

2

42. Jahrgang  
Juni 2019, S. 98-110  
ISSN 0172-6145

Sonderdruck

# geo technik

ORGAN DER DEUTSCHEN GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK

Bodenmechanik  
Erd- und Grundbau  
Felsmechanik  
Ingenieurgeologie  
Geokunststoffe  
Umweltgeotechnik



## Gründungsertüchtigungen/ Neugründungen im historischen, sensitiven Gefüge des Pergamonmuseums auf der Museumsinsel in Berlin-Mitte

Josef A. Patron  
Ralph Keller

 Ernst & Sohn  
A Wiley Brand





**Wer Zukunft plant,  
muss sicher gründen.**

## Stabile Lösungen für Gründungen und Baugruben

Jedes Bauwerk benötigt eine tragfähige Gründung. Dazu beraten und planen wir auf Basis fundierter geotechnischer Untersuchungen – damit man den Baugrund mit seinen Risiken fest im Griff hat.

- Baugruben- und Gründungsplanung
- Baugrund- und Altlastenbegutachtung
- Erschütterungsmessungen und strukturdynamische Berechnungen
- statische und dynamische Pfahltragfähigkeitsuntersuchungen sowie Pfahlintegritätstests
- Planung und Begleitung der Sanierung von schadstoffbelasteten Grundstücken und Gebäuden
- Pfahl- und Schwergewichtsgründungen von Offshore-Windenergieanlagen
- Bauüberwachung und Qualitätssicherung im Spezialtiefbau sowie bei der Schadstoffsanierung



**GuD** GEOTECHNIK und  
DYNAMIK CONSULT GmbH

[www.gudconsult.de](http://www.gudconsult.de)

Gutachten  
Beratung  
Planung  
Bauüberwachung

# Gründungsertüchtigungen/Neugründungen im historischen, sensitiven Gefüge des Pergamonmuseums auf der Museumsinsel in Berlin-Mitte

Das zwischen 1910 und 1936 errichtete Dreiflügelgebäude zur Präsentation vorwiegend antiker Großobjekte bedarf nach 100jähriger Standzeit einer Grundinstandsetzung. Für die Wiedererlangung einer vollen Museumsfunktionalität und Herstellung der den Ausstellungsobjekten gerechten klimatischen Randbedingungen sind umfangreiche Ertüchtigungsmaßnahmen, Neugründungen und Tieferlegungen der Kellergeschosssohlen unabdingbar.

Die Auswertung der Archivunterlagen ergab, dass die Gründung des Pergamonmuseums auf mehreren Ebenen in einer Tiefe zwischen 6 und 18 m unter Gelände erfolgte. Die in der Gründungsfläche vorhandene tiefe geologische Einkolkung führte zu großen Problemen bei der konzipierten Flachgründung nach Bodenaustausch im Schutz einer Wasserhaltung. Die erst 1912 vorliegenden Ergebnisse der Bodenerkundungen im Bereich des bis dato überbauten Südflügels zeigten, dass die organische Einkolkung bis ca. –12 m NHN reichte. Dies erforderte eine grundlegende Veränderung der Gründung in diesem Bauabschnitt. Sowohl die 1912 zur Verfügung stehenden Wasserhaltungsanlagen als auch die Tiefgründungselemente waren nicht in der Lage, den ca. 45 m unter Gelände liegenden tragfähigen Baugrund zu erreichen.

Die hohen Anforderungen an das Verformungsverhalten der Bestandsstrukturen und insbesondere der während der Sanierung noch in musealer Nutzung befindliche Südflügel des Pergamonmuseums bedingten ein entsprechendes Reaktionsmonitoring, das mit dem Baugeschehen permanent abgeglichen werden musste. Es wurden sowohl Erschütterungs- als auch Setzungsverläufe erfasst und als entscheidendes Kriterium bei der Wahl der noch möglichen Sanierungstechnologien des Spezialtiefbaus eingesetzt. Die gewählten Lösungsansätze vor Ort, sowohl in der Errichtungsphase als auch während der jetzigen Instandsetzung werden im Beitrag dargestellt und diskutiert.

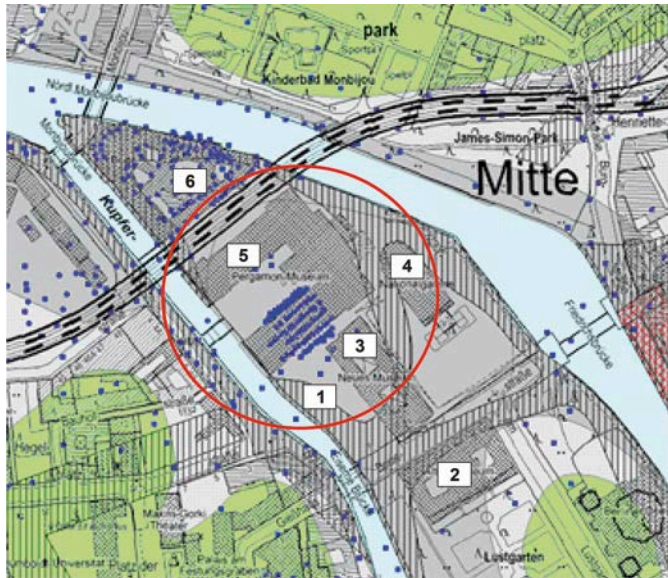
**Foundation strengthening/new foundations to the historically sensitive structure of the Pergamon Museum on the Museum Island in central Berlin.** *The three-wing building for the presentation of mostly large classical objects was built between 1910 and 1936 and after 100 years requires thorough refurbishment. In order to regain complete museum functionality and provide the correct climatic conditions for the exhibited objects, extensive strengthening measures, new foundations and lowering of the basement inverts are unavoidable.*

*The extensive archived documents showed that the Pergamon Museum is founded at several levels at a depth of between 6 and 18 m below ground level. The deep geological scouring in the foundation formation led to great problems with the planned raft foundation after soil exchange under the protection of dewater-*

*ing. The available results of the soil survey from 1912 in the area of the south wing, which until then had been built over, showed that the organic scouring extended down to about –12 m below sea level. This demanded a fundamental alteration of the foundation in this building section. Neither the dewatering plant nor the deep foundation elements available in 1912 were capable of reaching the loadbearing ground about 45 m below ground level. The stringent requirements for the deformation behaviour of the existing structures and in particular the south wing of the Pergamon Museum, which remained in use during the refurbishment works, required appropriate monitoring of reactions, which had to be constantly compared during the construction works. Both vibration and settlement curves were recorded and used as a decisive criterion for the selection of possible refurbishment technologies from specialised civil engineering. The solutions selected on site, both in the completion phase and in the current refurbishment phase, are described and discussed in this article.*

## 1 Baugeschichte des Pergamonmuseums

Die Räumlichkeiten im Alten und Neuen Museum konnten die spektakulären Funde der 1878 begonnenen Ausgrabungen in Pergamon weder aufnehmen noch angemessen präsentieren. In diesem Zusammenhang lag die Entscheidung zur Errichtung eines gesonderten Museums für antike Originalskulpturen nah. 1898 ist auf dem Gelände südlich der Stadtbahn eine sogenannte Pergamenische Halle, die ausschließlich der Präsentation des Pergamonaltars diente, errichtet worden. Dieses Bauwerk ist jedoch infolge der stark anwachsenden archäologischen Bestände und auch wegen der von *Wilhelm von Bode* vorgenommenen Neustrukturierung der Museen auf der Insel im Jahr 1908 abgerissen worden. Auf der frei gewordenen Fläche zwischen der Südbahn, dem Neuen Museum und der Nationalgalerie (Bild 1) sollte eine monumentale repräsentative Anlage für deutsche, antike und orientalische Kunst errichtet werden. Den Entwurf der Dreiflügelanlage lieferte der 1907 als Museumsarchitekt berufene *Alfred Messel*. Im Zentrum des Mittelbaus (Bild 2) und damit an zentraler Stelle des Gebäudes war die Aufstellung des Pergamonaltars geplant. Zum Baubeginn 1910 übernahm nach dem frühen Tod von *Alfred Messel* der Berliner Stadtbaurat *Ludwig Hoffmann* die weitere Entwurfsbearbeitung und Leitung der Bauausführung. Einen wesentlichen Anteil an der Bearbeitung von technisch konstruktiven Lösungen, insbesondere im Bereich der Gründung, hatte der Zivilingenieur *Otto Leitholf*.



- |                              |                         |
|------------------------------|-------------------------|
| 1. Eingangsgebäude (NEU) JSG | 4. Alte Nationalgalerie |
| 2. Altes Museum              | 5. Pergamonmuseum       |
| 3. Neues Museum              | 6. Bode-Museum          |

Bild 1. Pergamonmuseum Berlin – Lage und Geologie;  
 1 – Eingangsgebäude (neu) JSG, 2 – Altes Museum,  
 3 – Neues Museum, 4. – Alte Nationalgalerie,  
 5 – Pergamonmuseum, 6 – Bode-Museum

Fig. 1. Pergamon Museum, Berlin – location and geology;  
 1 – Entrance building (new) JSG, 2 – Old Museum,  
 3 – New Museum, 4. – Old National Gallery,  
 5 – Pergamon Museum, 6 – Bode Museum

Die Fertigstellung und Eröffnung der drei Museen zog sich bis in die Mitte der 1930er-Jahre. Der sich über 20 Jahre erstreckende, sowohl durch geologische als auch politische und soziale Auseinandersetzungen beeinträchtigte Bauablauf kann auf Grundlage der in den Archivunterlagen vorgefundenen ca. 4.500 Bautagebuchblätter mit statischen Berechnungen und Zeichnungen sowie ca. 500 fotografischen Aufnahmen nachvollzogen werden.

Vorbereitende Maßnahmen für die Gründung, den Rückbau, die Bodenerkundung, die Verbauarbeiten sowie die relativ schnell notwendige Wasserhaltung begannen 1910. Die Errichtung des Museums war in zwei Bauabschnitten vorgesehen. Der erste Bauabschnitt beinhaltete den Nordflügel (NF), den Kopfbau Nord (NK), den Mittelbau Nord (MN), den Mittelbau Mitte (MM) und den Mittelbau Süd (MS). Im zweiten Abschnitt sollte der Dreiflügelbau durch den Südflügel (SF), den südlichen Kopfbau (SK) sowie den vierten Flügel (4F) komplettiert werden (vgl. Bild 2).

Die ursprünglich als Gründung der neuen Museumsbauten geplante Pfahlgründung wurde nach durchgeführten Probelastungen und nach Auswertung der ersten Bodenerkundungskampagne verworfen. Sowohl die ursprünglich angenommene tiefste Bodenaustauschordinate bei ca. 6 m unter Gelände als auch der politische Wille zur Schaffung neuer Arbeitsplätze führte zur Favorisierung der Gründungsvariante „Bodenaustausch und Gründung auf dem pleistozänen tragfähigen Horizont“. Auf dieser Ebene sollten Betonbankette errichtet werden, die wiederum als Grundlage für die gemauerten Pfeiler, die

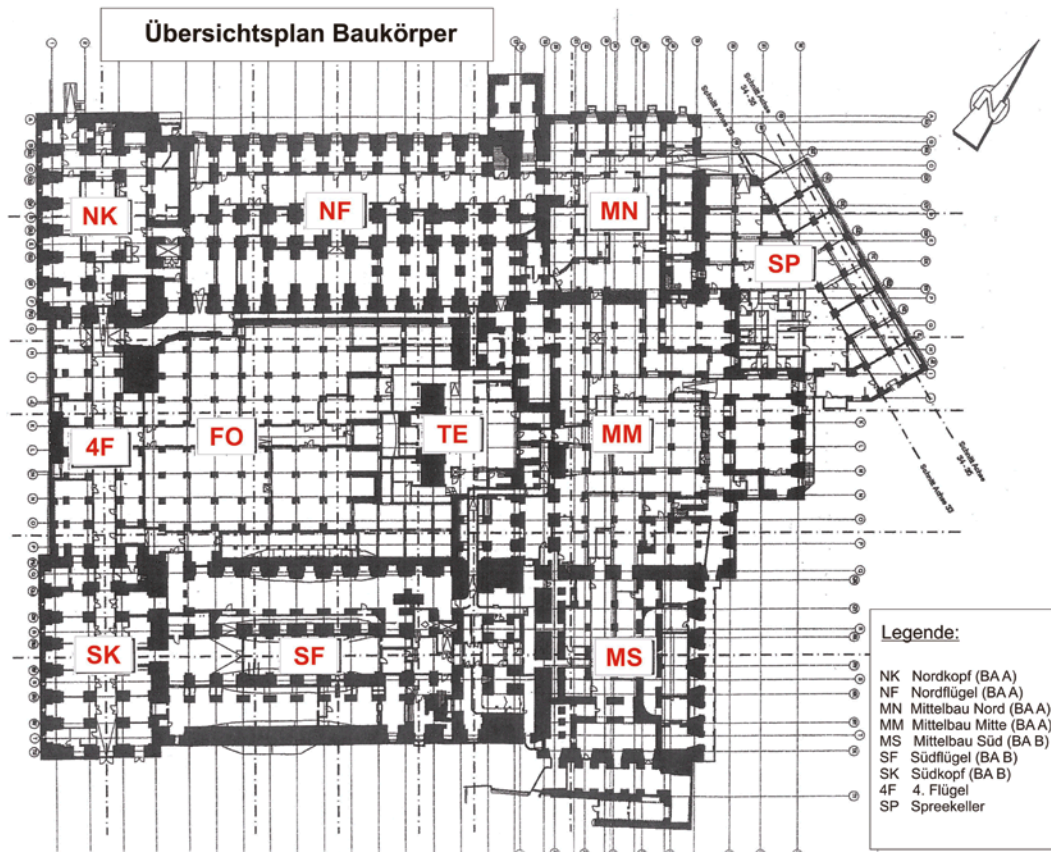


Bild 2. Pergamonmuseum, Übersichtplan der Baukörper, Entwurf Alfred Messel  
 Fig. 2. Pergamon Museum, overview plan of the blocks, design by Alfred Messel



*Bild 3. Pergamonmuseum Berlin – Archivfotos: Nordflügel-Tiefkeller; händischer Aushub; Baugrube Südflügel und Forum, Gründungsgewölbe*

*Fig. 3. Pergamon Museum, Berlin – archive photos: north wing – deep basement; manual digging; construction excavation for south wing and Forum, foundation vault*

unterhalb der 1. Nutzebene bei ca. +32,0 m NN (3 m unter Gelände, 1 m über dem aktuellen Grundwasserstand) eingewölbt [1] wurden, dienten. Diese Vorgehensweise wurde auch in den Bereichen konsequent angewandt, wo aufgrund falscher Interpretationen bzw. zu kurzer Aufschlüsse tieferreichende nicht tragfähige Böden zu spät entdeckt wurden. Hier ist insbesondere der Bereich des Tiefkellers im Nordflügel (Bild 3) aufzuführen.

Die tieferreichende Einkolkung wurde erst nach Fertigstellung der angrenzenden Wände und bereits eingetretenen Setzungen fertiggestellter Strukturen festgestellt. Der nachträglich erfolgte Rückbau (Sprengung), die Unterfangung der bereits ausgeführten Strukturen und die Neugründung in der Ordinate ca. +24,00 m NN sind fotografisch festgehalten (vgl. Bild 3). Zum Teil waren in den Jahren 1910 und 1911 auf der Baustelle rd. 1.500 Arbeitskräfte in einer Tag- und Nachtschicht beim händischen Ausschachten der Baugrube im Schutz der Wasserhaltung beschäftigt.

Die erhebliche Kostensteigerung und die erst 1912 vorliegenden Ergebnisse der Bodenerkundungen im Bereich des bis dato überbauten Südflügels, wonach die organische Einkolkung bis ca. –12 m NHN (45 m unter Gelände) reichte, erforderte eine grundlegende Veränderung der Gründungsart in diesem Bauabschnitt. Sowohl die zur Verfügung stehenden Wasserhaltungsanlagen als auch die Tiefgründungselemente waren nicht in der Lage, den tragfähigen Baugrund zu erreichen. Als Alternative wurden Kolkbrückenvarianten entworfen. Der ausgeführte, aber leider nur sehr unzureichend dokumentierte Entwurf (Bild 4) besteht aus vier Betonrippen, die zwischen den am südlichen Kopfbau und im Mittelbau Süd befindlichen Widerlagern gespannt wurden. Die Oberkante der Kolkbrücke liegt auf der Ordinate ca. +32,00 m NHN, die Widerlager der 60 m langen Kolkbogenbrücke sind ca. 16 m unter Gelände (Ordinate ca. +18,00 m NHN) gegründet.

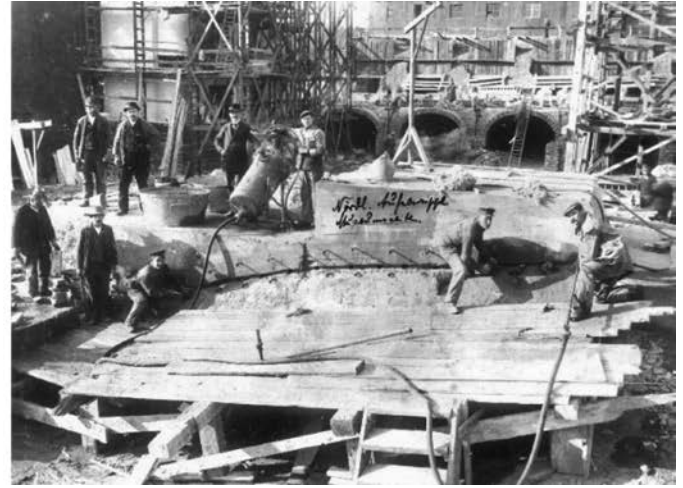


Bild 4. Kolkbrücke, realisierte Variante Kolkbogenbrücke  
Fig. 4. Scour bridge, implemented variant of scour arch bridge

## 2 Geologie – Erwartungen, Hoffnung und Realität

Das für den Neubau des Pergamonmuseums vorgesehene Gelände liegt wie die gesamte Museumsinsel im Berlin-Warschauer Urstromtal und wurde vorwiegend durch die letzte Weichseleiszeit gebildet. Grundsätzlich stehen im Urstromtal rhythmisch abgelagerte pleistozäne Talsande unterschiedlicher Kornfraktionen an. In den so entstandenen homogenen Bodenstrukturen bildeten sich, insbesondere in den Randzonen der sich in Richtung Norden zu-

rückziehenden Gletscher, Erosionsrinnen, in denen das Schmelzwasser abfloss. Wurden diese tief in den Untergrund reichenden Vertiefungen vom nachstürzenden Eis ausgefüllt, so konnte das durch den erst später eingetretenen Abtauprozess entstandene Volumen nur noch durch organische Bildungen des Holozäns aufgefüllt werden. Die Torf- und Faulschlammablagerungen sind sehr oft durch nachfallenden Sand und Kies überdeckt worden.

In der vorgesehenen Gründungsfläche des Pergamonmuseums (vgl. Bild 1) reichen die holozänen Ablage-

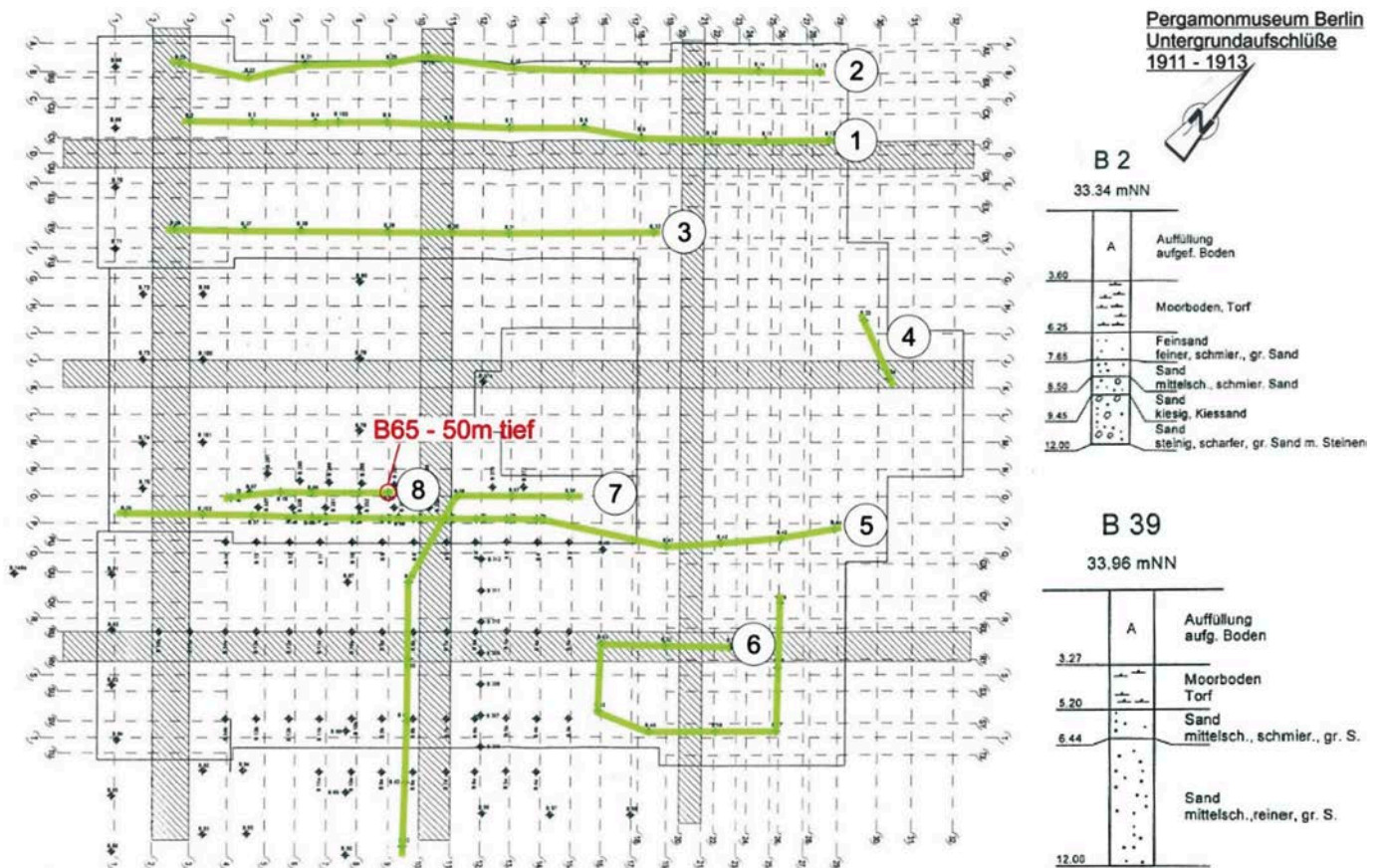


Bild 5. Pergamonmuseum Berlin, Bodenaufschlüsse 1911 bis 1913  
Fig. 5. Pergamon Museum Berlin, soil exploration 1911 to 1913

rungen bis ca. 45 m unter die Geländeoberfläche und bilden somit eine der tiefsten holozänen Einkolkungen im Berliner Stadtgebiet. Unterhalb der holozänen Böden stehen pleistozäne Talsande der Weichseleiszeit als ausreichend tragfähiger Baugrund an. Die Informationen zu schlechten Baugrundverhältnissen im Bereich des grundsätzlich alternativlosen Standorts des zukünftigen Pergamonmuseums lagen bei der Planung dieses Bauwerks vor. Die Überbrückung der nicht tragfähigen Bereiche erfolgte an ähnlichen Standorten zur damaligen Zeit meistens mittels Holzpfahlgründungen.

Zur Erarbeitung der Grundlage eines nachhaltigen Gründungskonzepts sind in der Bebauungsfläche des Pergamonmuseums zwischen 1910 und 1913 umfangreiche Bodenuntersuchungen durchgeführt worden. Die Ergebnisse dieser Erkundungskampagnen bildeten die Erkenntnisbasis auch für die jetzt durchgeführte Grundinstandsetzung/Sanierung des Gebäudes [1] [2]. Insgesamt wurden in der Errichtungsphase des Museums auf der Bebauungsfläche ca. 200 Bohrungen abgeteuft. Im Bild 5 sind die Bohrpunkte mehrerer Erkundungskampagnen dargestellt.

Den Beginn der ersten Erkundungsphase im Jahr 1910 bildeten die Bohrungen B2 bis B53 (Bild 5, Achsen 1–6), die alle samt von der Geländeoberfläche oder zumindest vom Niveau über dem aktuellen Grundwasserstand (ca. 3 m unter Gelände) abgeteuft wurden. Die Erkundungsbohrungen dieser ersten primären Kampagne sind in drei parallel verlaufenden Achsen im Bereich des späteren Nordflügels (Bild 5, Achsen 1–3) und in einer

Achse an der Nordbegrenzung des zukünftigen Südflügels (Bild 5, Achse 5) mit Abständen zwischen 15 und 20 m abgeteuft worden. Ergänzende Bohrungen wurden im Bereich des späteren Mittelbaus Mitte und Mittelbaus Süd abgeteuft. Die Länge der 53 Bohrungen lag im Mittel bei ca. 12 m, die tiefsten Bohrungen reichten bis 16 m unter Ansatzpunkt. Im Rahmen dieser Erkundungen wurden organische Ablagerungen festgestellt, die maximal bis 6 m unter Ansatzpunkt (Ordinate ca. +28 m NHN) reichten. Auf dieser Grundlage wurde die nachvollziehbare Entscheidung für den Bodenaustausch der oberflächennah anstehenden organischen Schichten getroffen.

Gravierende Veränderungen der bis dahin gültigen Vorstellung zum geologischen Aufbau des Untergrunds im Bereich des Pergamonmuseums brachte die zweite Untersuchungskampagne mit Bohrungen B56 bis B67 im Zeitraum 1912 bis 1913, die an der Nordflanke des heutigen Südflügels (Bild 5, Achse 8) angeordnet wurden. Die hier in der ersten Phase durchgeführten Erkundungen mit Teufen bis maximal 16 m ergaben keine Hinweise auf tieferliegenden organischen Ablagerungen. Die im Rahmen der zweiten Erkundungskampagne abgeteuften Bohrungen bis ca. 48 m (B58 bis B60) führten zu gravierend neuen Erkenntnissen in Bezug auf die tragfähigen Horizonte. Die Dramatik dieser neuen Erkenntnisse kann auch in der Anzahl und in der Dichte der nachfolgend abgeteuften Bodenerkundungen abgelesen werden. Insbesondere im Bereich des heutigen Südflügels sind Untersuchungen im Abstand von z. T. nur 2 m und mit Tiefen bis

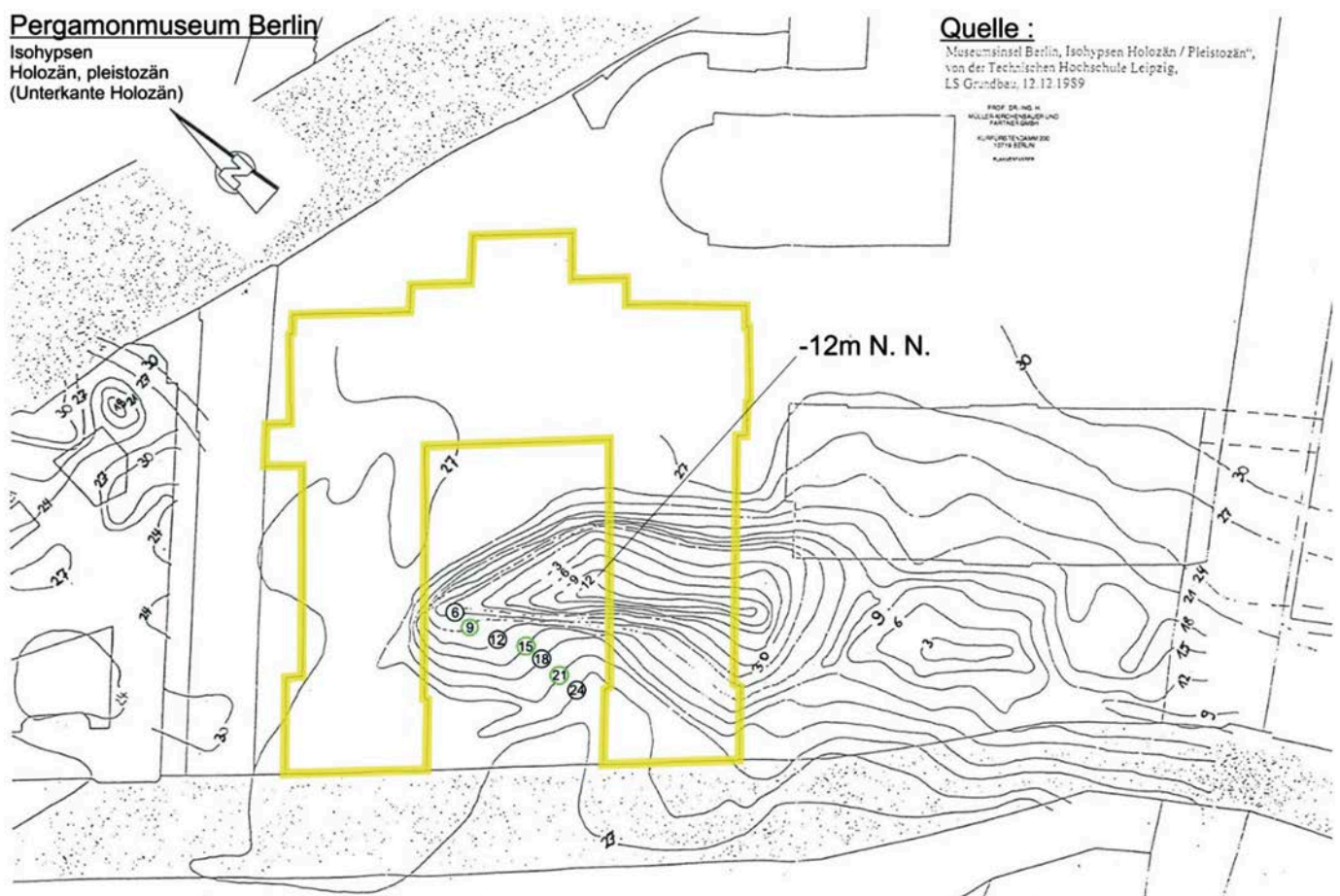


Bild 6. Pergamonmuseum Berlin – Isohypsen Holozän, Pleistozän (Unterkante Holozän)  
 Fig. 6. Pergamon Museum, Berlin – Isohypses of Holocene, Pleistocene (lower edge of Holocene)

## Grundriss Ebene 20 - Hauptrundgang

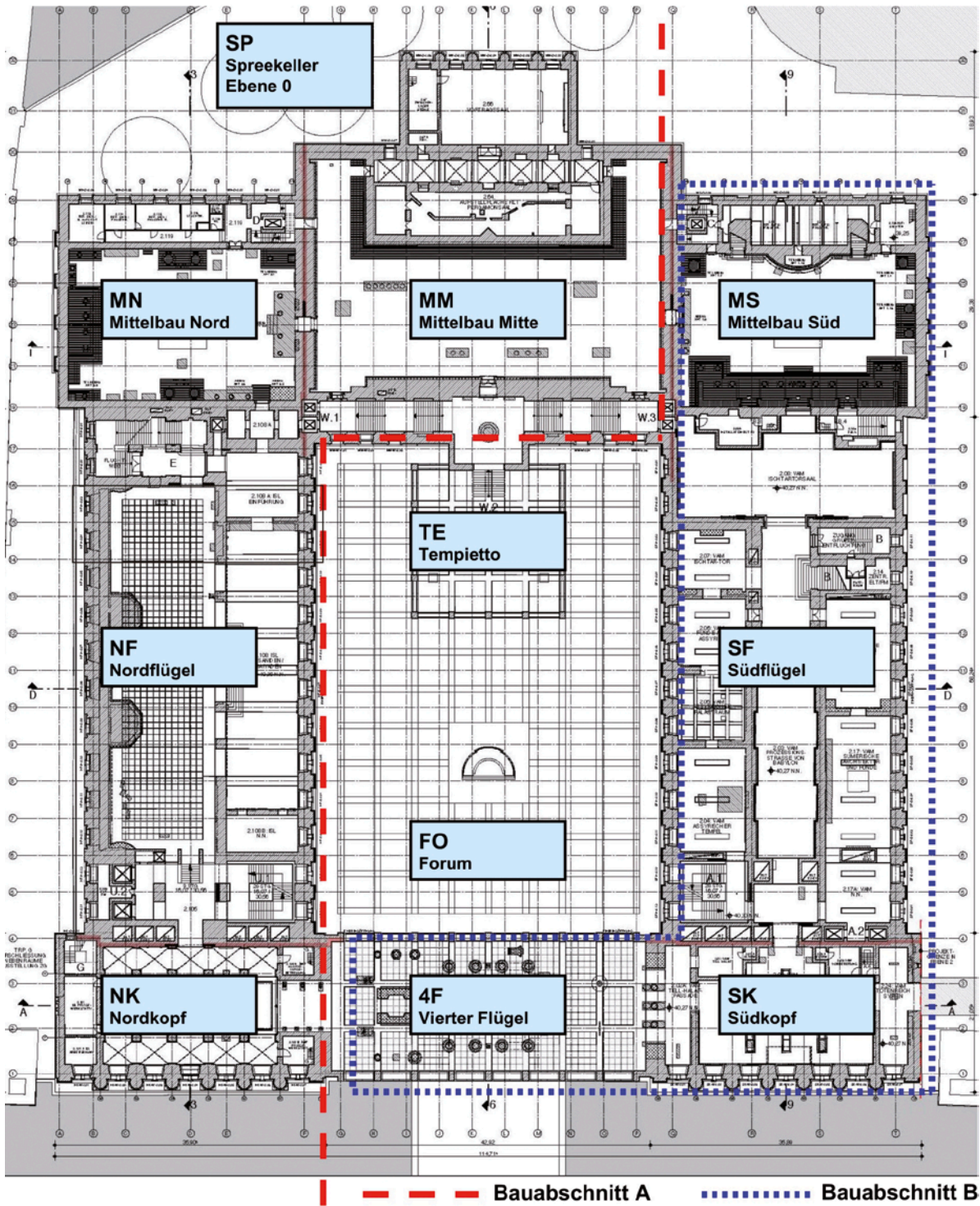


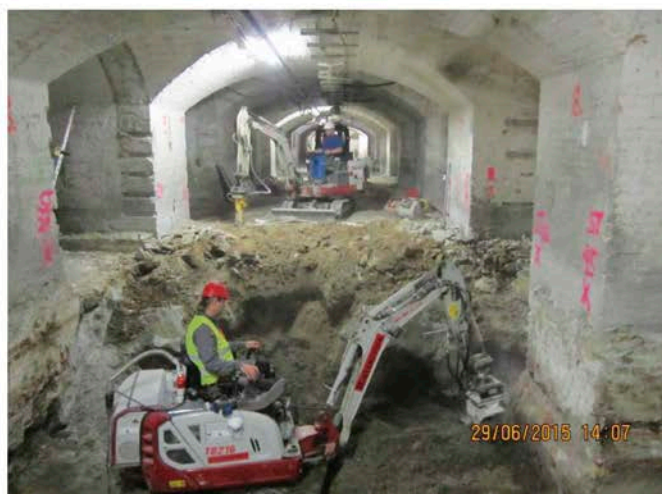
Bild 7. Bauabschnitte der Grundinstandsetzung/Ergänzung mit Bauteilen  
 Fig. 7. Building sections of the thorough refurbishment/addition of building elements

60 m von jedem in der Bauzeit erreichten Aushubniveau ausgeführt worden. Ergänzend zu den Untersuchungskampagnen im Bereich des Südflügels sind zusätzliche tieferreichende Bohrungen im Bereich des Nordflügels und auch entlang des Kupfergrabens durchgeführt worden. Die mit den Aufschlüssen festgestellte Ausdehnung der organischen Einkolkung ist im Bild 6 dargestellt. Die Tiefe der mit einer steilen Böschung versehenen Einkolkung

(Unterkante organische Schicht ca. -12 m NHN) im Bereich des Südflügels ist klar zu erkennen.

Die Gründung des im Bereich des Südflügels vorgesehenen Gebäudeteils war weder mit einem Bodenaustausch noch auf einer Holzpfahlgründung möglich. Die im unmittelbar angrenzenden Mittelbau Süd und im südlichen Kopfbau festgestellten Ordinaten der tragfähigen Horizonte bei ca. 27 m NHN führten zu der Entschei-





*Bild 8. Rückbau der Bodenplatte, Fundamentunterfangungen, Herstellung Mikropfähle  
Fig. 8. Demolition of the base slab, foundation underpinning, installation of micropiles*

dung, eine unterirdische, die tiefe Rinne überspannende Kolkbogenbrücke zu errichten.

In Ergänzung der bauzeitlichen Erkundungen wurden im Zusammenhang mit der Grundinstandsetzung und Ergänzung zwischen 2005 und 2018 die Lagerungsverhältnisse der Austauschböden bzw. die Übergangsbereiche der holozänen zu pleistozänen Schichten/Gründungshorizonte erkundet/überprüft [2]. Es konnte eine lockere Lagerungsdichte der Verfüllbereiche und eine mindestens mitteldichte Lagerung der pleistozänen Sande festgestellt werden.

### **3 Sanierung, Grundinstandsetzung, Tieferlegung der Bestandssohle**

Für das im Zeitrahmen 1910 bis 1936 erbaute Gebäude besteht ein dringender Sanierungsbedarf. Im Zuge der laufenden Grundinstandsetzung und Ergänzung soll das dreiflügelige Gebäude umfangreich saniert und bis dato nicht realisierte Gebäudeteile ergänzt werden. Die Arbeiten erfolgen in zwei Bauabschnitten (Bild 7), dadurch kann das Museum auch weiterhin, wenn auch nur teilweise, für Besucher zugänglich gehalten werden.

Im ersten Bauabschnitt (2013 bis 2025) erfolgt die Sanierung der Bauteile Nordkopf, Nordflügel, Mittelbau

Nord, Mittelbau Mitte und Forum. Für die Bereiche Tempetto und 4. Flügel erfolgt eine Vervollständigung/Ergänzung des Bestands. Gleichzeitig erfolgt im Pergamonmuseum die bauliche Umsetzung der archäologischen Promenade, die fünf Gebäude der Museumsinsel unterirdisch verbinden wird. Nach Fertigstellung des Bauabschnitts A (BA-A) und dem Wiedereinzug des Museums in die neuen Räume erfolgt im zweiten Abschnitt die Sanierung des Südflügels, des Südkopfs und des Mittelbaus Süd (BA-B).

Aufgrund der exponierten Lage auf der Museumsinsel mit der Begrenzung des Baufelds durch die Bahntrasse im Norden, den Kupfergraben im Westen, die Spree im Osten und das Neue Museum/NEG-JSG/Nationalgalerie im Süden (vgl. Bild 1) sind notwendige Baustelleneinrichtungsflächen nur eingeschränkt vorhanden und die logistische Erschließung der Baustelle sehr komplex und problematisch. Zur Erweiterung des ursprünglichen Logistikkonzepts für die Grundinstandsetzung mit Andienung der Baugeräte und Material mittels Kran oder LKW-Zufahrt auf den Spreekeller erfolgte der Aufbau [3] einer Stahlbau-Brückenkonstruktion entlang des Südflügels bis zum Tempetto.

Die Grundinstandsetzung des Gebäudes begann mit der Ertüchtigung der Fundamente und der Tieferlegung der Kellergeschossohle (Bild 8). Das Grundwasser steht

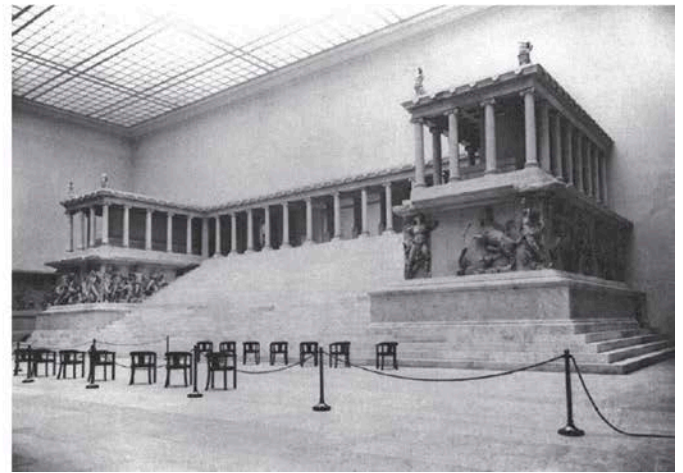


Bild 9. Nicht demontierbarer Bestand, Pergamonaltar, Pergamonsaal (1930)  
 Fig. 9. Existing parts which could not be demolished, Pergamon Altar, Pergamon Hall (1930)

ca. 1 m unterhalb des Nutznieaus des Bestandsuntergeschosses an. Zur Vermeidung negativer Auswirkung einer Grundwasserabsenkung auf die benachbarten Strukturen wurden die Absenkungsmaßnahmen der UG-Sohle im Schutz von Trograugruben ausgeführt. Die Trogwände bildeten hierbei die vorhandenen Bestandsfundamente/unterirdische Substrukturen. Als horizontale Abdichtung ist eine DS-Sohle zwischen die Bestandsstrukturen eingedüst worden.

Bei der Auswertung der Archivfotos wurden deutliche Defizite, insbesondere bei den Unterfangungsmaßnahmen der Fundamente, festgestellt (vgl. Bild 3). Um das Setzungspotenzial zu reduzieren und die Einzelstützenfundamente, insbesondere unterhalb der im Gefüge eingebetteten Exponate (Bild 9), zu stabilisieren, wurden vor der Herstellung der grundwasserdichten Tröge Zusatzsäulen (Bild 10) zur direkten Lastableitung der höher liegenden Gründungskörper in die gewachsenen ungestörten Horizonte ausgeführt.

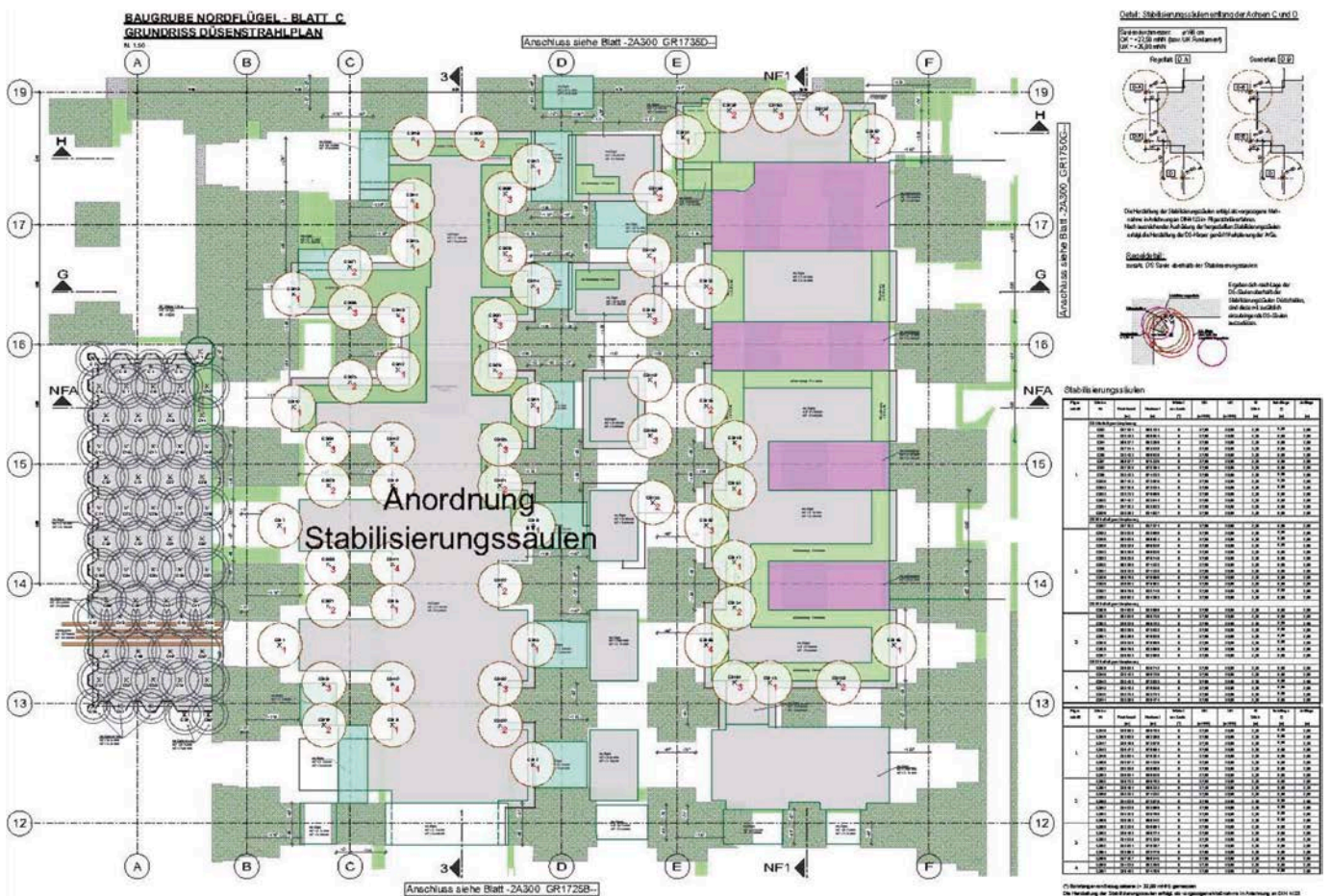


Bild 10. Stabilisierungssäulen vor der Herstellung der DS-Tröge [3]  
 Fig. 10. Stabilising columns before the installation of jet grout troughs [3]

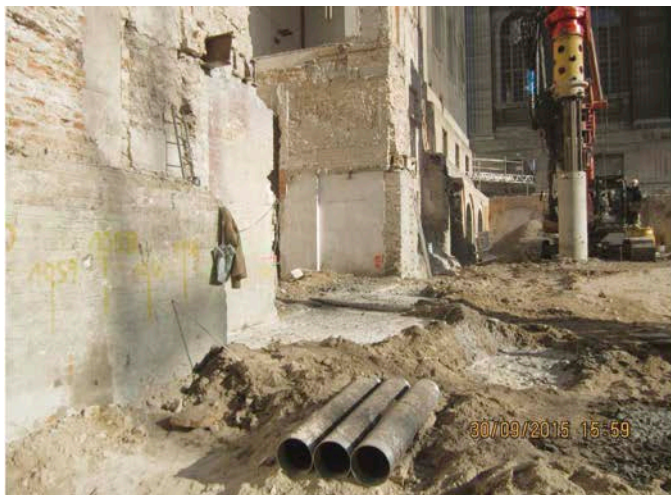


Bild 11. Tiefenberäumung der Hindernisse mit einem Großbohrgerät und geborgene Stahlträger  
 Fig. 11. Deep removal of obstructions with a large drill rig

#### 4 Neubau im historischen Gefüge, Teilbaugruben Tempietto und Forum

Im Baufeld Tempietto sollte zur Fortführung der Archäologischen Promenade und für die umfangreichen TGA-Anlagen ein Untergeschoss bis auf das Niveau ca. +27,80 m NHN errichtet werden. Da das Grundwasser bei ca. 30,80 m NHN ansteht, sah die ursprüngliche Pla-

nung zur Abdichtung der Baugrube gegen Grundwasser die Herstellung einer Trogbaugrube bestehend aus einer tiefliegenden DS-Sohle und den DS-Unterfangungskörpern der Bestandswände als vertikale Abdichtung vor. Die tiefliegende DS-Sohle sollte zwischen den Ordinaten +25,50 m NHN bis +24,30 m NHN hergestellt werden.

Die Arbeiten im Tempietto begannen nach dem Abbruch der oberirdischen Bausubstanz mit dem Abteufen

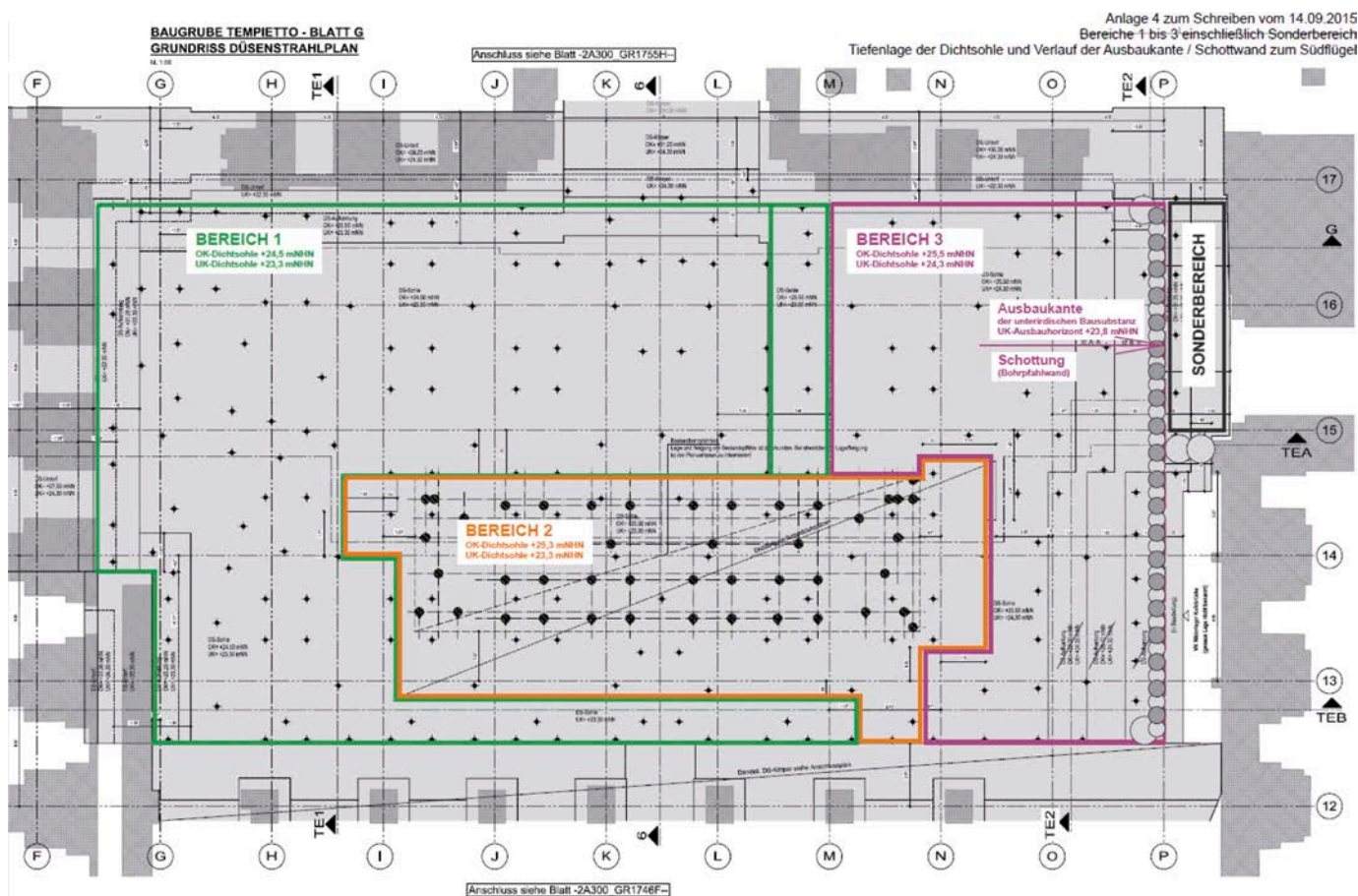


Bild 12. Baugrube Tempietto: Tiefenlage der Dichtsohle und Schottwand zum Südflügel  
 Fig. 12 Tempietto excavation: Depth of the bottom sealing and bulkhead to the south wing

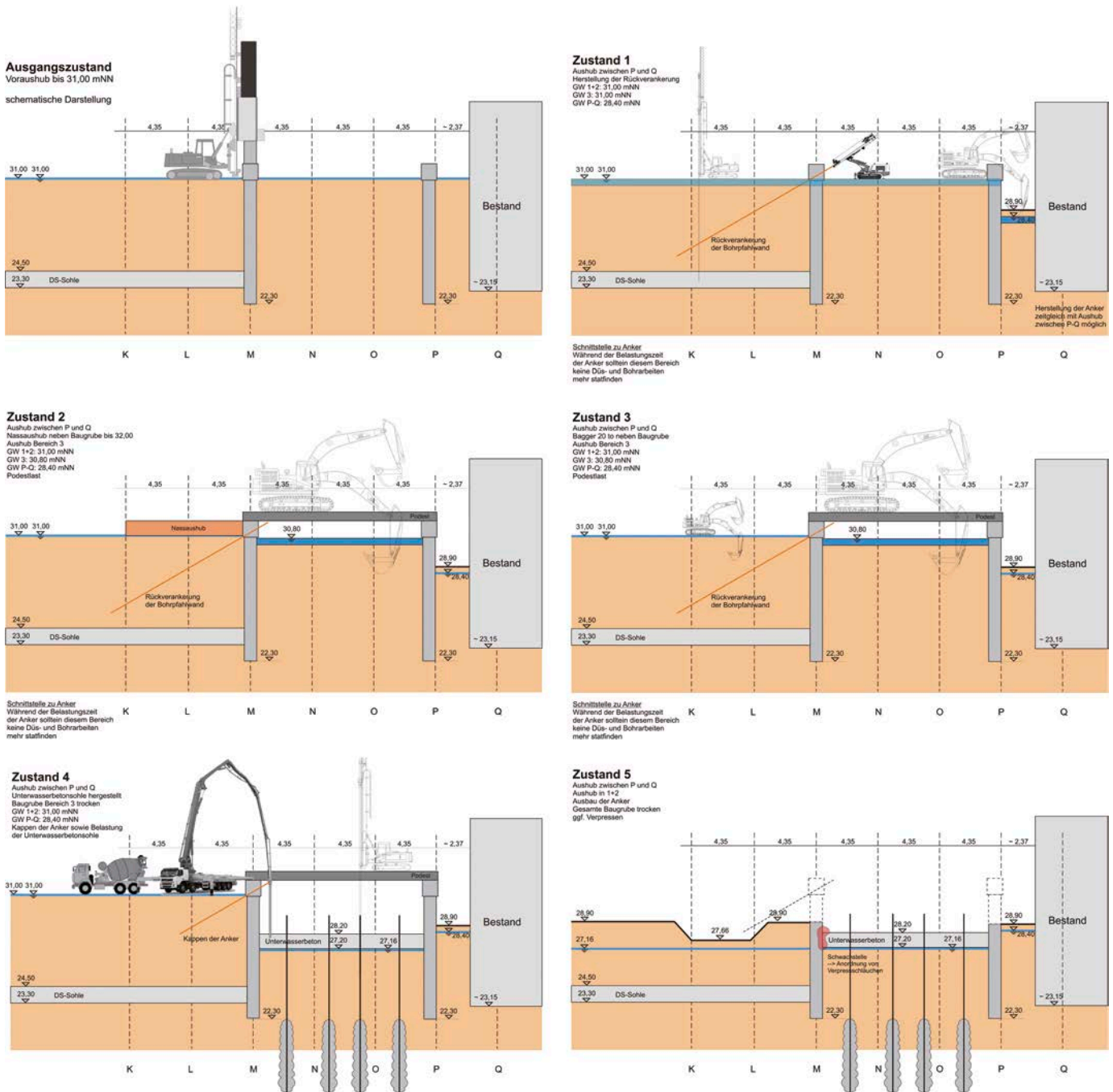


Bild 13. Gewählte und ausgeführte Variante: Verankerte UW-Betonsohle, umschließende Bohrpfahlwand, Unterwasserabbruch  
Fig. 13. Selected and implemented variants: high-level underwater concrete invert, surrounding bored pile wall, underwater demolition

von Mikropfählen zur Durchführung der Pfahlprobekbelastungen. Hierbei wurden entgegen dem Planungsstand großflächig tiefreichende Hindernisse im Baugrund angetroffen. Diese ragten zum Teil deutlich unterhalb des Tiefenhorizonts der geplanten DS-Sohle. Um bei der Herstellung der DS-Sohle keine Düschatten und damit Undichtigkeiten entstehen zu lassen, mussten die Hindernisse im Vorfeld flächendeckend beseitigt werden. Mithilfe eines Großbohrgeräts erfolgten die Ausbohrarbeiten (Bild 11). Diese waren jedoch aufgrund der diversen Hindernisse wie Holz, Mauerwerk, Beton und Altgründungspfähle (Lorenzpfähle) und insbesondere horizontal liegende, in mehreren Lagen im Mauerwerk eingebundene Stahlträger sehr beschwerlich, kosten- und zeitintensiv.

Im Ergebnis der im Abteufungsraster der DS-Sohle durchgeführten Auskernungsarbeiten konnte die Tempetto-Fläche in den Bereich 1 (Bild 12) mit Unterkanten der Hindernisse über +25 m NHN, den Bereich 2, der die ehemalige Lorenzpfahlgründung beinhaltet, und den Bereich 3, in dem die Restsubstanzen deutlich unterhalb der Ordinate +25 m NHN ragten, unterteilt werden. In den Bereichen 1 und 2 ist die geplante DS-Sohle um 1 m auf die Ordinate +24,50 m NHN abgesenkt worden. Im Bereich 3 musste die geplante Vorgehensweise an die vor Ort festgestellten Gegebenheiten angepasst werden. Die vollständige Auskernung der alten Restsubstanzen bis zum Niveau der DS-Sohle hätte zu einer wesentlichen Verlängerung der Ausführungszeit geführt. Nach Untersuchung unterschied-



*Bild 14. Aushub der Altsubstanz unter Wasser  
Fig. 14. Excavation of the old substance under water*

licher Beschleunigungsverfahren ist die Entscheidung für eine verankerte Unterwasserbetonsohle und die Unterwasserbeseitigung der Hindernisse gefallen (Bild 13). Die Anhebung des Rückbauniveaus um ca. 3 m führte zu einer signifikanten Reduzierung der Bauzeit.

Die Herstellung einer Unterwasserbetonsohle, die unmittelbar unterhalb der gewünschten Aushubebene lag, erforderte jedoch die Erstellung eines umlaufenden biegesteifen Baugrubenverbau. Dieser wurde als Bohrpfehlwand mithilfe des vorhandene Auskernbohrgeräts ausgeführt. Die Bohrpfehlwand führte auch eine Trennung zur benachbarten sehr heterogenen, nicht eindeutig erkundeten Bausubstanz herbei und ermöglichte die gefahrlose Erkundung der Qualitäten des als südliche Begrenzung des Tempietto-Trogs vorgesehenen östlichen Widerlagers der Kolkbrücke. Nach Herstellung der Bohrpfehlwand erfolgte im Tempiettobereich 3 der Aushub vom Querpodest nach Zerkleinerung der unter Wasser befindlichen Restsubstanz. Die Rückbaumaßnahme erfolgte vollständig unter Wasser (Bild 14). Um auszuschließen, dass die notwendige Energie zur Zertrümmerung der unterirdischen Bausubstanz inklusive der eingebetteten Stahlträger zu einer

Gefährdung der benachbarten Bausubstanz und Exponate führt, wurde im Vorfeld dieser Maßnahme ein Rückbaustest zur Optimierung der einzusetzenden Geräte durchgeführt.

Da das Baufeld Tempietto aus zwei getrennten Teilbaugruben (vgl. Bilder 12 und 13) bestand, mussten bei der Herstellung die unterschiedlichen Aushub- und Grundwasserstände eng abgestimmt werden. So wurde z.B. Frischwasser in die Teilbaugrube geführt, um ein Absinken des Grundwasserstands durch den Nassaushub zu verhindern. Weiterhin musste die kontinuierliche Abfuhr des Nassaushubs gewährleistet werden, um die zulässige statische Belastung auf die rückverankerte Trennbohrpfehlwand einzuhalten. Um etwaige Undichtigkeiten aufgrund der Hindernisse ca. 1 m oberhalb der hergestellten DS-Sohle vorab zu orten, wurde eine thermische Leckortung durchgeführt. Beim Abbruch der Teilbaugrube war die in das Baufeld ragende Rückverankerung der Umschließungsbohrpfehlwand zu schützen. Die Mikropfähle im Bereich der Teilbaugrube hatten eine doppelte Funktion: Sie dienen zur Sicherung der Unterwasserbetonsohle gegen Auftrieb sowie dem späteren Lastabtrag des Neubaus.



*Bild 15. Herstellung der bewehrten Sicherungssohle sowie anschließende Mikropfehlherstellung  
Fig. 15. Construction of the reinforced support invert and subsequent micropile installation*

Eine weitere Besonderheit bei der Herstellung der Baugruben im Pergamonmuseum stellten die Arbeiten im Forum dar. Die konstruktive Ausbildung des Bestands besteht hier aus 71 flachgegründeten Einzelstützen. Aufgrund der Lage des Forums im Bereich der sehr tiefen Einkolkung und der damit verbundenen Gründung in der Auffüllung, musste bei der Nachgründungen mit großen Setzungen gerechnet werden. Zur Fortsetzung der Arbeiten wurde daher im Bereich des Baugrubenplanums eine temporäre bewehrte Stabilisierungsebene (Bild 15) angeordnet, von der Mikropfähle abgeteufelt wurden. Mit diesen Maßnahmen konnten die auftretenden Setzungen auf ein Minimum reduziert werden.

### 5 Reaktionsmonitoring als wesentliches Instrument der qualitätssichernden Überwachung

Die Komplexität des Bauwerks und die Vielzahl der bauzeitlich z.T. sehr pragmatisch ausgebildeten Gründungselemente erlaubten nur eine bedingte Extrapolation der punktuellen Berechnungsergebnisse des gewählten Bemessungsmodells. Die Vielfalt möglicher Bemessungsparameter und gleichzeitig die hohen Anforderungen an das Verformungsverhalten, insbesondere der denkmalgeschützten Strukturen mit eingebetteten Großexponaten, erforderten ein Monitoring, das die Planungsbeteiligten in die Lage versetzen sollte, die Antwort des Bauwerks auf

das Baugeschehen im Sinne der gültigen Standsicherheitsnachweise und restauratorischen Empfehlungen zu bewerten, um auf etwaige sich abzeichnenden Defizite rechtzeitig reagieren zu können.

Zu den Besonderheiten des Pergamonmuseums zählt eine Vielzahl von Großobjekten, die in dem statischen Gefüge des Gebäudes fest eingebettet sind. Hierzu gehört nicht nur der Große Altar (vgl. Bild 9) und das Pergamonfries, sondern auch das Propylon des Rathauses von Milet, das Säulenjoch des Athena-Tempels aus Pergamon und viele weitere antike Objekte, die vorwiegend im Hellenistischen Saal den Besuchern präsentiert wurden. Für diese Objekte haben die Restauratoren eine Kategorisierung des Gefährdungspotenzials [4] [5] vorgenommen. Auf dieser Grundlage sind alle ortsfesten Monumente einer Gefährdungspotenzialklasse (GP01 bis GP03) zugeordnet worden.

Die in der Gefährdungspotenzialgruppe GP03 aufgeführten Monumente können nur geringfügige Gebäudeverformungen schadensfrei aufnehmen. Da eine Kompensation der möglichen Setzungen durch Sicherungsmaßnahmen an den Monumenten selbst nicht möglich war, mussten die Anforderungen an das Verformungsverhalten des Gebäudeteils, in denen die betroffenen Großmonumente verankert waren, überprüft werden. Daher wurden weitere Optimierungen der Bauabläufe der Grundinstandsetzungsmaßnahme des Pergamonmuseums vorgenom-

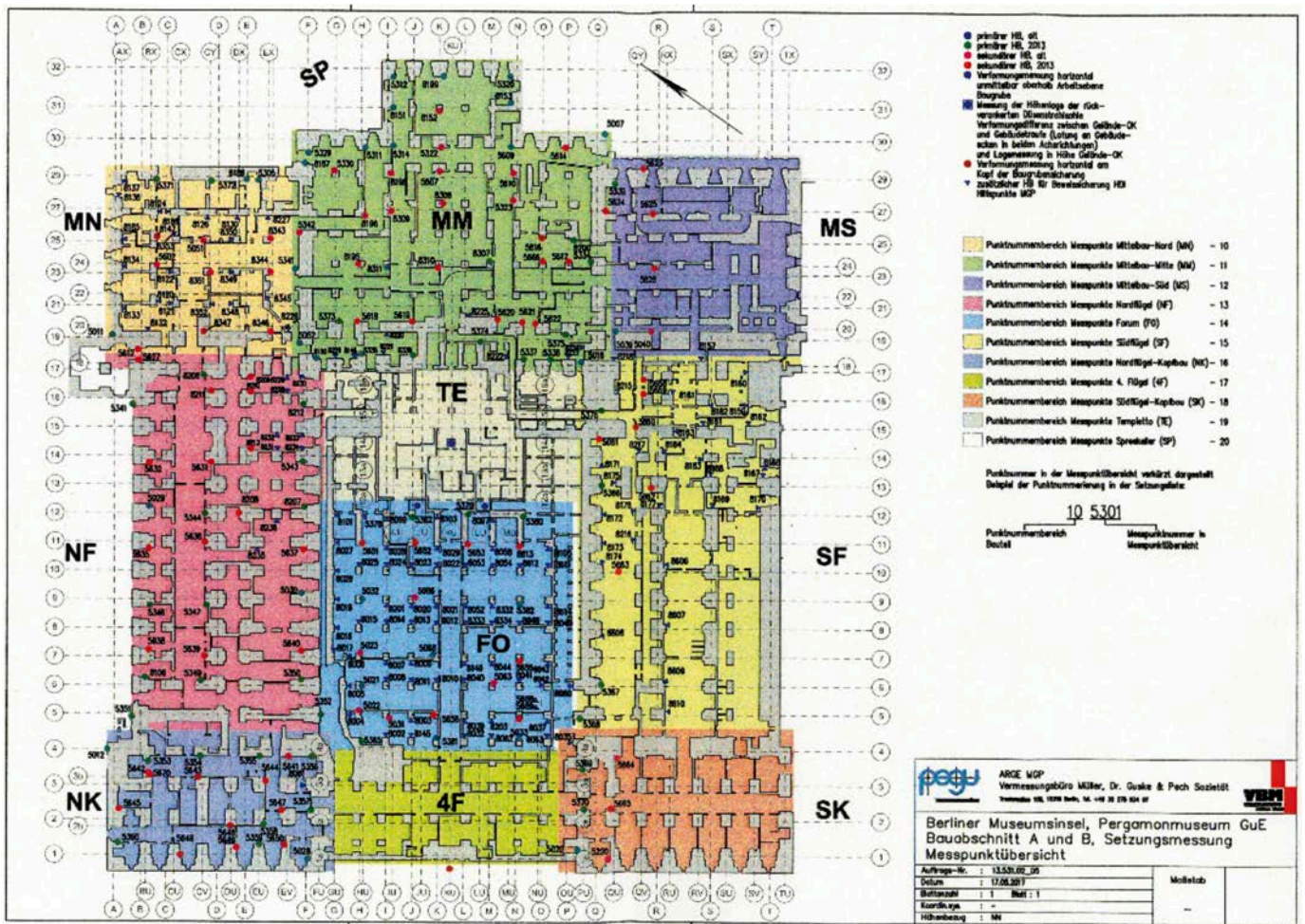


Bild 16. Anordnung der Messpunkte für die geodätischen Setzungsmessungen in der Ebene 00  
 Fig. 16. Arrangement of the survey points for geotechnical settlement measurement at level 00

men. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf den Rückbau- und Spezialtiefbaumaßnahmen. Es galt, den als kritisch angesehenen Alarm- und Grenzwert für Setzungsdifferenzen von 7 bis 10 mm bzw. 10 bis 15 mm für das relevante Stützenrastermaß von 5 m mit geeigneten Maßnahmen zu gewährleisten. Auf der Grundlage detaillierter Analysen der Sensitivität der Ausstellungsstücke selbst und auch der Art deren Integration in die Struktur des Museumsgebäudes hat der Tragwerksplaner Aussteifungselemente und Baubehelfskonstruktionen [6] für die gefährdeten Stellen entworfen und im Rahmen eines Havarieplans logistisch zum Einbau vorbereitet.

Zur Erfassung der an den Monumenten relevanten Verformungen und Überwachung der festgelegten Alarm- und Grenzwerte sind im Pergamonmuseum Lage- und Neigungsmessungen zur Ermittlung der Neigungsänderungen der betreffenden Bauwerksteile sowie Setzungsmessungen als diskontinuierliche und in der Ebene 10 und 20 auch als kontinuierliche Messung (Schlauchwaagenmesssystem) zum Schutz der dort verbleibenden Kulturgüter durchgeführt worden. Die Ergebnisse der Setzungen und Setzungsdifferenzmessung ermöglichten eine zuverlässige Beurteilung der Stand- und Verkehrssicherheit der Gebäudeteile und der eingebetteten Monumente während der Bautätigkeit. Zur Überwachung des Setzungsverhaltens sind z. B. in der Ebene 00 des Pergamonmuseums 97 primäre Setzungsmesspunkte, 61 sekundäre Setzungsmesspunkte, 14 Lagemesspunkte zur Überwachung der Gebäudeschiefstellung und 30 Lagemesspunkte zur Erfassung von Horizontalverschiebungen [8] installiert worden (Bild 16).

Neben den Verformungen aus Änderungen der Tragstruktur führten auch dynamische Beanspruchungen – Erschütterungen durch Grundinstandsetzungsmaßnahme – zu relevanten negativen Einwirkungen sowohl auf die Gebäudestruktur als auch auf die darin eingebetteten Monumente. Zur Abschätzung der Sensitivität der Exponate wurden im Vorfeld der Baumaßnahme dynamische Messungen zur Feststellung der tatsächlichen Erschütterungsempfindlichkeit der Einzelobjekte [8] durchgeführt.

Als Grenzwert für Schwingungsbelastung ist die gemessene Schwinggeschwindigkeit aus dem Besucherverkehr, der bereits über lange Zeit einwirkte und bis dato zu keinen Schäden geführt hat, festgelegt worden. Dieser liegt an dem Aufstellort der Objekte bei  $v_{\text{Grenz}} = 1 \text{ mm/s}$ . Im Vorfeld der jeweiligen Einzelmaßnahme sind die Bauverfahren bezüglich der Erschütterungsimmission bewertet worden. Unter Beachtung der vor Ort festgestellten relativ hohen Eigendämpfung des Gebäudes wurde ein Konzept für ein Schwingungsmonitoring erarbeitet [7]. Als permanent zu überwachende Gebäudeteile sind der Mittelbau-Mitte und der Südflügel festgelegt worden. Die Schwingungssensoren wurden in Außenwandnähe innenhofseitig installiert. In die Schwingungsüberwachung wurde eine automatische Alarmierung integriert, die bei Erreichen des Alarm-/Grenzwerts eine entsprechende Meldung an die Verantwortlichen verschickt. Zur Verifizierung der Lage der Dauermesspunkte wurden entsprechende Untersuchungen vor Ort und Übertragungsfunktionen zwischen den Messpunkten und den verschiedenen Ausstellungsobjekten ermittelt und ausgewertet [5] [8].

## 6 Schlussbemerkung

Die Ertüchtigung der Gründung/Neugründung im historischen Bestand im Rahmen der Grundinstandsetzung und Ergänzung des Pergamonmuseums im Abschnitt A ist zum Beginn des Jahres 2018 beendet worden. In enger konstruktiven Zusammenarbeit zwischen dem Bauherren der Stiftung Preußischer Kulturbesitz, vertreten durch das BBR – der ausführenden Arbeitsgemeinschaft PMU II, den Planern, dem Bodengutachter und den Objektüberwachern konnte die Maßnahme ohne nennenswerte Setzungen/Schädigung im Bereich der eingebauten Exponate, insbesondere im Gründungsbereich des Pergamonaltars, durchgeführt werden.

### Literatur

- [1] *Oehmig, C., Hübner, V., Häfner, B.*: Pergamonmuseum Historische Baukonstruktion. Aachen: Geymüller, 2017.
- [2] MKP Prof. Dr.-Ing. H. Müller-Kirchenbauer u. Partner GmbH: Bericht zu den Untergrundverhältnissen Grundinstandsetzung und Ergänzung. Berlin, 28.10.2004,
- [3] Arge Implenia/Stump: Logistikkonzept, Werk- und Montageplanung der Grundinstandsetzung.
- [4] Architekturbüro Klessing: Gefährdungspotenzial Objekte ANT bei anzusetzenden Gebäudeverformungen BA-A. Mai 2014
- [5] ProDenkmal: Bewertung der Standsicherheit ausgewählter RUB-Objekte für die Umbaumaßnahmen im Rahmen des Bauabschnitts A. Mai/Juni 2014.
- [6] ACP/CRP: Planungsunterlagen zur Grundinstandsetzung/ Ergänzung des Pergamonmuseums.
- [7] CRP: Konzeption Messprogramm vom 04.07.2014
- [8] BeSB GmbH Berlin: Konzept Schwingungsmonitoring im Pergamonmuseum

### Bildernachweis

- Archiv Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz: Bilder 3, 4, 9  
 BBR Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung: Bilder 2, 5, 6, 7, 16  
 Geoportal Berlin: Bild 1  
 GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH: Bilder 8, 11, 13, 14, 15  
 WM-Planung, Arge PMU II: Bilder 10, 12

### Autoren

Dipl.-Ing. Josef-A. Patron  
 GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH  
 Darwinstraße 13  
 10589 Berlin  
 patron@gudconsult.de

Dipl.-Ing. Ralph Keller  
 GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH  
 Darwinstraße 13  
 10589 Berlin  
 keller@gudconsult.de



**GuD Geotechnik und Dynamik Consult GmbH**

Darwinstraße 13

10589 Berlin

Tel. +49 30 789089-0

Fax. +49 30 789089-89

[office@gudconsult.de](mailto:office@gudconsult.de)

[www.gudconsult.de](http://www.gudconsult.de)