

# ARBEITSBERICHT

Institut für Holzbiologie und Holzschutz

**Untersuchung des langfristigen Holzfeuchteverlaufes an ausgewählten  
Bauteilen der Fußgängerbrücke in Essing**

von

**Christian Brischke und Andreas O. Rapp**



**Bundesforschungsanstalt  
für Forst- und Holzwirtschaft**

Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg  
Hausadresse: Leuschnerstr. 91, 21031 Hamburg  
Postadresse: Postfach 80 02 09, 21002 Hamburg

Tel: 040 / 73962-401  
Fax: 040 / 73962-499  
Email: [holzbiologie@holz.uni-hamburg.de](mailto:holzbiologie@holz.uni-hamburg.de)  
Internet: <http://www.bfafh.de>

**Institut für Holzbiologie und Holzschutz**

**Untersuchung des langfristigen Holzfeuchteverlaufes an ausgewählten  
Bauteilen der Fußgängerbrücke in Essing**

**von**

**Christian Brischke und Andreas O. Rapp**

Arbeitsbericht des Instituts für Holzbiologie und Holzschutz 2007 / 2

Hamburg, Juni 2007



---

# **ABSCHLUSSBERICHT**

zum Forschungsvorhaben

## **Untersuchung des langfristigen Holzfeuchteverlaufes an ausgewählten Bauteilen der Fußgängerbrücke in Essing**

**Kurztitel: „Essing“**

gefördert durch

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

ausführende Forschungs- und Entwicklungsstelle:  
Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft  
Institut für Holzbiologie und Holzschutz

**Wissenschaftliche Bearbeitung:**

Dipl.-Holzwirt C. Brischke

**Projektleitung:**

Dr. A. O. Rapp

**Hamburg, Juni 2007**

---

## INHALT

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1</b>	<b>Ausgangslage .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1.1</b>	<b><i>Konstruktionsmerkmale.....</i></b>	<b>5</b>
<b>1.1.2</b>	<b><i>Schadereignisse am Bauwerk vor Beginn des Untersuchungszeitraumes.....</i></b>	<b>8</b>
<b>1.2</b>	<b>Ergebnisse einer ersten Vorortbesichtigung.....</b>	<b>10</b>
<b>1.3</b>	<b>Zielstellung.....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>DURCHGEFÜHRTE UNTERSUCHUNGEN .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Prinzip und Aufbau der angewandten Holzfeuchte- Messeinrichtungen .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1.1</b>	<b><i>Einleimen von Messelektroden .....</i></b>	<b>13</b>
<b>2.1.2</b>	<b><i>Messprinzip und Datenaufzeichnung .....</i></b>	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b>Laboruntersuchungen zur elektrischen Holzfeuchtemessung an Bauwerken im Gebrauch.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.1</b>	<b><i>Besondere Mess- und Installationsbedingungen an der Essinger Brücke .....</i></b>	<b>14</b>
<b>2.2.2</b>	<b><i>Einfluss der Imprägnierung mit organischen Holzschutzmitteln auf die Leitfähigkeit des Holzes.....</i></b>	<b>15</b>
<b>2.2.3</b>	<b><i>Eignung von Messdübeln zur Holzfeuchtemessung.....</i></b>	<b>16</b>
<b>2.3</b>	<b>Holzfeuchtemessungen an der Essinger Brücke .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3.1</b>	<b><i>Anordnung der Messstellen .....</i></b>	<b>17</b>
<b>2.3.2</b>	<b><i>Installation der Messeinrichtungen .....</i></b>	<b>20</b>
<b>2.4</b>	<b>Messung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte an der Essinger Brücke.....</b>	<b>22</b>
<b>2.5</b>	<b>Referenzmessungen in Doppellagen-Freilandversuchen.....</b>	<b>22</b>

---

2.5.1	<b>Versuchsaufbau.....</b>	<b>22</b>
2.5.2	<b>Standorte der Doppellagen-Testsets .....</b>	<b>23</b>
2.6	<b>Zeitlicher Verlauf der Messungen an der Essinger Brücke ....</b>	<b>25</b>
2.7	<b>Bauliche Maßnahmen und Schadensereignisse während des Untersuchungszeitraumes.....</b>	<b>26</b>
2.7.1	<b>Beschädigung von Messstellen am 27.07.2004 .....</b>	<b>26</b>
2.7.2	<b>Instandsetzungsarbeiten an der Essinger Brücke im Dezember 2004 .....</b>	<b>26</b>
2.7.3	<b>Beschädigung des Regenmessers am Essinger Pumpenhaus 2005/2006.....</b>	<b>26</b>
3	<b>ERGEBNISSE .....</b>	<b>27</b>
3.1	<b>Laborergebnisse (Vorversuche) zur elektrischen Holzfeuchtemessung an Bauwerken im Gebrauch .....</b>	<b>27</b>
3.1.1	<b>Einfluss der Imprägnierung mit organischen Holzschutzmitteln auf die Leitfähigkeit des Holzes.....</b>	<b>27</b>
3.1.2	<b>Eignung von Messdübeln zur Holzfeuchtemessung.....</b>	<b>28</b>
3.2	<b>Holzfeuchteverläufe an ausgewählten Bauteilen der Essinger Brücke.....</b>	<b>29</b>
3.2.1	<b>Stiele der Brückenpfeiler auf der Wetterseite .....</b>	<b>29</b>
3.2.2	<b>Stiele der Brückenpfeiler auf der wetterabgewandten Seite.....</b>	<b>37</b>
3.2.3	<b>Zugbänder im Bereich von Nagelplatten.....</b>	<b>40</b>
3.2.4	<b>Zugbänder außerhalb von Nagelplatten .....</b>	<b>41</b>
3.3	<b>Verläufe von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte an der Essinger Brücke.....</b>	<b>43</b>
3.4	<b>Fäulnisentwicklung, Holzfeuchte- und Holztemperaturverläufe an Referenzmessobjekten.....</b>	<b>44</b>
4	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN.....</b>	<b>48</b>
4.1	<b>Eignung der Holzfeuchte-Messmethode für Bauwerke im Gebrauch .....</b>	<b>48</b>

---

4.2	Holzfeuchteverläufe an ausgewählten Bauteilen der Essinger Brücke .....	48
4.3	Einfluss der Gewässernähe auf die Feuchtebelastung .....	49
4.4	Eignung des Holzfeuchte-Monitorings als Fäulnis-Frühwarnsystem .....	49
5	LITERATUR.....	50
6	ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS .....	51
6.1	Abbildungen .....	51
6.2	Tabellen .....	56
7	ANHANG .....	57

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Ausgangslage

### 1.1.1 Konstruktionsmerkmale

Die Fußgänger- und Radwegbrücke über den Main-Donau-Kanal in Essing wurde 1987 erbaut und weist eine Gesamtlänge von ca. 190 m auf. Die Tragstruktur der Brücke besteht aus 9 nebeneinander liegenden Trägern aus Fichten-Brettschichtholz (BSH, 650 x 220 mm), die als Zugband über die gesamte Brückenlänge wirken. Wesentliche Konstruktionsdetails sind Abb. 1 zu entnehmen. Auf den zu Dreiergruppen zusammengefassten BSH-Elementen liegt eine doppelte, gekreuzt angeordnete Bretterlage, die als oberer, horizontaler Verband dient und Grundlage für Bleche ist, die als Wasser- und Witterungsschutz für das darunterliegende Holz dienen. Die eigentliche Fahrbahn befindet sich oberhalb dieser Bleche und besteht aus profilierten Bongossi-Brettern. Während die Hauptträger von oben durch die Bleche vor Witterungseinflüssen geschützt werden, erfolgt ein seitlicher Schutz durch erst nachträglich im Jahre 1998 angebrachte Sperrholzplatten, die das von den Metallblechen abtropfende Regenwasser von den Hauptträgern abhalten.

Unterhalb der BSH-Hauptträger befindet sich ein horizontaler Verband, der als Rautenfachwerk mit Bretterquerschnitten ausgebildet ist. Diese Diagonalstäbe sind mit den vertikalen Hauptträgern an deren Unterseiten mit genagelten Stahlblechen befestigt. Die Stahlbleche sind so breit wie die Hauptträger, ca. 40 cm lang und durch mehrere Nägel mit dem Holz verbunden.



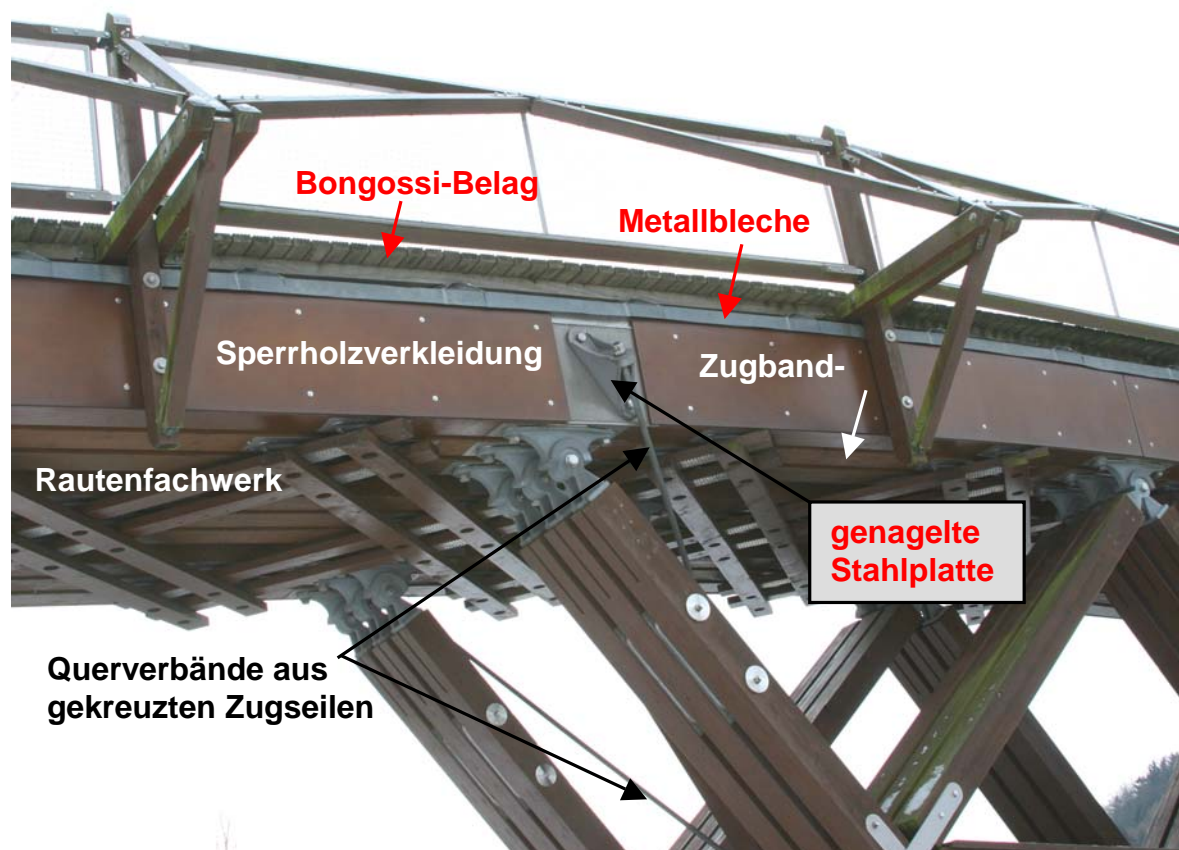


Abb. 1: Essinger Brücke: Konstruktionsmerkmale von Hauptträgern, unterem Verband und Querverbänden.

Die vertikale Zwischenabstützung der Konstruktion ist durch fünf in Brückenlängsrichtung gespreizte Stützenkonstruktionen (Pfeiler) ausgeführt. Die Pfeiler befinden sich unmittelbar links und rechts vom Kanalufer (je 2 Pfeiler), sowie am Ostufer (dorfseitig) zwischen der Hauptstraße und dem Dorf Essing. Die Knotenpunkte zwischen Hauptträgern und Pfeilern sind mit auf der Unterseite der Hauptträger angebrachten Stahl-Nagelplatten ausgeführt. Zur Stabilisierung der Konstruktion sind bei den Zwischenabstützungen Querverbände aus gekreuzten Zugseilen angeordnet. Die Verbindung zwischen Hauptträgern und den mit Seilen ausgebildeten Diagonalen erfolgt durch genagelte Stahlplatten, die an den äußeren Seitenflächen der Hauptträger angebracht sind. Diese Stahlplatten decken in der Höhe die gesamte Trägerhöhe ab und sind ca. 1,10 m lang.

Die fünf der vertikalen Abstützung der Hauptträger dienenden Pfeiler bestehen aus jeweils 18 in Dreier-Gruppen angeordneten Stielen, die V-förmig gespreizt und auf etwa halber Brückenhöhe durch jeweils 9 Querstreben verbunden sind. Innerhalb einer Dreier-Gruppe sind die Stiele durch Bolzen in Verbindung mit genagelten

Stahlplatten schubfest miteinander verbunden. Eine zusätzliche vertikale Abstützung ist durch weitere 18 kürzere Stiele je Pfeiler, die vom Knotenpunkt Querstrebe/Stiel zum Hauptträger verlaufen, gegeben.



Abb. 2: Vertikale Abstützung durch V-förmige Pfeilerkonstruktion der BSH-Hauptträger zwischen Hauptstraße und Dorf Essing.

Im oberen und unteren Drittel sind die Stiele der Dreier-Gruppen jeweils durch Bolzen und Stahl-Nagelplatten schubfest miteinander verbunden (Abb. 2 und Abb. 3).



Abb. 3: Knotenpunkt: Verbindung zwischen Betonfundamenten und Stielen der Pfeilerkonstruktion.

Sämtliche konstruktiven Holzbauteile der Brücke wurden nach Angaben der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe nach DIN 68 800 (1990) wie folgt behandelt:

- Grundierung mit Basileum Holzschutzgrund, Fa. Desowag Bayer, Düsseldorf
- Grund- und Zwischenanstrich (2-fach) mit Basiment Holzschutzlasur (Farbton Esche), Fa. Desowag Bayer, Düsseldorf
- Schlussanstrich mit Consolan Wetterschutzlasur U735 (Farbton Kastanie), Fa. Desowag Bayer, Düsseldorf

Im Jahr 1992 wurde folgende Nachbehandlung durchgeführt:

- Grundierung mit Basileum Fertigbau 100 B, Fa. Desowag Materialschutz GmbH, Düsseldorf
- Grund- und Schlussanstrich (2-fach) mit Basiment Holzschutzlasur U4931 (Farbton Kastanie), Fa. Desowag Materialschutz GmbH, Düsseldorf

### **1.1.2 Schadereignisse am Bauwerk vor Beginn des Untersuchungszeitraumes**

Im Rahmen einer Bauwerksprüfung durch das Wasser- und Schifffahrtsamt Nürnberg wurden 1997 Schädigungen durch holzerstörende Braunfäulepilze im Bereich der Metallplatten an den Knotenpunkten der Querverbände festgestellt. Durch das

---

Institut für Tragwerksbau der TU München wurden 1997 Bohrwiderstandsmessungen und Holzfeuchtemessungen an der Essinger Brücke durchgeführt, die zu der Empfehlung führten, geschädigte Bereiche des Bauwerkes auszutauschen und im Rahmen einer Sanierungsmaßnahme „Hinweise auf mögliche Schädigungen“ zu überprüfen. Durch das Institut für Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (BFH), Hamburg wurde im April 1998 eine weitere Untersuchung des Bauwerks unter folgenden Aspekten durchgeführt:

- Beurteilung der Konstruktion aus holzschutztechnischer Sicht
- Holzfeuchtemessungen an ausgewählten Bereichen der Hauptträger der Brücke
- Bohrwiderstandsmessungen an ausgewählten Bereichen der Hauptträger der Brücke
- Entnahme von Bohrkernen an ausgewählten Bereichen der Hauptträger der Brücke.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden unter anderem folgende Feststellungen getroffen:

- Holzschäden wurden ausschließlich unterhalb und neben den großen Metallplatten der Knotenpunkte des Querverbandes in den Feldern 15 und 33 (Abb. 8) festgestellt.
- In mehreren Bereichen wurde eine erhöhte Holzfeuchte festgestellt, die als Vorwarnung für das mögliche Entstehen von Schädigungen zu sehen war.
- Die konstruktive Abdeckung der Seitenflächen der Brücke wurde als einzig sinnvolle Lösung des Problems von Feuchteanreicherungen angesehen.

Als Reaktion auf die festgestellten Schädigungen wurden 1998 folgende Sanierungsarbeiten durchgeführt:

- Besonders stark geschädigte Bereiche, v.a. des oberwasserseitigen Trägers, wurden vollständig ausgetauscht.



- 
- Bereiche mit einer Schädigung geringer Tiefe wurden ausgefräst und durch Einsetzen passgenauer Leisten wieder verschlossen.
  - Risse im Holz der Außenträger wurden verpresst und sämtliche freiliegende Holzflächen mit einem Holzschutzanstrich versehen.
  - Die Randträgerflächen wurden durch eine hinterlüftete Sperrholzbeplankung bekleidet; die wiedereingebauten Nagelbleche blieben von der Verkleidung ausgenommen, wurden jedoch vor dem Wiedereinbau mit einer Neoprendichtung hinterlegt, um das Eindringen von Wasser zu verhindern.
  - Zusätzlich wurden Stahlprofile auf die Ränder der Bleche aufgeschweißt, um ablaufendes Wasser vom Holz fernzuhalten.

Im Rahmen einer Bauwerksprüfung am 08.09.2003 und einer Vorortbesichtigung durch Vertreter des Wasser- und Schifffahrtsamtes Nürnberg (WSA) und der Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe (BAW) wurden unter anderem folgende Schäden festgestellt:

- Anzeichen für einen Befall durch holzerstörende Pilze im Bereich der als schubfestes Verbindungsmittel dienenden Nagelplatten an den Fußenden der Stielgruppen auf der Nordseite der Brücke.
- Ein Großteil der Nägel in den oberseitigen Randbereichen der Nagelplatten ließ sich mit geringem Kraftaufwand herausziehen.
- Dunkel verfärbtes Bohrmehl ab einer Tiefe von 2-3 cm bei Probebohrungen.

## **1.2 Ergebnisse einer ersten Vorortbesichtigung**

Aufgrund der Bauwerksprüfung im Herbst 2003 wurde das Institut für Holzbiologie und Holzschutz der BFH über die Möglichkeiten einer Untersuchung des Bauwerkes mit automatisierter Holzfeuchtemessung am Bauwerk und Beurteilung von Sanierungsmöglichkeiten auf Eignung hinsichtlich der vorhandenen Pilzart im Rahmen eines Antrags auf Amtshilfe angesprochen. Am 12.02.2004 fand eine Besichtigung vor Ort statt. Anwesend waren Vertreter von WSA, BAW und BFH.

Ergebnis der Besichtigung war, dass insbesondere an mehreren Stellen der wetterseitigen Stielgruppen folgende Anzeichen für den Befall durch holzerstörende Pilze (Abb. 4) festgestellt wurden:

- Erweichung der Holzsubstanz im Inneren der Stiele (2-3 cm unterhalb der Holzoberfläche).
- Leichte Deformationen der Holzoberfläche.
- Nägel ließen sich teilweise mit sehr geringem Kraftaufwand aus dem Holz herausziehen.



Abb. 4: Anzeichen für Fäulnis im Inneren (ca. 2-3 cm unterhalb der Oberfläche) einer Stielgruppe auf der Nord- bzw. Wetterseite der Essinger Brücke im Bereich der unteren Nagelplatten (Stechbeitel lässt sich mit geringem Kraftaufwand in die erweichte Holzsubstanz drücken).

Die während der Besichtigung der Brücke gewonnenen Erkenntnisse ließen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der im Bereich der unteren Nagelplatten der wetterseitigen Stielgruppen aufgetretene Schaden wies starke Ähnlichkeiten zu dem im Jahr 1997 festgestellten Schädigungen an den Hauptträgern der Brücke auf.
- Die im Jahr 1998 durchgeführten Sanierungsmaßnahmen und Schutzmaßnahmen (Anbringen von Sperrholzabdeckungen) haben keinerlei positive Auswirkungen auf die Konstruktion im Bereich der vertikalen Abstützung (Pfeiler) aus holzschutztechnischer Sicht.
- Wasser gelangt nicht nur wetterseitig durch Schlagregen in die Pfeiler-Konstruktion, sondern auch durch Abtropfen von der Fahrbahn und den seitlichen Sperrholzabdeckungen der Hauptträger.

- Die gesamte Konstruktion ist lediglich durch einen äußeren Anstrich mit einem Holzschutzmittel, und somit nicht ausreichend, geschützt. Durch Risse und Nagellöcher kann vielfach Wasser in das ungeschützte Holz eindringen.
- Insbesondere im unteren Bereich der Stiele ist die Abtrocknung des einmal befeuchteten Holzes durch große Nagelplatten erschwert. Die Nagelplatten decken hier die gesamte Trägerhöhe ab, wobei der jeweils mittlere Stiel einer Gruppe sogar beidseitig abgedeckt wird.

Im Nachgang zur Vorortbesichtigung wurde zwischen der BAW und der BFH eine Forschungskoooperation zur „Untersuchung des langfristigen Holzfeuchteverlaufes an ausgewählten Bauteilen der Fußgängerbrücke in Essing“ vereinbart.

### **1.3 Zielstellung**

Ziel des Projektes ist es, Messeinrichtungen an ausgewählten Holzbauteilen der Fußgängerbrücke in Essing zu installieren und über einen Zeitraum von drei Jahren Messwerte zu erfassen, auszuwerten und mit den aufgetretenen Schädigungen durch holzerstörende Pilze zu korrelieren.

Die automatisierte Aufzeichnung von Messwerten dient sowohl der Früherkennung weiterer Schädigungen, die von Bedeutung für die Standsicherheit des Bauwerks sind, als auch der Gewinnung von Erkenntnissen hinsichtlich des Einflusses von Holzfeuchte, Temperatur, Luftfeuchte und anderer klimatischer Faktoren auf die Entstehung von Fäulnisschäden an Holzbauwerken, insbesondere in Gewässernähe.

## 2 DURCHGEFÜHRTE UNTERSUCHUNGEN

### 2.1 Prinzip und Aufbau der angewandten Holzfeuchte-Messeinrichtungen

#### 2.1.1 Einleimen von Messelektroden

Das für die vorliegende Untersuchung eingesetzte Messverfahren zur Bestimmung langfristiger Holzfeuchteverläufe wurde u.a. von RAPP *et al.* (2001) wie folgt beschrieben:

Gemessen wird der elektrische Widerstand des Holzes zwischen zwei in das Holz eingeleimten Elektroden. Hierzu werden polyamidummantelte Edelstahlseile (Durchmesser 1,2 –1,5 mm, ohne Ummantelung; Fa. Hartmann, Brühl-Rohrhof) in das zu prüfende Bauteil leitfähig eingeklebt. Zwei 2 mm breite und 25 mm tiefe Löcher werden im Abstand von 30 mm in das Bauteil gebohrt. Damit die Feuchtemessungen weniger durch eventuelle Störungen, die dem Faserverlauf folgen (z.B. Harzgallen oder Risse) beeinflusst werden, sind die Löcher um 6 mm versetzt angeordnet.

Die Edelstahlseile werden an ihren Enden auf einer Länge von 5 mm abisoliert und mittig in die Bohrlöcher eingesetzt, welche zuvor mit ca. 7 ml leitfähigem Klebstoffes gefüllt wurden (Tab. 1).

Tab. 1: Rezeptur des leitfähigen Klebstoffes.

Epoxydharz L (Fa. Conrad Electronic GmbH, Hirschau)	37,5g/100g
Härter L (Fa. Conrad Electronic GmbH, Hirschau)	14,5g/100g
Ethanol	nach Bedarf
Graphitpulver (fein gepulvert)	48,0g/100g

Um nur im Inneren des Bauteiles eine Leitfähigkeit zu erzielen, werden die Löcher mit einer isolierenden Epoxydharzvergussmasse ausgefüllt (Tab. 2).



Tab. 2: Rezeptur der isolierenden Epoxydisoliervergussmasse.

Epoxydharz L (Fa. Conrad Electronic GmbH, Hirschau)	49,0g/100g
Härter L (Fa. Conrad Electronic GmbH, Hirschau)	15,0g/100g
Weizenmehl Typ 405	36,0g/100g

Abb. 5 zeigt eine in Kiefernholz eingeleimte Elektrode im Schnitt.

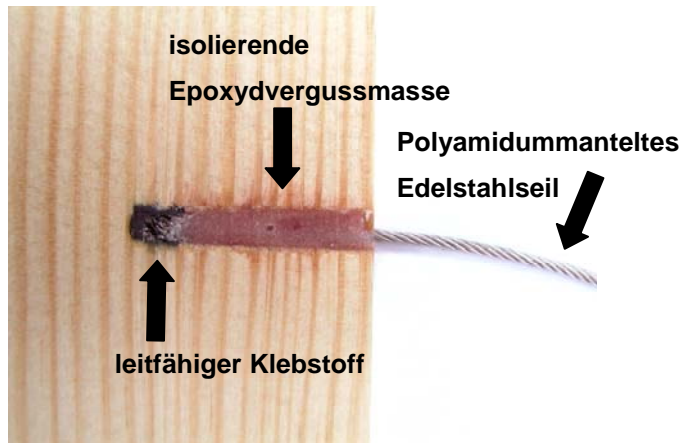


Abb. 5: Schnitt durch in Kiefernholz (*Pinus sylvestris* L.) eingeleimte Elektrode.

### 2.1.2 Messprinzip und Datenaufzeichnung

Die Holzfeuchtemessung erfolgte indirekt über die Messung des elektrischen Widerstandes mit Datenaufzeichnungsgeräten (Datenlogger) vom Typ „Materialfox Mini“ der Fa. Scantronik GmbH, Zorneding. Jeder Datenlogger verfügte über drei Kanäle und war somit an drei Messstellen angeschlossen. Die mit 16000 Speicherplätzen ausgestatteten Datenlogger maßen im Minutentakt und zeichneten den in  $10 \cdot \log \Omega$  gemessenen Widerstand des Holzes einmal täglich um 24:00 Uhr als Mittelwert auf. Anhand von Umrechnungsfaktoren ließen sich diese Widerstandswerte in Holzfeuchten  $u$  in % überführen.

## 2.2 Laboruntersuchungen zur elektrischen Holzfeuchtemessung an Bauwerken im Gebrauch

### 2.2.1 Besondere Mess- und Installationsbedingungen an der Essinger Brücke

Für die Installation von Messstellen und Messgeräten an der Essinger Brücke waren folgende Besonderheiten zu berücksichtigen:

- Die Installation hatte im Freien ohne Wetterschutz zu erfolgen.
- Die Installation hatte z.T. in großer Höhe zu erfolgen.
- Die Installation hatte z.T. von der Unterseite des Brückenbelages aus zu erfolgen (Gefahr des Herauslaufens von Klebstoff aus den Bohrlöchern).
- Die Messstellen waren z.T. bereits von braunfäuleerregenden holzerstörenden Pilzen befallen und abgebaut (Einfluss des pilzlichen Abbaus auf die Leitfähigkeit des Holzes).

Um das Einleimen der Elektroden vor Ort zu vermeiden, wurde die Eignung von Holzdübeln mit bereits im Labor eingeleimten Elektroden zur Holzfeuchtemessung untersucht. Die Holzdübel sollten weiterhin chemisch geschützt werden, um eine Messung in bereits durch Pilze abgebautem Holz zu vermeiden. Hierzu wurde der Einfluss von verschiedenen organischen Holzschutzmitteln auf die Leitfähigkeit des Holzes untersucht.

### **2.2.2 Einfluss der Imprägnierung mit organischen Holzschutzmitteln auf die Leitfähigkeit des Holzes**

Axial zugeordnete Kiefernholzprüfkörper (*Pinus sylvestris* L.) von 50 x 2,5 x 50 mm<sup>3</sup> (ax. x tan. x rad.) wurden für eine Vakuum-Druck-Tränkung (15 min Vakuum 20 mbar abs.; 15 min Druck 9 bar abs.) mit den in Tab. 3 aufgeführten Holzschutzmitteln hergestellt.

Tab. 3: Organische Holzschutzmittel, Hersteller und Wirkstoffkonzentrationen nach Herstellerangaben.

Nr.:	Holzschutzmittel	Hersteller	Wirkstoffkonzentrationen
1	Koranol Holzbau DV	Fa. Obermeier GmbH & Co KG	1,50 % Propiconazol 0,06 % Cyfluthrin 0,23 % IPBC
2	Sonderformulierung (Lösemittel: Testbenzin)	Fa. Obermeier GmbH & Co KG	1,50 % Propiconazol 1,50 % Tebuconazol
3	Wolvac L0-F	Fa. Dr. Wolman GmbH	0,8 % Propiconazol 0,01% Farox

Nach der Tränkung und einer Trocknungsphase von 14 Stunden bei Raumtemperatur wurden jeweils zwei Nuten (Tiefe 1,5 mm; Breite 3 mm) im Abstand

von 30 mm in die Prüfkörper gesägt. Die Hälfte der Prüfkörper wurde mit Nuten quer zur Faserrichtung, die andere Hälfte mit Nuten parallel zur Faserrichtung versehen. In die Nuten wurde jeweils ein Edelstahlseil (1,5 mm Durchmesser) mit einem leitfähigen Klebstoff (Tab. 1) eingeklebt. Holzfeuchtemessungen mit einem Messgerät der Fa. Gann wurden durchgeführt nach 90 Stunden Lagerung in einem Trockenschrank bei 30 °C, nach 9 Tagen Lagerung im Normklima (20 °C / 65 % relative Luftfeuchte (r.L.)) und nach 9 Tagen in einem 20 °C / 98 % r.L. – Klima.

### **2.2.3 Eignung von Messdübeln zur Holzfeuchtemessung**

Holzdübel mit bereits im Labor eingeleimten Elektroden wurden hinsichtlich ihrer Eignung für die Messung der Holzfeuchte durch vergleichende Holzfeuchtemessungen gravimetrisch und nach dem Widerstandsprinzip untersucht. Hierzu wurden insgesamt 24 Holzdübel (Durchmesser: 13 mm; Länge: 60 mm) aus Kiefernspiltholz hergestellt (Tab. 4). In die Hälfte der Dübel wurden wie folgt Elektroden eingeleimt:

In axialer Richtung wurden im Abstand von ca. 5 mm zwei Löcher (Durchmesser: 2 mm) mit einer Tiefe von 15 mm und 60 mm gebohrt. Analog zu der unter 2.1.1 beschriebenen Weise wurden zwei Edelstahlseile in die Dübel eingeleimt. Beide Bohrlöcher wurden zusätzlich mit nicht-leitender Epoxydvergussmasse gefüllt (Abb. 6). Die Messung des elektrischen Widerstandes erfolgte somit in axialer Richtung mit einem Versatz um ca. 5 mm quer zur Faserrichtung über eine Messstrecke von ca. 30 mm.



Abb. 6: Längsschnitt durch einen Holzdübel mit zwei eingeleimten Messelektroden.

Tab. 4: Bezeichnung, Behandlung und Anzahl von Kiefernholzdübeln für die Untersuchung der Eignung zur elektrischen Holzfeuchtemessung.

Bezeichnung	Eingeleimte Elektroden	Imprägnierung mit Wolvac L0-F	Künstlicher Stress	Anzahl der Dübel
KE	ja	nein	nein	3
KES	ja	nein	ja	3
HE	ja	ja	nein	3
HES	ja	ja	ja	3
K	nein	nein	nein	3
KS	nein	nein	ja	3
H	nein	ja	nein	3
HS	nein	ja	ja	3

Um den Einfluss einer natürlichen Bewitterung auf den Kontakt zwischen Edelstahlkabel, leitfähigem Klebstoff und Holz zu simulieren, wurde die Hälfte der Dübel einem künstlichen Stress durch eine Vakuum-Druck-Tränkung (15 min Vakuum 20 mbar abs.; 15 min Druck 9 bar abs.) und einer anschließenden Trocknung bei 60 °C während 24 h unterworfen.

Die Holzfeuchtemessung erfolgte mit einem Gann-Widerstandsmessgerät an Proben mit eingeleimten Elektroden und gravimetrisch an Proben ohne eingeleimte Elektroden nach 4 Tagen im Normalklima und nach 22 Tagen in einem 20 °C/ 98 % r.L. – Klima.

## 2.3 Holzfeuchtemessungen an der Essinger Brücke

### 2.3.1 Anordnung der Messstellen

Insgesamt 64 Holzfeuchte - Messstellen wurden an der Essinger Brücke installiert, hiervon 39 in den Stielen der Brückenpfeiler auf der Nordseite (Wetterseite), 13 in den Stielen der Brückenpfeiler auf der Südseite, 8 in den Zugbändern im Bereich von Nagelplatten an den Knotenpunkten der Zwischenabstützungen auf beiden Brückenseiten und 4 in den Zugbändern außerhalb von Nagelplatten. Die Holzfeuchte-Messstellen sind nach folgenden Schlüsseln nummeriert:

Messstellen 1 bis 52:

a	Pfeiler- Nr.	1 bis 5
b	Westseite/Ostseite	w, o
c	Stiel- Nr.	1 bis 9
d	Messstellenhöhe*	u, m, w

Messstellen 53 bis 64:

a	Feld- Nr.	1 bis 41
b	Südseite/Nordseite	s, n
c	Parallele	1, 2

\*Die Messstellen an den Pfeilern befinden sich in drei verschiedenen Höhen: unten (u) im Bereich der unteren die Stiele verbindenden Nagelplatten, mittig (m) oberhalb der unteren Nagelplatten und oben (o) im Bereich der oberen Nagelplatten.

Die genaue Bezeichnung und Lage der einzelnen Messstellen ist Abb. 7, Abb. 8 und Tab.5 zu entnehmen.

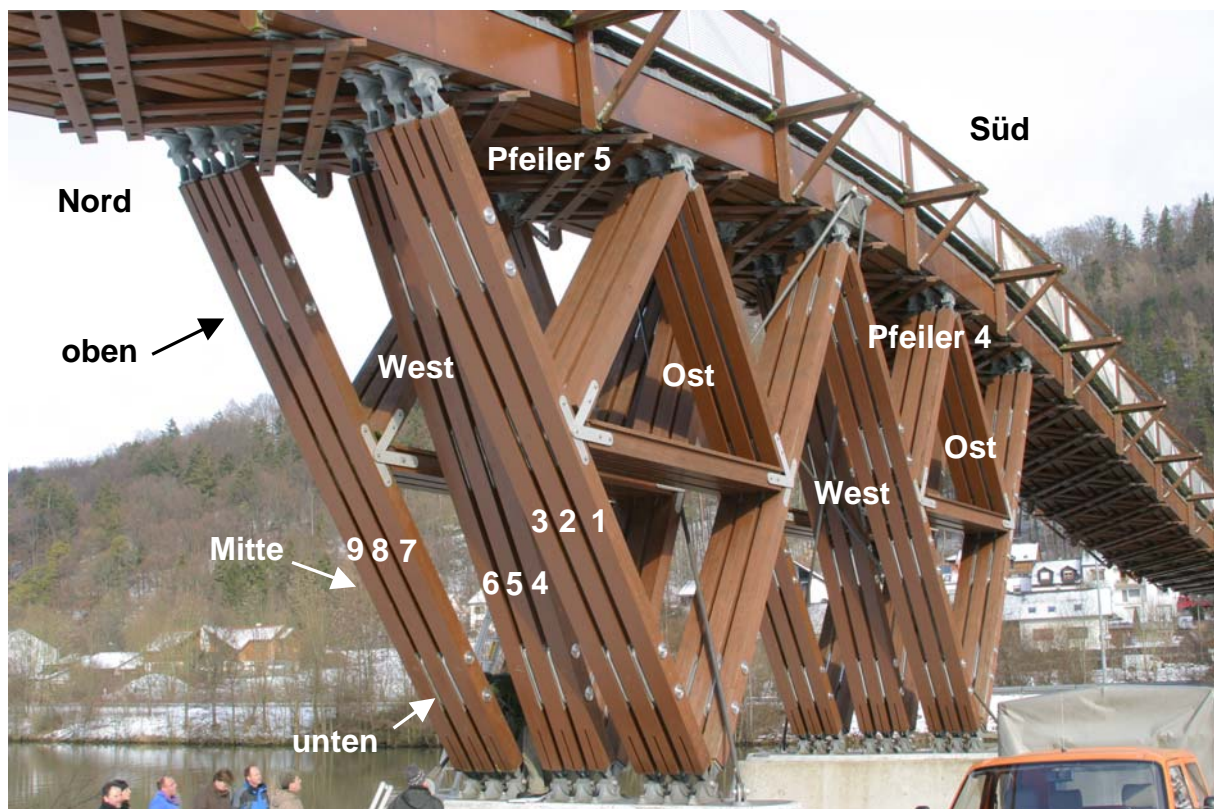


Abb. 7: Bezeichnung von Stielen und Pfeilern der Essinger Brücke.



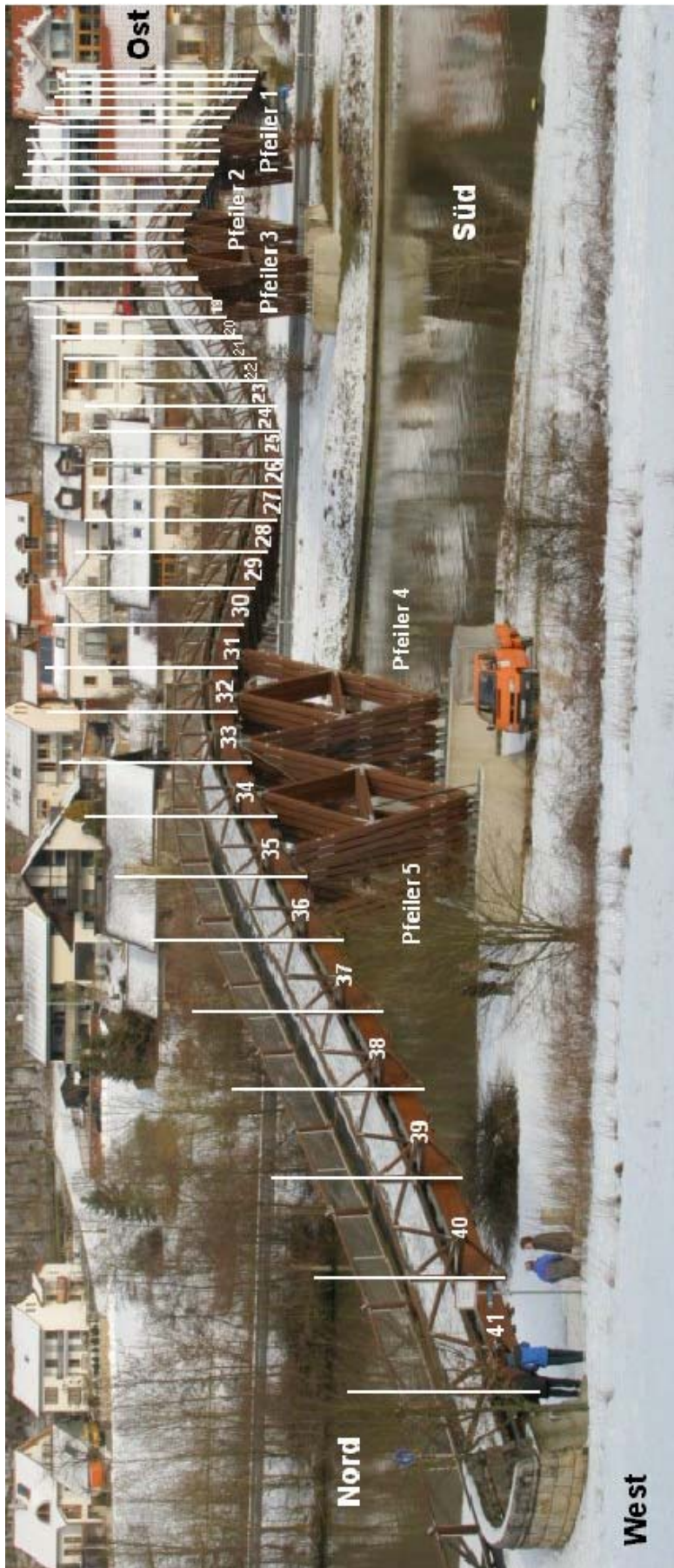


Abb. 8: Nummerierung von Feldern und Pfeilern an der Essinger Brücke

Tab.5: Bezeichnung und Lage der Holzfeuchte- Messstellen an der Essinger Brücke.

Nr.	Lage	Nr.	Lage	Nr.	Lage	Nr.	Lage
U1	1.o.1.u	U17	2.w.8.u	U33	4.w.1.u	U49	5.w.8.o
U2	1.o.1.m	U18	2.w.8.m	U34	4.w.1.m	U50	5.w.9.u
U3	1.o.1.o	U19	2.w.9.u	U35	4.w.7.u	U51	5.w.9.m
U4	1.o.7.u	U20	2.w.9.m	U36	4.w.7.m	U52	5.w.9.o
U5	1.o.7.m	U21	3.w.1.u	U37	4.w.8.u	U53	15.s.1
U6	1.o.7.o	U22	3.w.1.m	U38	4.w.8.m	U54	15.s.2
U7	1.o.8.u	U23	3.w.1.o	U39	4.w.9.u	U55	15.n.1
U8	1.o.8.m	U24	3.w.7.u	U40	4.w.9.m	U56	15.s.2
U9	1.o.8.o	U25	3.w.7.m	U41	5.w.1.u	U57	18.s
U10	1.o.9.u	U26	3.w.7.o	U42	5.w.1.m	U58	18.n
U11	1.o.9.m	U27	3.w.8.u	U43	5.w.1.o	U59	33.s.1
U12	1.o.9.o	U28	3.w.8.m	U44	5.w.7.u	U60	33.s.2
U13	2.w.1.u	U29	3.w.8.o	U45	5.w.7.m	U61	33.n.1
U14	2.w.1.m	U30	3.w.9.u	U46	5.w.7.o	U62	33.n.2
U15	2.w.7.u	U31	3.w.9.m	U47	5.w.8.u	U63	41.s
U16	2.w.7.m	U32	3.w.9.o	U48	5.w.8.m	U64	41.n

### 2.3.2 Installation der Messeinrichtungen

Für die automatisierte elektrische Messung der Holzfeuchte wurde an jeder Messstelle ein Messdübel (cf. 2.2.3) in dem zu untersuchenden Bauteil installiert. Hierzu wurde ein 70 mm tiefes Loch (Durchmesser 13 mm) in das Holzbauteil gebohrt und ein Messdübel von 60 mm Länge in das Loch eingeschlagen, so dass eine Presspassung entstand. Die verbleibenden 10 mm des Bohrloches an der Oberfläche des Holzbauteils wurden mit einer Polyurethan - Dichtmasse (Sikaflex-290 DC, Fa. Sika GmbH, Stuttgart) versiegelt, um das Eindringen von flüssigem Wasser in die Messstelle zu verhindern. Bis zu drei Messdübel wurden über Edelstahlkabel mit einem Datenlogger (2.1.2), der zum Schutz gegen Feuchtigkeit in einer ebenfalls versiegelten Kunststoffdose verschlossen wurde, verbunden (Abb. 9). Messstellen hinter den Metallplatten (Nagelplatten) in den Knotenpunkten der Zwischenabstützung wurden analog zu den anderen Messstellen installiert, in dem die Nagellöcher auf 13 mm aufgebohrt und die Messdübel ebenfalls in dahinter befindlichen Zugbändern versenkt wurden (Abb. 10).



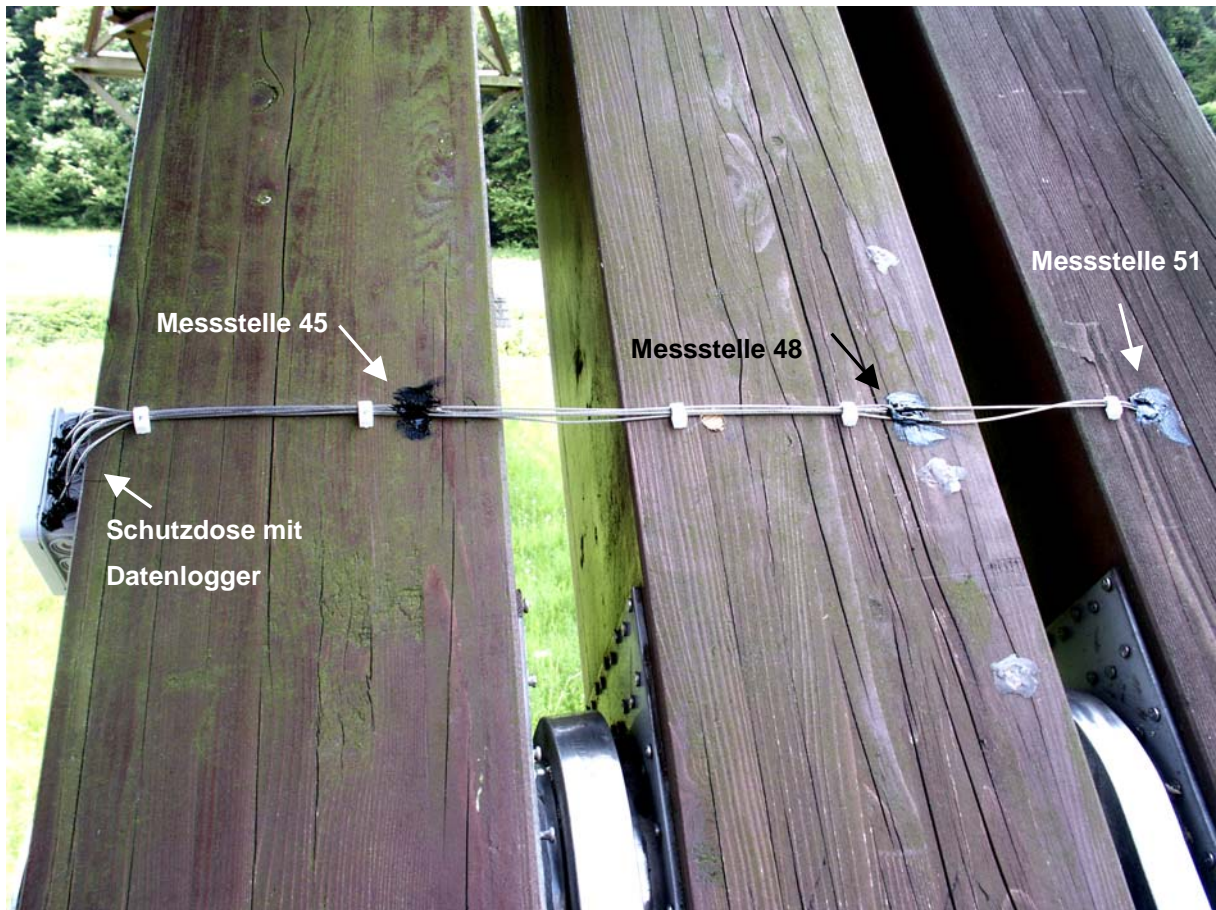


Abb. 9: Messstellen 45, 48 und 51, verbunden mit Datenlogger M17, an Pfeiler 5 der Essinger Brücke.

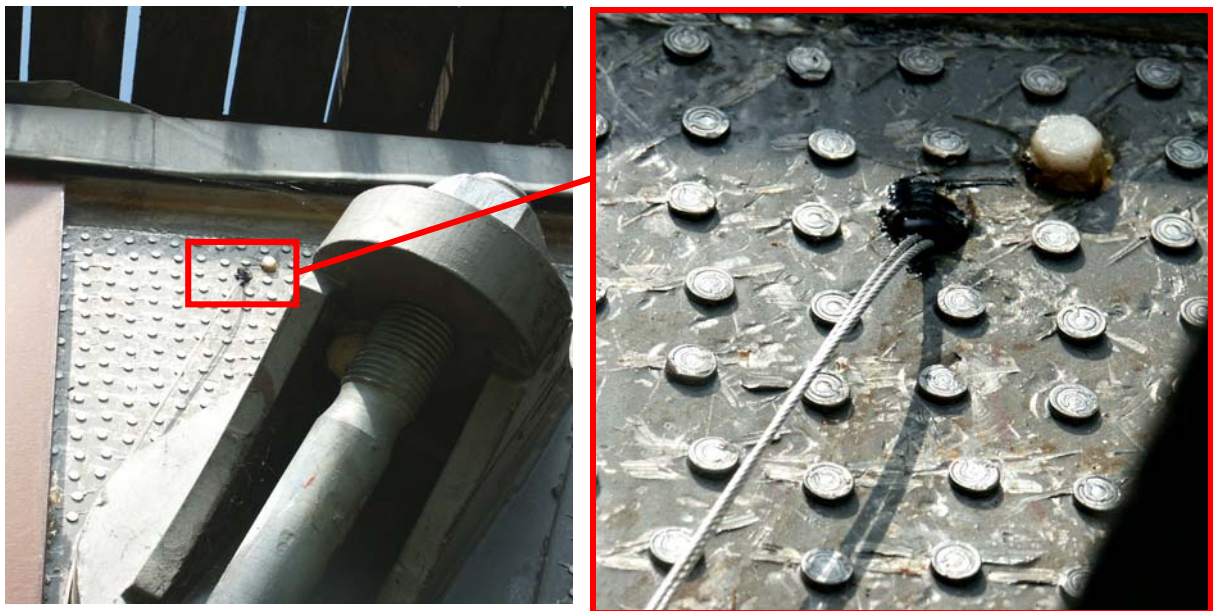


Abb. 10: Messstelle 59, hinter einer Nagelplatte eines Knotenpunktes zwischen Pfeiler 5 und 6 der Essinger Brücke.



---

## 2.4 Messung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte an der Essinger Brücke

Die Messung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte an der Essinger Brücke erfolgte mit vier Hygrofox Mini – Datenloggern der Fa. Scantronik GmbH, Zorneding. Die Logger wurden auf der Brückenunterseite an folgenden Stellen installiert:

- nahe des vorderen Widerlagers (Feld 1)
- nahe des hinteren Widerlagers (Feld 41)
- nahe des Kanalufers Ostseite (Feld 17)
- nahe des Kanalufers Westseite (Feld 31).

## 2.5 Referenzmessungen in Doppellagen-Freilandversuchen

### 2.5.1 Versuchsaufbau

Als Referenz zu den Holzfeuchtemessungen an der Essinger Brücke wurden zwei Doppellagen-Testsets (u.a. Rapp und Augusta, 2004) in Essing ausgebracht. Die Testsets bestanden aus jeweils 35 Prüfkörpern (12x Kiefer-Splint, 11x Douglasie-Kern, 12x Fichte) in den Abmessungen 500 x 50 x 25 mm<sup>3</sup>, die in zwei horizontalen, gegeneinander um eine halbe Prüfkörperbreite verschobenen Lagen übereinander angeordnet wurden. Abb. 11 ist die Anordnung der Prüfkörper, die Lagerung auf mit Bitumenschweißbahnen abgedeckten Fichtenkanthölzern und die seitliche Abdeckung der Hirnenden der Prüfkörper zu entnehmen. Diese Doppellagen-Anordnung stellt eine Wasserfalle dar und wird deshalb für Dauerhaftigkeitsuntersuchungen in einer besonders stark beanspruchten Situation innerhalb der Gefährdungsklasse 3 (DIN 68 800, 1990) eingesetzt.



Abb. 11: Aufbau der Doppellagen-Testsets. Links: Oberseite, gegeneinander versetzte Doppellage. Rechts: Unterseite, Schutzdose mit Holzfeuchte- und Holztemperatur-Loggern.

Je Holzart wurden drei Prüfkörper der unteren Lage mit eingeleimten Elektroden (2.1.1) versehen und analog zur Holzfeuchtemessung an der Essinger Brücke mit 3 Datenloggern „Materialfox Mini“ je Testset verbunden. Zusätzlich war jedes Testset mit einem Temperatur-Logger „Thermofox Mini“ (Fa. Scantronik GmbH, Zorneding) zur Messung der Holztemperatur ausgestattet. Einmal jährlich wurden die Prüfkörper hinsichtlich Verfärbungen und Befall durch holzerstörende Pilze nach DIN EN 252 (1990) bewertet.

### **2.5.2 Standorte der Doppellagen-Testsets**

Das Testset eb (essingbrücke) wurde auf den der Wetterseite zugewandten Querstreben des Pfeilers 2 der Essinger Brücke exponiert (Abb. 12), so dass es durch den Brückenbelag zwar unmittelbar vor Niederschlag geschützt, jedoch ungeschützt vor Schlagregen war.



Abb. 12: Doppellagen-Testset eb (**essingbrücke**) exponiert auf den Querstreben (Wetterseite) von Pfeiler 2 der Essinger Brücke.

Das Testset ep (**essingpumpenhaus**) wurde auf dem zum Pumpenhaus Essing gehörigen Gelände des Wasser- und Schifffahrtsamtes Nürnberg etwa 800 m von der Essinger Brücke entfernt frei bewittert und in unmittelbarer Nähe des Main-Donau-Kanals exponiert.



Abb. 13: Doppellagen-Testset ep (essingpumpenhaus) exponiert auf dem zum Pumpenhaus Essing gehörigen Gelände des Wasser- und Schifffahrtsamtes Nürnberg.

Zusätzlich wurde zur Messung von Lufttemperatur und Niederschlag ein Regenmesser (Fa. Wilmers Messtechnik, Hamburg) in Kombination mit einem Ereignislogger „Eventfox“ (Fa. Scantronik GmbH, Zorneding) direkt neben dem Testset ep exponiert.

## 2.6 Zeitlicher Verlauf der Messungen an der Essinger Brücke

Die Installation der Messeinrichtungen an der Essinger Brücke erfolgte vom 24. bis 26.05.2004. Beginn der Messung war somit der 26.05.2004. Die Messgeräte wurden in der Folge an folgenden Tagen ausgelesen:

24./25.05.2005

13./14.09.2005

25./26.07.2006

22./23.05.2007



---

## **2.7 Bauliche Maßnahmen und Schadensereignisse während des Untersuchungszeitraumes**

### ***2.7.1 Beschädigung von Messstellen am 27.07.2004***

Am 27.07.2004 wurde durch Herrn Wild, WSA Nürnberg/Außenbezirk Riedenburg eine Beschädigung der Messstellen 4, 7 und 10, bzw. des Datenloggers M2 festgestellt. Die Edelstahlkabel waren aus der Schutzdose herausgerissen worden, die Dose samt Datenlogger lag auf dem Boden. Ursache war vermutlich Unachtsamkeit eines Passanten beim Besteigen der Brückenkonstruktion. Der Schaden wurde am 02.08.2004 durch Mitarbeiter des WSA Nürnberg/Außenbezirk Riedenburg behoben.

### ***2.7.2 Instandsetzungsarbeiten an der Essinger Brücke im Dezember 2004***

Verbindungen zwischen den sog. 3er-Stützbalken wurden angebracht, um die Standsicherheit des Bauwerkes zu erhöhen.

### ***2.7.3 Beschädigung des Regenmessers am Essinger Pumpenhaus 2005/2006***

Während der Auswertung am 26.07.2006 wurde festgestellt, dass das Datenübertragungskabel vom Regenmesser am Essinger Pumpenhaus durchschnitten und vermutlich ebenfalls durch Fremdeinwirkung die Schutzdose für den zugehörigen Datenlogger (epr) beschädigt worden war. Durch Wassereintritt verursacht ließ sich der Datenlogger epr nicht mehr auslesen. Der Datenlogger wurde daraufhin ausgetauscht und innerhalb des Regenmessergehäuses untergebracht.

### 3 ERGEBNISSE

#### 3.1 Laborergebnisse (Vorversuche) zur elektrischen Holzfeuchtemessung an Bauwerken im Gebrauch

##### 3.1.1 Einfluss der Imprägnierung mit organischen Holzschutzmitteln auf die Leitfähigkeit des Holzes

Die Messung der Holzfeuchte an den mit drei verschiedenen Holzschutzmitteln getränkten Kiefernproben ergab weder in Faserrichtung noch quer zur Faserrichtung signifikante Unterschiede zu den unbehandelten Kontrollproben (Abb. 14).

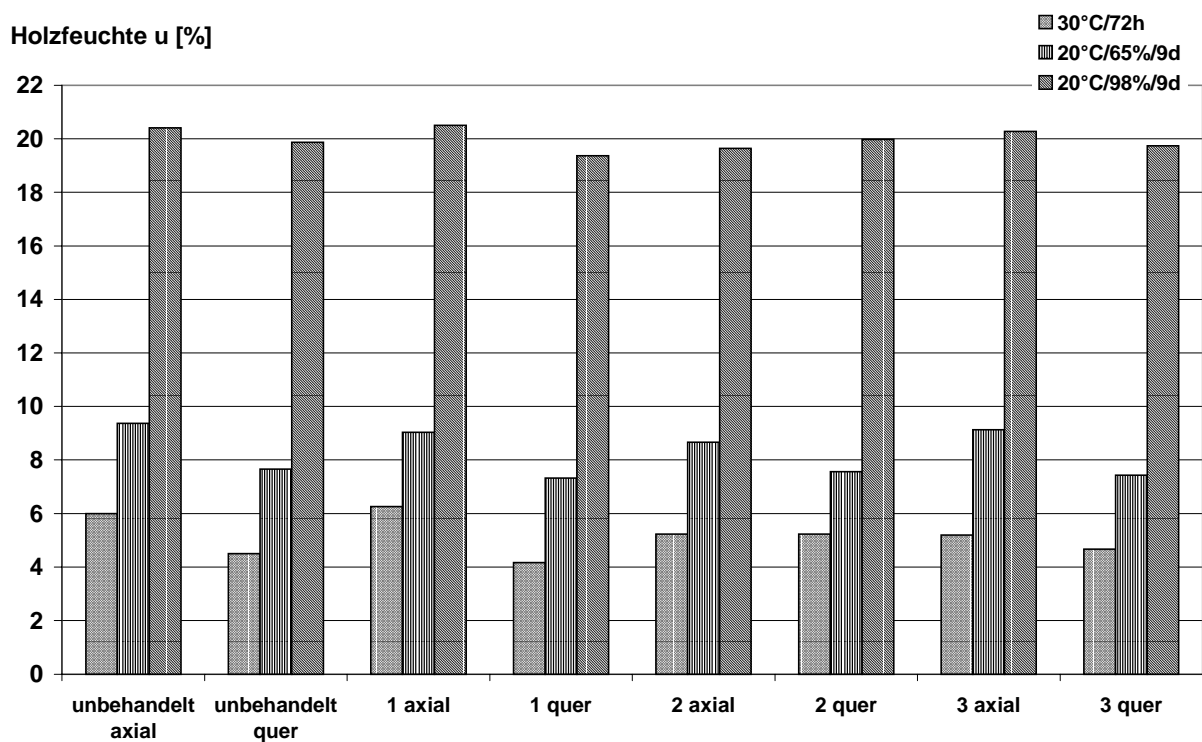


Abb. 14: Elektrisch gemessene Holzfeuchten u in % an unbehandelten und mit drei verschiedenen Holzschutzmitteln (1=Koranol Holzbau DV; 2=Sonderformulierung, Fa. Obermeier; 3=Wolvac L0-F) getränkten Kiefernslint-Prüfkörpern in und quer zur Faserrichtung nach Lagerung in verschiedenen Klimata.

Für weitere Versuche und Messungen mit Holzdübeln wurde das Holzschutzmittel 3 (Wolvac L0-F) verwendet.

### 3.1.2 Eignung von Messdübeln zur Holzfeuchtemessung

Die vergleichende Holzfeuchtemessung an Holzdübeln ergab sehr geringe Unterschiede zwischen den beiden Messverfahren: Nach Lagerung im Normklima lagen die gravimetrisch ermittelten Holzfeuchten der Dübel im Mittel weniger als ein Holzfeuchte-Prozentpunkt unter den nach dem Widerstandsprinzip ermittelten Werten (Abb. 15). Nach Lagerung in 20°C/98% r.L. lagen die gravimetrisch ermittelten Holzfeuchtwerte dagegen geringfügig über den nach dem Widerstandsprinzip ermittelten Werten.

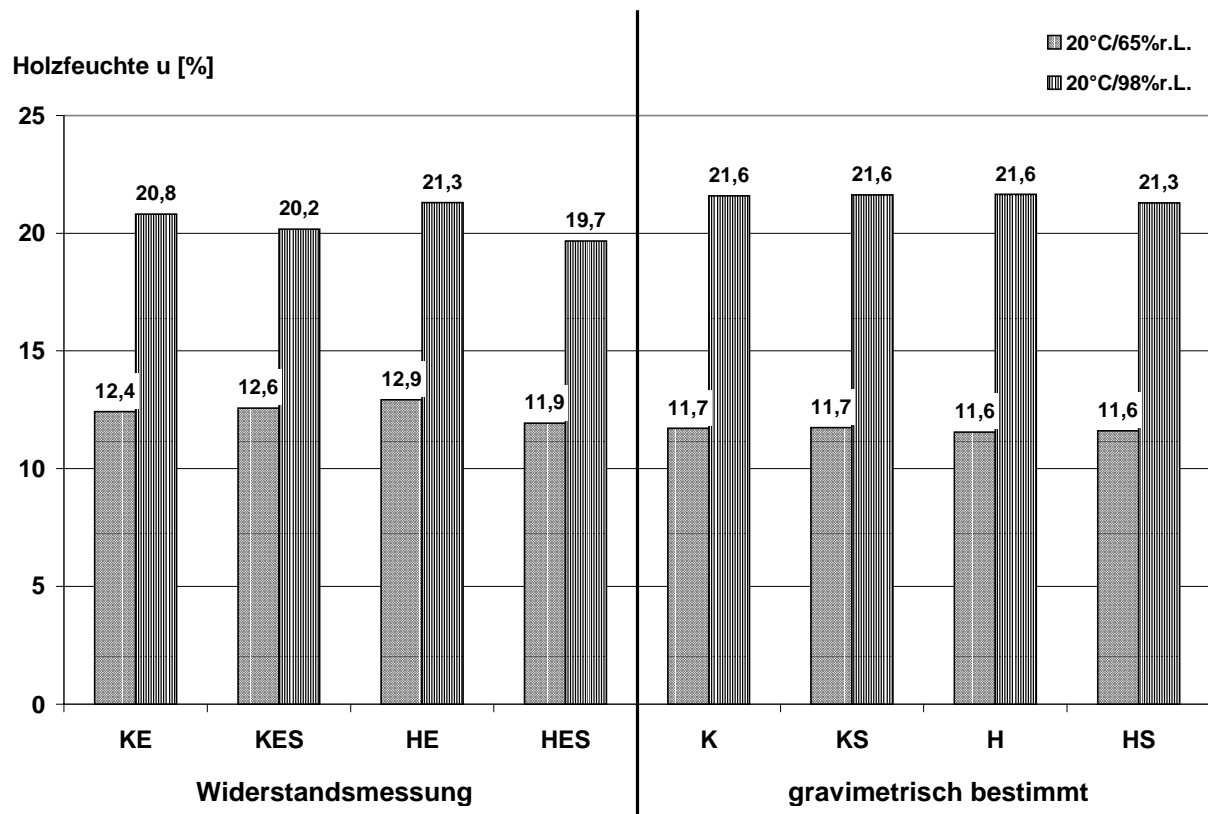


Abb. 15: Holzfeuchten von Holzdübeln in zwei verschiedenen Klimaten, gemessen mit einem Widerstands-Holzfeuchtemessgerät (Fa. Gann) und gravimetrisch bestimmt (K = Kiefer unbehandelt, E = mit eingeleimter Elektrode, H = mit Wolvac L0-F imprägniert, S = gestresst).

Aus Abb. 15 wird ebenfalls deutlich, dass weder die Imprägnierung mit dem Holzschutzmittel Wolvac L0-F noch der künstliche Stress das Ergebnis der Holzfeuchtemessung signifikant beeinflussten, jedoch tendenziell durch den künstlichen Stress etwas niedrigere Holzfeuchtwerte angezeigt werden.

## **3.2 Holzfeuchteverläufe an ausgewählten Bauteilen der Essinger Brücke**

Im folgenden sind die Holzfeuchteverläufe an ausgewählten Bauteilen der Essinger Brücke als Monatsmittel dargestellt, Tageswerte der Holzfeuchte sind analog für alle untersuchten Bauteile dem Anhang zu entnehmen.

### **3.2.1 Stiele der Brückenpfeiler auf der Wetterseite**

Die von Mai 2004 bis Mai 2007 ermittelten Holzfeuchteverläufe in den wetterseitigen Stiel-Dreiergruppen der Brückenpfeiler sind in Abb. 16 bis Abb. 30 dargestellt. Es sind für jeden einzelnen Stiel die Verlaufskurven an den zwei, bzw. drei Messstellen im Vergleich aufgetragen.

Als Ergebnis der Messungen lässt sich folgendes feststellen:

In allen Stielen, mit Ausnahme von Stiel 8 in Pfeiler 2 (Abb. 20) und Stiel 9 im Pfeiler 4 (Abb. 27) wurde im Bereich der unteren Nagelplatten eine höhere Holzfeuchte als im darüber befindlichen Bereich ermittelt. Lediglich in Stiel 8 / Pfeiler 4 (Abb. 26) lag die Holzfeuchte an diesen unteren Messpunkten überwiegend unterhalb einer kritischen Feuchte von 30%. Auch im Bereich der oberen Nagelplatte wurden erhöhte Holzfeuchten festgestellt, die teilweise über denen oberhalb der unteren Nagelplatten lagen (Abb. 28, Abb. 29). Auffällig ist die höhere Schwankung der Holzfeuchte im Bereich der unteren Nagelplatte verglichen mit den anderen Messbereichen.

Während der Auswertungen wurden an allen 5 Pfeilern im Bereich der wetterseitigen Dreier-Stielgruppen Schädigungen durch Braunftäule visuell ermittelt. Die aufgetretene Fäulnis wurde in allen Fällen im Bereich der Nagelplatten, bzw. direkt unterhalb der Nagelplatten lokalisiert. Im einzelnen waren folgende Stiele betroffen:

Pfeiler 1: Stiel 8 Ost, Stiel 7 West

Pfeiler 2: Stiel 8 Ost, Stiel 9 West

Pfeiler 3: Stiel 7 Ost, Stiel 9 West

Pfeiler 4: Stiel 8 Ost, Stiel 8+9 West

Pfeiler 5: Stiel 9 Ost, Stiel 7+8 West

Das bislang ausschließliche Auftreten von Schädigungen durch Braunftäule in direkter Nähe zu den unteren Nagelplatten deckt sich weitgehend mit den Ergebnissen der Feuchtemessung, die für diese Bereiche die höchste



Feuchtebelastung und somit das höchste Befallsrisiko ergab. Als Ursache für die erhöhten Holzfeuchten wird Kondensation und die verhinderte Austrocknung durch die großflächige Metallauflage angenommen.

### Holzfeuchte [%]

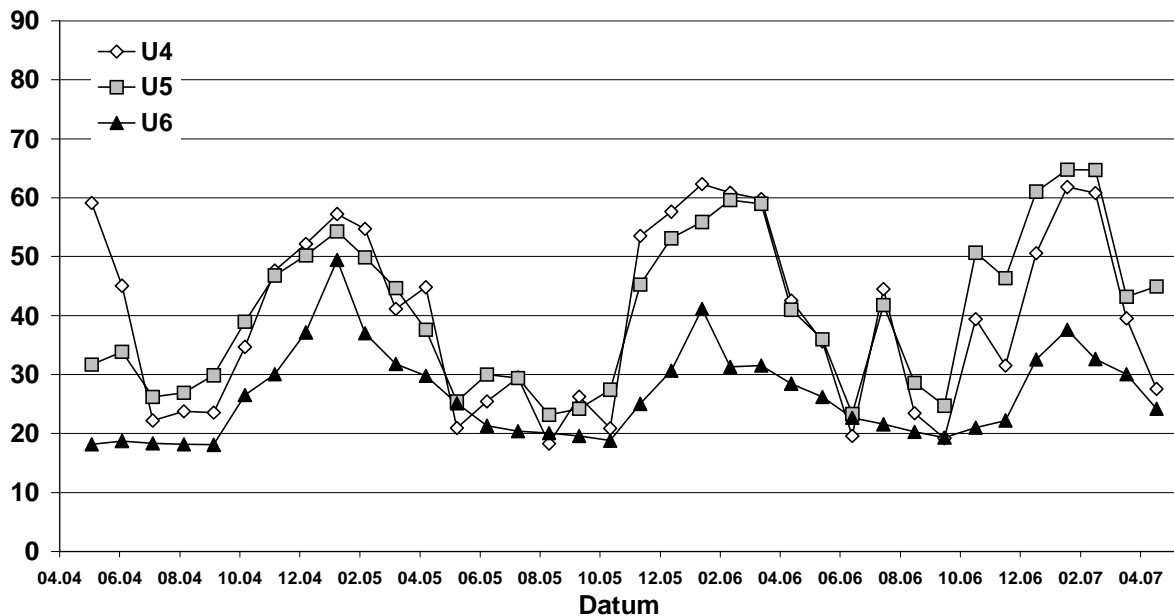


Abb. 16: Holzfeuchteverläufe im Stiel 7 des Brückenpfeilers 1 im Bereich der unteren Nagelplatte (U4), oberhalb der unteren Nagelplatte (U5) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U6).

### Holzfeuchte [%]

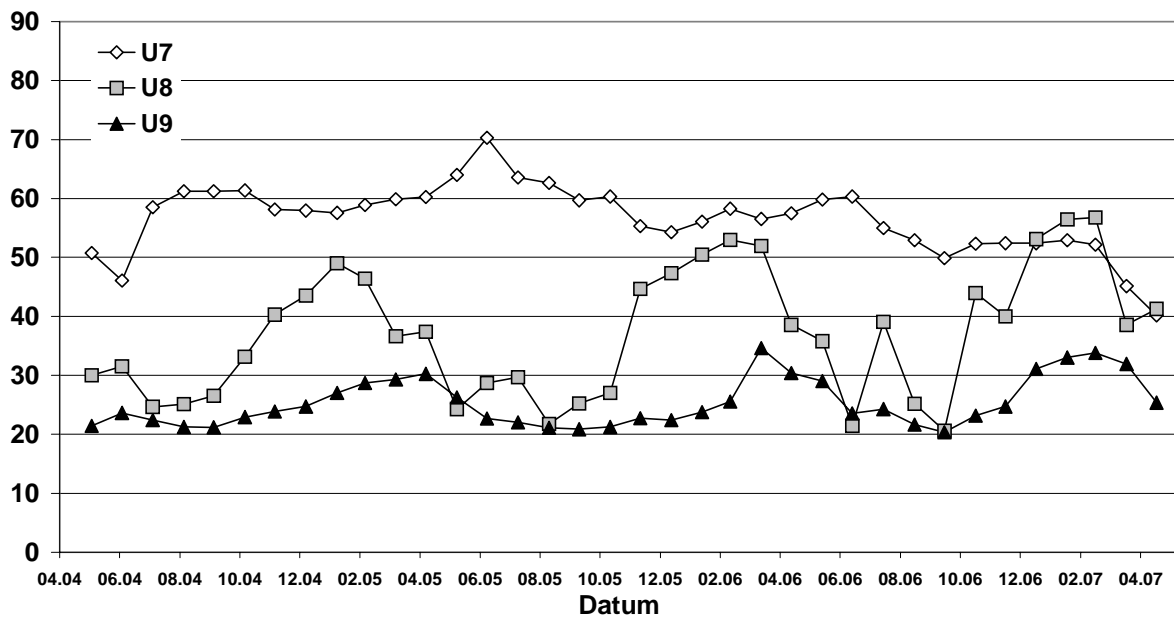


Abb. 17: Holzfeuchteverläufe im Stiel 8 des Brückenpfeilers 1 im Bereich der unteren Nagelplatte (U7), oberhalb der unteren Nagelplatte (U8) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U9).

## Holzfeuchte [%]

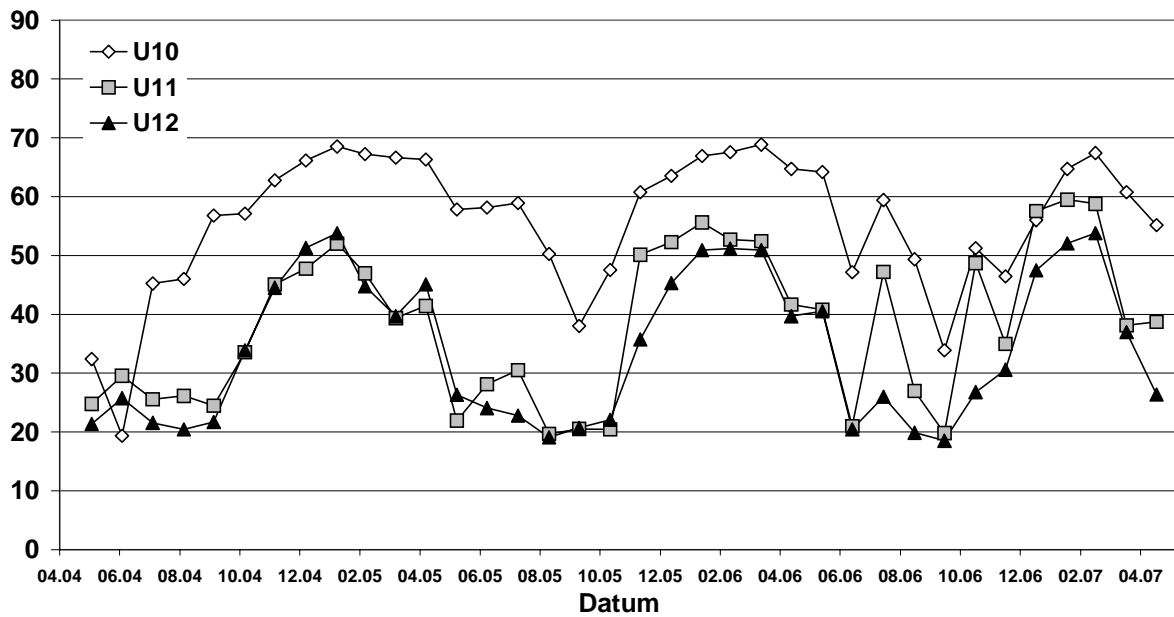


Abb. 18: Holzfeuchteverläufe im Stiel 9 des Brückenpfeilers 1 im Bereich der unteren Nagelplatte (U10), oberhalb der unteren Nagelplatte (U11) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U12).

## Holzfeuchte [%]

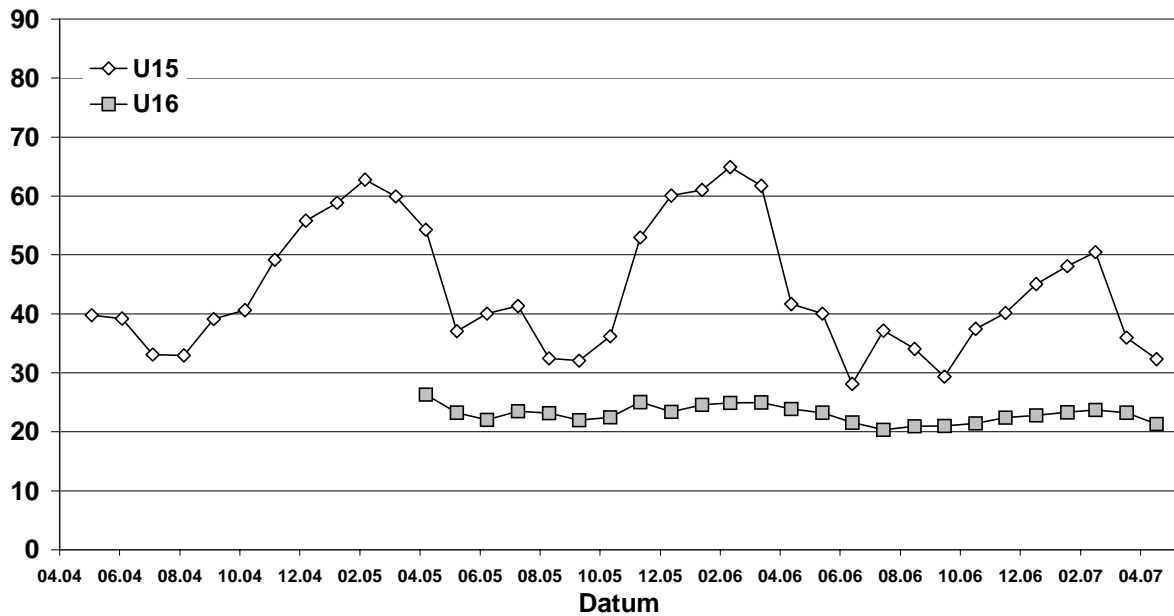


Abb. 19: Holzfeuchteverläufe im Stiel 7 des Brückenpfeilers 2 im Bereich der unteren Nagelplatte (U15) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U16).

## Holzfeuchte [%]

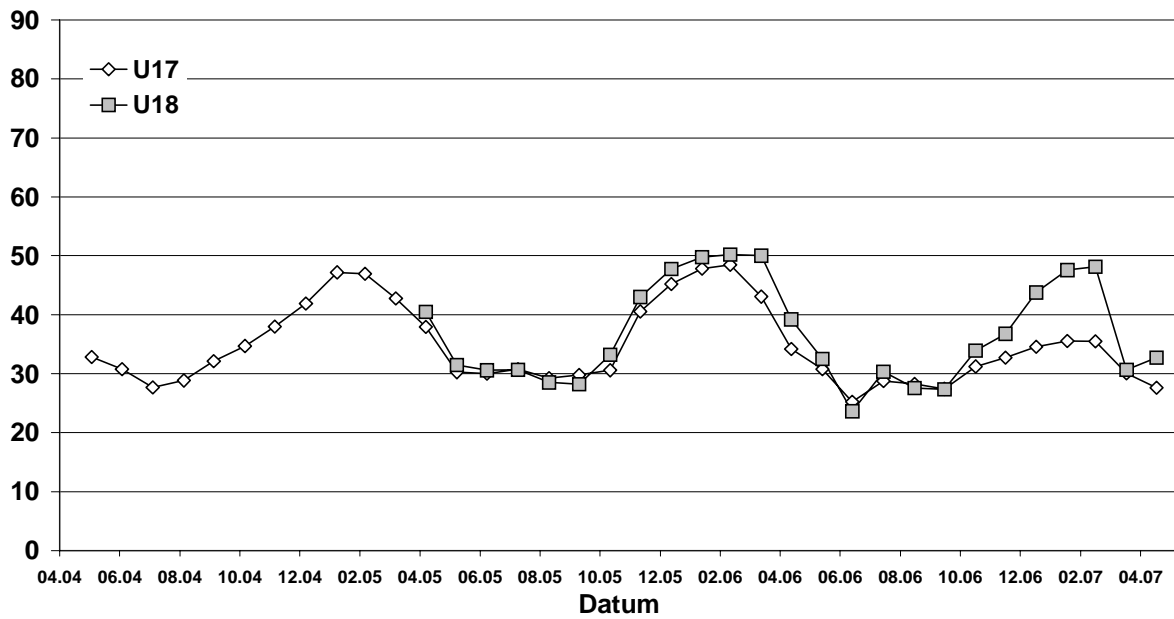


Abb. 20: Holzfeuchteverläufe im Stiel 8 des Brückenpfeilers 2 im Bereich der unteren Nagelplatte (U17) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U18).

## Holzfeuchte [%]

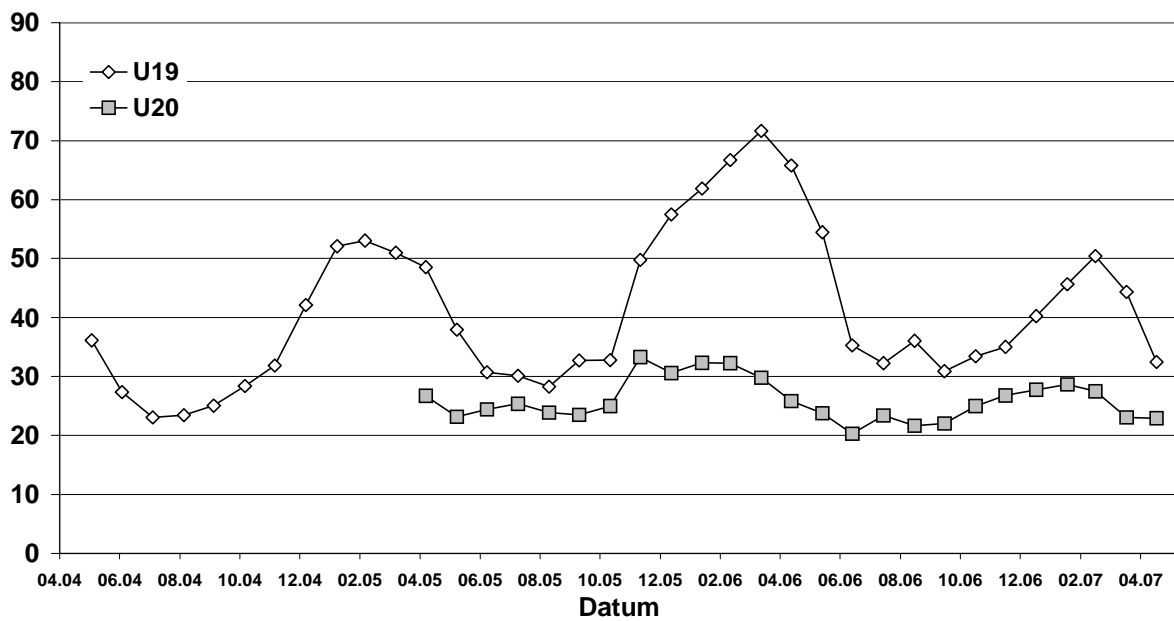


Abb. 21: Holzfeuchteverläufe im Stiel 9 des Brückenpfeilers 2 im Bereich der unteren Nagelplatte (U19) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U20).

## Holzfeuchte [%]

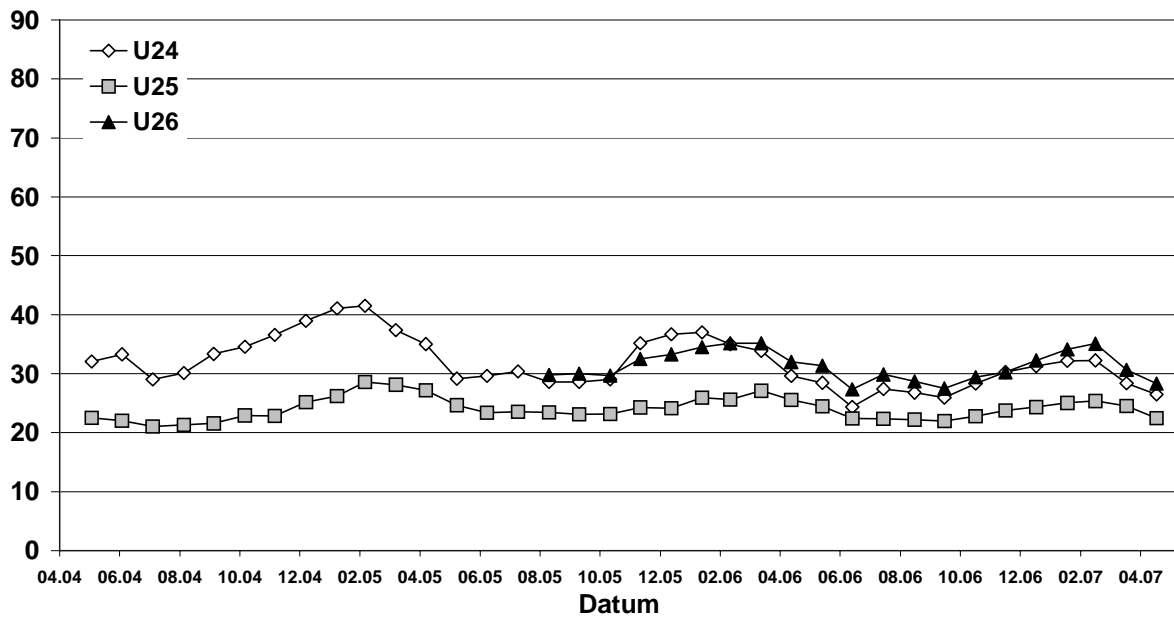


Abb. 22: Holzfeuchteverläufe im Stiel 7 des Brückenpfeilers 3 im Bereich der unteren Nagelplatte (U24), oberhalb der unteren Nagelplatte (U25) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U26).

## Holzfeuchte [%]

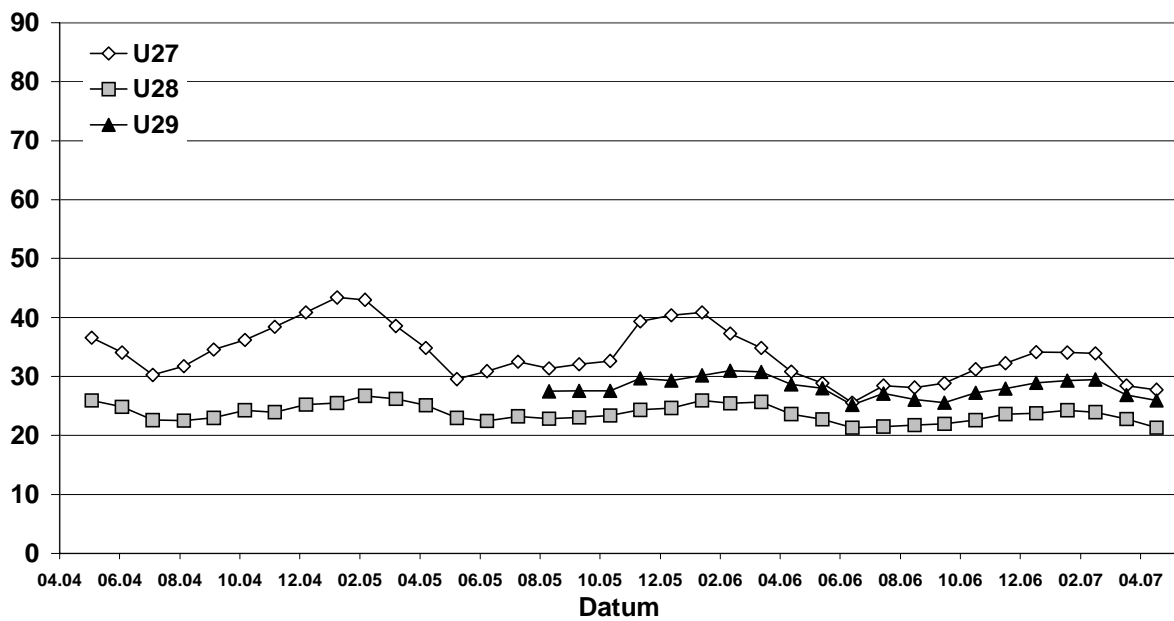


Abb. 23: Holzfeuchteverläufe im Stiel 8 des Brückenpfeilers 3 im Bereich der unteren Nagelplatte (U27), oberhalb der unteren Nagelplatte (U28) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U29).

## Holzfeuchte [%]

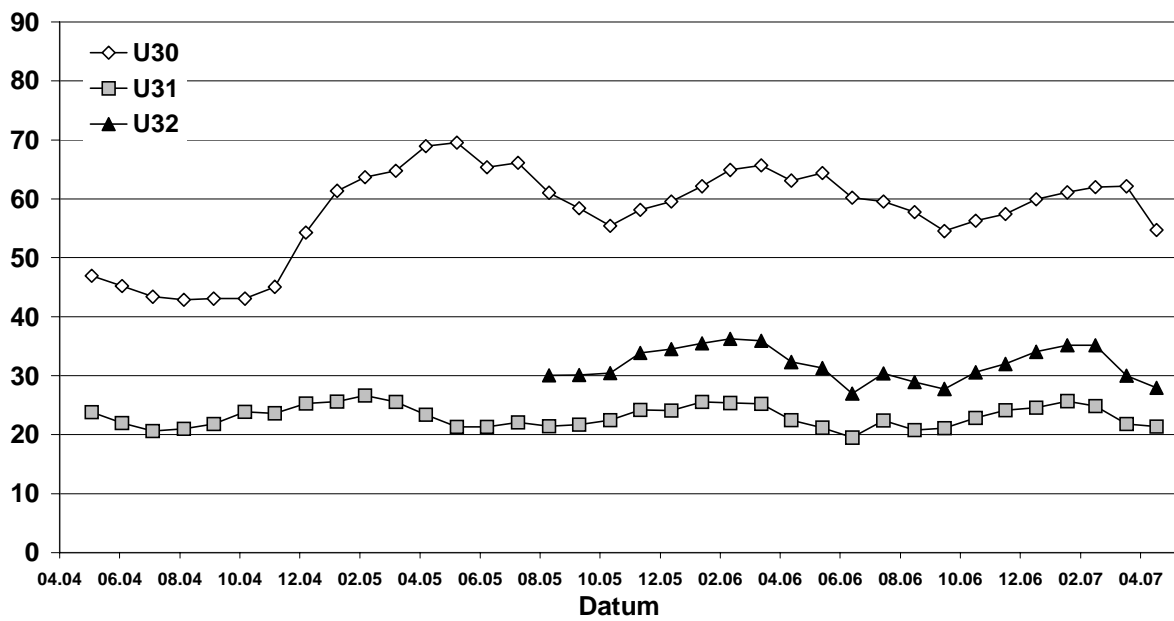


Abb. 24: Holzfeuchteverläufe im Stiel 9 des Brückenpfilers 3 im Bereich der unteren Nagelplatte (U30), oberhalb der unteren Nagelplatte (U31) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U32).

## Holzfeuchte [%]

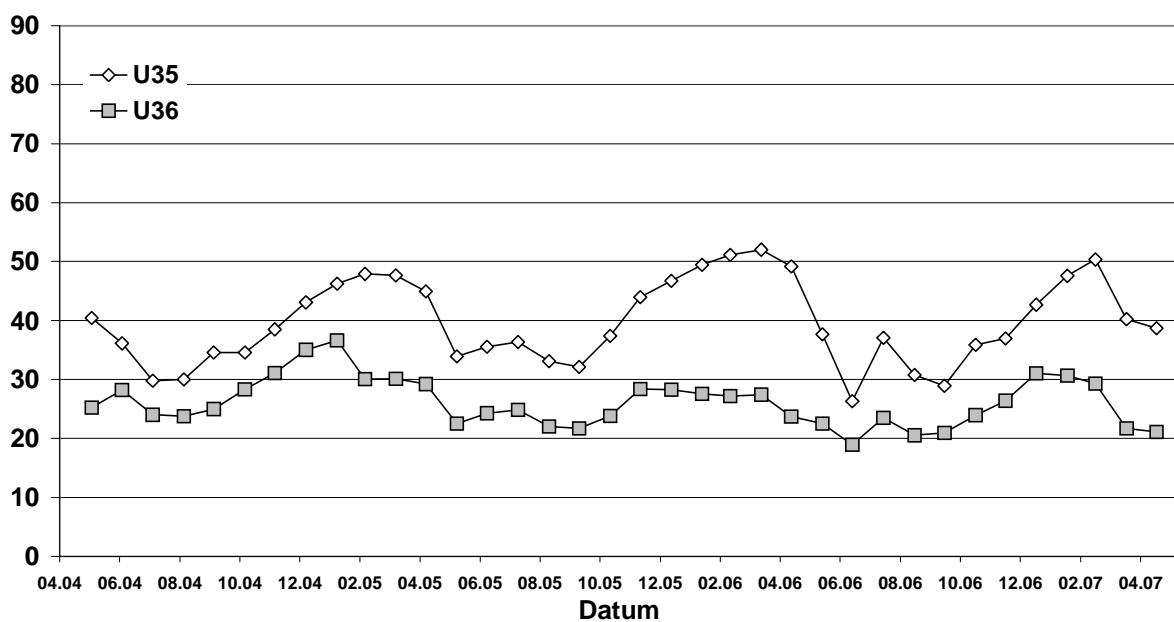


Abb. 25: Holzfeuchteverläufe im Stiel 7 des Brückenpfilers 4 im Bereich der unteren Nagelplatte (U35) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U36).

## Holzfeuchte [%]

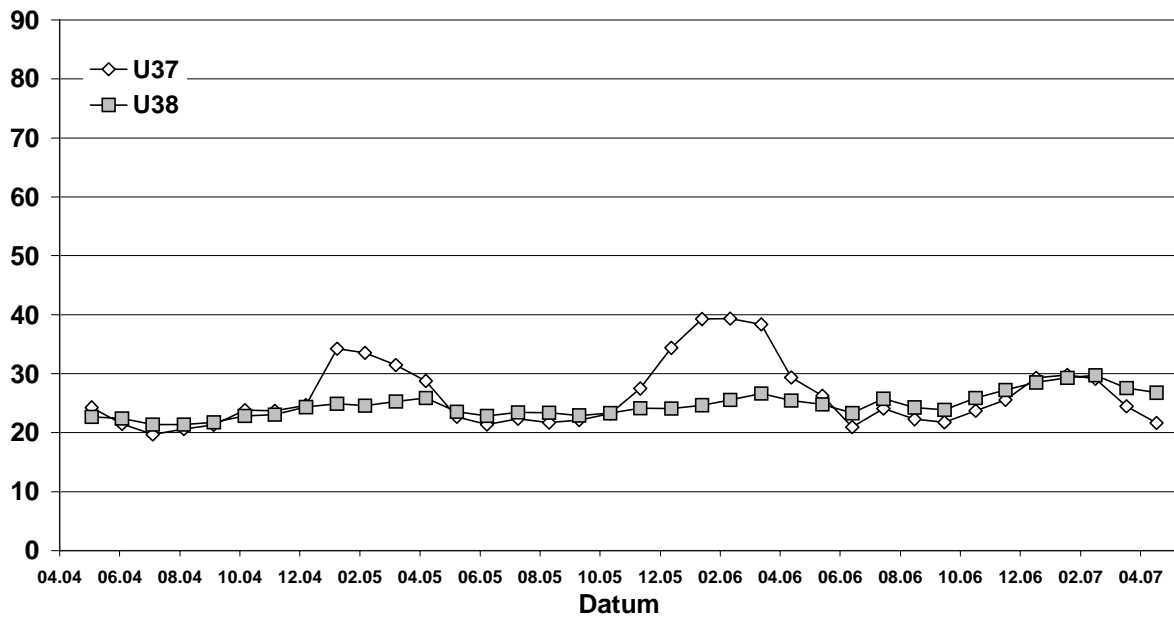


Abb. 26: Holzfeuchteverläufe im Stiel 8 des Brückenpfeilers 4 im Bereich der unteren Nagelplatte (U37) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U38).

## Holzfeuchte [%]

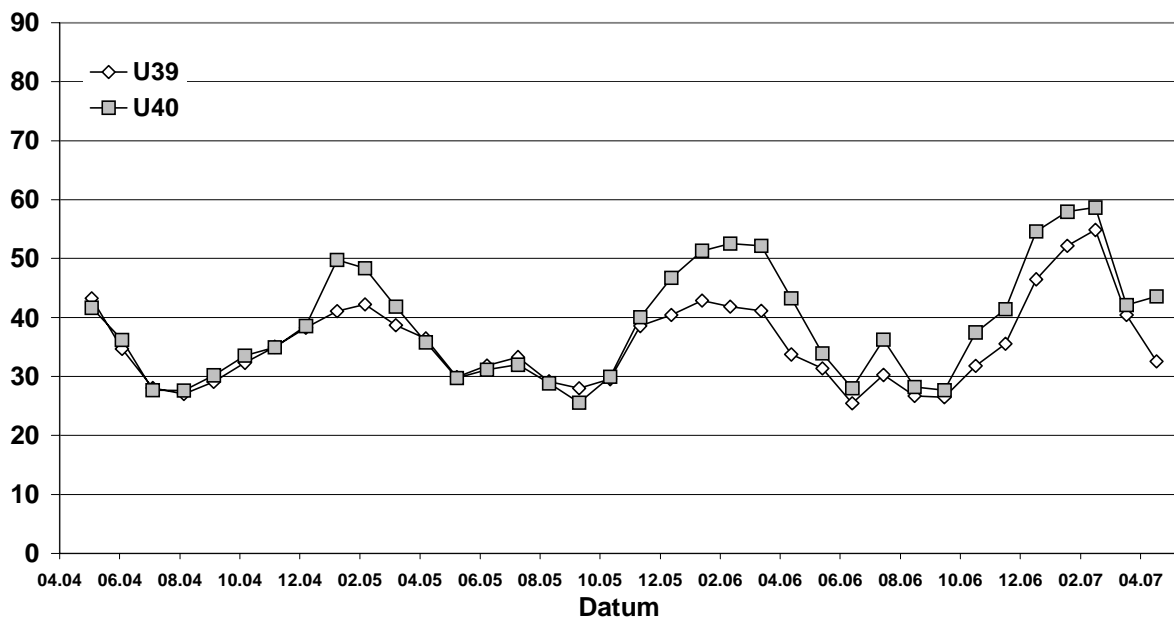


Abb. 27: Holzfeuchteverläufe im Stiel 9 des Brückenpfeilers 4 im Bereich der unteren Nagelplatte (U39) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U40).

## Holzfeuchte [%]

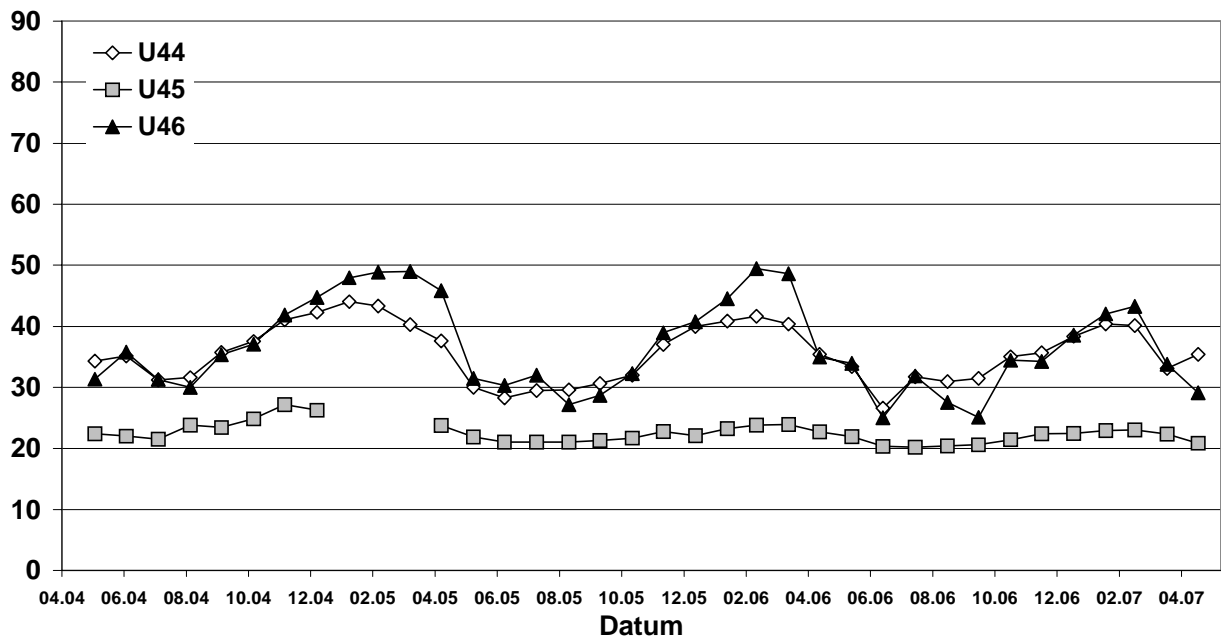


Abb. 28: Holzfeuchteverläufe im Stiel 7 des Brückenpfeilers 5 im Bereich der unteren Nagelplatte (44), oberhalb der unteren Nagelplatte (U45) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U46).

## Holzfeuchte [%]

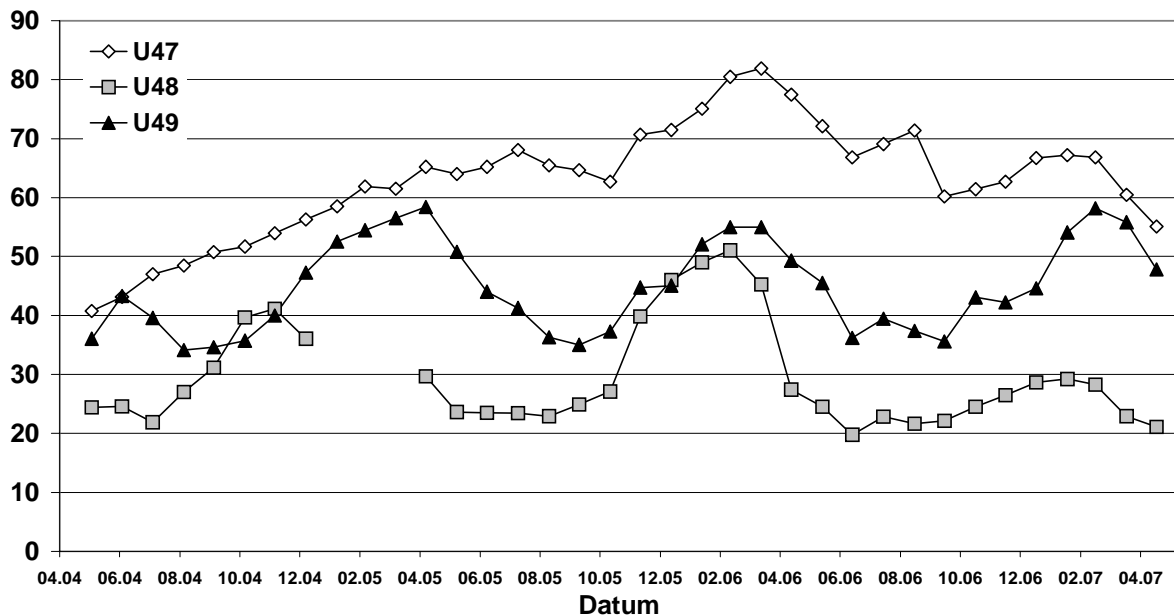


Abb. 29: Holzfeuchteverläufe im Stiel 8 des Brückenpfeilers 5 im Bereich der unteren Nagelplatte (47), oberhalb der unteren Nagelplatte (U48) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U49).

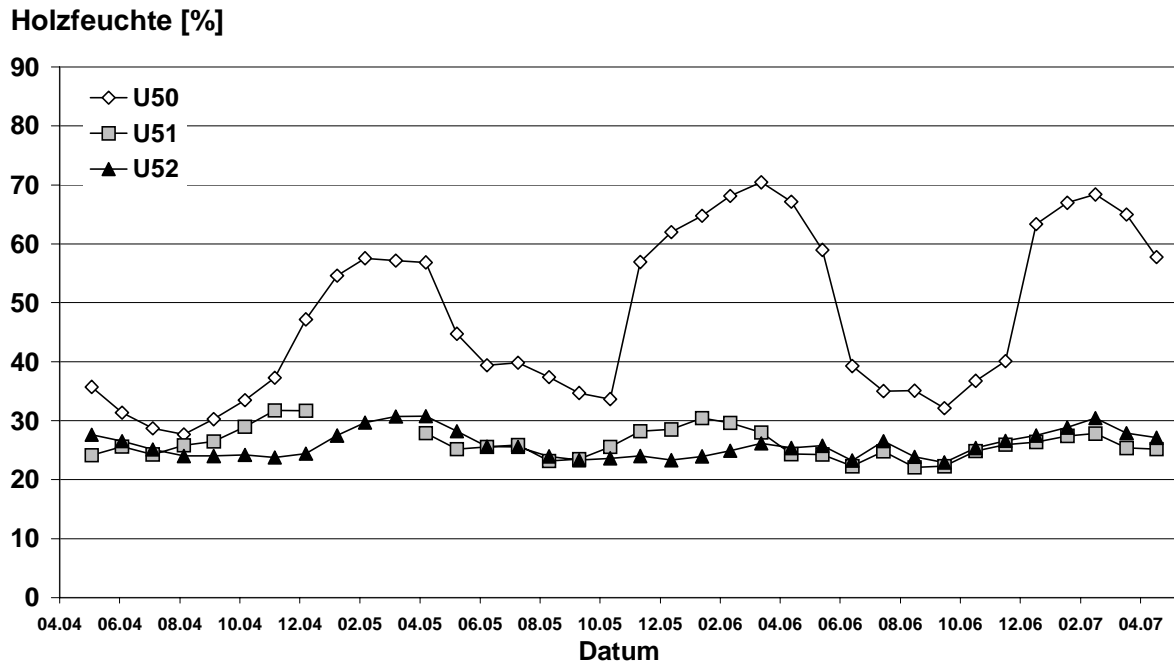


Abb. 30: Holzfeuchteverläufe im Stiel 9 des Brückenpfeilers 5 im Bereich der unteren Nagelplatte (U50), oberhalb der unteren Nagelplatte (U51) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U52).

### 3.2.2 Stiele der Brückenpfeiler auf der wetterabgewandten Seite

Die von Mai 2004 bis Mai 2007 ermittelten Holzfeuchteverläufe in den der Wetterseite abgewandten Stiel-Dreiergruppen der Brückenpfeiler sind in Abb. 31 bis Abb. 35 dargestellt. Es sind wiederum für jeden einzelnen Stiel die Verlaufskurven an den zwei, bzw. drei Messstellen im Vergleich aufgetragen.

Als Ergebnis der Messungen lässt sich folgendes feststellen: Im Vergleich zu den wetterseitigen Stielen sind die Holzfeuchten auf der dem Wetter abgewandten Seite geringer, liegen aber dennoch über längere Zeiträume über der für einen potentiellen Pilzbefall kritischen Grenze von 30%. Die Unterschiede in der gemessenen Holzfeuchte zwischen den Bereichen „untere Nagelplatte“, „oberhalb unterer Nagelplatte“ und „obere Nagelplatte“ waren anfangs vernachlässigbar gering, wurden aber mit zunehmender Beobachtungsdauer stärker (Abb. 32, Abb. 33, Abb. 35).



## Holzfeuchte [%]

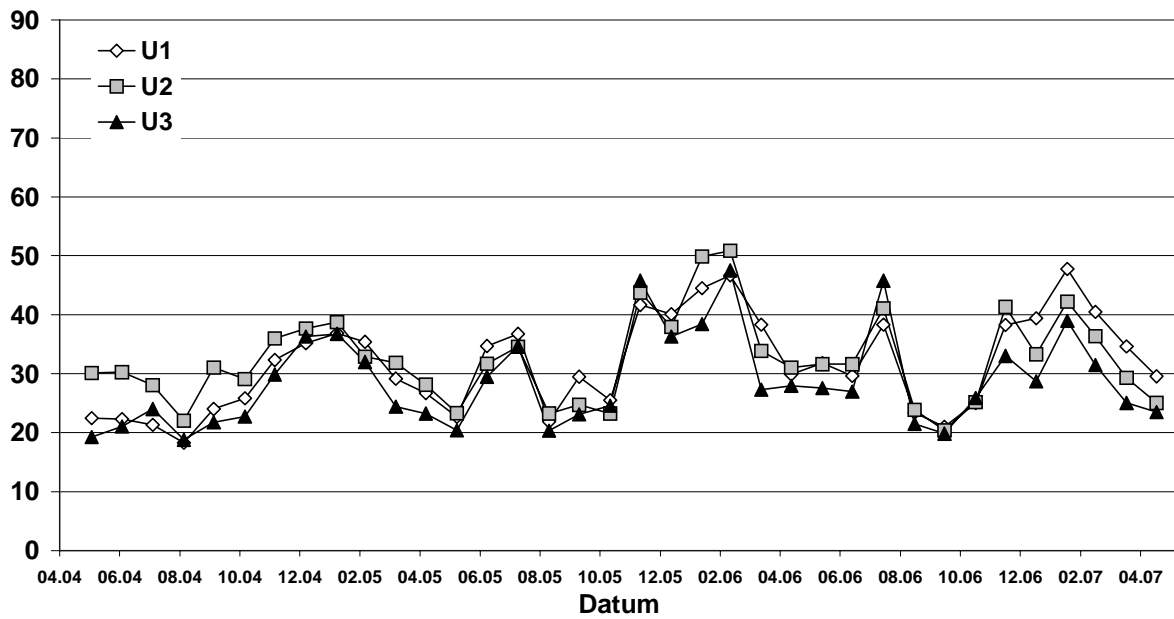


Abb. 31: Holzfeuchteverläufe im Stiel 1 des Brückenpfeilers 1 im Bereich der unteren Nagelplatte (U1), oberhalb der unteren Nagelplatte (U2) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U3).

## Holzfeuchte [%]

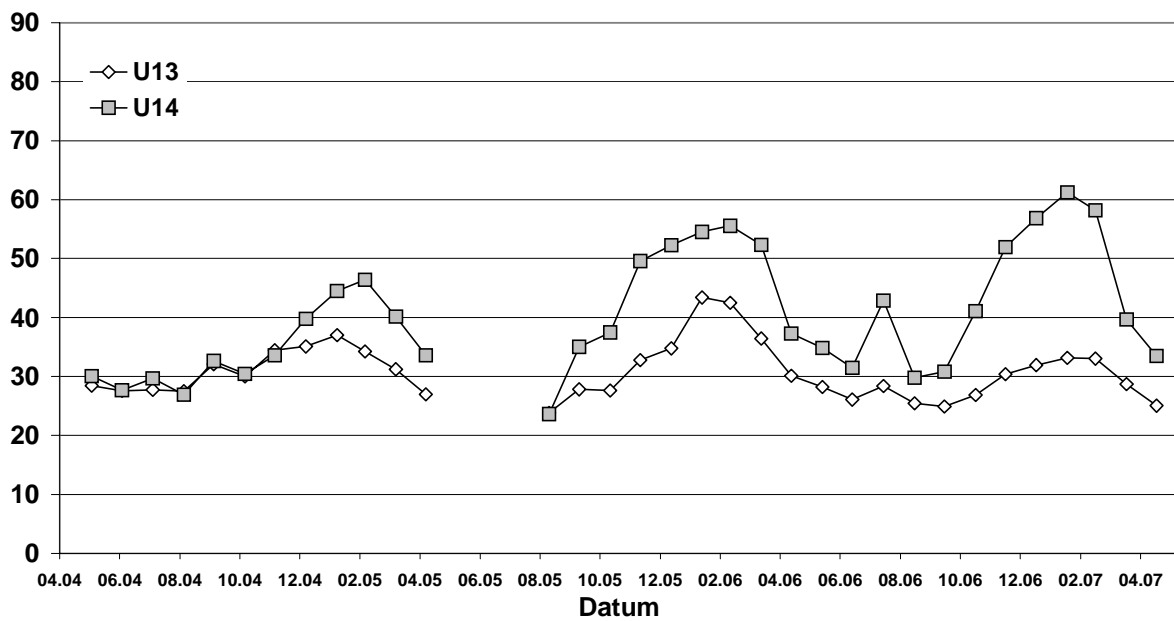


Abb. 32: Holzfeuchteverläufe im Stiel 1 des Brückenpfeilers 2 im Bereich der unteren Nagelplatte (U13) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U14).

## Holzfeuchte [%]

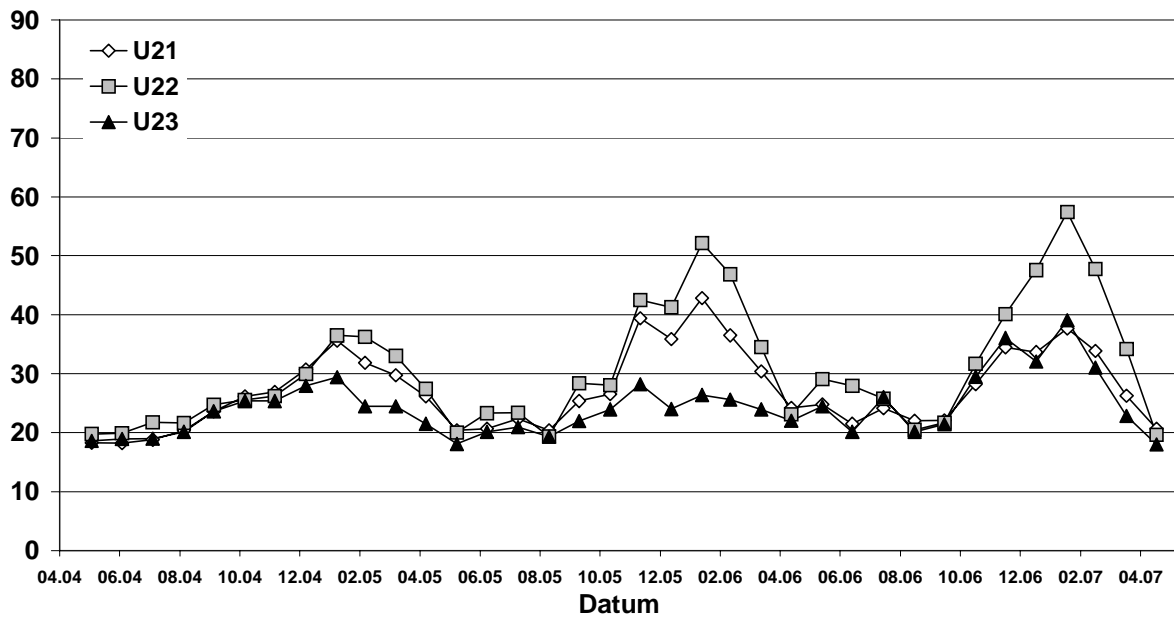


Abb. 33: Holzfeuchteverläufe im Stiel 1 des Brückenpfeilers 3 im Bereich der unteren Nagelplatte (U21), oberhalb der unteren Nagelplatte (U22) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U23).

## Holzfeuchte [%]

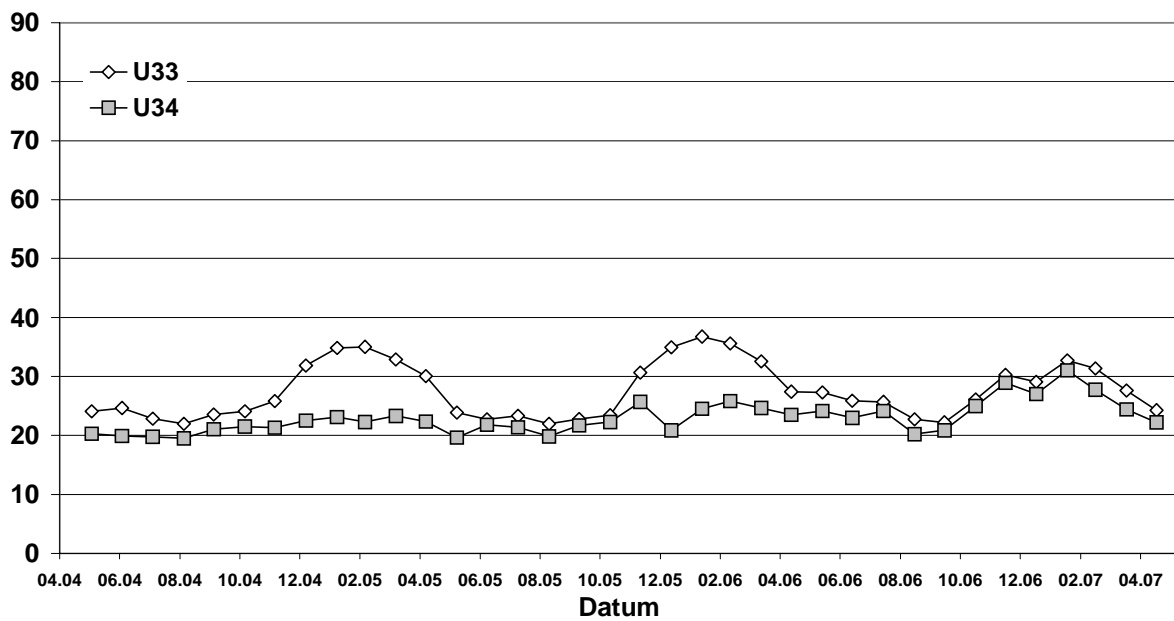


Abb. 34: Holzfeuchteverläufe im Stiel 1 des Brückenpfeilers 4 im Bereich der unteren Nagelplatte (U33) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U34).

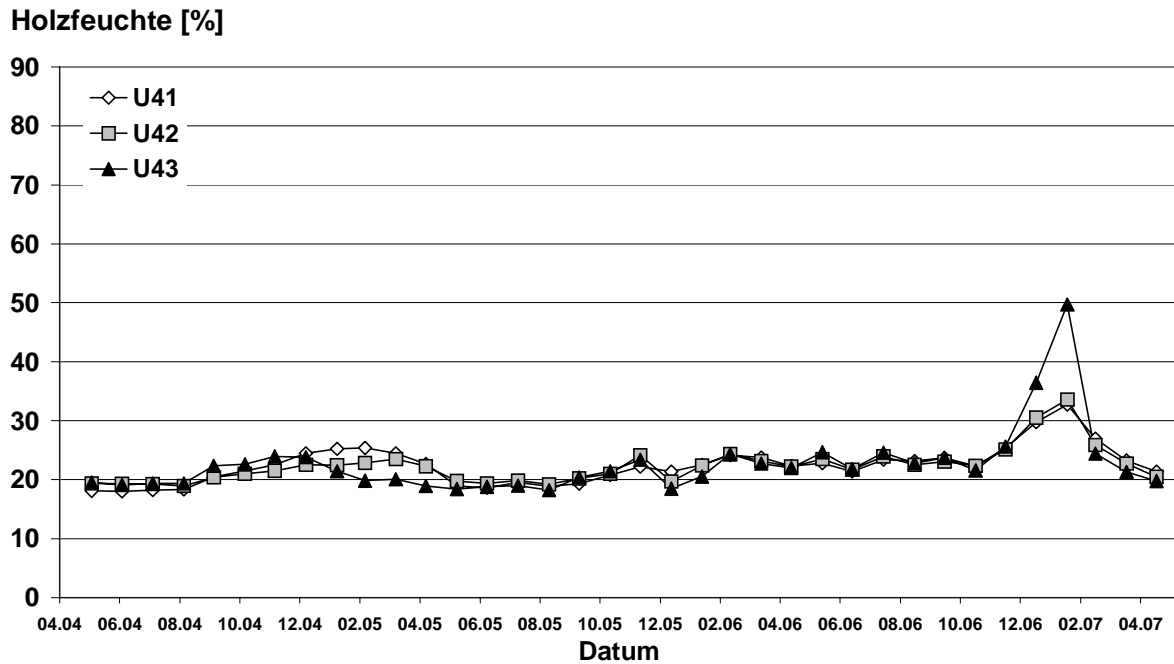


Abb. 35: Holzfeuchteverläufe im Stiel 1 des Brückenpfeilers 5 im Bereich der unteren Nagelplatte (U41), oberhalb der unteren Nagelplatte (U42) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U43).

### 3.2.3 Zugbänder im Bereich von Nagelplatten

Die von Mai 2004 bis Mai 2007 ermittelten Holzfeuchteverläufe in den Zugbändern hinter den Nagelplatten sind in Abb. 36 (Feld 15) und Abb. 37 (Feld 33) dargestellt. Die Holzfeuchte lag hier zu nahezu keinem Zeitpunkt oberhalb der kritischen Marke von 30%. Tendenziell leicht erhöhte Feuchtwerte waren im Herbst und Winter 2006/2007 zu beobachten, lassen aber nicht den Schluss zu, dass die Wirkung der im Bereich der Zugbänder getroffenen Schutzmaßnahmen nachgelassen haben könnte. Sehr hohe Holzfeuchten wurden auch an anderen Bauteilen der Brücke während dieses Zeitraumes ermittelt (Abb. 30, Abb. 32, Abb. 33) Unterschiede zwischen Wetterseite und wetterabgewandter Seite waren nicht festzustellen.

## Holzfeuchte [%]

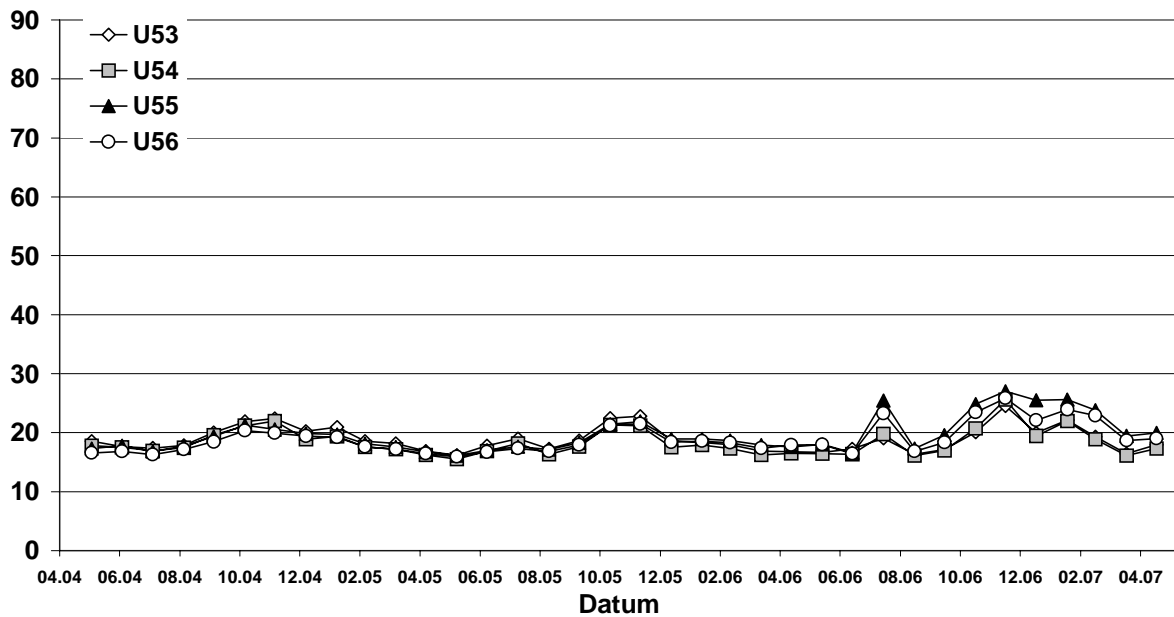


Abb. 36: Holzfeuchteverläufe im Zugband (Feld 15) hinter den Nagelplatten (U53 und U54 wetterseitig; U55 und U56 wetterabgewandt).

## Holzfeuchte [%]

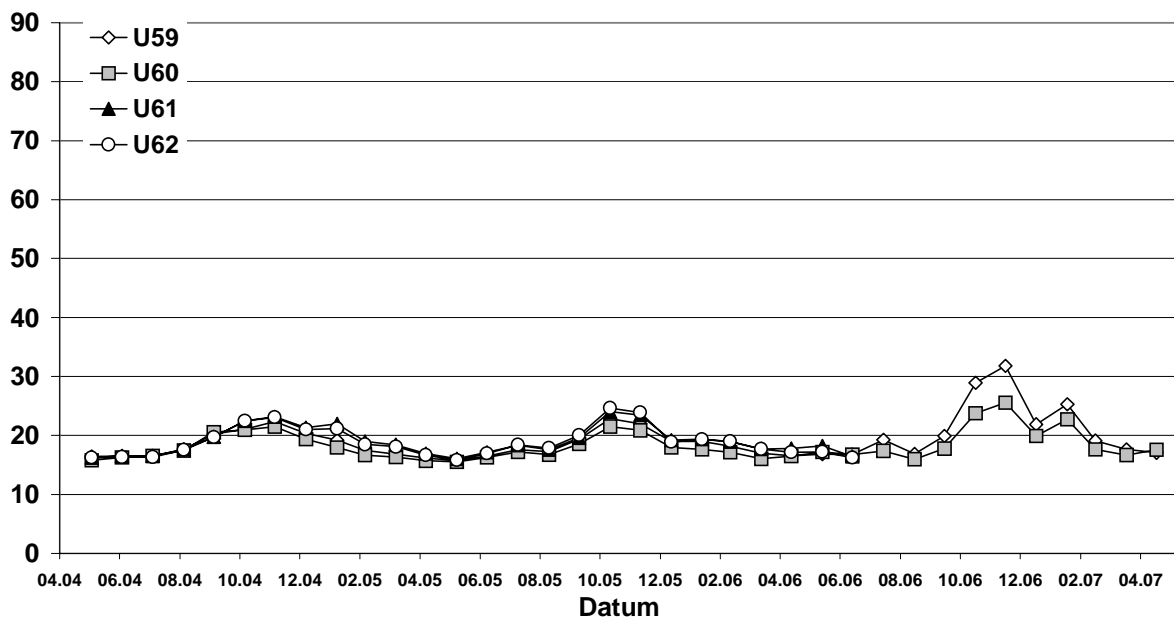


Abb. 37: Holzfeuchteverläufe im Zugband (Feld 33) hinter den Nagelplatten (U59 und U60 wetterseitig; U61 und U62 wetterabgewandt).

### 3.2.4 Zugbänder außerhalb von Nagelplatten

Die von Mai 2004 bis Juli 2006 ermittelten Holzfeuchteverläufe in den Zugbändern hinter den Nagelplatten sind in Abb. 37 (Feld 18) und Abb. 38 (Feld 41) dargestellt.

Die Holzfeuchte lag in beiden Feldern nur an wenigen Tagen über der kritischen Holzfeuchte von 30%. Sehr geringe Unterschiede zwischen Wetterseite und wetterabgewandter Seite waren an den Zugbändern im Bereich der Nagelplatten nur in Feld 18 festzustellen.

### Holzfeuchte [%]

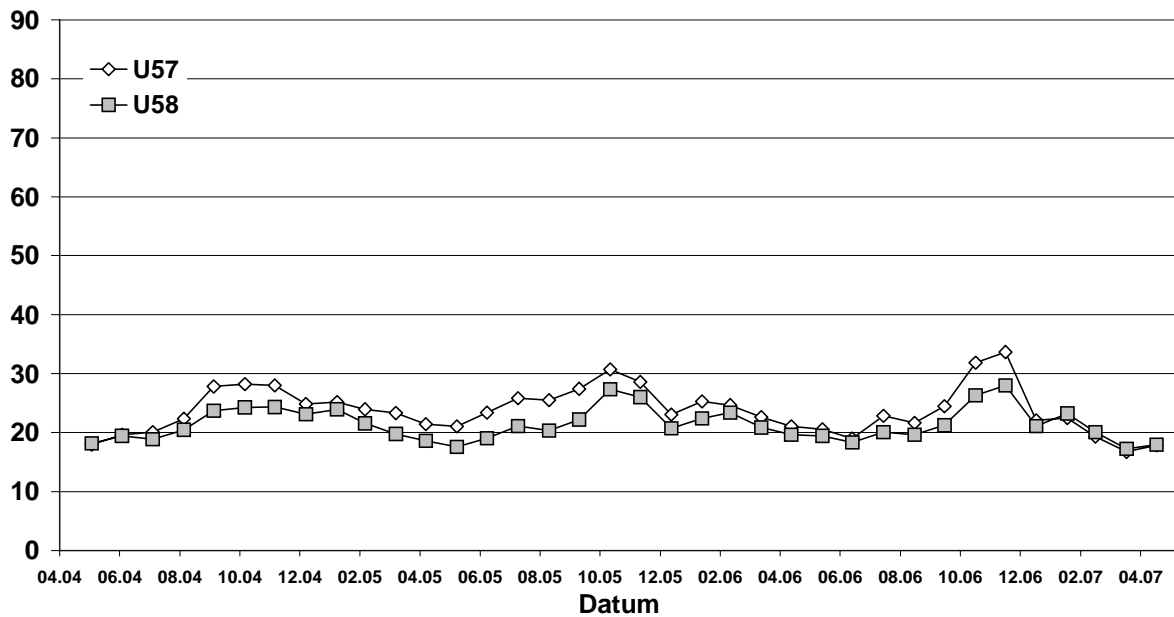


Abb. 38: Holzfeuchteverläufe im Zugband (Feld 18), wetterseitig (U57) und wetterabgewandt (U58).

### Holzfeuchte [%]

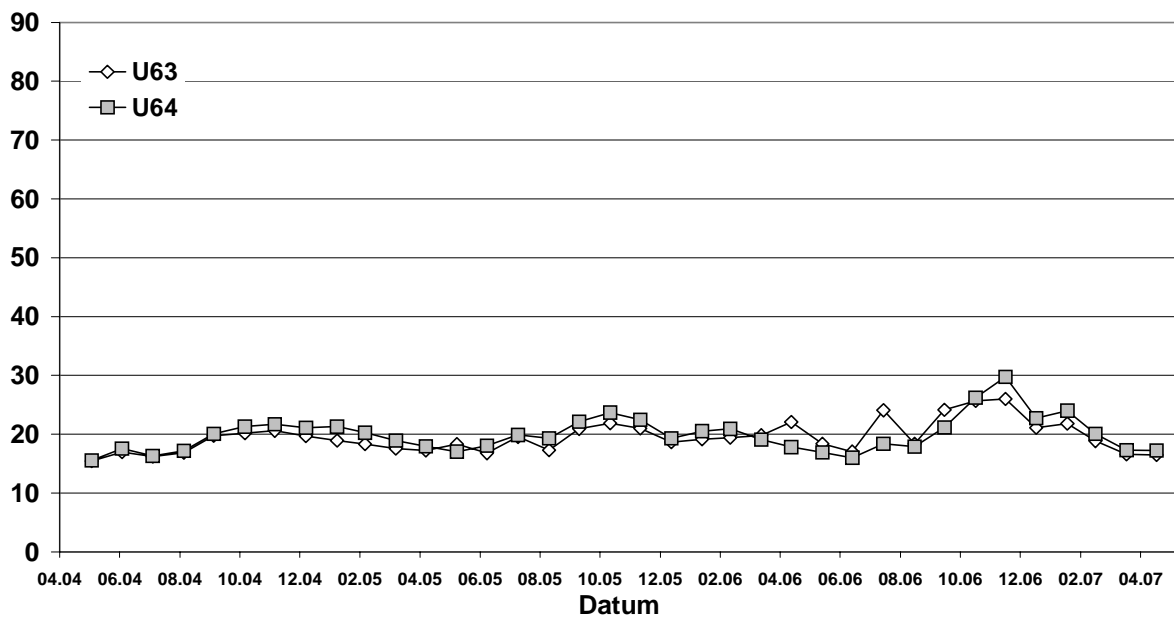


Abb. 39: Holzfeuchteverläufe im Zugband (Feld 41), wetterseitig (U63) und wetterabgewandt (U64).

### 3.3 Verläufe von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte an der Essinger Brücke

Die von Mai 2004 bis Mai 2007 gemessenen mittleren Lufttemperaturen sind Abb. 40 zu entnehmen.

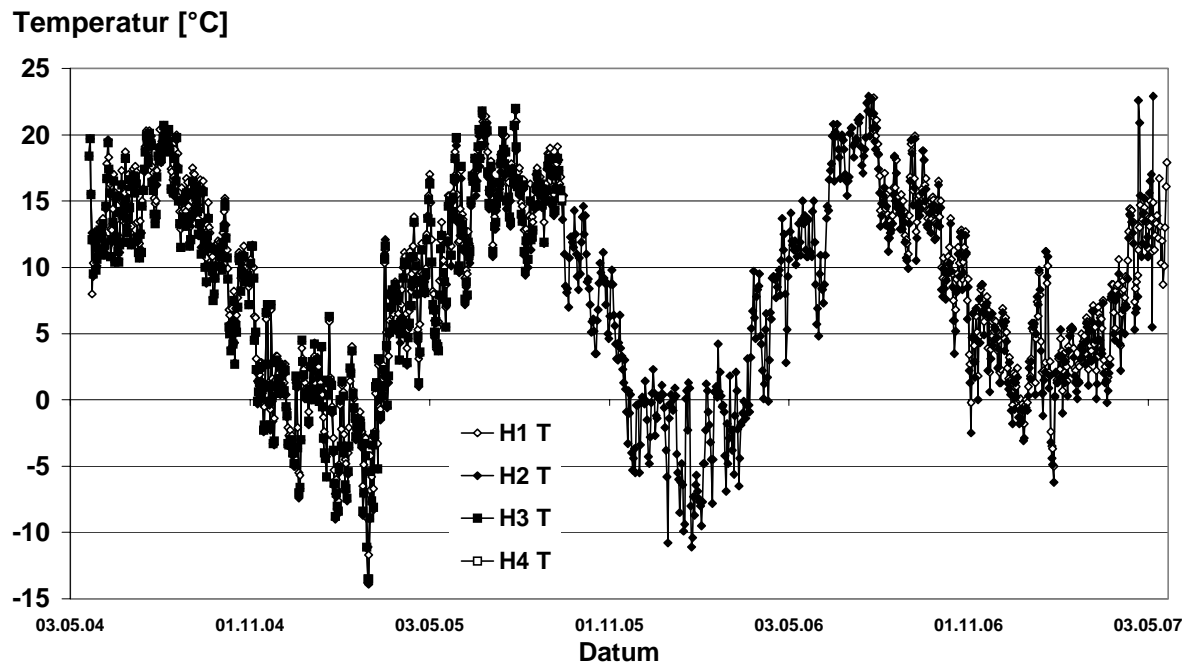


Abb. 40: Verlauf der mittleren Lufttemperatur an der Essinger Brücke nahe des vorderen Widerlagers (H1 T), nahe des hinteren Widerlagers (H4 T), nahe des ostseitigen Kanalufers (H2 T) und nahe des westseitigen Kanalufers (H3 T).

Die von Mai 2004 bis Mai 2007 gemessenen mittleren relativen Luftfeuchten sind Abb. 41 zu entnehmen.

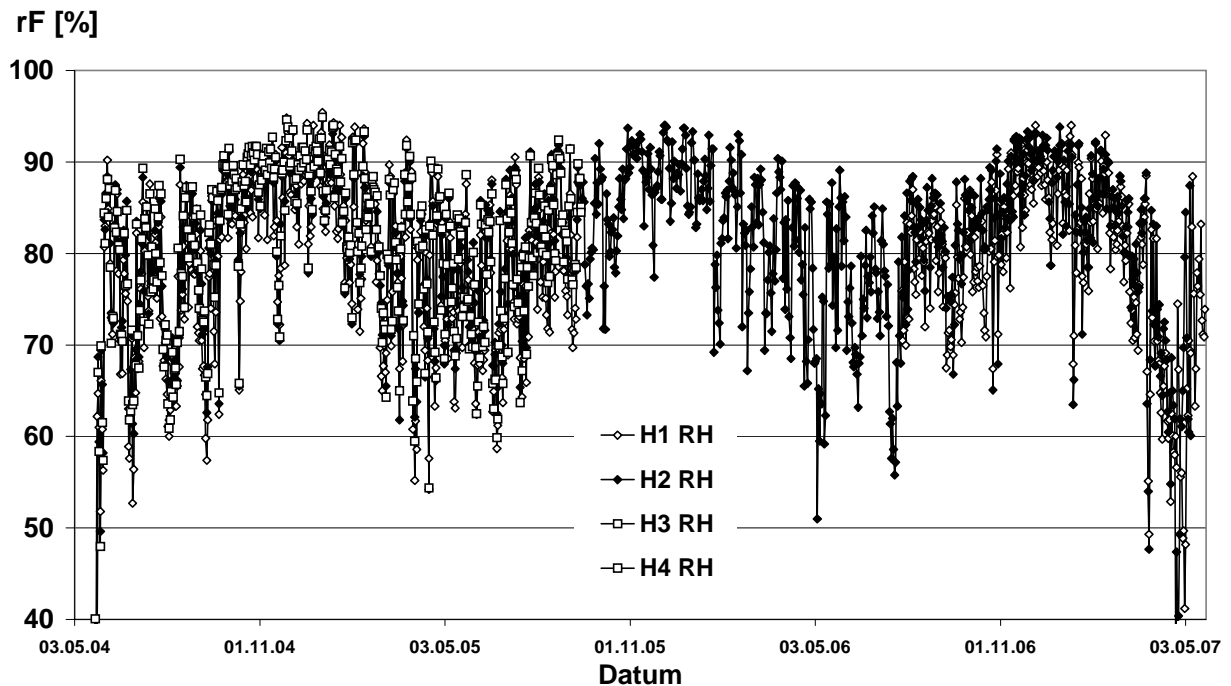


Abb. 41: Verlauf der mittleren relativen Luftfeuchtigkeit an der Essinger Brücke nahe des vorderen Widerlagers (H1 RH), nahe des hinteren Widerlagers (H4 RH), nahe des ostseitigen Kanalufers (H2 RH) und nahe des westseitigen Kanalufers (H3 RH).

Ein signifikanter Einfluss der Gewässernähe auf die relative Luftfeuchtigkeit und die Lufttemperatur im Bereich der Essinger Brücke konnte nicht festgestellt werden.

### 3.4 Fäulnisentwicklung, Holzfeuchte- und Holztemperaturverläufe an Referenzmessobjekten

Die Holzfeuchteverläufe der Prüfkörper aus den Doppellagen-Test-Sets an der Essinger Brücke (eb) und am Pumpenhaus Essing (ep) sind in Abb. 42 und Abb. 43 dargestellt. Die zugehörigen, zwischen den beiden Prüfkörperlagen, ermittelten Holztemperaturverläufe sind in Abb. 44 dargestellt. Aufgrund eines Wasserschadens sind die Werte für ep im ersten Expositionsjahr nicht vollständig.

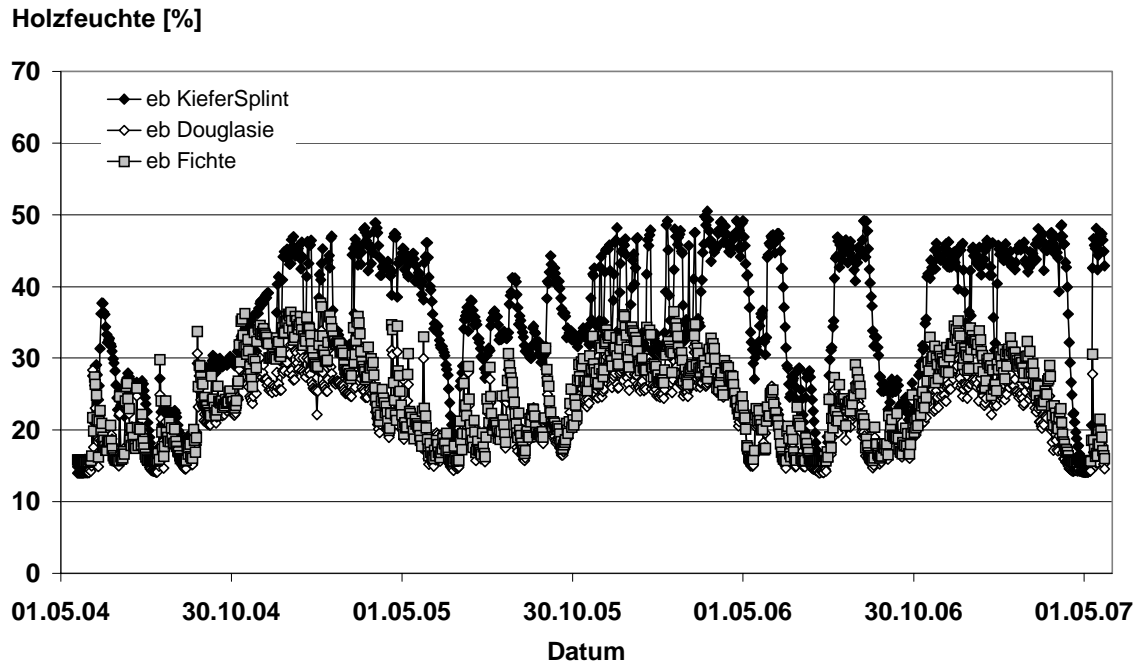


Abb. 42: Holzfeuchteverläufe im Doppellagen-Test-Set an der Essinger Brücke (eb).

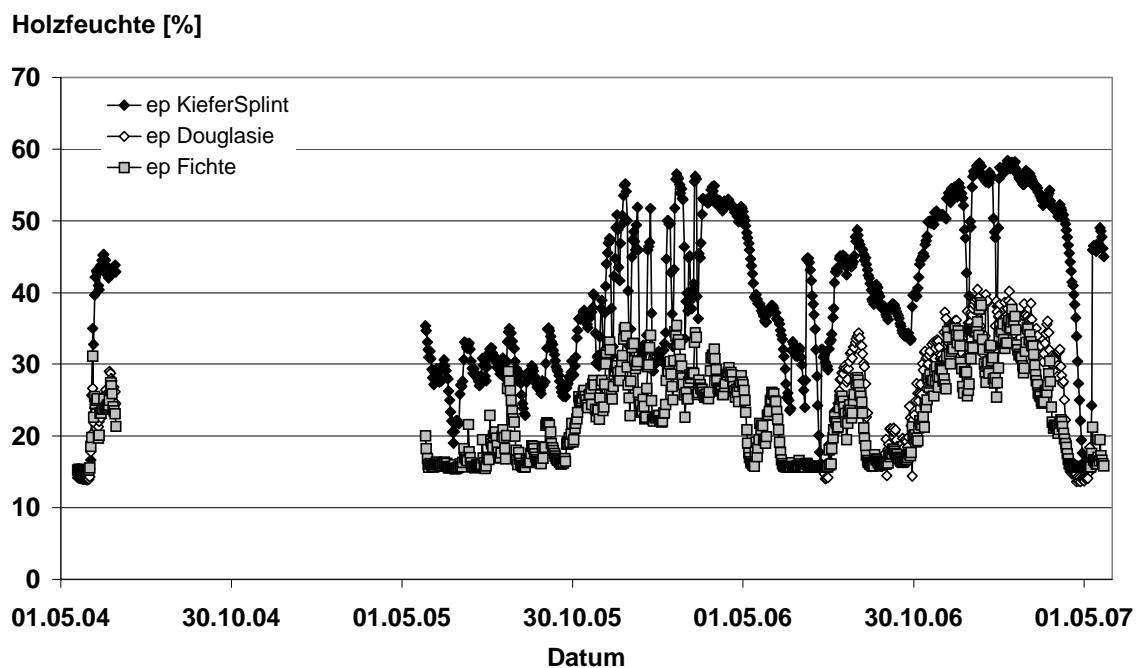


Abb. 43: Holzfeuchteverläufe im Doppellagen-Test-Set am Pumpenhaus Essing (ep).

Erwartungsgemäß wies das Kiefernspintholz über den gesamten Beobachtungszeitraum höhere Holzfeuchten auf als das Douglasien- und das Fichtenholz. Die Holzfeuchte lag über weite Teile des Jahres über der kritischen Grenze von 30%. Douglasie und Fichte trockneten hingegen während der Sommermonate bis unter diese Grenze ab. Die vermeintlich geschütztere Exposition



innerhalb der Brückenkonstruktion von eb (teilweise Überdachung, Austrocknung durch Konvektion/Wind) im Vergleich zu der offenen Exposition von ep führte nicht zu einer deutlich geringeren Feuchtebelastung. Es zeigte sich somit, dass bei einer Befeuchtung des Holzes, wie sie durch die Doppellagenanordnung der Prüfhölzer provoziert wird (Wasserfalle), auch innerhalb der Brückenkonstruktion das Holz nicht wieder austrocknet und somit die Gefahr eines feuchteinduzierten Pilzbefallsrisikos gegeben ist. In Bereichen, die konstruktiv nur mangelhaft geschützt sind (z.B. im Bereich von Nagelplatten, *c.f.* 3.2.1), ist somit das Befallsrisiko auch für das im Vergleich zu Kiefer-Splint weniger permeable Fichtenholz über mehrere Monate im Jahr vorhanden.

Die Holztemperaturverläufe zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen eb und ep.

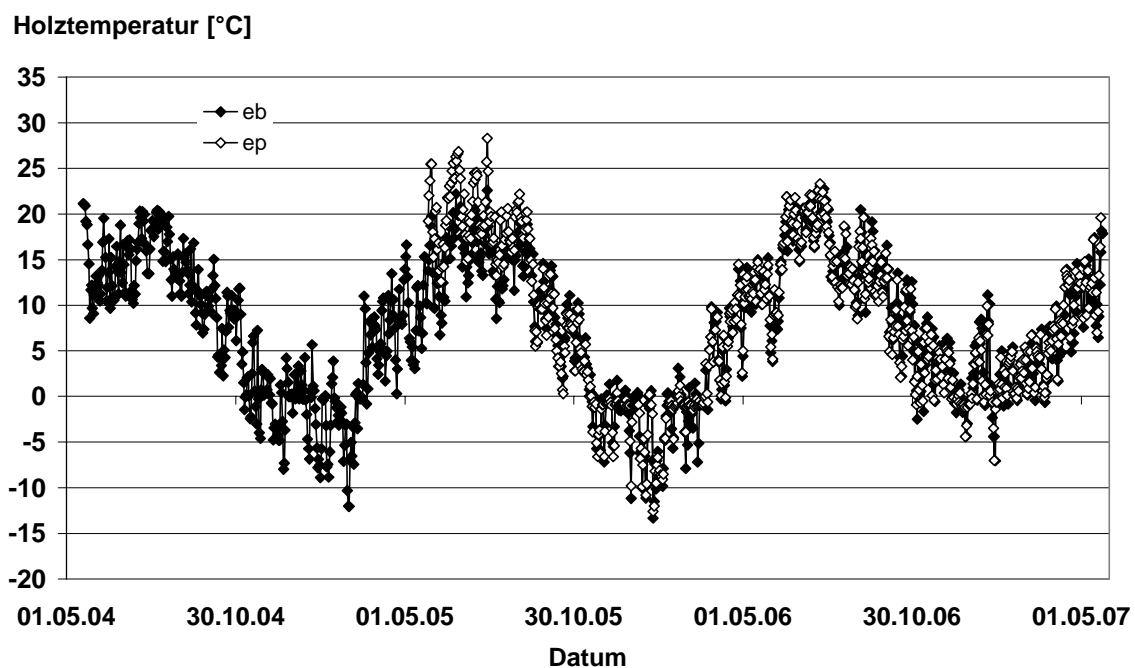


Abb. 44: Temperaturverläufe in der Zwischenlage der Doppellagen-Test-Sets (Holztemperatur) an der Essinger Brücke (eb) und am Pumpenhaus Essing (ep).

In Abb. 45 ist die mittlere Abbaubewertung der Doppellagen-Prüfkörper aus den Test-Sets eb und ep getrennt nach Holzarten dargestellt. Nach drei Jahren Exposition zeigten an beiden Standorten bereits die ersten Kiefern- und Fichten-Prüfkörper Anzeichen von Pilzbefall und waren teilweise auch stark angegriffen, bei ep war auch ein Douglasienprüfkörper mäßig angegriffen (Bewertung 3).

## Mittlere Abbaubewertung [0-4]

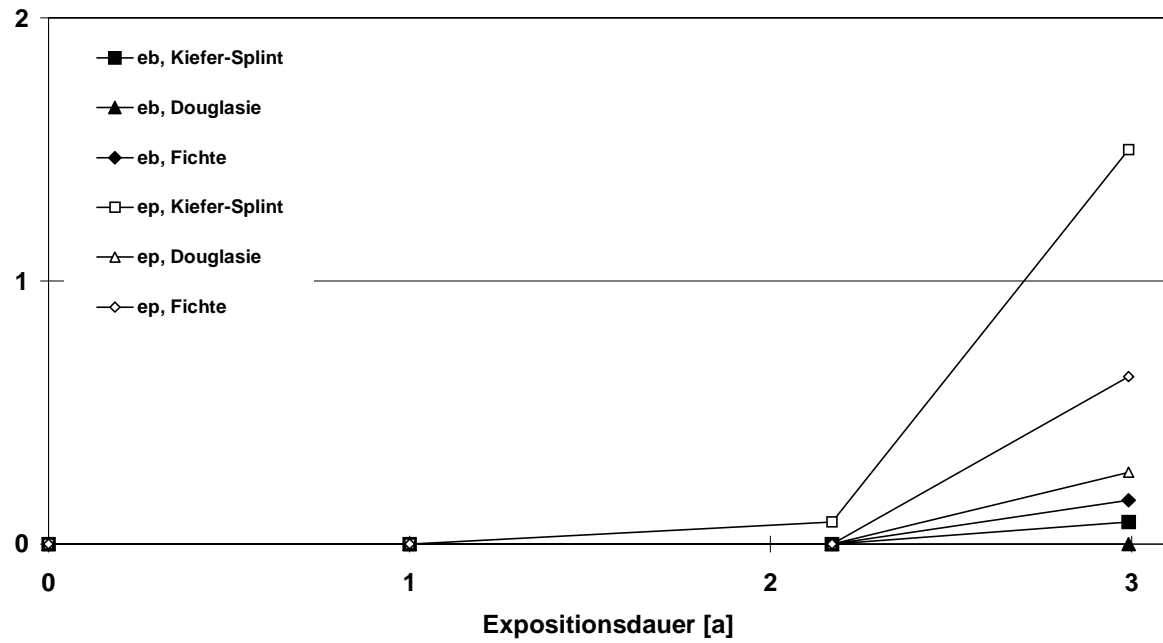


Abb. 45: Mittlere Abbaubewertung nach DIN EN 252 (1990) der Doppellagen-Prüfkörper an der Essinger Brücke (eb) und am Pumpenhaus Essing (ep).

## **4 SCHLUSSFOLGERUNGEN**

### **4.1 Eignung der Holzfeuchte-Messmethode für Bauwerke im Gebrauch**

Die auf dem Widerstandsprinzip basierende Methode zur Messung der Holzfeuchte, um das Risiko eines feuchteinduzierten Pilzbefalls abzuschätzen, hat sich als geeignet erwiesen. Die Methode wird durch Messungenauigkeiten oberhalb des Fasersättigungsbereichs eingeschränkt, die aber für die in diesem Fall vorliegende Zielstellung unerheblich erscheinen, da bereits bei Überschreiten von Fasersättigung von einem möglichen Pilzbefall auszugehen ist. Durch die Verwendung von mit einem organischen Holzschutzmittel getränkten Holzdübeln als Messdübel, wurde das Problem der Installation von Messelektroden durch Einleimen am bestehenden Objekt im Freien überwunden. Ferner war es durch die Schutzmittelimprägnierung der Dübel möglich, Messstellen auch an solchen Bereichen einzurichten, die bereits Pilzbefall aufwiesen, ohne Elektroden direkt im faulenden Holz zu installieren.

### **4.2 Holzfeuchteverläufe an ausgewählten Bauteilen der Essinger Brücke**

Die Messung der Holzfeuchte im Bereich der Brückenpfeiler ergab eine insgesamt hohe Feuchtebelastung der Konstruktion, auf der Wetterseite der Brücke etwas höher als auf der gegenüberliegenden Seite. Als besondere konstruktive Schwachstelle in Form hoher Holzfeuchtwerte wurden die Stiele im Bereich der unteren Nagelplatten identifiziert. Dies deckt sich mit den bisher aufgetretenen Schädigungen durch Braunfäule in diesem Bereich. Die Entstehung von Rissen im Brettschichtholz der Tragkonstruktion in Verbindung mit einer behinderten Abtrocknung durch großflächige Metall-Verbindungsmitel (Nagelplatten) führt hier zu einer Feuchteanreicherung und somit zu einem erhöhten Befallsrisiko. Im Bereich der weiter oben in der Konstruktion befindlichen Nagelplatten traten ähnliche Feuchteanreicherungen auf. Die im Rahmen einer vorhergehenden Sanierungsmaßnahme durch Sperrholzabdeckungen vor Niederschlag geschützten Zugbänder der Brücke wiesen während des Untersuchungszeitraums keine kritischen Holzfeuchten auf.

---

### **4.3 Einfluss der Gewässernähe auf die Feuchtebelastung**

Die Messungen von Holzfeuchte, relativer Luftfeuchte und Lufttemperatur haben keine Anhaltspunkte für ein erhöhtes Befallsrisiko einer Holzkonstruktion in Gewässernähe erbracht. Die Holzfeuchtemessungen an den Referenzobjekten (Doppellagentest) zeigten sogar, dass bei unzureichendem konstruktiven Holzschutz, wie er im Doppellagentest nachgestellt wird, die teilgeschützten und windexponierten Proben an der Essinger Brücke ähnlich hohe Feuchten aufwiesen wie die in direkter Nähe (= 1m) zum Gewässer exponierten Proben am Pumpenhaus Essing. Aussagen zum Einfluss der Gewässernähe auf Feuchtecondition und Befallsrisiko werden ferner relativiert durch die Tallage der Essinger Brücke mit entsprechender Windexposition und ungleicher Beschattung. Somit erscheinen weitere Untersuchungen unter Ausschaltung weiterer störender Einflussgrößen empfehlenswert.

### **4.4 Eignung des Holzfeuchte-Monitorings als Fäulnis-Frühwarnsystem**

Die an der Essinger Brücke eingesetzte Langzeitmessung der Holzfeuchte scheint prinzipiell als Frühwarnsystem für das Auftreten feuchteinduzierter Befallsrisiken geeignet, wie die Messungen an den Zugbändern gezeigt haben. Hier konnte die Effektivität der konstruktiven Schutzmaßnahmen während des gesamten Untersuchungszeitraumes nachgewiesen werden. Durch den Einsatz von kontinuierlichen Holzfeuchtemessungen als Frühwarnsystem für das gesamte Bauwerk wurde eine insgesamt zu hohe Feuchtebelastung im unteren Bereich der Brückenkonstruktion nachgewiesen. Die konstruktiven Holzschutzmaßnahmen müssen hier als unzureichend bewertet werden, weshalb an nahezu allen Messstellen im Bereich der Stützpfiler über weite Zeiträume Holzfeuchten oberhalb der kritischen Grenze von 30% gemessen wurden. Die Überwachung eines Gesamtbauwerkes durch automatisierte kontinuierliche Holzfeuchtemessungen erscheint als sinnvolle Maßnahme um sowohl das Maß des konstruktiven Holzschutzes wie auch das aktuelle Gefährdungspotential eines Bauwerkes zu bestimmen. Hierzu sollten die kritischen Punkte/Bauteile, sowohl aus statischer wie auch aus holzschutztechnischer Sicht, mit Messfühlern ausgestattet werden.

## 5 LITERATUR

DIN 68 800, 1990: Holzschutz im Hochbau.

DIN EN 252, 1989: Freiland-Prüfverfahren zur Bestimmung der relativen Schutzwirkung eines Holzschutzmittels im Erdkontakt.

Rapp, A.O., Augusta, U., Peek, R.D., 2001: Facts and ideas of testing wood durability above ground. Proc. COST E22 meeting in Reinbek, Germany, 9 November 2001, 5 S.

Rapp, A.O., Augusta, U., 2004: The full guideline for the “double layer test method” – A field test method for determining the durability of wood out of ground. Stockholm: The International Research Group On Wood Preservation, IRG Document No: IRG/WP 04-20290, 24 S.

## 6 ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS

### 6.1 Abbildungen

Abb. 1: Essinger Brücke: Konstruktionsmerkmale von Hauptträgern, unterem Verband und Querverbänden. ....	6
Abb. 2: Vertikale Abstützung durch V-förmige Pfeilerkonstruktion der BSH-Hauptträger zwischen Hauptstraße und Dorf Essing.....	7
Abb. 3: Knotenpunkt: Verbindung zwischen Betonfundamenten und Stielen der Pfeilerkonstruktion. ....	8
Abb. 4: Anzeichen für Fäulnis im Inneren (ca. 2-3 cm unterhalb der Oberfläche) einer Stielgruppe auf der Nord- bzw. Wetterseite der Essinger Brücke im Bereich der unteren Nagelplatten (Stechbeitel lässt sich mit geringem Kraftaufwand in die erweichte Holzsubstanz drücken).....	11
Abb. 5: Schnitt durch in Kiefernholz ( <i>Pinus sylvestris</i> L.) eingeleimte Elektrode. ....	14
Abb. 6: Längsschnitt durch einen Holzdübel mit zwei eingeleimten Messelektroden. ....	16
Abb. 7: Bezeichnung von Stielen und Pfeilern der Essinger Brücke.....	18
Abb. 8: Nummerierung von Feldern und Pfeilern an der Essinger Brücke .....	19
Abb. 10: Messstellen 45, 48 und 51, verbunden mit Datenlogger M17, an Pfeiler 5 der Essinger Brücke. ....	21
Abb. 12: Messstelle 59, hinter einer Nagelplatte eines Knotenpunktes zwischen Pfeiler 5 und 6 der Essinger Brücke. ....	21
Abb. 13: Aufbau der Doppellagen-Testsets. Links: Oberseite, gegeneinander versetzte Doppellage. Rechts: Unterseite, Schutzdose mit Holzfeuchte- und Holztemperatur-Loggern.....	23
Abb. 14: Doppellagen-Testset eb ( <b>essingbrücke</b> ) exponiert auf den Querstreben (Wetterseite) von Pfeiler 2 der Essinger Brücke.....	24
Abb. 15: Doppellagen-Testset ep ( <b>essingpumpenhaus</b> ) exponiert auf dem zum Pumpenhaus Essing gehörigen Gelände des Wasser- und Schifffahrtsamtes Nürnberg. ....	25
Abb. 16: Elektrisch gemessene Holzfeuchten u in % an unbehandelten und mit drei verschiedenen Holzschutzmitteln (1=Koranol Holzbau DV; 2=Sonderformulierung, Fa. Obermeier; 3=Wolvac L0-F) getränkten Kiefernspint-	

---

Prüfkörpern in und quer zur Faserrichtung nach Lagerung in verschiedenen Klimata. ....	27
Abb. 17: Holzfeuchten von Holzdübeln in zwei verschiedenen Klimaten, gemessen mit einem Widerstands-Holzfeuchtemessgerät (Fa. Gann) und gravimetrisch bestimmt (K = Kiefer unbehandelt, E = mit eingeleimter Elektrode, H = mit Wolvac L0-F imprägniert, S = gestresst). ....	28
Abb. 18: Holzfeuchteverläufe im Stiel 7 des Brückenpfeilers 1 im Bereich der unteren Nagelplatte (U4), oberhalb der unteren Nagelplatte (U5) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U6). ....	30
Abb. 17: Holzfeuchteverläufe im Stiel 8 des Brückenpfeilers 1 im Bereich der unteren Nagelplatte (U7), oberhalb der unteren Nagelplatte (U8) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U9). ....	30
Abb. 18: Holzfeuchteverläufe im Stiel 9 des Brückenpfeilers 1 im Bereich der unteren Nagelplatte (U10), oberhalb der unteren Nagelplatte (U11) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U12). ....	31
Abb. 19: Holzfeuchteverläufe im Stiel 7 des Brückenpfeilers 2 im Bereich der unteren Nagelplatte (U15) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U16). ....	31
Abb. 20: Holzfeuchteverläufe im Stiel 8 des Brückenpfeilers 2 im Bereich der unteren Nagelplatte (U17) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U18). ....	32
Abb. 21: Holzfeuchteverläufe im Stiel 9 des Brückenpfeilers 2 im Bereich der unteren Nagelplatte (U19) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U20). ....	32
Abb. 22: Holzfeuchteverläufe im Stiel 7 des Brückenpfeilers 3 im Bereich der unteren Nagelplatte (U24), oberhalb der unteren Nagelplatte (U25) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U26). ....	33
Abb. 23: Holzfeuchteverläufe im Stiel 8 des Brückenpfeilers 3 im Bereich der unteren Nagelplatte (U27), oberhalb der unteren Nagelplatte (U28) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U29). ....	33
Abb. 24: Holzfeuchteverläufe im Stiel 9 des Brückenpfeilers 3 im Bereich der unteren Nagelplatte (U30), oberhalb der unteren Nagelplatte (U31) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U32). ....	34
Abb. 25: Holzfeuchteverläufe im Stiel 7 des Brückenpfeilers 4 im Bereich der unteren Nagelplatte (U35) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U36). ....	34
Abb. 26: Holzfeuchteverläufe im Stiel 8 des Brückenpfeilers 4 im Bereich der unteren Nagelplatte (U37) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U38). ....	35

---

Abb. 27: Holzfeuchteverläufe im Stiel 9 des Brückenpfeilers 4 im Bereich der unteren Nagelplatte (U39) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U40). .....	35
Abb. 28: Holzfeuchteverläufe im Stiel 7 des Brückenpfeilers 5 im Bereich der unteren Nagelplatte (44), oberhalb der unteren Nagelplatte (U45) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U46). .....	36
Abb. 29: Holzfeuchteverläufe im Stiel 8 des Brückenpfeilers 5 im Bereich der unteren Nagelplatte (47), oberhalb der unteren Nagelplatte (U48) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U49). .....	36
Abb. 32: Holzfeuchteverläufe im Stiel 9 des Brückenpfeilers 5 im Bereich der unteren Nagelplatte (U50), oberhalb der unteren Nagelplatte (U51) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U52). .....	37
Abb. 31: Holzfeuchteverläufe im Stiel 1 des Brückenpfeilers 1 im Bereich der unteren Nagelplatte (U1), oberhalb der unteren Nagelplatte (U2) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U3). .....	38
Abb. 32: Holzfeuchteverläufe im Stiel 1 des Brückenpfeilers 2 im Bereich der unteren Nagelplatte (U13) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U14). .....	38
Abb. 33: Holzfeuchteverläufe im Stiel 1 des Brückenpfeilers 3 im Bereich der unteren Nagelplatte (U21), oberhalb der unteren Nagelplatte (U22) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U23). .....	39
Abb. 34: Holzfeuchteverläufe im Stiel 1 des Brückenpfeilers 4 im Bereich der unteren Nagelplatte (U33) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U34). .....	39
Abb. 35: Holzfeuchteverläufe im Stiel 1 des Brückenpfeilers 5 im Bereich der unteren Nagelplatte (U41), oberhalb der unteren Nagelplatte (U42) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U43). .....	40
Abb. 36: Holzfeuchteverläufe im Zugband (Feld 15) hinter den Nagelplatten (U53 und U54 wetterseitig; U55 und U56 wetterabgewandt). .....	41
Abb. 37: Holzfeuchteverläufe im Zugband (Feld 33) hinter den Nagelplatten (U59 und U60 wetterseitig; U61 und U62 wetterabgewandt). .....	41
Abb. 38: Holzfeuchteverläufe im Zugband (Feld 18), wetterseitig (U57) und wetterabgewandt (U58). .....	42
Abb. 39: Holzfeuchteverläufe im Zugband (Feld 41), wetterseitig (U63) und wetterabgewandt (U64). .....	42



Abb. 40: Verlauf der mittleren Lufttemperatur an der Essinger Brücke nahe des vorderen Widerlagers (H1 T), nahe des hinteren Widerlagers (H4 T), nahe des ostseitigen Kanalufers (H2 T) und nahe des westseitigen Kanalufers (H3 T)....	43
Abb. 41: Verlauf der mittleren relativen Luftfeuchtigkeit an der Essinger Brücke nahe des vorderen Widerlagers (H1 RH), nahe des hinteren Widerlagers (H4 RH), nahe des ostseitigen Kanalufers (H2 RH) und nahe des westseitigen Kanalufers (H3 RH). .....	44
Abb. 42: Holzfeuchteverläufe im Doppellagen-Test-Set an der Essinger Brücke (eb). .....	45
Abb. 43: Holzfeuchteverläufe im Doppellagen-Test-Set am Pumpenhaus Essing (ep). .....	45
Abb. 44: Temperaturverläufe in der Zwischenlage der Doppellagen-Test-Sets (Holztemperatur) an der Essinger Brücke (eb) und am Pumpenhaus Essing (ep). .....	46
Abb. 45: Mittlere Abbaubewertung nach DIN EN 252 (1990) der Doppellagen-Prüfkörper an der Essinger Brücke (eb) und am Pumpenhaus Essing (ep). ....	47
Abb. 46: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 7 des Brückenpfeilers 1 im Bereich der unteren Nagelplatte (U4), oberhalb der unteren Nagelplatte (U5) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U6). .....	57
Abb. 47: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 8 des Brückenpfeilers 1 im Bereich der unteren Nagelplatte (U7), oberhalb der unteren Nagelplatte (U8) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U9). .....	57
Abb. 48: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 9 des Brückenpfeilers 1 im Bereich der unteren Nagelplatte (U10), oberhalb der unteren Nagelplatte (U11) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U12). .....	58
Abb. 49: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 7 des Brückenpfeilers 2 im Bereich der unteren Nagelplatte (U15) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U16). .....	58
Abb. 50: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 8 des Brückenpfeilers 2 im Bereich der unteren Nagelplatte (U17) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U18). .....	59
Abb. 51: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 9 des Brückenpfeilers 2 im Bereich der unteren Nagelplatte (U19) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U20). .....	59

---

Abb. 52: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 7 des Brückenpfeilers 3 im Bereich der unteren Nagelplatte (U24), oberhalb der unteren Nagelplatte (U25) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U26). .....	60
Abb. 53: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 8 des Brückenpfeilers 3 im Bereich der unteren Nagelplatte (U27), oberhalb der unteren Nagelplatte (U28) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U29). .....	60
Abb. 54: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 9 des Brückenpfeilers 3 im Bereich der unteren Nagelplatte (U30), oberhalb der unteren Nagelplatte (U31) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U32). .....	61
Abb. 55: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 7 des Brückenpfeilers 4 im Bereich der unteren Nagelplatte (U35) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U36). .....	61
Abb. 56: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 8 des Brückenpfeilers 4 im Bereich der unteren Nagelplatte (U37) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U38). .....	62
Abb. 57: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 9 des Brückenpfeilers 4 im Bereich der unteren Nagelplatte (U39) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U40). .....	62
Abb. 58: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 7 des Brückenpfeilers 5 im Bereich der unteren Nagelplatte (44), oberhalb der unteren Nagelplatte (U45) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U46). .....	63
Abb. 59: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 8 des Brückenpfeilers 5 im Bereich der unteren Nagelplatte (47), oberhalb der unteren Nagelplatte (U48) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U49). .....	63
Abb. 60: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 9 des Brückenpfeilers 5 im Bereich der unteren Nagelplatte (U50), oberhalb der unteren Nagelplatte (U51) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U52). .....	64
Abb. 61: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 1 des Brückenpfeilers 1 im Bereich der unteren Nagelplatte (U1), oberhalb der unteren Nagelplatte (U2) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U3). .....	64
Abb. 62: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 1 des Brückenpfeilers 2 im Bereich der unteren Nagelplatte (U13) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U14). .....	65

Abb. 63: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 1 des Brückenpfeilers 3 im Bereich der unteren Nagelplatte (U21), oberhalb der unteren Nagelplatte (U22) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U23). .....	65
Abb. 64: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 1 des Brückenpfeilers 4 im Bereich der unteren Nagelplatte (U33) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U34). .....	66
Abb. 65: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 1 des Brückenpfeilers 5 im Bereich der unteren Nagelplatte (U41), oberhalb der unteren Nagelplatte (U42) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U43). .....	66
Abb. 66: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Zugband (Feld 15) hinter den Nagelplatten (U53 und U54 wetterseitig; U55 und U56 wetterabgewandt). .....	67
Abb. 67: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Zugband (Feld 33) hinter den Nagelplatten (U59 und U60 wetterseitig; U61 und U62 wetterabgewandt). .....	67
Abb. 68: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Zugband (Feld 18), wetterseitig (U57) und wetterabgewandt (U58). .....	68
Abb. 69: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Zugband (Feld 41), wetterseitig (U63) und wetterabgewandt (U64). .....	68

## 6.2 Tabellen

Tab. 1: Rezeptur des leitfähigen Klebstoffes. ....	13
Tab. 2: Rezeptur der isolierenden Epoxydisoliervergussmasse. ....	14
Tab. 3: Organische Holzschutzmittel, Hersteller und Wirkstoffkonzentrationen nach Herstellerangaben. ....	15
Tab. 4: Bezeichnung, Behandlung und Anzahl von Kiefernholzdübeln für die Untersuchung der Eignung zur elektrischen Holzfeuchtemessung. ....	17
Tab.5: Bezeichnung und Lage der Holzfeuchte- Messstellen an der Essinger Brücke. ....	20

## 7 ANHANG

### Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten an ausgewählten Bauteilen der Essinger Brücke

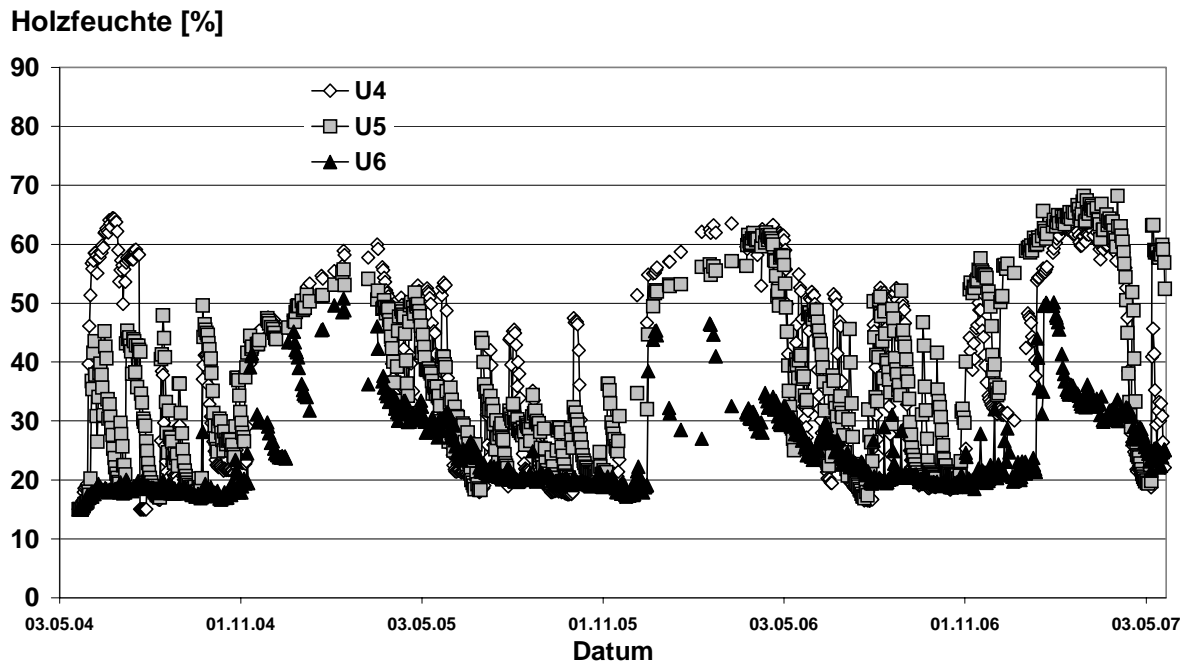


Abb. 46: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 7 des Brückenpfeilers 1 im Bereich der unteren Nagelplatte (U4), oberhalb der unteren Nagelplatte (U5) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U6).

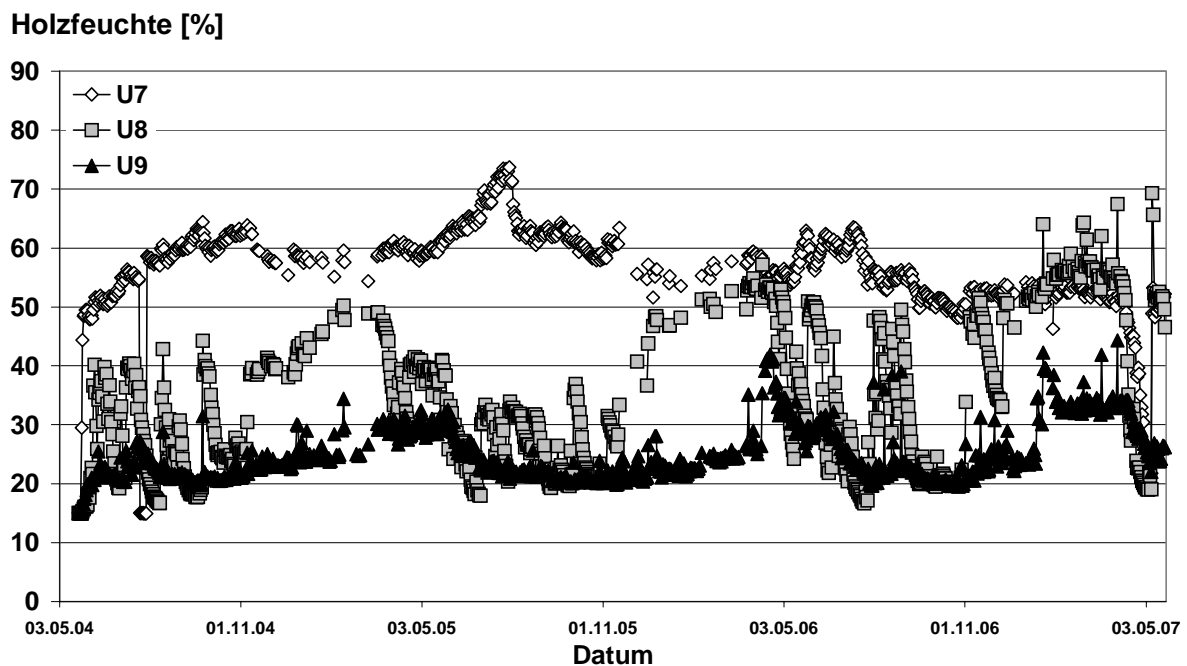


Abb. 47: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 8 des Brückenpfeilers 1 im Bereich der unteren Nagelplatte (U7), oberhalb der unteren Nagelplatte (U8) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U9).

## Holzfeuchte [%]

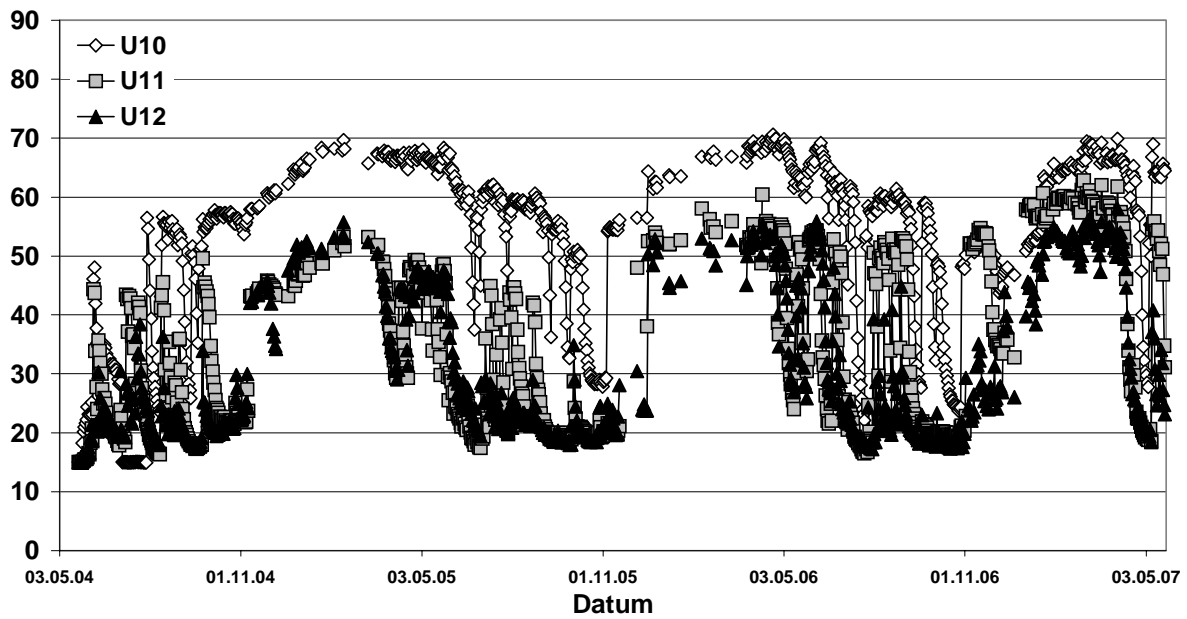


Abb. 48: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 9 des Brückenpfeilers 1 im Bereich der unteren Nagelplatte (U10), oberhalb der unteren Nagelplatte (U11) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U12).

## Holzfeuchte [%]

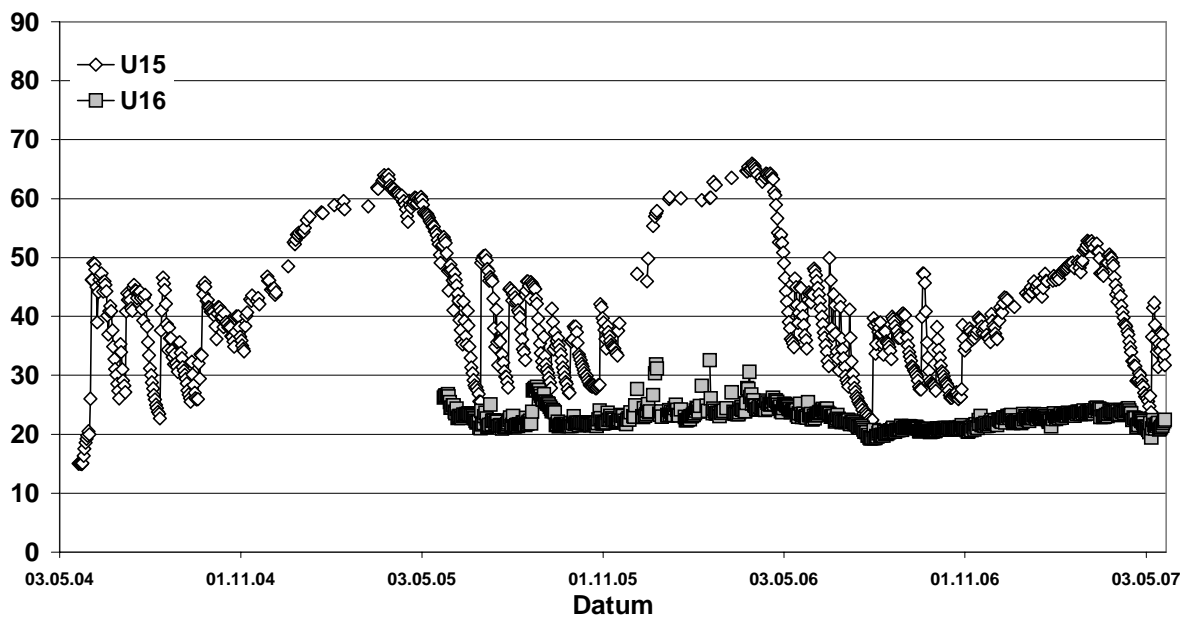


Abb. 49: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 7 des Brückenpfeilers 2 im Bereich der unteren Nagelplatte (U15) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U16).

## Holzfeuchte [%]

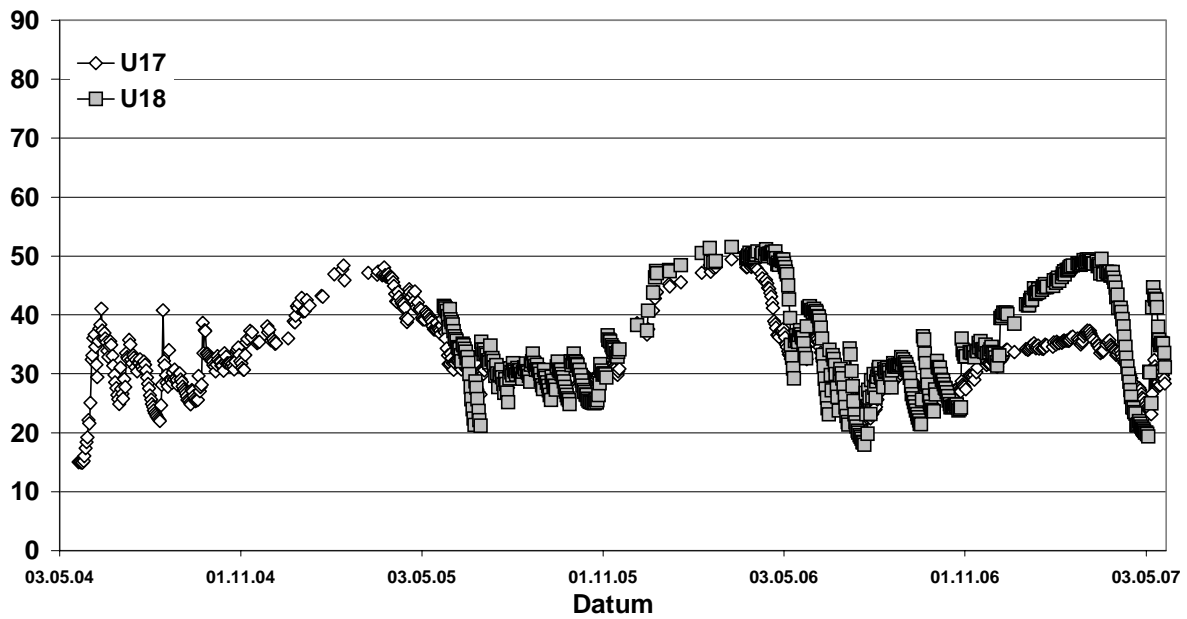


Abb. 50: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 8 des Brückenpfeilers 2 im Bereich der unteren Nagelplatte (U17) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U18).

## Holzfeuchte [%]

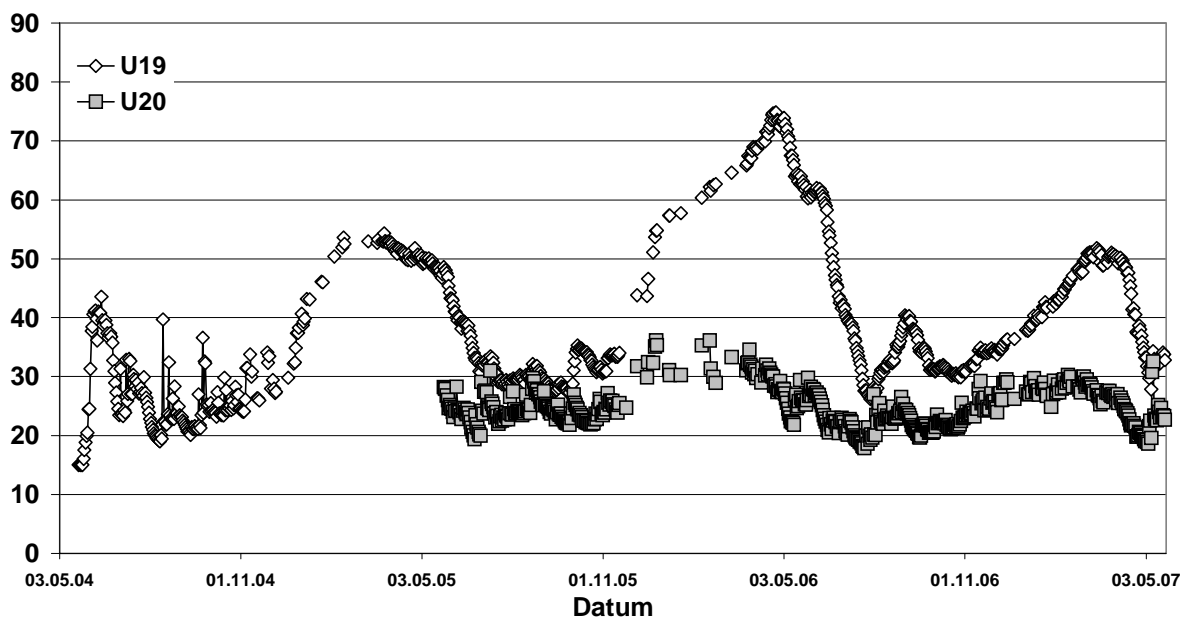


Abb. 51: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 9 des Brückenpfeilers 2 im Bereich der unteren Nagelplatte (U19) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U20).

## Holzfeuchte [%]

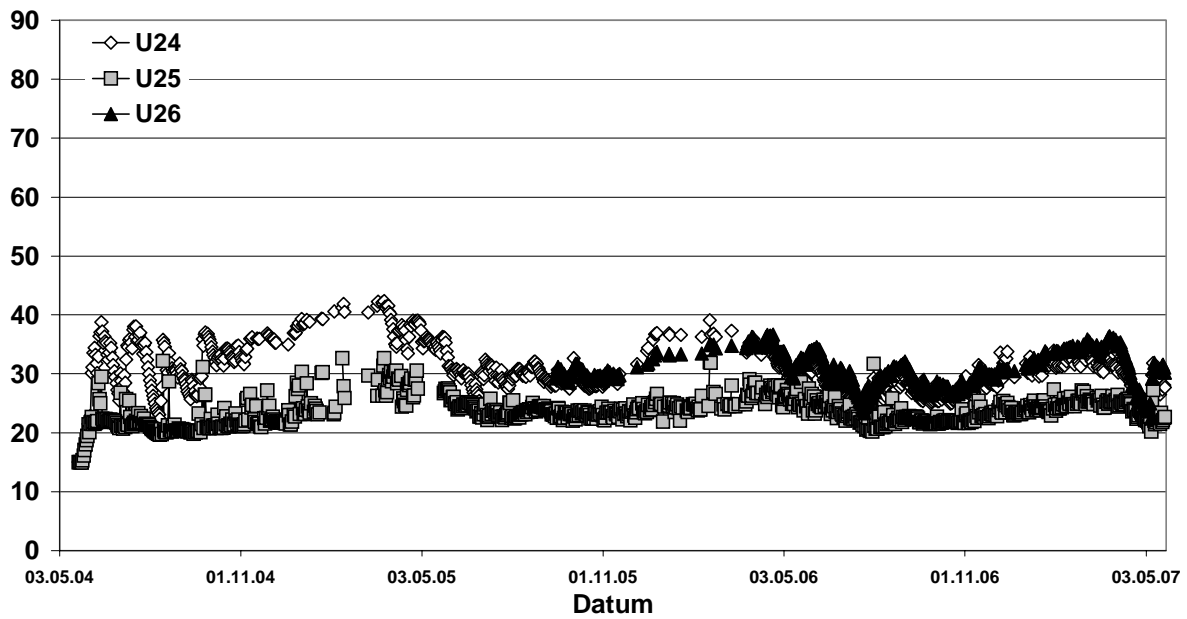


Abb. 52: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 7 des Brückenpfeilers 3 im Bereich der unteren Nagelplatte (U24), oberhalb der unteren Nagelplatte (U25) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U26).

## Holzfeuchte [%]

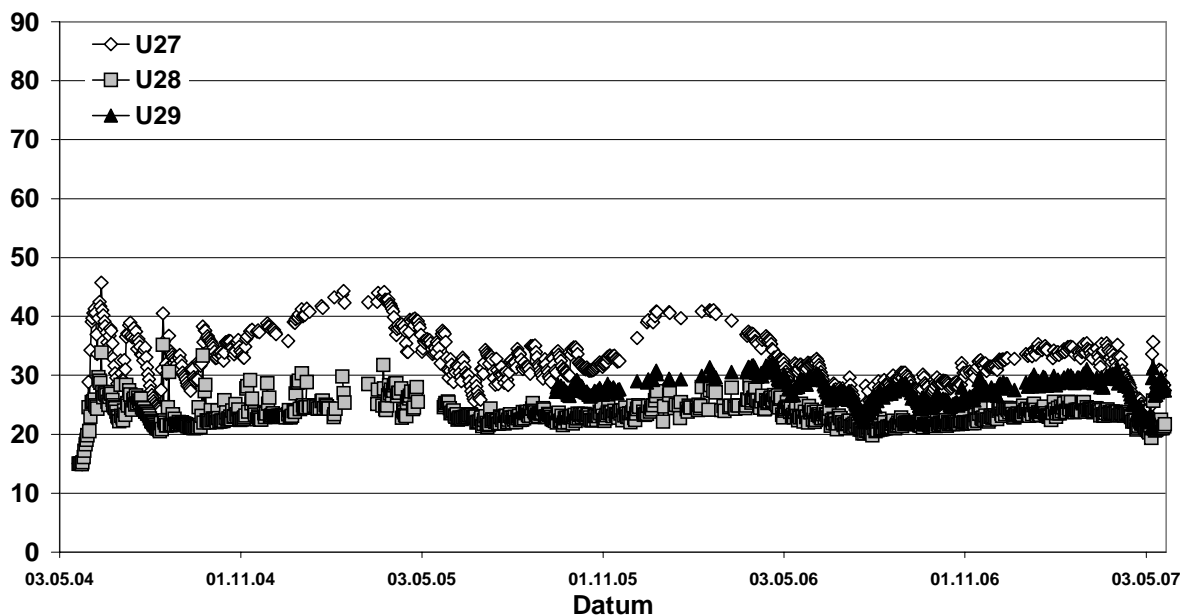


Abb. 53: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 8 des Brückenpfeilers 3 im Bereich der unteren Nagelplatte (U27), oberhalb der unteren Nagelplatte (U28) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U29).

## Holzfeuchte [%]

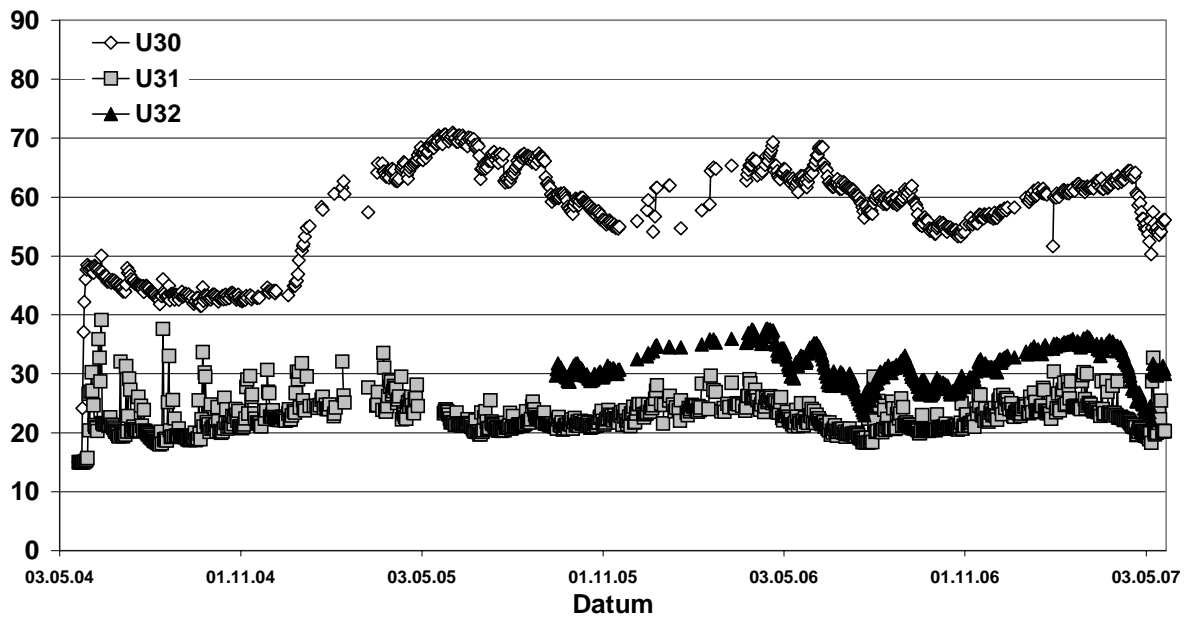


Abb. 54: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 9 des Brückenpfeilers 3 im Bereich der unteren Nagelplatte (U30), oberhalb der unteren Nagelplatte (U31) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U32).

## Holzfeuchte [%]

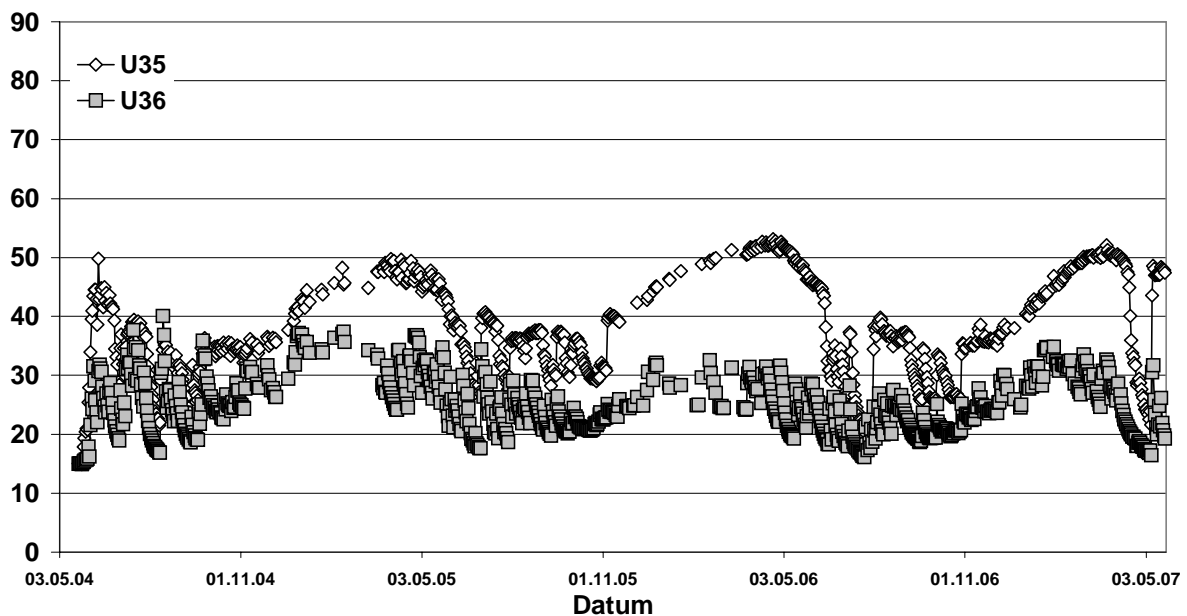


Abb. 55: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 7 des Brückenpfeilers 4 im Bereich der unteren Nagelplatte (U35) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U36).



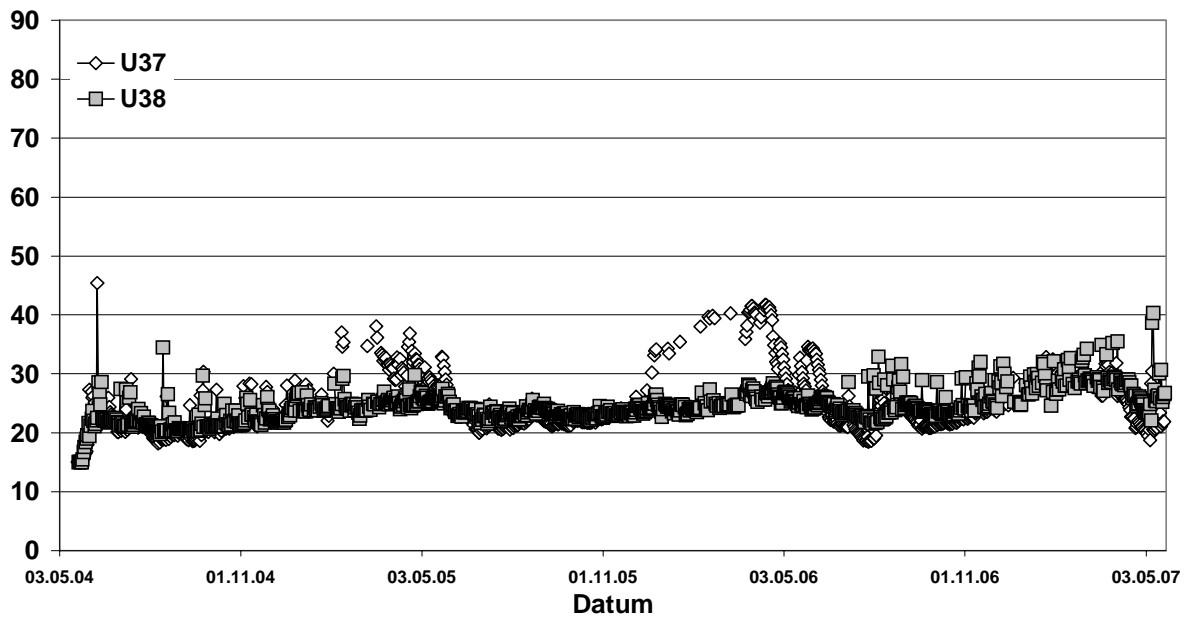
**Holzfeuchte [%]**

Abb. 56: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 8 des Brückenpfeilers 4 im Bereich der unteren Nagelplatte (U37) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U38).

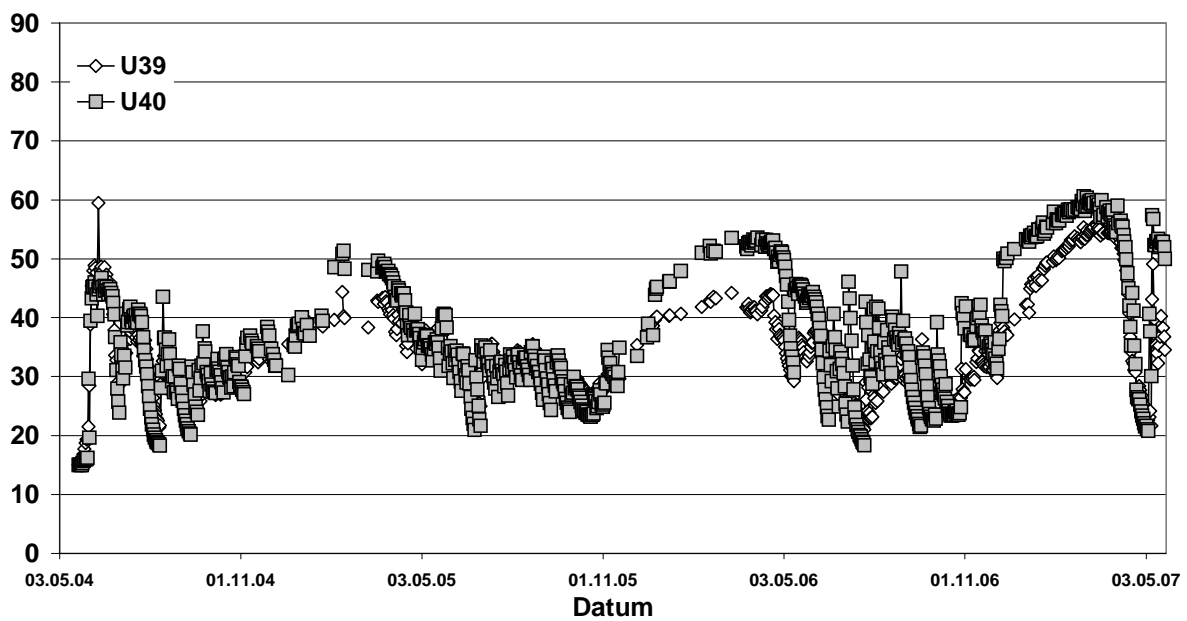
**Holzfeuchte [%]**

Abb. 57: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 9 des Brückenpfeilers 4 im Bereich der unteren Nagelplatte (U39) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U40).

## Holzfeuchte [%]

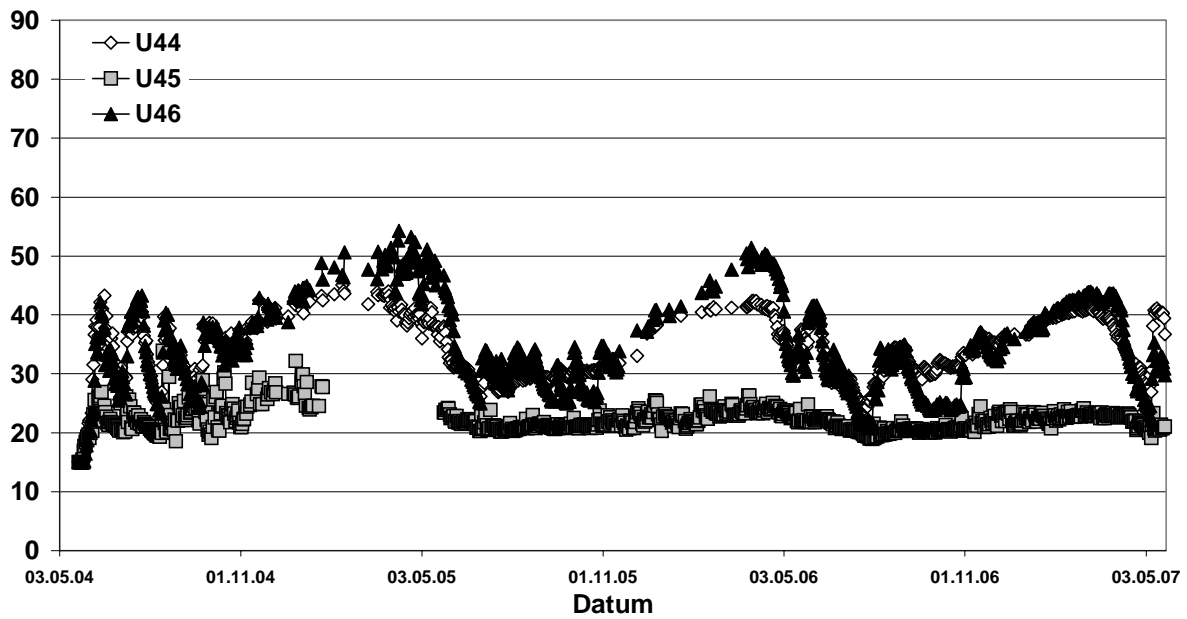


Abb. 58: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 7 des Brückenpfeilers 5 im Bereich der unteren Nagelplatte (44), oberhalb der unteren Nagelplatte (U45) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U46).

## Holzfeuchte [%]

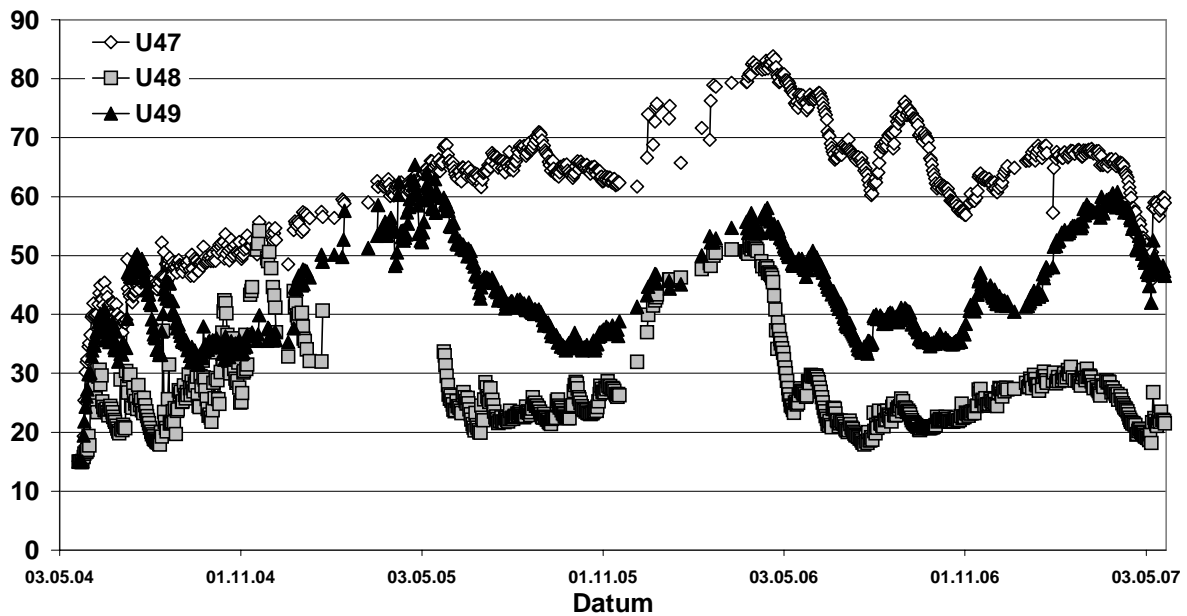


Abb. 59: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 8 des Brückenpfeilers 5 im Bereich der unteren Nagelplatte (47), oberhalb der unteren Nagelplatte (U48) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U49).

## Holzfeuchte [%]

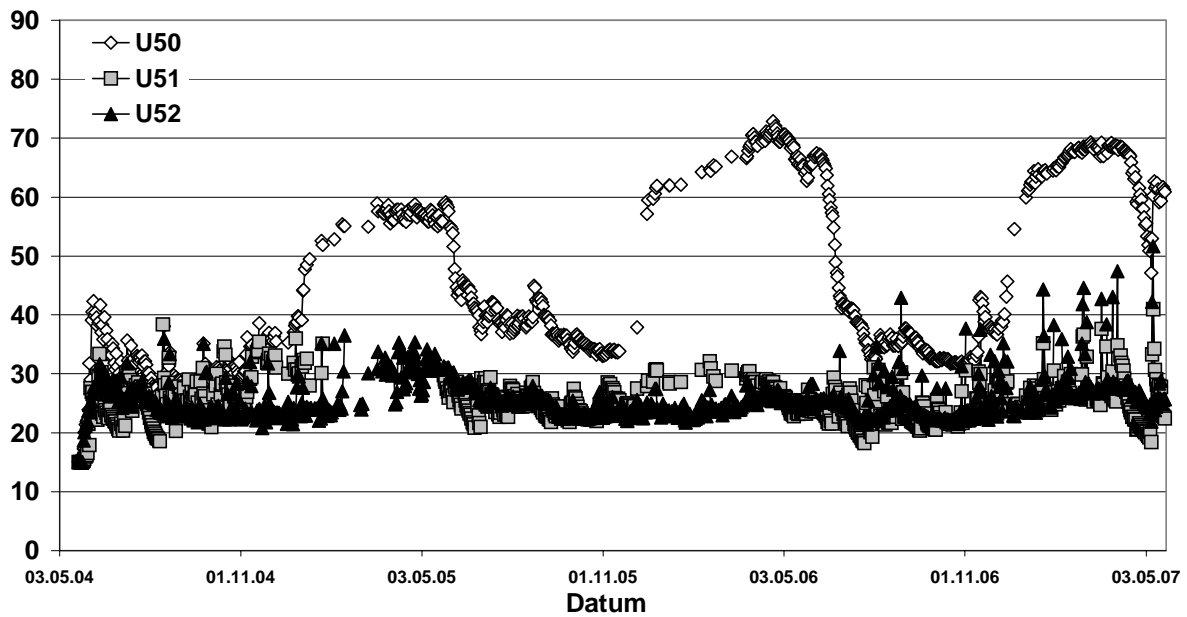


Abb. 60: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 9 des Brückenpfeilers 5 im Bereich der unteren Nagelplatte (U50), oberhalb der unteren Nagelplatte (U51) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U52).

## Holzfeuchte [%]

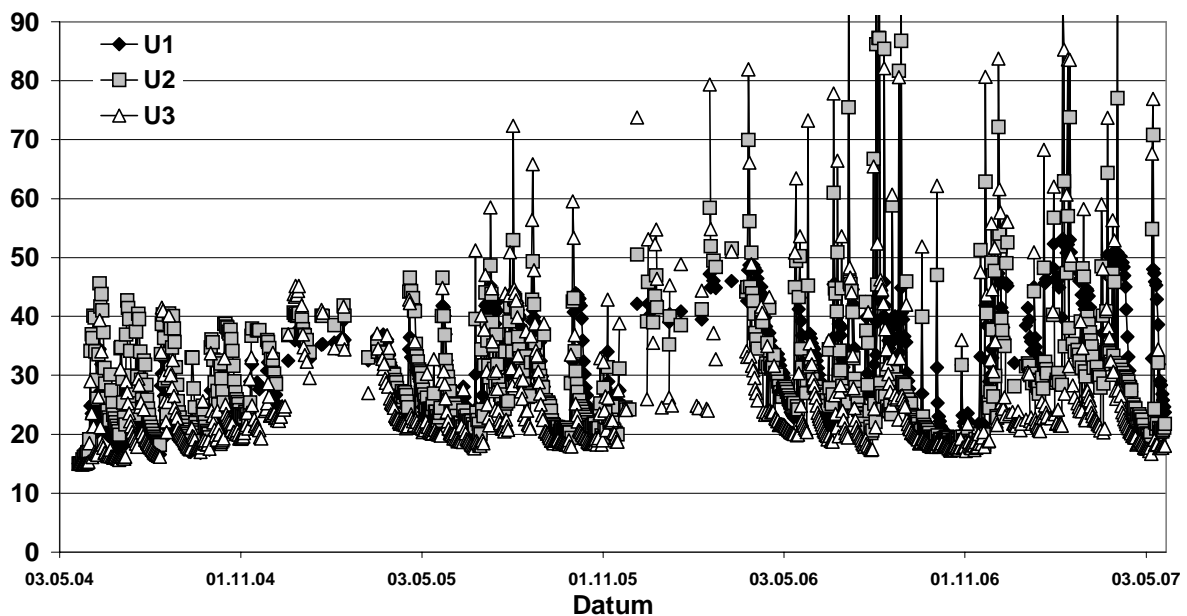


Abb. 61: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 1 des Brückenpfeilers 1 im Bereich der unteren Nagelplatte (U1), oberhalb der unteren Nagelplatte (U2) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U3).

## Holzfeuchte [%]

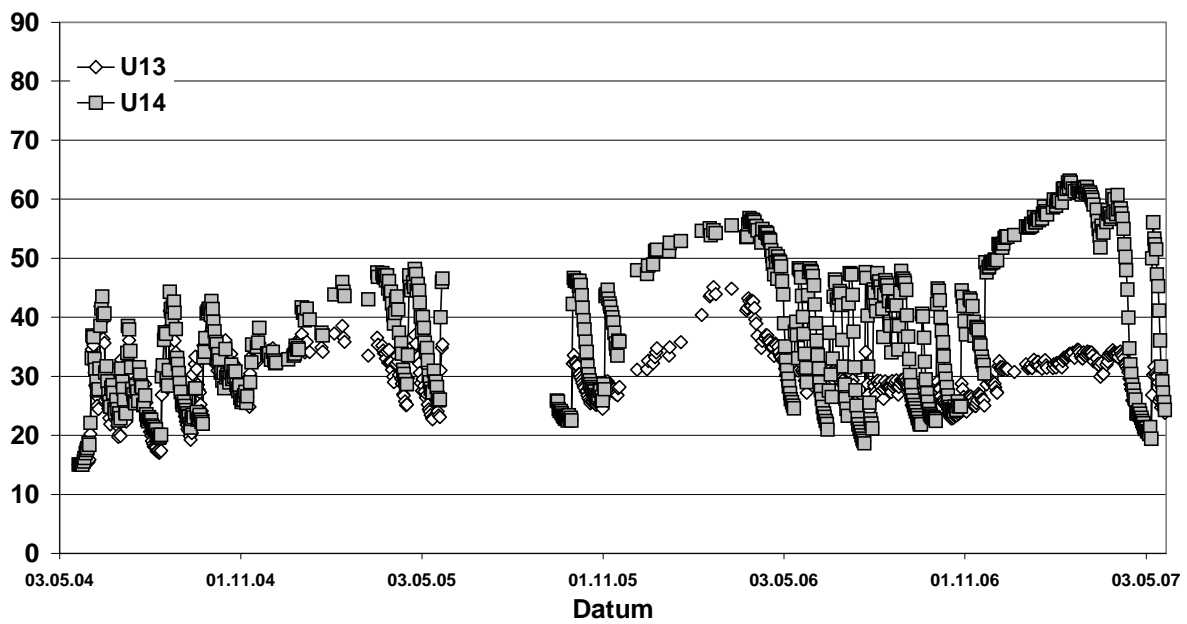


Abb. 62: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 1 des Brückenpfeilers 2 im Bereich der unteren Nagelplatte (U13) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U14).

## Holzfeuchte [%]

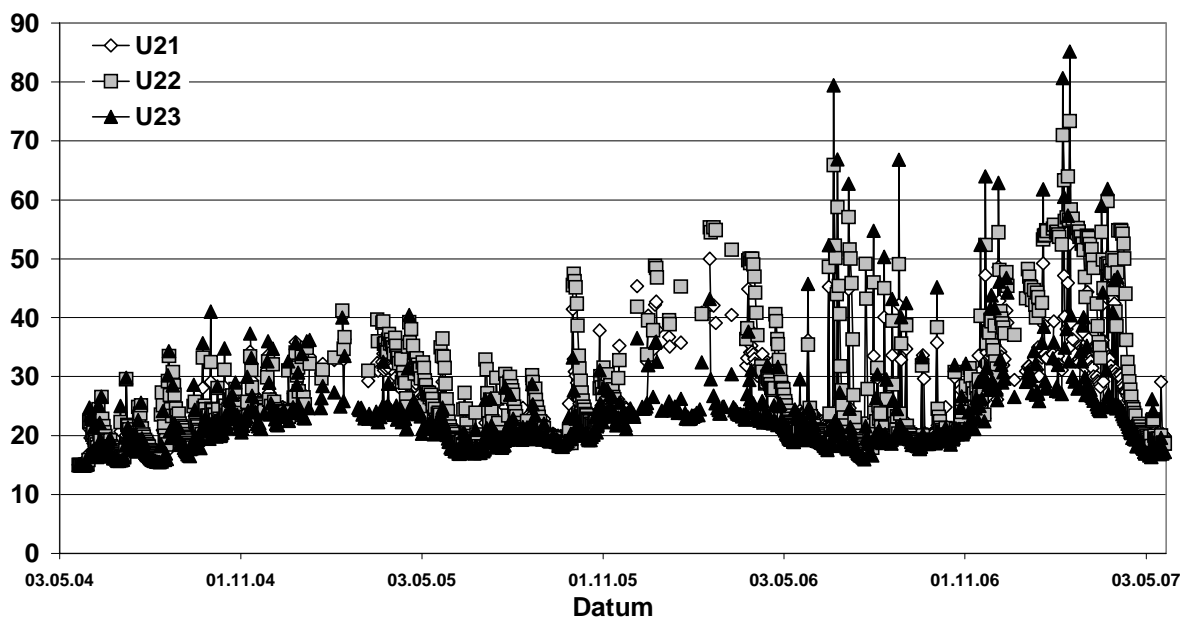


Abb. 63: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 1 des Brückenpfeilers 3 im Bereich der unteren Nagelplatte (U21), oberhalb der unteren Nagelplatte (U22) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U23).

## Holzfeuchte [%]

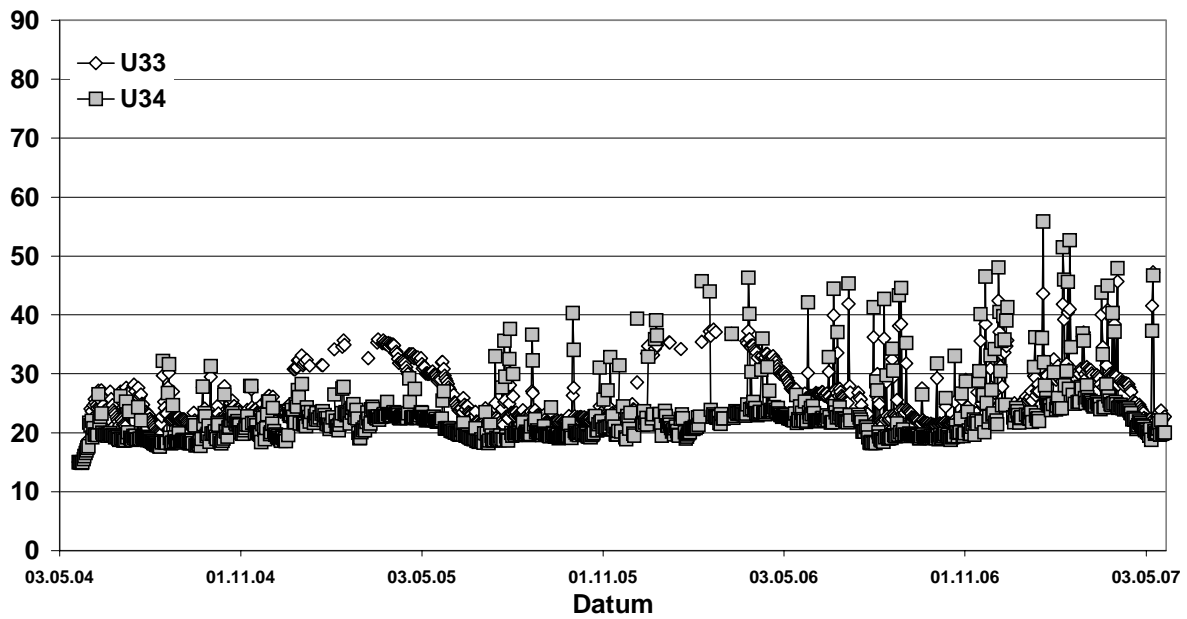


Abb. 64: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 1 des Brückenpfeilers 4 im Bereich der unteren Nagelplatte (U33) und oberhalb der unteren Nagelplatte (U34).

## Holzfeuchte [%]

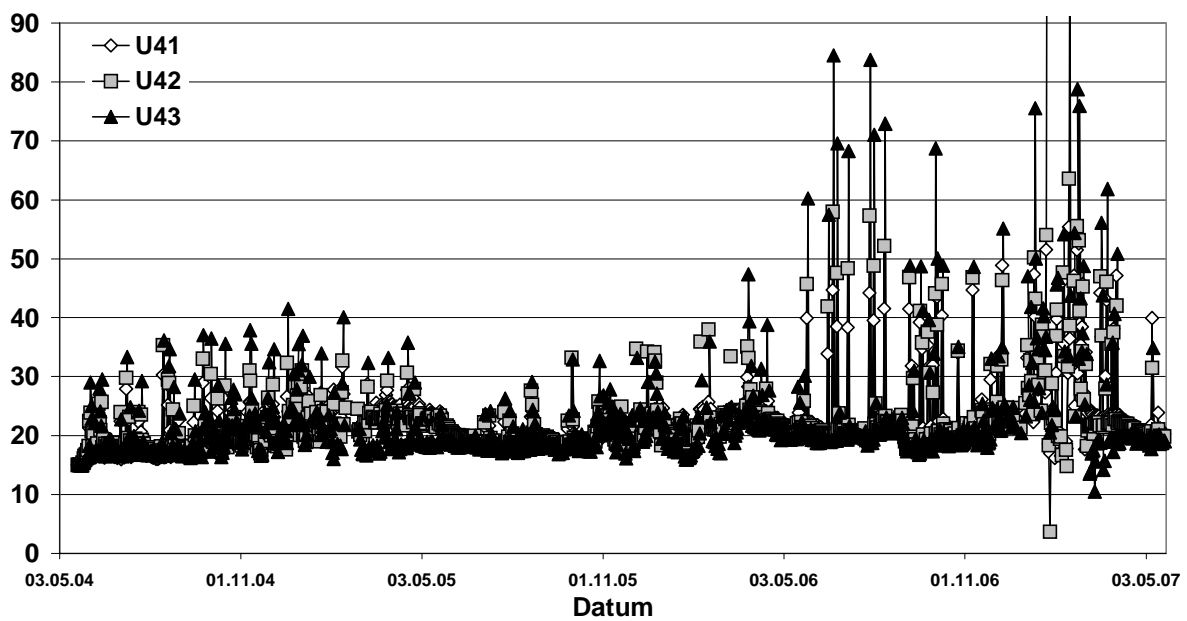


Abb. 65: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Stiel 1 des Brückenpfeilers 5 im Bereich der unteren Nagelplatte (U41), oberhalb der unteren Nagelplatte (U42) und im Bereich der oberen Nagelplatte (U43).

## Holzfeuchte [%]

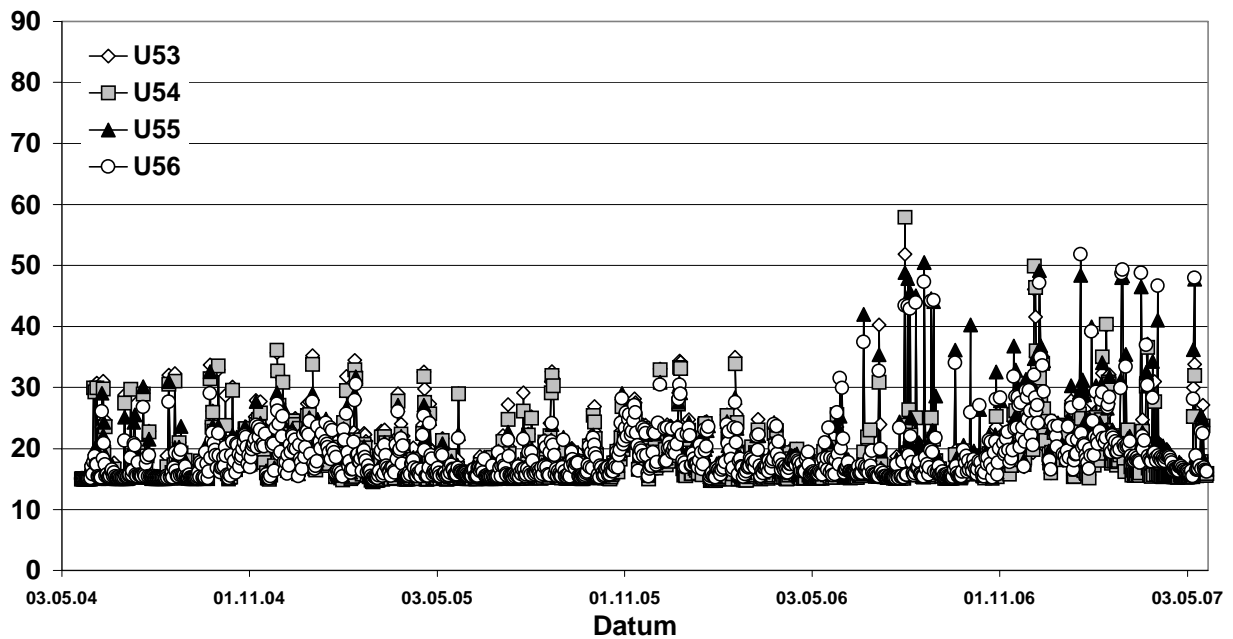


Abb. 66: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Zugband (Feld 15) hinter den Nagelplatten (U53 und U54 wetterseitig; U55 und U56 wetterabgewandt).

## Holzfeuchte [%]

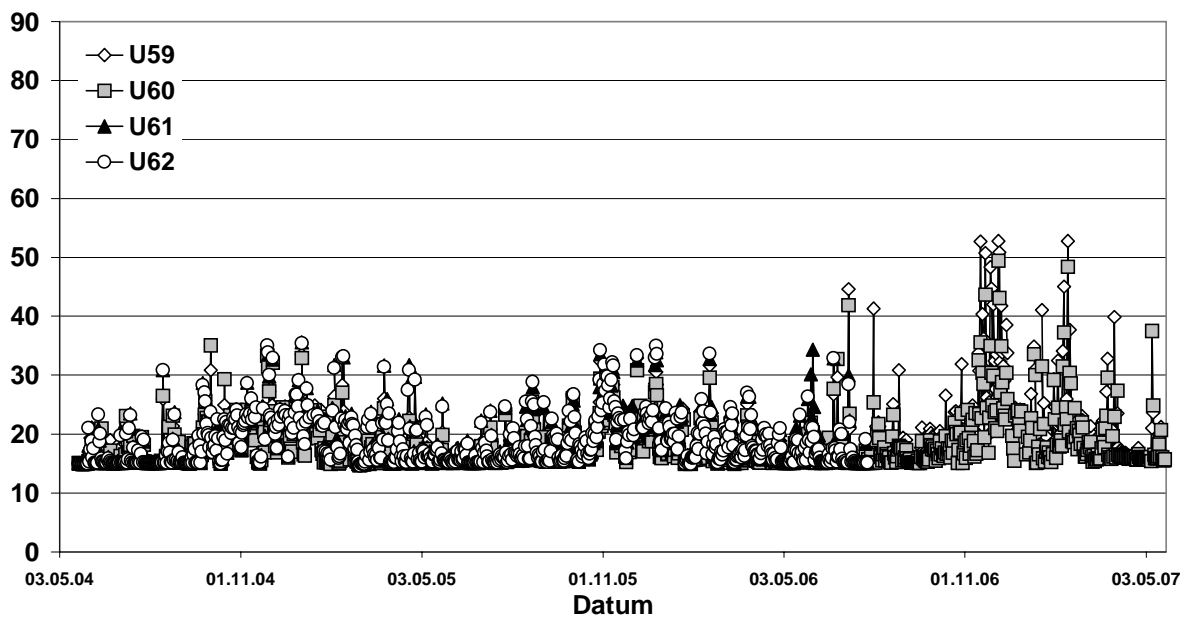


Abb. 67: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Zugband (Feld 33) hinter den Nagelplatten (U59 und U60 wetterseitig; U61 und U62 wetterabgewandt).

## Holzfeuchte [%]

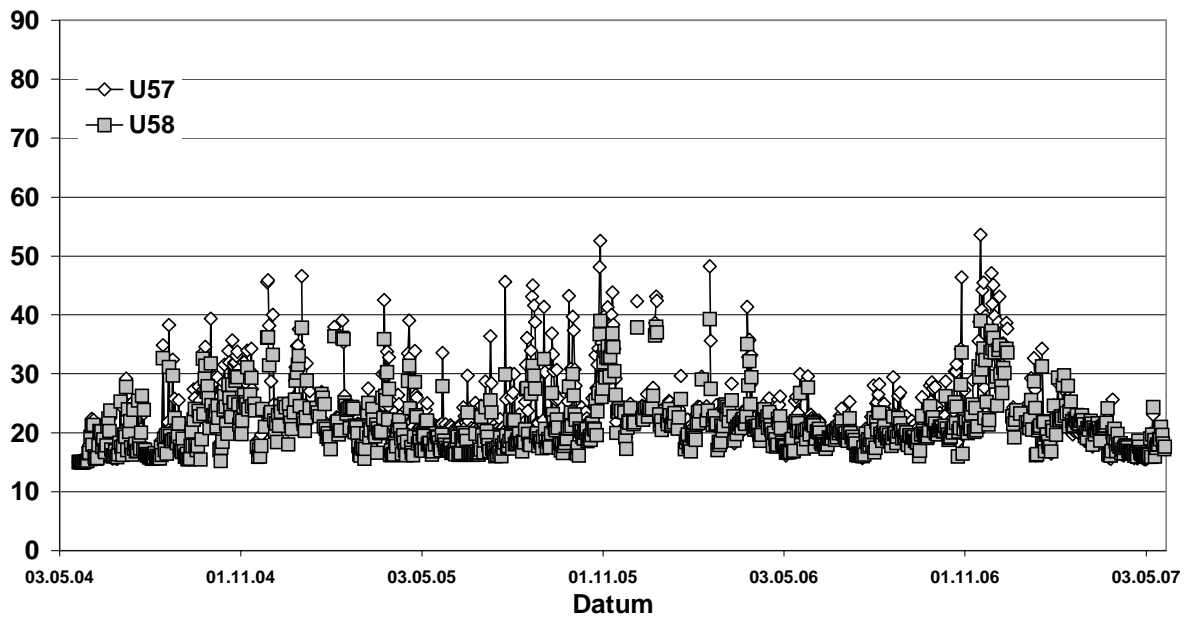


Abb. 68: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Zugband (Feld 18), wetterseitig (U57) und wetterabgewandt (U58).

## Holzfeuchte [%]

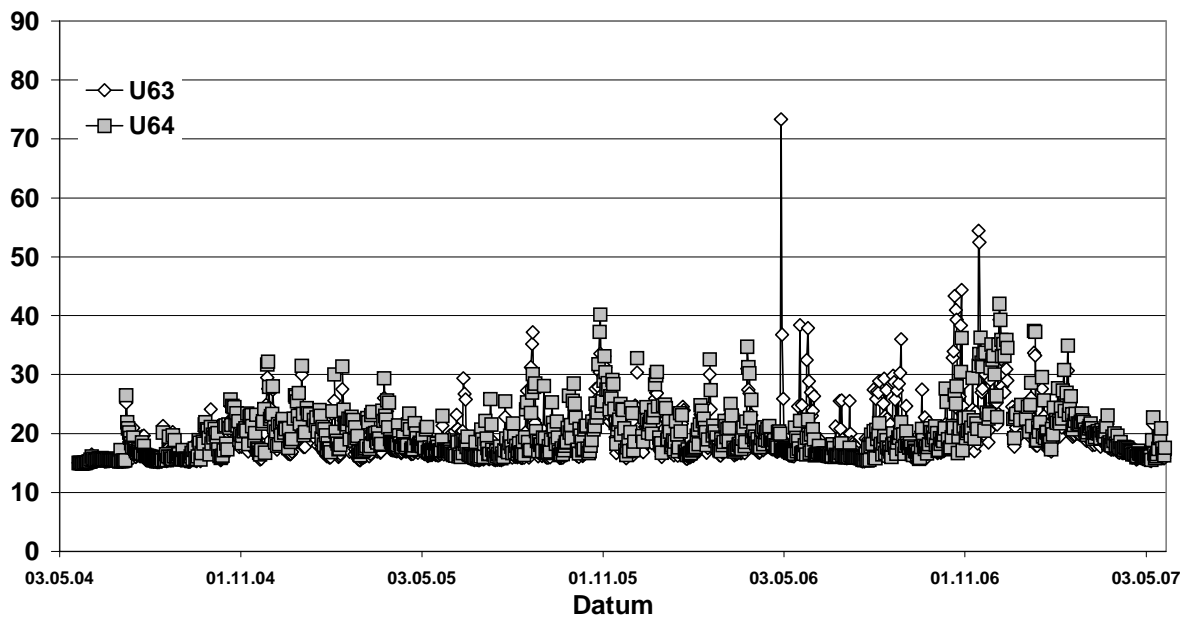


Abb. 69: Holzfeuchteverläufe mit Tageswerten im Zugband (Feld 41), wetterseitig (U63) und wetterabgewandt (U64).