Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 115 (1997)

Heft: 48

Artikel: Prüfung von vor 160 Jahren unter Wasser verbautem Holz: Pfähle der Münsterbrücke in Zürich

Autor: Niemz, Peter / Zürcher, Ernst / Kucera, Ladislav J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-79351

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Peter Niemz, Ernst Zürcher, Ladislav J. Kucera, Zürich, Grzegorz Bernatowicz, Warschau

Prüfung von vor 160 Jahren unter Wasser verbautem Holz

Pfähle der Münsterbrücke in Zürich

An der Zürcher Münsterbrücke wurde der Zustand der Holzpfähle, die Widerlager und Pfeiler tragen, untersucht. Die Holzpfähle wurden vor 160 Jahren gerammt und blieben seither immer unter Wasser. Die Untersuchungen belegen einen mit Ausnahme der Randzonen noch guten Zustand des Holzes.

Die Münsterbrücke im Zentrum von Zürich wurde in den Jahren 1836-1838 nach den Plänen von Alois Negrelli (Kasten) erbaut [1]. Sie hat eine Gesamtlänge von 72 m und besteht aus vier gleichmässigen Bögen mit drei steinernen Brückenpfeilern. Die drei Brückenpfeiler und zwei Widerlager sind auf Holzpfählen gegründet. Im Rahmen einer geplanten Instandsetzung der Brücke sollte der Zustand des eingesetzten Holzes stichprobenartig geprüft werden, um Grundlagen für

- die statische Nachrechnung der Standsicherheit und
- eventuell notwendige Massnahmen zur Sanierung der Holzfundamente

zu schaffen. Allgemein gilt Holz bei völliger Unterwasserlagerung in Süsswasser als sehr beständig [2], da es infolge der Wassersättigung nicht durch Pilze zerstört wird. Unter besonderen Bedingungen (z.B. sehr sauerstoffreiches Wasser) kann es allerdings zu Moderfäule kommen; ebenso zum Befall durch Bakterien. Eine Beeinflussung der Holzqualität durch Bakterien tritt bei extrem langem Wasserangriff auf. Bei Bakterienbefall erhöht sich die Durchlässigkeit des Holzes durch Zerstörung der Tüpfelmembranen [3]. Bisherige Veröffentlichungen über langzeitig wassergelagertes Holz zeigen, dass offensichtlich grosse Schwankungen im Erhaltungszustand des Holzes vorhanden sind, was auf verschiedene Lagerbedingungen sowie verschiedene Ausgangszustände des Holzes zurückzuführen sein könnte. Bei extrem langer Wasserlagerung von Holz wurde mehrfach eine weiche Randzone beschrieben, die nach dem Trocknen zur verstärkten Rissbildung neigt. Schweingruber [4] verweist auf diese weichen Zonen an Holz, das zwischen einigen hundert und mehreren tausend Jahren (bis zu 6000 Jahre) unter Wasser gelagert wurde. Er zeigte, dass sich die Festigkeitswerte - je nach Lagerungsbedingungen - langfristig reduzieren. Das Schwindverhalten, das bei der Trocknung die Risse bewirkt, ist bei langzeitig wassergelagerten Hölzern im Randbereich deutlich höher als bei rezentem Holz. Die Schwindung steigt auf 50-75% in radialer Richtung und 2-3% in Längsrichtung [4]. Beide Werte liegen wesentlich über den bei rezentem Holz ermittelten (3-12% in radialer bzw. tangentialer Richtung, 0,3% in Faserrichtung). Auch im Holzlexikon [2] wird im gleichen Sinne auf diese Rissbildung verwiesen. Hoffmann et. al. [5] beschreiben die Eigenschaften von 1600 Jahre altem, wassergelagertem Eichenholz. Dieses Holz war aber offensichtlich stärker geschädigt. Die Raumdichte und die Druckfestigkeit nahmen nach aussen hin ab, die Feuchtigkeit stieg. Das Schwindverhalten beim Trocknen erhöhte sich. Zur Stabilisierung des Holzes musste Polyäthylenglykol eingesetzt werden.

Wagenführ publizierte Angaben zu subfossiler Eiche (geschätztes Alter 4750 Jahre) aus einem Tagebau [6]. Das Holz lagerte unter einer Sandschicht. Er konnte dabei feststellen, dass sich das untersuchte Material noch gut bearbeiten liess; es trat lediglich eine Verschlechterung der Trocknungseigenschaften auf. Er gibt für die subfossile Eiche eine Rohdichte (bei 12% Holzfeuchte) von 615-760 kg/m^3 und eine Druckfestigkeit von 33-52 N/mm^2 an. Im Vergleich dazu liegen bei rezenter Eiche *(Quercus robur)* die Dichte (430-960 kg/m^3) und die Druckfestigkeit (54-67 N/mm^2) tendenzmässig höher.

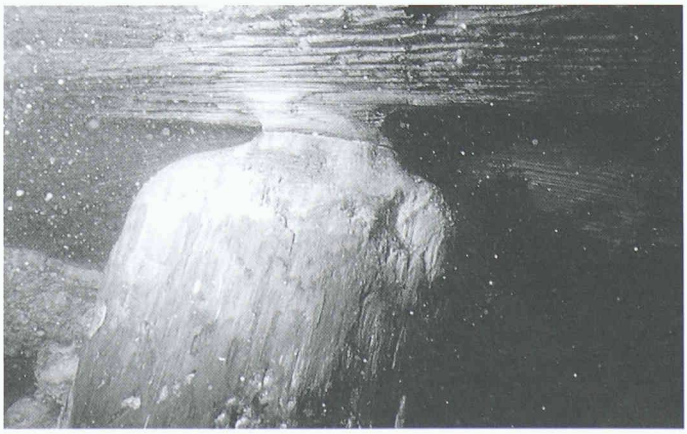
Nachfolgend wird eine kurze Übersicht zur Qualität des geprüften Holzes gegeben.

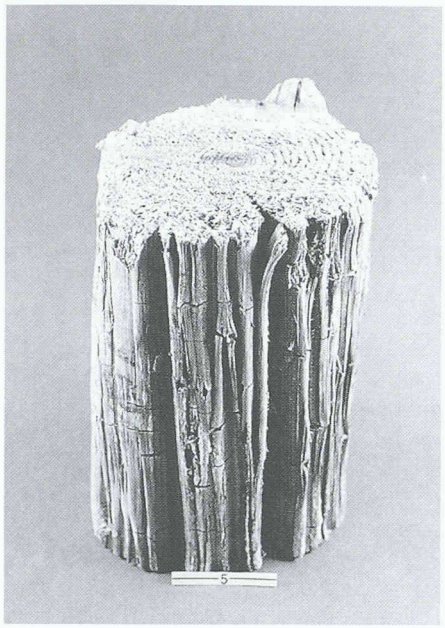
Alois (Luigi) Negrelli nannte sich als Südtiroler - wohl aus politischen Gründen - wahlweise Alois oder Luigi. Wir stellen ihn in zwei Wochen (SI+A Nr. 50/97) ausführlicher dar.

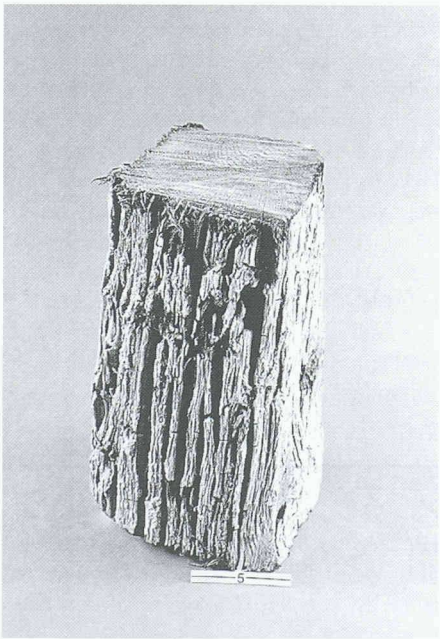
Aufbau der Pfahlgründung

Für die Errichtung der beiden Widerlager und der drei Brückenpfeiler wurden zunächst vertikal Holzpfähle in den Fluss gerammt.

1
Unterwasseraufnahmen der Holzkonstruktion; a: am Widerlager verbautes Holz (gesamte Konstruktion in Lehm eingebettet), b: Erosionserscheinungen an einem Holzpfeiler (Holz nur teilweise in Sand und Steine eingebettet)







2
Holz aus der Verbauung nach der Trocknung,
a: Fichte mit Rissbildung im Randbereich,
b: Eiche mit Rissbildung

Die Pfahlköpfe befinden sich heute rund zwei Meter unter dem Wasserspiegel, ein direkter Luftzutritt liegt damit nicht vor. Über diese vertikalen Pfähle wurde ein Rost aus horizontalen Balken aufgebaut. Der Zwischenraum wurde mit Sand, Bauschutt und zum Teil mit Lehm (bei den Widerlagern) verfüllt. Zum Schutz der tragenden Konstruktion des Pfeilers wurde zusätzlich eine Umbauung aus Holzpfählen, Lehm, Bauschutt usw. eingesetzt.

Vorgenommene Prüfungen

Zur Beurteilung der Qualität des eingesetzten Holzes wurde die Umbauung an einem Widerlager und drei Stützpfeilern teilweise geöffnet und die tragende Konstruktion freigelegt. Mit Hilfe eines Tauchers wurden jeweils folgende Prüfungen vorgenommen:

- visuelle Beurteilung des Holzes anhand von Fotos und Videoaufnahmen
- Entnahme von Bohrkernen mittels Zuwachsbohrer (dabei wurde jeweils durch das gesamte Holzstück gebohrt)
- Prüfung der Eindringtiefe mit einem Pilodyn-Gerät. Der Durchmesser der verwendeten Stahlnadel betrug 2,5 mm.

Diese Prüfung erfolgte an vier Stellen im Winkel von jeweils 90 Grad um den Pfahl herum und in einer Entfernung von 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 und 40 cm vom Pfahlkopf. Da in der Literatur kaum Werte zu Pilodyn-Messungen vorliegen, wurden zusätzlich Vergleichsmessungen an rezentem Holz im trockenen Zustand (Prüfung senkrecht zur Faser) durchgeführt.

Entnahme von Holz zur Prüfung der Druckfestigkeit

Die Bohrkerne und ausgewählte Holzproben für die Festigkeitsmessungen wurden visuell und rasterelektronenmikroskopisch beurteilt. Das entnommene Holz für die Festigkeitsprüfung wurde mit einer Bandsäge in Leisten von 5 x 5 x 40 cm aufgetrennt und langsam getrocknet. Danach erfolgte ein Zuschnitt von Prüfkörpern nach DIN 52185. An diesen Proben wurden Dichte und Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung bestimmt.

Ergebnisse

Allgemeine Beurteilung des Holzzustands

Für die gesamte Konstruktion wurden Tanne *(Abies alba)*, Fichte *(Picea abies)* und Eiche *(Quercus sp.)* verwendet. Eine Beurteilung des Holzzustands anhand der Unterwasseraufnahmen zeigt, dass es in der Regel noch sehr gut erhalten ist. Bild 1a enthält ausgewählte Aufnahmen.

Elemente, bei denen keine vollständige Verbauung der Pfähle zum Schutz der Wassereinwirkung vorlag, zeigten jedoch besonders stromaufwärts teilweise deutliche Erosionserscheinungen (Bild 1b). Diese Erosion betrug zum Teil mehrere Zentimeter. Die Umbauung war bei dem entsprechenden Pfeiler so angelegt, dass das Holz stärker mit dem Wasser in Berührung gekommen war als bei den anderen Pfeilern und dem Widerlager. Die Erosionserscheinungen sind vermutlich rein mechanischer Natur und auf im Wasser mitgeführte Schwebepartikel zurückzuführen.

Das entnommene Holz war im feuchten Zustand mit Ausnahme einer 1-1,5 cm dicken, weichen Schicht in der Randzone in allen Fällen sehr gut erhalten. Diese weiche Randzone war unterschiedlich intensiv ausgeprägt. Offensichtlich macht sich dabei die geringere Widerstandsfähigkeit des Splintholzes bemerkbar.

Da sowohl Rundholz als auch Schnittholz verwendet wurde, wirkt sich der Einfluss des Einschnitts aus. Teilweise liegt nur Kernholz, teilweise Holz mit einem erheblichen Anteil an Splintholz vor. Alle Proben liessen sich gut trocknen.

Nach der Trocknung war das Innere der Holzelemente gut erhalten. Die Randzonen waren dagegen häufig sehr locker (reduzierte Dichte und Festigkeit) und wiesen starke Risse auf (Bild 2). Diese Zone war etwa 1-1,5 cm breit. Der Effekt deckt sich mit den in der Literatur beschriebenen Angaben.

Das Nadelholz war im Inneren hell und visuell sehr gut erhalten. Das Eichenholz zeigte stellenweise die übliche dunklere Färbung. Sie trat in der Randzone bis zu einer Tiefe von 5 mm auf. Mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche wurde die Farbe wieder heller.

Auch REM-Aufnahmen an den Bohrkernen aus dem Inneren der Balken und Pfähle zeigen einen sehr guten Erhaltungszustand des Holzes (Bild 3). Die typischen anatomischen Strukturmerkmale sind hier gut erkennbar und intakt, die Tüpfelmembranen sind noch erhalten. In den Aussenzonen ist dagegen der durch Bakterien bewirkte Abbau der Tüpfelmembranen ersichtlich. Bild 4 zeigt eine dazu ausgewählte REM-Aufnahme.

Es könnte sein, dass die Erweichung der Randzonen möglicherweise sehr langsam voranschreitet. Dies betrifft allerdings sehr lange Zeiträume. Rechnet man die Erweichung des Holzes auf die gesamte bisherige Lagerdauer (160 Jahre) hoch und legt dabei eine bisherige durchschnittliche

Reduzierung von 10 mm/Seite zu Grunde, so sind es etwa 0,13 mm/Jahr Reduzierung des tragenden Querschnitts (gesamt) bzw. 0,063 mm/Jahr und Seite. Andrerseits zeigen Prüfungen von Schweingruber an mehrere tausend Jahre altem Holz, dass sich die Erweichung möglicherweise stabilisiert und im Kernholzbereich zum Stillstand kommt.

Härtemessung mit Pilodyn

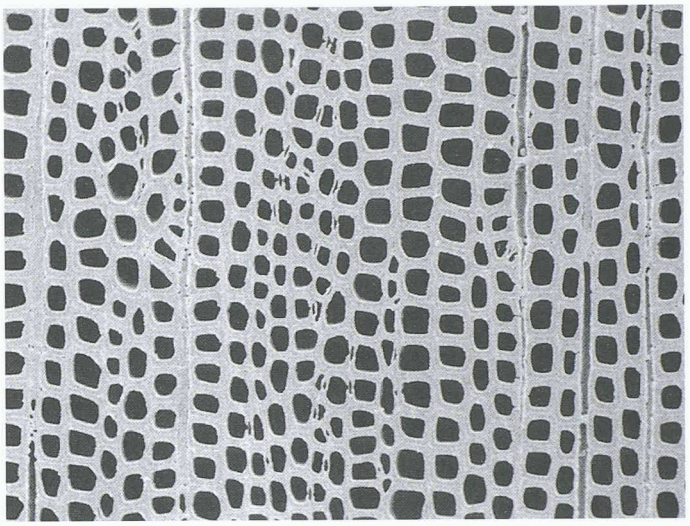
Zu diesem Messverfahren liegen nur wenige Arbeiten vor. Um Vergleichswerte zu erhalten, wurde für trockenes, rezentes Holz die Eindringtiefe ermittelt. Bild 5 zeigt die Messergebnisse mittels Pilodyn-Verfahren für rezentes Holz im trockenen Zustand. Nach Untersuchungen von Hoffmeyer [7] steigt die Eindringtiefe mit Zunahme der Holzfeuchte. Bei Erhöhung der Holzfeuchte von 10 auf 21% stieg die Eindringtiefe um 10-20%, bei weiterer Erhöhung von 23 auf 123% um 30-40%. Da sich die Messwerte nach Bild 5 auf eine Holzfeuchte von 12% beziehen, sind bei dem unter Wasser geprüften Holz systematisch höhere Werte zu erwarten.

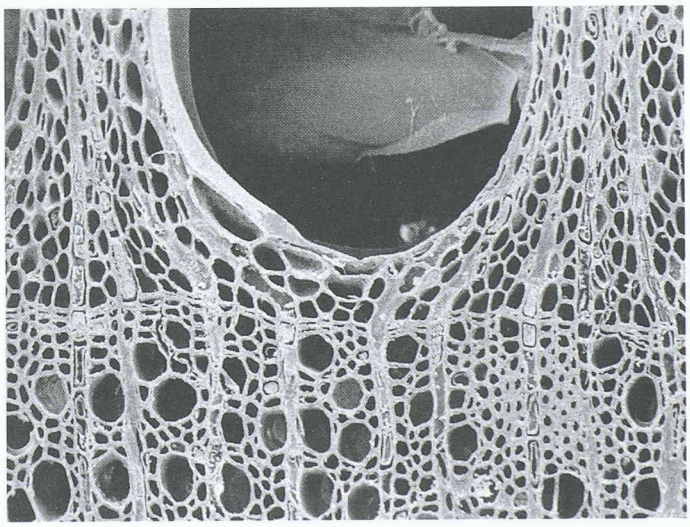
Eichenholz

Die Messungen zeigten Eindringtiefen von 10-27 mm (im Durchschnitt 14,5 mm). Von der Tendenz her betrachtet sind sowohl Unterschiede am Balkenumfang als auch in der Entfernung vom Balkenkopf erkennbar. Im Durchschnitt waren die Eindringtiefen am Balkenkopf etwas grösser als an weiter davon entfernten Stellen. Dies deckt sich mit der Erweichung der Randzonen, die langsam von aussen nach innen voranschreitet. Generell liegen die Messwerte aber im Bereich der am rezenten Holz gemessenen.

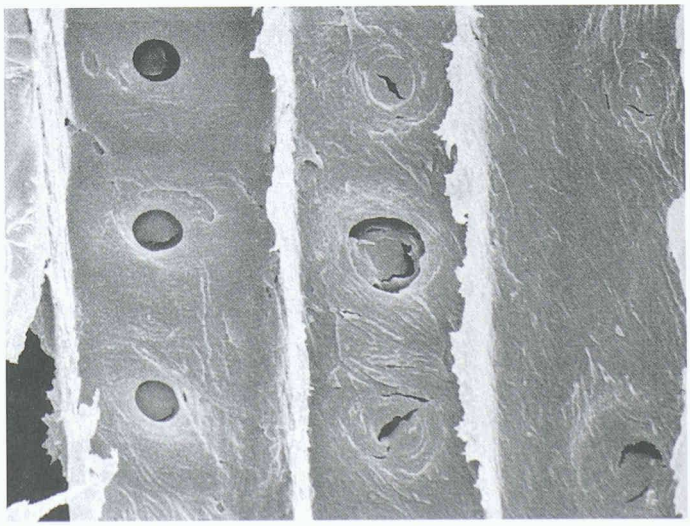
Tannen- und Fichtenholz

Die Pilodynmessungen an Nadelholz ergaben Eindringtiefen von 10-31 mm (Durchschnitt: 16,9 mm). Die Werte sind infolge der geringeren Dichte etwas höher als bei Eiche. Auch hier zeigen sich die bereits genannten Unterschiede in der Eindringtiefe in Abhängigkeit von der Entfernung vom Balkenkopf. Teilweise sind auch am Balkenumfang deutliche Unterschiede erkennbar. Dies könnte u.a. durch den unterschiedlichen Splintanteil, aber auch durch verschiedene Anströmungsverhältnisse bedingt sein. Die Streuung der Pilodyn-Werte ist insgesamt recht gross, da eine ausgeprägte Punktbelastung vorliegt (Nadeldurchmesser 2,5 mm). Dadurch ist logischerweise ein Unterschied vorhanden, wenn die Nadel in Früh- oder Spätholz eindringt. Auch hier liegen die Messwerte im Bereich des rezenten Holzes.





3
REM-Aufnahmen von Holz aus dem Inneren eines Balkens,
a: Tanne in 230facher Vergrösserung,
b: Eiche in 360facher Vergrösserung



4
REM-Aufnahme der weichen Randzonen (Tanne) mit zerstörten Tüpfelmembranen wegen Bakterienbefall. 1500fache Vergrösserung

	Eiche	Fichte
Mittlere Eindringtiefe [mm]	12	15
Standardabweichung [mm]	2	2

5
Messergebnisse der Eindringtiefe mittels Pilodyn-Verfahren an rezentem Holz im trockenen Zustand. Prüfung senkrecht zur Faserrichtung, Probenanzahl: 20

Kenngrösse	Eiche	Tanne
Rohdichte [kg/m³]	430-960	350-710
Druckfestigkeit [N/mm²]	54-67	31-59

7
Richtwerte für Rohdichte und Druckfestigkeit von rezentem Holz nach [6]

		Tanne	Eiche I hell	Eiche II verfärbt
Rohdichte [kg/m³]	x	478	728	744
	s	74	46	74
Druckfestigkeit [N/mm²]	x	36,7	48,2	37,9
	s	7,7	8,1	6,1
Holzfeuchte [%]	x	12,4	15,0	14,7
	s	0,5	0,6	0,4

6
Mechanische Eigenschaften der untersuchten Hölzer. x: Mittelwert, s: Standardabweichung. Probenanzahl: Tanne: 32, Eiche I: 20, Eiche II: 20

Rohdichte und Festigkeit

Bild 6 zeigt die Rohdichte und die Druckfestigkeit der Prüfkörper von ausgewählten Holzstücken (Eichen- und Tannenholz aus Pfählen), Bild 7 zeigt die Eigenschaften von rezentem Holz nach Literaturangaben (Holzfeuchte 12%). Für beide Holzarten liegen die Festigkeiten im unteren Bereich der in der Literatur angegebenen Werte, die Rohdichte dagegen im mittleren bis höheren Bereich.

Einer der beiden Pfähle aus Eiche hatte einen Riss in Pfahlmitte und war stärker verfärbt als der andere. Das Holz des stärker verfärbten Pfahls aus Eiche weist eine geringere Festigkeit auf als das weniger verfärbte (möglicherweise durch den stärkeren Randeffekt bedingt). Das Bruchbild bei der Druckprüfung zeigt die übliche Form. Atypische Veränderungen waren nicht erkennbar. Es kann davon ausgegangen werden, dass keine Schädigung vorliegt.

Die Festigkeit von Eichenholz wird sich bei einer durch Klimatisierung von 15 auf 12% reduzierten Holzfeuchtigkeit noch um etwa 15% erhöhen. Eine exakte, zahlenmässig quantifizierbare Aussage zur Festigkeitsminderung ist nicht möglich, da die Ausgangswerte nicht bekannt sind.

Zusammenfassung

An dem rund 160 Jahre alten, in der Münsterbrücke in Zürich verbauten Holz (zwei Meter unter der Wasseroberfläche) wurden folgende Prüfungen vorgenommen:

- visuelle Begutachtung des Holzes mittels Unterwasseraufnahmen
- visuelle und elektronenmikroskopische Begutachtung von Bohrkernen
- Ermittlung der Eindringtiefe einer Nadel mittels Pilodyn-Gerät und
- Ermittlung von Rohdichte und Festigkeit im trockenen Zustand an ausgewählten Stichproben.

Das Holz war mit Ausnahme der relativ weichen Randzonen noch gut erhalten. In den Randzonen ist die ursprüngliche Festigkeit nicht mehr vorhanden. Dort konnte die Einwirkung von Bakterien nachgewiesen werden. Die Druckfestigkeit des Holzes in den weiter innen liegenden Zonen liegt im unteren, die Rohdichte im mittleren bis höheren Bereich der in der Literatur angegebenen Werte. Beim Nachweis der Resttragfähigkeit der Gesamtkonstruktion sollte eine entsprechende Querschnittsminderung vorgenommen werden, da die äusseren Zonen keine Tragfähigkeit mehr besitzen.

Literatur

[1]
Vermessungsamt der Stadt Zürich: Vom Pilgersteg zur Münsterbrücke. Baugeschichtliches Archiv der Stadt Zürich. IV. Ausgabe, Zürich 1995

[2]
Lexikon der Holztechnik. 3. Auflage, DRW-Verlag Stuttgart 1988

[3]
Schmidt O.: Holz- und Baumpilze. Biologie, Schäden, Schutz, Nutzen. Springer-Verlag Berlin 1994

[4]
Schweingruber F.H.: Mikroskopische Holzanatomie. Kommissionsverlag Zürcher AG Zug 1978

[5]
Hoffmann P., Peek R.-D., Puls J., Schwab E.: Das Holz der Archäologen. Holz als Roh- und Werkstoff 44 (1986), 241-247

[6]
Wagenführ R.: Holzatlas, 4. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig 1996

[7]
Hoffmeyer P.: The pilodyn instrument as a non-destructive tester of shock resistance of wood. Paper presented at the non-destructive testing meeting in Vancouver, WA, August 1978

Adresse der Verfasser:
Peter Niemz, Ernst Zürcher, Ladislav J. Kucera, Professur für Holzwissenschaften, ETH-Zentrum, 8092 Zürich, und *Grzegorz Bernatowicz*, landwirtschaftliche Akademie, Warschau