

**Optimierung und Erweiterung der
Parallel-Seismik-Methode
zur Bestimmung der Länge von Fundamentpfählen**

**Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
"doctor rerum naturalium"
(Dr. rer. nat.)
in der Wissenschaftsdisziplin "Geophysik"**

**eingereicht an der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Potsdam
von**

**Diplom-Geophysiker
Ernst Niederleithinger
aus Berlin**

**Eingereicht in Potsdam, den 7. April. 2010
Disputation am 17. September 2010**

**Betreuer: Prof. Dr. Jens Tronicke (Universität Potsdam)
Gutachter: Prof. u. Dir. Dr. Herbert Wiggerhauser (BAM)
Prof. Dr. Christian Grosse (TU München)**

Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....vii

Allgemeinverständliche Zusammenfassung.....ix

English Abstract.....x

1 Einleitung.....1

 1.1 Warum Längenmessung an Fundamentpfählen?.....1

 1.2 Die Parallel-Seismik-Methode.....3

 1.3 Gliederung der Arbeit.....3

2 Bautechnische Grundlagen.....4

 2.1 Pfähle.....4

 2.1.1 Pfahlgründungen.....4

 2.1.2 Moderne Betonpfahltypen.....5

 2.1.3 Bemessung von Pfahlgründungen.....7

 2.1.4 Pfahlbeton.....8

 2.2 Baugrund.....12

 2.2.1 Typisierung von Böden.....12

 2.2.2 Boden- und felsmechanische Parameter.....14

 2.2.3 Bodendynamische Kennwerte.....16

3 Die Parallel-Seismik-Methode.....17

 3.1 Kurzbeschreibung.....17

 3.2 Historie und Stand der Technik.....17

 3.3 Konventionelle Auswerteverfahren.....21

 3.3.1 Die Knickpunktmethode.....21

 3.3.2 Korrekturwert nach Liao.....22

 3.3.3 Weitere Verfahren.....23

 3.4 Bisher publizierte Einsatzbereiche24

 3.5 Messtechnisch ähnliche Methoden.....25

 3.5.1 Vertical Seismic Profiling (VSP).....25

 3.5.2 Downhole-Seismik (DH).....26

 3.5.3 Vergleich der Methoden.....28

4 Ausbreitung elastischer Wellen.....29

 4.1 Physikalische Grundlagen.....29

 4.1.1 Die Wellengleichung.....29

 4.1.2 Wellenausbreitung im homogenen Halbraum.....31

 4.1.3 Reflexion und Brechung.....33

 4.1.4 Beugung (Diffraktion).....39

4.1.5	Streuung.....	39
4.1.6	Inhomogenität, Anisotropie und Dämpfung.....	39
4.2	Simulation der elastischen Wellenausbreitung.....	40
4.3	Wellenausbreitung in pfahlartigen Strukturen.....	41
4.3.1	Stabwellen.....	41
4.3.2	Wellenausbreitung im Pfahl und Boden.....	42
4.3.3	Wellengeschwindigkeit im Pfahl.....	45
4.3.4	Seitliche Grenzflächen.....	49
4.3.5	Pfahlfuß.....	50
4.3.6	Kopplung Pfahl-Boden.....	51
4.3.7	Einfluss von Bewehrung und Bohrloch.....	52
5	Parameterstudien.....	53
5.1	Geometrie.....	54
5.1.1	Bohrlochlänge.....	54
5.1.2	Abstand Pfahl-Bohrloch.....	55
5.1.3	Pfahlradius.....	57
5.1.4	Inklination.....	58
5.2	Pfahlparameter.....	60
5.2.1	Betonqualität.....	60
5.2.2	Materialänderung im Pfahl.....	61
5.2.3	Querschnittsänderung.....	64
5.3	Bodenparameter.....	69
5.3.1	Wellengeschwindigkeit im Boden.....	69
5.3.2	Ungesättigte Bodenzone und eingelagerte Weichschichten.....	70
5.3.3	Gründung im Fels.....	75
5.4	Zusammenfassung und Diskussion der Parameterstudien.....	79
6	Entwicklung und Test eines verbesserten Auswerteverfahrens.....	81
6.1	Laufzeitberechnung.....	82
6.1.1	Näherungsweise Berechnung.....	82
6.1.2	Berücksichtigung des Pfahlradius.....	83
6.1.3	Berücksichtigung von Bohrloch – bzw. Pfahlneigung.....	84
6.1.4	Berücksichtigung von Schichtgrenzen.....	85
6.2	Automatisierte Auswertung (Inversion).....	88
6.2.1	Levenberg-Marquardt-Verfahren.....	91
6.2.2	Simulated Annealing.....	94
6.3	Vergleich der Methoden.....	98
6.3.1	Daten mit Messfehlern.....	98

6.3.2 Bohrlochneigung.....	101
6.3.3 Bodenschichtung.....	103
6.3.4 Anzahl der Sensoren/Bohrlochtiefe.....	106
6.3.5 Bewertung der Inversionsmethoden.....	109
7 Messung und Datenaufbereitung.....	110
7.1 Messtechnik.....	110
7.1.1 Normale und inverse Anordnung.....	110
7.1.2 Quellen, Trigger.....	110
7.1.3 Empfänger.....	113
7.1.4 Datenerfassung.....	115
7.1.5 Einrichtung des Bohrlochs.....	117
7.2 Datenaufbereitung.....	117
7.2.1 Datenverarbeitung.....	117
7.2.2 Ersteinsatzbestimmung.....	119
8 Messbeispiele.....	122
8.1 Referenzpfähle auf dem BAM-TTS.....	122
8.1.1 Messbeispiel Pfahl B4.....	122
8.1.2 Auswertung aller Messungen.....	124
8.1.3 Scherwellenmessungen.....	126
9 Alternativmethoden.....	129
9.1 Pfahlintegritätsprüfung.....	129
9.2 Ultraseismik (Mehrkanal-Pfahlintegritätsprüfung).....	131
9.3 Bohrlochradar.....	131
9.4 Bohrlochgeophysik.....	133
9.5 Induktionsmethode	134
9.6 Mise à la Masse.....	136
9.7 Methodenvergleich und Anwendungsmatrix.....	136
10 Schlussfolgerungen und Ausblick.....	138
11 Zusammenfassung.....	142
Literaturverzeichnis.....	144
Abbildungsverzeichnis.....	150
Tabellenverzeichnis.....	160
Symbolverzeichnis.....	161
Abkürzungsverzeichnis.....	163

Anhänge.....	Anh.-1
A Elastische Parameter und seismische Geschwindigkeiten.....	Anh.-3
B Simulation der elastischen Wellenausbreitung.....	Anh.-4
B.1 CEFIT.....	Anh.-4
B.2 Raytracing.....	Anh.-8
B.3 Test und Vergleich der vorgestellten Verfahren.....	Anh.-11
C Steuerprogramm für das BAM Parallel-Seismik Messsystem.....	Anh.-17
C.1 Modul Messung.....	Anh.-17
C.2 Modul Bearbeitung.....	Anh.-17
C.3 Modul Auswertung.....	Anh.-20
D Testgelände Technische Sicherheit (TTS) Horstwalde.....	Anh.-21
E Praxisbeispiele.....	Anh.-26
E.1 Uferspundwände Berlin.....	Anh.-26
E.2 Bohrpfahlwand Grimma.....	Anh.-30
E.3 Machbarkeitsstudie Hangstützmauer.....	Anh.-35
F Publikationsliste.....	Anh.-40
G Lebenslauf.....	Anh.-43