



Abb. 10. Gründungsdetail an der Felswand des Westflügels von Schloß Nossen (Foto: Verf.).

Ausgangspunkt ist dabei die mit der Verbreiterung und Vertiefung des Burggrabens im Jahre 1545 erfolgte Versteilung des Hanges.

Ingenieurgeologische Untersuchungen

Der zu sanierende Hangbereich wurde geologisch kartiert. Das für die erforderlichen Standsicherheitsnachweise maßgebende Trennflächengefüge wurde dabei mittels stereo-

photogrammetrischer Auswertung erfaßt. Mit einer klein-kalibrigen Kernbohrung wurde die Mächtigkeit der Auflockerungszone erkundet. Vom angewitterten Phyllit wurden gesteinsmechanische Kennwerte ermittelt. Ziel der Untersuchungen sind die Erstellung eines möglichst realen geotechnischen räumlichen Modells als Grundlage für Standsicherheitsuntersuchungen und eine möglichst naturgemäße Sanierung.

Literaturhinweise

- (1) Autorenkollektiv: Rudolstadt eine Residenz in Thüringen, Leipzig 1993.
- (2) Thauer, G.: Geotechnische Analyse von Bauschäden am Beispiel der Heidecksburg/Rudolstadt, unveröff. Studienarbeit, Freiberg 1992.
- (3) Preiß, W.: Übersicht über den konstruktiven Bauzustand der Stützmauern von Schloß Heidecksburg, unveröff. Man., Dresden 1976.
- (4) Hoffmann, G.: Ingenieurgeologisches Gutachten zu Schadstellen im Bereich des Schloßkomplexes Heidecksburg, unveröff. Man., Gera 1976.

- (5) Autorenkollektiv: Protokolle zur Unterspülung Schloßcafe und eines Mauersturzes östlich vom Schloßcafe vom 24., 26. und 28. Juni 1975 sowie Ergänzung vom 4.7.1975, unveröff. Man., Rudolstadt 1975.
- (6) Puff, P.: Erläuterungen zur geologischen Spezialkarte der Deutschen Demokratischen Republik, Blatt Rudolstadt, 5234, Zentrales Geologisches Institut, Jena 1963.
- (7) Lynx Geosystems Inc.: The Lynx-System, User Documentation, Vancouver 1991.
- (8) Volkman, N.: Mikropetrographische Untersuchung an holozänen Bodensedimenten im Gebiet der Runneburg, unveröff. Man., Freiberg 1993.

Ralf-Jürgen Erber/Ralf Thiele

Zerstörungsarme Geometrie- und Zustandsermittlung für historische Gründungen, bestehend aus Naturstein, Ziegel und Holz

1 Einleitung

Für den Erhalt und die Instandsetzung von Burgen und Schlössern ist in vielen Fällen die Kenntnis von Geometrie, Zustand und Kinematik der Gründungen notwendig. Aus dem Zustand von Gründungsteilen lassen sich Schadensursachen und die Notwendigkeit von Sicherungskonstruktionen ableiten.

Die Erarbeitung dieser Daten ist jedoch aus boden- und bauhistorischen Aspekten mit möglichst wenig Substanzeingriffen (zerstörungsfrei) zu realisieren. Anhand von Fragen und Problemen bei der Arbeit im historischen Gründungsbereich werden Verfahren vorgestellt, welche durch die Hochschule Leipzig erarbeitet, eingesetzt bzw. weiterentwickelt wurden.

Abb. 1. Schloß Schwerin –
Ansicht (Foto: Verf.).



Die Beispiele stammen aus der Untersuchungs- und Forschungstätigkeit am Schweriner Schloß (1, 2, 3, 4, 5, 10, 11).

Das Schweriner Schloß

Die Bebauung der Schloßinsel kann bis in das Jahr 900 zurückverfolgt werden. Der heutige Gebäudekomplex stammt aus der großen Umbauphase in den Jahren 1845–54 nach Plänen von Demmler (Abb. 1). Vielfältige Reste der Vorgängerbebauung sind heute noch vorhanden. Das Schloß weist bereichsweise Schäden auf, die häufig durch Baugrund- und Gründungsschwächen erklärt werden können. Eine Sicherung bzw. Sanierung einzelner Teile ist erforderlich, wünschenswert hierbei eine unterstützende, substanzschonende, mit der Nachbarbebauung verträgliche Lösung.

2 Probleme, Verfahren, Untersuchungen

2.1 Aufbau und Zustand der Gründung

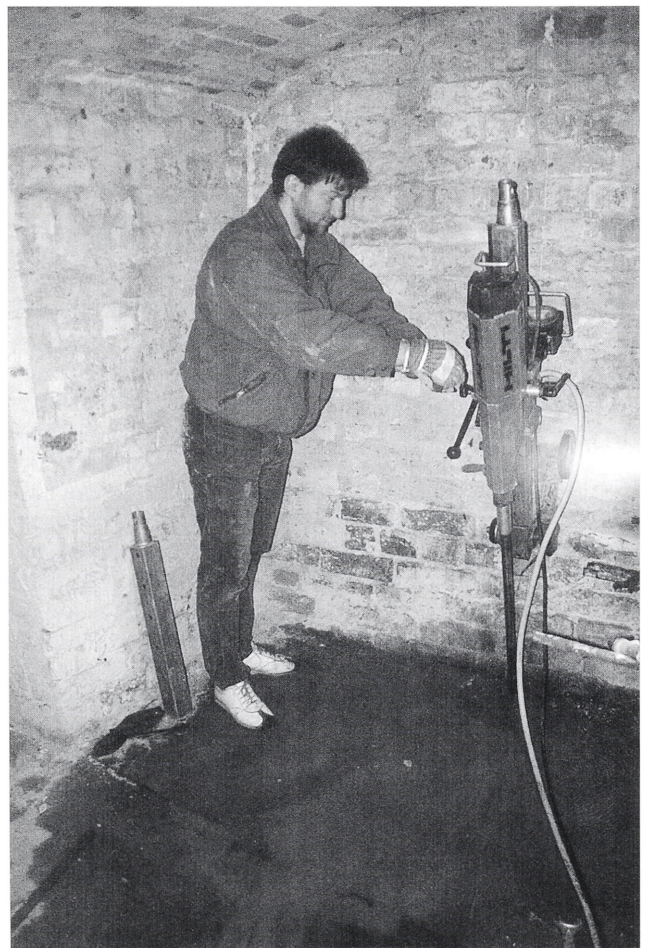
(Breite, Tiefe, Hohlräume, Mehrschaligkeit, Kontaktfläche Baugrund, Unterlagerungen – Holz)

Die Gebäude des heutigen Schloßensembles entstanden während mehrerer Umbauphasen zwischen 1600 und 1845. Dabei wurden auch in bestehende Gebäudekomplexe neue Bauteile eingesetzt (z. B. Hauptturm). Heute gibt es in diesem Bereich deutliche Setzungsunterschiede, die auf Gründungsschwächen zurückzuführen sind. Der Versuch einer Klärung dieser Setzungen ist für die Erarbeitung eines Sanierungsvorschlages sehr wichtig, da jede Ursache zu einer anderen Sicherung führen kann (3, 4, 5).

Für diese Arbeiten wurde ein Kernbohrgerät durch Zusatzteile und Eigenbauten ergänzt. Durch eine horizontale und vertikale Verstellbarkeit sind alle gewünschten Bohrrichtungen realisierbar (Abb. 2). Für die Aufschlüsse steht ein System aus Einzel- oder verlängerbaren Kronen bei einem Durchmesser von 25/32 mm zur Verfügung. Die bisher realisierte maximale Bohrlänge beträgt über 4 m. Der innere Aufbau der Gründung wird durch den gewonnenen Kern und eine zeichnerische Aufnahme bei der Mauerwerksendoskopie dokumentiert. Beim Anschluß einer Kamera kann die Bohrlochbefahrung aufgezeichnet und an einem Moni-

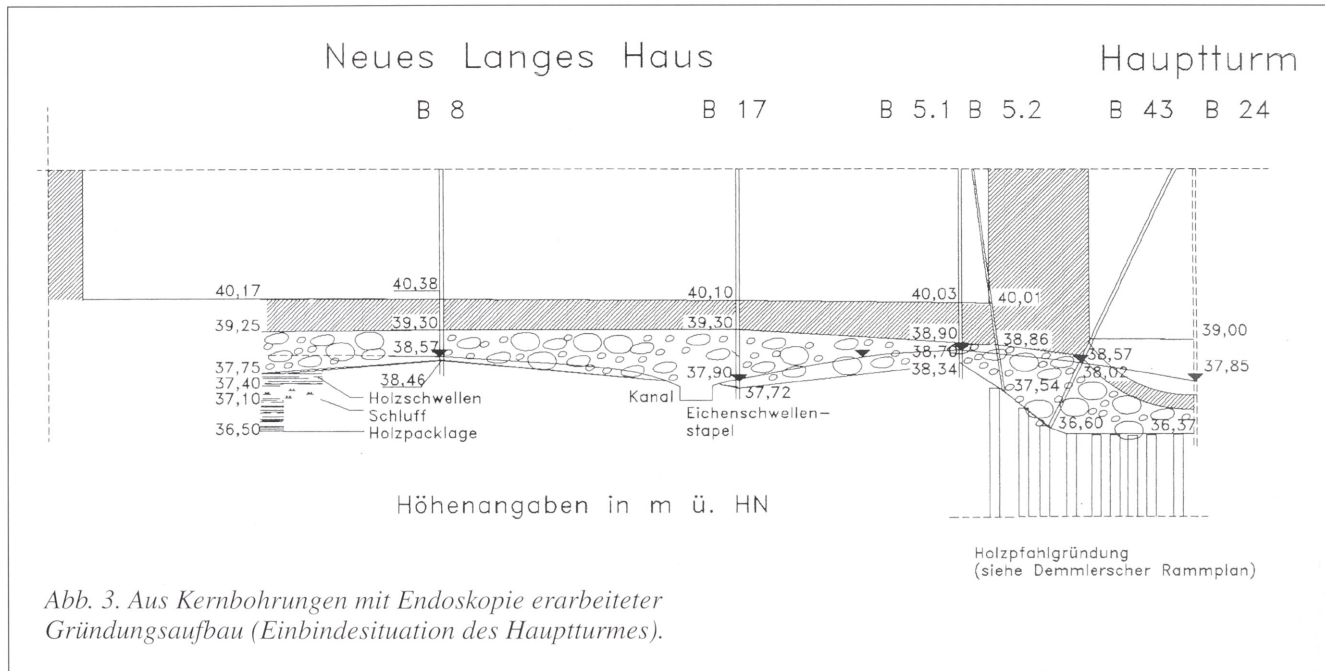
tor verfolgt werden (8, 9). Gegenwärtig wird an der weiteren Aufarbeitung der Videosignale (Einblendung von Orientierungsdaten während der Endoskopie, Zusammensetzung von Einzelbildern zu einer farbigen Bohrlochabwicklung) gearbeitet.

Abb. 2. Mauerwerkskernbohrung (Foto: Verf.)



Durch insgesamt 11 Kernbohrungen (9) im Bereich des Hauptturmes konnte festgestellt werden, daß die Holzpfahlgründung des Turmes deutlich unterhalb der Grundwasser-oberfläche liegt. Bei mehreren Entnahmen von Holzproben wurde als Material Kiefer festgestellt; biologische Analysen und Dichtekontrollen ergaben nur geringe Schädigungen. Die vorhandenen älteren Gebäude haben eine 2 m höher liegende Gründungssohle. Für den Turmeinbau wurde eine ringförmig abgeböschte Baugrube hergestellt. Auf das Feldsteinbankett wurde eine Ziegelgründung in Form eines Contrebogens errichtet (Abb. 3). Die Arbeiten am Objekt (Bohrung und Endoskopie) waren nach drei Tagen beendet.

der nächsten Meßtiefe (nach 10 cm) werden die Schnitte um 60° versetzt zur vorhergehenden Teufe hergestellt. Pro laufenden Meter können bis zu 30 Prüfungen erfolgen. In direkter Nähe der Säge befindet sich ein Wegsensor. Über ein Schreiberdiagramm wird für jeden Schlitz ein Dehnungssignal über die Zeit aufgezeichnet. Diese Dehnungsänderung ist das bestimmende Maß für die vorhandene Druck- oder Zugspannung an diesem Punkt. Sie entspricht der Verformung vom belasteten zum lastfreien Zustand. Die Versuche werden nach dem Modell der unendlich ausgedehnten gelochten Scheibe ausgewertet. Für die Berechnung der Beträge und Richtungen der Hauptspannungen steht ein Auswerteprogramm zur Verfügung. Aus den je-



2.2 Statische Beanspruchung von Gründungsbauteilen (Belastung bei komplizierter oder unbekannter Überbauung, Bemessung von Nachgründungen)

Im Bereich der Terrassen haben sich infolge starker Rißschäden neue, bisher unbekannte Kräfteverläufe innerhalb der Säulenkonstruktion eingestellt. Für die Dimensionierung einer Nachgründung müssen die einzelnen Belastungsgrößen bekannt sein. Dies ist möglich entweder durch eine statische Berechnung ohne bzw. mit Einbeziehung von Annahmen zum veränderten Kräfteverlauf oder durch die Messung der gesuchten Größe.

Dazu wurde die für Untersuchungen im Fels eingesetzte Bohrlochschlitzsonde auf ihre Anwendbarkeit für eine Spannungsanalyse im historischen Gründungsmauerwerk untersucht. Bei der Arbeit mit diesem Gerät werden die Beträge und Richtungen der Hauptnormalspannungen in situ bestimmt, ohne das zu untersuchende Bauteil aus seiner Lage bzw. Einspannung zu entnehmen (8, 11). Das Bohrlochschlitzsondenverfahren beruht auf dem Prinzip der lokalen Spannungsentlastung. In einem Loch mit einem Durchmesser von 100 mm werden mit Hilfe einer pneumatisch angetriebenen kleinen Säge mit Diamantbesatz etwa 20 mm tiefe Schlitzte längs in die Bohrlochwand gesägt (Abb. 4). In jeder Tiefe können dabei drei Schnitte, jeweils versetzt um einen Winkel von 120° ausgeführt werden. In

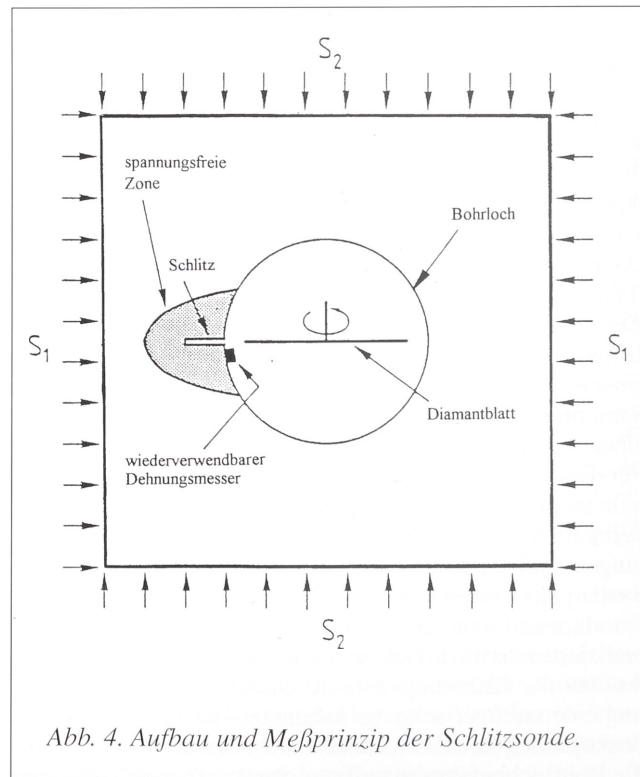
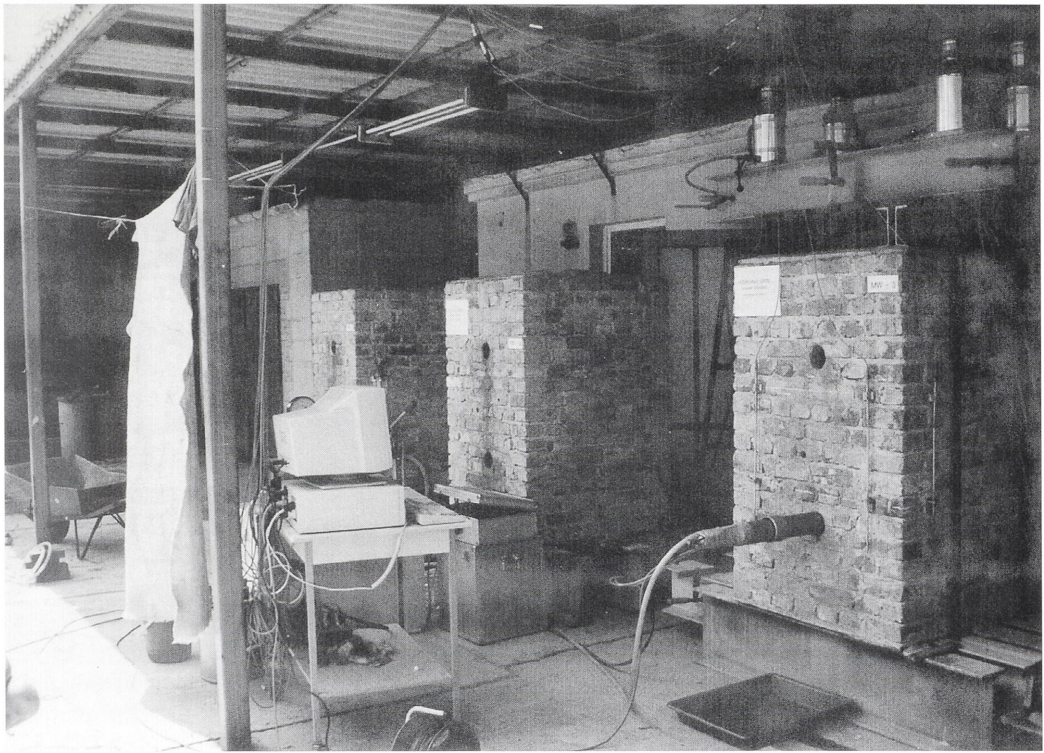


Abb. 5. Probefeld mit Mauerwerksversuchskörpern für Schlitzsondenversuche.



weils drei gemessenen Dehnungssignalen je Teufe, dem Verformungsmodul und der Querdehnzahl werden diese Größen in Abhängigkeit von der Teufe ermittelt. Die Ergebnisse der Messungen werden in einer Grafik aufgetragen, auf der die Richtung und der Betrag der Hauptspannungen sichtbar werden (11).

Den für die Umrechnung der Dehnungen in Spannungen erforderlichen Verformungsmodul kann man durch Bohrlöchaufweitungsversuche, z. B. Messungen mit einem Pressiometer oder Dilatometer, erhalten. Bei diesen Geräten wird in einem vorhandenen Bohrloch eine Gummimembran durch einen Innendruck an die Bohrlochwand angelegt. Eine weitere Druckerhöhung führt zu Verformungen des Mauerwerks, die über Wegaufnehmer (Dilatometer) bzw. Volumenänderung (Pressiometer) erfaßt werden. Die Versuche werden mit mehreren Be- und Entlastungsschleifen durchgeführt. Aus den aufgezeichneten Spannungs-Dehnungsbeziehungen kann ein Verformungsmodul nach der Lume-Formel für ein dickwandiges Rohr ermittelt werden.

Bisher wurden an sechs Objekten Messungen vorgenommen. Um zu prüfen, inwieweit die Ergebnisse der Schlitzsondenversuche den tatsächlich vorhandenen Spannungen entsprechen, wurde ein Versuchsprogramm mit neun großformatigen Versuchskörpern (bis $1,5 \text{ m}^3$) realisiert (Abb. 5). Die maximale Abweichung der gemessenen Spannung von der durch Pressen aufgebrachtene Belastung betrug 25%. Bei der Bestimmung der Richtung der Hauptnormalspannungen betrug die Abweichung im Mittel 9% (11). Gegenwärtig wird an einer verbesserten Verformungsmodulerfassung und der Modellierung der Spannungsverläufe im 3D-Modell mit der Methode der Finiten Elemente gearbeitet.

Die Spannungsanalyse im Gründungsmauerwerk wird damit durch die Messung von Dehnungen bzw. Stauchungen durch die Schlitzsonde am Gebäude möglich. Die Verformungsmoduln können durch Pressiometer- oder Dilatometerversuche oder aus Tabellenwerten bestimmt werden. Bei

den insgesamt 7 Messungen im Schweriner Schloß wurde der Ausfall eines Pfeilers aus dem Tragsystem festgestellt. Er war nur noch durch sein Eigengewicht belastet. Darüber bildete sich ein neues Gewölbetragsystem aus. Bei den Messungen wurden in den umliegenden Bereichen erhöhte Belastungen, einschließlich Lastneigungen, registriert (1).

2.3 Resttragfähigkeit von Holzgründungskonstruktionen (Belastbarkeit und Bruchverhalten längs und quer zur Faser, mittragende Funktion des Baugrundes, zeitliches Setzungsverhalten, biologischer Abbau)

Ein Großteil des Schweriner Schlosses steht auf einer Holzkonstruktion aus über 8000 Pfählen mit doppeltem Rostwerk. Im Laufe der Standzeit hat das Holz durch natürliche Alterung, biologische und chemische Prozesse (Zellabbau, Fäulnis) an Festigkeit und Tragfähigkeit verloren. Aussagen bezüglich der noch vorhandenen Resttragfähigkeit waren erforderlich. Bisher gelangte man zu diesen Versuchsdaten nur durch die Entnahme von größeren Proben. Dies war gleichbedeutend mit dem Verlust eines Bauteils (Pfahl, Bohle).

Deshalb wurden zerstörungsarme Meßverfahren auf ihre Anwendbarkeit im Naßholz (Wassergehalt über 100%) getestet und zwei geeignete Methoden in umfangreichen Serien weiter untersucht. Für die Bohrkernanalyse werden mit einem Hohlbohrer Kerne mit einem Durchmesser von 15 mm gewonnen und in einer speziellen Prüfeinrichtung belastet. Die Proben können aus Bohlen und Pfählen entnommen werden. Die Prüfung erfolgt entsprechend der Einbaulage längs bzw. quer zur Faser. Bei der Bohrwiderstandsmessung wird eine Nadel mit einem Durchmesser von 2,5 mm mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit in das Holz gebohrt (Abb. 6). Die dafür erforderliche Stromstärke kann als ein Maß für die Holzdicke angesehen werden. Durch den Vergleich mit parallel durchgeführten Würfeldruckversuchen konnten Abhängigkeiten zu festigkeitsbeschreibenden Parametern ($r = 0,85-0,95$) bestimmt

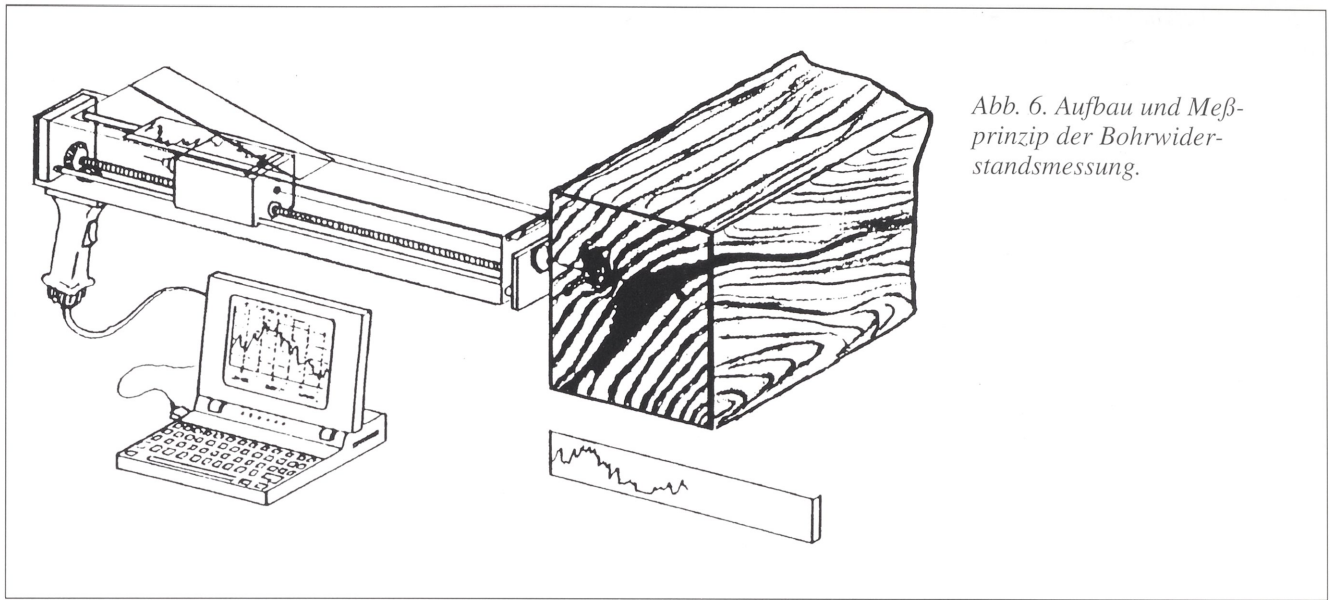


Abb. 6. Aufbau und Meßprinzip der Bohr- und Widerstandsmessung.

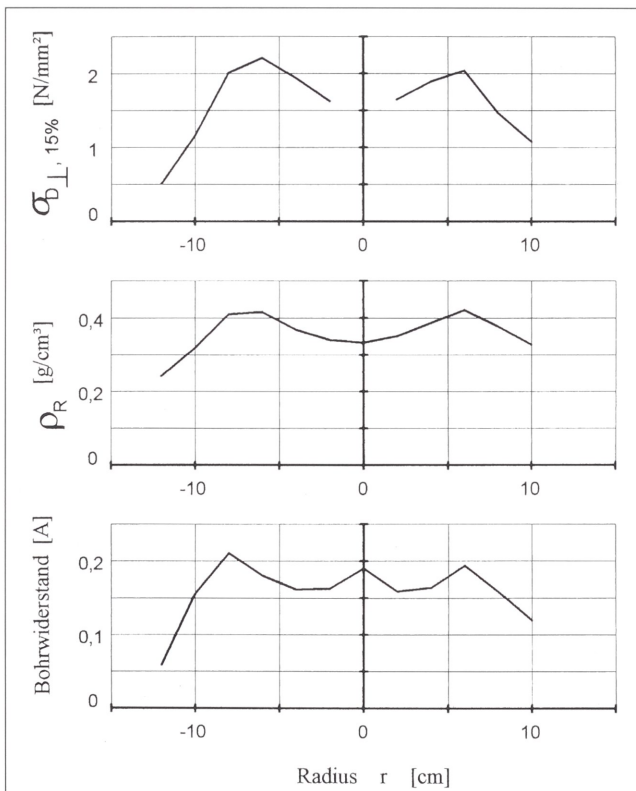


Abb. 7. Gegenüberstellung von gemittelter Bohr- und Widerstandsmessung und Daten der Würfel- und Druckversuche quer zur Faser (Raumdichte ρ_R und Druckfestigkeit bei 15% Stauchung $\sigma_{DL,15\%}$).

werden (Abb. 7). Die Prüfungen erfolgten an historischem und frischem Holz durch Bauteil-, Würfel- und zerstörungsarme Versuche (8).

Das aus Rostwerk- und Pfahlteilen gewonnene Material wurde zur Bestimmung von Kennwerten an ca. 2500 Einzelproben untersucht. Dabei wurden die Druckfestigkeiten an Würfel- und Bauteilprüfkörpern entsprechend den Einbaubedingungen längs bzw. quer zur Faser ermittelt. Die Serien wurden in Kern- und Splintproben unterteilt. Bei den Versuchen quer zur Faser erfolgte zusätzlich eine Aufteilung in

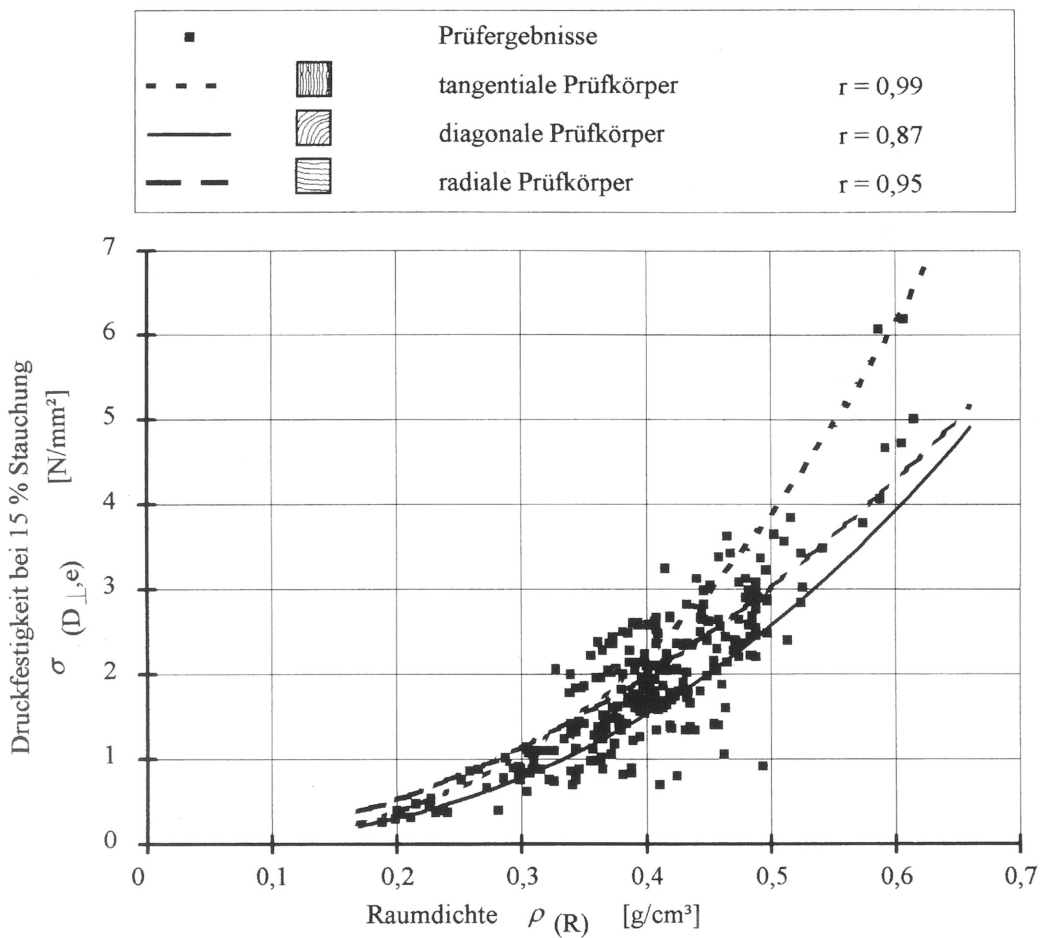
radiale, diagonale und tangentielle Prüfkörper (Abb. 8). Bei Querbelastung tritt kein deutlich erkennbarer Bruch auf. Als Rechenwert wird nach DIN 52 192 die Last angesetzt, bei der die Steigung der Tangente an die Spannungs-Dehnungs-Kurve $\frac{2}{3}$ der Steigung im anfänglichen elastischen Bereich entspricht. Diese Größe wird erweiterte Proportionalitätsgrenze σ_{DP} genannt. Außerdem wurde die Druckfestigkeit bei der konstanten Stauchung von 15% aufgenommen ($\sigma_{DL,15\%}$).

Das üblicherweise als Maß für die Dichte geltende Verhältnis von Masse zu Volumen von normalklimatisiertem Holz ist wegen irreversibler Schrumpfung von Altholz bei Trocknung nicht möglich. Demzufolge wird für Gründungsholz die Raumdichte ρ_R benutzt (*conventional density*), die als das Verhältnis von Darrgewicht zum Volumen im jeweiligen Quellungs-zustand definiert ist. Damit stellt ρ_R den Anteil von wasserfreiem Holz an einer Raumeinheit im Einbauzustand dar. Kiefer mit einer Darrdichte von $\rho_0 = 0,49 \text{ g/cm}^3$ bzw. einer Normalroh-dichte von $\rho_N = 0,52 \text{ g/cm}^3$ besitzt im ungeschädigten nassen Zustand eine Raumdichte von $\rho_R = 0,43 \text{ g/cm}^3$.

Die Feuchte von Bauteilen im Hochbau liegt bei etwa $u = 12\text{--}18\%$. Die Fasersättigung von Holz beträgt ca. $u = 30\%$. Darüber hinaus ist die Aufnahme von kapillarem Wasser möglich. Sind alle Hohlräume gefüllt, ist der maximale Wassergehalt erreicht. Er liegt bei ungeschädigter Kiefer bei Annahme einer Darrdichte von $\rho_0 = 0,49 \text{ g/cm}^3$ bei $u_{\max} \approx 170\%$. Höhere Wassergehalte sind nur durch den Abbau von Holzsubstanz (Sekundärwände der Zellen) möglich. Größen von $u = 200\text{--}300\%$ werden bei historischen Holzgründungsteilen häufig erreicht, selbst Wassergehalte von 800–1000% sind durchaus möglich.

So können Wassergehalt ($u > 170\%$) und Raumdichte ($\rho_R < 0,43 \text{ g/cm}^3$) erste wichtige Indikatoren für einen Substanz- und damit Festigkeitsverlust sein. Aber auch bei unveränderten Dichten können schon erhebliche Tragfähigkeitsverluste auftreten. Die Festigkeit von Holz ist stark vom Wassergehalt abhängig. Oberhalb der Fasersättigungsgrenze ($u < 30\%$) beträgt die Druckfestigkeit nur noch etwa 40% der Festigkeit bei $u = 12\%$. Für nasses ungeschädigtes Kiefernholz wird von einer mittleren Druckfestigkeit längs

Abb. 8. Abhängigkeit der Druckfestigkeit von Würfelproben quer zur Faser von der Raumdichte ρ_R bei einer Stauchung von 15% ($\sigma_{D_{\perp,15\%}}$).



zur Faser von $\sigma_{D_{II,naB}} = 20 \text{ N/mm}^2$ ausgegangen ($\sigma_{D_{II}} = 45 \text{ N/mm}^2$ nach DIN 68 364 bei $u = 12\%$).

Eine dendrochronologische Untersuchung ergab für die gewonnenen Holzteile eine Datierung von 1769 (Kern) bis 1845 (äußerster Splintring). Das eingebaute Holz war somit zum Einschlag 75 Jahre alt. Da 1845 erstmalig Arbeiten im Orangeriebereich erwähnt wurden, deckt sich der Fällzeitpunkt des Holzes mit den baugeschichtlichen Daten. Es handelt sich um Kiefernholz.

Die biologische und mikroskopische Untersuchung des seit 150 Jahren im Baugrund steckenden Gründungsholzes ergab folgendes: Über den gesamten Querschnitt liegt ein Bakterienbefall vor. Stark befallen ist die dunkel verfärbte Randzone. Im Übergangsbereich zwischen Kern- und Splintholz nimmt der Befall deutlich ab. Die Folge ist ein teilweiser Abbau bzw. eine Aufweichung von Holzzellen im äußeren Splintbereich. Insgesamt ist aber kein wesentlicher Abbau von Zellwandsubstanz erfolgt. Holzzerstörende oder holzverfärbende Pilze, einschließlich Moderfäulekavernen, wurden nicht festgestellt. Dichtemessungen mit Isotopenstrahlung ergaben keinen merklichen Dichteverlust.

Zur Abschätzung des Festigkeitsverlustes der Gründungshölzer am Schweriner Schloß wurden die Würfel- und Bauteilprüfungen auch an neuem Holz durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, daß die Tragfähigkeit der parallel zur Faser beanspruchten Pfähle nur um maximal 20% abgenommen hat. Der Verlust im Kopfbereich ist deutlich größer als in tieferliegenden Abschnitten. Ursache dürfte die über die Tiefe abnehmende Belastung des Pfahles sein. Bei den

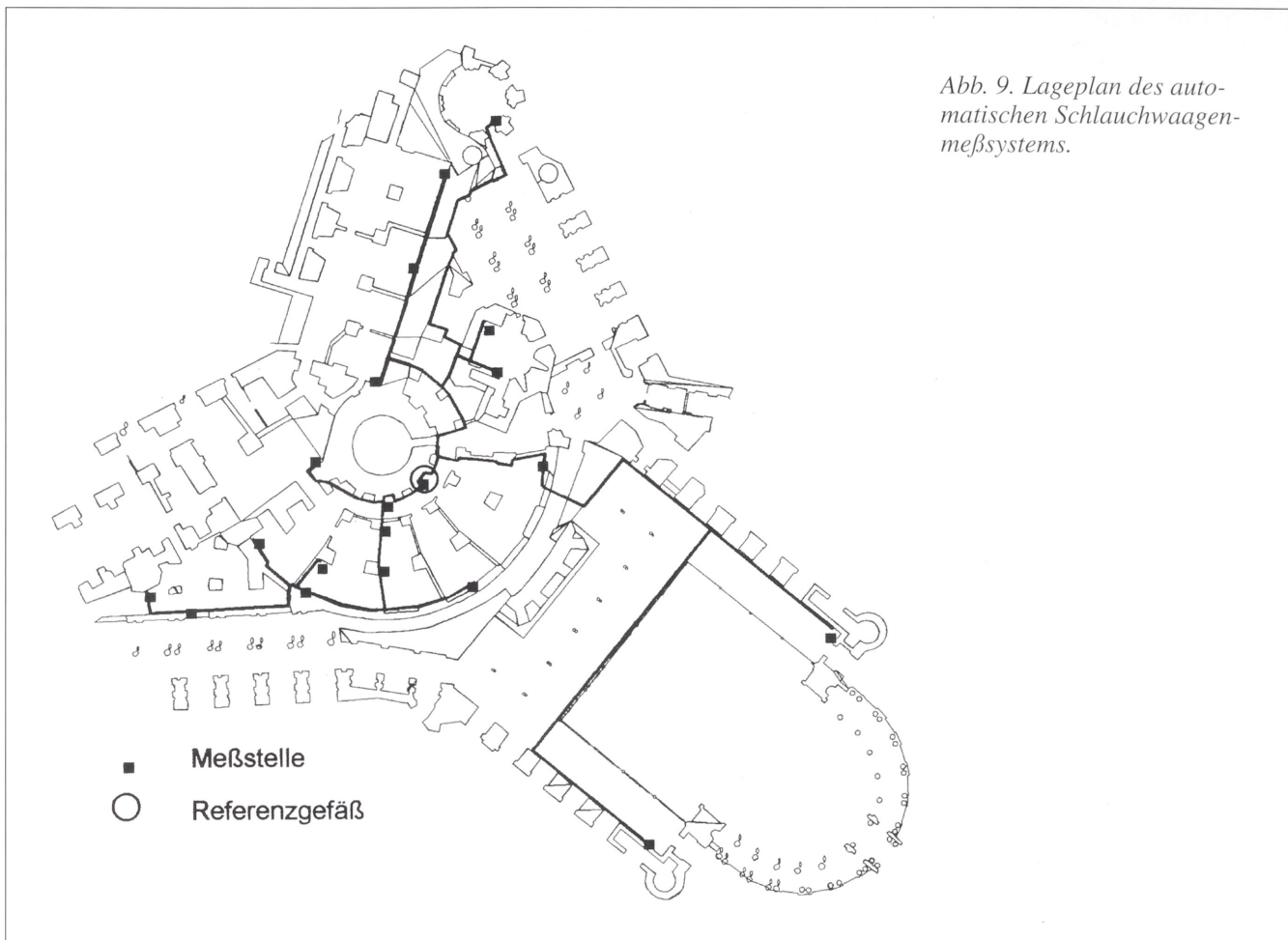
quer zur Faser belasteten Rähmen beträgt der Festigkeitsverlust bis 30%. Bei dieser Belastungsrichtung tritt kein deutlich erkennbarer Bruch auf. Die Folge sind erhöhte Stauchungen, die bei dem doppelten Rostwerk der Gründungskonstruktion des Schweriner Schlosses im jetzigen Zustand durchaus Größen von 6–8 cm erreicht haben können (8).

2.4 Sanierungsüberwachung (automatisch)/Setzungsmessung (Überwachung und Steuerung von verträglichen Sanierungen an historischen Gebäuden)

Alle Gebäude des Schweriner Schlosses weisen eine geodätisch meßbare jährliche Setzungsrate auf. Saniert werden müssen nur die Gebäude bzw. -teile, die eine deutlich höhere Setzungsrate aufweisen. Angestrebtes Ziel der Sicherungsarbeiten ist ein möglichst geringer, substanzschonender, gezielter Eingriff, d.h. die bisher unterschiedliche Setzungsrate pro Jahr ist auf ein für das Gebäude verträgliches Maß zu reduzieren. Im Sinne der Beobachtungsmethode sind dazu Angaben zum Verformungsverhalten einzelner Gebäudeteile vor, während und nach den Sicherungsarbeiten notwendig (3, 4, 5, 6, 8).

Im Oktober 1991 wurde ein automatisch arbeitendes hydrostatisches Höhenmeßsystem im Bereich der zur Sicherung anstehenden Gebäude installiert. Die zentrale Meßwerterfassung und das Referenzgefäß wurden am Hauptturm angebracht (Abb. 9). Die insgesamt 20 Meßstellen befinden sich vorwiegend im Bereich von Terrassen, Bischofshaus, Kondensatraum und Neuem Langen Haus. Einzelne Meß-

Abb. 9. Lageplan des automatischen Schlauchwaagenmeßsystems.



gefäße wurden auch im Kirchenchor und in der Orangerie eingerichtet (8, 10).

Bei der verwendeten Anlage handelt es sich um ein in sich geschlossenes System mit Erfassung der freien Wasserspiegelhöhe durch induktive Wegaufnehmer. Die aus früheren Veröffentlichungen (7) bekannten Anwendungseinschränkungen und Auswertefehler wurden bei der Installation des Systems durch eine entsprechende Meßgefäßgestaltung, -anordnung und durch Begleitmessungen weitgehend ausgeschaltet. Die Weiterentwicklung von Gerät und Auswertesoftware erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Entwickler des Meßsystems. Jedes Meßgefäß ist auf einer genau ausgerichteten Konsole befestigt. Darüber befindet sich ein abnehmbares Schutzgehäuse. Die Meßstellen sind über eine separate Flüssigkeitsleitung mit einem zentralen Pegel verbunden. Dadurch entfällt ein großer Nachteil von Systemen mit Strangverlegung, bei denen sich Höhenänderungen eines Meßpunktes auf jedes der angeschlossenen Gefäße auswirken. Die Schlauchwaagenflüssigkeit besteht aus Wasser mit einem Zusatz von Frostschutzmittel. Dies war erforderlich, weil ein Teil der Gefäße der Außentemperatur ausgesetzt ist. Die Meßpunkte sind untereinander und mit der Zentrale durch einen weiteren Schlauch zum Luftdruckausgleich verbunden. Durch das damit entstandene geschlossene System wird der Fehler durch Luftdruckänderungen und -unterschiede weitgehend ausgeschlossen.

Das Ergebnis einer Schlauchwaagenmessung ist der relative Setzungsunterschied der Meßpunkte zu einem zentralen Pegel (Abb. 10). Dieser wurde in unmittelbarer Nähe eines bekannten geodätischen Höhenpunktes angebracht. Durch

die Anbindung an die jährliche geodätische Einmessung können so auch absolute Setzungsbeträge bestimmt werden.

Aufgrund der Übereinstimmung einiger Schlauchwaagenmeßpunkte mit geodätischen Meßpunkten kann die Meßgenauigkeit des Systems kontrolliert werden. Mit maximalen Abweichungen von 25% stimmten die Meßwerte der Hälfte der Schlauchwaagen-Meßpunkte mit den Mittelwerten aus geodätischen Messungen gut überein. Der Fehler der geodätischen Messungen liegt bei $\sigma_H = 0,4 \text{ mm/Jahr}$. Die Meßdaten wurden anfänglich ein- oder mehrmals im Monat registriert. Seit Anfang 1993 erfolgt alle acht Stunden eine automatische Datenabfrage und -speicherung durch einen Kleinrechner mit Netzausfallsicherung. Dabei werden Wasserspiegelhöhe und Temperatur aller Meßstellen aufgezeichnet (8).

Die Sicherungsarbeiten im Gründungsbereich des Schweriner Schlosses haben noch nicht begonnen. Damit ergab sich die Möglichkeit, vor dem Einsatz bei der Bauüberwachung Erfahrungen im Umgang mit dem System und der Datenauswertung zu sammeln. Es konnten vorhandene Fehlereinflüsse erkannt und schon teilweise beseitigt werden.

In den Gebäudeteilen, in denen das Schlauchwaagensystem installiert wurde, gibt es jährliche Setzungen von 0,8–1,8 mm. Da sich der zentrale Pegel selbst um etwa 0,95 mm/Jahr setzt, ergeben sich Meßgrößen unter 1,0 mm/Jahr. Wegen der unterschiedlichen klimatischen Bedingungen an den Meßstellen werden die Meßergebnisse der einzelnen Gefäße durch unterschiedliche Temperaturexpansion der Flüssigkeit verfälscht und müssen korrigiert werden. Dazu wur-

de ein Korrekturverfahren entwickelt und den weiteren Berechnungen zu Grunde gelegt (8, 10). Der Einfluß nimmt mit steigenden Höhenunterschieden in den Schlauchleitungen zu. Für die Korrektur und Beseitigung des Temperatureinflusses wird folgende spezielle Gleichung zum Ansatz gebracht:

$$\rho_0 h_0 + \frac{1}{2}(\rho_0 + \rho_i)(h_i - s_i' - h_0) = \rho_i(h_i - s_i' - s_i)$$

Durch Umformen gelangt man zu dem Ausdruck:

$$s_i = \frac{1}{2} \frac{(\rho_i - \rho_0)(h_i + h_0) + \rho_0 s_i'}{\rho_i}$$

mit s_i = korrigierter Meßwert
 s_i' = unkorrigierter Meßwert
 h_i = Höhe der effektiven Wassersäule der Meßstelle
 h_0 = Höhe der effektiven Wassersäule des Referenzgefäßes
 ρ_i = Dichte der Meßflüssigkeit an der Meßstelle
 ρ_0 = Dichte der Meßflüssigkeit am Referenzgefäß.

Es wurden lineare multiple Regressionen durchgeführt. Dabei wurde die Setzung als Funktion von der Temperatur der Meßstelle, des Referenzgefäßes sowie der Zeit dargestellt:

$$s_i = m_1 t + m_2 \vartheta_i + m_3 \vartheta_0 + b$$

mit s_i = Niveaumeßwert
 t = Zeit in Tagen seit der Nullmessung (Dezember 1991)
 ϑ_i = Temperatur der Meßstelle
 ϑ_0 = Temperatur des Referenzgefäßes
 b = additive Konstante
 m_{1-3} = Regressionsfaktor für die entsprechende Variable.

Die bestimmten Regressionsfaktoren lagen für die einzelnen Meßstellen zwischen $r = 0,79$ und $0,97$ (Abb. 10).

Durch den Einsatz eines Schlauchwaagensystems kann eine ständige automatische Bewegungserfassung bei sehr schneller Meßfolge realisiert werden. Dies ist insbesondere für die Sicherung von Gründungen mit weichen, reversiblen, angepaßten Lösungen wichtig. Die erreichbaren Systemgenauigkeiten liegen für die einzelnen Meßpunkte zwischen $0,1-0,5$ mm/a. Sanierungsarbeiten, bei denen die Schlauchwaage erstmalig zur Überwachung eingesetzt wird, werden 1995 beginnen.

2.5 Horizontale Baugrundbewegungen (Gleiten, Rutschen von geneigten Bodenschichten)

Orangerie, Kolonnaden und Grotte sind auf einer bis zu 11 m mächtigen Aufschüttung errichtet worden. Die durchschnittlichen Setzungsraten liegen daher mit $1,0-2,0$ mm/

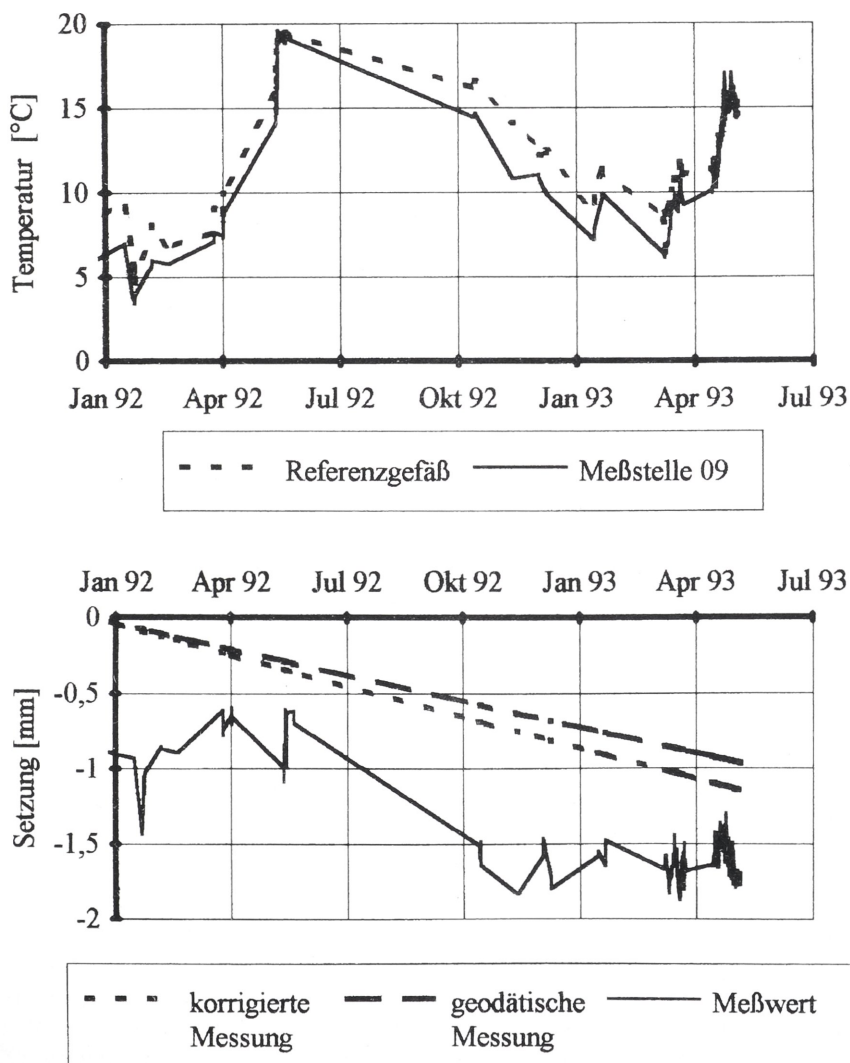


Abb. 10. Meßergebnisse und Temperaturkorrektur am Schlauchwaagenmeßpunkt 9.

Jahr in diesem Bereich auch deutlich über dem Durchschnitt. Der Baugrund der Schloßinsel zeichnet sich durch eine deutliche Kuppenlage mit geneigten Schichtenhorizonten aus. Es gibt Anzeichen für horizontale Baugrundverformungen in Richtung See. Bisher konnte die Vermutung von noch anhaltenden Bewegungen nicht klar belegt werden. Da aber die Beantwortung dieser Frage wichtig ist für die Diagnose der Schadensursache und damit für die Wahl von Sicherungsmaßnahmen, wurden entsprechende Untersuchungen vorgenommen.

Für diese Messungen wurden vier Baugrundbohrungen für den Einsatz eines hochgenauen Inklinometers ausgebaut, die auch für Baugrunderkundungen zu nutzen waren. Die Meßpunkte wurden im Bereich von Orangerie und Kolonnaden, an der Südbastion und am Vorhof angeordnet, da diese Gebäude Verformungsbilder zeigten, die eine horizontale Baugrundverformung vermuten lassen. Die prognostizierten Bewegungsraten sind jedoch so gering, daß selbst bei Verwendung einer hochgenauen Inklinometer-sonde frühestens in 3 bis 4 Jahren mit einer verlässlichen Aussage gerechnet werden kann (5, 8, 10).

Der Meßanordnung liegt folgendes Prinzip zu Grunde. Ein verformbares, mit Führungsnuten versehenes Rohr wird so in den Baugrund eingesetzt, daß es den horizontalen Bodenbewegungen exakt folgen kann. Für die Auswertung ist es notwendig, daß der Fußpunkt unbeweglich ist, d. h. in eine tiefe und feste Bodenschicht einbindet. Eine Sonde mißt die Neigung des Meßrohrs über die Tiefe. Die Neigung wird bei einem Durchlauf für zwei aufeinander senkrecht stehende Achsen (+A und +B) bestimmt. Zur Ausschaltung von systematischen Fehlern wird die Messung sofort mit der um 180° gedrehten Sonde wiederholt. Die horizontale Verformung ergibt sich durch den Vergleich von zwei verschiedenen Messungen, d.h. aus einer Neigungsänderung bezüglich der Null- oder Bezugsmessung.

Bei dem Inklinometermeßsystem im Schweriner Schloß wurden Meßkanäle aus Kunststoffrohren verwendet, die jeweils 5–7 m tief in die Sandschicht eingebaut wurden. Damit kann von einer Unverschieblichkeit des Fußpunktes ausgegangen werden. Zur Kontrolle wurden die Kopfpunkte noch geodätisch eingemessen. Die Bohrungen erreichten, entsprechend der Lage des Sandrückens, Tiefen von 10 bis 23 m. Im Abstand von mehreren Monaten wurden die Kanäle mit einer 0,5 m bzw. 1,0 m langen Sonde vermessen. Die Aufzeichnung erfolgte durch ein automatisches Registriergerät.

Nach 6 Wiederholungsmessungen im Laufe von 1½ Jahren Meßdauer deuten sich Baugrundverformungen mit horizontalen Komponenten an (Abb. 11). Die Ergebnisse liegen aber noch im Bereich der Systemungenauigkeit, die für die Hauptmeßrichtung bei ca 0,5 mm Abweichung auf 10 m Meßtiefe liegt. Bei den Messungen in Schwerin wurden sowohl die Null- als auch die Folgemessungen mehrfach durchgeführt, um den mittleren Fehler des Mittelwertes zu begrenzen. Für die weitere Auswertung verwendete man die arithmetisch gemittelten Daten der Einzelmessungen (10).

Zur Untersuchung der Meßgenauigkeit wurde in einem Treppenhaus ein 15 m langes senkrecht Meßrohr voll einsehbar installiert. Die über Pendellot ermittelte Lage des Rohrs diente als Vergleichsbasis zu den Messungen mit Inklinometer. Die Neigungsmessungen am Testrohr liefern eine maximale Abweichung vom Mittelwert von ca. $\pm 0,25$ mm in der A- und $\pm 0,5$ mm in der B-Richtung. Beide Achsen wichen höchstens um 0,5 mm von der Pendellot-

messung ab. Beim Einsatz der A-Achse des Inklinometers in die B-Meßrichtung und umgekehrt wurde eine maximale Differenz von 4,5 mm festgestellt. Diese Abweichungen basieren auf systematischen Fehlern bei der Messung in B-Richtung infolge nicht möglicher genauer Inklinometerjustierung in dieser Achse. Werden beide Richtungen für die Auswertung benötigt, sollte die B-Richtung gesondert mit der genaueren A-Achse vermessen werden (8).

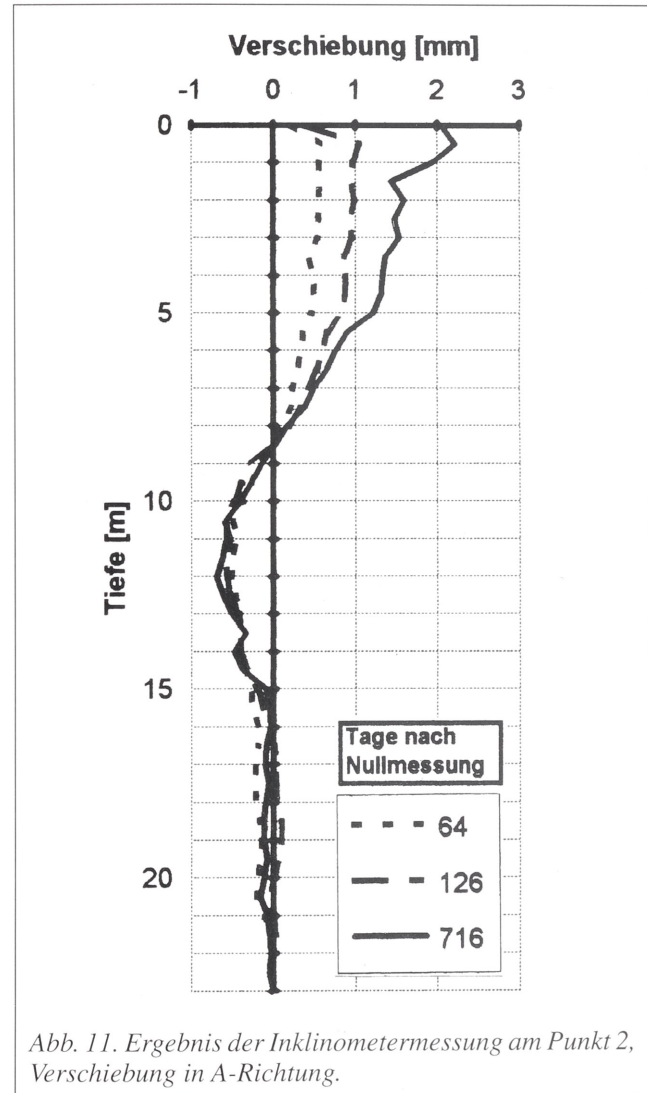


Abb. 11. Ergebnis der Inklinometermessung am Punkt 2, Verschiebung in A-Richtung.

3 Schlußfolgerungen

Die am Schweriner Schloß durchgeführten Messungen und Untersuchungen der Gründungskonstruktionen können auch an anderen Burgen und Schlössern für ein besseres Verständnis der wesentlichen Schadensursachen beitragen. Die Verfahren zur Geometrie- und Zustandsbestimmung sind zu meist zerstörungsarm, die Methoden zur Kinematik erfassung orientieren sich an einer Sicherung der Gebäude nach der Beobachtungsmethode. An der Verbesserung und Weiterentwicklung der Meß- und Erkundungsgeräten wird gearbeitet. Bei den vorgestellten Systemen handelt es sich um:

- Mauerwerkskernbohrungen mit Endoskopie,
- Bohrlochschlitze,sonde,
- Bohrkernanalyse und -widerstandsmessung,
- automatisches Schlauchwaagenmeßsystem und
- Inklinometer.

Literaturangaben

- (1) *Sperling, Gerhard/Sinkwitz, Helmut*: Spannungsanalyse am Mauerwerk des Schlosses Schwerin mit der Bohrlochschlitzsonde und dem Dilatometerversuch, in: Sonderkolloquium „Sanierung historischer Gebäude – Gründungen“, Wissenschaftliche Zeitschrift der TH Leipzig, 16 (1992) 1/2, S. 71–80.
- (2) *Gudehus, Gerd/Klobe, Berthold/Kudella, Peter/Sperling, Gerhard/Thiele, Ralf*: Das Schloß Schwerin, Untersuchungen von Baugrund und Gründungen, in: Jb. 1990 SFB 315, S. 293–315.
- (3) *Sperling, Gerhard*: Zur Sanierung der Gründung von historischen Gebäuden, in: Sonderkolloquium „Sanierung historischer Gebäude – Gründungen“, Wissenschaftliche Zeitschrift der TH Leipzig, 16 (1992) 1/2, S. 25–42.
- (4) *Erber, Ralf-Jürgen/Sperling, Gerhard/Heise, Günter/Thiele, Ralf*: Schloß Schwerin – Vorläufiges Gesamtgutachten zur Gründung des Schweriner Schlosses, Teil 1–9, TH Leipzig, Lehrbereich Grundbau, 1993.
- (5) *Otto, Hans-Peter/Sperling, Gerhard (†)/Thiele, Ralf*: Die meßtechnische Aufgabenstellung für einen Geodäten bei der Überwachung eines historischen Bauwerkes, in: Proc. Fig. XX International Congress Melbourne, Australia, 3/1994 (im Druck).
- (6) *Goldscheider, Michael/Klobe, Berthold/Krieg, Stefan/Kudella, Peter/Gudehus, Gerd*: Bodenuntersuchungen und erste Empfehlungen für die Gründungssanierung an Terrassen, Orangerie und Kolonnaden des Schweriner Schlosses, in: Jb. 1991, SFB 315, S. 247–279.
- (7) *Klobe, Berthold/Gudehus, Gerd*: Langzeitsetzung historischer Bauwerke auf weichen Böden, in: Jb. 1991, SFB 315, S. 210–213.
- (8) *Erber, Ralf-Jürgen/Holdt, Jochen/Thiele, Ralf/Wittmann, Falk*: Untersuchungen zu Geometrie, Zustand und Verformungsverhalten der Gründungen am Schweriner Schloß, in: Jb. 1992 SFB 315, S. 107–132.
- (9) *Heise, Günther/Holdt, Jochen/Thiele, Ralf/Wittmann, Falk*: Dokumentation der Bohrungen am Schweriner Schloß . . . , HTWK Leipzig, Lehrbereich Grundbau, 3/5 1994.
- (10) *Wittmann, Falk*: Möglichkeiten zur langfristigen Bauwerksüberwachung beim Einsatz von Schlauchwaagenmeßsystemen und Inklinometersonden, Diplomarbeit, HTWK Leipzig, Lehrbereich Grundbau, 7/93.
- (11) *Holdt, Jochen/Keller, Ralf*: Zerstörungssarme Ermittlung von Kennziffern des Mauerwerks, Diplomarbeit, HTWK Leipzig, Lehrbereich Grundbau, 7/93.

Die Autoren dieses Heftes

Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Hofrichter, Kaiserslautern
Dipl.-Ing. Klaus Bingenheimer, Darmstadt
Dr.-Ing. Günther Stanzl, Mainz
Dr.-Ing. Lukas Högl, Zürich/Schweiz
Dipl.-Ing. Fredi Schneller, Effretikon/Schweiz
Prof. Dr.-Ing. Gerd Gudehus, Karlsruhe
Dr.-Ing. Rainer Blum, Leonberg
Prof. Dr.-Ing. Erwin Schwing, Karlsruhe

Dipl.-Ing. Kurt Ross, Gernsheim
Dipl.-Ing. Dipl.-Geol. Norbert Müller, Krefeld
Prof. Dr.-Ing. Günter Heise, Leipzig
Dipl.-Ing. Hans-Peter Schleußner, Freiberg
Dipl.-Geol. Detlev Tondera, Freiberg
Dr. Ralf-Jürgen Erber, Delitzsch
Dipl.-Ing. Ralf Thiele, Leipzig