

Die Gründung der Frauenkirche in Dresden – eine ingenieurtechnische Herausforderung vor Beginn des Wiederaufbaus

Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Peter-Andreas von Wolffersdorff

Dr.-Ing. Eckart Schulz

BAUGRUND DRESDEN Ingenieurgesellschaft

1 Einführung

Seit der historischen Wende 1989/1990 in Deutschland stand der Wiederaufbau der Frauenkirche zu Dresden im öffentlichen Interesse. Zahlreiche Veröffentlichungen waren seitdem diesem Wiederaufbau gewidmet (siehe z. B. (Franke 1992), (Siegel 1991), (Wenzel 1996), (Zumpe 1998)). Die bauliche Hülle wurde im Sommer 2004 fertiggestellt, der Innenausbau wurde ein Jahr später vollendet und die Weihe der Kirche fand als großes gesellschaftliches Ereignis in Dresden Ende Oktober 2005 statt.

Es bietet sich nun an, über die Erfahrungen, die bei den Untersuchungen zur Gründung dieser wiederaufgebauten Kirche gesammelt wurden, zu berichten und das realisierte Gründungskonzept vorzustellen, zumal die Kirche bis zu ihrer Zerstörung 1945 permanent Schäden am Tragwerk aufwies, deren Ursachen auch in der Gründung bzw. dem Baugrund vermutet wurden (siehe Bild 2a).

2 Die historische Frauenkirche und das Konzept für den Wiederaufbau

Die Frauenkirche wurde als barocker Zentralbau nach einem Entwurf und unter der Leitung des Ratszimmermeisters George Bähr in den Jahren 1726 bis 1743 errichtet und prägte mit der bekannten steinernen Kuppel ganz wesentlich die Silhouette der Stadt Dresden bis zum Jahr 1945. Die Lasten dieses auf quasi quadratischem Grundriss errichteten Bauwerks – namentlich die der schweren Kuppel – sollten sowohl über die mächtigen Außenwände als auch die 8 schlanken Innenpfeiler in den Baugrund abgeleitet werden (siehe Bild 2b). Nach dem Bombenangriff auf Dresden vom 13./14. Februar

1945 brannte die Kirche aus, stürzte am 15. Februar zusammen und blieb als Trümmerberg liegen (Bild 1).

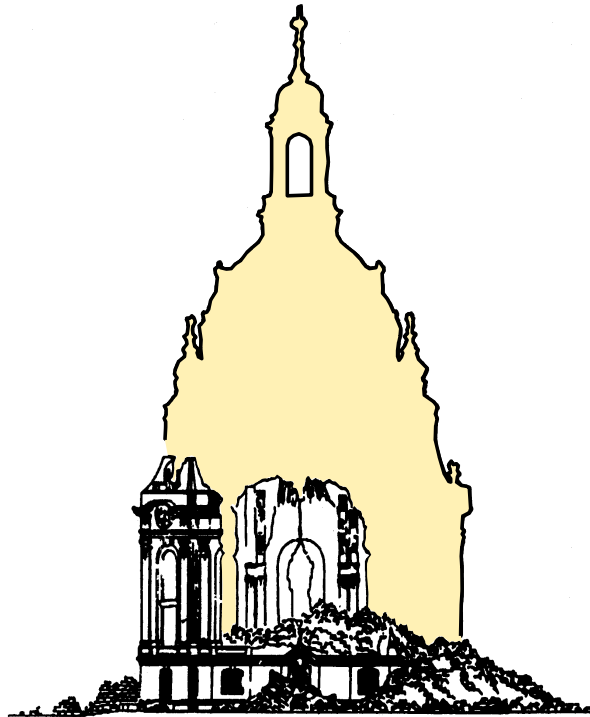


Bild 1 Silhouette der Kirche vor ihrer Zerstörung und ihr Trümmerberg

Der von einer Bürgerinitiative geäußerte „Ruf aus Dresden“ vom 13.02.1990 fand weltweit ein breites Echo und war der Anlass dafür, diese Kirche wieder aufzubauen.

Das Konzept des Wiederaufbaues sah vor, die Kirche innen und außen in originaler Form und aus dem gleichen Baustoff – aus Stein und Eisen – wieder herzustellen, wobei so weit wie möglich originale Bausubstanz wiederzuverwenden war. Das sollte auch für die Gründung gelten, die seinerzeit, entsprechend dem Bährschen Entwurf, als Flächen-gründung aus Mauerwerk etwa 7 m unter Gelände auf den Ablagerungen der Elbe ausgeführt worden war (siehe Bild 2, Bild 3 und Bild 4).

Die geotechnischen Fragestellungen für einen Wiederaufbau betrafen folglich neben der Untersuchung des Baugrundes unter der Kirche – vor allem bezüglich seines Verformungsverhaltens – Art und Zustand der vorhandenen Gründungselemente im Hinblick auf ihre Wiederverwendbarkeit. In dem Zusammenhang war zu klären, inwieweit Baugrund und Gründung an den überlieferten Schäden am Tragwerk der Kirche verantwortlich waren.

Originaler Wiederaufbau bedeutete auch, dass die abzutragenden Lasten aus dem Bauwerk etwa in der Größe der Lasten des historischen Baues bleiben.

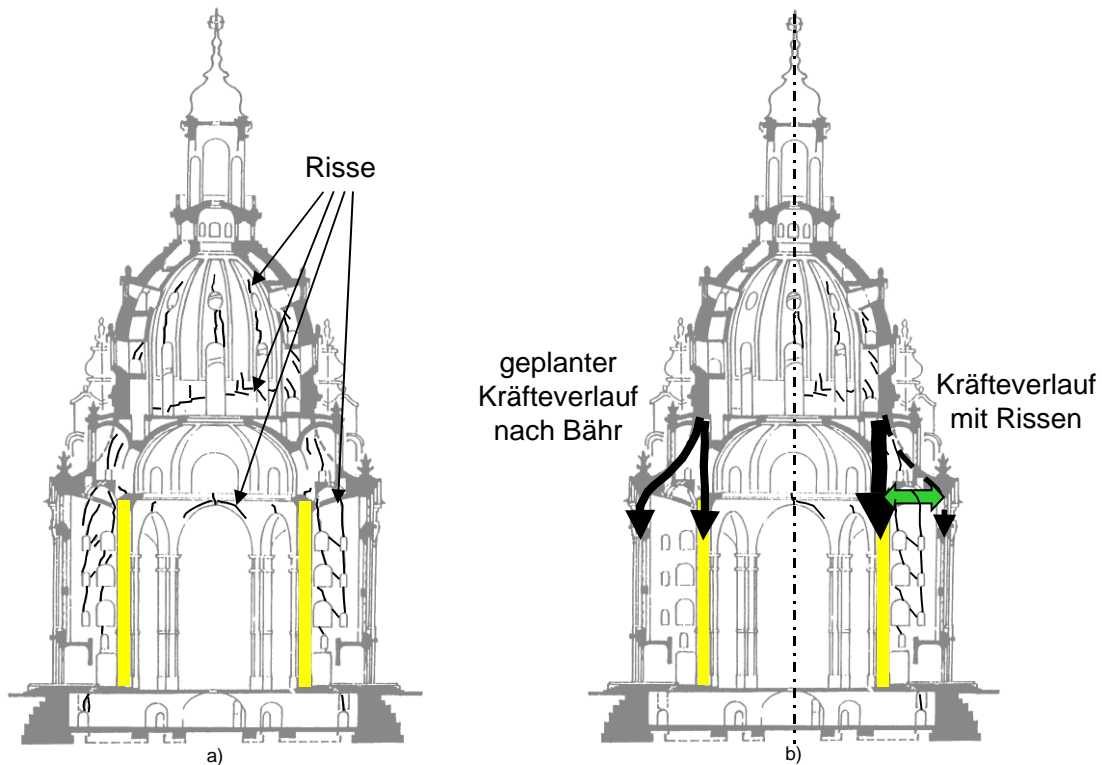


Bild 2 Vertikalschnitt durch die historische Kirche: a) Rissbilder, b) Kräfteverlauf innerhalb des Tragwerks

3 Geotechnische Untersuchungen und ihre Ergebnisse

Die Untersuchungen begannen noch vor dem Abräumen des Trümmerberges mit Hilfe von Baugrundbohrungen und Schürfen sowie – soweit zugänglich – von Durchbohrungen des Gründungsmauerwerks mit Erkundung des dann folgenden Baugrundes. Während des behutsamen Abtrages der Trümmer im Zeitraum Januar 1993 bis Mai 1994 erfolgten weitere Untersuchungen und Begutachtungen der jeweils freigelegten Bereiche (siehe Bild 4).

Enttrümmerung und späterer Wiederaufbau wurden durch regelmäßige geodätische Messungen an stehen bleibenden Gründungskörpern, vor allem zu ihrer Höhenänderung, begleitet.

Aus all diesen Untersuchungen, ergänzt durch ältere Baugrunduntersuchungen mit Altbohrungen aus dem Umfeld der Kirche, ergab sich folgende Baugrund- und Gründungssituation:

- Die Kirche steht als Ganzes auf holozänen bis pleistozänen Sanden und Kiesen der Elbe, die hier eine natürliche Erhebung bilden.

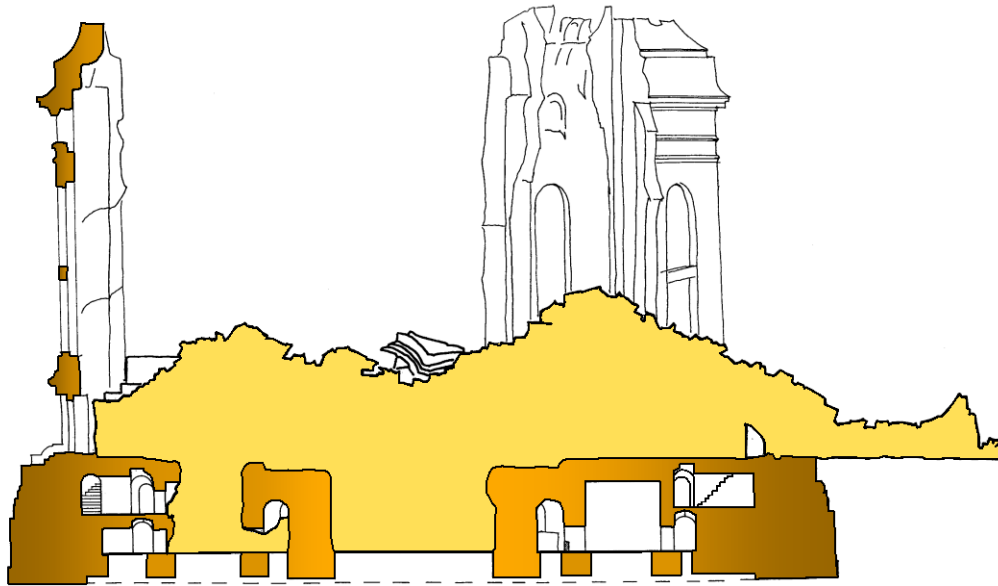


Bild 3 Schnitt durch Trümmerberg und die historischen Fundamente



Bild 4 Freigelegte Fundamente nach Abtrag des Trümmerberges im Jahre 1994

- Bindige Auebildungen, wie sie aus der unmittelbaren Umgebung der Kirche bekannt sind und die als mögliche Ursache für die früher beobachteten Schäden am Bauwerk anzusehen waren, reichen nicht bis unter die Kirche.

- Die Sande und Kiese werden in größerer Tiefe – etwa ab 12 m unter Unterkante der vorhandenen Gründungen – von einem kreidezeitlichen Mergelsandstein (sogenannter Pläner), zunächst als Zersatz in geringer Mächtigkeit, dann als Festgestein unterlagert.
- Die genannten Sande und Kiese, die vorwiegend weit gestuft sind und einen Anteil von $\leq 5\%$ Feinkorn besitzen, sind mindestens mitteldicht gelagert.
- Anhand von im Labor ausgeführten Triaxialversuchen und Ödometerversuchen ergab sich, dass diese Sande und Kiese eine hohe Reibungsfestigkeit ($\varphi' = 38^\circ$, $c' = 0$) und geringe Verformbarkeit unter Last mit Steifzahlen bei Erstbelastung von $E_S \geq 65 \text{ MN/m}^2$ bzw. bei Wiederbelastung von $E_S \geq 160 \text{ MN/m}^2$ besitzen.
- Das mittlere Grundwasser steht etwa 7 m unter Gelände und damit etwas unter Gründungsunterkante (siehe Bild 5). Hohe Grundwasserstände resultieren aus hohen, lang anhaltenden Wasserständen der nahen Elbe und können im Extremfall Flurnähe erreichen.
- Das vorhandene Mauerwerk der Wand- und Pfeilergründungen (Sandsteinmauerwerk) befindet sich in einem sehr guten Zustand. Das gilt sowohl für den Sandstein als auch für den Fugenmörtel.

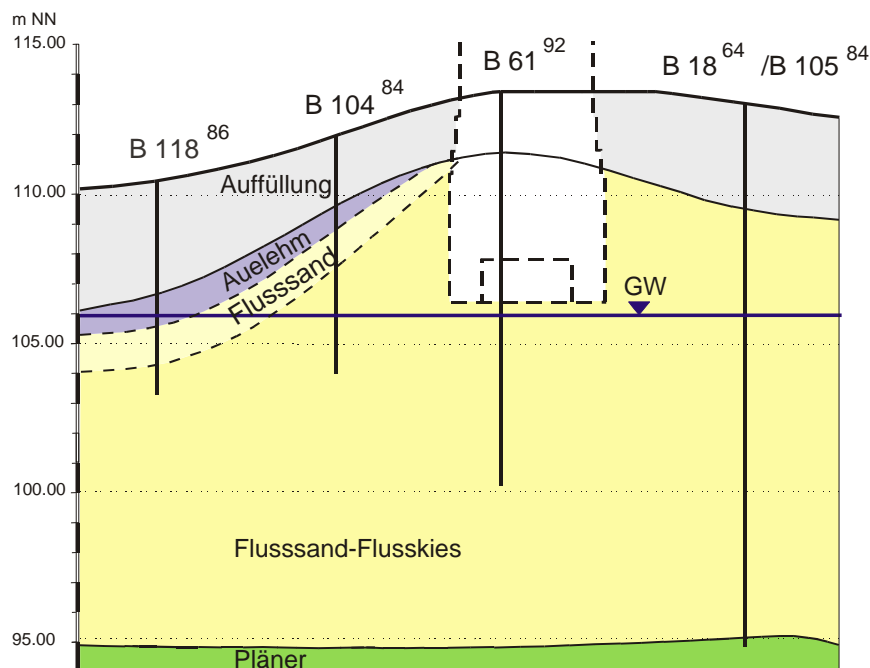


Bild 5 Baugrundverhältnisse unter der Kirche

In Bild 5 sind die Baugrundverhältnisse einem etwa ostwest-orientierten Schnitt dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Kirche an dem geotechnisch günstigsten Standort befindet.

4 Schadensanalyse und Gründungskonzept für den Wiederaufbau

Das Schadensbild der Kirche nach den bis zu ihrer Zerstörung gemachten Beobachtungen äußerte sich u.a. in Rissen in der steinernen Kuppel selbst und in den Wandscheiben zwischen den Pfeilern und Außenwänden sowie in nach außen verkippten Außenwänden mit entsprechenden Überhängen der Hauptgesimse (siehe Bild 2a).

Es hat sich gezeigt, dass sich die Außenwände dem Abtrag der Kuppellasten wegen ungenügender Steifigkeit im Bereich des Kuppelanlaufes teilweise entzogen haben und dadurch die Innenpfeiler besonders hoch beansprucht wurden (siehe Bild 2b).

Vermutlich sind sehr hohe Sohldrücke am gedrückten Rand der Pfeilerfundamente, auf denen die Pfeiler nicht mittig stehen, aufgetreten, und Plastifizierungen am Fundamentrand waren dabei nicht auszuschließen. Die Folge waren Setzungen – trotz des guten Baugrundes – in der Größe mehrerer Zentimeter und entsprechende Setzungsdifferenzen zwischen Pfeiler- und Wandfundamenten. Insofern war der Baugrund – wenn auch nur mittelbar – an den eingetretenen Schäden am Tragwerk beteiligt.

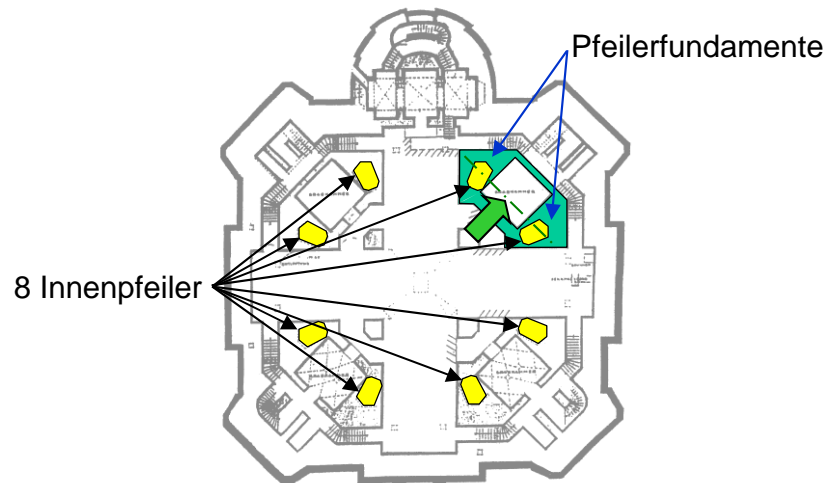
Noch in den Jahren 1937 bis 1942, also kurz vor ihrer Zerstörung wurde im Zuge einer Sanierung der Kirche versucht, die Flächen der Pfeilerfundamente gemäß Bild 6b durch zwischengeschaltete umgekehrte Stahlbetongewölbe zu vergrößern und damit die Sohldrücke zu reduzieren. Der grüne Pfeil in Bild 6a weist auf die Lage des in Bild 6b dargestellten Querschnittes durch ein Pfeilerfundament hin.

Die Wirkung dieser Maßnahme kann aber nur gering gewesen sein, da sich notwendige Vertikalverschiebungen des Gewölbes zur Aktivierung von Sohldrücken in nennenswerter Größe so nur begrenzt realisieren lassen.

Mit den Ergebnissen der genannten Untersuchungen wurde schließlich folgendes gründungstechnisches Konzept für den Wiederaufbau zugrunde gelegt:

- Die Wand- und Pfeilerfundamente der Kirche sind intakt, auch dort, wo während der Standzeit der Kirche und bei ihrem Einsturz Wandverschiebungen bzw. geringe Fundamentverdrehungen stattgefunden haben.
- Auf diesen Fundamenten kann die wiederaufzubauende Kirche gegründet werden, wenn – anders als beim historischen Bauwerk – die Bauwerkslasten so auf die Pfeiler- und Wandfundamente verteilt werden, dass die auftretenden Setzungen untereinander etwa gleich werden.
- Sondermaßnahmen zur Baugrundertüchtigung, wie Injektionen oder gar Tiefgründungen, sind nicht erforderlich oder sogar schädlich.

a)



b)

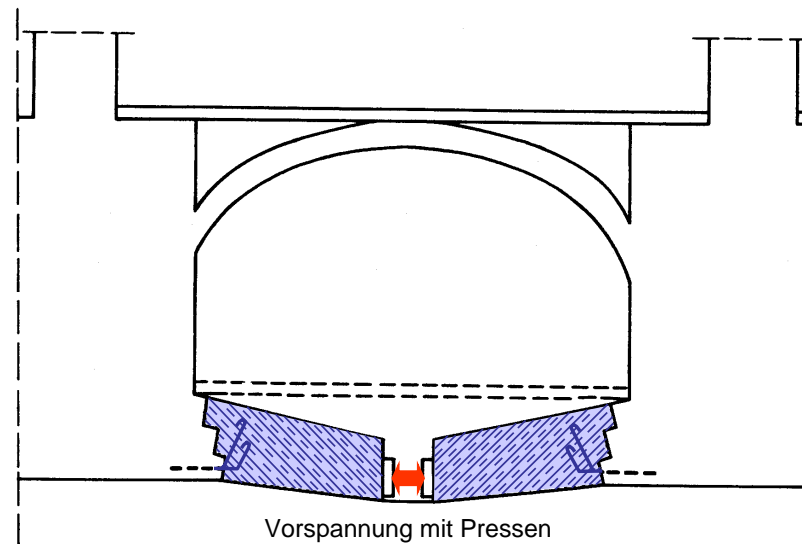


Bild 6 Verstärkung der Pfeilerfundamente in den Jahren 1937 bis 1942: a) Schnittführung durch das Pfeilerfundament, b) Konstruktion des umgekehrten Stahlbetongewölbes

Das Konzept des Tragwerksplaners zum Bau der steinernen Kuppel mit einem Ringanker mit definierter Vorspannung in Höhe des Hauptgesimses (Jäger, Stoll 2002) trägt der zu fordernden Lastaufteilung Rechnung. Es führt – auch als Ergebnis von Finite-Elemente-Berechnungen – zu einer erheblichen Reduzierung der Sohlspannung unter den Pfeilern, wobei nun mit mittleren Spannungen von $\sigma \leq 800 \text{ kN/m}^2$ und Randspannungen von $\sigma \leq 1200 \text{ kN/m}^2$ zu rechnen ist. Damit bleiben die Spannungen hier deutlich unter dem Erstbelastungszustand. Er wird bei den Wandfundamenten überschritten, die aber bezüglich ihrer Setzungen ohnehin unkritisch sind.

Für dieses Tragwerkskonzept waren mit dem im Labor ermittelten Baugrundkennwerten als Ergebnis von konventionellen Setzungsberechnungen Mittensetzungen der Pfeiler-

fundamente von $s \leq 2$ cm und Schiefstellungen von $\alpha \leq 0,0015$ zu erwarten, die z.T. bereits vor dem Bau der Kuppel eintreten.

Das o.g. Tragwerkskonzept in Verbindung mit einer umfassenden Wiederverwendung der alten Kirchengründung wurde schließlich realisiert.

Eine Abdichtung des Kellers der Kirche, d.h. der sogenannten Unterkirche gegen von außen drückendes Wasser bei hohen Grundwasserständen wurde nicht vorgesehen. Sie wäre bautechnisch auch im Sinne eines historischen Aufbaus nicht zu realisieren gewesen. Zur Trockenhaltung dient vielmehr eine Grundwasserabsenkanlage mittig unter der Kirche, die im Hochwasserfall anspringen soll.

Im Unterschied zur historischen Kirche wird für die Nutzung der wieder aufgebauten Kirche einschließlich der Unterkirche Platz für Haustechnik, Garderoben und Toiletten benötigt. Hierfür wurde ein unterirdisches Außenbauwerk errichtet (siehe Bild 7 und Bild 9). Dieses Außenbauwerk reicht bis zur Tiefe der historischen Außenfundamente und umschließt den historischen Gründungsteil an der Seite des Chorbereiches und an den beiden angrenzenden Seiten. Die Decke des Außenbauwerkes liegt nur wenig unter der Höhe des späteren gepflasterten Neumarkts. Das Außenbauwerk wurde als wasserdichte, auftriebssichere Stahlbetonkonstruktion ausgeführt.



Bild 7 Baugrube für das Außenbauwerk mit Spundwandverbau und freigelegtes Außenmauerfundament im Jahre 1995

Bild 7 zeigt die zur Errichtung des Außenbauwerkes vergrößerte Baugrube und ein freigelegtes Außenmauerfundament der Kirche. Aus Platzgründen wurde die Baugrube mit einem einfach rückverankerten Spundwandverbau umschlossen.

5 Bauzeitliche Feststellungen

Die Beherrschung der Verformungen an diesem Bauwerk ist – wie auch die Vergangenheit gezeigt hat – in besonderem Maße entscheidend für die Gewährleistung der Stand- und Funktionssicherheit der Kirche.

Das Abräumen des bis zu 14 m hohen Trümmerberges und der Wiederaufbau der Kirche wurden kontinuierlich durch geodätische Messungen an Festpunkten im Gründungsbereich und am aufgehenden Bauwerk kontrolliert.

Bei der Entrümmerung wurden an allen von dieser Entlastung betroffenen Gründungsbereichen Hebungen festgestellt, die etwa synchron zur Abnahme der Trümmerberghöhe, d.h. zur Größe der wirksamen Auflast verliefen. Für ausgewählte Gründungsbereiche – dort, wo eine definierte und weitgehende Entlastung erfolgte – konnten bei Spannungsänderungen von $\Delta\sigma = -150 \text{ kN/m}^2$ bis $\Delta\sigma = -180 \text{ kN/m}^2$ aus den gemessenen Hebungen Entlastungsmoduln für den unterlagernden Baugrund in einer Größe von $E_{s,e} = 160 \text{ MN/m}^2$ bis $E_{s,e} = 360 \text{ MN/m}^2$ abgeleitet werden. Sie entsprechen etwa den Steifezahlen für eine Wiederbelastung und liegen damit z.T. deutlich über den im Labor ermittelten Steifigkeiten.

Der eigentliche Wiederaufbau der baulichen Hülle und damit der Lasteintrag in die Gründung endete im Juni 2004 mit der Fertigstellung der Laterne auf der Kuppel und dem Aufsetzen des Kuppelkreuzes. Aus den während des Wiederaufbaues der Kirche gemäß (Schütze, Weber 2004) gemessenen Verformungen im Gründungsbereich, die für 2 repräsentative Bereiche in Bild 9 angegeben sind, ergibt sich:

- Die Setzungen, die im Anschluss an die Hebungen infolge der Entrümmerung (1993 bis 1995) gemessen wurden, sind quasi abgeklungen.
- Die seit Ende der Entrümmerung bzw. Beginn des Wiederaufbaues eingetretenen Setzungen liegen im Bereich der Pfeilerfundamente sehr gleichmäßig bei 9 mm, bei den Wandfundamenten zwischen 2 und 5 mm, d.h. die Verformungsunterschiede zwischen Pfeilern und Wänden sind entsprechend klein.

Da diese Unterschiede z.T. während des Baues noch vor Aufführen der Kuppel eingetreten sind, sind sie für die Beanspruchung des Tragwerkes kaum relevant.

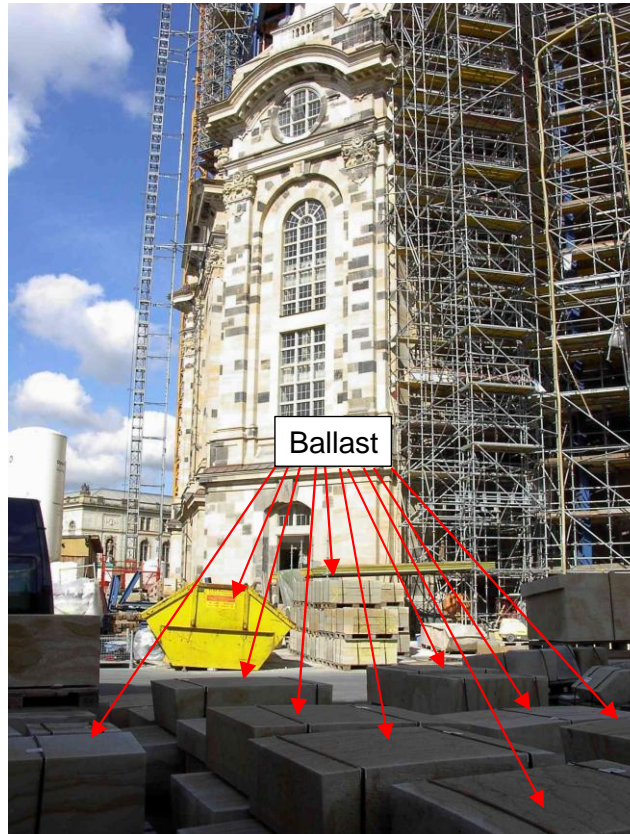


Bild 8 Ballastierung des Außenbauwerkes im Bereich des Technikellers während des Hochwassers im August 2002

Während der Hochwasserkatastrophe im August 2002 stieg das Grundwasser weit über die Gründungsunterkante der historischen Fundamente, so dass Wasser in die bereits genutzte Unterkirche eindrang. Eine kritische Situation trat für das unterirdische Außenbauwerk ein, weil der extrem hohe Grundwasserstand den Bemessungswasserstand für den Nachweis der Sicherheit gegen Auftrieb des Außenbauwerkes zu erreichen drohte. Vorsorglich wurden Baumaterialien zur Ballastierung in die Bereiche des Außenbauwerkes umgestapelt (siehe Bild 8).

6 Setzungsprognosen

In der Planungsphase wurden umfangreiche numerische Berechnungen sowohl zur Ermittlung des Kräfteverlaufes im Tragwerk der Kirche als auch zur Ermittlung der Fundamentsetzungen durchgeführt, wobei die Interaktion Baugrund-Bauwerk angemessen berücksichtigt wurde. Die in (Markert 2000) durchgeführten Finite-Elemente-Berechnungen hatten vorrangig zum Ziel, Setzungsprognosen für den Wiederaufbau mit realitätsnah modellierten Untergrundverhältnissen und mit der Berücksichtigung der komplexen Belastungsgeschichte in der Gründungsebene zu erstellen.

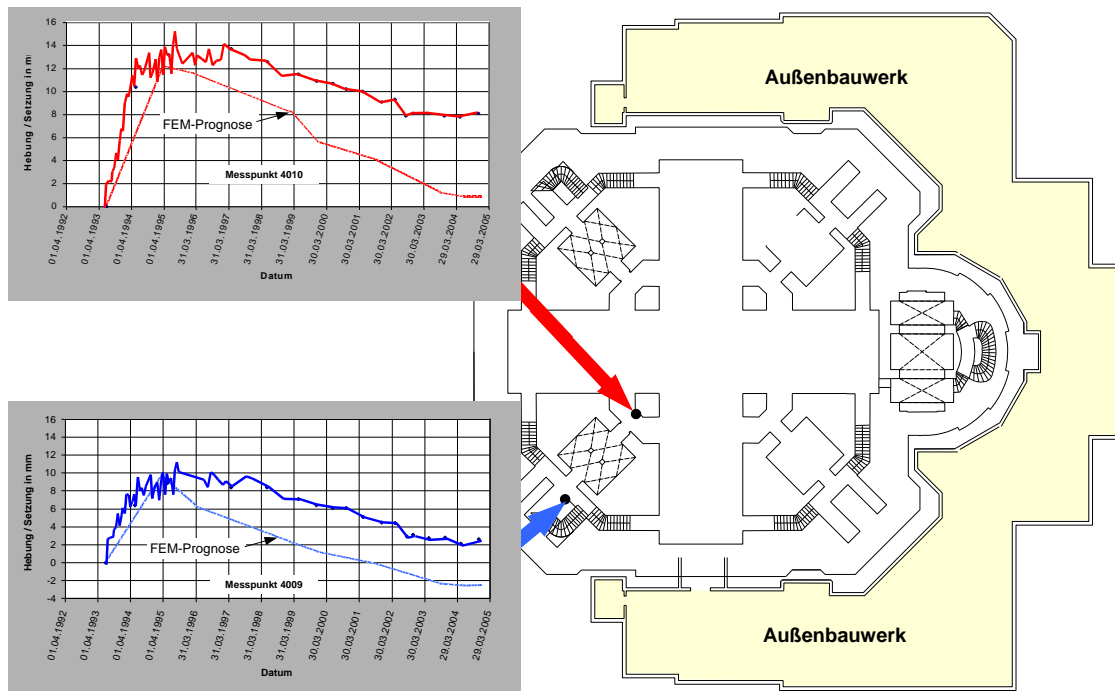


Bild 9 Grundriss in der Gründungsebene mit Außenbauwerk – Ergebnisse der beobachteten und prognostizierten Hebungen/Setzungen eines Pfeilerfundamentes und im Außenbereich

In dem rotationssymmetrischen Finite-Elemente-Modell bildeten vereinfacht die historischen Gründungselemente, der Trümmerberg und der umgebende Baugrund das FE-Netz. Die Fundamentlasten für die einzelnen Bauzustände und den Endzustand wurden den umfangreichen Berechnungen des Tragwerkplaners entnommen.

Zur Erfassung des Spannungs-Verformungsverhaltens der Flussand-Fluskes-Schichten wurde ein nichtlineares elasto-plastisches Stoffmodell (Hardening Soil Model) verwendet. Damit können insbesondere die unterschiedlich großen Steifigkeiten bei Erstbelastung und Entlastung/Wiederbelastung berücksichtigt werden. Die Parameter für das Stoffmodell wurden anhand der Ergebnisse von Ödometerversuchen und Triaxialversuchen bestimmt. Dazu wurde ein nachgemischter Modellboden verwendet. Die Steifigkeitsparameter des Stoffmodells wurden nachträglich so angepasst, dass die rechnerischen Setzungen bzw. Hebungen mit den bereits vorliegenden Messergebnissen gut übereinstimmten (siehe Bild 9).

Für die Größe der Setzungen war entscheidend, die Vorbelastungen aus historischem Kirchenbau und Zerstörung, d.h. aus einer Umlagerung der Fundamentlasten in eine Belastung aus Trümmerberg, zu berücksichtigen, denn bei einer maßgeblichen Wiederbelastung des Baugrundes sind wegen seiner sehr viel größeren Steifigkeit kleinere Setzungen zu erwarten. Insgesamt wurden 18 Berechnungsphasen (7 Phasen Belastungsge-

schichte, 11 Phasen Herstellung des Bauwerkes) in der Finite-Elemente-Prognose für die Setzungen während des Wiederaufbaus berücksichtigt (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1 Berechnungsschritte für die FE-Prognose der Hebungen bzw. Setzungen im Gründungsbereich

Lfd. Nr.	Bezeichnung
1	Ausgangszustand ohne Bauwerk
2	Historischer Baugrubenaushub
3	Belastung infolge historischen Kirchenbaus
4	Verfüllen der historischen Baugrube
5	Grundwasseranstieg
6	Trümmerberg (Zerstörung 1945)
7	Entrümmerung
8	Baugrubenverbau
9	Baugrubenaushub
10	Einbau des Außenbauwerkes
11	Verfüllung der Baugrube
12	Grundwasserabfall
13	Belastung infolge Bauzustand – Höhe ca. 23 m
14	Grundwasseranstieg
15	Belastung infolge Bauzustand – Höhe ca. 31 m
16	Belastung infolge Bauzustand – Höhe ca. 38 m
17	Belastung infolge Bauzustand – Höhe ca. 62 m
18	Belastung infolge Endzustand

In Bild 9 sind außer den beobachteten Hebungen/Setzungen eines Pfeilerfundamentes und im Außenbereich die entsprechenden Ergebnisse der Finite-Elemente-Berechnungen dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass die prognostizierten Hebungen und insbesondere die prognostizierten Setzungen größer sind als die entsprechenden Messergebnisse. Der Grund dafür ist, dass die im Berechnungsmodell verwendete Bodensteifigkeit für Entlastung/Wiederbelastung trotz vorgenommener Anpassung an gemessene Hebungs-Setzungsverläufe in situ immer noch zu klein war.

Auch die rechnerischen Setzungen der anderen, während der Planungsphase erstellten Prognosen für den Wiederaufbau der Kirche, auf deren Grundlage die für die Tragstruktur zulässigen Fundamentsetzungen, -setzungsunterschiede und -schiefstellungen festgelegt wurden, waren im Vergleich zu den Messergebnissen größer. Die Steifigkeit bzw. die Tragfähigkeit des Baugrundes unter den historischen Gründungen der Frauenkirche dürfte somit größer sein, als sie anhand der umfangreichen geotechnischen Untersuchungen erwartet werden konnte.

7 Schlussbemerkungen

Der Wiederaufbau der Kirche in historischer Form und mithistorischem Material ist glücklich vollendet (Bild 10). Dazu trägt auch die weitgehende Belassung der historischen Gründung der Pfeiler und Wände bei.



Bild 10 Die außen vollendete Frauenkirche im Juli 2005

Die mit dem Wiederaufbau im Gründungsbereich gemessenen Verformungen bestätigen das Tragwerks- und Gründungskonzept und die daraus resultierende hohe Standsicherheit dieses Teiles der Kirche.

Die Autoren möchten an dieser Stelle hervorheben, dass auch der damalige Geschäftsführer von BAUGRUND DRESDEN, Herr Dr.-Ing. Erich Rehfeld sich maßgeblich für die Gründung auf den historischen Fundamenten eingesetzt hat.

Erwähnt sei auch Dr. Rehfelds persönliches Engagement als Stifter für den Förderverein Frauenkirche e. V.. Stellvertretend für viele Bewunderer der Frauenkirche sei ihm hierfür gedankt.

Literatur

Schütze, B., Weber, H. (2004)

Büro für Industrievermessung Prof. Schütze & Dr. Weber, Wiederaufbau Frauenkirche, Protokolle zur Deformationsmessung, November 2004

Franke, D (1992)

Die Dresdner Frauenkirche und ihre Gründung beim Wiederaufbau, Vorträge der Baugrundtagung 1992 in Dresden, S. 81 – 87

Jäger, W., Stoll, V (2002)

Die Dresdener Frauenkirche. Grundzüge der Statik, Dresdner Hefte 20 (2002), H. 71, S. 48 – 56

Markert, U. (2000)

Möglichkeiten zur Vorhersage von Setzungen beim Wiederaufbau der Frauenkirche Dresden mit Hilfe moderner Berechnungsverfahren. TU Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau, Diplomarbeit

Siegel, K. (1991)

Bautechnische Aspekte des Wiederaufbaus der Dresdner Frauenkirche, Deutsche Bauzeitung 1991, H. 11, S 72 – 79

Wenzel, F. (1996)

Ein Bau aus Stein und Eisen. Die bautechnische Konzeption zum Wiederaufbau der Frauenkirche zu Dresden, Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden 45, Sonderheft, S. 48 – 53

Zumpe, G. 1998)

Die Tragende Steinerner Glocke und die Kuppel der Frauenkirche zu Dresden, Bauingenieur 73 (1998), H. 6, S. 259 – 266