



**Bergische Universität Wuppertal**

**Fachbereich D**

**Abteilung Bauingenieurwesen**

**Berichte des Lehr- und  
Forschungsgebietes Geotechnik**

---

**Nr. 29**

**August 2005**

---

Carsten Hauser

**Boden-Bauwerk-Interaktion  
bei parallel-wandigen Verbundsystemen**

Bodenmechanische Modellversuche  
unter Anwendung innovativer Auswerteverfahren

---

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. M. Pulsfort  
und Prof. em. Dr.-Ing. B. Walz

**Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Wuppertal, Univ., Diss., 2005

Copyright Shaker Verlag 2005

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-4392-5

ISSN 1438-809X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen  
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# **INHALTSVERZEICHNIS:**

|          |                                                                                    |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>EINFÜHRUNG .....</b>                                                            | <b>1</b>  |
| 1.1      | Ziel der Arbeit .....                                                              | 1         |
| 1.2      | Stand der Forschung.....                                                           | 2         |
| 1.2.1    | Allgemeines.....                                                                   | 2         |
| 1.2.2    | Stabwand .....                                                                     | 2         |
| 1.2.3    | Schmale Trennmolen in Spundwandbauweise.....                                       | 5         |
| 1.2.4    | Fangedamm .....                                                                    | 6         |
| 1.2.5    | Hangverdübelung mit Pfahlreihen .....                                              | 10        |
| 1.2.6    | Zusammenfassung .....                                                              | 10        |
| 1.3      | Arbeitsmethode.....                                                                | 11        |
| <b>2</b> | <b>VERSUCHSAUFBAU .....</b>                                                        | <b>14</b> |
| 2.1      | Allgemeines .....                                                                  | 14        |
| 2.2      | Versuchsparameter .....                                                            | 14        |
| 2.3      | Aufbau der bodenmechanischen Modellversuche.....                                   | 15        |
| 2.3.1    | Versuchscontainer .....                                                            | 15        |
| 2.3.2    | Modellwände .....                                                                  | 16        |
| 2.3.3    | Belastungseinrichtung / Krafteinleitung .....                                      | 18        |
| 2.4      | Füllmedium Sand .....                                                              | 20        |
| 2.4.1    | Bodenkenngrößen und Kornverteilung .....                                           | 20        |
| 2.4.2    | Reibungseinflüsse im Modellversuch .....                                           | 21        |
| 2.4.2.1  | <i>Reibung in der Kontaktfläche zwischen Sandfüllung und Glasscheiben .....</i>    | <i>21</i> |
| 2.4.2.2  | <i>Reibung in der Kontaktfläche zwischen Sandfüllung und Aluminiumwänden .....</i> | <i>23</i> |
| 2.5      | Schneebeli-Modell .....                                                            | 24        |
| 2.5.1    | Allgemeines.....                                                                   | 24        |
|          | Abb. 2-17: Eingebauter Versuch mit dem Schneebeli-Modell .....                     | 25        |
| 2.5.2    | Untersuchungen anderer Autoren mit dem Schneebeli-Modell .....                     | 25        |
| 2.5.3    | „Reibungswinkel“ .....                                                             | 27        |
| <b>3</b> | <b>MESSTECHNIK .....</b>                                                           | <b>29</b> |
| 3.1      | Übersicht .....                                                                    | 29        |
| 3.2      | Messsystem SPIDER8 & Catman.....                                                   | 29        |

|            |                                                                      |           |
|------------|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3.3</b> | <b>Wegmessung .....</b>                                              | <b>29</b> |
| <b>3.4</b> | <b>Kraftmessung.....</b>                                             | <b>31</b> |
| <b>3.5</b> | <b>Ankerkraftmesser .....</b>                                        | <b>32</b> |
| <b>3.6</b> | <b>Modellwände mit Dehnungsmessung .....</b>                         | <b>34</b> |
| 3.6.1      | Allgemeines.....                                                     | 34        |
| 3.6.2      | Aufbau / Beschreibung.....                                           | 34        |
| 3.6.3      | DMS-Verschaltung.....                                                | 36        |
| <b>3.7</b> | <b>Funktionstests der Messwände .....</b>                            | <b>38</b> |
| 3.7.1      | Versuchsbeschreibung.....                                            | 38        |
| 3.7.2      | Ergebnisse .....                                                     | 38        |
| 3.7.3      | Plattenwirkung .....                                                 | 40        |
| 3.7.4      | Korrekturfaktor.....                                                 | 42        |
| <b>4</b>   | <b>BODENMECHANISCHE MODELLVERSUCHE .....</b>                         | <b>44</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Einleitung .....</b>                                              | <b>44</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Versuchsablauf / -durchführung.....</b>                           | <b>45</b> |
| 4.2.1      | Allgemeines.....                                                     | 45        |
| 4.2.2      | Füllung mit Sand .....                                               | 46        |
| 4.2.3      | Füllung mit Schneebeli-Stäbchen .....                                | 46        |
| <b>4.3</b> | <b>Last-Verformungs-Kurven.....</b>                                  | <b>47</b> |
| 4.3.1      | Erläuterungen .....                                                  | 47        |
| 4.3.2      | Gelenkige Fußlagerung .....                                          | 47        |
| 4.3.3      | Eingespannte Fußlagerung .....                                       | 50        |
| 4.3.4      | Unterschiede Sand - Schneebeli-Modell .....                          | 53        |
| <b>4.4</b> | <b>Verformungswiderstand der Bodenfüllung .....</b>                  | <b>55</b> |
| 4.4.1      | Ermittlung des Bodenwiderstandes bei eingespannter Fußlagerung ..... | 55        |
| 4.4.2      | Ergebnisse .....                                                     | 58        |
| 4.4.3      | Regressionsanalyse der Bodenwiderstands-Verformungs-Kurven.....      | 60        |
| 4.4.4      | Ansatz „verdrängtes Bodenvolumen“ .....                              | 62        |
| 4.4.5      | Dimensionslose Darstellung der Mobilisierungsfunktion.....           | 64        |
| <b>4.5</b> | <b>Ankerkräfte .....</b>                                             | <b>66</b> |
| <b>4.6</b> | <b>Randfaserdehnungen .....</b>                                      | <b>70</b> |
| <b>4.7</b> | <b>Einfluss der Lagerungsdichte.....</b>                             | <b>76</b> |

|             |                                                                             |            |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4.8</b>  | <b>Einfluss der Wandrauigkeit .....</b>                                     | <b>78</b>  |
| <b>4.9</b>  | <b>Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit .....</b>                        | <b>80</b>  |
| <b>4.10</b> | <b>Zusammenfassung der Ergebnisse .....</b>                                 | <b>83</b>  |
| <b>5</b>    | <b>ERMITTLUNG DES ERDDRUCKS MIT DER INVERSEN FE-METHODE .....</b>           | <b>85</b>  |
| <b>5.1</b>  | <b>Einführung „inverse Problemstellungen“ .....</b>                         | <b>85</b>  |
| <b>5.2</b>  | <b>Versuche anderer Autoren .....</b>                                       | <b>86</b>  |
| 5.2.1       | TSCHEBOTARIOFF (1952) .....                                                 | 86         |
| 5.2.2       | SCHÜRMANN (1997) .....                                                      | 86         |
| 5.2.3       | KREMER (1998) .....                                                         | 87         |
| <b>5.3</b>  | <b>Eigene Versuche .....</b>                                                | <b>88</b>  |
| <b>5.4</b>  | <b>iFEM – inverse Finite-Element-Method .....</b>                           | <b>89</b>  |
| 5.4.1       | Einführung .....                                                            | 89         |
| 5.4.2       | Theorie der inversen Finiten Elemente .....                                 | 91         |
| 5.4.3       | Beispiel: 1D-Fachwerk mit 3 Elementen .....                                 | 93         |
| <b>5.5</b>  | <b>Bestimmung der Erddruckbelastung mit iFEM .....</b>                      | <b>97</b>  |
| 5.5.1       | System .....                                                                | 97         |
| 5.5.2       | Größenordnung der Erddruckbelastung im Modellversuch .....                  | 98         |
| 5.5.3       | Benchmarks: Eingespannter Kragträger .....                                  | 100        |
| 5.5.4       | Mögliche Fehlerquellen .....                                                | 103        |
| 5.5.5       | Parameter der Berechnung .....                                              | 104        |
| <b>5.6</b>  | <b>Ergebnisse der iFEM-Berechnungen .....</b>                               | <b>105</b> |
| 5.6.1       | Erläuterungen .....                                                         | 105        |
| 5.6.2       | Plausibilitätsprüfung .....                                                 | 106        |
| 5.6.3       | Gelenkige Lagerung .....                                                    | 109        |
| 5.6.4       | Einspannung .....                                                           | 112        |
| <b>5.7</b>  | <b>Auswertung der Erddruckresultierenden .....</b>                          | <b>115</b> |
| <b>5.8</b>  | <b>Zusammenfassung der Ergebnisse .....</b>                                 | <b>119</b> |
| <b>6</b>    | <b>BILDBASIERTE AUSWERTUNG DER MODELLVERSUCHE MIT DER PIV-METHODE .....</b> | <b>122</b> |
| <b>6.1</b>  | <b>Einführung .....</b>                                                     | <b>122</b> |
| <b>6.2</b>  | <b>Particle Image Velocimetry (PIV) .....</b>                               | <b>123</b> |

|            |                                                                           |            |
|------------|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>6.3</b> | <b>MatPIV .....</b>                                                       | <b>124</b> |
| <b>6.4</b> | <b>Modellversuche.....</b>                                                | <b>126</b> |
| 6.4.1      | Versuchsprogramm .....                                                    | 126        |
| 6.4.2      | Versuchsaufbau und -parameter.....                                        | 127        |
| 6.4.3      | Genauigkeit der Untersuchungsmethode .....                                | 129        |
| <b>6.5</b> | <b>Ergebnisse .....</b>                                                   | <b>131</b> |
| 6.5.1      | Allgemeines.....                                                          | 131        |
| 6.5.2      | Gelenkige Fußpunktlagerung .....                                          | 132        |
| 6.5.3      | Eingespannte Fußpunktlagerung.....                                        | 136        |
| 6.5.4      | Visuelle Auswertung der Schneebeli-Versuche.....                          | 139        |
| 6.5.5      | Visualisierung von Scherflächen.....                                      | 141        |
| <b>6.6</b> | <b>Zusammenfassung der Ergebnisse .....</b>                               | <b>145</b> |
| <b>7</b>   | <b>NUMERISCHE BERECHUNGEN .....</b>                                       | <b>148</b> |
| <b>7.1</b> | <b>Allgemeines .....</b>                                                  | <b>148</b> |
| <b>7.2</b> | <b>FE-Modellierung .....</b>                                              | <b>149</b> |
| 7.2.1      | Bodenmodell .....                                                         | 149        |
| 7.2.2      | System und Berechnungsparameter .....                                     | 151        |
| <b>7.3</b> | <b>Untersuchungen.....</b>                                                | <b>153</b> |
| 7.3.1      | Umfang der Untersuchungen .....                                           | 153        |
| 7.3.2      | Simulation der Laborversuche .....                                        | 154        |
| 7.3.3      | Visualisierung des Verlaufs der Hauptspannungen in der Bodenfüllung ..... | 160        |
| 7.3.4      | Variation der Wandrauigkeit.....                                          | 162        |
| 7.3.5      | Realitätsnahe Belastung .....                                             | 165        |
| <b>7.4</b> | <b>Zusammenfassung der Ergebnisse .....</b>                               | <b>169</b> |
| <b>8</b>   | <b>ENTWICKLUNG EINER MODELLVORSTELLUNG.....</b>                           | <b>170</b> |
| <b>8.1</b> | <b>Zusammenfassende Analyse der Modellversuche.....</b>                   | <b>170</b> |
| <b>8.2</b> | <b>Mobilisierung des Widerstands in der Bodenfüllung .....</b>            | <b>171</b> |
| 8.2.1      | Unterteilung der Bodenwiderstands-Verformungskurven .....                 | 171        |
| 8.2.2      | Mobilisierung der horizontalen Schubspannungen.....                       | 172        |
| 8.2.3      | Mobilisierung der vertikalen Schubspannungen.....                         | 175        |
| <b>8.3</b> | <b>Analytisches Modell .....</b>                                          | <b>176</b> |
| 8.3.1      | Erläuterungen .....                                                       | 176        |

|            |                                                                                          |            |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 8.3.2      | Einfluss der Wandrauigkeit.....                                                          | 178        |
| 8.3.3      | Ergebnisse .....                                                                         | 179        |
| 8.3.4      | Interpretation der Ergebnisse .....                                                      | 181        |
| 8.3.5      | Vergleich mit den Ergebnissen der Berechnung nach JELINEK .....                          | 185        |
| <b>8.4</b> | <b>Fazit .....</b>                                                                       | <b>189</b> |
| <b>9</b>   | <b>SCHLUSSBETRACHTUNG.....</b>                                                           | <b>190</b> |
| <b>9.1</b> | <b>Zusammenfassung.....</b>                                                              | <b>190</b> |
| <b>9.2</b> | <b>Empfehlungen.....</b>                                                                 | <b>192</b> |
| <b>9.3</b> | <b>Ausblick.....</b>                                                                     | <b>193</b> |
|            | <b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>                                                        | <b>195</b> |
|            | <b>ANHANG A: ERGEBNISSE DER DEHNUNGSMESSUNGEN .....</b>                                  | <b>200</b> |
|            | <b>ANHANG B: ERLÄUTERUNGEN ZUR INVERSEN FE-METHODE .....</b>                             | <b>206</b> |
|            | <b>ANHANG C: EINFLUSS DER PARAMETERWAHL AM BEISPIEL DER „CABLE<br/>FORCE COST“ .....</b> | <b>210</b> |
|            | <b>ANHANG D: ERGEBNISÜBERSICHT ERDDRUCKSPANNUNGEN .....</b>                              | <b>211</b> |