7

111. Jahrgang
Juli 2016, S. 460-472
ISSN 0005-9900
A 1740

Sonderdruck

Beton- und Stahlbetonbau

Neugestaltung des denkmalgeschützten Senckenbergareals in Frankfurt/Main

Nutzung vorhandener Qualitäten und Wertschätzung historischer Konstruktionen

Matthias Pfeifer
Ralf Wittenbecher
Günter Burger
Peter Beck

Ernst & Sohn
A Wiley Brand

ProfessorPfeiferundPartner PartGmbB
Ingenieurbüro für Tragwerksplanung

DOI: 10.1002/best.201600018

Matthias Pfeifer, Ralf Wittenbecher, Günter Burger, Peter Beck

Neugestaltung des denkmalgeschützten Senckenbergareals in Frankfurt/Main

Nutzung vorhandener Qualitäten und Wertschätzung historischer Konstruktionen

Die Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung, Träger des renommierten Museums und des nicht minder bedeutenden wissenschaftlichen Instituts, erweitert bis Ende 2018 in Frankfurt/Main ihre Räumlichkeiten für Forschung, Sammlung, Veranstaltungen und Verwaltung um ca. 19000 m^2. Dazu wurden drei historische Gebäude des „Senckenbergareals" nach den Plänen des Büros Kulka-Architekten, Köln und Dresden, zusammengeführt und so umgestaltet, dass das Ergebnis den Anforderungen eines modernen Forschungsbetriebs sowie zugleich den Belangen des Denkmalschutzes Rechnung trägt.
Das für diese herausfordernde Baumaßnahme mit der Tragwerksplanung beauftragte Ingenieurbüro ProfessorPfeiferundPartner untersuchte zuerst die vor mehr als 100 Jahren errichteten, mehrgeschossigen Bestandsgebäude umfassend auf Standsicherheit und Durchführbarkeit der geplanten Umgestaltungen und Nutzungsänderungen. Die weiteren Planungsleistungen umfassten neben der „behutsamen" Ertüchtigung einzelner Geschossdecken unterschiedlicher Bauart und dem Einbau neuer Decken zur Herstellung der erforderlichen Barrierefreiheit sowie Schaffung zusätzlicher Flächen gemäß den Nutzervorgaben die Ergänzung eines Gebäudeteils mit Überbauung sowie die Zusammenführung der Gebäude durch repräsentative Verbindungsbrücken. Zusätzlich waren komplexe Bauzustände und Abbruchmaßnahmen und die Ertüchtigungen höher belasteter Fundamente durch HD-Injektionen zu beplanen.

Redesign of the listed Senckenbergareal in Frankfurt/Main
Using existing qualities and appreciation of historic structures
The Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung (Association for Research in Nature), sponsor of the renowned Senckenberg Museum and equally prestigious Senckenberg Institute, aims to increase its facilities for research, collection and administration in Frankfurt/Main by 19,000m^2 by the end of 2018. Kulka-Architekten, based in Cologne and Dresden, reconfigured and merged three historic buildings to satisfy the demands of a modern research facility while taking account of the historic building preservation act.
The international consultancy ProfessorPfeiferundPartner, which was entrusted with the structural engineering of this challenging project, in a first step assessed the as-built situation of the more than 100 years' old multi-storey buildings for structural stability with a view to establish the feasibility of the envisaged redevelopment.
Further design steps included the "cautious" strengthening of floor slabs of various type, the addition of an annex as well as the joining of buildings by means of imposing connection-bridges. Complex demolition and construction sequence analysis, strengthening of foundations by means of HDI injection as well as the restoration of parts of the sandstone façade elements had to be considered as well.

1 Bauwerksgeschichte

Das in den Jahren 1904 bis 1916 geplante und gebaute Senckenberg-Gebäudeensemble in Frankfurt am Main – Bockenheim ist das Werk der Architekten Ludwig Neher und Franz von Hoven, beides seinerseits königliche Bauräte der Stadt Frankfurt. Jeweils im Stil des Neobarock errichtet, sind die Gebäude der Alten Physik mit der markanten Sternwarte, des Jügelbaus (ehemaliges Hauptgebäude der Johann-Wolfgang von Goethe-Universität) und des Museumshauptgebäudes zwischen diesen beiden Gebäuden durch Arkadengänge miteinander verbunden (Bild 1).

Von den weitreichenden Zerstörungen der Stadt Frankfurt im 2. Weltkrieg blieben auch die Senckenberg-Gebäude nicht verschont – der Zerstörungsgrad der Gebäude nach zahlreichen Bombentreffern betrug ca. 50 % bis 75 % [2]. Die Dächer und oberen Geschosse wurden nahezu vollständig zerstört und wurden in den 1950er Jahren in schlichterer Form wieder aufgebaut. In den 1960er bis 1990er Jahren erfolgten kleinere Umbauten im Innenbereich der Gebäude. Die einzelnen Bauphasen wurden in Grundrissen durch einen Fachplaner für Restaurierung dokumentiert (Bild 2).

Die dargestellte Bauchronologie visualisiert u. a. die einzelnen Bau- und Umbauphasen mit entsprechenden Farben (z. B. blau/grün: historischer Bestand von 1904–1916; rot: Wiederaufbauphase 1950er Jahre). Wie ebenfalls in Bild 2 dargestellt, gliedert sich der Jügelbau wiederum in drei Bauabschnitte, die bis 1907 gebaute ehemalige Senckenbergische Bibliothek (Bauteil A), das im gleichen Zug gebaute ehemalige Auditoriengebäude in der Mitte (Bauteil B) und die 1914 bis 1916 realisierte Erweiterung des Jügelbaus (Bauteil C).

Der repräsentative Gebäudekomplex wurde als unterkellerter, fünf- bzw. sechsgeschossiger Mauerwerksbau mit großzügigem Eingangsbereich und einer stuckverzierten Aula errichtet (Bild 3). Der heterogene Baubestand zeigte sich besonders deutlich bei den vielfach unterschiedlichen Bestandsdeckentypen, auf die im folgenden Abschnitt im Einzelnen eingegangen wird. Unterschiedliche Deckenniveaus mit vielen kleinen Zwischentreppen machten es zur weitgehenden Herstellung der Barriere-

Bild 1 Senckenberg-Gebäudeensemble, Ostansicht mit Haupteingang des Naturkundemuseums (Darstellung mit Neubaumaßnahmen im Entwurf: Peter Kulka Architektur [1])
Senckenberg – East elevation with main entrance to museum of natural history (view including concept of redevelopment; Peter Kulka Architekture [1])

Bild 2 Jügelbau mit Darstellung der Bauchronologie (Grundriss 3. OG; ProDenkmal GmbH, Bamberg [2]), ergänzt um die Bezeichnung der Gebäudeteile
Jügelbau with construction chronology (layout of 4th floor; ProDenkmal GmbH, Bamberg [2]), names of building parts added

freiheit unumgänglich, im Zuge der aktuellen Baumaßnahme einzelne Deckenbereiche komplett zurückzubauen, sie wurden meist durch neue filigrane Decken ersetzt, aus Gewichtsgründen teils in Leichtbeton- oder Stahlbetonverbundbauweise.

Das Museumshauptgebäude, das weniger umfangreich umgebaut wird, und das Gebäude der Alten Physik wurden wie die Gebäudeteile A und B des Jügelbaus in den Jahren 1904–1906 erbaut. Letzteres Gebäude ist ebenfalls ein mehrgeschossiger Mauerwerksbau mit repräsentativem Eingangsbereich auf der Südseite. Es wurde im Krieg leider auch stark zerstört, die oberen zwei Geschosse nahezu vollständig (Bild 4). In den 1950er Jahren wieder aufgebaut und in den 1970er Jahren in kleineren Teilbereichen umgebaut, wies es vor Beginn der aktuellen Baumaßnahme einen ähnlich heterogenen Baubestand auf wie der Jügelbau.

2 Von Bestandsdecken und reduzierten Ertüchtigungsmaßnahmen

Bei der Tragwerksplanung, insbesondere im denkmalgeschützten Bestand, ist der behutsame, erhaltende Umgang mit der bestehenden Bausubstanz ein wichtiges Leitziel.

Dies auch schon deshalb, weil der Bestand nicht nur dann, wenn er denkmalgeschützt ist, eine wichtige Ressource an Material und Raum darstellt, die in der Diskussion um Nachhaltigkeit eine immer wichtigere Rolle spielt. Durch deren Erhalt und den Verzicht auf Abriss und Neubau der gehörigen Mengen an Baumaterial wird Energie für die Herstellung der neuen Materialien eingespart und der damit verbundene Ausstoß z. B. an CO_2 verhindert. Durch das Studium von Bestandsunterlagen und der von den Verfassern in einem frühen Planungs-

Bild 3 Jügelbau, historische Nord-Ost-Ansicht, links der repräsentative Eingangsbereich des Auditoriengebäudes mit seinen Sandsteinsäulen und der Stuckdecke mit der runden Deckenöffnung, die in den 1950er Jahren geschlossen wurde (Quelle: Archiv des Instituts für Stadtgeschichte, Frankfurt, S7A1998_12854 Panoramaaufnahme Universität, ca. 1914 (Bild oben); Foto aus der Festschrift zur Eröffnung 1906, aus [2] S7A1998_12855 Jügelbau innen, 1906 (Bild links))
Jügelbau, historic North-East elevation, representative entrance area of the auditorium with sandstone columns and stuccoed ceiling including round slab opening, which was closed in the 1950s (Source: archives of the institute for town history, Frankfurt (left); photograph from Festschrift for opening in 1906, from [2])

Bild 4 Historische Südansicht des ehemaligen Physikalischen Vereins, die Alte Physik, rechts: Massive Schäden nach den Bombentreffern 1944 (Quelle: Universitätsarchiv Frankfurt, Ordner 4 (links); Archiv des Instituts für Stadtgeschichte (rechts), aus [2], S7B1998_3320, Alte Physik, 1944/ Heinrich Stürz)
Historic South elevation of the previous Physics Association, the "Alte Physik", right: significant destruction due to the bombings of 1944 (Source: archives of the University of Frankfurt, file 4 (left); archives of the institute for town history (right), from [2])

stadium veranlassten Tragwerksuntersuchungen konnten Deckenbereiche lokalisiert werden, die aufgrund zu geringer Tragfähigkeiten für die neuen Nutz- und Ausbaulasten nicht geeignet waren. Mithilfe der erstellten Belastungspläne konnte die Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung entscheiden, inwieweit das Raumprogramm mit unterschiedlich hohen aufzunehmenden Nutzlasten von 2,0 KN/m^2 bis zu 7,5 KN/m^2 für Sammlungsräume und Bibliotheken an die Belastbarkeit der Deckenkonstruktionen angepasst werden sollte. Durch weitgehende Anpassung der Sammlungsräume (von leichten Trockensammlungen z. B. für Insekten und Schmetterlinge bis zu schweren Alkohol- und Gesteinssammlungen) an die Deckenbelastbarkeit des Bestands konnten Kosten durch Minimierung statischer Ertüchtigungsmaßnahmen eingespart werden.

2.1 Übersicht über die Bestandsdeckentypen

Nach Auswertung der zum Teil noch vorhandenen Plan- und Statikunterlagen aus der Bauzeit sowie der Tragwerksuntersuchungen wurde offensichtlich, dass in jedem Gebäude bzw. in jedem Gebäudeteil verschiedene Deckensysteme ausgeführt wurden, Tab. 1, Bild 5.

So wurden im Jügelbau, Bauteil A, ursprünglich Betonkappendecken eingebaut. Im Bauteil B wurden in der Erstehungszeit sog. Eggertdecken geplant und gebaut und im Bauteil C wurden Stahlbetonrippendecken ausgeführt.

In der Alten Physik wurden zur Errichtungszeit ebenfalls Betonkappendecken ausgeführt.

Nach der Kriegszerstörung 1944/45 wurden in der Wiederaufbauphase der 1950er Jahre in den oberen Geschossen des Jügelbaus und der Alten Physik Hohlkörperdecken und Stahlbetondecken hergestellt. In der Alten Physik und im Bauteil A kamen außerdem Rippendecken mit großen Spannweiten von ca. 10 m zum Einsatz.

Die ursprünglich ausgeführte große runde Deckenöffnung im Eingangsfoyer des Jügelbaus (Bild 3) wurde in den 1950er Jahren durch eine Stahlbetondecke geschlossen, die auf zwei damals zusätzlich eingebaute Stahlträger abgelastet wurde. Im Zuge der aktuellen Umbaumaßnahme wurde die Deckenöffnung wieder hergestellt und die Stahlträger wurden entfernt.

Tab. 1 Übersicht über die Bestandsdeckentypen, geordnet nach dem Zeitpunkt der Ausführung
Overview of existing slabs – sorted according to time of construction

Übersicht der Deckentypen					
Zeitpunkt der Ausführung	**Veranlassung**	**Alte Physik**	**Jügelbau**		
			BT A	BT B	BT C
1904–1906	Errichtung des Gebäudes/des Gebäudeteils	Betonkappendecken	Betonkappendecken	Eggertdecken, Stahlbetondecken im Bereich der Foyeröffnung über dem EG	
1914–1916	Errichtung des Gebäudeteils				In Schilfrohr/Holz geschalte Rippendecken
1950er Jahre	Wiederaufbau nach dem 2. Weltkrieg	Hohlkörperdecken, Stahlbetonrippendecke	Hohlkörperdecken, Stahlbetonrippendecke	Hohlkörperdecken	Hohlkörperdecken
1970er Jahre	Umbaumaßnahmen		Stahlbetondecken		

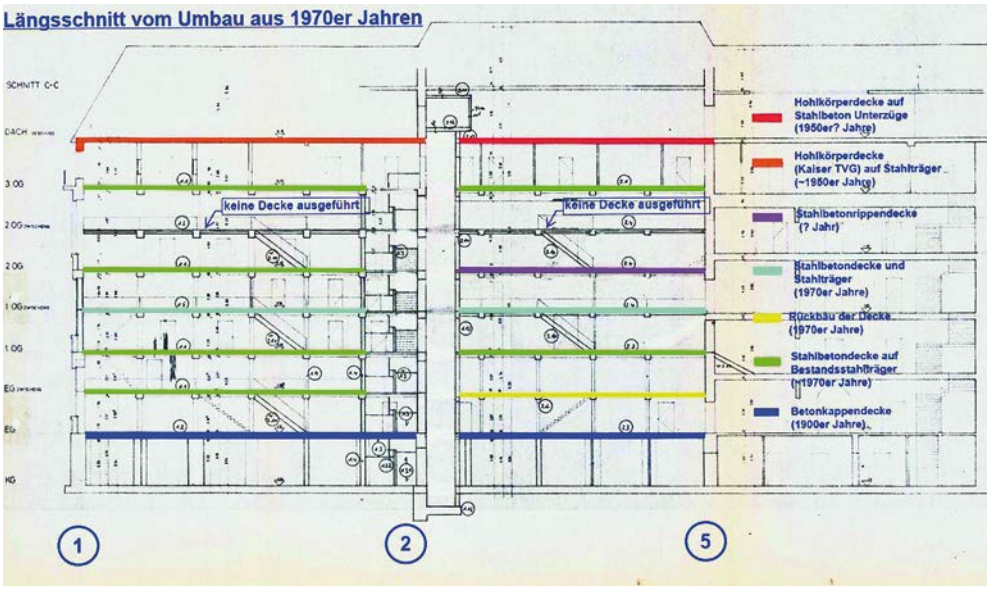

Bild 5 Auswertung der Bauwerksbegehungen, -untersuchungen und Bestandsplanunterlagen – Plan aus den 1970er Jahren [3], farbliche Kennzeichnung der unterschiedlichen Deckenarten durch die Verfasser
Analysis of site visits and existing documentation – drawing from the 1970s [3], coloured distinction of various slab types by the designer

Bei Umbaumaßnahmen in den 1970er Jahren wurden im Bauteil A die Betonausfachungen zwischen den Stahlträgern ausgebaut und über den Trägern (Abstand der Stahlträger ca. 1,0 m) neue Stahlbetonplatten mit einer Stärke von ca. d = 7,5 cm sowie ein neues Treppenhaus eingebaut. Da insbesondere die Ausführung der historischen Eggertdecken und der Stahlbetonrippendecken aus den Kinderjahren des Stahlbetonbaus auf einer enormen Ingenieurleistung und handwerklichem Geschick beruht, werden diese im Folgenden näher beschrieben.

2.2 Eggertdecken

Dieser Deckentyp wurde überwiegend in zwei Varianten unterschiedlicher Deckenspannweite und -stärke ausgeführt. Variante 1 wurde bei einer Spannweite von bis zu 5,10 m in 17 cm Rohdeckenstärke hergestellt (10 cm dicke Schwemmsteine und 7 cm Aufbeton, Bild 6). Der 4 cm große Abstand zwischen den Schwemmsteinen wurde mit Beton verfüllt, der einen Vierkantstabstahl 12/12 mm ummantelt. Variante 2 wurde bei einer kleineren Spannweite von bis zu 3,30 m in 11 cm Rohdeckenstärke (7 cm starke Schwemmsteine und 4 cm Aufbeton) mit Vierkantstabstahl 10/10 mm ausgebildet (Bild 7).

Über dem Haupteingang des Jügelbaus wurde eine dritte Variante dieses Deckentyps mit einer größeren Spannweite von 7,0 m in 22 cm Rohdeckenstärke realisiert (10 cm dicke Schwemmsteine, 12 cm Aufbeton, Vierkantstabstahl 14/14 mm).

Die Decke trägt sich über Stahlträger ab, die zum Teil in die Decke miteingebaut sind. Die Oberkante der Träger entspricht in etwa jener der Schwemmsteine bzw. der Unterkante des Aufbetons. Unterseitig sind die Decken mit Beton an die Stahlträger angevoutet. Die Bewehrung ist in den Stegen vor dem Auflager schräg nach oben aufgebogen und im Aufbeton über den Stahlträger hinweggeführt. Die Verankerung der Bewehrung erfolgt jeweils im benachbarten Deckenfeld im Aufbeton durch an den Bewehrungsenden horizontal gebogene Haken.

Die Decken weisen in statischer Hinsicht eine Durchlaufwirkung auf und wurden entsprechend bemessen. Im Grunde handelt es sich durch die Formgebung um jeweils beidseits der Stahlträger angeordnete Kragarme mit schräger Aufhängebewehrung und Einhängeträgern mit unterer Bewehrung. Das System erinnert stark an die Systematik von Gerber-Trägern.

Das für die Ermittlung der untere Bewehrung maßgebende Feldmoment wurde in der Bestandsstatik (Bild 6) mit

$$M = q \cdot l^2/12$$

errechnet. Neben dem Eigengewicht für die Deckenkonstruktion wurde eine Nutzlast von 4,0 kN/m² (inkl. Ausbaulast) berücksichtigt.

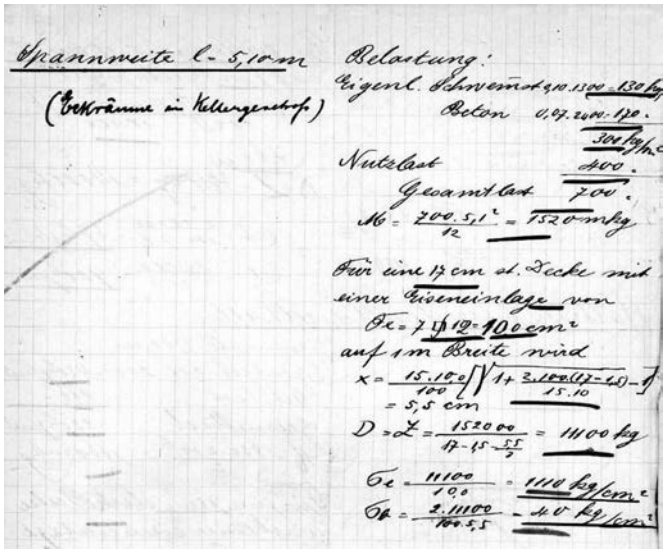

Bild 6 Auszug aus der geprüften Bestandsstatik von 1904 [3] – Bemessung der Eggertdecke, Deckentyp 1 (Spannweite 5,10 m)
Extract from approved design calculations of 1904 [3] – design of Eggertdecke, slab type 1 (span of 5.10 m)

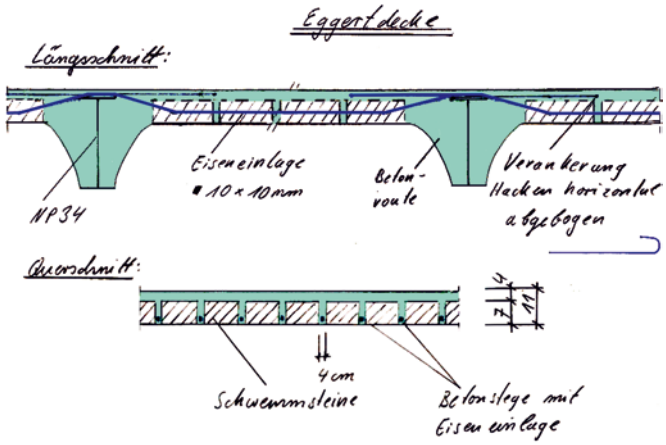

Bild 7 Eggertdecke, Deckentyp 2 (Spannweite 3,30 m), Skizze der Verfasser
Eggertdecke, slab type 2 (span of 3.30 m), sketch of designer

Da sowohl der vorgefundene Deckenbeton als auch die Schwemmsteine sehr „weich“ waren, musste der Rückbau des Bodenbelags und des Putzes sehr behutsam händisch mit leichtem Stemmhammer erfolgen. Dennoch ließen sich kleinere Schäden durch die Umbaumaßnahme nicht vermeiden, die durch die die Betoninstandsetzungsarbeiten an den Rippendecken ausführende Fachfirma nach Anweisungen der Verfasser instand gesetzt wurden.

2.3 Historische Rippendecken und „behutsame“ Betoninstandsetzung

Die 100 Jahre alten Rippendecken der Erweiterung des Jügelbaus (Bauteil C) sind ein Zeugnis zur Entstehungsgeschichte des Stahlbetonbaus (damals Eisenbetonbaus) in Deutschland. Die Weiterentwicklung der Bauweise ist hier geschossweise von unten nach oben gut nachvollziehbar. Im Untergeschoss und im Erdgeschoss wurde die

Schalung der Rippendecken noch mit Schilfrohrmatten hergestellt. Im 1. Obergeschoss, im Zwischengeschoss und im 2. Obergeschoss wurde bereits eine Holzschalung verwendet. Die Qualität der Ausführung, insbesondere auch die Betonqualität, ist in den oberen Geschossen fast durchgehend besser als in den unteren. Das am Beton haftende Schilf in den unteren Geschossen musste zuerst händisch aufwendig entfernt werden, um den Beton in seinen Eigenschaften und Dimensionen (Rippen) begutachten zu können.

Es zeigte sich nach Inaugenscheinnahme aller zugänglichen Deckenbereiche zusammengefasst das folgende Schadensbild:

- Beton unterschiedlicher Druckfestigkeit mit Kiesnestern und schlechter (händischer) Verdichtung, sehr unebene Betonoberfläche und zahlreiche Fremdkörper (Steine, Hölzer, Dachpappe, usw.) in den strohgeschalten Rippendecken, vgl. Bild 8
- Zahlreiche Risse in bereichsweise nur ca. 4 cm dicken Deckenspiegeln, die sich zum Teil in die Rippen fortsetzten
- Einzelne, vor dem Wandauflager zerstörte Rippen mit durchtrennter Bewehrung, meist aufgrund nachträglichen Einbaus von Heizungsrohren, Bild 10
- Unzureichende Betondeckung und teils freiliegende Bewehrung, abplatzender Beton unter der tragenden Längsbewehrung nach Bearbeitung mit dem Hammer (Hauptgründe für diese Abplatzungen waren die in den schmalen Rippen als Bündel vorhandene untere Bewehrung und die im 1.OG und im ZG mittig an der Rippenunterseite eingebauten Dachlatten)
- Relativ zum Betonalter sehr geringe Betonstahlkorrosion (keine statisch relevante Abrostung)

Die Ergebnisse der visuellen Bestandsaufnahme wurden in Form einer Schadenskartierung mit zugehöriger Fotodokumentation festgehalten, Bild 9.

Im nächsten Schritt wurden ergänzende Bauteiluntersuchungen (Druck- und Haftzugfestigkeiten, Betondeckungen) durchgeführt, deren Ergebnisse im Anschluss ausgewertet und in die Planung übernommen wurden.

Um die festgestellten Schäden mit möglichst geringem Aufwand zu sanieren und trotzdem die erforderliche Deckentragfähigkeit zu erreichen, wurde von ProfessorPfeiferundPartner als geeignete Therapiemöglichkeit eine „behutsame“, partielle Betoninstandsetzung der Rippendecken vorgeschlagen. Vor Erstellen des Leistungsverzeichnisses für die Instandsetzungsmaßnahmen wurden Probeflächen zur Reprofilierung der Rippen und zur Rissesanierung ausgeführt.

Die Instandsetzungsarbeiten umfassten zunächst das Abschlagen losen Betons und das Entfernen von Fremdkörpern. Nach den daran anschließenden Strahlarbeiten (Partikelstrahlung mit an Probeflächen ermitteltem Strahldruck von ca. 600 bar) erfolgte eine erneute Begutachtung sämtlicher Deckenflächen, da erst jetzt der Schädigungsgrad, insbesondere der strohgeschalten Deckenbereiche und der Rippen mit den eingebauten Dachlatten, und damit der Umfang der erforderlichen Instandsetzungsarbeiten realistisch ermittelt werden konnte. Daraufhin wurden die Betoninstandsetzungsarbeiten mit der ausführenden Firma im Detail vor Ort abgestimmt und die Schnittstellen mit den durch die Rohbaufirma gleichzeitig durchzuführenden Ertüchtigungsmaßnahmen (z. B. Einbau von Stahlträgern und Schließen größerer Deckenlöcher) geklärt.

Die geplante partielle Betoninstandsetzung verzichtet auf eine flächige Reprofilierung mit Spritzbeton und auch auf Betonergänzung unterhalb der Hauptbewehrung der Rippen. Diese ist statisch nicht erforderlich, der statische Nachweis wurde mithilfe des sogenannten Druckbogen-Zugband-Modells geführt, Bild 11.

Bild 8 Schilfrohrgeschalte Stahlbetonrippendecke von 1915 über EG mit Fremdkörpern nach weitgehender Entfernung des Schilfs (links), holzgeschalte Rippendecke über 1.OG mit eingebauten Dachlatten (rechts)
Reinforced concrete rib slab above ground floor with reed shuttering from 1915, with foreign substances, after removal of the reed (left), rib slab above first floor with timber shuttering and battens (right)

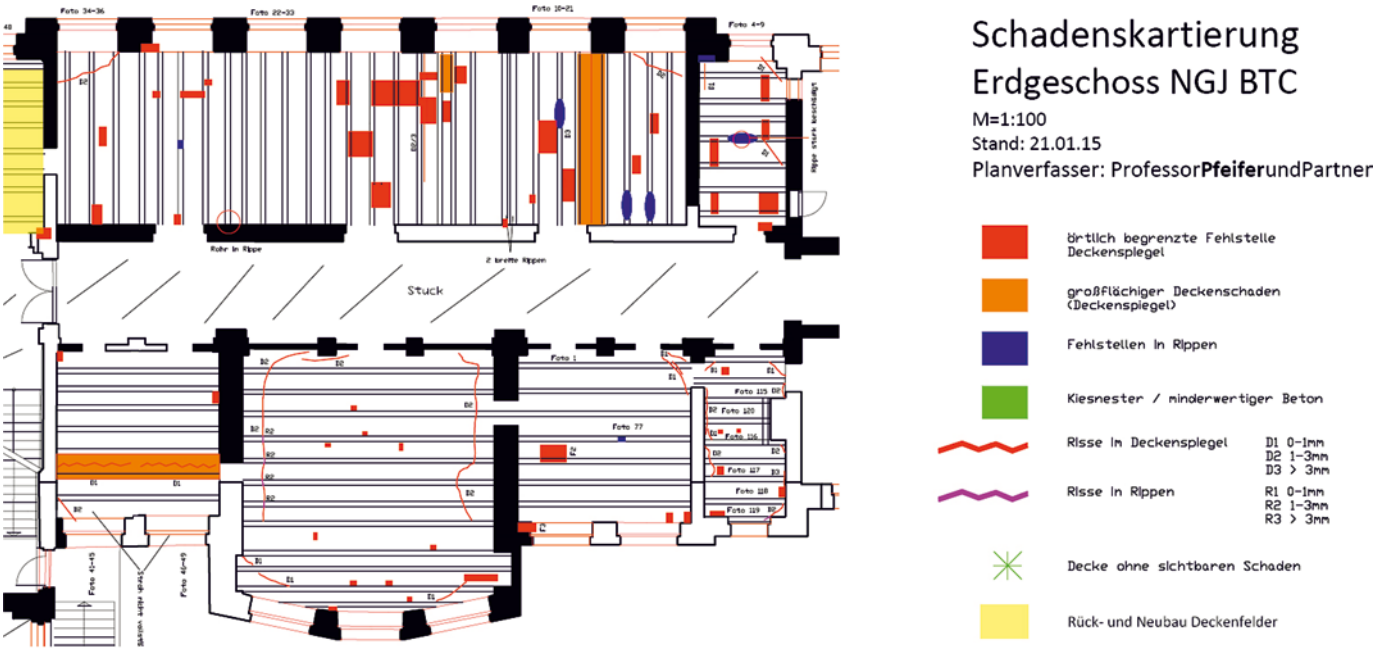

Bild 9 Planausschnitt Schadenskartierung, Decke über EG mit Legende der verschiedenen Schadensarten
Extract of damage map with legend of damage types, Jügelbau part C, slab above ground floor

Bild 10 Zerstörtes Rippenauflager durch nachträglich hergestellten Durchbruch für in den 1950er Jahren ergänzte Haustechnik
Damaged rib support due to a slab opening for the MEP installation in the 1950s

Nur partiell wurde Spezialmörtel (PCC bzw. SPCC) zur Reprofilierung eingesetzt. Zuvor wurde in Anlehnung an die Instandsetzungsrichtlinie der Betonstahl auf einen Reinheitsgrad von Sa 2 entrostet und die erforderliche Haftbrücke mit gleichzeitigem Korrosionsschutz aufgebracht. Auf den nach Richtlinie geforderten Reinheitsgrad von Sa 2 $^1/_2$ wurde bewusst verzichtet, um zusätzliche Betonschäden durch zu hohen Strahldruck zu vermeiden. Da sich die zu sanierenden Stahlbetondecken im Innenbereich (Expositionsklasse XC1) befanden, ist diese mit dem fremdüberwachenden Sachkundigen abgestimmte Vorgehensweise gerechtfertigt.

Die Instandsetzung der Rissschäden wurde in Abhängigkeit von den gemessenen Rissbreiten festgelegt. Des Weiteren wurde zwischen statisch relevanten Rissen (z. B. Risse im Deckenspiegel neben der Rippe in Rippenrichtung sowie breitere Risse in Rippen) und statisch unkritischen Rissen (z. B. Risse im Deckenspiegel quer zu den

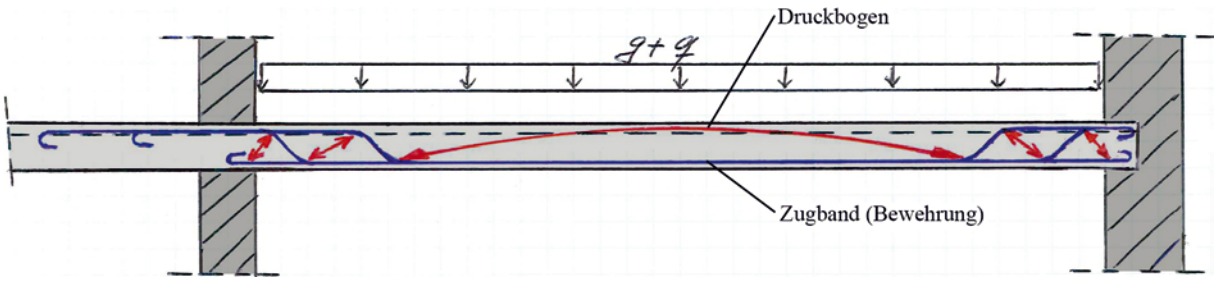

Bild 11 Druckbogen-Zugband-Modell zum rechnerischen Nachweis der Rippen ohne Bügelbewehrung
Strut and tie model to proof ribs without shear reinforcement

Bild 12 Risssanierung von unten und partielle Reprofilierung der Rippen nach Entfernen der Dachlatten (links); Risssanierung von oben durch Tränkung mit Epoxidharz (rechts)
Crack remediation from bottom and partial re-profiling of ribs after removal of battens (left); crack remediation from top by means of filling with epoxy (right)

Rippen) unterschieden. Alle Risse mit Rissweiten > 1 mm sowie statisch relevante Rissschäden wurden mit Epoxidharz kraftschlüssig geschlossen, Bild 12. Da wegen der Haftung des nachfolgenden Brandschutzputzes das Epoxidharz an der Deckenunterseite nicht austreten durfte, erwies sich folgende Vorgehensweise als praktikabel:

- Aufstrahlen der Risse an der Deckenunterseite
- Schließen der Risse an der Deckenunterseite mit PCC- oder SPCC-Mörtel
- Aufweiten der Risse auf der Deckenoberseite (mit Winkelschleifer)
- Absaugung, Risstränkung mit Epoxidharz und Abstreuung mit Quarzsand

Die regelmäßige Kontrolle der Arbeiten erfolgte im Rahmen der von den Autoren durchgeführten Fachbauleitung zur Betoninstandsetzung und wurde in Protokollen dokumentiert.

2.4 Dübelauszugsversuche

Die Traglasten für neue Dübelbefestigungen an den Bestanddecken, insbesondere für die neuen Haustechnik- und Installationsleitungen, konnten aufgrund der ermittelten geringen Betongüte sowie der zu geringen Bauteildicke des Befestigungsgrunds nicht aus den Dübel-Zulassungen entnommen werden. Deshalb wurden Dübelauszugsversuche veranlasst und vor Ort ausgeführt, um die tatsächliche Tragfähigkeit der Dübel zu ermitteln. Eine Fachfirma wurde beauftragt, die Versuche auszuführen. Die Festlegung der Versuchsbereiche und die Auswertung der Ergebnisse erfolgte auftragsgemäß durch ProfessorPfeiferundPartner.

Es wurden Schraubanker, Schraubdübel und Injektionsanker getestet, um zu prüfen, ob die erforderlichen Anhängelasten von 0,4 kN bis 1,0 kN pro Befestigungspunkt erreicht werden können. Insgesamt wurden ca. 160 Dübelauszugsversuche an den unterschiedlichen Bestandsdecken beider Gebäude durchgeführt. Die Auswertung der Dübelauszugsversuche erfolgte in Anlehnung an die „Leitlinie für die europäische technische Zulassung für Metall-Injektionsdübel zur Verankerung im Mauerwerk“ (ETAG 029, Anhang B). Die Prüflast pro Dübel betrug 5,0 kN, die jedoch nicht in allen Decken ausnahmslos erreicht werden konnten. Die zulässigen charakteristischen Anhängelasten wurden zu 0,6 kN an Eggertdecken (Bimsstein) und 1,2 kN an den Betonkappendecken bei Verwendung von Injektionsankern ermittelt. Bei Verwendung von Schraubankern beträgt die maximal zulässige Anhängelast 1,0 kN an den Betonkappendecken.

3 Die Neubauten

3.1 Der Bügelbau über dem Jügelbau

Der Neubau am Bauteil B des Jügelbaus wurde als unterkellerte, sechsgeschossige Stahlbetonkonstruktion an der Südseite geplant. Das Bauwerk wurde vom UG bis zum 3. OG jeweils seitlich vom Bestandsgebäude in Stahlbeton errichtet, im 4. und 5. OG wurde das Bestandgebäude zweigeschossig überbaut, ohne den darunterliegenden Bestand zu belasten. Das neue Bauwerk (Bügelbau) wird vom Bestandsgebäude durch horizontale und vertikale Bauwerksfugen getrennt und separat gegründet. Um Setzungen zu minimieren, wurde der Neubau in Abstimmung mit dem Bodengutachter über zwei 1,10 m starke Bodenplatten auf jeweils zwölf Bohrpfählen gegründet. Die Bohrpfähle aus Stahlbeton weisen sämtlich einen Durchmesser von d = 90 cm und eine Länge von l = 17,0 m auf. Sie konnten aufgrund der Größe des Pfahlbohrgeräts sowie der auskragenden Sandsteingesimse nicht in unmittelbarer Nähe des Gebäudes eingebracht werden. Es wurde daher ein Randabstand senkrecht zum Gebäude von ca. 1,0 m und im Eckbereich von 1,5 m eingehalten. Die Außenwand des tiefer liegenden Unterge-

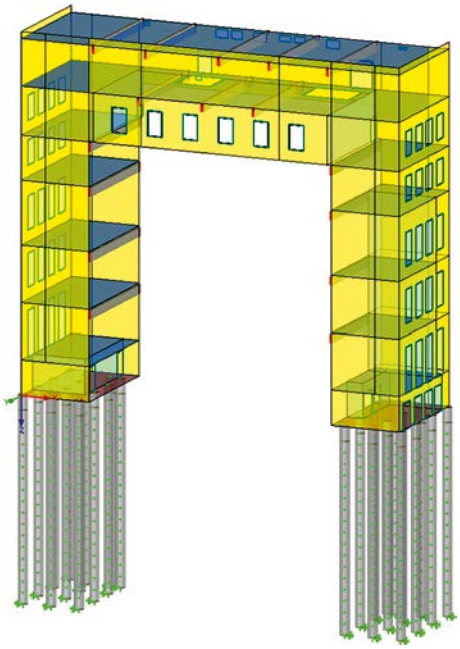

Bild 13 FE-Modell mit Bohrpfählen und Baustelle des Bügelbaus, hier bis in das 2. OG errichtet
FE model with piles and site photograph of Bügelbau, here erected until second floor

schosses im Bestand wurde für die Aufnahme des Erddrucks resultierend aus dem schweren Gewicht des Bohrpfahlgeräts im Bauzustand horizontal abgestützt. Das Gebäude wurde dreidimensional als FE-Modell im Programm RFEM abgebildet und bemessen. So konnten u. a. die Bauwerksverformungen und die Bohrpfahlkräfte exakt ermittelt werden, Bild 13.

Um Barrierefreiheit zu erlangen, wurde der Abbruch der oberen drei Geschossdecken über dem imposanten Haupttreppenhaus und deren Ersatz durch neue Verbunddecken in angepasster Höhenlage geplant (Achse D–F in Bild 14). Durch den Rückbau der Decken war die Gebäudeaussteifung im Bauzustand nicht mehr gegeben. Für den Bauablauf wurde daher geplant, zuerst den Bügelbau zu errichten (Achse F–G), an den im Anschluss der Bestand horizontal fixiert und horizontal gehalten werden konnte. In Bild 14 ist die zeitliche Reihenfolge der Abbruch- und Neubaumaßnahmen dargestellt.

3.2 Die beiden Verbindungsbrücken zwischen den Bestandsgebäuden

Ein wichtiger Bestandteil der Baumaßnahme in architektonischer und funktionaler Hinsicht ist der Neubau zweier Verbindungsbrücken zur Erschließung des Museumshauptgebäudes im 1. Obergeschoss vom Jügelbau auf der Nordseite und von der Alten Physik auf der Südseite her. Die Laufebene ist eine Verbunddecke (Stahlbetondecke auf Stahlträgern mit Kopfbolzendübeln als Verbundmittel), die innerhalb der Fassade über schlanke Stahlzugglieder an die beiden Hauptträger HEM 1000 im Deckenbereich hochgehängt wird (Bild 15). Die Fassade besteht aus über 10 m^2 großen Glasscheiben, die eine vertikale Verformungsbegrenzung der Stahlkonstruktion (Durchbiegung $f_g = l/750$ unter Eigengewicht, $f_q = l/1500$ unter Nutzlast, ergibt $f_{gesamt} = l/500$ unter Gesamtlast) erforderten.

Die vertikale Lastabtragung der Brücken erfolgt über je zwei vor den Bestandsgebäuden angeordnete Rundstahlstützen, die zur Minimierung von Setzungen ebenfalls auf Bohrpfählen gegründet sind. In die Bestandsgebäude müssen somit nur die horizontalen Aussteifungslasten eingeleitet werden, dies wurde durch in Auflagertaschen einbetonierte Stahlkonsolen sichergestellt.

Der Festpunkt für die kleineren horizontalen Stabilisierungslasten in Brückenlängsrichtung wurde jeweils am Hauptgebäude mit durch das Mauerwerk geankerten Gewindestangen realisiert. Die Brückenzugänge zum Foyer im Jügelbau wie auch zum Hörsaal in der Alten Physik sollten in kompletter Brückenbreite von 10 m gebaut werden. Im Bauzustand mussten daher jeweils Wand- und Deckenlasten durch Hilfskonstruktionen temporär abgefangen werden (Bild 16). Bei der Herstellung des Brückenzugangs vom Hauptgebäude in den Jügelbau wurde ein hochbelasteter Mauerwerkspfeiler in der Außenwand des Bauteils B ausgebaut und durch einen Stahlabfangträger auf zwei Stahlstützen ersetzt, Bild 17. Es werden die Lasten aus den drei darüberliegenden Geschossen abgefangen. Im Bauzustand kam erschwerend hinzu, dass in der Höhenlage der geplanten Stahlabfangträger ein denkmalgeschütztes Natursteingebilde aus großformatigen Sandsteinen, die sogenannte „Eule“, ausgebaut werden musste, (Bild 18).

Weiterhin wurde auch die Decke über dem 1. OG (schräg verlaufende Bestandsdecke des ehemaligen Hörsaals im 2. OG) ausgebaut und durch eine Stahlbetonverbunddecke ersetzt. Die Stahlträger der Verbunddecke, die in einer Höhenlage mit den Abfangträgern verlaufen, wur-

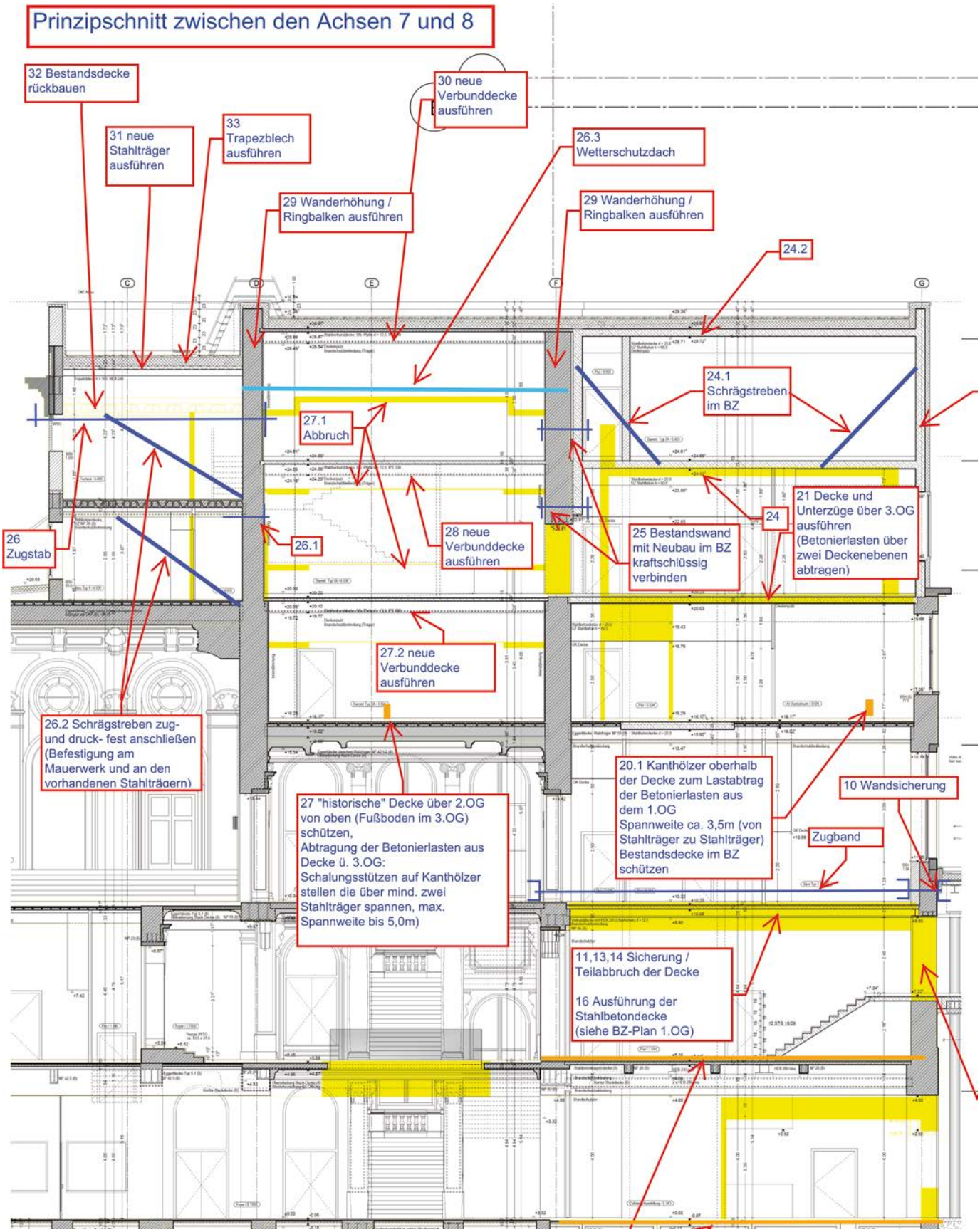

Bild 14 Ausschnitt aus einem Bauzustandsplan: Bauablaufplanung mit Beschreibung der Sicherungs-, Abbruch- und Neubaumaßnahmen in zwingend einzuhaltender zeitlicher Abfolge im Bereich des Bügelbaus

Extract of construction sequence drawing: description of mandatory sequencing of support-, dismantling- and new build works at Bügelbau

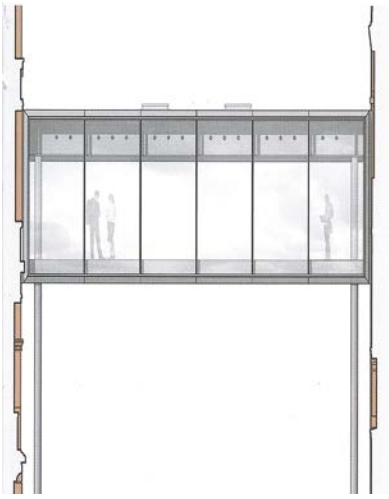

Bild 15 Verbindungsbrücke zwischen Hauptgebäude und der Alten Physik, im Bauzustand noch ohne Verbunddecke und Glasfassade (links); Entwurfszeichung Peter Kulka Architektur (rechts, [1])
Connecting bridge between main building and "Alten Physik" during construction without composite slab and glass facade (left); concept drawing Peter Kulka Architektur (right, [1])

Bild 16 Zugang zum Hörsaal in der Alten Physik mit Stahlabfangkonstruktion zur Unterfangung der vorhandenen Sandsteinpfeiler (links); Verbunddecke mit Fertigteilelementen und mit Stahlbetonstützen unterfangene Sandsteinpfeiler am Zugang zur Alten Physik (rechts)
Future entrance from connecting bridge to auditorium of "Alten Physik" including steel works to underpin the existing sandstone columns (left); composite slab with precast elements and underpinned sandstone columns with reinforced concrete at vicinity of "Alten Physik" (right)

den mit Schaubverbindungen an diese angeschlossen. Im Bauzustand mussten daher neben Maßnahmen für den vertikalen Lastabtrag auch Maßnahmen für die horizontale Stabilisierung umgesetzt werden. Die Ausführung des Brückenzugangs wurde im Zusammenhang mit dem Deckenaustausch über dem 1. OG geplant.

Die erforderlichen Abstützungsmaßnahmen wurden auch hier statisch nachgewiesen und in den Bauzustandsplänen, zusammen mit der Bauabfolge der einzelnen Arbeitsschritte, ausführlich dargestellt und beschrieben, Bild 17. Die sachgerechte Ausführung wurde im Rahmen der beauftragten Fachbauleitung überwacht.

4 Zusammenfassung

Das über 100 Jahre alte Senckenberg-Ensemble mit seinen drei Hauptgebäuden in Frankfurt/Main hat eine interessante „Evolution" hinter sich, die sich in mehreren Bauphasen zeigt [4]. Im Zuge von Erweiterungsmaßnahmen, Modernisierungen, Kriegszerstörungen und Umnutzungen haben sich die hier beschriebenen Gebäude des Jügelbaus und der Alten Physik auch von der Tragstruktur her immer wieder verändert, sodass bei der erfolgten umfangreichen Tragwerksbestandsaufnahme nicht selten Überraschungen auftauchten.

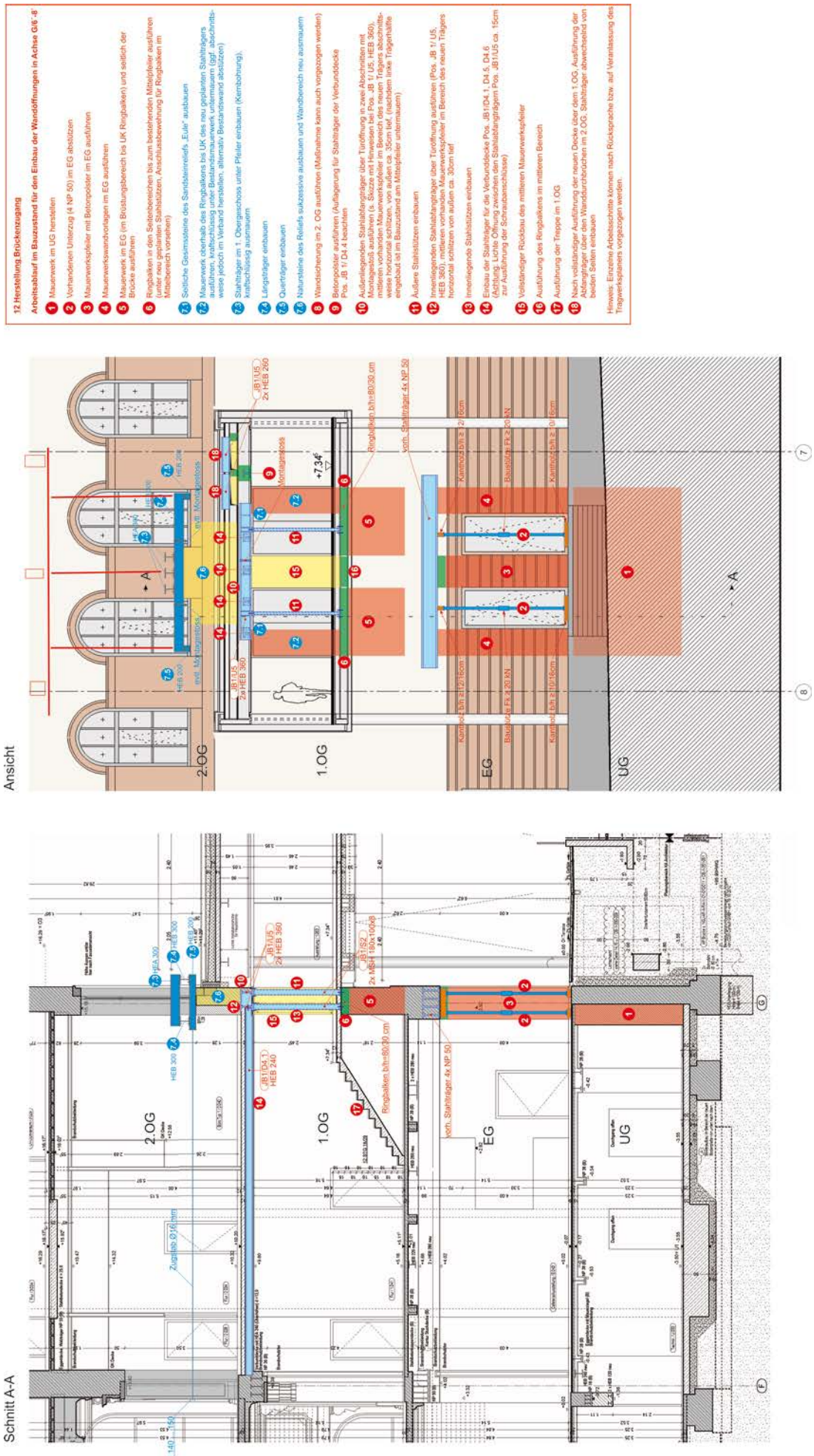

Bild 17 Auszug aus dem Bauzustandsplan für die Herstellung des Zugangs von der Verbindungsbrücke in den Jügelbau
Extract of construction sequence drawing for erection of the connecting bridge to Jügelbau

Bild 18 Ausbau der Eule, Jügelbau vor der Errichtung der Verbindungsbrücke
Demolition of "Eule" at Jügelbau prior to erection of connecting bridge

Der unter Denkmalschutz stehende Gebäudekomplex wurde im Vorfeld zudem durch einen Fachplaner für Restaurierung zur Unterscheidung der einzelnen Bauphasen aufgenommen und in einer Bauchronologie dokumentiert. Mit der Denkmalpflege wurden die erhaltungswürdigen Bauteile abgestimmt und der Umbau entsprechend angepasst.

Durch „behutsame" Instandsetzung der vorgefundenen Tragwerksschäden und minimierte Ertüchtigungsmaßnahmen, ergänzt durch neue (Zwischen-)Ebenen aus Stahl, Stahlbeton und Leichtbeton sowie bis zu zweigeschossige Aufstockungen zur Unterbringung des vorgegebenen Raumprogramms und zur Herstellung der erforderlichen Barrierefreiheit, wurden und werden insgesamt 19 000 m^2 historische Bausubstanz für die Nutzung durch Wissenschaft und Sammlungen hergerichtet.

Tab. 2 Bautafel/Am Bau Beteiligte
Main participants

Bauherr	Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung (SGN), Frankfurt/Main
Architekt	Peter Kulka Architektur, Köln und Dresden
Tragwerksplanung, Bestands- und Schadensanalysen, Planung der Betoninstandsetzung, Bauzustandsplanung, Fachbauleitung	ProfessorPfeiferundPartner PartGmbB, Ingenieurbüro für Tragwerksplanung, HNL Darmstadt
Prüfstatik	Professor Kind und Partner (PKP), Wiesbaden
Ausführende Rohbauunternehmen	P.A. Budau Bauunternehmen GmbH & Co.KG, Idar-Oberstein (Alte Physik) Adam Hörnig Baugesellschaft mbH & Co. KG, Aschaffenburg (Jügelbau) Breternitz GmbH, Ranis (Betoninstandsetzung)

Literatur

[1] Peter Kulka Architektur, Köln/Dresden: Entwurfs- und Ausführungszeichnungen 2012–2015.
[2] ProDenkmal, Bamberg: Erläuterungsbericht zur Bauwerkschronologie Jügelhaus und Alte Physik, 01/2012.
[3] Archive des Bauherrn, der Goethe-Universität, der Bauaufsicht und des Instituts für Stadtgeschichte, Frankfurt/Main: historische statische Berechnungen und statische Ausführungsunterlagen.
[4] Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung, Frankfurt: SENCKENBERG natur.forschung.museum/Das Senckenberg-Wissenschaftsmagazin, Band 144, Heft 5/6, 2014.

Autoren

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Matthias Pfeifer
Karlsruher Institut für Technologie
Institut Entwerfen und Bautechnik
Englerstr. 7
76131 Karlsruhe
ProfessorPfeiferundPartner PartGmbB
Ingenieurbüro für Tragwerksplanung
Heidelberger Straße 14
64283 Darmstadt
email@pfeifer-tragwerk.de

Dipl.-Ing. Ralf Wittenbecher
ProfessorPfeiferundPartner PartGmbB
Ingenieurbüro für Tragwerksplanung
Heidelberger Straße 14
64283 Darmstadt
wittenbecher@pfeifer-tragwerk.de

Dipl.-Ing. Günter Burger
ProfessorPfeiferundPartner PartGmbB
Ingenieurbüro für Tragwerksplanung
Heidelberger Straße 14
64283 Darmstadt
burger@pfeifer-tragwerk.de

Dipl.-Ing. Peter Beck
ProfessorPfeiferundPartner PartGmbB
Ingenieurbüro für Tragwerksplanung
Heidelberger Straße 14
64283 Darmstadt
beck@pfeifer-tragwerk.de

Professor**Pfeifer**undPartner PartGmbB
Ingenieurbüro für Tragwerksplanung

Hauptniederlassung:
Heidelberger Straße 14
64283 Darmstadt
Tel.: +49 (0)6151 3627-0
email@pfeifer-tragwerk.de