

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Allgemeines .....	1
1.2	Problemstellung .....	3
1.3	Zielsetzung .....	4
1.4	Aufbau der Arbeit.....	4
<b>2</b>	<b>Stand der Technik und Forschung</b> .....	<b>6</b>
2.1	<b>Notwendigkeit der Setzungsminimierung</b> .....	<b>6</b>
2.1.1	Einfluss der Setzungen auf die anstehende Bebauung .....	6
2.1.2	Einfluss der Setzungen auf die Qualität und Lebensdauer der Tunnelröhre .....	7
2.2	<b>Datenaufnahme und -auswertung bei modernen Flüssigkeits- schildvortrieben</b> .....	<b>9</b>
2.2.1	Aufnahme der Vortriebsdaten.....	9
2.2.2	Genauigkeit der Messinstrumente.....	11
2.2.3	Aufnahme und Genauigkeit der Vermessungsdaten .....	15
2.2.4	Datenauswertung .....	17
2.3	<b>Verfahren zur Berechnung der Setzungen</b> .....	<b>17</b>
2.3.1	Klassische Verfahren zur Berechnung der Setzungen .....	17
2.3.2	Entwicklungsansätze für Verfahren zur möglichen vortriebssynchronen Berechnung der Setzungen .....	21
2.3.3	Mängel der bisherigen Verfahren und Entwicklungsansätze zur Berechnung der Setzungen.....	23
2.4	<b>Schlussfolgerung</b> .....	<b>25</b>
<b>3</b>	<b>Theoretische Betrachtung der Fuzzy-Logik und der künstlichen neuronalen Netzwerke</b> .....	<b>26</b>
3.1	<b>Fuzzy-Logik</b> .....	<b>26</b>
3.1.1	Einleitung .....	26
3.1.2	Grundlagen der Fuzzy-Theorie.....	26
3.1.3	Fuzzy-Modelltypen .....	32
3.1.4	Bisherige Anwendungen der Fuzzy-Logik im Tunnelbau.....	33
3.1.5	Vor- und Nachteile der Fuzzy-Logik .....	35

<b>3.2</b>	<b>Künstliche neuronale Netze (KNN)</b> .....	<b>36</b>
3.2.1	Einleitung.....	36
3.2.2	Grundlagen der KNN.....	36
3.2.3	Bisherige Anwendungen der KNN im Tunnelbau.....	40
3.2.4	Vor- und Nachteile der KNN.....	42
<b>3.3</b>	<b>Neuro-Fuzzy Konzepte</b> .....	<b>42</b>
<b>3.4</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>44</b>
<b>4</b>	<b>Analyse der Interaktion zwischen Schildvortrieb und Setzungen</b> .....	<b>46</b>
<b>4.1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>46</b>
<b>4.2</b>	<b>Analyse der Setzungsursachen und Einflussfaktoren</b> .....	<b>46</b>
4.2.1	Allgemeines .....	46
4.2.2	Setzungsursachen.....	48
4.2.3	Einflussfaktoren .....	54
<b>4.3</b>	<b>Analyse des Setzungsverlaufs eines Punktes an der Geländeoberfläche</b> ..	<b>58</b>
4.3.1	Aufteilung der Setzungsbereiche .....	58
4.3.2	Anfang und Ende der Setzungsbewegung.....	59
<b>4.4</b>	<b>Analyse der Setzungsmulde quer zur Tunnelachse</b> .....	<b>60</b>
4.4.1	Funktionale Beschreibung der Setzungsmulde.....	61
4.4.2	Bestimmung des Flexionspunktes.....	61
4.4.3	Vergleich der Berechnungsverfahren.....	62
<b>4.5</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>64</b>
<b>5</b>	<b>Neuer Ansatz zu einer neuro-fuzzy-basierten Prognose der Setzungen</b> .....	<b>66</b>
<b>5.1</b>	<b>Grundkonzept</b> .....	<b>66</b>
5.1.1	Aufbau .....	66
5.1.2	Details zur Prognose des Setzungsverhaltens und zur adaptiven Verbesserung der Wissensbasen .....	68
5.1.3	Begrenzung der Anzahl der Regeln .....	70
5.1.4	Vorgehen zur Entwicklung der Fuzzy-Systeme.....	70
<b>5.2</b>	<b>Definition der maßgebenden Eingangsparameter</b> .....	<b>71</b>
5.2.1	Definition der Eingangsparameter zur Beschreibung der Setzungsursachen vor Passage des Schneidrades.....	71
5.2.2	Definition der Eingangsparameter zur Beschreibung der Setzungsursachen nach Passage des Schneidrades.....	77
5.2.3	Definition der Eingangsparameter zur Beschreibung der übergeordneten Einflussfaktoren .....	83
5.2.4	Einfluss des Abstandes zwischen der Schildmaschine und dem betrachteten Punkt .....	85
5.2.5	Zusammenfassung und Struktur des Systems.....	85

<b>5.3</b>	<b>Definition der Fuzzy-Mengen .....</b>	<b>90</b>
<b>5.4</b>	<b>Entwicklung der Regelbasen .....</b>	<b>94</b>
5.4.1	Systeme zur Prognose der Setzungen.....	94
5.4.2	Optionale Subsysteme zur Berücksichtigung der Bodenmehrentnahmen.....	95
<b>5.5</b>	<b>Softwaretechnische Umsetzung des neuen Ansatzes zur Setzungsberechnung.....</b>	<b>96</b>
5.5.1	Entwicklungsumgebung MATLAB .....	96
5.5.2	Modellierung der fuzzy-logischen Auswertung der Prozessdaten .....	96
5.5.3	Modellierung der adaptiven Verbesserung der Wissensbasen mit einem KNN .....	97
5.5.4	Modellierung der Anpassung des Verlaufs der Setzungsmulde .....	104
5.5.5	Programmablauf .....	104
<b>6</b>	<b>Validierung des neuen Ansatzes zur Setzungsprognose anhand von Praxisdaten .....</b>	<b>109</b>
<b>6.1</b>	<b>Referenzprojekte .....</b>	<b>109</b>
6.1.1	Pannerdenschkanaltunnel .....	109
6.1.2	Sophiaspoortunnel.....	112
<b>6.2</b>	<b>Aufbereitung der Prozessdaten .....</b>	<b>114</b>
6.2.1	Verknüpfung der unterschiedlichen Datengruppen .....	114
6.2.2	Reduzierung des Fehleranteils.....	114
6.2.3	Anzahl der vorhandenen Datensätze und Testablauf .....	115
<b>6.3</b>	<b>Vergleichsrechnungen – Prognose der verursachten Setzungen .....</b>	<b>116</b>
6.3.1	Testkriterien.....	116
6.3.2	Test der manuell erstellten Wissensbasen.....	116
6.3.3	Test der schrittweisen adaptiven Verbesserung der Wissensbasen durch ein KNN .....	120
6.3.4	Test des Systems unter Berücksichtigung der Bodenmehrentnahmen .....	127
6.3.5	Test der Übertragbarkeit auf vergleichbare Projekte.....	130
6.3.6	Überprüfung der Anpassung der funktionalen Beschreibung des Setzungsverlaufs quer zur Tunnelachse.....	134
<b>6.4</b>	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse .....</b>	<b>135</b>
<b>7</b>	<b>Empfehlungen zum Praxiseinsatz und Ausblick .....</b>	<b>137</b>
<b>7.1</b>	<b>Empfehlungen zum Praxiseinsatz .....</b>	<b>137</b>
<b>7.2</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>139</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>141</b>
<b>9</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>145</b>
<b>10</b>	<b>Symbole und Abkürzungen .....</b>	<b>154</b>

<b>11</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>159</b>
11.1	<b>Fehlerrechnung zur abschnittswisen zeitlichen Linearisierung des Setzungsverlaufs .....</b>	<b>159</b>
11.2	<b>Beispiel zur Arbeitsweise des Fuzzy-Systems.....</b>	<b>160</b>
11.3	<b>Darstellung der entwickelten Regelbasen .....</b>	<b>165</b>
11.3.1	Regelbasis zur Berechnung der vorauselenden Setzungen .....	165
11.3.2	Regelbasis zu Berechnung der nachlaufenden Setzungen .....	171
11.3.3	Regelbasis zur Bestimmung der Bodenmehrentnahmen.....	176
11.3.4	Regelbasis zur Berechnung der Ortsbruststützung .....	178
11.3.5	Darstellung des Programmcodes mit Struktogrammen .....	179