Philipp Nellessen

Vortriebssynchrone Prognose der Setzungen bei Flüssigkeitsschildvortrieben auf Basis der Auswertung der Betriebsdaten mit Hilfe eines Neuro-Fuzzy-Systems



Vortriebssynchrone Prognose der Setzungen bei Flüssigkeitsschildvortrieben auf Basis der Auswertung der Betriebsdaten mit Hilfe eines Neuro-Fuzzy-Systems

Dissertation

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

der

Fakultät für Bauingenieurwesen

der

Ruhr-Universität Bochum

von

Philipp Nellessen

 Berichter: em. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. B. Maidl, Ruhr-Universität Bochum Lehrstuhl für Bauverfahrenstechnik, Tunnelbau und Baubetrieb
 Prof. Dr.-Ing. D. Hartmann, Ruhr-Universität Bochum Lehrstuhl für Ingenieurinformatik im Bauwesen

Eingereicht am: 11.05.2005

Tag der mündlichen Prüfung: 23.08.2005

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2005 Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2005 ISBN 3-86537-589-8

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2005 Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen Telefon: 0551-54724-0 Telefax: 0551-54724-21 www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen. 1. Auflage, 2005

Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 3-86537-589-8

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Bauverfahrenstechnik, Tunnelbau und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum und wurde von der dortigen Fakultät für Bauingenieurwesen als Dissertation angenommen.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. B. Maidl für die wissenschaftliche Begleitung dieser Arbeit, für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die Freiheiten während meiner sehr lehrreichen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter.

Herrn Prof. Dr.-Ing. D. Hartmann danke ich für das große wissenschaftliche Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Koreferats. Seine konstruktiven Verbesserungsvorschläge, Ratschläge und Anregungen waren mir sehr hilfreich bei der Abfassung der Dissertation.

Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Stolpe danke ich sehr herzlich für sein Interesse an der Arbeit und seine freundliche Bereitschaft zur Übernahme der Aufgaben des fachfremden Prüfers.

Weiterhin danke ich allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für ihre kollegiale Unterstützung. Insbesondere möchte ich hier Herrn K. Werkhäuser erwähnen. Daneben möchte ich den Herren G. Vollmann und H.-B. Einck sowie den ehemaligen Mitarbeitern V. Stein, F. Abel und J. Berg meinen Dank aussprechen.

Mein besonderer Dank gilt ebenfalls Frau B. Wagner für ihre unermüdlichen Rechtschreibkorrekturen, die diese Arbeit erst in eine lesbare Form brachten. Daneben danke ich den Herren G. Kaufhold und H. Schmidt sowie den studentischen Hilfskräften am Lehrstuhl für ihre Unterstützung.

Danken möchte ich auch meiner Familie sowie meiner Freundin Britta, die mich immer unterstützt und begleitet haben und mir stets geduldig zur Seite standen, so dass ich den notwendigen Rückhalt finden konnte.

Bochum, im August 2005

Philipp Nellessen

Britta gewidmet.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Problemstellung	3
1.3	Zielsetzung	4
1.4	Aufbau der Arbeit	4
2	Stand der Technik und Forschung	6
2.1	Notwendigkeit der Setzungsminimierung	6
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	Datenaufnahme und -auswertung bei modernen Flüssigkeits- schildvortrieben	9
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	Verfahren zur Berechnung der Setzungen	17
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	Schlussfolgerung	25
3	Theoretische Betrachtung der Fuzzy-Logik und der künstlichen neuronalen Netzwerke	. 26
3.1	Fuzzy-Logik	26
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

3.2	Künstliche neuronale Netze (KNN)	. 36
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
3.3	Neuro-Fuzzy Konzepte	. 42
3.4	Zusammenfassung	. 44
4	Analyse der Interaktion zwischen Schildvortrieb und	
	Setzungen	. 46
4.1	Einleitung	. 46
4.2	Analyse der Setzungsursachen und Einflussfaktoren	. 46
4.2.1	Allgemeines	46
4.2.2	Setzungsursachen	48
4.2.3	Einflussfaktoren	54
4.3	Analyse des Setzungsverlaufs eines Punktes an der Geländeoberfläche.	. 58
4.3.1	Aufteilung der Setzungsbereiche	58
4.3.2	Anfang und Ende der Setzungsbewegung	59
4.4	Analyse der Setzungsmulde quer zur Tunnelachse	. 60
4.4.1	Funktionale Beschreibung der Setzungsmulde	61
4.4.2	Bestimmung des Flexionspunktes	61
4.4.3	Vergleich der Berechnungsverfahren	62
4.5	Zusammenfassung	. 64
5	Neuer Ansatz zu einer neuro-fuzzy-basierten Prognose der	
•	Setzungen	. 66
5 1	Grundkonzent	66
511		. 00
5.1.2	Details zur Prognose des Setzungsverhaltens und zur adaptiven Verbesserung der	00
540	Wissensbasen	68
5.1.3	Begrenzung der Anzahl der Regeln	70
5.1.4		70
5.2	Definition der maßgebenden Eingangsparameter	. 71
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

5.3	Definition der Fuzzy-Mengen	90
5.4	Entwicklung der Regelbasen	94
5.4.1	Systeme zur Prognose der Setzungen	94
5.4.2	Optionale Subsysteme zur Berücksichtigung der Bodenmehrentnahmen	95
5.5	Softwaretechnische Umsetzung des neuen Ansatzes zur	
	Setzungsberechnung	96
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
6	Validierung des neuen Ansatzes zur Setzungsprognose	
	anhand von Praxisdaten	109
6.1	Referenzprojekte	109
6.1.1	Pannerdenschkanaltunnel	109
6.1.2	Sophiaspoortunnel	112
6.2	Aufbereitung der Prozessdaten	114
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
6.3	Vergleichsrechnungen – Prognose der verursachten Setzungen	116
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	l120
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	3 134
61	Zusammonfassung der Ergebnisse	125
0.4		155
7	Empfehlungen zum Praxiseinsatz und Ausblick	137
7.1	Empfehlungen zum Praxiseinsatz	137
7.2	Ausblick	139
8	Zusammenfassung	141
9	Literatur	145
10	Symbole und Abkürzungen	154

11	Anhang	159
11.1	Fehlerrechnung zur abschnittsweisen zeitlichen Linearisierung des Setzungsverlaufs	159
11.2	Beispiel zur Arbeitsweise des Fuzzy-Systems	160
11.3	Darstellung der entwickelten Regelbasen	165
11.3.1	Regelbasis zur Berechnung der vorauseilenden 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

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Beim bergmännischen Tunnelvortrieb in Böden mit nur geringer Standfestigkeit, mit und ohne Grundwasser, hat der maschinelle Tunnelbau mit Flüssigkeitsschilden eine große Bedeutung. Auch in schwierigen geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen (geringe Überdeckung, hoher Wasserdruck, hohe Durchlässigkeit, geringe Tragfähigkeit des Baugrundes, etc.) lassen sich mit Flüssigkeitsschilden heute wirtschaftlich Tunnel auffahren.

Der Tunnelvortrieb im nicht standfesten Boden erfordert dabei zu jedem Zeitpunkt eine Abstützung des anstehenden Baugrunds. Bei Flüssigkeitsschilden wird dies durch die Stützung der Ortsbrust mit einer druckbeaufschlagten Flüssigkeit realisiert, die gleichzeitig Transportmedium für den gelösten Boden ist. Hierfür wird in der Regel eine Tonsuspension verwendet. Zusätzlich wird der beim Vorschub entstehende Ringspalt kontinuierlich mit einem ebenfalls druckbeaufschlagten Medium, in der Regel einem zement- oder flugaschehaltigen Mörtel, verpresst (Abbildung 1.1).



Abbildung 1.1: Aufbau eines Hydroschildes

Zahlreiche technische Innovationen der letzten Jahrzehnte haben zu einer signifikanten Erweiterung des Einsatzspektrums der Schildmaschinen geführt. Aufgrund des Trends zu einer immer intensiveren Nutzung des unterirdischen Raumes existiert zudem gerade im urbanen Raum ein hoher Bedarf an Tunnelbauwerken, die in zunehmendem Maße maschinell aufgefahren werden.

Durch die positiven Erfahrungen in der Vergangenheit ist derzeit eine Entwicklung zu Tunnelvortrieben mit immer größeren Schilddurchmessern, geringeren Überdeckungen und in gering tragfähigen Böden unter teilweise sensibler Bebauung zu verzeichnen (z.B. Metro Amsterdam Projekt Noord/Zuidlijn, Nord-Süd Stadtbahn Köln, Zimmerbergtunnel Zürich,...).

Die Anforderungen an die Prozesssteuerung und -überwachung hinsichtlich einer effizienten Betriebsweise, insbesondere im Hinblick auf die verursachten Setzungen bzw. die damit verbundene Beeinträchtigung vorhandener Bebauung und Infrastruktureinrichtungen, haben sich somit fundamental erhöht [71].

Das Setzungsverhalten an der Oberfläche stellt heutzutage das maßgebende Beurteilungskriterium für die gesamte Qualität des Tunnelbaus dar [2],[6],[13],[47],[56]. Es wird als Qualitätsmaßstab für die Ausführung der Vortriebsarbeiten, von der Ortsbruststützung, der Steuerung, der Ringspaltverpressung bis hin zum Einbau der Tübbingsicherung und den Konsolidierungserscheinungen des Bodens, verstanden [47]. Maximal zulässige Gesamtsetzungen werden vorab vertraglich festgelegt.

Selbst eine geringe Abnahme der Qualität des Bohrprozesses und eine damit verbundene Zunahme der Setzungen kann bereits zu inakzeptablen Schäden der umgebenden Bebauung führen [49]. Vergrößerte Setzungen führen darüber hinaus zu einer größeren Belastung der Tunnelauskleidung und damit zu erhöhten Reparatur- und Wartungskosten sowie einer verkürzten Lebenszeit der Tunnelröhre. Die weitestgehende Vermeidung von Setzungen würde somit zu einer deutlich kostengünstigeren Bauweise führen.

Verursacht werden die Bodenbewegungen bzw. Setzungen durch Spannungsveränderungen, Auflockerungen und Störungen der natürlichen Lagerungsverhältnisse im Baugrund, hauptsächlich an der Ortsbrust und am Schildschwanz. Die Betriebsweise, die Kontrolle des Stützdrucks, die Bodenmehr- und -minderentnahmen, die Steuerung des Überschnitts, die Vortriebsgeschwindigkeit, die Abweichungen von der Solltrasse, notwendige Steuerbewegungen sowie Druck und Volumen der Ringspaltverpressung haben entscheidenden Einfluss.

Schlüsselstellen zur Vermeidung der Setzungen sind die Ortsbruststützung und die Ringspaltverpressung. Zum einen werden die Setzungen hier in der Regel maßgeblich verursacht, zum anderen kann die Interaktion zwischen Schildvortrieb und Bodenbewegung hier aktiv gesteuert werden. Bei einer adäquaten, an die jeweiligen Randbedingungen angepassten Steuerung dieser Schlüsselstellen können Setzungen weitestgehend vermieden und bereits erzeugte Setzungen durch Anpassung der Ringspaltverpressung zumindest teilweise wieder kompensiert werden (vgl. [5],[112]).

Die zur Verminderung der vortriebsbedingten Setzungen maßgebliche Prozesssteuerung von Flüssigkeitsschilden basiert weitestgehend auf den manuellen Einstellungen des Schildfahrers. Der Einfluss der Qualität der Vortriebsarbeiten kann bei gleicher Geologie Setzungsunterschiede zwischen dem Faktor 2,5 und 100 ausmachen wie in [109] wiedergegebene Erfahrungen unterschiedlicher Projekte zeigen. Der Schildfahrer muss die Maschine dabei in der Regel ohne detaillierte Kenntnis der situationsspezifischen Randbedingungen, basierend auf seinem impliziten Prozesswissen, seiner Intuition, Erfahrung und fachlicher Qualifikation, an die wechselnden geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse anpassen.

1.2 Problemstellung

Bezüglich der Interaktion zwischen Schildvortrieb und Bodenbewegungen bzw. den verursachten Setzungen an der Oberfläche, liegen im Tunnel in der Regel keine Informationen vor. Auch bei der Bauleitung an der Geländeoberfläche liegen die Ergebnisse der Setzungsmessungen aufgrund der üblichen manuellen Aufnahme der Messwerte erst deutlich zeitverzörgert vor.

Aufgrund der mit der Einrichtung von Setzungsmesspunkten verbundenen Kosten, den damit verbundenen großen Abständen zwischen den Setzungsmesspunkten - außerhalb von Messquerschnitten sind sie in der Regel in einem Raster von 25 bis 50 m, je nach Zugänglichkeit der Oberfläche aber auch mit deutlich größeren Abständen angeordnet - und den zeitlichen Abständen zwischen den Messungen, würde die alleinige zeitnahe Übertragung der Messwerte dem Personal vor Ort auch keine hinreichenden Informationen zur Anpassung der Maschinensteuerung liefern.

Zur Verbesserung der Prozesssteuerung im Hinblick auf die Minimierung der Setzungen ist es daher erforderlich, die verursachte Setzungsmulde basierend auf den vor Ort verfügbaren Daten - den aufgezeichneten Prozessdaten - vortriebsbegleitend zu berechnen, um so die potentiellen Auswirkungen des Vortriebs auf die Umgebung unmittelbar anzeigen zu können.

Die gängigen Verfahren zur Berechnung der Setzungen sind bisher nicht für eine solche vortriebsbegleitende Berechnung in Echtzeit ausgelegt. Hinsichtlich der Anforderungen einer vortriebssynchronen Prognose der Setzungen und unter Berücksichtigung der bauverfahrenstechnischen Einflüsse sind daher Weiterentwicklungen der Berechnungsverfahren erforderlich. Dabei ergeben sich folgende Probleme:

- Das Setzungsverhalten ist hochgradig nicht linear, zeitabhängig und von einer Vielzahl von Parametern abhängig. Unterschiedliche Setzungsursachen und Einflussfaktoren überlagern und beeinflussen sich gegenseitig.
- Die Interaktion zwischen den Bodendeformationen und dem Vortriebsgeschehen sowie die Phänomene und Mechanismen der vortriebsbedingten Bodenbewegungen sind deterministisch noch nicht ausreichend geklärt [34]. Die Setzungsbewegungen können daher nicht vollständig mathematisch exakt modelliert werden, sondern lassen sich oftmals nur vage beschreiben, was bei der Modellfindung zu berücksichtigen ist.
- Sowohl die Setzungsursachen als auch die f
 ür das Setzungsverhalten maßgebenden projekt- und situationspezifischen Randbedingungen lassen sich quantitativ nicht immer eindeutig erfassen. Insbesondere die im Projektverlauf variierenden Bodeneigenschaften k
 önnen messtechnisch nur unvollst
 ändig und ungenau erfasst werden und erfordern eine Modellierung, die diese Unsch
 ärfe ber
 ücksichtigt.
- Wichtige, das Setzungsverhalten beeinflussende Parameter (z.B. der Einfluss der Penetration der Bentonitsuspension oder des Verpressmediums, die Maschinenabnutzung, die im Projektverlauf zunehmende Effektivität der Vortriebsmannschaft, aber auch Störzonen, Hindernisse, etc.), können teilweise gar nicht erfasst werden und erfordern daher eine empirische Anpassung. Das heißt, dass eine vortriebsbe-

gleitende dynamische Anpassung des Berechnungsverfahrens an die gemessenen Setzungsdaten notwendig ist.

Deterministische Konzepte sind aufgrund dieser Probleme zur Verarbeitung der Prozessdaten und zur Prognose des Setzungsverhaltens nicht prädestiniert, da die Modellierung des Setzungsverhaltens bzw. die Kopplung der unterschiedlichen Parameter mit scharfen quantitativen Regeln oder Ja/Nein-Entscheidungen nicht möglich ist bzw. aufgrund der Komplexität des Problems zu einem zu umfangreichen Regelkonzept führen würde. Auch stochastische Verfahren bieten sich aufgrund der zu treffenden Annahmen hinsichtlich des Modells, der Verteilung der Variablen, der notwendigen Unabhängigkeit der unterschiedlichen Einflüsse und des in der Regel nur unzureichend vorhandenen statistischen Datenmaterials zur Abschätzung der Modellparameter nicht an.

1.3 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es daher, ein Verfahren zu entwickeln, dass es erlaubt, die durch den Tunnelvortrieb verursachten Setzungen, basierend auf den aufgenommenen Prozessdaten, vortriebssynchron zu prognostizieren.

Vor dem Hintergrund der erwähnten Schwierigkeiten der deterministischen oder stochastischen Erfassung der Interaktion zwischen Vortriebsprozess und Bodenbewegungen, den damit verbundenen Schwierigkeiten hinsichtlich einer mathematischen Formulierung oder stochastischen Modellierung und unter Berücksichtigung des in der Praxis vorhandenen Fachwissens bezüglich der Setzungsursachen bietet sich hierbei an, auf die Möglichkeiten der Fuzzy-Logik zurückzugreifen. Im Verbund mit künstlichen Neuronalen Netzwerken ist es zudem möglich, eine adaptive Verbesserung der Wissensbasis, basierend auf der in situ aufgezeichneten Interaktion zwischen dem Vortriebsprozess und den Bodenbewegungen, zu realisieren.

Die Möglichkeiten dieser Techniken für den Einsatz zur vortriebsbegleitenden Setzungsprognose soll daher aufgezeigt und ein Verfahren zur Setzungsprognose entwickelt werden.

Abschließend soll das entwickelte Verfahren anhand aufgezeichneter Daten zweier Referenzprojekte getestet, seine Praxistauglichkeit überprüft und Empfehlungen für den zukünftigen Einsatz in der Praxis im Rahmen der Verbesserung der Prozesssteuerung gegeben werden.

1.4 Aufbau der Arbeit

Als erster Schritt nach der Einleitung wird in Kapitel zwei der Stand der Technik und Forschung bei Schildvortrieben aufgezeigt. Dabei wird zunächst die Notwendigkeit der Setzungsminimierung bzw. die Einflüsse der Setzungen auf die Bebauung und die Tunnelröhre erläutert. Zudem werden die Datenaufnahme sowie die unterschiedlichen Messsysteme moderner Flüssigkeitsschilde und die dazugehörige Datenauswertung erklärt. Im Anschluss daran werden die bisherigen Verfahren (empirische, analytische und numerische) zur Berechnung der Setzungen sowie neue Entwicklungsansätze für mögliche vortriebssynchrone Berechnungsverfahren vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung zur Prognose der Setzungen auf Basis der aufgezeichneten Prozessdaten bewertet. Hierbei werden die Mängel der bisherigen Verfahren sowie die sich daraus ergebenden Anforderungen an zukünftige Prognosesysteme aufgezeigt.

Die theoretische Betrachtung der Fuzzy-Logik, der künstlichen neuronalen Netzwerke sowie der Kombination der beiden Techniken erfolgt in Kapitel drei. Dabei werden zunächst die Grundlagen erklärt. Anschließend werden bisherige Anwendungen im Bereich Tunnelbau erläutert und die jeweiligen Gründe für die Wahl der entsprechenden Technik verdeutlicht. Abschließend werden die Vor- und Nachteile der jeweiligen Technik und die Vorteile, die sich aus ihrer Kombination ergeben, aufgeführt und im Rahmen der Zusammenfassung vor dem Hintergrund der hiesigen Aufgabenstellung bewertet. Daraus leitet sich die Wahl des hier eingesetzten Systems ab.

Mit der Analyse des Setzungsverhaltens liefert Kapitel vier die Grundlage zum Verständnis der Interaktion zwischen Schildvortrieb und Bodenbewegungen. Hier wird detailliert auf die unterschiedlichen Ursachen für Setzungen und die Faktoren, die die Größe der Setzungen beeinflussen, sowie den Verlauf der Setzungen längs und quer zur Tunnelachse eingegangen.

Im fünften Kapitel wird der neue Ansatz zur vortriebssynchronen Prognose der Setzungen entwickelt. Dabei wird zunächst ein Grundkonzept für ein Prozessmodell erarbeitet. Anschließend werden aussagekräftige Eingangsparamter auf Basis der aufgenommenen Prozessdaten zur Beschreibung der in Kapitel vier gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich des Setzungsverhaltens identifiziert und in ein Regelkonstrukt umgesetzt. Die Entwicklung der Wissensbasen zur Beschreibung der Interaktion zwischen Vortrieb und Setzungen wird dabei ausführlich erläutert. Darüber hinaus wird der neue Ansatz in ein Programm zur vortriebssynchronen Prognose der Setzungen umgesetzt.

In Kapitel sechs erfolgt die Validierung des neuen Verfahrens zur Setzungsprognose anhand der aufgezeichneten Prozessdaten zweier Referenzprojekte. Anhand der vorhandenen Daten werden die entwickelten Wissensbasen zur Berechnung der Setzungen sowie die Möglichkeiten der adaptiven Anpassung der Wissensbasen mit künstlichen neuronalen Netzwerken überprüft.

Abschließend werden in Kapitel sieben Empfehlungen zum Praxiseinsatz des neuen Verfahrens zur vortriebssynchronen Prognose der Setzungen und ein Ausblick zu möglichen Weiterentwicklungen gegeben.

Die Erkenntnisse der Arbeit werden in Kapitel acht zusammengefasst.

2 Stand der Technik und Forschung

2.1 Notwendigkeit der Setzungsminimierung

Die Notwendigkeit der Setzungsminimierung ergibt sich, wie im Folgenden gezeigt, zum einen aus den durch die Setzungen verursachten Schäden anstehender Gebäude und Infrastruktureinrichtungen, zum anderen aus der mit hohen Setzungen einhergehenden geringeren Qualität und Lebensdauer der Tunnelröhre.

2.1.1 Einfluss der Setzungen auf die anstehende Bebauung

Den Einfluss der durch den Tunnelvortrieb verursachten Setzungen auf anstehende Bebauung einer vereinfachten zweidimensionalen Betrachtung zeigt die Abbildung 2.1. Bei Gebäuden ist das Ausmaß der Schäden in erster Linie von den Setzungsunterschieden, d.h. der Schiefstellung bzw. Winkelverdrehung in Längs- und Querrichtung, der Dehnung des Gebäudes sowie von seiner Konstruktion, der Steifigkeit, der Gründungsart und der Setzungsgeschwindigkeit abhängig. Untersuchungen in [54] zeigten weiter, dass bei einer dreidimensionalen Betrachtung auch der Winkel zwischen Gebäude- und Tunnelachse bzw. die Stellung der Wände Einfluss auf die potentielle Beschädigung hat. Bei Leitungen hängt das Ausmaß der Schädigung neben den Setzungen vom Durchmesser der Leitung, der Verbindung der Rohrstücke, dem Material sowie der Bettung ab [12].



Abbildung 2.1: Deformation eines Gebäudes aufgrund einer durch einen Tunnelvortrieb verursachten Setzungsmulde (zweidimensionale Betrachtung) nach [73]

Eine einfache Abschätzung der durch Tunnelvortriebe verursachten möglichen Schäden an der Bebauung erlaubt die folgende, von Lake et al. empirisch entwickelte Tabelle (Tabelle 2.1). Maßgebend sind dabei die maximalen Setzungen sowie die maximale Neigung des Gebäudes, die sich aus dem Verlauf der Setzungsmulde ergibt.

Risiko- klasse	Maximale Neigung [-]	Maximale Setzung [mm]	Risikobeschreibung
1	< 1/500	< 10	oberflächliche Schäden: unwahrscheinlich
2	1/500 – 1/200	10 – 50	oberflächliche Schäden: <i>möglich</i> Konsequenz für Standsicherheit: <i>keine</i>
3	1/200 – 1/50	50 – 75	oberflächliche Schäden: <i>erwartet</i> Konsequenz für Standsicherheit: <i>möglich</i> Schäden an relativ starren Rohrleitungen: <i>möglich</i>
4	> 1/50	> 75	oberflächliche Schäden: <i>erwartet</i> Schäden an relativ starren Rohrleitungen: <i>erwartet</i> Schäden an anderen Rohrleitungen: <i>möglich</i>

Tabelle 2.1: Einfluss der Setzungen auf die anstehende Bebauung, Einschätzung des Schadensrisikos [58]

Wie zu sehen ist, sind bereits ab Setzungen von 10 mm Schäden an der anstehenden Bebauung möglich. Ein Wert, der trotz modernster Tunnelbautechnologie heutzutage selbst mit Schildvortriebsmaschinen ohne kostenintensive Zusatzmaßnahmen (z.B. Bodeninjektion unterhalb sensibler Gebäude) nicht dauerhaft zu erreichen ist bzw. garantiert werden kann.

Bereits maximal vorgeschriebene Setzungen von 15 mm sind mit heutigen Schildmaschinen nicht verlässlich einzuhalten und würden zusätzliche Maßnahmen und umfangreiche Weiterentwicklungen der Schildmaschinen erfordern [49]. In der Praxis werden lokal aufgrund individueller Fehlbedienungen und mangelnder Prozesskontrolle oft wesentlich größere Setzungen erzeugt. Einzelne Havarien können selbst heute noch zur Zerstörung von Gebäuden führen (z.B. Verbrüche aufgrund Bodenmehrentnahmen bei der U-Bahn Erweiterung Porto Linie C, 2000 [27]) und verdeutlichen die Notwendigkeit einer intensiven Prozesskontrolle zur Begrenzung der Setzungen.

2.1.2 Einfluss der Setzungen auf die Qualität und Lebensdauer der Tunnelröhre

Setzungen sind die Folge der Störung der primären Spannungs- und Lagerungsverhältnisse des Bodens. Je größer die Setzungen desto größer ist die Verformung des umgebenden Bodens. Die Folge ist eine mit zunehmenden Setzungen und damit zunehmenden Verformungen des Bodens steigende Entspannung und Auflockerung des die Tunnelröhre umgebenden Bodens. Dies führt zu einer stärkeren Verformbarkeit des Bodens und damit einer schlechteren Bettung und einer höheren Belastung der Tübbingröhre. Die größere Belastung bei schlechter Bettung führt zu einer Zunahme der radialen Verformung bzw. der Ovalisierung der Tübbingringe bei Austritt aus dem Schildschwanz, der so genannten "Trompetenform" [10] (siehe Abbildung 2.2).



Abbildung 2.2: Verformung der Tübbingröhre beim Verlassen der Schildmaschine

Die Tunnelauskleidung wird aufgrund der Ovalisierung höheren Spannungen aus Biegeund Torsionsmomente ausgesetzt, die aufgrund der ggf. eintretenden Rissbildung - die maximal zulässigen Spannungen sind trotz der hohen Torsionsfestigkeit der Segmente schnell erreicht - die Qualität und Lebensdauer der Tunnelröhre verringern und die Unterhaltskosten erhöhen [7] (siehe Abbildung 2.3).

Lokale Überbeanspruchungen der Koppelstellen aufgrund der höheren Biegemomente durch die schlechtere Bettung zwischen den Ringen können zu Versätzen der Tübbingringe nach Verlassen des Schildschwanzes führen (siehe Abbildung 2.4). Dadurch kommt es ggf. zu Abplatzungen und verminderter Dichtigkeit der betreffenden Ringfuge. Diese muss dann aufwendig injiziert und abgedichtet werden. Durch eine Verschiebung der Auflagerebene kann es zudem beim darauf folgenden Ring zu Längsrissen kommen.



Abbildung 2.3: Hauptsächlich durch Torsion verursachte Risse in Tübbingen

Abbildung 2.4: Fugenversatz durch lokale Überbeanspruchung der Koppelstellen

Grenzwerte oder quantitative Abschätzungen des Beschädigungsrisikos der Tunnelauskleidung in Abhängigkeit der maximalen Setzungen bzw. der damit verbundenen Bettung der Tübbinge existieren nach Kenntnis des Autors derzeit noch nicht. In [10] wurde jedoch festgestellt, dass bereits Ovalisierungen bei Bodenbelastung im Bereich von 2-3 mm zu einer Rissbildung führen können und deshalb neben anderen Faktoren (z.B. dem möglichst genauen Ringbau, etc.) auch die Deformation der Ringe nach Verlassen der Schildmaschine möglichst gering gehalten werden muss. Daraus folgt, dass für eine möglichst gute, gleichmäßige Bettung und geringe Bodenbewegungen bzw. Setzungen zu sorgen ist.

2.2 Datenaufnahme und -auswertung bei modernen Flüssigkeitsschildvortrieben

Die Datenaufnahme bei Schildvortrieben gliedert sich in die Bereiche "Vortriebsdaten" und "Vermessungsdaten". Daneben liegen noch eine Reihe externer Daten, wie z.B. die Schildkenndaten (Schneidraddurchmesser, Schildlänge, etc.), oder auch Vorgaben aus den statischen Berechnungen (erforderlicher Verpressdruck, Stützdruck, maximale Belastbarkeit der Tübbinge, etc.) sowie Gutachten zur anstehenden Geologie vor. Da die externen Daten jedoch unabhängig vom Vortriebsgeschehen sind, erübrigt sich im Rahmen dieser Arbeit eine weitergehende Untersuchung ihrer Aufnahme.

Die Gesamtheit aller Daten (Vortriebsdaten, Vermessungsdaten und externer Daten) wird im Folgenden als Prozessdaten bezeichnet.

2.2.1 Aufnahme der Vortriebsdaten

Die beim Flüssigkeitsschildvortrieb mindestens zu erfassenden Vortriebsdaten sind gemäß Empfehlungen des Deutschen Ausschusses für Unterirdisches Bauen (DAUB) [18]:



Abbildung 2.5: Graphische Darstellung der nach DAUB bei Flüssigkeitsschildvortrieben an der Schildmaschine mindestens zu erfassenden Vortriebsdaten

Die umfassende Aufzeichnung der Maschinendaten gehört bei modernen Schildmaschinen zum Stand der Technik. Da mittlerweile fast alle Funktionen der Vortriebsmaschine elektrisch oder elektro-hydraulisch gesteuert werden, sind die entsprechenden Größen messtechnisch erfassbar und digital verarbeitbar. Außerdem werden standardmäßig eine Reihe von Messinstrumenten zur Erfassung weiterer maschinen- oder vortriebsrelevanter Daten eingesetzt. Bei Aufzeichnungsraten zwischen 0,1 bis 1 Hz und 200 bis 400 unterschiedlichen aufgezeichneten Parametern fallen zwischen 1,7 und 35 Mio. Maschinendaten, so genannte Momentanwerte, täglich an. Daneben werden üblicherweise noch eine Vielzahl zusätzlicher Daten innerhalb und außerhalb des Tunnels bzw. an den Schnittstellen (z.B. der Separieranlage) protokolliert.

Einen Überblick über die in der Regel aufgezeichneten Momentanwerte sowie die zusätzlichen Daten, die zur Berechnung der Setzungen zur Verfügung stehen, gibt Tabelle 2.2.

Maschinendaten				
Baufortschritt	Ortsbruststützung	Materialförderung	Ringspaltverpr.	Betriebszustand
 Vortriebs- geschwindigkeit Penetration Überschnitt Pressenkräfte und -drücke Pressenausfah- rung Drehzahl, Dreh- moment, Drehrich- tung des Schneidrades Verschiebung des Schneidrades Stromaufnahme Antriebsmotoren 	 Luftpolsterdruck und Bentonit- spiegel Verteilung des Stützdruckes in der Abbaukammer und am Schneid- rad Drücke in der Abbaukammer 	 Durchfluss- messung in Förder- und Spei- seleitung Dichtemessung in Förder- und Spei- seleitung Druckmessung in Förder- und Spei- seleitung 	 Verpressdruck Verpressvolumen Druck und Volumen Schild- schwanzfett Gewicht Mörtel- tank Stromaufnahme der Pumpen 	 Temperatur und Druck in den Hy- draulikkreisläufen Temperatur und Druck in den Kühl- kreisläufen
Zusätzliche (manuell protokollierte) Messdaten				
 Eigenschaften des Stützmediums: Dichte, Filtratwasserabgabe und Fließgrenze Zusammensetzung und Eigenschaften des Ringspaltverpressmörtels Beschädigungen der Auskleidung Einbauposition der Ringe 				
Schichtprotokolle	• Schichtprotokolle			

Tabelle 2.2: Übersicht über die aufgezeichneten Vortriebsdaten

Die große Anzahl an Daten verhindert eine manuelle Auswertung und erfordert auch bei der computergestützten Auswertung entweder eine gezielte Beschränkung auf aussagekräftige Parameter oder Analysemethoden zur Identifikation der relevanten Parameter, da ansonsten Informationen und Zusammenhänge in der "Datenflut" verloren gehen.

Die Identifikation der aussagekräftigen Parameter erfolgt im Rahmen dieser Arbeit unter Berücksichtigung des in der Praxis vorhandenen umfangreichen Expertenwissens. Ein rechnergestütztes Vorgehen zur Identifikation relevanter Datengruppen wäre zwar möglich z.B. auf Basis von Data-Mining-Verfahren (siehe z.B. [121]), die selbstständig relevante Daten aus einer Vielzahl von Daten herausfiltern können, die Ergebnisse des Data-Minings müssten aber anschließend auch wieder von Experten auf Plausibilität überprüft werden, würden von den Daten und deren Qualität abhängen und müssten aufgrund des induktiven Charakters der Data-Mining-Verfahren nicht zwangsläufig zu allgemeingültigen Aussagen führen.

2.2.2 Genauigkeit der Messinstrumente

Neben der Erfassung der zur Verfügung stehenden Daten ist im Rahmen der Auswertung der Prozessdaten auch die Abschätzung der unterschiedlichen Genauigkeiten der eingesetzten Messinstrumente von Bedeutung. Gerade für die oftmals redundant erfassten kritischen Vortriebsparameter bestimmt die Abschätzung der Genauigkeiten die sinnvolle Wahl der auszuwertenden Messinstrumente.

Daher wird die Genauigkeit der Instrumente, die im Bezug auf die Erfassung der Interaktion zwischen Vortriebsgeschehen und Bodenbewegung von Bedeutung sind, hier näher untersucht. Für die elektronisch gesteuerten Maschinenparameter (wie z.B. die Stromaufnahme Antriebsmotoren oder der Pumpen etc.) erübrigt sich eine solche Untersuchung, da die Messungen dieser Daten in der Regel keine nennenswerten Fehler aufweisen.

2.2.2.1 Theoretische Genauigkeit der Messinstrumente

Hinsichtlich der Genauigkeit der Messungen zeigt Tabelle 2.3 die theoretische Messgenauigkeit der im Rahmen der Erfassung der Interaktion zwischen Vortriebsgeschehen und Bodenbewegungen wichtigsten Messinstrumente der Schildmaschine. Die tatsächliche Genauigkeit der Messungen vor Ort wird im Anschluss daran untersucht. In den ersten Spalten der Tabelle 2.3 ist die jeweilige Geräteart, in der zweiten Spalte ist der Zweck der Messgeräte angegeben, in der dritten Spalte sind Beispiele für die erfassten Messwerte und in der vierten Spalte die theoretische Messgenauigkeit (Herstellerangaben) aufgeführt.

Geräteart	Zweck	Messwerte	Theor. Messgenauig- keit
Drucksensoren	 Kontrolle der Ortsbrust- stützung Kontrolle der Verpress- drücke Kontrolle der Suspen- sionsspeisung und der Bodenförderung 	 Stützdrücke in der Abbaukammer, an der Tauchwand etc. Mörteldrücke in den unterschiedlichen Lisenen Drücke in den Speise- und Förderleitungen 	0,5 %
Magnetisch-Induktive Durchflussmessung	Berechnung der Boden- mehrentnahmen	Volumenströme in Speise- und Förderleitung	1 %
Radiometrische Dich- temessung	Berechnung der Boden- mehrentnahmen	 Gemischdichte bzw. Massenströme in Speise- und Förderleitung 	0,1 %
Kapazitive Seilzug- messung	Kontrolle der Ortsbrust- stützung	Bentonitniveau	100 μm
Kontaktsensoren	Kontrolle der Ortsbrust- stützung	Bentonitniveau	in der Regel 20 - 40 cm (Entsprechend dem Abstand der Sensoren)
Magnetostriktive Posi- tionsmessung	Positions- und Geschwin- digkeitsbestimmung	Ausfahrung der PressenVortriebsgeschwindigkeit	0,002 mm

Tabelle 2.3: Übersicht über die theoretische Messgenauigkeit der im Hinblick auf die Berechnung der Setzungen relevanten Gerätebereiche

2.2.2.2 Genauigkeit der erfassten Messwerte in der Praxis

Die hohen theoretischen Messgenauigkeiten der Geräte werden infolge von Beeinträchtigungen während des Vortriebes und der "rauen" Einsatzbedingungen vor Ort in der Regel nicht erreicht. Insbesondere die Messeinheiten, die direkt mit dem abzubauenden Boden, dem Verpressmörtel oder der Bentonitsuspension in Berührung kommen, wie z.B. die Drucksensoren, die Seilzugmessung oder auch die Dichte- und Durchflussmessung, sind anfällig für Störeinflüsse. Neben den natürlichen Fluktuationen und Schwankungen führen hier kurzzeitige Behinderungen, z.B. durch Verklebungserscheinungen in der Abbaukammer, der Tauchwandöffnung und der Sensoren, zugesetzte oder verstopfte Leitungen sowie diskontinuierliche Materialförderungen zu teilweise deutlichen Fehlern bei den Messungen. Daneben kommt es immer wieder zu Beschädigungen sowie partiellen und kompletten Ausfällen der Messgeräte.

Die beim Einsatz vor Ort zu erwartende Genauigkeit der resultierenden Messwerte weicht daher teilweise deutlich von den theoretischen Messgenauigkeiten der Geräte ab:

Drucksensoren

Die Drucksensoren verfügen über eine Sensormembran, mit der der anliegende Druck anhand der Bewegung der Membran in ein Verhältnis zu einem definierten Referenzdruck auf der Membranrückseite gesetzt werden kann.

Die Bewegung der Membran und damit der gemessene Druck wird durch die schwankende Viskosität, Thixotropie und Adhäsivität des Bodensuspensionsgemisches beeinflusst. Nur

Membranen ohne Kontakt zum Bodensuspensionsgemisch können die angegebene theoretische Messgenauigkeit erreichen.

Die tatsächliche Genauigkeit der erfassten Flüssigkeitsdrücke vor Ort lässt sich nur qualitativ abschätzen. Untersuchungen in [42] zeigten, dass beispielsweise zwischen dem gemessenen Luftpolsterdruck und den damit korrespondierenden Drücken in der Abbaukammer temporäre Abweichungen von ± 0,5 bar (entspricht ca. 20 % der gemessenen Werte) aufgezeichnet wurden. Gelegentlich wurden aufgrund der zuvor erwähnten Behinderungen (z.B. Verklebungen der Sensoren) auch wesentlich höhere Abweichungen bzw. gänzlich unrealistische Werte gemessen. Für die weiteren Drucksensoren können bei ähnlich unmittelbarem Boden bzw. Suspensionskontakt vergleichbare Genauigkeiten angenommen werden.

Der Luftpolsterdruck ist für die Messung des Stützdrucks als übergeordnet genau anzusehen, da die betreffenden Sensoren keinen Kontakt zum Boden oder zur Bentonitsuspension haben.

Induktive Durchfluss- und radiometrische Dichtemessung

Mittels der induktiven Durchflussmessung werden die Volumenströme in den Speise- und Förderleitungen gemessen. Dabei wird senkrecht zur Strömungsrichtung ein Magnetfeld angelegt. Während des Durchströmens des elektrisch leitfähigen Bodensuspensionsgemisches wird in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit und der Feldstärke des Magnetfeldes eine Spannung induziert, die über Elektroden abgegriffen werden kann. Die angegebene theoretische Genauigkeit von ± 1 % konnte bei Großversuchen im Maßstab 1:1 bestätigt werden [122].

Die radiometrische Dichtemessung wird zur Erfassung der Gemischdichten in den Speiseund Förderleitungen eingesetzt. Die Werte der Gemischdichten dienen in Kombination mit den Werten der Volumenströme zur Berechnung der Massenströme. Das Prinzip der radiometrischen Dichtemessung beruht auf der Abschwächung radioaktiver Strahlen beim Durchgang durch Materie in Abhängigkeit von der Dichte der Materie. Für detaillierte Erklärungen zum Messprinzip wird auf [122] verwiesen.

Die angegebene theoretische Genauigkeit der Geräte weicht deutlich von den in der Praxis ermittelten Genauigkeiten ab. Bei den zuvor erwähnten Großversuchen wurden für die im Schildvortrieb übliche horizontale Einbauposition und für übliche Boden-Suspensionsgemische Abweichungen zwischen 42,6 und 89,6 % ermittelt [122]. Die Ergebnisse der Dichtemessung werden dabei von der Fließgeschwindigkeit und der schwankenden und nicht bekannten Materialverteilung im Rohrquerschnitt beeinflusst.

Die Berechnung der Volumen- und Massenströme ist damit nicht ohne weiteres rein rechnerisch möglich und in der Praxis mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Wie in [47] berichtet wird, sind die Resultate der Berechnung oft *"nicht zufrieden stellend"*. Diese Praxisstudie berichtet u. a. von Projekterfahrungen, bei denen gänzlich *"unrealistische Werte"* angezeigt wurden und die Messeinrichtungen infolgedessen im Projektverlauf entfernt wurden [47].

Verwertbare Ergebnisse lassen sich bis dato nur bei homogenen Böden und störungsfreiem Vortriebsablauf sowie ständiger gewissenhafter Kalibrierung der Messgeräte erzielen, die aber oftmals nicht mit der notwendigen Genauigkeit und Regelmäßigkeit durchgeführt wird [47]. Ereignisse, wie z.B. plötzliche Bentonitverluste durch die Ortsbrust aufgrund lokaler Störungen im Bodengefüge und damit verbundene große Bentonitspiegelschwankungen, führen zu weiteren Beeinträchtigungen der Volumenbilanz, da der IST-Wert des Aushubvolumens dadurch unterschätzt wird [68].

Kapazitive Seilzugmessung und Kontaktsensoren

Die kapazitive Seilzugmessung und die Kontaktsensoren dienen der Erfassung des Bentonitniveaus. Gegebenenfalls werden anstelle der kapazitiven Seilmessung auch Ultraschallsonden verwendet.

Die Kontaktsensoren, die in bestimmten Abständen in der Arbeitskammer angebracht sind, geben nur an, ob an der betreffenden Höhenkote Bentonit ansteht oder nicht. Aufgrund des in der Regel großen Rasters eignen sie sich daher nur begrenzt zur Ermittlung des momentanen Bentonitniveaus.

Bei der kapazitiven Seilmessung wird mit einer Messsonde die elektrische Kapazität der Suspension gemessen und durch die Berechnung der Dielektrizitätskonstante, des Proportionalitätsfaktors zwischen dem elektrischen Fluss und der elektrischen Feldstärke, in ein füllstandproportionales Signal umgesetzt. Allerdings ist diese Berechnung von den schwankenden elektrischen Eigenschaften der Suspension abhängig.

Anhand gefundener Bentonitrückstände bei Begehungen der Abbaukammer konnten bei der kapazitiven Seilzugmessung vereinzelte Abweichungen von bis zu 40 cm festgestellt werden. In der Regel sind die Werte aber im Zentimeterbereich genau und aufgrund des erwähnten Rasters dem der einfachen Kontaktsensoren überlegen [42].

Magnetostriktive Positionsmessung

Die magnetostriktive Positionsmessung dient zur Ermittlung der Pressenausfahrung und der Ausfahrgeschwindigkeit der Pressen und damit zur Berechnung der Vortriebsgeschwindigkeit und Position der Schildmaschine. Hierbei wird ein durch das Zusammentreffen zweier Magnetfelder ausgelöster Torsionsimpuls in ein wegproportionales Ausgangssignal umgewandelt.

Die ermittelte Ausfahrung sowie die Ausfahrgeschwindigkeit der jeweiligen Presse ist sehr genau, die Genauigkeit der daraus berechneten Position und der Vortriebsgeschwindigkeit der Schildmaschine hängt jedoch entscheidend von der Anzahl der Pressen ab, die gemessen werden.

Da während des Vortriebs nicht alle Pressen gleichzeitig vorgeschoben werden, ist der jeweilige Momentanwert der Vortriebsgeschwindigkeit einer Presse nur eine ungenaue Kenngröße. Steuerungsprobleme bzw. Korrekturbewegungen während des Vortriebs führen zu großen Streuungen bei den Messwerten. Zuverlässige Aussagen in Bezug auf die Geschwindigkeit der Schildmaschine lassen sich nur anhand einer möglichst großen Anzahl an Pressengeschwindigkeiten ermitteln. Die Anzahl der gemessenen Pressen bzw. Pressengruppen schwankt aber projektabhängig, aus Kostengründen wird teilweise nur eine einzige Presse gemessen.

Aus diesem Grund bietet es sich an, für die Ermittlung der Vortriebsgeschwindigkeit auf die im folgenden Kapitel beschriebenen Daten der Vermessung im Tunnel zurückzugreifen. Die Geschwindigkeitsbestimmung anhand der Vermessungsdaten des Steuerleitsystems ist zwar nicht so exakt wie die ermittelte Geschwindigkeit der Pressenausfahrung, sie kann jedoch ebenfalls permanent ermittelt werden und gibt aufgrund der beschriebenen Problematik die Vortriebsgeschwindigkeit der Schildmaschine besser wieder [42].

2.2.2.3 Schlussfolgerung

Neben dem Mengenproblem stellt der Fehleranteil in den Daten ein weiteres Problem bei der Datenauswertung dar. Die in der Praxis oder anhand von Versuchen ermittelten Genauigkeiten weichen deutlich von den theoretischen Messgenauigkeiten der Geräte ab.

Eine Berechnung der zu erwartenden Fehler in den Messwerten anhand der theoretischen Genauigkeit der Messinstrumente bzw. deren Standardabeichungen ist nicht möglich, da sich die Fehler nicht aus den Standardabweichungen der Messinstrumente, sondern aus lokalen, fluktuierenden Beeinträchtigungen vor Ort ergeben, die sich aufgrund fehlender Referenzwerte oftmals nicht quantifizieren lassen. Hierbei sind vor allem die anfangs erwähnten, immer wieder auftretenden groben Abweichungen oder "Messausreißer" aufgrund temporärer Beeinträchtigungen der Messgeräte (z.B. Verklebungen etc.) zu beachten. Im Rahmen der Auswertung ist es daher neben einer adäquaten Wahl der auszuwertenden Messinstrumente notwendig fehlerhafte, offensichtlich unrealistische oder falsche Messdaten zu identifizieren und ggf. auszusortieren.

2.2.3 Aufnahme und Genauigkeit der Vermessungsdaten

Die Aufzeichnung und Speicherung der Vermessungsdaten erfolgt separat von den Vortriebsdaten. Einen Überblick über die aufgezeichneten Vermessungsdaten gibt Tabelle 2.4.

Vermessungsdaten		
Im Tunnel	Außerhalb des Tunnels	
Tatsächliche Position der Maschine	Setzungsmessungen an der Oberfläche	
Theoretische Position der Maschine	 Extensometer-, Inklinometermessungen 	
• Verrollung	 Druckzellen und Piezometermessung 	
 Maschinenneigung und -schrägstellung 		
 Innenmessquerschnitte mit Verformungsmessungen (Konvergenzen, Fugenversatz, Fugenöffnungen etc.) 		

Tabelle 2.4: Übersicht über die während des Vortriebs aufgezeichneten Vermessungsdaten

Maßgeblich für die Setzungsprognose sind hier in erster Linie die Daten der Laservermessung im Tunnel und der Setzungsmessungen an der Geländeoberfläche sowie die Piezometermessungen.

Laservermessung im Tunnel

Die Laservermessung im Tunnel dient zur Bestimmung der Maschinenposition im Verhältnis zur Solltrasse. Aufgrund der kontinuierlichen Messaufnahme kann daraus, wie zuvor erwähnt, auch die Geschwindigkeit der Schildmaschine bestimmt werden. Die Messungen sind aufgrund der geringen Entfernung zwischen Laser und Zieltafel sowie der geringen Beeinträchtigungen vor Ort im Milimeterbereich genau [11].

Setzungsmessungen an der Geländeoberfläche

Die Setzungen werden im Tunnelbau in der Regel mit Tachymetern gemessen. Das Raster, in dem die Setzungsmesspunkte auf der Geländeoberfläche angeordnet sind, beträgt je

nach örtlichen Gegebenheiten und Zugänglichkeit des Geländes nach Möglichkeit zwischen 25 und 50 m. Streckenweise sind jedoch weitaus größere Abstände üblich. Zusätzlich dazu werden teilweise lokale Messquerschnitte mit einem deutlich kleineren Raster (bis zu 5 m) angeordnet.

Die vorgeschriebene Messfrequenz ist projektabhängig definiert und kann zwischen mindestens einmal täglich bis hin zu stündlichen Messungen reichen. Teilweise werden die Setzungen manuell, in stark differierenden Zeitintervallen gemessen. Bei neueren Projekten (z.B. Unterquerung Pannerdenschkanal, Niederlande) werden teilweise Messroboter eingesetzt, die vorab definierte Messpunkte in festgelegten Zeitintervallen (in der Regel 3 h) automatisch erfassen und die Daten weiterleiten [47].

Moderne elektronische Tachymeter, so genannte "Totalstationen", verfügen über einen elektro-optischen Distanzmesser und einen elektronischen Winkelabgriff. Bei motorisierten Tachymetern ist zudem ein vollständig automatisierter Messablauf inklusive selbstständiger Zielsuche möglich. Trotzdem verbleiben auch hier die vermessungstypischen Restfehler.

Neben Ableseungenauigkeiten (auch bei automatischer Ablesung) oder evtl. Verschiebungen der Referenzpunkte, die aufgrund der begrenzten Gerätereichweite in Tunnelnähe liegen müssen, sind vor allem gerätespezifische Abweichungen bei den Messungen bzw. Ungenauigkeiten bei der Aufstellung der Zielmarken für diese Restfehler verantwortlich. Für die im Tunnelbau in der Regel eingesetzten Totalstationen mit Zielreflektoren sind folgende Ursachen in der Praxis relevant [57]:

- Winkelmessung
 - Achsfehler
 - Zielpunktexzentrizität
- Längenmessung
 - Nullpunktkorrektion
 - Frequenzkorrektion
 - Zyklische Fehler
 - Phaseninhomogenitäten

Die Fehler unterliegen einer zufälligen Streuung und sind zudem Temperatur- und Witterungsabhängig [57].

Für die im Tunnelbau zu messenden Relativverschiebungen zwischen den vorab definierten und als unbeweglich angesehenen Referenzpunkten und den Messpunkten wird in der Praxis trotz des Einsatzes präziser Instrumente mit automatischer Zielerfassung bei gewissenhafter Durchführung der Messung und den üblichen Entfernungen von Fehlern im Bereich von einigen mm ausgegangen [11].

Die Übermittlung der Messdaten erfolgt in der Regel elektronisch und damit weitestgehend fehlerfrei, selbst manuell betriebene Instrumente verfügen über Datenspeicher zur Aufnahme der Messdaten.

Piezometermessungen

Pioezometer dienen zur Erfassung des anstehenden Porenwasserdrucks auf Höhe der Tunneltrasse. Bei ausreichender Abdichtung gegen Oberflächenwasser erreichen die Messungen im Tunnelbau Genauigkeiten von ± 0.5 % [11].

2.2.4 Datenauswertung

Hinsichtlich der Auswertung der Prozessdaten bzw. der Vortriebs- und Setzungsdaten existieren noch keine standardisierten Vorgehensweisen.

Da die Auswertung überwiegend manuell durch Experten vor Ort mit Hilfe von Tabellenkalkulationsprogrammen erfolgt, beschränkt sie sich meist auf die Maschinendaten, da diese bereits digital erfasst sind und einfache Aussagen hinsichtlich der Maschinensteuerung ermöglichen [47].

Die Auswertung der Maschinendaten dient vorrangig der Dokumentation der Schildfahrt, der Ursachenforschung bei Störfällen oder der nachträglichen Analyse kritischer Betriebszustände (Ortsbrustbegehung, etc.) [70]. Die Ergebnisse hängen entscheidend von der Erfahrung des Auswertenden und dessen Interpretation ab und liegen zudem nur zeitverzögert vor. Aufgrund des hohen Aufwandes beschränkt man sich meist auf die Auswertung der Mittelwerte, zum Beispiel über den Vortriebszeitraum eines Ringes. Die Aussage eines über einen gesamten Vortriebszyklus gemittelten Wertes ist jedoch gering. Wichtige Ereignisse, beispielsweise die Unterschreitung des Verpressdrucks über mehrere Minuten, bleiben völlig unbemerkt.

Da die Setzungsdaten separat von den Maschinendaten aufgenommen und aufgezeichnet werden, existiert bisher keine systematische Rückkopplung zwischen diesen Datengruppen. Die aufgenommenen Setzungen werden in der Regel sporadisch kontrolliert, die Auswertung beschränkt sich auch hier auf einen manuellen Vergleich der aktuell gemessenen Setzungen mit den maximal zulässigen. Gelegentlich wird beispielsweise das Setzungsverhalten mit der ringweisen Stützdruckaufzeichnung oder mit dem verpressten Mörtelvolumen verglichen, ohne dabei jedoch weitere setzungsbeeinflussende Faktoren genauer zu beachten.

Eine manuelle vortriebssynchrone Auswertung der Vortriebsdaten im Hinblick auf die verursachten Setzungen lässt sich mit einem vertretbaren Zeitaufwand nicht realisieren. Aufgrund der komplexen zeitabhängigen Interaktion zwischen Schildmaschine, Stützmedium, Ringspaltverpressung, Tübbingauskleidung und den Bodenbewegungen sowie der nicht einheitlichen Erfassung und Speicherung der Daten würde dies die Kapazität der Experten vor Ort übersteigen.

2.3 Verfahren zur Berechnung der Setzungen

2.3.1 Klassische Verfahren zur Berechnung der Setzungen

Unter klassischen Verfahren zur Berechnung der Setzungen werden hier Verfahren verstanden, die bisher keine Schnittstelle zum Vortriebsprozess besitzen. Das heißt, sie beinhalten im Gegensatz zu den im Anschluss vorgestellten Entwicklungsansätzen zur vortriebssynchronen Setzungsberechnung, keine Möglichkeit aktuelle Einstellungen des Vortriebsprozesses zu berücksichtigen.

Die klassischen Verfahren zur Berechnung der Setzungen lassen sich in drei Bereiche aufteilen:

- Empirische Verfahren
- Analytische Verfahren
- Verfahren auf der Basis der Finiten Elemente Methode (FEM)

2.3.1.1 Empirische Verfahren

Empirische Verfahren zur Setzungsberechnung beruhen allein auf Erkenntnissen und Erfahrungen vorangegangener Projekte. Sie stellen die Anfänge der Entwicklung der Verfahren zur Berechnung der Setzungen im Tunnelbau dar. Gängige Beispiele sind die Verfahren von Szechy (1969) [112], Peck (1969) [88], Attewell (1977) [3], Attewell and Woodman (1982) [4], O'Reilly and New (1982) [87] und Köster (1987) [55].

Von diesen Verfahren ist das im Folgenden erläuterte Verfahren von Peck das mit Abstand bekannteste. Peck wertete eine Vielzahl unterschiedlicher Schildvortriebe statistisch aus und entwickelte daraus bodenabhängige Richtwerte für die Breite der Setzungsmulde und die zu erwartenden maximalen Setzungen (siehe Abbildung 2.6). Die Form der Setzungsmulde näherte er in Anlehnung an die Arbeiten von Schmidt [105] und Martos [74] durch eine Gauß'sche Normalverteilungsfunktion an.



Abbildung 2.6: Beziehung zwischen der Breite der Setzungsmulde und dem Verhältnis von Überdeckung zum Tunneldurchmesser für unterschiedliche Bodenarten zur Abschätzung der Setzungsmulde sowie der maximalen Setzungen nach [88]

Mit der relativen Tiefenlage des Tunnels (Verhältnis Überdeckung zum Tunneldurchmesser) lässt sich anhand des Diagramms (Abbildung 2.6) der Abstand i des Flexionspunktes von der Tunneltrasse ermitteln. Dieser gibt den Wendepunkt der Normalverteilungsfunktion an, die den Verlauf der Setzungsmulde quer zur Tunnelachse beschreibt. Anhand des angenommen Verlaufs der Setzungsmulde ergibt sich die Größe der Setzungen nach Peck aus dem Hohlraum des Ringspalts. Der Ringspalt weist trotz Mörtelverpressung seiner Meinung nach ein Volumen von 1 bis 3 % des Ausbruchsquerschnitts auf. Da er von einem linear elastischen Bodenverhalten ausgeht, entspricht dies auch dem Volumen der Setzungsmulde.

Daraus ergeben sich die Setzungen über der Tunneltrasse nach Peck zu:

$$s_{\max} = \frac{\Delta F}{i \cdot \sqrt{2\pi}}$$

$$\Delta F = (0,01bis\,0.03) \cdot F_{A}$$
(2.1)
(2.2)

mit

 s_{max} : maximale Setzungen über der Tunneltrasse [mm]

 ΔF : Hohlraum des Ringspaltes [m²]

 F_A : Ausbruchsquerschnitt des Tunnels [m²]

i : Abstand des Flexionspunktes von der Tunnelachse [m]

2.3.1.2 Analytische Verfahren

Analytische Verfahren sind Rechenansätze zur Berechnung der Setzungen auf Basis:

- des Spannungsverformungsverhaltens des Bodens
- einiger Bodenkenndaten (Kohäsion, Erdruckbeiwerte,...)

sowie teilweise:

- geschätzter Parameter (z. B "gap-parameter" zur Abschätzung der Einflüsse aus der Ringspaltverpressung, [98])
- der Stütz- und Überlagerungsdrücke

Bekannte Beispiele sind die Verfahren von Herzog (1985) [36], Sagaseta (1987) [100], Uriel und Sagaseta (1989) [102], Verruijt-Booker (1996) [120], Romo (1997) [96] und Longanathan (1998) [64].

Die Ansätze dieser Verfahren sind vergleichbar; daher wird hier zur Verdeutlichung der Grundzüge der analytischen Ansätze nur die analytische Vorgehensweise nach Herzog zur Berechnung der Setzungsmulde über seicht liegenden Tunneln vorgestellt.

Als maßgebliche Faktoren berücksichtigt Herzog die Oberflächenlast p_0 , die Raumwichte des Bodens γ_{Boden} , die Überlagerungshöhe *H*, das Verformungsmodul des Bodens und den Winkel der inneren Reibung φ .

Unter den stark vereinfachenden bzw. für Lockergesteinsböden in der Regel nicht zutreffenden Voraussetzungen, dass es sich bei dem anstehenden Boden um ein isotropes elastisches Medium handelt und ein periodischer Verlauf der Setzungsmulde vorliegt, nimmt er an, dass die Querschnittsfläche der Setzungsmulde gleich der Querschnittsfläche der Hohlraumverengung ist (siehe Abbildung 2.7). Die Breite der Senkungsmulde wird aus der Gleitflächenneigung unter der Annahme des aktiven Rankin'schen Zustandes berechnet. Das heißt, es wird angenommen, dass der gesamte Bruchkörper plastifiziert und an jeder Stelle die Bruchbedingung des ebenen Verformungszustandes erreicht ist.



Abbildung 2.7: Setzungsmulde über einem einröhrigen Tunnel nach [37]

Unter weiteren, für Lockergesteinsböden in der Regel nicht zutreffenden Annahmen eines hydrostatischen Verlaufs des Erddrucks ($e_v = e_h$, $= \gamma \cdot H$ bzw. Seitendruckverhältnis k = 1) sowie eines kohäsionslosen Bodens erhält Herzog die radiale Verformung des Bodens aus:

$$w = \frac{3}{4} \cdot \frac{\sigma_0 \cdot D}{E_{Boden}}$$
(2.3)

mit :

$$E_{Boden}$$
 :Elastizitätsmodul des Bodens $\left\lfloor \frac{N}{mm^2} \right\rfloor$

$$\sigma_0$$
 : primärer Spannungszustand des Bodens kN_m^2

Der primäre Spannungszustand σ_0 wird gemäß folgender Formel berechnet:

$$\sigma_0 = p_0 + \gamma_{Boden} \cdot \left(H + \frac{D}{2}\right) \tag{2.4}$$

mit:

$$p_{0} : \text{Oberflächenlast} \begin{bmatrix} kN \\ m^{2} \end{bmatrix}$$

$$\gamma_{Boden} : \text{Raumwichte des Bodens} \begin{bmatrix} kN \\ m^{3} \end{bmatrix}$$

$$H_{n} : Überdeckung des Tunnels [m]$$

Die zur Berechnung der maximalen Setzungen erforderliche Breite der Setzungsmulde ergibt sich aufgrund der Annahme des aktiven Rankin'schen Zustands aus:

$$B = \frac{D}{\cos\beta} + 2 \cdot T \cdot \tan\beta$$
(2.5)

$$\beta = 45^{\circ} - \frac{\varphi}{2} \tag{2.6}$$

mit:

 β : Gleitflächenneigung im aktiven Rankin'schen Zustand [°]

T : Tiefenlage der Tunnelachse [m]

 φ : Winkel der inneren Reibung [°]

Der Betrag der maximalen Setzungen ergibt sich damit nach dem Verfahren von Herzog zu:

$$= w \cdot \pi \cdot \frac{D}{B}$$
(2.7)

mit

S_{max}

 s_{max} : maximale Setzungen über der Tunnelachse [mm]

w : radiale Verformung des Bodens [mm]

D : Tunneldurchmesser [m]

B : halbe Breite der Setzungsmulde [m]

2.3.1.3 Verfahren auf der Basis der Finite Elemente Methode

Auf Basis der Finite Elemente Methode (FEM) sind heutzutage zwei- und dreidimensionale Simulationen des Vortriebs mit nichtlinearem Bodenverhalten möglich. Da die meisten projektspezifischen Entwicklungen für eine bestimmte Geologie ausgelegt sind, existiert mittlerweile eine große und ständig wachsende Zahl von Modellen. In [82] wurden 60 verschiedene FEM-Modelle der letzen zwei Jahrzehnte miteinander verglichen, wovon sich allein 14 mit der Setzungsberechnung bei Schildvortrieben beschäftigten.

Modelle zur Simulation der Interaktion zwischen Vortrieb und Bodenbewegungen können unter anderem das Gewicht der Schildmaschine, Pressenkräfte, Schubspannungen entlang des Schildes und den Stützdruck mehr oder weniger akkurat berücksichtigen [59].

Eines der bis dato komplexesten Modelle zur Simulation des Schildvortriebs berücksichtigt zusätzlich Parameter für die Vortriebsgeschwindigkeit, die Verpressung des Ringspaltes, die zeitabhängigen Materialeigenschaften des Verpressmörtels, die Interaktion zwischen Stützmedium und Boden an der Ortsbrust sowie die Einflüsse der Pressen auf den Tübbingausbau [52].

In Abhängigkeit von dem verwendeten Bodenmodell können mit diesen Modellen Schildvortriebe und ihre Auswirkungen auf die Umgebung zwei- oder dreidimensional simuliert werden, allerdings nicht unter simultaner Berücksichtigung tatsächlicher Vortriebs- und Setzungsdaten einer Schildmaschine.

2.3.2 Entwicklungsansätze für Verfahren zur möglichen vortriebssynchronen Berechnung der Setzungen

2.3.2.1 Integrales Bohrleitsystem (IBLS)

Die Entwicklung des IBLS, auch als "Interactive Boring Control System"(IBCS) bezeichnet, wurde im Rahmen der Vorarbeiten für das Projekt Metro Amsterdam begonnen, um "Prozessentscheidungen setzungsorientiert ausführen zu können" [22].

Das Bohrleitsystem soll ein Modul zur Prognose der Setzungen mit Hilfe eines 3D-FEM-Modells beinhalten. In diesem Modell sollen die maßgebenden Prozessparameter (Bohrfrontstützung und Ringspaltverpressung) berücksichtigt werden und die Auswirkungen dieser Parameter auf die für die Amsterdamer Innenstadt typischen Pfahlgründungen vortriebsbegleitend ermittelt werden. Um die Einflüsse des Tunnelvortriebs auf die Pfähle zu evaluieren, wurde im Rahmen der Erstellung des Heinenoordtunnels ein "Pfahlversuchsfeld" unterfahren. Der Aufbau des IBLS ist in Abbildung 2.8 zu sehen. Das Modul zur Setzungsprognose ist in der Funktionseinheit "Auswertung und Vorhersage" integriert, hier soll der Bohrprozess virtuell nachvollzogen und daraus Einstellungen für zukünftige Vortriebszyklen berechnet werden. Durch den Abgleich der virtuellen mit den realen Ergebnissen soll der Bohrprozess hinsichtlich der Setzungsvermeidung sukzessive verbessert werden und ein geschlossener Informationskreislauf entstehen [22].



Abbildung 2.8: Schematischer Aufbau des IBLS aus [22]

Zur Berechnung der Setzungen werden die Bohrfrontstützung und die Ringspaltstützung als aktive druckgesteuerte Flüssigkeiten modelliert und angenommen, dass die mathematische Formulierung der Fortpflanzung dieser Krafteinflüsse in den umgebenden Boden eine Vorhersage der Bodenverformung im Bezug auf die Bewegung der Pfähle erlaubt [22].

Erfahrungen mit diesem Konzept liegen noch nicht vor.

2.3.2.2 4D-Geo-Control System (4D-GCS)

Das 4D-GCS, das ebenfalls in den Niederlanden entwickelt werden soll, basiert auch auf einer FEM-Simulation des Vortriebs, die eine Bandbreite von optimalen Bohrparametern liefern soll. Im Gegensatz zu dem zuvor beschriebenen IBLS soll hier das dem FEM-Modell zugrunde liegende Bodenmodell an die in situ angetroffenen Verhältnisse angepasst werden können [84]. Damit soll ein wesentlicher Nachteil der FEM-basierten Ansätze (das statische Bodenmodell) umgangen werden.

Die notwendigen Bodenparameter für diese Anpassung sollen mit Vorauserkundungssystemen anhand der aufgezeichneten Maschinendaten oder durch zusätzliche und vorhandene Messinstrumente im Boden (Extensometer, Inklinometer und Setzungsmesspunkte) während des Vortriebs bestimmt werden.

Erfahrungen mit diesem Konzept liegen ebenfalls noch nicht vor.

2.3.2.3 Informations- und Prozessleitsystem (IPS)

An der Ruhr Universität Bochum wurde ein äußerst umfangreiches konzeptionelles Prozesssteuerungssystem geplant. Zielsetzung war es, vortriebsbedingte Setzungen beim Tunnelbau im Hydroschildvortrieb weitestgehend zu minimieren und den Vortriebsprozess durch Vermeidung von Verschleiß und materialbedingten Ausfallzeiten sowie durch Steigerung der Maschinenverfügbarkeit zu optimieren.

Für das geplante wissensbasierte System sollten durch eine Kombination von numerischen Prognosen und einer Auswertung der Prozessdaten physikalische Wirkungszusammenhänge zwischen dem Vortriebsgeschehen und den Bodenbewegungen analysiert und in Regeln umgesetzt werden. Diese sollten die Basis für einen Fuzzy-Controller bilden, der zur Setzungsprognose und zur Vorgabe von Richtwerten während des Vortriebs dient [33],[69].

Die Realisierung und Entwicklung dieses äußerst umfassenden, viel versprechenden Prozessleitsystems, inklusive des Moduls zur Setzungsprognose, hat sich allerdings aufgrund schwieriger Randbedingungen bei der finanziellen Förderung immer wieder verzögert. Erst mit dem im Jahr 2005 startenden europäischen Forschungsprojekt TUNCONSTRUCT kann mit der Verwirklichung des geplante Prozessleitsystems (sogar in erweiterter Form) begonnen werden [9].

2.3.3 Mängel der bisherigen Verfahren und Entwicklungsansätze zur Berechnung der Setzungen

Empirische Verfahren sind sehr einfache Werkzeuge zur überschlägigen Abschätzung der Setzungen. Wie das hier exemplarisch vorgestellte Verfahren von Peck, berücksichtigen sie in der Regel nur einige wenige Parameter (z.B. Geologie, Überdeckung, Tunneldurchmesser) und leiten daraus die zu erwartenden Setzungen ab.

Die Bauverfahrenstechnik und die Ausführung der Vortriebsarbeiten finden in der Regel keinen Eingang, obwohl ihr entscheidender Einfluss sowohl von Peck [88] als auch von Köster [55] erkannt wurde. Peck setzte voraus, dass die Vortriebsarbeiten immer mit höchster Qualität ausgeführt werden, Köster hielt die Einflüsse aus der Vortriebsarbeit für nicht quantifizierbar. Zur Anwendung im Rahmen der vortriebsbegleitenden Prognose der Setzungen sind die Ergebnisse der empirischen Verfahren daher zu unspezifisch.

Die analytischen Verfahren gehen in der Regel von linear elastischen Verformungsansätzen aus und betrachten den Boden als isotropes elastisches Medium. Sie erfordern drastische Vereinfachungen der Geometrie, des Bodenaufbaus, der Spannungs-Verformungsbeziehungen sowie der Interaktion zwischen Tunnelvortrieb und Boden, bei der sie sich auf wenige Parameter beschränken. Diese vereinfachenden Annahmen werden dem hochgradig nicht-linearen, multivariablen Setzungsverhalten nicht gerecht.

Weiterhin sind für die analytischen Verfahren mitunter Parameter erforderlich (z.B. Konsolidierungsgrad, Spannungszustände im Boden, etc.), die nur schwer zu bestimmen sind. Die Unsicherheiten bei der Aufnahme der Maschinendaten und der geologischen Parameter werden nicht berücksichtigt. Eine Weiterentwicklung dieser Verfahren im Rahmen dieser Arbeit erscheint daher nicht sinnvoll. Zu den Nachteilen der FEM zählen der Zeit- und Kostenaufwand für eine Simulation und die Abhängigkeit von nicht ausreichend genau bestimmbaren Bodenparametern [60],[86],[97],[107].

Selbst wenn mit groben Vernetzungen auch bei relativ geringem Rechenaufwand Ergebnisse produziert werden können, erfordern hinreichend sensible dreidimensionale Modelle eine entsprechend feine Inkrementierung und einen damit verbundenen hohen Zeit- und Rechenaufwand (siehe z.B. die in [76] gemachten Angaben hinsichtlich des für die Vortriebssimulation verwendeten Großrechners). Die Akzeptanz neuer informationstechnischer Konzepte zur Lösung des Rechenzeitproblems - beispielsweise internetbasierte Datenverbindungen zu Hochleistungsrechenzentren an Universitäten, an denen die rechenintensiven Simulationen durchgeführt werden und dann die Ergebnisse wieder zur Baustelle übermittelt werden können - ist derzeit vor Ort auf den Tunnelbaustellen nach Erfahrungen des Autors oft noch nicht in ausreichendem Maße gegeben.

Entscheidend für die Zuverlässigkeit einer FEM-Berechnung ist zudem die Modellierung des viskosen Verhaltens des Bodengefüges (Spannungs-Verformungsverhalten), des Einflusses des Porenwasserdrucks sowie der komplexen Interaktion zwischen Tunnelvortrieb und Boden. Die dafür notwendigen Parameter (Elastizitätsmodul, Kohäsion, Winkel der inneren Reibung, Querdehnungszahl, Konsolidierungsgrad etc.) konnten bisher - selbst bei den heute möglichen Bodenuntersuchungen - im Vorfeld noch nicht mit der notwendigen Genauigkeit ermittelt werden [60]. Bisherige Untersuchungen des Autors zeigen zudem, dass die Informationen bezüglich des anstehenden Bodens auch anhand der vorhandenen Vortriebsdaten der Schildmaschine nur relativ ungenau ermittelt werden können und sich in der Regel nur qualitativ abschätzen lassen [67]. Gerade die Ungenauigkeiten bei der Aufnahme der Bodendaten werden bisher in FEM-Modellen nicht berücksichtigt. Normalerweise sind daher manuelle "empirische Korrekturen" bei den Berechnungen erforderlich [101].

Die Interaktion zwischen Tunnelvortrieb und Setzungsbewegung kann zudem in weiten Teilbereichen per se nur unscharf beschrieben werden. Wichtige Randbedingungen (z.B. Einfluss der Penetration der Bentonitsuspension, aber auch Störzonen, Hindernisse, etc.) lassen sich nur bedingt erfassen.

Entsprechende Probleme treten auch bei den Entwicklungsansätzen zur vortriebssynchronen Prognose der Setzungen auf, die bisher ebenfalls auf klassischen FEM-Ansätzen beruhen. Bereits von anderen Autoren wurde daher festgestellt, dass sowohl numerische als auch analytische und empirische Modelle Setzungen nur ungenau vorhersagen können [34], da nicht alle Faktoren, die Setzungen beeinflussen, adäquat erfasst werden können [114].

Die von einigen FEM-Modellen erzielten guten Ergebnisse hinsichtlich der Übereinstimmung von gemessenen und berechneten Setzungen sind mit Vorsicht zu betrachten. In der bereits erwähnten Studie ([82]), die verschiedene FEM-Modelle der letzten Jahre vergleicht, wird angemerkt, dass keine Berechnungsergebnisse aus einem Stadium vor Beginn der Tunnelarbeiten veröffentlicht wurden und auch Shirlaw [109] stellt fest, dass die "*Vorhersagen*" mit FEM-Modellen in der Regel durch das "*Wissen der Ergebnisse beeinflusst wurden*".

2.4 Schlussfolgerung

Die für die Berechnung von Setzungen wesentlichen Parameter können bis dato nicht adäquat erfasst werden. Ein Großteil dieser Parameter kann zudem vortriebsbegleitend auf Basis der aufgezeichneten Betriebsdaten nur unscharf bestimmt werden. Komplexe, nicht lineare und zeitabhängige Zusammenhänge zwischen Tunnelvortrieb und Setzungsbewegung lassen sich aufgrund fehlender Bodeninformationen und der teilweise unbekannten Mechanismen und Phänomene bei der Bodenbewegung oftmals nur vage - auf Basis der Erfahrungen vor Ort - formulieren, so dass sie in herkömmlichen Berechnungsverfahren nicht adäquat umgesetzt werden können. Menschliches Urteilsvermögen, das zu einer Einschätzung des Setzungsverhaltens herangezogen werden kann, kann in den bisherigen Verfahren nicht abgebildet werden. Das Potential der umfangreichen Datenaufnahme moderner Schildmaschinen, die den Fachleuten wichtige Hinweise zur aktuellen Vortriebssituation geben kann, wird bisher ebenfalls noch nicht ausreichend zur Setzungsberechnung genutzt.

Aus den genannten Gründen sollen in der vorliegenden Arbeit neue Möglichkeiten zur Prognose der Setzungen geschaffen werden, wobei ein wissensbasiert arbeitendes System entwickelt wird, das auf Basis von aufgenommenen Prozessdaten arbeitet.

Wissensbasierte Systeme (irritierender Weise in der Vergangenheit auch oft "Expertensysteme" genannt) sind Programme, die die Fachkompetenz eines Experten auf einem eng umgrenzten Bereich abbilden; ihre Anwendung bietet sich bei Problemen an, für die keine exakten Theorien und Lösungsalgorithmen existieren [32]. Auf eine mathematische Formulierung der Interaktion zwischen Schildvortrieb und Bodenbewegungen im herkömmlichen Sinne wird dabei verzichtet; statt algorithmischer Ansätze wird das in der Praxis vorhandene Erfahrungswissen über die Setzungsbewegungen in Zusammenhang mit den aufgezeichneten Daten des Schildvortriebs gesetzt.

Da die Kenntnisse bezüglich der Zusammenhänge zwischen Setzungen und Schildvortrieb auf der subjektiven Einschätzung und Erfahrungen der Experten vor Ort beruht, ist das daraus abgeleitete Wissen qualitativ repräsentiert, d.h. es enthält die Merkmale, die Expertisen ausmachen: Dem menschlichen Denken ähnliche Vorgehensweisen, Wissen in Regelform, wie Faustregeln, unscharfe, aber im Kern zutreffende Verhaltensregeln und auf Fingerspitzengefühl beruhende Regeln. Zur adäquaten Verarbeitung dieses Erfahrungswissens soll daher auf die Fuzzy-Logik zurückgegriffen werden, die die mathematische Grundlage zur konsistenten Modellierung von Unschärfen darstellt. Zudem sollen hier die Möglichkeiten einer vortriebsbegleitenden adaptiven Verbesserung der Wissensbasis mit Hilfe von künstlichen neuronalen Netzwerken überprüft werden.

Die theoretischen Grundlagen dieser Techniken, ihre Vor- und Nachteile und die Vorteile, die sich aus der Kombination der beiden Techniken ergibt, werden im folgenden Kapitel näher erklärt.

3 Theoretische Betrachtung der Fuzzy-Logik und der künstlichen neuronalen Netzwerke

3.1 Fuzzy-Logik

3.1.1 Einleitung

Die heutige Fuzzy-Logik - bzw. "The Fuzzy-Set-Theorie" - wurde 1965 von L. A. Zadeh entwickelt. [124]. Im Gegensatz zur klassischen binären Logik, in der Bedingungen oder ihre Schlussfolgerungen nur "wahr" oder "falsch" bzw. nur "0" oder "1" sein können, erlaubt die Fuzzy-Logik das Arbeiten mit unscharfen, analytisch bzw. numerisch nicht exakt erfassbaren Kenngrößen, die mit Hilfe von Zugehörigkeitsfunktionen in einem Intervall zwischen 0 und 1 abgebildet werden.

Hinsichtlich der Unschärfe muss unterschieden werden zwischen der objektiven Unschärfe (probalistische Unschärfe), die sich zum Beispiel aus einer Wahrscheinlichkeitsverteilung eines Messwertes ergibt, und der hier gemeinten subjektiven Unschärfe, die aus der menschlichen Beschreibung von Regeln und Prozesszuständen entsteht (z.B.: "Die Setzungen sind hoch" ist keine eineindeutige Definition, der zugehörige numerische Wert ist nicht genau bestimmt und hängt von der Situation ab. Bei der Unterfahrung eines setzungssensiblen Gebäudes wird der numerische Wert zu "hoch" ein ganz anderer sein als bei der Unterfahrung einer Wiese).

Dabei ist auch das Verarbeiten linguistisch formulierter vager Aussagen möglich, die menschliches Erfahrungswissen und nicht deterministisch hergeleitete Sachverhalte abbilden. Infolgedessen können subjektive Einschätzungen mathematisiert und zur Problemlösung verwendet werden [31].

Der entscheidende Vorteil der Fuzzy-Logik ist daher, dass sie es im Gegensatz zur klassischen binären Logik ermöglicht "*mit Worten zu rechnen*" [41].

3.1.2 Grundlagen der Fuzzy-Theorie

Grundlage der Fuzzy-Theorie sind unscharfe Mengen und die zugehörige Mengenalgebra. In der klassischen Mengenlehre gehören alle Elemente eindeutig entweder zu einer Menge oder nicht. Wie schon erwähnt sind im Unterschied hierzu bei den Fuzzy-Mengen beliebige graduelle Zugehörigkeiten zwischen 0 und 1 zugelassen.

3.1.2.1 Unscharfe Mengen

Eine unscharfe Menge oder Fuzzy-Menge setzt sich aus Wertepaaren x, $\mu(x)$ zusammen, wobei x das Element, X die Grundmenge und $\mu(x)$ [0,1] den entsprechenden Zugehörigkeitsgrad des Elements x zur Fuzzy-Menge *FM* beschreibt (vgl. [50],[127]):

$$FM = \left\{ \left(x, \mu(x) \right); x \in X \right\}$$
(3.1)

Zur Darstellung der Zugehörigkeit eignen sich verschiedene Funktionsverläufe, parametrische Darstellungen oder diskrete Therme. In der Regel werden trapez- oder dreiecksförmige Funktionen, Gaußkurven oder verallgemeinerte Glockenkurven eingesetzt. Unter anderem stehen folgende Funktionen zur Verfügung (vgl. [19],[50]):

Tabelle 3.1: Übersicht über verschiedene Funktionsverläufe von Zugehörigkeitsfunktionen


Wesentlich in der Beschreibung von unscharfen Eingangsgrößen durch Zugehörigkeitsfunktionen sind dabei die Toleranz und die Einflussbreite (auch Support oder Träger genannt) [50]. Die Toleranz ist das Intervall auf der Grundmenge, in dem die Zugehörigkeitsfunktion den Wert 1 besitzt, die Einflussbreite das Intervall, in dem die Zugehörigkeitsfunktion größer Null ist. Die Qualität der Abbildung eines Zusammenhangs hängt auch von der Wahl der Zugehörigkeitsfunktionen ab [116],[127].

Mit Hilfe der unscharfen Mengen können linguistische, unscharfe Terme inhaltlich erfasst und so qualitative Begriffe der Umgangssprache in numerischer Form ausgedrückt werden. Für eine Fuzzy-Programmierung sind alle Kenngrößen (linguistische Variablen) in der Form solcher Fuzzy-Mengen zu definieren.

3.1.2.2 Operationen mit Fuzzy-Mengen

Die Definition der Fuzzy-Mengen an sich reicht allerdings noch nicht zum Aufbau eines Fuzzy-Systems aus. Um mit diesen Mengen arbeiten zu können müssen auch Operatoren und Operationen definiert werden, das heißt, es müssen Regeln aufgestellt werden, wie die einzelnen Mengen untereinander verknüpft oder modifiziert werden können.

In der klassischen zweiwertigen Mengenlehre bedient man sich dazu der so genannten Operatoren, wobei sich alle Operationen auf die Grundoperatoren ("UND", "ODER", "NICHT") zurückführen lassen. Die Bedeutung dieser Operatoren ist wie folgt definiert als:

- UND: Schnittmenge, bezeichnet die Menge aller Elemente, die zu Menge A und zu Menge B gehören (A∩B).
- ODER: Vereinigung, bezeichnet die Menge aller Elemente, die zu Menge A oder zu Menge B (eine Erfüllung reicht, inklusives oder) gehören (A∪B).
- NICHT: Komplement, bezeichnet die Menge aller Elemente, die zu Menge A und nicht zu Menge B (bzw. umgekehrt) gehören (A – B).

In der Fuzzy-Theorie werden entsprechende Operatoren für unscharfe Mengen definiert. Allerdings besteht bei unscharfen Mengen die Schwierigkeit, dass die Elemente gemäß den Zugehörigkeitsfunktionen nur zu einem gewissen Grad zu der einen oder anderen Menge und dementsprechend auch nur zu einem gewissen Grad zu einer daraus gebildeten Menge gehören. Das heißt, dass die bekannten Operatoren der binären Logik für unscharfe Mengen sinnvoll verallgemeinert werden müssen, so dass die Informationen der graduellen Zugehörigkeit erhalten bleiben.

Eine Übersicht über die grundlegenden Operatoren für Fuzzy-Mengen gibt Tabelle 3.2. In der ersten Spalte ist dabei die logische Beschreibung des zugrunde liegenden Operators der binären Logik gegeben, in der zweiten Spalte die dazugehörige mathematische Beschreibung, die die Eigenschaften des Operators in der Fuzzy-Logik beschreibt. In der dritten Spalte ist die Definition des Operators gegeben, wobei $\mu_{A,B}(x)$ die Zugehörigkeit des Elementes x zur Menge A bzw. B bezeichnet.

Logische Beschreibung	Mathematische Beschreibung	Definition
UND	Minimum der Zugehörigkeiten	$\mu_{A \cap B}(\mathbf{x}) = \min(\mu_A(\mathbf{x}), \mu_B(\mathbf{x})) $ (3.7) $\forall \mathbf{x} \in \mathbf{X}$
ODER	Maximum der Zugehörigkeiten	$\mu_{A\cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) $ (3.8) $\forall x \in X$
NICHT	Negation der Zugehörigkeit	$\mu_{\neg A}(x) = 1 - \mu_{A}(x) $ (3.9) $\forall x \in X$

T - L - II - O O	THE EVEN PLACE			
	I Indreicht Lind	ar alla Standarac	noratoron tur	
		כו עוב טנמוועמוענ		

Die UND-Verknüpfung zweier Mengen, die in der klassischen Mengenlehre die Schnittmenge bezeichnet, wird in der Fuzzy-Logik durch das Minimum der Zugehörigkeiten zu den Ausgangsmengen dargestellt und bezeichnet damit nicht mehr die Schnittmenge der beiden Mengen, sondern die Schnittmenge der Flächen unter den Graphen der Zugehörigkeitsfunktionen [50]. Der Maximum-Operator, also das Maximum der Zugehörigkeitsfunktionen der Ausgangsmenge, bezeichnet analog dazu die Vereinigungsmenge der Graphen der Zugehörigkeitsfunktionen, die Negation die Abweichung der Zugehörigkeit von der "vollen Zugehörigkeit" zu einer Menge (μ =1).

Neben dieser Verallgemeinerung der klassischen Operatoren lassen sich weitere nachfolgend kurz beschriebenen Operatoren definieren. Aufgrund der Mehrwertigkeit der Logik existieren theoretisch unendlich viele Verknüpfungsmöglichkeiten [41]. Die daraus resultierende Mannigfaltigkeit von Ansätzen kann man entsprechend ihrer Eigenschaften in drei Gruppen, so genannte "Normen" zusammenfassen:

- t-Normen (Triangular Norms): mathematische Modelle für die mengetheoretische Schnittmenge, bzw. das logische UND
- s-Normen (auch t-Conormen): mathematische Modelle für die mengentheoretische Vereinigung, bzw. das logische (inklusive) ODER
- kompensatorische Operatoren: mittelnde Operatoren, bilden zwischen t-Normen und s-Normen ab, sind im Allgemeinen Kombinationen aus Paaren von komplementären t-und s-Normen.

Eine Auswahl möglicher alternativer Operatoren nach [41],[81] zeigt Tabelle 3.3. Auf die vielfältigen kompensatorischen Operatoren wird hier nicht weiter eingegangen, da sie im Rahmen dieser Arbeit keine Verwendung finden, stattdessen wird auf die angegebene Literatur ([41],[81]) verwiesen. Wie in Tabelle 3.2 ist in der ersten Spalte die jeweilige Norm, in der zweiten Spalte die Beschreibung und in der dritten die Definition des Operators gegeben.

	Beschreibung	Definition	
t-Normen	Algebraisches Produkt	$\mu_{AB}(\mathbf{x}) = \mu_{A}(\mathbf{x}) \cdot \mu_{B}(\mathbf{x})$	(3.10)
	Beschränktes Produkt	$\mu_{A_{\square}B}(x) = max(0, \mu_A(x) + \mu_B(x) - 1)$	(3.11)
s-Normen	Algebraische Summe	$\mu_{A+B}(\mathbf{x}) = \mu_{A}(\mathbf{x}) + \mu_{B}(\mathbf{x}) - \mu_{A}(\mathbf{x}) \cdot \mu_{B}(\mathbf{x})$	(3.12)
	Beschränkte Summe	$\mu_{A_{\square}B}(\mathbf{x}) = \min(1, \mu_{A}(\mathbf{x}) + \mu_{B}(\mathbf{x}))$	(3.13)

Tabelle 3.3: Übersicht möglicher alternativer Operatoren für Fuzzy-Mengen (ohne kompensatorische Operatoren)

3.1.2.3 Aufbau eines Fuzzy-Systems

Nach diesen theoretischen Grundlagen wird im Folgenden der Aufbau und die Arbeitsweise eines Fuzzy-Logik Systems erklärt werden. Die charakteristische Struktur in einem Fuzzy-Logik-System beinhaltet die Prozesse Fuzzifizierung, Inferenz und Defuzzifizierung (siehe Abbildung 3.1).



Abbildung 3.1: Struktur eines Fuzzy-Systems

Fuzzifizierung

Unter Fuzzifizierung versteht man das Transformieren der gegebenen scharfen Werte in unscharfe Fuzzy-Werte bzw. genauer gesagt, in einen Vektor von Zugehörigkeitsgraden. Hierzu wird für jeden scharfen Wert der Zugehörigkeitsgrad bezüglich aller linguistischen Terme eines Fuzzy-Sets bestimmt. Ein Fuzzy-Set bezeichnet einen Satz von unscharfen Mengen, die zur vollständigen Charakterisierung einer Kenngröße erforderlich sind.

Falls nicht genügend Expertenwissen zur Definition der Fuzzy-Mengen der Eingangswerte zur Verfügung steht, sind zwei verschiedene Vorgehensweisen üblich: Zum einen ist das die Gitter- bzw. Rasterpartitionierung ("grid partition"), bei der der gesamte Wertebereich eines Parameters in gleich große Intervalle unterteilt wird, zum anderen die gestreute Partitionierung ("scatter partition"), bei der mit Hilfe von Clusteranalysen charakteristische Wertebereiche bzw. Häufungsbereiche bestimmt und zur Definition der Zugehörigkeitsfunktionen verwendet werden [28]. Die Anwendung der gestreuten Partitionierung kann aber ggf. zu semantischen Problemen hinsichtlich der Interpretierbarkeit und Transparenz des Fuzzy-Systems führen [80].

Inferenz

Nach der Fuzzifizierung aller Kenngrößen erfolgt die Inferenz, das regelbasierte Schlussfolgern. Eine Fuzzy-Inferenz ist im Prinzip eine Verarbeitungsvorschrift für Regeln in der Form:

WENN (UND/ODER/NICHT)	DANN
Prämisse	Konklusion

bzw. ganzer Gruppen von Regeln auf unscharfen Aussagen. In der Prämisse können noch weitere UND/ODER/NICHT oder alternative Operatoren, wie zuvor beschrieben, eingefügt werden. Nach dem Prinzip des regelbasierten Schlussfolgerns wird nun analog dem menschlichen Umgang mit solchen Regeln ein Schritt nach dem anderen abgearbeitet.

Die Regelmatrix stellt den Kern eines Fuzzy-Systems dar. Alle eingehenden Daten werden auf Basis dieser Regeln verarbeitet, so dass hier ein hohes Maß an Sorgfalt und Prozesswissen bei der Erstellung erforderlich ist.

Die Inferenz gliedert sich in die drei Schritte:

- Aggregation
- Implikation oder Komposition
- Akkumulation oder Ergebnis-Aggregation

Im ersten Schritt, der Aggregation, wird der Erfüllungsgrad (auch Gesamtkompatibilitätsmaß genannt) der Prämisse bestimmt. Für jede Regel wird also bestimmt, in welchem Maße die Prämisse aufgrund der aktuellen Eingangswerte erfüllt ist.

Die Auswahl der Operatoren zur Verknüpfung der unterschiedlichen Bedingungen ist dabei vom jeweiligen Anwendungsfall abhängig. Im Prinzip kann jeder der zuvor genannten Operatoren verwendet werden, sofern er die sprachlich formulierte Verknüpfung abbildet. Die Verwendung von kompensatorischen Operatoren führt allerdings zu Rechenzeitnachteilen und beeinträchtigt die mathematischen Eigenschaften des Systems, da die Assoziativität der Regeln dann nicht mehr erfüllt sein muss, das heißt, dass die Reihenfolge, in der die Teile einer Regel abgearbeitet werden, eine Rolle spielt [50].

Im zweiten Schritt, der Implikation, wird mit dem zuvor errechneten Erfülltheitsgrad der Prämisse der Erfülltheitsgrad der zugehörigen Konklusion (DANN-Teil der Regel) bestimmt. Falls nicht alle Regeln einer Regelbasis gleich wichtig sind, lässt sich die Relevanz einzelner Regeln über so genannte Gewichtungsfaktoren [0,1] steuern. Dadurch eröffnen sich zusätzliche Möglichkeiten zur Feineinstellung eines Fuzzy-Systems. Sind Regeln mit solchen Gewichtungsfaktoren versehen, müssen diese in der Implikation berücksichtigt werden. Da sowohl die Aussage der Prämisse als auch das Gewicht der Regel erfüllt sein müssen, erfolgt diese Operation mit nichtkompensatorischen t-Normen bzw. UND-Operatoren [41].

Im dritten Schritt, der Akkumulation, werden die Einzelergebnisse aller aktiven Regeln zusammengeführt (akkumuliert) und ein Gesamtergebnis gebildet. Dies ist immer dann notwendig, wenn mehrere aktive Regeln die gleiche Schlussfolgerung liefern. Da alle Regeln einen alternativen Charakter haben, werden dafür ODER-Operatoren (in der Regel: Maximum oder Additionsoperatoren [127]) eingesetzt. Bei der Addition ist der maximale Erfüllungsgrad auf 1,0 begrenzt.

Defuzzifizierung

Die in der Inferenz erhaltene unscharfe Menge kann nun entweder verbal charakterisiert oder in scharfe skalare Werte umgewandelt (defuzzifiziert) werden.

In der Literatur werden hierfür eine Reihe von unterschiedlichen Methoden genannt (Maximum-Methode, Maximum-Mittel-Methode, Schwerpunktmethode, lineare Defuzzifizierung, Hyperdefuzzifikation,...) [19],[50],[127]. Für eine vollständige Übersicht über diese Methoden wird auf die genannte Literatur verwiesen.

Das gebräuchlichste Verfahren ist die hier vorgestellte Schwerpunktmethode [50]. Dabei wird der Flächenschwerpunkt der aus allen aktiven Regeln resultierenden Ausgangs-Fuzzy-Menge ermittelt und die Abzisse des Schwerpunktes als scharfer Ausgangswert genommen:

$$\overline{y}_{erg} = \frac{\int_{b}^{a} y \cdot \mu_{erg}(y) dy}{\int_{b}^{a} \mu_{erg}(y) dy}$$
(3.14)
mit:

mit:

: defuzzifizierter Ausgangswert [-] y_{erg}

: Abzisse des Teilflächenschwerpunkts [-] y

 $\mu_{erg}(y)$: Zugehörigkeitsfunktion der aus allen Ergebnissen resultierenden Ausgangs-

Fuzzy-Menge in den Grenzen y = a und y = b[-]

3.1.3 Fuzzy-Modelltypen

In der Literatur sind verschiedene unterschiedliche Fuzzy-Modelle bekannt. Die bekanntesten davon sind:

- Mandami-Modell
- Takagi-Sugeno-Kang-Modell
- Singleton-Modell

3.1.3.1 Mandami-Modell

Das Mandami-Modell gilt als das typische (gebräuchlichste) Fuzzy-Modell [75]. Es wurde 1975 von Mandami entwickelt. Der Aufbau eines solchen Systems entspricht den bisherigen Ausführungen.

3.1.3.2 Takagi-Sugeno-Kang-Modell

Von Takagi und Sugeno wurde 1985 das Takagi-Sugeno-Kang-Modell (TSK) entwickelt. Das TSK bietet eine Kombination aus linguistischer und mathematischer Modellierung. Ziel war es, die automatische Modellierung von Fuzzy-Modellen basierend auf Messdaten zu ermöglichen.

Die ersten beiden Schritte der Inferenz (Aggregation und Implikation) unterscheiden sich dabei nicht von dem zuvor erklärten herkömmlichen Mandami-Modell. Der Unterschied des TSK ist, dass für den Konklusionsteil mathematische Funktionen (in der Regel nullter oder erster Ordnung) zur Beschreibung des Ergebnisses verwendet werden.

3.1.3.3 Singleton-Modell

Das Singleton-Modell ist ein Spezialfall des Mandami-Modells oder des TSKs. Der DANN -Teil der Regeln wird hier auf einen einzigen Wert, ein Singleton, reduziert.

Der Vorteil des Singleton-Modells ist, dass es genau wie das TSK besser mit lernfähigen Systemen (z.B. künstlichen neuronalen Netzwerken) kombiniert werden kann. Es ist kompakter und arbeitet effizienter, wohingegen Mandami-Modelle intuitiver, gebräuchlicher und besser nachvollziehbar sind [75].

3.1.4 Bisherige Anwendungen der Fuzzy-Logik im Tunnelbau

Bisherige Einsatzgebiete im Tunnelbau finden sich z.B. im Bereich:

- der Gebirgsklassifikation bei konventionellen [126] und maschinellen Tunnelvortrieben mit Tunnelbohrmaschinen [92],[93]
- der Vorhersage der zu erwartenden Penetrationsrate von Tunnelbohrmaschinen [29]
- der Richtungssteuerung bei Rohrvortrieben [85]
- der Steuerung von Injektionsvorgängen [125]

Für die Gebirgsklassifikation bei konventionellen Tunnelvortrieben [126] wurde im Rahmen der Vortriebsarbeiten für den Semmering-Basistunnel ein Klassifizierungssystem entwickelt, das eine Einteilung des Gebirges vornimmt, basierend auf den Aussagen des Geologen hinsichtlich des Zerlegungsgrades des Gebirges, des Bergwasseranfalls und dem baugeo-logischen Gesteinstyp.

Grund für die Wahl eines Fuzzy-Logik-basierten Systems war hier, dass dieses die Möglichkeit bietet, eine dem menschlichen Denken entsprechenden Umgang mit Unsicherheiten zu implementieren und bei der Beurteilung einer Situation unscharfe, nicht quantifizierte Werte zuzulassen [126]. Zur Klassifizierung des Gebirges reichten dabei die drei genannten Eingangsparameter aus.

Hinsichtlich der Gebirgsklassifizierung bei maschinellen Tunnelvortrieben im Hartgestein wurde in [92],[93] ein Modell auf Basis der Anpresskraft, der Energieaufnahmen der Maschine und der täglichen Vortriebsleistung entwickelt, das es ermöglichen sollte, vortriebsbegleitend die Gebirgsklasse zu bestimmen. Aufgrund der fließenden Übergänge zwischen den geologischen Klassen lag es nahe ein System zu entwickeln, das keine scharfe

Klasseneinteilung vorsieht, sondern fuzzyhaft arbeitet und die Unschärfe der Übergänge berücksichtigt [92],[93].

In [29] wurde ein Modell zur projektübergreifenden Prognose der zu erwartenden Penetrationsrate von Hartgesteinsmaschinen in Abhängigkeit von einer Beschreibung der Geologie, dem Tunneldurchmesser, dem Anpressdruck pro Diske, der Umdrehungszahl, dem installierten Drehmoment, dem Bohrkopfdurchmesser und dem Jahr der Fertigstellung entwickelt. Ein fuzzy-basiertes System wurde hier gewählt, da herkömmliche statistische Modelle nicht ausreichten, um die komplexen, multivariablen und nicht linearen Zusammenhänge zwischen den Maschinenkenndaten, der Geologie und der Penetrationsrate zu beschreiben [29]. Beim Vergleich übertraf das entwickelte fuzzy-basierte Modell mit Fehlern bei der Prognose der Penetrationsrate zwischen -2,8 bis 1,8 m/h die herkömmlichen statistischen Modelle zur Prognose der Penetrationsrate [29].

Bei der Richtungssteuerung von Rohrvortrieben verhinderten die sich in ihrer Wirkungsweise überlagernden und messtechnisch schwer erfassbaren Einflüsse aus dem Abbauverhalten, der Bodenbeschaffenheit und den auf den Steuerkopf und den Maschinenrohrstrang wirkenden Kräften eine allgemeingültige mathematische Beschreibung des Steuerverhaltens [85]. Da sich dieses Verhalten jedoch mit menschlichem Erfahrungswissen umschreiben ließ, konnte ein Fuzzy-System mit nur vier Eingangsparametern entwickelt werden (Neigung, vertikale Abweichung sowie bisherige Tendenz zur Neigung und Vertikalabweichung), das eine automatische Richtungssteuerung bei Rohrvortrieben erlaubt [85]. Die Eignung dieses Fuzzy-Systems zur Richtungssteuerung von Rohrvortrieben wurde in [85] anhand eines stochastischen Simulationsmodells überprüft. Dabei zeigte sich, dass das Fuzzy-System in der Lage ist, einen Rohrvortrieb stabil entlang der Solltrasse zu steuern.

Bei der Steuerung des Injektionsvorgangs handelt es sich zwar mehr um ein geotechnisches als ein tunnelbautechnisches Problem. Da die zugrunde liegende Problematik aber mit der des Tunnelbaus verwandt ist, soll es hier aber trotzdem aufgeführt werden. Das Problem bei der Verpressung war, dass sich die maßgeblichen Bodeneigenschaften (hier: Kluftweite, Kluftrauhigkeit und Kluftfüllung) in situ nur schwer bzw. nur stichprobenartig, und deshalb nicht mit der erforderlichen Genauigkeit, erfassen ließen. Dieser Mangel an repräsentativen Bodendaten, die eine mathematische Modellierung und Berechnung des Verpressvorgangs verhinderten, soll durch die Beurteilung der vor Ort gemessenen Injektionsrate, dem Injektionsdruck, dem Ruhedruck und dem Druckabfall beim Pumpenstopp mit Hilfe eines Fuzzy-Systems ausgeglichen werden. Die Beobachtung dieser vier Parameter erlaubt es, wie anhand von Computersimulationen gezeigt wurde, die Injektion zuverlässig zu steuern [125].

Für einen weiteren Überblick über das Einsatzspektrum und unterschiedlichste Beispiele zum Einsatz von Fuzzy-Logik-basierten Systemen sei hier auf die Übersichtsbeiträge [89],[90] der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik verwiesen. In diesen Beiträgen wird über die Erfahrung bei der Anwendung der Fuzzy-Logik in der Prozessführung, Regelung und Steuerung in den Jahren 1991-2002 berichtet.

3.1.5 Vor- und Nachteile der Fuzzy-Logik

3.1.5.1 Vorteile

Die Vorteile der Fuzzy-Logik liegen - wie gezeigt - im Wesentlichen in der Möglichkeit des heuristischen, das heißt nicht mathematischen Entwurfs eines auf ihr basierenden Systems. In einer Fuzzy-Regelbasis lässt sich menschliches Erfahrungswissen unscharf in Form von linguistisch formulierten Zusammenhängen beschreiben. Die Interpretierbarkeit und Anschaulichkeit des so entwickelten Systems ist dadurch wesentlich höher als bei klassischen Konzepten. Gerade äußerst komplexe, hochgradig nichtlineare Probleme können häufig mit wenigen einfachen Regeln modelliert werden. Fuzzy-Logik-basierte Systeme sind zudem in einem hohen Maße tolerant gegenüber ungenauen Daten.

Allgemein lässt sich sagen, dass sich der Einsatz der Fuzzy-Logik immer dann anbietet, wenn:

- Kein in sich geschlossenes mathematisches Modell des Prozesses, z.B. in Form von Differentialgleichungen, existiert oder gefunden werden kann, oder wenn die Komplexität des Problems für eine solche Modellierung zu groß ist.
- Unscharfe und vage Aussagen oder intuitive Einschätzungen zur Modellierung des Sachverhalts herangezogen werden müssen.
- Viele Eingangsparameter und hohe Nichtlinearität vorliegen. Aufgrund der einfacheren Modellbildung lassen sich dann Fuzzy-Systeme mit wesentlich geringerem Aufwand entwickeln.

3.1.5.2 Nachteile

Neben den genannten Vorteilen sind aber auch einige Nachteile mit dem Einsatz der Fuzzy-Logik und dem damit einhergehenden Verzicht auf eine geschlossene mathematische Modellierung verbunden. Diese sind:

- Die Beliebigkeit bzw. die Freiheit, die der Entwickler bei der Wahl und Implementierung des Fuzzy-Modells hat. Es existieren keine standardisierten Vorgehensweisen um Erfahrungswissen in die Daten- und Regelbasis eines Fuzzy-Systems umzusetzen [44].
- Die Beliebigkeit bzw. die Freiheit, die der Entwickler bei der Modifzierung eines Fuzzy-Modells zur Feinabstimmung oder Ergebnisverbesserung hat. Hierzu existieren ebenfalls keine standardisierten Methoden. Die Anpassung eines Fuzzy-Modells an veränderte Parameter kann daher schwierig und zeitaufwendig werden oder auch scheitern.
- Fuzzy-Systeme besitzen keine Lernfähigkeit, die Regeln und Zugehörigkeitsfunktionen müssen vom Entwickler entworfen und optimiert werden.

3.2 Künstliche neuronale Netze (KNN)

3.2.1 Einleitung

Künstliche neuronale Netze (KNN) sind lernfähige Systeme und werden anhand von Beispieldaten trainiert. KNN sind der Struktur des menschlichen Gehirns nachempfunden und stellen die mathematische Modellierung von Nervenzellen und deren Verbindungen dar. Sie bestehen aus einer großen Anzahl netzwerkartig verbundener Neuronen, welche - dem biologischen Vorbild entsprechend - einfache Operationen durchführen.

Sie werden vorteilhaft dann eingesetzt, wenn die Komplexität eines betrachteten Problems zu groß oder das Wissen zu unstrukturiert ist, um Regelwissen extrahieren zu können [127]. Im Gegensatz zu konventionellen deterministischen Methoden ist keine geschlossene mathematische Modellierung des Systems erforderlich.

3.2.2 Grundlagen der KNN

KNN bestehen, wie erwähnt, aus einer großen Zahl einfacher "Prozessoren", die den Neuronen entsprechen. Diese sind untereinander verbunden und tauschen Informationen in Form von numerischen Werten aus.

3.2.2.1 Aufbau eines Neurons

Jedes einzelne Neuron repräsentiert einen Entscheidungsprozess und kann als eine Schaltung aufgefasst werden. Diese Schaltung führt dazu, dass - analog zu dem biologischen Vorbild - erst dann eine Ausgabe erzeugt wird, wenn ein bestimmter Schwellenwert überschritten wird [115].

Ein künstliches Neuron lässt sich durch ein Tupel beschreiben, das aus:

- einem Eingabevektor (x)
- einem Gewichtsvektor (w)
- einer Propagierungsfunktion (fp)
- einer Aktivierungsfunktion (f_a) bzgl. eines Schwellenwertes (Θ)
- einer Ausgabefunktion (f_0) mit einem Ausgabewert (y)

besteht.





In jedem einzelnen Neuron des KNN werden Informationskanäle als Input zusammengeführt. Die eingehenden Informationen werden dabei durch einfache Multiplikation der Eingabedaten mit ihrem jeweiligen Verbindungsgewicht gebildet. Durch die so erfolgte Gewichtung üben die Eingabedaten Einfluss auf die weitere Verarbeitung aus.

Der Gesamteingabewert eines Neurons berechnet sich über die so genannte Propagierungsfunktion und wird als Nettoinput bezeichnet. Hierbei werden die gewichteten Werte aller eingehenden Informationen in der Regel entweder summiert, multipliziert oder es werden Maximal- und Minimalwerte bestimmt [106].

Aus dem Nettoinput bzw. dem letzten Aktivierungszustand wird dann mit Hilfe der Aktivierungsfunktion unter Berücksichtigung des Schwellenwertes der neue Aktivierungszustand des Neurons bestimmt. Die Aktivierungsfunktion ist eine Kennlinie, die den Zusammenhang zwischen den Ein- und Ausgängen definiert. Die am häufigsten verwendeten Aktivierungsfunktionen sind lineare Funktionen, Schwellenwert-Funktionen, sigmoide Funktionen (Exponentialfunktionen) oder auch tangens-hyperbolicus-Funktionen (vgl. [106]), welche in der folgenden Tabelle dargestellt sind.



Tabelle 3.4: Übersicht über die Aktivierungsfunktionen

Aus den Aktivierungszuständen wird anhand der Ausgabefunktion die Ausgabe des Neurons berechnet. Dazu werden ebenfalls lineare oder Maximumsfunktionen verwendet [106].

3.2.2.2 Aufbau künstlicher neuronaler Netze

KNN bestehen aus einer Vielzahl von Neuronen, welche netzwerkartig verbunden sind. Während die einzelnen künstlichen Neuronen jeweilige Entscheidungsprozesse repräsentieren, wird durch das Netzwerk der Neuronen die Wechselwirkung vieler Einzelentscheidungen modelliert [95].

Die Neuronen werden üblicherweise in unterschiedlichen Schichten angeordnet; man unterscheidet:

- Eingabeschicht
- ggf. Verarbeitungsschicht(en) bzw. verborgene Schicht(en)
- Ausgabeschicht

In der Eingabeschicht werden die von der Außenwelt übertragenen Eingangssignale verarbeitet. In den verborgenen Schichten findet die Verarbeitung der Eingabeneuronen-Impulse statt. Ein Netzwerk kann mehrere Verarbeitungsschichten enthalten. Der Ausgabevektor einer verborgenen Schicht stellt den Eingabevektor der folgenden verborgenen Schicht oder der Ausgabeschicht dar. In der Ausgabeschicht wird das Ergebnis der vom Netzwerk verarbeiteten Information ausgegeben. Jedes Neuron ist, je nach Netzarchitektur, mit den Neuronen der darauf folgenden und der vorangehenden Schicht verbunden, allerdings nicht zwangsläufig mit allen. Abbildung 3.3 zeigt beispielhaft den Aufbau eines einfachen Mehrschichtnetzwerks ohne Rückkopplung.



Abbildung 3.3: Modell eines einfachen Mehrschichtnetzwerkes ohne Rückkopplung mit einer Verarbeitungsschicht aus [42]

Bei der in Abbildung 3.3 exemplarisch dargestellten Netzstruktur bestehen nur Verbindungen zwischen aufeinander folgenden Schichten. Der Informationsfluss findet also nur in einer Richtung statt, weshalb man auch von Netzen ohne Rückkopplung bzw. azyklischen Netzen (feedfoward nets) spricht. Generell lassen sich die Netze ihrer Architektur nach in unterschiedliche Kategorien einteilen:

1. Netze ohne Rückkopplung (Feedforward-Netze), bei denen die Informationsverarbeitung nur in einer Richtung erfolgt

- Ebenenweise verbundene Netze ohne Rückkopplung beinhalten nur Verbindungen von einer Schicht zur nächsten, das Überspringen einer Schicht ist nicht möglich.
- Allgemeine Netze ohne Rückkopplung erlauben auch Verbindungen zwischen weiter entfernten Schichten.
- 2. Netze mit Rückkopplungen (Recurrent-Netze), die es erlauben, dass die Neuronen ihre eigene Aktivierung oder die der anderen Neuronen in der Gruppe über eine Verbindung beeinflussen
 - Netze mit direkten Rückkopplungen erlauben es, dass ein Neuron seine eigene Aktivierung über eine Verbindung von seinem Ausgang zu seinem Eingang verstärkt oder abschwächt.
 - Netze mit indirekten Rückkopplungen erlauben Rückkopplungen von Neuronen höherer Schichten zu Neuronen niederer Schichten.
 - Netze mit Rückkopplungen innerhalb einer Schicht werden oft für Aufgaben eingesetzt, bei denen nur ein Neuron in einer Gruppe von Neuronen aktiv werden soll. Jedes Neuron erhält eine hemmende Verbindungen zu anderen Neuronen und oft noch eine aktivierende direkte Rückkopplung zu sich selbst. Das Neuron mit der stärksten Aktivierung (der Gewinner) hemmt die anderen Neuronen.

Für eine Übersicht über die unterschiedlichen Netzwerkarchitekturen und Einsatzbereiche wird hier auf [106] verwiesen.

Die Verbindungen zwischen den Neuronen sind - wie beschrieben - mit veränderlichen Gewichten versehen; hierbei spiegelt das Gewicht die Bewertung der Verbindung zwischen zwei Neuronen wieder. Über die unterschiedlich gewichteten Verbindungen wird das "Wissen" des KNN gespeichert. Zur Realisierung des Lernens werden dann, ähnlich dem menschlichen Gehirn, die Gewichte, d.h. die Stärken der Verbindungen zwischen den einzelnen Neuronen modifiziert, so dass das vorgegebene Ziel bestmöglich erreicht wird. Die Modifikation der Gewichte der einzelnen Verbindungen des Netzes erfolgt über Lernregeln, wobei man grundsätzlich zwischen überwachtem und unüberwachtem Lernen unterscheidet [24].

Beim überwachten Lernen steht dem Ausgabeparameter stets ein Zielwert (Target) gegenüber. Das Lernziel des KNN besteht darin, den Fehler zwischen gewünschter und berechneter Ausgabe zu minimieren. Der Lernprozess wird mit Hilfe von "Trainingsdaten", d.h. zur Verfügung stehenden Ein- und Ausgabedaten, durchgeführt.

Das unüberwachte Lernen wird durch einen Lernalgorithmus realisiert, der nur Eingangsdaten an das Netzwerk liefert und diese Daten nach Regelmäßigkeiten durchsucht, die sich für die Einstellung der Verbindungsgewichte eignen. Im Rahmen dieser Arbeit, in der KNN hybrid zur adaptiven Verbesserung von Fuzzy-Regelbasen und Zugehörigkeitsfunktionen anhand von in situ Messdaten eingesetzt werden sollen, also ein Zielwert zur Verfügung steht, ist das unüberwachte Lernen nicht relevant. Auf weitere diesbezügliche Ausführungen wird hier deshalb verzichtet.

Für das überwachte Lernen stehen unterschiedliche Lernregeln zur Verfügung (Hebbsche Regel, Delta Regel, Backpropagation Regel [79]). Bei der Hebbregel wird die Verbindung

zwischen zwei Neuronen immer dann verstärkt, wenn beide gleichzeitig aktiviert sind. Die Delta Regel stellt eine Spezialisierung der Hebb Regel für zweischichtige Netze (ohne verborgene Schichten) dar. Die Differenz zwischen Zielwert und aktueller Ausgabe kann hier direkt zur Modifikation der Gewichte herangezogen werden. Die Backpropagation Regel oder Fehlerrückführungsmethode ist der am häufigsten eingesetzte Lernalgorithmus. Sie ist ein Gradienten-Abstiegsverfahren und versucht dadurch möglichst schnell die Gewichte so zu konfigurieren, dass ein Fehlerminimum gefunden wird.

Nach der Modifikation der Verbindungsgewichte werden die Ausgabeparameter erneut berechnet. Danach wird überprüft, ob der neue Fehler die gewünschte Größe erreicht hat oder ob die maximale Anzahl an Durchläufen, Epochen genannt, erreicht ist. Ist dies nicht der Fall, folgt eine weitere Epoche.

Abschließend müssen die Ergebnisse anhand von so genannten Testdaten überprüft werden. Testdaten sind Datensätze, die nicht zum Trainieren des Netzwerks verwendet wurden. Hierdurch wird überprüft, ob dem Netzwerk eine Generalisierung der Zusammenhänge gelungen ist oder es ggf. nur in der Lage ist, die Trainingsdaten wiederzugeben.

3.2.3 Bisherige Anwendungen der KNN im Tunnelbau

In den letzten Jahren wurden KNN auch im Bereich des Tunnelbaus eingesetzt. Beispiele im Bereich des konventionellen Tunnelbaus sind Programme für die:

- Prognose von Konvergenzen [25]
- Vorhersage von Setzungen [108]
- Abschätzung der resultierenden Schäden an unterfahrenen Bauwerken [8],[54]

Beispiel im Bereich des maschinellen Tunnelbaus sind die durchgeführten Studien zur Möglichkeiten der KNN zur:

- Setzungsprognose [70]
- Prozesssteuerung [86]

Für die Prognose der Konvergenzen der Außenschalen konventionell aufgefahrener Tunnel wurde in [25] ein Verfahren auf Basis eines KNN entwickelt, das basierend auf 11 unterschiedlichen Eingangsparametern, die die geologische Situation und das Vortriebsverfahren beschreiben, die maximal zu erwartenden Konvergenzen bestimmt. Als Trainingsdaten wurden die Daten von vier verschiedenen Tunnelbauprojekten in Slowenien verwendet. Grund für die Wahl eines KNN war die Tatsache, dass die für eine numerische Berechnung notwendigen geologischen Parameter nur schwer und nicht mit der notwendigen Genauigkeit bestimmt werden können, so dass sich das Problem nicht mit ausreichender Genauigkeit modellieren ließ und daher hier anhand von vorhandenen Beispieldaten entwickelt werden sollte. Vergleiche zwischen den gemessen Konvergenzen und den mit dem KNN prognostizierten Werten anhand von Testdatensätzen ergaben eine hohe Korrelationen (Korrelationkoeffizient um 0,9) [25].

In [108] wurde im Rahmen des Vortriebs des "Brasilia Tunnel" versucht, mit Hilfe eines KNN Vorhersagen über zu erwartende Setzungen zu machen. Dabei wurden wiederum 11 verschiedene Eingangsparameter zur Beschreibung der geologischen Situation, der Vor-

triebsart, der Vortriebsgeschwindigkeit und des Bauverfahrens berücksichtigt. Ziel war es, ein Verfahren zur Setzungsprognose zu entwickeln, das basierend auf den bisherigen Projekterfahrungen die Setzungen prognostiziert. Der Ansatz erwies sich aber aufgrund eines mittleren Fehlers bei der Setzungsprognose von 33,4 mm (siehe [108]) als relativ ungenau. Hauptgrund hierfür scheinen der stark schwankende Verlauf der Setzungen (zwischen 10 und bis zu 270 mm) und die für die Komplexität des Problems geringe Anzahl an Messpunkten zu sein (für den gesamten Tunnel, der mit unterschiedlichen Vortriebsmethoden aufgefahren wurde, standen insgesamt nur 328 Datensätze zur Verfügung).

Im Rahmen der Abschätzung vortriebsbedingter Gebäudeschäden wurde in [8],[54] ein System auf Basis eines KNN entwickelt, das unter der Berücksichtigung von 47 verschiedenen Eingangsparametern die potentielle Beschädigung von Gebäuden über einer Tunneltrasse berechnen soll. Zum Trainieren des Netzwerkes wurden 113 Beispieldatensätze der U-Bahn-Vortriebe in Seoul verwendet. Der Grund für die Wahl eines KNN war hier die große Parameteranzahl, die eine konventionelle Modellierung des Problems aufgrund der damit verbundenen Komplexität verhinderte. Stattdessen sollte das System anhand der Erfahrungen der Vergangenheit die Zusammenhänge selbst lernen. Vergleiche zwischen den mit 3D-FEM-Berechnung und den mit dem KNN berechneten Winkelverdrehungen eines Gebäudes und den horizontalen Spannungen der Wände ergaben hier durchschnittliche Abweichungen von 13,1 bzw. 16,1 % [54].

Im Bereich der Setzungsprognose beim maschinellen Tunnelbau wurden in [70] im Rahmen der Vorarbeiten zu dieser Arbeit vom Autor Studien zum möglichen Einsatz von KNN durchgeführt. Hierbei wurde versucht, die Setzungen bei einem maschinellen Tunnelvortrieb mit Hilfe von neun verschiedenen Parametern, die die Vortriebssituation beschreiben, zu prognostizieren. Es wurde allerdings festgestellt, dass die vorliegenden 134 Beispieldatensätze aufgrund der Komplexität des Problems in diesem Fall nicht ausreichen, um eine zuverlässige Prognose der Setzungen zu garantieren. Leichte Modifikationen des Trainingsverfahrens führten zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen bei der Setzungsprognose; zur Ermittlung des für diesen Fall optimalen Netzwerkes waren daher eine große Anzahl von Testdurchläufen notwendig [70]. Der mittlere Fehler bei der Prognose der Setzungen betrug 8,16 mm, die durchschnittlichen Setzungen 7,2 mm.

In [86] wird vorgeschlagen ein KNN zu nutzen, um anhand von "Deformations-" und "Statusdaten" des Vortriebs "Kontrollwerte" zur Steuerung der Schildmaschine bestimmen. Die so erhaltenen Kontrollwerte sollen direkt zur Steuerung der Schildmaschine herangezogen und der Schildfahrer nur bei außergewöhnlich großen Abweichungen akustisch informiert werden. Wie auch schon von anderen Autoren (z.B. in [84]) bemängelt, werden allerdings weder die Eingabewerte ("Deformations-" und "Statusdaten") noch die daraus zu ermittelnden "Kontrollwerte" näher spezifiziert, noch werden Ergebnisse präsentiert oder Hinweise zu dem verwendeten KNN zur Umsetzung, zur Realisierung oder zu Tests etc. gegeben. Das äußerst allgemein beschriebene Konzept lässt sich somit nur als Idee bezeichnen, bei der allerdings nicht einmal klar wird, welche Bohrparameter gesteuert werden sollen. Die Idee, den Schildfahrer komplett durch ein KNN zu ersetzen, ist nach Erfahrungsstand des Autors zum jetzigen Zeitpunkt nicht realisierbar, da dies eine gewaltige, nicht vorhandene Anzahl an Trainingsdatensätzen erfordern würde, um ein hinreichend zuverlässiges Netzwerk trainieren zu können.

3.2.4 Vor- und Nachteile der KNN

3.2.4.1 Vorteile

Allgemein ist festzustellen, dass die KNN aufgrund ihrer zahlreichen Lernalgorithmen weitreichende Lösungsmöglichkeiten für Aufgabenstellungen mit unbekannten und zugleich komplexen Ursache-Wirkungsbeziehungen eröffnen. Die wesentlichen Vorteile dabei sind (nach [24]):

- KNN benötigen kein mathematisches Modell, beliebig komplexe Probleme können "theoretisch" allein mit Hilfe von Beispieldaten erlernt werden.
- Die gesuchten Zusammenhänge sind nicht auf lineare Beziehungen beschränkt. KNN können beliebige nichtlineare Beziehungen zwischen Variabeln nachbilden.
- Ein KNN kann Zusammenhänge generalisieren, d.h. es kann nach der Trainingsphase auch Ergebnisse für Eingabewerte berechnen, die in den Trainingsdaten nicht vorkommen.
- Das "Wissen" eines KNN wird in den Verbindungsgewichten gespeichert. Wenn einzelne Komponenten eines Netzes ausfallen, wird die Leistung des Netzes vermindert, es erleidet aber keinen Totalausfall. Regelwissen ist nicht erforderlich.

3.2.4.2 Nachteile

Die Nachteile bei der Anwendung von KNN bestehen in Folgenden:

- Um Zusammenhänge in Daten finden zu können ("lernen" zu können), benötigen KNN für das Trainieren ausreichend Beispieldaten. Die benötigte Anzahl der Datensätze hängt maßgeblich von der Komplexität des Problems sowie der Qualität der Daten ab und lässt sich im Vorfeld nicht festlegen. Je komplexer ein Problem ist und je fehlerbehafteter bzw. verrauschter die Daten sind, desto mehr Datensätze werden benötigt.
- Hinsichtlich der Vorbereitung der Daten ist oftmals ein hoher Zeitaufwand erforderlich.
- Die ermittelte Lösung bzw. der Lösungsweg sind für den Anwender aufgrund des so genannten "black-box-Verhaltens" weder nachvollziehbar noch manuell optimierbar bzw. veränderbar [115]. Das in den Verbindungen gespeicherte Wissen kann in der Regel nicht zur Modellbildung extrahiert werden.
- Es besteht keine Möglichkeit vorhandenes Wissen, z.B. bezüglich bekannter Zusammenhänge oder Berechnungsabläufe, in ein solches System zu integrieren [115].
- Der Lernvorgang kann divergent verlaufen.

3.3 Neuro-Fuzzy Konzepte

Unter Neuro-Fuzzy wird die Kombination zwischen KNN und Fuzzy-Systemen verstanden. Fuzzy-Systeme erlauben es, Wissen explizit zur Formulierung von Regeln zu nutzen und können mit unsicheren und vagen Aussagen arbeiten. Sie besitzen jedoch keine Lernfähigkeit, so dass alle Regeln einzeln definiert und ggf. prozessbegleitend verbessert werden müssen. Bei entsprechend großen Systemen sind die Definition und einsatzbegleitende Verbesserung der Regeln sehr zeitaufwendig. KNN besitzen hingegen eine exzellente Lernfähigkeit, leiden allerdings darunter, dass die Lösungen nicht oder nur schwer nachvollziehbar sind und sich das Entscheidungsverhalten wie erwähnt nicht extrahieren lässt.

Die Kombination der beiden Techniken, der expliziten Darstellung menschlichen Schlussfolgerns der Fuzzy-Logik und der Lernfähigkeit der KNN, bietet daher einige Vorteile, die im Folgenden kurz wiedergegeben werden sollen:

- Neuro-Fuzzy Modelle basieren auf linguistischen Regeln. Dadurch lässt sich vorhandenes Wissen in das Modell integrieren. Bereits bekannte Regeln und Zugehörigkeitsfunktionen können zur Initialisierung des Systems genutzt werden, wodurch der Lernvorgang erheblich verkürzt werden kann [28].
- Die benötigte Anzahl an Datensätzen zum Trainieren des Netzwerkes ist bei solchen strukturierteren Neuro-Fuzzy-Modellen wesentlich geringer als bei reinen KNN-Lösungen [104].
- Das Ergebnis des Lernprozesses ist ein normales, regelbasiertes Fuzzy-System, dessen Arbeitsweise im Gegensatz zu den KNN nachvollziehbar ist. Dadurch wird das "black-box"-Verhalten der Netzwerke vermieden, das Resultat ist manuell nachoptimierbar und es kann Wissen extrahiert werden.
- Im Gegensatz zu herkömmlichen Fuzzy-Systemen besteht nicht mehr die Notwendigkeit, jede Regel zeitaufwendig manuell zu entwerfen bzw. im Prozessverlauf so lange zu optimieren, bis das gewünschte Resultat erreicht wird. Das System kann die Regeln selbstständig anhand von Beispieldateien erlernen bzw. verbessern.

Bei der Kombination zwischen Fuzzy-Systemen und KNN werden nach [79] grundsätzlich zwei verschiedene Ansätze unterschieden:

- kooperative Neuro-Fuzzy-Systeme
- hybride Neuro-Fuzzy-Systeme

In kooperativen Systemen arbeiten das Fuzzy-System und das KNN grundsätzlich unabhängig voneinander. Die Kopplung besteht darin, dass entweder die Zugehörigkeitsfunktionen *oder* die Regeln *oder* Gewichtungsfaktoren für die Fuzzy-Regeln des Fuzzy-Systems bestimmt werden. Eine gleichzeitige Verbesserung, z.B. sowohl der Zugehörigkeitsfunktionen als auch der Regeln, ist bei kooperativ arbeitenden Neuro-Fuzzy-Konzepten nicht möglich [79]. Die Anpassung erfolgt entweder "offline" (vor Betrieb des Fuzzy-Systems) oder "online" (während der Betriebsphase des Fuzzy-Systems) [79].

In hybriden Systemen werden das KNN und das Fuzzy-System zu einem einzigen System zusammengefasst. Hybride Systeme besitzen daher eine einheitliche Architektur. In der Regel wird hierfür ein Fuzzy-System als spezielles KNN interpretiert und durch ein solches abgebildet, d.h. das KNN ahmt die Struktur und den Aufbau eines Fuzzy-Systems nach. [79]. Dadurch können sowohl die Zugehörigkeitsfunktionen als auch die Regeln eines Fuzzy-Systems modifiziert werden. Die Regelbasen und die Zugehörigkeitsfunktionen lassen

lassen sich nach dem Lernvorgang wieder extrahieren, das übliche "black-box" von KNN entfällt somit auch bei hybriden Systemen [79].

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein hybrid arbeitendes Neuro-Fuzzy-System entwickelt.

3.4 Zusammenfassung

Die Fuzzy-Logik erlaubt eine mathematisch konsistente Verarbeitung numerischer Daten oder subjektiv eingeschätzter Zustände basierend auf vagen Aussagen und menschlichem Erfahrungswissen. Die Formulierung der Regeln erfolgt linguistisch und spiegelt Expertenwissen wider.

Für das Problem der Setzungsprognose bzw. die Erfassung der nicht-linearen, physikalisch bisher nicht exakt beschriebenen Interaktion zwischen dem Schildvortrieb und den Setzungsbewegungen, bietet sich ein Einsatz der Fuzzy-Logik in besonderer Weise aus folgenden Gründen an:

- wegen der erwähnten Schwierigkeiten hinsichtlich der allgemeingültigen mathematischen Modellbildung der nichtlinearen Interaktion zwischen Schildvortrieb und Bodenbewegungen
- wegen der Parametervielzahl
- wegen der nur vage beschreibbaren Zusammenhänge zwischen Vortriebsgeschehen und Setzungsbewegungen
- wegen der schwer zu quantifizierenden zeitabhängigen Eigenschaften des Bodens
- wegen der möglichen Einbindung des in der Praxis vorhandenen Erfahrungswissens

Obwohl die Zusammenhänge zwischen Schildvortrieb und Bodenbewegungen physikalisch nicht exakt beschrieben werden können, können sie dennoch qualitativ linguistisch erfasst werden. Hauptursachen für Setzungen sind beispielsweise die Steuerung des Stützdrucks und die Steuerung der Ringspaltverpressung. Auch wenn sich deren Einflüsse nicht genau quantifizieren lassen, so lassen sich die Grundsätze der Interaktion in unscharfen Regeln zur Beschreibung dieses Verhaltens fassen, z.B.:

"Wenn der Stützdruck zu niedrig ist und sehr wenig Mörtel verpresst wurde, dann werden die Setzungen hoch sein."

Derartige Regeln können im Rahmen einer fuzzy-logischen Modellierung im Zusammenhang mit weiteren beschreibenden Regeln adäquat umgesetzt werden.

Die Fähigkeiten von KNN, aus Beispieldaten zu lernen, bietet die Möglichkeit, auf die Modellierung eines Problems verzichten zu können und Systeme allein aufgrund von Trainings- und Testdaten zu entwickeln. Beliebig komplexe Problemstellungen können allein mit Hilfe "erlernter" Zusammenhänge modelliert werden. Diese Fähigkeit prädestiniert die KNN gerade für den Einsatz im Tunnelbau, der sich durch physikalisch verwickelte, nicht deterministisch erfassbare Wechselwirkungen auszeichnet. Dabei sind KNN jedoch auf eine große Anzahl qualitativ hochwertiger Beispieldaten angewiesen, erlauben keine Integration vorhandenen Wissens und produzieren Lösungen, die manuell nicht veränderbar bzw. optimierbar sind. Systeme allein auf Basis von KNN haben daher bei weitem nicht die Zuverlässigkeit und Flexibilität, die kombinierte Neuro-Fuzzy Ansätze haben, durch die eine Integration von vorhandenem Wissen und Regeln möglich ist.

Für geotechnische Probleme, wie die vorliegende Aufgabenstellung, die in der Regel dadurch gekennzeichnet sind, dass sie eine hohe Komplexität aufweisen, nur durch unscharfe Daten beschreibbar sind, nicht vollständig mathematische formulierbar sind und Auswertungssysteme erfordern, die sich an wechselnde Randbedingungen anpassen können, bieten sich deshalb kombinierte Neuro-Fuzzy-Ansätze an. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher ein solches System entwickelt und umgesetzt. Um die dabei eingesetzten notwendigen linguistischen Regeln formulieren zu können, wird im folgenden Kapitel die Interaktion zwischen Schildvortrieb und Setzungsbewegungen analysiert.

4 Analyse der Interaktion zwischen Schildvortrieb und Setzungen

4.1 Einleitung

Dieses Kapitel bildet die Grundlage zum Verständnis der Setzungsbewegungen, der Ursache-Wirkungszusammenhänge, der beeinflussenden Faktoren und des Verlaufs der Setzungen.

Entsprechend der zuvor herausgearbeiteten Theorie der Fuzzy-Logik kommt es dabei nicht darauf an, eine mathematische Formulierung zur Beschreibung der Interaktion zwischen Schildvortrieb und Bodenbewegungen zu finden, sondern das in der Praxis vorhandene Erfahrungswissen, das zur Formulierung der Regeln herangezogen wird, herauszuarbeiten. Dieses Erfahrungswissen bildet dann die Grundlage für den Entwurf und die Entwicklung der Regelbasen.

4.2 Analyse der Setzungsursachen und Einflussfaktoren

4.2.1 Allgemeines

Unter Setzungen versteht man die "zeitabhängige Vertikalverschiebung der Baugrundoberfläche" [117].

Im maschinellen Tunnelbau werden Setzungen durch Spannungsänderungen, Materialentzug und Gefügeumlagerungen im Boden verursacht. Anstatt der im Grundbau üblichen Unterscheidung zwischen Setzungen (durch Spannungsänderungen ausgelöst), Senkung (infolge Materialentzug) und Sackung (infolge Umlagerungen des Korngerüstes) gemäß DIN 4019 [20], werden die Setzungen im maschinellen Tunnelbau anhand der Phasen des Bohrprozesses unterteilt.

Analog dem Bohrprozess lassen sich näherungsweise folgende Phasen des Setzungsverlaufs zuordnen:

- Vorauseilende Setzungen
- Setzungen bei der Schildpassage (aus Schildbereich und Ringspalt)
- Nachfolgende Setzungen

Aufgrund zahlreicher Praxiserfahrungen, Baustellenuntersuchungen, Modellversuche und numerischer Simulationen sind eine Reihe unterschiedlicher Ursachen für Setzungen beim Flüssigkeitsschildvortrieb in diesen drei Phasen bekannt (siehe Abbildung 4.1). Der darge-

stellte Setzungsverlauf ergibt sich dabei aus der Summe der jeweiligen Ursachen für Setzungen in den einzelnen Phasen des Bohrprozesses.



Vorauseilend	Schildpassage	Nachfolgend
 Änderungen des primären Spannungszustandes in Längsrichtung Bodenmehrentnahmen 	 Schildbereich Schubspannungen entlang des Schildmantels Dynamische Belastung und Vibration bei der Vorwärtsbewegung Überschnitt und Konizität 	 Konsolidierung aufgrund der ge- steigerten Kompressibilität des durch den Tunnelvortrieb umge- formten Bodens Verformung der Tunnelauskleidung durch Langzeiteinflüsse
	 Durch Steuerbewegungen verursach- te Bodenverdrängung und -verdichtung Verformungen des Schildkörpers 	
	Ringspalt	
	 Unzureichende Ringspaltverfüllung Verformung der Tunnelauskleidung bei Belastung 	

Abbildung 4.1: Setzungen und ihre bauverfahrenstechnischen Ursachen beim Hydroschildvortrieb, unterteilt in die Phasen des Setzungsverlaufs, oberer Teil entnommen aus [33]

Die in Abbildung 4.1 genannten Ursachen rufen in Abhängigkeit von weiteren äußeren Randbedingungen, die unabhängig von den Phasen des Bohrprozesses sind und einen übergeordneten Einfluss auf alle drei Setzungsbereiche haben, unterschiedlich große Setzungen hervor.

Diese maßgeblichen Einflussfaktoren sind:

- übergeordnete bauverfahrenstechnische Einflüsse
 - Stillstandszeiten
 - Vortriebsgeschwindigkeit
- die geologischen und hydrogeologischen Einflüsse
 - anstehender Boden
 - Konsolidierungsgrad
 - Lagerungsdichte
 - Schichtzusammensetzung
 - Grundwasserstand (ggf. zusätzlich Tideeinflüsse bzw. gespannte Grundwasserverhältnisse)
 - ggf. vorhandene Hindernisse
- die projektspezifischen Randbedingungen
 - Durchmesser des Tunnels
 - Überdeckung
 - Schildkenndaten (Schneidradgestaltung, etc.)
 - Gradienten- und Trassierungsverlauf

4.2.2 Setzungsursachen

4.2.2.1 Vorauseilende Setzungen

Der Anteil der vorauseilenden Setzungen bei Hydroschildvortrieben beträgt erfahrungsgemäß zwischen 0 und 15 % der Gesamtsetzungen in kohäsiven Böden [43], in nicht kohäsiven Böden sind Werte um 25 % die Regel, in Ausnahmefällen kann der Anteil aber auch bis zu 50 % der Gesamtsetzungen betragen [15].

Die vorauseilenden Setzungen werden durch vertikale sowie horizontale Bodenbewegungen in Richtung der Ortsbrust verursacht. Diese Bodenbewegungen führen abhängig vom anstehenden Boden zu Gefügeumlagerungen, Form- und Volumenänderungen der Bodenelemente und damit zu Setzungen bzw. vorübergehenden Hebungen. Ausschlaggebend für die Gesamtgröße der vorauseilenden Setzungen ist die Steuerung und Kontrolle des Stützdrucks.

Änderungen des primären Spannungszustandes in Längsrichtung

Dem Schildvortrieb vorauseilende Setzungen durch Veränderungen des primären Spannungszustandes im Boden lassen sich selbst bei sorgfältiger Steuerung des Stützdrucks nicht vermeiden. Veränderungen des primären Spannungszustandes führen zwangsläufig zu horizontalen Bodenbewegungen parallel zur Tunnelachse und damit auch zu Setzungen.

Falls der Netto-Spannungszustand (die Resultierende aus dem Anpressdruck des Bohrkopfs und dem durch die Stützflüssigkeit aufgebrachten Stützdruck) an der Ortsbrust geringer ist als der ursprüngliche (primäre) Spannungszustand, kommt es zu einer horizontalen Bodenbewegung in Richtung der Ortsbrust und damit zu Setzungen. Im umgekehrten Fall, falls der Netto-Spannungszustand größer ist als der ursprüngliche Spannungszustand, resultiert daraus eine Bodenbewegung von der Ortsbrust weg und es kommt zu vorübergehenden Hebungen [96].

Bodenmehrentnahmen

Die zuvor beschriebenen Änderungen des primären Spannungszustands und die damit verbundenen Bodenbewegungen in horizontaler Richtung führen im Falle einer Unterschreitung der ursprünglichen Spannungen an der Ortsbrust zu einer Entspannung des Bodens in die Abbaukammer hinein. Diese Materialbewegungen, im angelsächsischen Sprachraum treffend als "ground loss" bezeichnet, können zu einem zusätzlichen Materialentzug führen, der sich in Form von Setzungen bis zur Geländeoberfläche fortsetzt [63] und durch einen steil ansteigenden Setzungsverlauf kurz vor der Ortsbrust gekennzeichnet ist.

4.2.2.2 Setzungen bei der Schildpassage

Den zweiten Bereich stellen die Setzungen bei der Schildpassage dar. Der in diesem Bereich auftretende Anteil an den Gesamtsetzungen schwankt nach bisherigen (projektspezifischen) Erfahrungen zwischen 50 und bis zu 100 % in kohäsiven Böden [43].

Schubspannungen entlang des Schildmantels

Aufgrund der Reibung entlang des Schildmantels werden Schubkräfte von der Schildmaschine in den umgebenden Boden übertragen. Die Schubkräfte an der Grenze zwischen Schild und Boden führen zu Schubspannungen in einem Ring um den Schild, dessen Höhe von den Spannungs-Verformungsbeziehungen des umgebenden Bodens abhängt. Daraus folgen Schubverformungen und horizontale Bodenbewegungen parallel zur Tunnelachse. Diese können durch Gefügeumlagerungen und Form- oder Volumenänderungen der Bodenelemente zu Setzungen, oder bei dicht gelagerten rolligen Böden aufgrund der Volumenvergrößerung durch die bei der Verformung einsetzende Dilatation auch zu Hebungen führen.

Die Größe der Schubspannungen und damit auch der Schubverformungen ist abhängig von der Vortriebsgeschwindigkeit des Schildes. Während eine hohe Vortriebsgeschwindigkeit, wie später noch erläutert wird, ansonsten einen positiven Einfluss auf die Gesamtgröße der Setzungen hat, gilt für die Schubverformungen, dass diese in feinkörnigen (bindigen) Böden umso größer sind, je schneller die Schildmaschine ist [48].

Der Einfluss der Schubspannungen auf das Gesamtsetzungsverhalten ist jedoch vernachlässigbar gering. Anhand von Parameterstudien in [51] konnte festgestellt werden, dass Veränderungen der Schubspannungen zwischen Schildmantel und Boden, hier anhand einer Variation des Reibungskoeffizienten (k_R) in dem für Schildvortrieb nach [37] üblichem Spektrum der Reibungskoeffizienten zwischen k_R =0,2 (Tonböden) bis k_R = 0,35 (Mergel) gezeigt, nur einen untergeordneten Einfluss auf die Gesamtgröße der Setzungen haben (siehe Abbildung 4.2).



Abbildung 4.2: Einfluss der Schubspannungen entlang des Schildmantels auf das Setzungsverhalten, gezeigt anhand einer Variation des Reibungsbeiwertes $k_{R,}$ [51]

Die Abbildung zeigt das simulierte Setzungsverhalten entlang der Geländeoberkante bei der Passage der Schildmaschine mit unterschiedlichen Reibungskoeffizienten k_R . Die in der Praxis übliche Bandbreite wird durch die Kurven $k_R = 0,2$ und $k_R = 0,3$ wiedergegeben, $k_R = 0$ stellt einen theoretischen Wert (keinerlei Reibung) dar, der in der Praxis derzeit nicht erreicht werden kann. Die Unterschiede bei den Setzungen zwischen $k_R = 0,2$ bei und $k_R = 0,3$ sind minimal. Veränderungen der Schubspannungen entlang des Schildmantels haben daher nur einen vernachlässigbar kleinen Einfluss und müssen nicht berücksichtigt werden.

Dynamische Belastung und Vibration bei der Vorwärtsbewegung

Während der Schildfahrt entstehen durch den Vortriebsprozess dynamische Belastungen und Vibrationen, die über den Schildmantel in den umgebenden Boden übertragen werden [43]. Diese können zu Gefügeumlagerungen führen, die insbesondere bei locker bis mitteldicht gelagerten rolligen Böden zur Verdichtung und damit zu Setzungen an der Geländeoberfläche führen. Bei dicht gelagerten rolligen Böden können sie zu einer Volumenvergrößerung und damit zu verminderten Setzungen bzw. Hebungen führen.

Überschnitt und Konizität

Der Überschnitt dient ebenso wie die planmäßige Konizität des Schildmantels dazu, die Reibung entlang des Schildmantels zu reduzieren und Steuerbewegungen zu ermöglichen. Der dadurch entstehende Spalt, der erst mit der Ringspaltverfüllung am Ende des Schildes verpresst wird, führt zu radialen Deformationen des Bodens in Richtung der Tunnelachse, Bodenauflockerungen und Setzungen.

Je größer Konizität und Überschnitt des Schildmantels sind, desto größer sind die unvermeidlichen Bodenbewegungen. Die Konizität ist im Projektverlauf konstant, der Überschnitt kann jedoch mittels hydraulisch ausfahrbarer Überschneider verändert werden und muss daher bei der Prognose der Setzungen auch als veränderlicher Einfluss berücksichtigt werden.

Durch Steuerbewegungen verursachte Bodenverdrängung und -verdichtung

Steuerbewegungen der Schildmaschine führen aufgrund des starren Schildmantels zur Verdrängung des umgebenden Bodens in der Kurvenebene. Diese Verdrängungen führen zu einer Verdichtung des anstehenden Bodens und damit zu Setzungen [66]. Der vorhandene Überschnitt und die Konizität des Schildes, die, um unnötige Setzungen zu vermeiden, möglichst klein gehalten werden, bieten in der Regel bei Kurvenfahrten keinen ausreichenden Bewegungsspielraum für den Schildmantel (vgl. Abbildung 4.3).

Die Verdrängung des Bodens bei Kurvenfahrten erfolgt dabei sowohl an der Kurvenaußenals auch an der Kurveninnenseite. Dadurch nimmt die Größe des Ringspalts zu und erlaubt bei nicht ausreichender Verpressung zusätzliche Bodenbewegungen in radialer Richtung.

Abbildung 4.3 zeigt schematisch die Bodenverdrängung und die Größe des daraus entstehenden Ringspaltes bei unterschiedlichen Schildmaschinen (mit und ohne Überschnitt bzw. mit und ohne Gelenk). Schraffiert dargestellt sind die Bereiche, in denen es zur Verdrängung bzw. Verdichtung des Bodens kommt. Die daraus resultierende Kraft auf den Schildmantel ist als Pfeil dargestellt.



Abbildung 4.3: Bodenverdrängung durch einen Schild bei Kurvenfahrt [66]

Diese Steuervorgänge lassen sich in der Praxis aufgrund von Kursabweichungen (z.B. durch nicht einheitliche Pressenkräfte, unsymmetrische Geologie, ungleiche Kompression der Ringfugen, etc.) und daraus resultierenden notwendigen Korrekturbewegungen nicht vermeiden. In vertikaler Richtung ist oftmals eine geneigte Stellung der Schildmaschine notwendig, um ein Absinken zu verhindern. Steifigkeitsunterschiede sowie unterschiedliche Reibungskoeffizienten führen zudem in geschichteten Böden zu vertikalen Verdrehungen der Schildmaschine und damit ebenfalls zu Abweichungen von der Solltrasse.

Die Einflüsse der Steuerbewegungen sind daher unter Beachtung der Schildgeometrie zu berücksichtigen.

Verformungen des Schildkörpers

Nach [113] sind Verformungen des Schildkörpers ebenfalls eine Ursache für Setzungen beim Schildvortrieb. Solche Verformungen treten aber heutzutage wegen der großen Steifigkeit des Schildmantels normalerweise nur in sehr geringem Maße auf und sind hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt.

Bei hohen anstehenden Wasserdrücken oder unerwartet hohen Erddrücken (z.B. durch unplanmäßig hohe Konsolidation des Bodens) können sich zwar in seltenen Einzelfällen Beulen im Schildkörper bilden (siehe z.B. [14]: Verformungen bis zu 53 mm), diese haben jedoch in Bezug auf Setzungen nur einen untergeordneten Einfluss. Auch die zuvor genannten Belastungen des Schildmantels aus Steuerbewegungen reichen in der Regel nicht aus, um den Schildmantel signifikant zu verformen.

Unzureichende Ringspaltverfüllung

In allen nicht standfesten Böden muss der am Ende des Schildschwanzes entstehende Ringspalt (auch "Schildschwanzfuge" genannt) unmittelbar verpresst werden, um den Spannungszustand des Bodens nach Möglichkeit zu erhalten. Entscheidenden Einfluss auf die Setzungen haben dabei sowohl die Verpressmenge als auch der Verpressdruck. Entspricht das verpresste Volumen vorübergehend nicht dem Volumenzuwachs des Ringspaltes durch den Vortrieb oder kommt es zu einem Druckabfall in dem Verpressmaterial, kann der anstehende Boden in den Ringspalt eindringen. Dadurch kommt es zu Auflockerungen und Setzungen (Abbildung 4.4).



Abbildung 4.4: Einfluss der Ringspaltverpressung nach [5]

Die Ringspaltverpressung ist eine der Hauptursachen für Setzungen im Schildvortrieb. Der Anteil der hier verursachten Setzungen an den Gesamtsetzungen beträgt zwischen 30 und 50 % [43].

Durch einen im Vergleich zum Primärspannungszustand überhöhten Verpressdruck können bereits verursachte Setzungen aber zumindest in Teilen kompensiert werden [7],[112]. Ein zu hoher Verpressdruck kann allerdings auch zum Aufbruch des Bodengefüges und damit ebenfalls zu zusätzlichen Setzungen führen [48].

Des Weiteren spielt die Beschaffenheit des Verpressmaterials für die Größe der entstehenden Setzungen eine Rolle. Eine hohe Filtratwasserabgabe des Verpressmaterials führt zu einer Erhöhung des Porenwasserdrucks im umgebenden Boden und damit zu verstärkten Konsolidationssetzungen [103], hinzu kommen zeitabhängige Schwindverluste des Zement-Bodengemisches. Diese schwanken aber bei den üblichen Zusammensetzungen nur gering und liegen nach in [40] durchgeführten Versuchen zwischen 7-10 %. Sie können damit als weitestgehend konstanter verpressvolumenproportionaler Anteil angesehen werden und müssen nicht zusätzlich berücksichtigt werden.

Verformung der Tunnelauskleidung bei Belastung

Bei der Belastung der Tübbinge durch die Vortriebspressen und aufgrund der beim Austritt der Tübbinge aus dem Schildschwanz anstehenden Erd- und Wasserdrücke bzw. den Verpressdrücken des Ringspaltmörtels treten elastische bzw. elasto-plastische Verformungen auf. Die Größe der Verformungen ist abhängig von der Steifigkeit des Ausbaus, vom anstehenden Boden und den Eigenschaften des Ringspaltverpressmörtels. Sie führen zu der bereits beschriebenen Ovalisierung der Röhre und zu zusätzlichen Setzungen [65].

Bei 1:1-Modellversuchen wurden bei simulierter Auflast von 18,5 kN/m² für einen Tunneldurchmesser von 9,45 m und 40 cm dicken Tübbingen (Breite 1,5 m) für die Ovalisierung Werte von 5,5 mm gemessen [119]. Nach vorliegenden Berichten wurden durch in situ Messungen bei vergleichbaren Projekten in sandigen Böden mit einer Überdeckung zwischen 15 und 25 m und einem Außendurchmesser von 9,45 m Werte zwischen 0 und 4 mm für die horizontale und vertikale Verschiebung gemessen [38].

Diese Werte zeigen, dass die Ovalisierung zwar Einfluss auf die Qualität der Tunnelröhre hat, ihr Einfluss auf die Setzungen aber selbst bei oberflächennahen Tunneln als sehr gering einzuschätzen ist.

Wird auf der sicheren Seite liegend von einem linearen Verlauf der Setzungsausbreitung zwischen Betrachtungsquerschnitt (hier Tunnelfirste, *z*) und Oberfläche (z_0) ausgegeangen, der eigentlich nur für geringe Verhältnisse z/z_0 gegeben ist [43], so ist das Verhältnis zwischen den Setzungen auf Höhe der Tunnelfirste und denen an der Geländeoberfläche proportional zu dem Verhältnis der Breiten der Setzungsmulde, das durch den Abstand der Flexionspunkte (*i*) gekennzeichnet ist.

$$s_{\max_{1}} = s_{\max_{2}} \cdot \frac{i_{2}}{i_{1}}$$
 (4.1)

mit:

 $s_{\max_{1/2}}$: jeweilige maximale Setzung des Betarchtungshorizontes [mm]

 $i_{1/2}$: jeweiliger Abstand des Inflexionspunktes des Betrachtungshorizontes [-]

Nach den Formeln zur Berechnung dieses Flexionspunktes (*i*) nach [87] (siehe Tabelle 4.1 in Kapitel 4.4.1, S. 62) ergeben sich bei den genannten Werten im ungünstigsten Fall (4 mm Verschiebung, 15 m Überdeckung) nur maximale Setzungen von 0,58 mm an der Geländeoberfläche. In situ ist diese Größe aufgrund der mit zunehmender Höhe des Betrachtungshorizontes exponentiell abnehmenden maximalen Setzungen (vgl. [34]) sogar noch wesentlich geringer. Der Einfluss ist damit zu vernachlässigen.

4.2.2.3 Nachfolgende Setzungen

Der Anteil der nachfolgenden Setzungen ist stark von den zeitabhängigen Eigenschaften des Bodens abhängig.

Konsolidierung aufgrund der gesteigerten Kompressibilität des durch den Tunnelvortrieb umgeformten Bodens

Durch den Schildvortrieb verursachte Spannungs- und Gefügeumlagerungen im Boden und Veränderungen (in der Regel Erhöhung) des Porenwasserdrucks führen aufgrund der langsamen Konsolidation des Bodens und des zeitverzögerten Abbaus der Porenwasserüberdrücke zwangsläufig zu Setzungen nach Passage der Schildmaschine. Besonders bei feinkörnigen Böden treten diese erst weit nach Passage der Schildmaschine auf, da die Umlagerung der Wasserhüllen bzw. der Abbau des Porenwasserüberdrucks meist sehr lange dauert. Dadurch kann es Monate dauern, bis die Bodenbewegungen vollständig abgeklungen sind [48]. Die daraus resultierenden Setzungen werden als nachfolgende Setzungen bzw. Langzeitsetzungen bezeichnet. Sie nehmen in feinkörnigen Böden in der Regel logarithmisch mit der Zeit ab [111].

Die Konsolidationssetzungen aufgrund der Kompression des gestörten Bodens (auch als "broken zone" bzw. "remolded zone" bezeichnet) sind unvermeidbar, da sich ein störungsfreier Vortrieb nicht realisieren lässt.

Verformung der Tunnelauskleidung durch Langzeiteinflüsse

Verformungen der Tunnelauskleidung durch Langzeiteinflüsse wie Kriechen und Schwinden können ebenfalls zu den Setzungen beitragen. Sie haben jedoch heutzutage bei der im Schildvortrieb üblichen steifen Tübbingauskleidung des Tunnels nur noch einen untergeordneten Einfluss.

4.2.3 Einflussfaktoren

Wie eingangs erwähnt, wird das Setzungsverhalten darüber hinaus durch weitere Einflussfaktoren (bauverfahrenstechnische, geologische, hydrogeologische sowie projektspezifische Randbedingungen) bestimmt, die die Größe der erzeugten Setzungen übergeordnet in allen drei zuvor erwähnten Bohrphasen beeinflussen. Diese werden im Folgenden diskutiert.

4.2.3.1 Einflüsse der Stillstandszeiten und der Vortriebsgeschwindigkeit

Hinsichtlich der Größe der Setzungen beeinflussen auf Seiten der bauverfahrenstechnischen Faktoren neben den bereits erklärten Ursachen die Stillstandszeiten und die Vortriebsgeschwindigkeit die erzeugten Setzungen.

Während der Stillstandszeiten dringt zum einen die Suspension tiefer in den anstehenden Boden ein und überträgt damit den Stützdruck auf Bereiche, die weiter von der Ortsbrust entfernt sind und damit teilweise außerhalb des belastenden Bereichs liegen, zum anderen verformt sich der Boden während längerer Stillstandszeiten zunehmend in den ungestützten Steuerspalt entlang des Schildes.

Hinsichtlich der Abnahme des Stützdrucks zeigt Abbildung 4.5 die Abnahme der resultierenden Stützkraft in Abhängigkeit von der Eindringtiefe der Suspension. Die Eindringzeit hängt von der Durchlässigkeit des anstehenden Bodens ab und ist bei grobkörnigen Böden wesentlich geringer als bei feinkörnigen. Abbildung 4.6 zeigt dazu beispielhaft die Eindringzeit bei einem sandigen Boden mit einer Durchlässigkeit von k=10⁻⁴ m/s nach [1].

Die sich daraus ergebende Reduktion des Netto-Spannungszustands an der Ortsbrust führt zu einer Zunahme der Setzungen.



Abbildung 4.5: Verhältnis der resultierenden Stützkraft S zur ursprünglichen Stützkraft S₀ Eindringtiefe der Suspension nach [1]

Abbildung 4.6: Eindringtiefe der Suspension beim Hydroschildvortrieb in Abhängigkeit von der Zeit (Eindringtiefe e = 0) in Abhängigkeit von der bei einem Boden mit einer Durchlässigkeit von $k=10^{-4}$ m/s nach [1]

Bei einer durchschnittlichen Eindringzeit von einer Stunde, beispielsweise während des Ringbaus, ergibt sich somit bei gleich bleibendem Stützdruck bereits eine Reduktion der Stützkraft um ca. 11 %.

Ahnliches gilt auch für die Vortriebsgeschwindigkeit: Bei einem langsamen Vortrieb wird der Netto-Spannungszustand an der Ortsbrust durch ein weites Eindringen der Suspension in den Boden verringert. Des Weiteren verformt sich der Boden bei einer Reduktion der Vortriebsgeschwindigkeit zunehmend in den Steuerspalt und führt damit zu größeren Setzungen.

Hinsichtlich der Ringspaltverpressung führen Veränderungen der durchschnittlichen Vortriebsgeschwindigkeit aufgrund der in der Regel nicht angepassten Geschwindigkeit der Verpresspumpen zu einem geringen Verpressvolumen (bei einer Erhöhung der Vortriebsgeschwindigkeit) oder zu einer diskontinuierlichen Verpressung (bei einer Verminderung der Vortriebsgeschwindigkeit), da die Verpresspumpen bei Erreichen des Maximaldrucks abschalten und erst nach Erreichen des minimalen Drucks in den Leitungen wieder aktiviert werden.

4.2.3.2 Geologische Einflüsse

Die physikalischen Eigenschaften des Bodens, seine Verformungseigenschaften, die Durchlässigkeit, die Schichtzusammensetzung und evtl. Hindernisse haben entscheidenden Einfluss auf die Größe der verursachten Setzungen.

Bei den aufgefahrenen Bodenarten ist grundsätzlich zwischen feinkörnigen und grobkörnigen Böden zu unterscheiden (vgl. [21]). Grobkörnige Böden (Sande und Kiese) werden in der Regel nicht durch Veränderungen der Druckspannungen, sondern durch Scherungen (Schubspannungen) und Erschütterungen bzw. Vibrationen verdichtet. Feinkörnige Böden (Schluffe und Tone) reagieren bei Druckbelastung mit einer deutlichen, in der Regel zeitverzögerten Komprimierung und Verringerung des Porenraums.

Feinkörnige Böden

Bei feinkörnigen Böden treten in der Regel nur sehr geringe Bentonitverluste an der Ortsbrust auf. Der Stützdruck wird in der Regel über eine dünne membranartige Schicht, den so genannten Filterkuchen, übertragen. Der Filterkuchen resultiert hier aus einer Phasentrennung der Bentonitsuspension in Feststoffpartikel, die sich an der Grenzfläche ablagern, und Dispersionsmittel, welches in den Boden eindringt. Durch den Filterkuchen wird die wirksame Stützkraft der Bentonitsuspension als Flächenlast unmittelbar auf die Bodenmatrix übertragen.

Feinkörnige Böden neigen im Gegensatz zu grobkörnigen Böden in geringerem Maße zu einem Bodenaufbruch bzw. einem schlagartigen Abfließen der Suspension und des Verpressmörtels. Sie sind daher "toleranter" gegenüber aufgebrachtem Überdruck. Durch ggf. auftretendes Quellverhalten bei Entlastung durch den Vortrieb können Bodenmehrentnahmen bis zu einem gewissen Grade kompensiert werden.

Veränderungen des Porenwasserdrucks können aufgrund der geringen Durchlässigkeit solcher Böden nur langsam abgebaut werden.

Der Anteil der Langzeitsetzungen bei feinkörnigen Böden ist aufgrund der langsamen Veränderungen des Porenwasserdrucks wesentlich größer als der bei grobkörnigen Böden. Die Konsolidierungszeit ist umso länger, je schlechter das überschüssige Wasser abströmen kann.

Wie unter Punkt 4.2.3.4 (S. 57) gezeigt wird, ist der Einfluss der Überdeckung bei feinkörnigen Böden größer.

Das Verhalten feinkörniger Böden hängt zudem vom Konsolidierungsgrad, d.h. dem Verhältnis zwischen der Spannung der geologischen Vorbelastung und dem vorhandenen Überlagerungsdruck ab [111]. Böden, die in ihrer Belastungsgeschichte bereits höheren Lasten als der augenblicklichen ausgesetzt wurden, bzw. deren Porenraumgröße nicht der aktuellen wirksamen Vertikalspannung entspricht, bezeichnet man als überkonsolidiert. Solche Böden verhalten sich bei Spannungsveränderungen stets steifer als vergleichbare normalkonsolidierte Böden und sind weniger setzungsanfällig.

Grobkörnige Böden

In grobkörnigen Böden, deren Poren größer sind als die Feststoffpartikel in der Suspension, wird der Stützdruck anhand der bei der Infiltration des Stützmediums entstehenden Schubspannungen auf die einzelnen Bodenkörner übertragen. Die Stützkraft der Bentonitsuspension wirkt damit nicht als Flächenlast an der Ortsbrust, sondern wird entlang der Eindringtiefe der Suspension übertragen.

Die Ortsbruststützung hat entscheidenden Einfluss auf die Gesamtgröße der Setzungen. Ein zu niedriger Stützdruck kann dazu führen, dass der Boden nahezu unkontrolliert in die Abbaukammer "fließt" und Mehrentnahmen sowie vergrößerte Setzungen die Folge sind [88].

Erhöhungen des Porenwasserdrucks durch in den Boden eindringende Suspension kann insbesondere bei kohäsionslosen grobkörnigen Böden, die von wesentlich kohäsiveren feinkörnigen Böden umgeben sind, durch die Verminderung der effektiven Korn-zu-Korn-Spannungen zu einer "Verflüssigung" des Bodens und damit ebenfalls zu nahezu unkontrollierten Bodenmehrentnahmen führen.

Hohe Suspensions- oder Verpressmörtelüberdrücke führen in der Regel zu steigenden Flüssigkeitsverlusten und können ggf. ein Aufbrechen des Bodens verursachen.

Der Anteil der Langzeitsetzungen in grobkörnigen Böden ist eher gering, da aufgrund der hohen Durchlässigkeit solcher Böden die Setzungen sehr schnell abklingen.

Bei eher grobkörnigen Böden hat zudem die Lagerungsdichte Einfluss auf das Verhalten des Bodens. Bei dichter Lagerung treten im Allgemeinen geringere Setzungen auf. Scherbeanspruchungen können mitunter sogar zu Volumenvergrößerungen führen und die Spannungs-Verformungsbeziehungen sind annähernd linear [88].

4.2.3.3 Hydrogeologische Einflüsse

Bei den hydrogeologischen Einflüssen ist in erster Linie der anstehende Porenwasserdruck zu nennen, der maßgeblich für die Bemessung des Stützdrucks und des Drucks der Ringspaltverpressung ist. Eine Erhöhung des Porenwasserdrucks durch den Schildvortrieb kann zudem die effektiven Spannungen (Korn-zu-Korn-Spannungen) im Boden verringern und zu Bodenmehrentnahmen führen.

4.2.3.4 Projektspezifische Randbedingungen

Die setzungsrelevanten projektspezifischen Randbedingungen bei Schildvortrieben sind:

- Durchmesser des Tunnels
- Überdeckung
- Schildkenndaten (Schneidradgestaltung, etc.)
- Gradienten- und Trassierungsverlauf

Entscheidend für die Größe der Setzungen ist in erster Linie das Verhältnis zwischen dem Durchmesser (*D*) des Tunnels und der anstehenden Überdeckung (*H*).

Abbildung 4.7 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Verhältnis *H/D* und den gemessenen Setzungen für feinkörnige und grobkörnige Böden nach [48]. Die durchschnittlichen Setzungen nehmen, wie zu sehen ist, bei zunehmender Überdeckung ab. Feinkörnige Böden neigen bei geringen Überdeckungen grundsätzlich zu größeren Setzungen als grobkörnige Böden, bei großen Überdeckungen kehrt sich das Verhältnis um.



Abbildung 4.7: Zusammenhang zwischen dem Verhältnis der Überdeckung zum Tunneldurchmesser und den gemessenen Setzungen beim Schildvortrieb in Abhängigkeit von der Bodenart nach [48]

Die Schildkenndaten sind sekundäre Einflussfaktoren und von geringerem Interesse. Sie beeinflussen teilweise die Auswirkungen der Vortriebssteuerung auf die Setzungen. Zum Beispiel können weitestgehend geschlossene Schneidräder im Gegensatz zu offenen Schneidsternen die Setzungen vermindern, da aufgrund der zusätzlichen mechanischen Abstützung des Bodens an der Ortsbrust die Veränderungen des Netto-Spannungszustandes in der Regel geringer ausfallen.

Weitere Schildkenndaten sind z.B. die Schildmanteldicke und die Länge des Schildes, die ebenfalls im Rahmen der Ringspaltverpressung bzw. der Auswirkungen der Steuerbewegungen einen Einfluss auf das Setzungsverhalten haben können. Die Einflüsse sind aber ebenfalls nur von geringem Interesse, da die Schildmanteldicke projektübergreifend nur gering variiert und das Verhältnis Schilddurchmesser zu Schildlänge projektübergreifend auch weitestgehend konstant ist.

Daneben spielt auch der Gradientenverlauf eine Rolle, da der Verlauf der Trasse die notwendigen Steuerbewegungen und damit die Größe der verursachten Bodenverdrängungen beeinflusst.

4.3 Analyse des Setzungsverlaufs eines Punktes an der Geländeoberfläche

4.3.1 Aufteilung der Setzungsbereiche

Wie bereits bei der Beschreibung der unterschiedlichen Ursachen für die Setzungen deutlich wurde, lässt sich der Verlauf der Setzungen in den einzelnen Bereichen grundsätzlich getrennt beschreiben. Die Setzungen vor der Passage der Schildmaschine werden im Wesentlichen durch den Stützdruck bestimmt, die Setzungen während der Passage durch die Schildgeometrie, die Setzungen nach der Passage im Wesentlichen durch die Ringspaltverpressung.

Auch wenn im konventionellen Tunnelbau bei Untersuchungen unterschiedlicher Projekte festgestellt wurde, dass die vorauseilenden Setzungen proportional zu den Endsetzungen sein können, dass die Setzungsgeschwindigkeit am Anfang der Setzungsmessung proportional zu den maximalen Setzungen sein kann und dass die Setzungsgeschwindigkeit am Anfang der Setzungsmessung proportional zur Setzungsgeschwindigkeit gegen Ende der Setzungsmessung sein kann (Komi (1981), Yoshikawa (1983) und Ohokawa (1992), in englischer Sprache zusammengefasst in [53]), zeigte sich bei Untersuchungen der Daten der Referenzprojekte für den Schildvortrieb kein ausreichender Zusammenhang zwischen den Parametern der unterschiedlichen Setzungsbereiche, bzw. zwischen den vorauseilenden und den nachfolgenden Setzungen im Einflussbereich der Schildmaschine (siehe auch [91]).

Bei einer getrennten Behandlung der Bereiche gehen daher keine Informationen hinsichtlich möglicher Zusammenhänge verloren, die Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten der Regeln kann aber durch die Aufteilung deutlich reduziert werden. Auf die Problematik hinsichtlich der Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten wird in Kapitel 5.1.3 (S. 70) noch genauer eingegangen.

Die gesonderte Berücksichtigung des Bereichs der Schildpassage bzw. eine Aufteilung der Ursachen in drei Bereiche, Schildpassage, Ringspaltverpressung und nachfolgenden Setzungen, ist nicht erforderlich. Zum einen lassen sich die Setzungen in dem Bereich der Schildpassage bei heutigen Schildmaschinen ohnehin nicht aktiv steuern, zum anderen lassen sie sich, wie bei vorherigen Untersuchungen des Autors festgestellt wurde, aufgrund der kurzen Zeit, die die Schildmaschine in der Regel für die Passage eines Messpunktes benötigt, und den sich überlagernden Einflussbereichen der Ortsbruststützung und der Ringspaltverpressung auch nicht exakt zuordnen [83].

4.3.2 Anfang und Ende der Setzungsbewegung

Als Setzungsverlauf wird hier die zeitliche Abfolge der Setzungsmessungen eines Punktes auf der Geländeoberfläche bezeichnet.

Bei der Betrachtung der Setzungsmesswerte eines solchen Messpunktes in Abhängigkeit von der Entfernung zur Schildmaschine zeigt sich der unten beispielhaft dargestellte annähernd gespiegelt s-förmige Kurvenverlauf. Dieser Verlauf wurde auch in anderen Studien bestätigt (siehe z.B. [26],[62],[97]).



Abbildung 4.8: Beispielhafte Abbildung des Setzungsverlaufs eines Messpunktes, Daten des Referenzprojektes Pannerdenschkanal

Wie zu sehen ist, beginnen die Setzungsbewegungen bereits vor Eintreffen der Schildmaschine an dem betrachteten Punkt (hier: ca. 17 m vorher, bei 13,5 m Überdeckung in grobkörnigen Böden). Auch nach Passage der Schildmaschine beeinflusst das Vortriebsgeschehen den Verlauf der Kurve. Erst nach einem gewissen Abstand stellt sich ein annähernd konstanter Verlauf ein, der das Ende der Setzungsbewegung kennzeichnet.

Zur Berechnung der Setzungen eines Punktes ist dementsprechend nicht nur der Vortriebsprozess während der Unterfahrung dieses Punktes relevant, sondern der gesamte Prozess während der Annäherung, der Passage und der Entfernung der Schildmaschine von dem betrachteten Punkt, solange die Schildmaschine sich im Einflussbereich des jeweiligen Punktes befindet. Die Einflüsse und Ursachen für die Setzungen müssen daher in jedem Zeitintervall erfasst und daraus entsprechend der Dauer des Intervalls sowie dem jeweiligen Abstand zu dem betrachteten Punkt auf der Geländeoberfläche die resultierenden Veränderungen des Setzungsverhaltens prognostiziert werden.

Nach Studien in [16] schwankt dieser Einflussbereich des Schildvortriebs abhängig von der Geologie zwischen 30° und 50° bei grobkörnigen Böden und um 45° bei feinkörnigen Böden. Vergleichbare Werte für den Einflussbereich in Abhängigkeit von der Überdeckung

wurden auch in [26] ermittelt. Der Einflussbereich betrug dort für grobkörnige Böden die 0,85-fache Überdeckung für die vorauseilenden Setzungen und 1,1- bis 2,25-fache Überdeckung für die nachfolgenden Setzungen. Das Abklingen der nachfolgenden Setzungen kann allerdings, abhängig vom anstehenden Boden, auch deutlich langsamer ausfallen, so dass auch weit nach Passage der Schildmaschine noch Setzungsbewegungen gemessen werden (z.B. bis zu 50 m nach der Passage bei unterschiedlichen Projekten in [4] oder bis zu 75 m in [43]).

Für die Prognose der Setzungen wird daher im Rahmen dieser Arbeit für die vorauseilenden Setzungen von dem maximalen Einflussbereich von 30° ausgegangen. Für die nachfolgenden Setzungen wird hier der Bereich bis zu 100 m nach Passage der Schildmaschine betrachtet, um nicht aufgrund einer zu engen Wahl des Einflussbereiches Informationen bezüglich der Setzungsbewegungen zu verlieren (siehe Abbildung 4.9).



Abbildung 4.9: Maximaler betrachteter Einflussbereich der Schildmaschine

4.4 Analyse der Setzungsmulde quer zur Tunnelachse

Für die Berechnung einer dreidimensionalen Setzungsmulde ist auch der Setzungsverlauf quer zur Tunnelachse von Bedeutung. Da dieser Verlauf und damit die Schiefstellung bzw. Winkelverdrehung an der Geländeoberfläche für die eventuelle Beschädigung von Gebäuden und Infrastruktureinrichtungen entscheidend ist, existieren bereits eine Reihe von Verfahren, die diesen Verlauf in Abhängigkeit der Setzungsmesswerte auf der Tunneltrasse und der Tiefenlage des Tunnels beschreiben. Diese basieren im Wesentlichen auf der von Martos [74], Peck [88] und Schmidt [105] vorgeschlagenen Gauß'schen Normalverteilungskurve.

4.4.1 Funktionale Beschreibung der Setzungsmulde

Die Funktion zur Beschreibung der Setzungsmulde hat analog der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Gauß'schen Normalverteilung die Form:

$$s = s_{\max} \cdot e^{\frac{x_q^2}{2 \cdot i^2}}$$
 (4.2)

mit:

s : Verlauf der Setzungen quer zur Tunnelachse [mm]

 s_{max} : Betrag der maximalen Setzungen über der Tunnelachse [mm]

 x_q : Abstand quer zur Tunnelachse [m]

i : Abstand des Flexionspunktes von der Tunnelachse [m]

Dieser empirisch ermittelte Funktionsverlauf wurde durch zahlreiche in situ Messungen, Modellversuche und FEM-Berechnungen bestätigt (z.B. [43], [72]).

4.4.2 Bestimmung des Flexionspunktes

Maßgeblich für den Kurvenverlauf ist der Abstand zwischen der Tunnelachse und dem Flexionspunkt *i*. Anhand von Versuchen wurde bestätigt, dass die Entfernung dieses Punktes von der Tunnelachse unabhängig von der Größe der verursachten Setzungen oder den Bodenmehrentnahmen ist [30]. Zur Berechnung existieren eine Reihe unterschiedlicher Ansätze, die abhängig von der jeweiligen Geologie und den Projektrandbedingungen zu unterschiedlich guten Ergebnissen führen.

Peck entwarf im Rahmen seines Verfahrens zur Berechnung der Setzungen Diagramme, aus denen der Parameter *i* in Abhängigkeit von der relativen Tiefenlage des Tunnels und dem anstehenden Boden abgelesen werden kann. Diese auf in situ gemessenen Setzungen basierenden Diagramme wurden bereits im Rahmen der empirischen Rechnungsverfahren vorgestellt (siehe Abbildung 2.6, Kapitel 2.3.1, S. 18).

Auch andere Autoren haben empirische Werte für den Abstand *i* ermittelt. Die gängigen Verfahren sind in der folgenden Übersicht dargestellt (siehe Tabelle 4.1). Während die Verfahren 1 bis 5 rein empirisch sind und auf gemessenen Setzungen beruhen, liegen dem sechsten Verfahren, der Grenzwinkeltheorie, analytische Überlegungen zu Grunde. Nach der Grenzwinkeltheorie bzw. unter der Annahme, dass der gesamte Bruchkörper plastifiziert ist (Rankine scher Zustand), lässt sich der Abstand i in Abhängigkeit von dem inneren Reibungswinkel des anstehenden Bodens berechnen. Der Grenzwinkel gibt die maximale Reichweite der Senkungsmulde an. Allerdings ist der zur Berechnung des Grenzwinkels notwendige innere Reibungswinkel des Bodens in der Praxis nur schwer zu bestimmen, so dass sich dieses Verfahren in seiner Genauigkeit nicht von denen mit empirisch ermittelten Flexionspunkten unterscheidet.

Tabelle 4.1: Übersicht über die Verfahren zur Bestimmung des Abstandes des Flexionspunktes i von der Tunneltrasse bei Annahme einer Gauß schen Normalverteilungskurve zur Beschreibung des Setzungsverlaufs quer zur Tunnelachse

Nr.	Modell		Boden	Basierend auf
1	nach O'Reilly und New (1982) [87]: $i = 0, 43 \cdot z_0 + 1, 1 \approx 0, 5 \cdot z_0$ $i = 0, 28 \cdot z_0 - 0, 1 \approx 0, 25 \cdot z_0$	(4.3) (4.4)	Feinkörnig Grobkörnig	Praxisergebnissen
2	nach Clough und Schmidt (1982) [17]: $i = \frac{D}{2} \cdot \left(\frac{z_0}{D}\right)^{0.8}$	(4.5)	Tonig	Praxisergebnissen
3	nach Mair et al. (1993) [72]: $i = z_0 \cdot \left[0,175 + 0,325 \cdot \left(1 - \frac{z}{z_0} \right) \right]$	(4.6)	Tonig	Modellversuchen
4	nach Moh et al. (1996) [78]: $i_{z} = \frac{D}{2} \cdot \left(\frac{z_{0}}{D}\right)^{0.8} \cdot \left(\frac{z_{0} - z}{z_{0}}\right)^{m}$ $m \approx 0,4 \text{ sandiger Boden}$ $m \approx 0,8 \text{ toniger Boden}$	(4.7)	Sandig / Tonig	Modellversuchen
5	nach Lee et al. (1999) [61]: $i = 0, 29 \cdot (z - z_0) + 0, 5 \cdot D$	(4.8)	Tonig	Modellversuchen
6	Grenzwinkeltheorie nach Jancecz (2001) [43]: $i = \frac{1}{3} \cdot \left[\frac{D}{2 \cdot \sin(\beta)} + (H - z) \cdot \frac{1}{\tan(\beta)} \right]$ wobei $\beta = 45^{\circ} + \frac{\varphi}{2}$	(4.9)	Kohäsionslos	Analytisches Ver- fahren
	mit: H : Überdeckung des Tun D : Tunneldurchmesser [$z_0 = H + \frac{D}{2}$: Überdeckung der Tun z : betrachtete Tiefenlag β : Grenzwinkel[°] φ : innere Reibungswink	nnels [m] m] nelachse [m] e [m] el des Bodens	;[°]	

4.4.3 Vergleich der Berechnungsverfahren

Abbildung 4.10 zeigt einen Vergleich der unterschiedlichen funktionalen Beschreibungen des Setzungsverlaufs mit in situ aufgenommen Messdaten des Referenzprojektes. Dabei ist hier zur besseren Übersicht nur ein charakteristischer Messquerschnitt in dem überwiegend sandigen Boden des Referenzprojektes gezeigt.



Abbildung 4.10: Vergleich der unterschiedlichen funktionalen Beschreibungen der Setzungsmulde quer zur Tunnelachse mit Messdaten des Referenzprojektes in überwiegend sandigem Boden. Anmerkung: Das Verfahren nach Moh et al. ist für z = 0 (Geländeoberfläche) identisch mit dem von Clough und Schmidt

Wie zu sehen ist, unterscheiden sich die Verfahren zum einen von Peck sowie O'Reilly und New und zum anderen die Verfahren von Clough und Schmidt, Mair und Lee bei den vorliegenden Böden nur geringfügig. Die Verfahren von Peck und O'Reilly und New korrespondieren hier gut mit dem tatsächlich gemessenen Setzungsverlauf des Hydroschildvortriebs. Die Differenzen zwischen den Kurvenverläufen liegen innerhalb der Streuung der Messergebnisse und erlauben keine eindeutige Einschätzung, welcher Verlauf für diese Projektrandbedingungen realistischer ist.

Zur Berechnung der Setzungsmulde quer zur Tunnelachse wird im Folgenden der Verlauf nach O'Reilly und New als Ausgangsverlauf (bzw. Initialverlauf) gewählt, da bei diesem die Bestimmung des Flexionspunktes im Gegensatz zu dem Verfahren von Peck formelmäßig beschrieben ist und nicht in Abhängigkeit von Diagrammen bestimmt werden muss.

Die Lage des Flexionspunktes ist allerdings immer auch von den jeweiligen projekt- und situationsspezifischen Randbedingungen abhängig und kann sich dementsprechend verschieben [123]. Die genannten Berechnungsverfahren müssen daher nicht zwangsläufig einen adäquaten bzw. best angepassten Verlauf für alle zukünftigen Projekte ergeben.

Daher wird der Funktionsverlauf im Rahmen der vortriebssynchronen Berechnung der Setzungsmulde erweitert und hier zusätzlich ein Korrekturfaktor eingeführt. Dieser ermöglicht es, projektabhängige und situationsspezifische Erfahrungen zu berücksichtigen und die Lage des Flexionspunktes anzupassen, falls abweichende Messwerte vorliegen. Dadurch können die Verläufe der Setzungsmulde mit einfachen statistischen Kurvenanpassungsverfahren an wechselnde Randbedingungen angepasst und auch bei zukünftigen Projekten mit abweichender Geologie eingesetzt werden:
$i = (0, 43 \cdot z_0 + 1, 1) \cdot k_i$	feinkörnige Böden	(4.10)
$i = (0, 28 \cdot z_0 - 0, 1) \cdot k_i$	grobkörnige Böden	(4.11)
mit		

 k_i : Korrekturfaktor zur Anpassung des Setzungsverlaufs an die gemessenen Werte [-]

= 1 bis andere Werte vorliegen

Mit Hilfe dieses modifizierten Abstandes des Flexionspunktes wird im Folgenden die Setzungsmulde quer zur Tunnelachse aus den mit Hilfe des Neuro-Fuzzy-Modells prognostizierten Setzungen über der Tunneltrasse anhand der Gauß'schen Normalverteilungskurve (siehe Formel 4.2, S.61) unter Berücksichtigung der zuletzt gemessenen Setzungsmulde berechnet.

4.5 Zusammenfassung

Für die horizontalen und vertikalen Bodenbewegungen, die die Setzungen verursachen, sind verschiedene, sich gegenseitig überlagernde Ursachen aus dem Vortriebsgeschehen und der Interaktion mit dem umgebenden Boden verantwortlich (siehe Abbildung 4.1, S. 47). Maßgeblich sind in erster Linie die Spannungsveränderungen und Gefügeumlagerungen an der Ortsbrust und im Bereich des Ringspaltes. Die Zusammenhänge, die die Grundlage zur Formulierung der Regelbasis bilden, wurden umfassend dargestellt.

Hinsichtlich der Einflussfaktoren (siehe Aufzählung S. 48) konnte festgestellt werden, dass die Größe der verursachten Bodenbewegung während des Vortriebs in erster Linie von der anstehenden Geologie (Unterscheidung zwischen feinkörnigen und grobkörnigen Böden) und dem Bauablauf (Vortriebsgeschwindigkeit, Stillstände) beeinflusst wird. Maßgeblichste projektspezifische Randbedingung ist das Verhältnis von Durchmesser zu Überdeckung.

Auf die Berücksichtigung der untergeordneten Einflüsse (Variation der Schubspannungen entlang des Schildmantels, Verformung der Tunnelauskleidung, Verformung des Schildmantels, die Schneidradgestaltung, etc.) wird hier unter der Annahme, dass sie auch in Summe keinen signifikanten Einfluss auf das Setzungsverhalten haben, verzichtet. Eine Reduktion auf die maßgeblichen Einflüsse wird aufgrund der begrenzten Anzahl an Datensätzen, die zur Bestimmung des Setzungsverhaltens vorliegen, als zielführende Strategie erachtet, da mit steigender Anzahl von Freiheitsgraden die Gefahr steigt, dass kein Lernerfolg mit Hilfe des KNN erzielt werden kann.

Das derzeitige Setzungsverhalten eines Punktes an der Geländeoberfläche ist das Resultat einer Reihe akkumulierter Einflüsse und kann nicht basierend auf den momentanen Einstellungen des Vortriebsprozesses beschrieben werden, vielmehr gilt es, jeweils die Veränderungen des Setzungsverhaltens, basierend auf den aktuellen Einstellungen des Vortriebsprozesses, zu erfassen und diese zu einem Gesamtsetzungsverhalten zu addieren.

Der Setzungsverlauf kann analog zu den beiden Schlüsselstellen zur Vermeidung der Setzungen, der Ortsbruststützung und der Ringspaltverpressung grundsätzlich in zwei verschiedene Bereiche aufgeteilt (vor und nach der Passage des Schneidrades) werden.

Für die Berechnung des Setzungsverlaufs in Querrichtung ist keine fuzzy-logische Auswertung der Daten erforderlich, da bereits hinreichend genaue funktionale Modelle zur Berechnung dieser Setzungsmulde, basierend auf den Setzungen auf der Tunnelachse, vorliegen. Diese konnten durch die Einführung eines Korrekturfaktors zur Verschiebung des Flexionspunktes für eine vortriebssynchrone Berechnung der Setzungsmulde erweitert werden (siehe Formel 4.10 und 4.11, S. 64). Die Integration einer Komponente zur Erfassung des Setzungsverlaufs quer zur Tunnelachse in der Regelmatrix würde hier die Anzahl der Regeln und damit der Freiheitsgrade nur unnötig vergrößern.

5 Neuer Ansatz zu einer neuro-fuzzy-basierten Prognose der Setzungen

5.1 Grundkonzept

Basierend auf den bisherigen Erkenntnissen hinsichtlich der Interaktion zwischen Schildvortrieb und Setzungen sowie deren vortriebsbegleitende Berechnung, wird hier ein neues Verfahren zur vortriebssynchronen Prognose der Setzungen entwickelt.

Kernpunkte dabei sind, dass die vor Ort vorhandenen Informationsquellen zur Berechnung der aktuellen Setzungsmulde genutzt werden und dass eine ständige Rückkopplung zwischen den gemessenen und den berechneten Setzungen erfolgt.

Hinsichtlich der Prozessdaten sollen hier neben den aktuellen Vortriebsdaten auch "externe Daten", wie z.B. vor Prozessbeginn festgelegte Richtwerte, Daten der statischen Berechnungen oder auch einfache geologische Daten, herangezogen werden. Daneben werden die Vermessungsdaten, d.h. die Setzungsmessungen sowie die hydrologischen Messdaten, berücksichtigt. Als Grundlage dienen die vorgestellten Neuro-Fuzzy-Theorien und die bisherigen Untersuchungen des Setzungsverhaltens.

5.1.1 Aufbau

Abbildung 5.1 zeigt den schematischen Aufbau des Systems zur vortriebssynchronen Setzungsprognose.



Abbildung 5.1: Schematischer Aufbau des neuen Systems zur Prognose der Setzungen

Die aufgenommenen, teilweise mit Messfehlern behafteten Prozessdaten werden zunächst zur Verarbeitung aufbereitet, d.h. offensichtliche Abweichungen werden korrigiert oder aussortiert.

Anschließend werden die das jeweilige Szenario beschreibenden Daten fuzzy-logisch ausgewertet. Die fuzzy-logische Regelbasis enthält eine Beschreibung der Interaktion zwischen Schildvortrieb und Setzungen und wurde anhand des vorhandenen, teilweise vagen Wissens über die Setzungsursachen formuliert.

Das KNN wird zur adaptiven Verbesserung der Regeln und der Zugehörigkeitsfunktionen eingesetzt und soll diese vortriebsbegleitend modifizieren. Sobald neue Setzungsmessdaten vorhanden sind, wird die Interaktion zwischen den im letzten Messintervall aufgezeichneten Prozessdaten und den gemessenen Setzungen neu "gelernt" und die vorhandene Wissensbasis damit verbessert. Dadurch wird es ermöglicht, das Setzungsverhalten basierend auf dem in der Praxis vorhandenen Expertenwissen zu beschreiben und die zugrunde liegenden Regeln und Zugehörigkeitsfunktionen zur Beschreibung der Interaktion zwischen Schildvortrieb und Setzungen automatisch an die wechselnden in situ Verhältnisse anzupassen. Die zunächst statische Regelbasis kann somit nicht nur an die jeweiligen Projektrandbedingungen, sondern auch dynamisch an die jeweiligen situationsspezifischen Bedingungen angepasst werden.

Auch langfristige Veränderungen, die zu einem veränderten Setzungsverhalten führen, wie:

- Veränderungen der äußeren Randbedienungen (z.B. der Geologie/Hydrologie)
- Veränderungen der Maschine (z.B. durch im Projektverlauf zunehmende Abnutzung der Werkzeuge sowie des Schneidrades)
- Veränderungen der Betriebsweise (z.B. durch Modifikation einzelner Prozessabläufe sowie durch den "Lerneffekt" bzw. die im Projektverlauf zunehmende Effektivität der Vortriebsmannschaft)

können durch die ständige Anpassung der Wissensbasis an die gemessenen Setzungen kompensiert werden.

Der Setzungsverlauf quer zur Tunnelachse wird funktional beschrieben und mit statistischen Verfahren ebenfalls vortriebssynchron an gemessene Werte angepasst. Aus den Ergebnissen der fuzzy-logischen Auswertung wird dabei mit Hilfe der in Kapitel 4.4.3 (S. 64) bestimmten Funktion eine dreidimensionale Setzungsmulde berechnet. Sobald während eines Vortriebs Setzungsmesswerte von Punkten neben der Tunneltrasse vorliegen, wird der Verlauf der Setzungsmulde ggf. modifiziert und die Funktion an die gemessenen Werte angepasst. Dabei wird der optimale Korrekturfaktor automatisch mit einer nicht-linearen Minimierung der Fehlerquadrate zwischen dem gemessenen und dem berechneten Verlauf der Setzungsmulde bestimmt.

Neben den Ergebnissen der Prognose werden zusätzlich ggf. vorhandene Setzungsmessungen angezeigt. Beim zukünftigen Einsatz während eines Vortriebs soll in den Phasen ohne Setzungsmessungen die Setzungsmulde allein auf Basis der Prozessdaten prognostiziert werden. Diese Phasen stellen aufgrund der großen Entfernung zwischen den einzelnen Messpunkten und den großen zeitlichen Abständen zwischen den einzelnen Messungen den überwiegenden Teil einer Schildfahrt dar.

5.1.2 Details zur Prognose des Setzungsverhaltens und zur adaptiven Verbesserung der Wissensbasen

Aufgrund des Setzungsverlaufs bzw. der erwähnten Ausbreitung der Setzungseinflüsse wird die gesamte Geländeoberfläche über der Tunneltrasse in Längsrichtung in einem Raster von 2 m in diskrete Punkte unterteilt, die jeweils einzeln ihre "Einflussgeschichte" bzw. die unterschiedlichen Auswirkungen auf das Setzungsverhalten bei Annäherung der Schildmaschine speichern, sobald sie sich im Einflussbereich der Schildmaschine befinden.

Um die Setzungen bzw. die Veränderungen des Setzungsverhaltens in der Lernphase unabhängig vom zeitlichen Abstand der Messungen ermitteln zu können, wird als Ausgangsparameter die Veränderung der Setzungen pro Zeitintervall für jeden einzelnen Punkt bestimmt. Die Gesamtgröße der jeweiligen Setzungen eines Punktes ergibt sich also durch die Addition der einzelnen Terme, jeweils multipliziert mit der Dauer des entsprechenden Zeitintervalls.

$$s_{Messpunkt\,x,aktuell} = \sum_{i=t_0}^{t_{aktuell}} \Delta s_i \cdot \Delta t_i$$

mit:

 Δs_i

: Veränderung des Setzungsverhaltens im Zeitintervall i $\left\lceil \frac{mm}{m} \right\rceil$

(5.1)

 Δt_i : Zeitintervall [h]

Für die Lernphase beim Einsatz des KNN entspricht dieses Zeitintervall dem zeitlichen Abstand der Setzungsmessungen, da nur zu diesen Zeitpunkten neue Informationen hinsichtlich der Auswirkungen des Vortriebs aufgenommen werden.

Die Trainingsdaten, die zur Anpassung der Regelbasen und der Zugehörigkeitsfunktionen verwendet werden, bestehen aus vollständigen Datensätzen, das heißt Prozess- und Setzungsdaten der zurückliegenden Vortriebsintervalle. Um solche vollständigen Datensätze zu erhalten, müssen die aufgezeichneten Vortriebsdaten für die Lernphase in den jeweiligen Intervallen der Setzungsmessung gemittelt werden. Es ist nicht möglich, im 10-Sekunden-Takt aufgezeichnete Maschinendaten mit im 3-Stunden-Takt aufgezeichneten Setzungsmessungen direkt zu kombinieren. Die Anzahl der Datensätze in der Trainingsund Testphase wird daher durch die Anzahl der vorhandenen Setzungsmessungen bestimmt. Abbildung 5.2 verdeutlicht den schematischen Ablauf der adaptiven Verbesserung der Wissensbasen und der Berechnung der Setzungsmesswerte.



Abbildung 5.2: Schematischer Ablauf der adaptiven Verbesserung der Fuzzy-Wissensbasen in der Lernphase des KNN für die Berechnung der Setzungswerte eines Messpunktes

Da mit Hilfe des KNN die Veränderungen der Setzungen bezogen auf die Länge des Zeitintervalls gelernt werden, sind die Zeitintervalle bei der Prognose der Setzungen frei wählbar.

Die notwendige Mittellung der Setzungen in jedem Messintervall in der Lernphase stellt allerdings eine abschnittsweise Linearisierung des Setzungsverlaufs dar. Dies entspricht nicht dem in Abhängigkeit von der Zeit hyperbolischen Verlauf der Setzungen (vgl. [23]). Der daraus resultierende Fehler ist jedoch vernachlässigbar klein, wie eine Fehlerrechnung im Anhang (Kapitel 11.1, S. 159) zeigt.

Zur Beschreibung des Setzungsverhaltens werden analog der Erkenntnisse in Kapitel 4.3.1 (S. 58) zwei unabhängige Fuzzy-Systeme für den Bereich der vorauseilenden und den Bereich der nachfolgenden Setzungen erstellt. Die Gesamtsetzungen ergeben sich dann aus der Addition der Setzungsanteile.

5.1.3 Begrenzung der Anzahl der Regeln

In der vorliegenden Software, die in Kapitel 5.5 (S. 96) noch näher beschrieben wird, müssen aufgrund des verwendeten KNNs alle Kombinationsmöglichkeiten bzw. alle theoretisch möglichen Regeln definiert sein [75]. Ihre Anzahl (*n*) ergibt sich daher aus der Multiplikation aller linguistischen Terme (*I*), das heißt, aller sprachlich formulierten Ausprägungen zur Beschreibung des jeweiligen Parameters (*p*):

$$n = \prod_{p=1}^{p_{\text{max}}} l_p \tag{5.2}$$

Die Anzahl der Regeln ist gleichbedeutend mit der Anzahl der Freiheitsgrade, die durch das KNN bestimmt werden müssen. Je größer diese Anzahl an Freiheitsgraden, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass bei vorgegebener Anzahl an Daten kein Trainingserfolg erzielt werden kann bzw. desto mehr Daten sind zum Trainieren des Netzwerkes erforderlich. Bei der Beschreibung des Setzungsverhaltens gilt es daher, alle Einflüsse zu berücksichtigen und gleichzeitig die Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten möglichst gering zu halten. Dies kann durch eine adäquate Kombination der unterschiedlichen Einflüsse zu einem Parameter bzw. durch die Kondensierung zu maßgeblichen (fiktiven) Parametern und durch die bereits erwähnte Unterteilung in einzelne Fuzzy-Systeme geschehen.

5.1.4 Vorgehen zur Entwicklung der Fuzzy-Systeme

Abbildung 5.3 zeigt den grundlegenden Aufbau der Fuzzy-Systeme und die einzelnen, zur Entwicklung des Systems notwendigen Schritte.



Abbildung 5.3: Teilschritte zur Entwicklung der Fuzzy-Systeme

Auf die Modellierung der adaptiven Verbesserung der Fuzzy-Systeme wird in Kapitel 5.5.3 eingegangen.

5.2 Definition der maßgebenden Eingangsparameter

Einer der wichtigsten Schritte in der Entwicklung der Fuzzy-Regelbasen ist die Definition der Eingangsparameter. Die Eingangsparameter dienen zur Beschreibung der in Kapitel 4 (S. 46ff.) definierten maßgeblichen Ursachen und Einflussfaktoren für die Setzungen anhand der vor Ort vorhandenen Prozessdaten. Auf die zur Beschreibung des Setzungsverhaltens zur Verfügung stehenden Prozessdaten wurde in Kapitel 2.2 (S. 9ff.) eingegangen. Anhand dieser Eingangsparameter wird später die Interaktion zwischen Schildvortrieb und Bodenbewegungen beschrieben.

Die Aufteilung bei der Definition der Eingangsparameter erfolgt analog zu der in Kapitel 4: Zuerst werden Eingangsparameter für die Ursachen der Setzungen in den einzelnen Phasen des Bohrprozesses definiert und anschließend für die Einflussfaktoren, die die Setzungen zwar nicht verursachen, aber ihre Größe beeinflussen.

5.2.1 Definition der Eingangsparameter zur Beschreibung der Setzungsursachen vor Passage des Schneidrades

Gemäß Kapitel 4.2.2.1 (S. 48ff.) sind die bauverfahrenstechnischen Ursachen für die vorauseilenden Setzungen:

- Änderungen des primären Spannungszustands
- Bodenmehrentnahmen

5.2.1.1 Änderungen des primären Spannungszustands

Zur Bewertung der Änderung des Spannungszustands müssen zum einen der ursprüngliche Spannungszustand und zum anderen der aktuell vorhandene Netto-Spannungszustand ermittelt werden.

Vorhandener Netto-Spannungszustand

Der maßgebliche minimale Netto-Spannungszustand an der Ortsbrust ergibt sich aus dem Stützdruck in der Firste unter Vernachlässigung des Anpressdrucks des Schneidrades. Er kann daher entweder direkt anhand der Drucksensoren in der Abbaukammer oder aus dem Luftpolsterdruck, dem Bentonitspiegel und der Dichte des Boden-Suspensions-Gemisches in der Abbaukammer bestimmt werden.

Aufgrund der Ausführungen in Kapitel 2.2.2.2 (S.12), hinsichtlich der Genauigkeiten der Druckmessdosen in der Abbaukammer, wurden die Drücke der Messdosen nicht zur Berechnung des Stützdrucks herangezogen. Der für den Vergleich in der Firste maßgebliche Stützdruck ergibt sich daher wie folgt:



Abbildung 5.4: Berechnung des Stützdrucks anhand der Messdaten des Luftpolsterdrucks, der Bentonitspiegelhöhe und der Dichtemessungen

Die Dichte des Boden-Suspensions-Gemisches kann anhand der Dichtemessung in der Förderleitung, die proportional zur Dichte in der Abbaukammer ist, bestimmt werden. Der Luftpolsterdruck sowie die Suspensionsspiegelhöhe werden wie zuvor beschrieben erfasst.

Ursprünglicher Spannungszustand

Messtechnisch lässt sich der ursprüngliche Spannungszustand bis dato während des Vortriebs nicht erfassen.

Zur Berücksichtigung der ursprünglichen Spannungsverhältnisse wird hier daher der anhand der Bodengutachten berechnete Soll-Stützdruck ($p_{Stdr,Firste}$), der je nach Genauigkeit der Rechnung den tatsächlich vorhandenen Erddruck repräsentiert, und der aktuelle Porenwasserdruck herangezogen. Die aktuellen Porenwasserdrücke ($p_{Wasser,Firste}$) werden vortriebsbegleitend entlang der Strecke mit Piezometern gemessen.

In Abhängigkeit von dem verwendeten bodenmechanischen Modell zur Berechnung des erforderlichen Stützdrucks können zusätzlich unter anderem auch die durchschnittliche Penetration des Stützmediums in den Baugrund sowie der Aufbau des Filterkuchens zur Übertragung des Druckes berücksichtigt werden.

Differenz der Spannungszustände

Zur Beschreibung der Änderungen des Spannungszustands wird hier als Eingangsparameter für das Fuzzy-System eine Stützdruckrate (*SR*) definiert, die das Verhältnis zwischen dem aufgebrachten Stützdruck, dem anhand der bodenmechanischen Berechnungen bestimmten Soll-Stützdruck und dem aktuell anstehenden Wasserdruck in der Firste angibt:

$$Ep_{1} = SR = \frac{p_{Stdr,Firste}}{p_{Stdr_Soll,Firste} + p_{Wasser,Firste}}$$
(5.4)
mit:
$$Ep_{1} \qquad : \text{ erster Eingangsparameter 1 [-]}$$
$$SR \qquad : \text{ maßgebende Stützdruckrate in der Firste [-]}$$
$$p_{Stdr_Soll,Firste} \qquad : \text{ bodenmechanisch berechneter Soll-Stützdruck in der Firste } \left[\frac{kN}{m^{2}}\right]$$
$$p_{Wasser,Firste} \qquad : \text{ aktuell anstehender Wasserdruck in der Firste } \left[\frac{kN}{m^{2}}\right]$$

5.2.1.2 Bodenmehrentnahmen

Als weitere Ursache für Setzungen wurden in Kapitel 4.2.2.1 (S. 49) die Bodenmehrentnahmen ermittelt. Die Größe dieser Bodenmehrentnahmen kann aus dem vortriebsbegleitenden Vergleich der theoretischen und der tatsächlich geförderten Bodenvolumina und -massen ermittelt werden, auch als Volumen- und Massenbilanz bezeichnet.

Die Betrachtung nur einer Bilanz reicht nicht aus, da die Ergebnisse der Volumenbilanz zwar genauer sind als die der Massenbilanz (vgl. Kapitel 2.2.2, S.12), die Messwerte der Massenbilanz allerdings aussagekräftiger sind, da z.B. auch volumengleiche Austauschvorgänge erkannt werden können. Um die unterschiedlichen Vor- und Nachteile der Messsysteme zu kompensieren, sind daher beide Bilanzen zur Bestimmung der Bodenmehrentnahmen heranzuziehen (vgl. [122]).

Dies ist in der Praxis allerdings neben den bereits in Kapitel 2.2.1 erwähnten Schwierigkeiten hinsichtlich der Messung und Berechnung der tatsächlich geförderten Bodenvolumina und -massen mit den im Folgenden geschilderten Problemen hinsichtlich der Abschätzung der Sollwerte, d.h. der zu fördernden Massen und Volumina verbunden. Da darüber hinaus diese im Schildvortrieb neuen Messtechniken noch nicht standardmäßig eingesetzt werden, muss der Eingangsparameter zu den Bodenmehrentnahmen im späteren Fuzzy-System optional sein, d.h. das System muss die Setzungen auch ohne Berücksichtigung der Bodenmehrentnahmen berechnen können.

Berechnung der Volumenströme

Die Volumenströme des Aushubs setzen sich aus Feststoff- und Flüssigkeitsstrom zusammen.

Aufgrund des Porenanteils des Bodens lässt sich dabei der SOLL-Wert für das Aushubvolumen selbst für den üblicherweise wassergesättigten Boden nur näherungsweise bestimmen, da unklar ist, in welchem Maße das in den Poren enthaltene Wasser in die Abbaukammer eintritt, bzw. inwieweit die Suspension in den Boden eingedrungen ist und das Porenwasser dabei verdrängt hat, so dass nur suspensionsgesättigter Boden abgebaut wird. Bei eventuell eintretendem Wasser kann es weiterhin zu Volumenveränderungen durch frei werdende, im Wasser gelöste Gase kommen. Zeit- und bodenabhängige Bentonitverluste beeinträchtigen, zudem insbesondere bei längeren Stillständen, die Genauigkeit der Auswertung.

Für die Abschätzung des Volumenstroms lassen sich daher nur näherungsweise Richtwerte bestimmen, da der Porenanteil entlang der Strecke nicht exakt ermittelt werden kann (vgl. [122]):

$$\frac{\pi \cdot D_A^2}{4} \cdot (1-n) \cdot s \le V_A \le \frac{\pi \cdot D_A^2}{4} \cdot s$$
(5.5)

mit:

 D_A : Ausbruchsdurchmesser [m]

n : Porenanteil des Bodens [-]

• s : Vortriebsweg pro Zeitintervall
$$\left[\frac{m}{h}\right]$$

• V A : Volumenstrom des Ausbruchs $\left[\frac{m^3}{h}\right]$

Der Porenanteil des Bodens *n* schwankt für die für den Flüssigkeitsschildvortrieb üblichen Bodenarten zwischen 0,5 bis 0,6 in Tonlagen und zwischen 0,25 bis 0,35 in ungleichförmigen Sanden und Kiesen [110].

Zur Abschätzung des SOLL-Wertes kann, wie in früheren Studien des Autors festgestellt [67], vereinfachend davon ausgegangen werden, dass im Sand sämtliches Porenwasser durch eindringende Suspension verdrängt wurde und somit das Aushubvolumen nur aus dem Feststoffanteil des Bodens besteht. Der effektive Porenanteil ergibt sich damit zu $n_{eff} = n$. In Tonböden kann weiterhin angenommen werden, dass kein Eindringen der Suspension in den Boden möglich ist und der effektive Porenanteil damit $n_{eff} = 0$ ist.

Damit lässt sich ein Näherungswert zur Abschätzung des zu fördernden Volumens (vgl. [67]) berechnen:

mit:

• V_{Soll} : Sollvolumenstrom des Ausbruchs $\left\lfloor \frac{m^3}{h} \right\rfloor$

 $n_{e\!f\!f}$: effektiver, d.h. suspensionsgesättigter Porenanteil des Bodens [-]

Für die Berechnung der IST-Werte für das geförderte Bodenvolumen müssen die Volumenströme, die sich aus den Schwankungen des Bentonitspiegels ergeben, und die mit Hilfe der induktiven Durchflussmessung gemessenen Volumenströme in der Speise- und Förderleitung addiert werden.

Die Volumenströme aus den Bentonitspiegelschwankungen ergeben sich anhand der Geometrie der Abbaukammer und den Messungen des Bentonitlevels wie folgt:



Abbildung 5.5: Berechnung der Volumenströme aus den Schwankungen des Bentonitspiegels

Die geförderten Bodenvolumen (IST-Werte) ergeben sich damit zu:

$$\dot{V}_{Ist} = \dot{V}_{F\bar{o}} - \dot{V}_{Sp} + \dot{V}_{BS}$$
(5.9)
mit:
$$\dot{V}_{Ist} : \text{geförderter Volumenstrom} \left[\frac{m^3}{h}\right]$$

$$\dot{V}_{F\bar{o}} : \text{gemessener Volumenstrom in der Förderleitung} \left[\frac{m^3}{h}\right]$$

$$\dot{V}_{Sp} : \text{gemessener Volumenstrom in der Speiseleitung} \left[\frac{m^3}{h}\right]$$

Daraus lässt sich die Differenz der Volumenströme als weiterer Eingangsparameter zur Beschreibung des Setzungsverhaltens bestimmen:

$$Ep_{2} = V_{Bil} = V_{Ist} - V_{Soll}$$
mit:
• V_{Bil} : Differenz der Volumenströme $\left[\frac{m^{3}}{m^{3}}\right]$
(5.10)

| h |

Berechnung der Massenströme

Der näherungsweise Richtwert für die in einem Vortriebszyklus theoretisch zu erwartende Masse ergibt sich nach [122] zu:

$$\dot{M}_{A} = \frac{\pi \cdot D_{A}^{2}}{4} \cdot \dot{s} \cdot \rho_{d}$$
mit:
(5.11)

M_A : Massenstrom des Ausbruchs [t/h]

 ρ_d : Trockendichte [t/m³]

Wobei die Trockendichte allerdings in der Regel vortriebsbegleitend nicht zur Verfügung steht, so dass auf die Dichte des wassergesättigten Bodens zurückgegriffen werden muss.

Analog zu der geschilderten Vorgehensweise zur Berechnung des SOLL-Aushubvolumens kann auch bei der Berechnung der SOLL-Aushubmasse näherungsweise von einem effektiven Porenanteil in Abhängigkeit der anstehenden Bodenschicht ausgegangen werden. Die SOLL-Aushubmasse ergibt sich damit zu (vgl. [67]):

$$\overset{\bullet}{M}_{Soll} = \frac{\pi \cdot D_A^2}{4} \cdot \overset{\bullet}{s} \cdot \left(\rho_r - n_{eff} \cdot \rho_w \right)$$
(5.12)

mit:

• M_{Soll} :Sollmassenstrom des Ausbruchs $\left|\frac{t}{h}\right|$

 ρ_r : Dichte des wassergesättigten Bodens [t/m³]

$$\rho_{w}$$
 : Dichte des Wassers [t/m³]

Die tatsächlich geförderte Bodenmasse ergibt sich aus den Messwerten der Durchflussund Dichtemessungen wiederum unter Berücksichtigung der Bentonitspiegelschwankungen. Dabei wird angenommen, dass die Dichte in der Abbaukammer der in der Förderleitung entspricht:

$$\overset{\bullet}{M}_{Ist} = \begin{pmatrix} \overset{\bullet}{V}_{F\ddot{o}} + \overset{\bullet}{V}_{BS} \end{pmatrix} \cdot \rho_{m,F\ddot{o}} - \overset{\bullet}{V}_{Sp} \cdot \rho_{m,Sp}$$

mit:

M Ist

$$\begin{array}{l} \bullet \\ M_{Ist} & : \text{geförderter Massenstrom} \left[\frac{t}{h} \right] \\ \rho_{m,F\tilde{o}} & : \text{Gemischdichte in der Förderleitung} \left[\frac{t}{m^3} \right] \\ \rho_{m,Sp} & : \text{Gemischdichte in der Speiseleitung} \left[\frac{t}{m^3} \right] \end{array}$$

Die daraus resultierenden Werte der geförderten Bodenmasse sind allerdings aufgrund des bei Schildmaschinen üblichen horizontalen Einbaus der Geräte mit den in Kapitel 2.2.2.2 (S. 12) erwähnten hohen Fehleranteilen behaftet. Die Differenz der Massenströme als weiterer Eingangsparameter zur Beschreibung des Setzungsverhaltens ergibt sich daraus wie zuvor bei den Volumenströmen zu:

$$Ep_{3} = \overset{\bullet}{M}_{Bil} = \overset{\bullet}{M}_{Ist} - \overset{\bullet}{M}_{Soll}$$
(5.14)
mit:

: Differenz der Massenströme $\left| \frac{t}{h} \right|$ M Bil

5.2.2 Definition der Eingangsparameter zur Beschreibung der Setzungsursachen nach Passage des Schneidrades

Gemäß Kapitel 4.2.2.2 (S. 49) und 4.2.2.3 (S. 53) werden folgende Setzungsursachen als maßgeblich angesehen und als Eingangsparameter verwendet:

- Dynamische Belastung und Vibration bei der Vorwärtsbewegung
- Überschnitt und Konizität
- Durch Steuerbewegungen verursachte Bodenverdrängungen und -verdichtungen
- Unzureichende Ringspaltverfüllung (hinsichtlich Menge Druck und des Verpressmaterials)
- Konsolidierung des durch den Tunnelvortrieb umgeformten Bodens

5.2.2.1 Dynamische Belastungen und Vibrationen bei der Vorwärtsbewegung

Die dynamischen Belastungen und Vibrationen bei der Vorwärtsbewegung lassen sich messtechnisch derzeit noch nicht adäquat erfassen. Eine geeignete Repräsentation anhand der Prozessdaten kann nicht gefunden werden. Ein Eingangsparameter zur Beschreibung dieser Setzungsursache kann daher zur Zeit nicht definiert werden.

5.2.2.2 Überschnitt, Konizität, Steuerbewegungen

Die Konizität ist während des Projektverlaufs unveränderlich und damit für die vortriebsbegleitende Prognose der Setzungen nur von geringer Bedeutung. Für die Prognose der Setzungen sind in erster Linie die im Projektverlauf variablen bzw. veränderlichen Einflüsse

(5.13)

von Bedeutung. Konstante Einflüsse spielen nur eine untergeordnete Rolle, da der dadurch im Projektverlauf verursachte konstante Setzungsanteil auch durch andere Faktoren im Rahmen des Fuzzy-Systems berücksichtigt werden kann.

Der Überschnitt und die Steuerbewegungen sind jedoch entscheidend für die variable Größe des erzeugten Ausbruchsquerschnitts. Sie verursachen Bodenverdrängungen und bestimmen die Größe des verursachten Ringspaltes, der im Rahmen der Mörtelverpressung zu verfüllen ist.

Der zur Berechnung des verursachten Ringspaltes maßgebliche Ausbruchsdurchmesser D_L ergibt sich aus:

- dem Schneidraddurchmesser
- der Ausfahrung der Überschneider
- der Schrägstellung der Maschine bzw. den Daten des Steuerleitsystems
- den Unterschieden in der Ausfahrung der Schildgelenkspressen

Der Ausbruchsdurchmesser wird hier durch das Mittel der horizontalen und vertikalen Ausbruchsdurchmesser bestimmt. Die geometrischen Zusammenhänge zur Bestimmung der maßgeblichen vertikalen Ausbruchsdurchmesser D_{Lv} zeigt Abbildung 5.6. Analoges gilt für den maßgeblichen horizontalen Ausbruchsdurchmesser D_{Lh} .

Die Winkel $\alpha_{1/2}$ ergeben sich aus den Ausfahrungen der Schildgelenkspressen und den Daten des Steuerleitsystems. Aus den gemittelten Differenzen in den Ausfahrungen jeweils gegenüberliegender Schildgelenkspressen lässt sich die Schrägstellung des vorderen Abschnitts der Schildmaschine berechnen. Die Schrägstellung des hinteren Teils ergibt sich aus der Laservermessung. Anhand der gemessenen vertikalen und horizontalen Abweichung der hinter dem Schildgelenk angebrachten Zieltafel und der berechneten Achse kann die maximale Schrägstellung berechnet werden.



Abbildung 5.6: Geometrische Zusammenhänge zur Bestimmung des maßgeblichen vertikalen Ausbruchsdurchmessers D_{Lv}

Der Ausbruchsdurchmesser D_L kann danach wie folgt berechnet werden:

$$D_{L} = \frac{D_{Lv} + D_{Lh}}{2}$$
(5.15)

$$D_{L\nu/h} = D_s \cdot \cos(\alpha_1 + \alpha_2) + l_1 \cdot \sin\alpha_1 + l_2 \cdot \sin(\alpha_1 + \alpha_2)$$
(5.16)

mit:

 D_L : maßgebender Ausbruchsdurchmesser

 $D_{L_{V/h}}$: maßgebender horizontaler bzw. vertikaler Ausbruchsdurchmesser

 D_s : Durchmesser des Schneidrades inkl. Ausfahrung der Überschneider

 α_i, l_i : Winkel und Längen gemäß Skizze

Um die Anzahl der Regeln zu reduzieren, wird dieser Einfluss nicht separat berücksichtigt, sondern - wie im folgenden Kapitel 5.2.2.3 gezeigt - direkt im Zusammenhang mit dem verpressten Mörtelvolumen zur Verfüllung des erzeugten Hohlraums als Eingangsparameter erfasst.

5.2.2.3 Einflüsse der Ringspaltverpressung

Um die Wirksamkeit der Ringspaltverpressung adäquat beurteilen zu können, muss zum einen das Verpressvolumen mit dem Volumen des tatsächlich vorhandenen Ringspalts verglichen werden, zum anderen muss der Druck des Verpressmörtels mit dem des anstehenden Erd- und Wasserdrucks verglichen werden.

Die Betrachtung nur eines Parameters würde nicht ausreichen, da z.B. ein hohes Verpressvolumen nicht zwangsläufig auf eine gute Füllung des Ringspalts hindeutet, sondern bei gleichzeitigem geringem Verpressdruck nur ein Abfließen des Mörtels, z.B. aufgrund von lokalen Störungen im Boden oder aufgrund einer unzureichenden Mörtelzusammensetzung, anzeigt. Die Ringspaltverfüllung wäre trotzdem unzureichend. Analoges gilt für den Druck: Ein hoher Verpressdruck kann, wenn nicht ein entsprechendes Volumen verfüllt wurde, nur Verstopfungen in den Leitungen anzeigen.

Aufgrund der im Folgenden noch näher erklärten Problematik der diskontinuierlichen Pumpvorgänge und vor allem wegen der unstetigen Datenaufzeichnung der Schildschwanzverpressung zeigte sich, dass die Analyse der Druckabfallkurven, die Veränderung der Druckabfallgeschwindigkeit oder des Ruhedrucks zwischen den Pumpenhüben nicht ausreicht, um Informationen hinsichtlich des verpressten Volumens bzw. des Füllungsgrades des Ringspaltes zu erhalten. Daher wurden zur Beschreibung der Einflüsse ein Ringspaltverpresskoeffizient zur Berücksichtigung der Druckverhältnisse und eine Ringspaltverpressrate zur Berücksichtigung der Verpressvolumina definiert.

Ringspaltverpresskoeffizient

Der Ringspaltverpresskoeffizient ist als das Verhältnis des aktuellen Drucks der Ringspaltverpressung zum erforderlichen Verpressdruck definiert.

Der aktuelle Druck im Ringspalt ergibt sich unter Beachtung des Mörteldruckgradienten aus dem gemittelten Druck in den unterschiedlichen Verpressleitungen sowie den statischen und dynamischen Druckverlusten in den Leitungen.

Die Messung des Drucks erfolgt in der Regel nicht direkt im Ringspalt, sondern in den Verpressleitungen. Die Sensoren sind in der Regel unmittelbar vor dem Eintritt der Leitung in den Schildmantel angeordnet und somit in einem projektabhängig schwankenden Abstand von einigen Metern (entsprechend der Länge des Schildschwanzes) zur Austrittsöffnung (siehe z.B. [35]). Bei der Auswertung der Druckaufzeichnung muss daher grundsätzlich zwischen den wechselnden Ruhe- und Pumpphasen des Verpressvorgangs unterschieden werden.

In den Ruhephasen (z.B. bei Vortriebsstillständen oder bei vorübergehenden Stillständen der Pumpen) entspricht der in den Leitungen gemessene Druck annähernd dem Druck im Ringspalt. Während des Verpressvorgangs treten jedoch aufgrund der Reibung, der Verluste durch Krümmungen der Verpressleitungen und der Austrittsverluste erhebliche Abweichungen zwischen dem gemessenen Druck in den Leitungen und dem tatsächlichen Druck im Ringspalt auf. Da die Beschickung der Leitungen bei Schildvortrieben in der Regel diskontinuierlich mit Kolbenpumpen erfolgt, ergeben sich darüber hinaus während jedes Kolbenzyklus gravierende Druckschwankungen in den Leitungen.

Bei Verpressvorgängen mit einer diskontinuierlichen Beschickung mit Mörtel zeigte sich bei Versuchen, dass der Druckanstieg in der Leitung linear verläuft und der Druckabfall beim Zurückziehen des Kolbens annähernd parabelförmig ist [125]. Der parabelförmige Druckabfall in den Leitungen resultiert aus dem zeitverzögerten Ausfließen aus den Leitungen aufgrund der hohen Viskosität des Mörtels.

Ein Pumpzyklus dauert bei den für Schildmaschinen üblichen Pumpen in der Regel je nach eingestellter Pumpengeschwindigkeit zwischen 10 und 30 Sekunden. Der Tiefpunkt des Druckverlaufs erreicht dabei nur bei ausreichend langen Pumpenstopps, z.B. während Vortriebsunterbrechungen, annähernd den Ruhedruck. Der dem Druck im Schildschwanz entsprechende Ruhedruck ist durch eine waagerechte Asymptote des Druckverlaufs gekennzeichnet. Abbildung 5.7 zeigt schematisch den Druckverlauf in den Verpressleitungen (Lisenen) während des Pumpvorgangs.



Abbildung 5.7: Schematischer und tatsächlich aufgezeichneter Druckverlauf in den Lisenen zur Schildschwanzverpressung

In Abbildung 5.7 ist zudem ein möglicher aufgezeichneter Druckverlauf dargestellt. Trotz der Datenaufzeichnung im 10-Sekunden-Takt weichen die aufgenommenen Werte teilweise auch über einen längeren Zeitraum deutlich von dem tatsächlich vorhandenen Druck in den Lisenen ab. Dies liegt daran, dass die einzelnen Messinstrumente von der zentralen Recheneinheit auf der Schildmaschine in einem festgelegten Rhythmus "abgefragt"

werden. Die Zeitspanne nach der wieder von einer der Druckmessdosen in den Lisenen ein neuer Wert übermittelt werden kann, ein so genannter "Umlauf", ist teilweise deutlich länger als 10 Sekunden. Nach Analyse der Vortriebsdaten der Referenzprojekte ergab sich, dass die Umlaufzeit zwischen 10 und 30 Sekunden schwankt. Wie in Abbildung 5.7 dargestellt, werden dabei zufällig die zum Zeitpunkt der Datenabfrage aktuellen Werte weitergegeben.

Um die Druckschwankungen in den Lisenen und die unregelmäßige Datenaufzeichnung auszugleichen, müssen die Drücke daher zeitlich und über alle vorhandenen Verpressleitungen (in der Regel 4-8) gemittelt werden. Aufgrund der erwähnten Taktung bei der Datenaufzeichnung empfiehlt es sich, hier 60-Sekunden-Intervalle zu nehmen, um so zu gewährleisten, dass zumindest zwei Messwerte aus jeder Leitung über den Mittelwert berücksichtigt werden können. Die Mittelung über die Verpressleitungen erfolgt unter Berücksichtigung des Mörteldruckgradienten, d.h. der Zunahme des Drucks in den Leitungen in Abhängigkeit von der Wichte des Mörtels und der Differenzhöhe zur Firste, um einen maßgeblichen Mörteldruck in der Firste zu ermitteln (siehe Formel 5.17).

Um die Werte der jeweils aktiv beschickten mit denen der vorübergehend nicht aktiven Verpressleitungen kombinieren zu können, müssen zudem die mittleren dynamischen Druckverluste in den Verpressleitungen $\Delta p_{Lis,dyn}$ ermittelt werden. Dazu können Tübbingmessringe mit außenliegenden Druckmessdosen zur Messung des Drucks im die Kenntnis Ringspalt herangezogen werden. Da der Auswirkungen der Ringspaltverpressung auf die Druckverhältnisse außerhalb der Schildmaschine für die druckgesteuerte Verpressung notwendig ist, werden solche Ringe in der Regel zu Projektbeginn eingebaut.

$$p_{Rsp,Firste} = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^{n} p_{Lis,i} - h_{Firste} \cdot \gamma_{M\"ortel} \cdot 0,01}{n} & \text{in Ruhephasen} \\ \frac{\sum_{i=1}^{n} p_{Lis,i} - h_{Firste} \cdot \gamma_{M\"ortel} \cdot 0,01}{n} & \text{in Pumpphasen} \end{cases}$$
(5.17)

mit:

$p_{Rsp,Firste}$: maßgeblicher mittlerer Referenzdruck der Ringspaltverpressung in
	der Firste [bar]
$p_{Lis,i}$: gemessener Druck in den einzelnen Lisenen [bar]
$\Delta p_{{\scriptscriptstyle Lis},{\scriptscriptstyle dyn}}$: mittlere dynamische Druckverluste in den Lisenen [bar]
h_{Firste}	: Abstand Lisene-Firste [m]
$\gamma_{M\"{ortel}}$: durchschnittliche Wichte des Mörtels $\left[\frac{kN}{m^3}\right]$
n	: Anzahl Lisenen

Anmerkung: 1 bar entspricht $100 \text{ kN}/\text{m}^2$

Der im Ringspalt erforderliche Druck ergibt sich wiederum aus den bodenmechanischen Berechnungen und der Berücksichtigung des aktuellen Porenwasserdrucks. Der erforderliche Druck wird vor Projektstart für den Trassenverlauf festgelegt und während des Vortriebs gemäß dem anstehenden Porenwasserdruck modifiziert. Der Eingangsparameter "Ringspaltverpresskoeffizient" zur Beurteilung des tatsächlichen Verpressdrucks im Ringspalt im Verhältnis zum berechneten erforderlichen Ringspaltdruck lautet damit:

$$Ep_4 = RVK = \frac{p_{Rsp,Firste}}{p_{Rsp_Soll,Firste} + p_{Wasser,Firste}}$$
(5.18)

mit:

 $p_{Rsp_Soll,Firste}$: berechneter erforderlicher Verpressdruck in der Firste [bar]

Ringspaltverpressrate

Die Ringspaltverpressrate wird hier definiert als das Verhältnis des Verpressvolumens zum Volumen des vorhandenen Ringspaltes.

Da der auf der Schildmaschine vorhandene Mörteltank in der Regel bereits während des Verpressvorgangs wieder befüllt wird, kann die Gewichtsänderung bzw. die Füllstandsanzeige des Tanks nicht als Maß für die verpresste Mörtelmenge verwendet werden. Das Verpressvolumen muss daher anhand des bekannten Volumens der Kolben der Ringspaltverpresspumpen aus der Zählung der Pumpenhübe je Zeitintervall ermittelt und mit dem zuvor bestimmten Volumen des Ringspaltes verglichen werden.

Das Volumen des Ringspaltes ergibt sich aus dem zuvor bestimmten maßgeblichen Ausbruchsdurchmesser D_L (vgl. Punkt 5.2.2.2, S.77) und der Vortriebsstrecke je Ringzyklus.

Bei der Berechnung der Ringspaltverpressrate ist der zeitliche Versatz zwischen dem Auffahren und der Verpressung zu beachten. Der aktuell aufgefahrene Ausbruchsdurchmesser entspricht nicht dem aktuell zu verpressenden Ringspalt, sondern wird erst nach Passage des Schildschwanzes an der entsprechenden Stelle maßgeblich für den zu verpressenden Hohlraum.

Um weiterhin zu verhindern, dass sich bei einer Mittelwertbildung hohe und niedrige Verpressvolumina ausgleichen, was in situ aufgrund der begrenzten Fließfähigkeit des Mörtels nicht der Fall ist, wird die Verpressrate in 60-Sekunden-Intervallen berechnet.

Der Eingangsparameter "Ringspaltverpressrate" zur Beschreibung der Qualität der Ringspaltverpressung hinsichtlich des Verhältnisses zwischen erzeugtem Ring- und Steuerspalt und dem verpressten Volumen ergibt sich damit zu:

$$Ep_{5} = RVR_{i} = \frac{V_{M\ddot{o}rtel_{i_{2}}}}{V_{Ringspalt_{i_{1}}}}$$

$$= \frac{V_{M\ddot{o}rtel_{i_{2}}}}{\frac{\pi}{4} \cdot \left[\left(D_{L}^{2} - D_{T}^{2} \right) \cdot l \right]_{i_{1}}}$$
(5.19)

mit:

 $V_{M\ddot{o}rtel_{i_2}}$: verpresstes Mörtelvolumen zum Zeitpunkt i_2 [m³] an der Stelle an der der Hohlraum $\left[\left(D_L^2 - D_T^2\right) \cdot l\right]_i$ zum Zeitpunkt i_1 aufgefahren wurde

 D_T : Außendurchmesser der Tübbinge [m]

l : zurückgelegte Vortriebsstrecke im Intervall i [m]

5.2.2.4 Konsolidierung des durch den Tunnelvortrieb umgeformten Bodens

Die nach Passage der Schildmaschine auftretenden Konsolidierungssetzungen sind in der Regel proportional zur Störung des Bodens während des Vortriebs. Ihre Ursachen sind damit schon in den vorangegangenen Faktoren erfasst, ein zusätzlicher Eingangsparameter ist nicht erforderlich.

5.2.3 Definition der Eingangsparameter zur Beschreibung der übergeordneten Einflussfaktoren

Nachdem die Einflussfaktoren zur Beschreibung der bauverfahrenstechnischen Ursachen für Setzungen definiert sind, müssen nun repräsentative Eingangsparameter zur Beschreibung der übergeordneten Einflussfaktoren in den Regelbasen gefunden werden. Diese Einflussfaktoren sind gemäß Kapitel 4.2.3 (S. 54ff.):

- Geologie
- Hydrologie
- Projektspezifische Randbedingungen
- Vortriebsgeschwindigkeit und Stillstandszeiten

5.2.3.1 Geologische Einflussfaktoren

Wie in Kapitel 4.2.3.2 (S. 55) gezeigt bestimmt der Unterschied zwischen feinkörnigen und grobkörnigen Böden für das im Flüssigkeitsschildvortrieb übliche Bodenspektrum die Reaktionen des Bodens auf das Vortriebsgeschehen, vom Aufbau des Filterkuchens bis hin zum Drainierverhalten des Verpressmörtels, dem Einfluss der Überdeckung und den Auswirkungen des Schwellverhaltens.

Trotz der bereits erwähnten adaptiven Anpassung der Regelbasen an die in situ Messwerte, die eine vortriebssynchrone empirische Anpassung an die Geologie gewährleistet, müssen diese grundsätzlichen Einflüsse durch einen weiteren Eingangsparameter zur Beschreibung der Geologie berücksichtigt werden. Für das für Flüssigkeitsschilde übliche Bodenspektrum wird daher zur Unterscheidung zwischen feinkörnigen und grobkörnigen Böden der prozentuale Sand/Kies- bzw. Tonanteil im Tunnelquerschnitt als Kenngröße herangezogen.

Zur Charakterisierung, ob es sich eher um sandige/kiesige oder tonige Böden handelt, wird hier der mittlere Porenanteil der Bodenschichten im Tunnelquerschnitt berücksichtigt. Der mittlere Porenanteil ergibt sich als Quotient aus dem Volumen der Poren und dem Gesamtvolumen einer Bodenprobe und liegt für die im Projektverlauf anstehenden Bodenschichten in der Regel näherungsweise vor. Feinkörnige Böden sind durch einen höheren Porenanteil, grobkörnige durch einen geringeren Porenanteil gekennzeichnet (siehe z.B. [110]).

Für zukünftige Projekte ist ebenfalls jede andere Beschreibung, die eine Einteilung in den Anteil der grobkörnigen und feinkörnigen Böden im Tunnelquerschnitt ermöglicht, analog einsetzbar. Weitere mögliche Repräsentationen für den anstehenden Boden bzw. für dessen Korngrößenverteilung stellen beispielsweise charakteristische Siebdurchgänge, die Ungleichförmigkeitszahl und die Krümmungszahl dar. Diese beschreiben den Verlauf der Körnungslinien eines Bodens anhand der Verhältnisse der Durchmesser der Körner bei unterschiedlichen Gewichtsdurchgängen während des Siebvorgangs.

Als Eingangsparmeter wird definiert:

$$Ep_6 = \text{geologischer Kennwert (Sand-/Kiesanteil)} = f(Porenanteil)$$
 (5.20)

Sinnvoll wäre hier eine vortriebsbegleitende Bestimmung der geologischen Kennwerte des anstehenden Bodens, da die Bodengutachten nur stichprobenartige Ergebnisse liefern. Eine solche vortriebsbegleitende Bestimmung anhand der aufgezeichneten Vortriebsdaten ist derzeit jedoch noch nicht möglich: Ggf. eingesetzte seismische Vorauserkundungssysteme arbeiten noch nicht mit der notwendigen Genauigkeit und der Einfluss der abzubauenden Bodenart auf die Maschinendaten ist zu unspezifisch, als dass daraus Rückschlüsse auf den Boden gezogen werden können. Kennwerte wie die benötigte spezifische Vortriebsenergie pro m³ Aushub werden in einem zu hohen Maße von Verschleißzuständen der Werkzeuge, Verklebungen der Abbaukammer und am Schneidrad sowie Materialansammlungen in der Abbaukammer beeinträchtigt (vgl. frühere Studien des Autors: [67],[68]).

5.2.3.2 Hydrologische Einflussfaktoren

Wie bereits in Kapitel 4.2.3 erwähnt, ist auf Seiten der hydrologischen Einflüsse in erster Linie der anstehende Porenwasserdruck zu nennen, der mit Piezometern erfasst wird. Dieser wird bereits vortriebsbegleitend in der Berechnung des Soll-Stützdrucks und des Soll-Verpressdrucks berücksichtigt und muss daher nicht gesondert als Eingangsparameter eingeführt werden.

5.2.3.3 Projektspezifische Randbedingungen

Hinsichtlich der projektspezifischen Randbedingungen hat, wie bereits in Kapitel 4.2.3 gezeigt, die Überdeckung einen entscheidenden Einfluss auf die Größe der Setzungen. Die Überdeckung wird mit dem dimensionslosen Wert H/D berücksichtigt.

$$Ep_7 = \frac{H}{D}$$

mit:

H : Überlagerungshöhe [m]

D :Schilddurchmesser [m]

Der Einfluss des Trassen- und Gradientenverlaufs wird bereits anhand der tatsächlichen Steuerbewegungen bei der Ringspaltverpressung berücksichtigt und kann deshalb hier vernachlässigt werden. Im Rahmen der dort definierten Ringspaltverpressrate wird die vorhandene Neigung und Schrägstellung der Maschine bei der Berechnung des Sollvolumens des Ringspaltes berücksichtigt.

5.2.3.4 Vortriebsgeschwindigkeit und Stillstandszeiten

Wie in Kapitel 4.2.3 gezeigt, haben die Vortriebsgeschwindigkeit und die Stillstandszeiten einen Einfluss auf die Größe der Setzungen, wobei die Stillstandszeiten (Ringbauzeiten und Maschinenausfälle) nur dem Sonderfall einer Vortriebsgeschwindigkeit = 0 entsprechen. Dadurch lassen sich beide Einflüsse mit dem Parameter Vortriebsgeschwindigkeit beschreiben.

(5.21)

$$Ep_{8} = v$$

mit:
$$v \qquad : Vortriebsgeschwindigkeit \left\lceil \frac{mm}{min} \right\rceil$$
(5.22)

Aufgrund der in Kapitel 2.2.2.2 (S.12) geschilderten Ungenauigkeiten bei der anhand der Maschinendaten ermittelten Geschwindigkeit muss dabei auf die ebenfalls vortriebssynchron erfassten Messwerte der Vermessung im Tunnel zurückgegriffen werden.

5.2.4 Einfluss des Abstandes zwischen der Schildmaschine und dem betrachteten Punkt

Bei der gewählten Beschreibung der Veränderungen des Setzungsverhaltens diskreter Punkte ist der Abstand dieser Punkte von der Schildmaschine ein maßgeblicher Einflussfaktor.

Hinsichtlich des Abstandes (horizontal und vertikal) der Schildmaschine von einem gedachten oder realen Punkten auf der Geländeoberfläche ist anzumerken, dass der vertikale Abstand zur Geländeoberfläche bereits durch die Überdeckung bzw. das Verhältnis H/D in der Regelbasis berücksichtigt wird, so dass hier nur der horizontale Abstand als weiterer Eingangsparameter für die Auswirkungen des Vortriebsprozesses eingeführt werden muss.

$$Ep_{9} = x$$

mit:
x : horizontaler Abstand Schildmaschine - Messpunkt [m] (5.23)

Der Abstand wird aus der Position des Messpunktes und anhand der aus den aktuellen Daten der Laservermessung bestimmten Positionsdaten der Schildmaschine ermittelt.

5.2.5 Zusammenfassung und Struktur des Systems

5.2.5.1 Zusammenfassung

Zur Beschreibung der Setzungsursachen und Einflüsse konnten folgende maßgebliche Eingangsparameter ermittelt werden:

Tabelle 5.1: Eingangsparameter zur Erfassung der Setzungsursachen und Einflussfaktoren anhand der vor Ort vorhandenen Prozessdaten

Eingangs- parameter	erfasste Ursache/ Einflussfaktor	Einflüsse	Prozessdaten
Ep₁=SR	 Änderung des Spannungszustan- des 	 aktueller Netto- Spannungszustand primärer Spannungs- zustand 	 Luftpolsterdruck Gemischdichte in der Förderleitung Höhe des Suspensionsspiegels aktuell anstehender Porenwasser- druck Berechneter Soll-Stützdruck in der Firste Durchmesser der Abbaukammer
Ep ₂ =V _{Bil} *	 Bodenmehrent- nahmen (Volumen) 	 geförderter Volumen- strom theoretisch zu fördern- 	Durchfluss FörderleitungDurchfluss Speiseleitung

		der Volumenstrom	Höhe des Suspensionsspiegels
			Ausbruchsdurchmesser
			Effektiver (suspensionsgesättigter) Porenanteil des Bodens
			Vortriebsweg pro Zeitintervall
			Geometrie der Abbaukammer
Ep ₃ =M _{Bil} *	Bodenmehrent-	geförderter Massen-	Gemischdichte in der Förderleitung
10 2	nahmen (Masse)	strom	Gemischdichte in der Speiseleitung
		• theoretisch zu fördern-	Dichte des Wassergesättigten Bodens
		der Massenstrom	Durchfluss Förderleitung
			Durchfluss Speiseleitung
			Höhe des Suspensionssniegels
			Effektiver (suspensionsgesättigter)
			Porenanteil des Bodens
			Vortriebsweg pro Zeitintervali
			Auspruchsdurchmesser
			Geometrie der Abbaukammer
Ep₄=RVK	Unzurreichende Ringspaltverpressu	 tatsächlicher Verpressdruck 	Druck in den Lisenen der Ringspaltverpressung
	ng (Druck)	 theoretischer Verpressdruck 	 Dynamische Druckverluste w
		Wasserdruck	Anordnung der Verpresslisenen
			Wichte des Mörtels
			aktuell anstehender Porenwasser- druck
			Berechneter Soll-Druck der Ringspaltverpressung
Ep₅=RVR	 Steuerbewegungen Unzurreichende 	Größe des Ringspalts verpresstes Mörtel-	Schrägstellung der Maschine, vertikal und horizontal (gemäß Steuerleit- system)
	ng (Menge)	volumen	Ausfahrung der Schildgelenkspressen
			Ausfahrung der Überschneider
			Schneidraddurchmesser
			Verpresstes Mörtelvolumen (Hubzählung der Kolbennumpen)
			• Wichte des Mörtels
			Außendurchmesser der Tübbinge
			Zurückgelegte Vortriebsstrecke im
			Intervall
Ep ₆	Geologische Ein- flüsse	 Anteil der feinkörnigen und grobkörnigen Bodenarten im Tunnel- querschnitt 	Bodengutachten
Ep ₇	Überdeckung der	Überlagerungshöhe	Überlagerungshöhe
	Schildmaschine	Schilddurchmesser	Schilddurchmesser
Ep ₈	 Einfluss der Still- standzeiten und der Vortriebsgeschwindi gkeit 	 Vortriebsgeschwindig- keit 	 Vortriebsgeschwindigkeit
Ep₃	Abstand der Schildmaschine	 Abstand zwischen Schildmaschine und Messpunkt 	 Position des Messpunktes Position der Schildmaschine

Anmerkung: Angaben mit * bezeichnen Parameter, die aufgrund der nicht bei allen Projekten eingesetzten Durchfluss- und Dichtemessung optional sind.

5.2.5.2 Systemstruktur

Optionale Berücksichtigung der Bodenmehrentnahmen

Die optionale Bestimmung der aus der Volumen- und Massenbilanz resultierenden Bodenmehrentnahmen ist rein rechnerisch nicht ohne weiteres möglich. Zur Interpretation und sinnvollen Auswertung der teilweise gegensätzlichen Ergebnisse der Bilanzen bedarf es zusätzlich expliziten Wissens hinsichtlich der aktuellen Vortriebssituation.

Die Ergebnisse der Bilanzen hängen neben den bodenabhängigen Werten des effektiven Porenanteils vom Schwellverhalten der anstehenden Bodenschichten ab. Vorbelastete überkonsolidierte Böden entspannen sich bei der Entlastung durch den Vortrieb an der Ortsbrust, was zu einer Volumenvergrößerung in der Abbaukammer führt.

Der Anteil dieser nicht setzungsrelevanten Bodenmehrentnahmen ist zum einen abhängig von dem Schwellbeiwert C_S des Bodens, zum anderen von der Zeitspanne der Verformung und somit von der Vortriebsgeschwindigkeit. Bei grobkörnigen Böden ist der Schwellbeiwert wesentlich niedriger als bei feinkörnigen Böden [117].

Da diese Einflüsse vortriebsbegleitend nur schwer quantitativ erfasst werden können und insbesondere der Schwellbeiwert vortriebsbegleitend in der Regel nicht ermittelt werden kann, können die Einflüsse nur anhand des in der Praxis vorhandenen Erfahrungswissens abgeschätzt werden. Die Erfahrungen zeigen hier, dass die Bodenmehrentnahmen aufgrund des Schwellverhaltens des Bodens bei feinkörnigen Böden größer sind als bei grobkörnigen und kleiner werden, je höher die Vortriebsgeschwindigkeit ist.

Die Vortriebsgeschwindigkeit und die Geologie wurden bereits als Eingangsparamter für die Fuzzy-Systeme erfasst. Die Berücksichtigung der gegensätzlichen Auswirkungen dieser beiden Eingangsparmeter auf die Setzungen und auf die Bilanz der Bodenmehrentnahmen in einer Regelbasis würde allerdings die Entwicklung der Regelbasis wesentlich komplexer gestalten und dazu führen, dass die jeweilige Größe der Einflüsse qualitativ gegeneinander abgeschätzt werden muss.

Zur Berechnung der Bodenmehrentnahmen wird daher im Rahmen dieser Arbeit ein Fuzzy-Subsystem zur Modifikation der rechnerischen Ergebnisse der Volumen- und Massenbilanz nach den zuvor erläuterten Grundlagen erstellt (siehe Abbildung 5.8). Die Ergebnisse dieses Subsystems dienen als Eingangsparameter "Bodenmehrentnahmen" für das eigentliche Fuzzy-System zur Prognose der Setzungen.



Abbildung 5.8: Aufbau des Fuzzy-Subsystems zur Berechnung der Bodenmehrentnahmen

Die aus dem Praxiswissen abgeleiteten Regeln zur Ermittlung der Bodenmehrentnahmen bzw. zur Modifikation der rechnerisch ermittelten Werte anhand der aktuell anstehenden Geologie und der Vortriebsgeschwindigkeit sind im Anhang Kapitel 11.3.3 (S. 176) zu finden.

Aufbau des Fuzzy-Systems zur Prognose der vorauseilenden Setzungen

Das erste Fuzzy-System dient zur Prognose der vorauseilenden Setzungen basierend auf den Eingangsparametern 1,6,7,8 und 9 und beinhaltet das erwähnte optionale Subsystem zur Bestimmung der Bodenmehrentnahmen.

Bei der Integration des Subsystems ist zu berücksichtigen, dass die Eignung der Messwerte der Durchfluss- und Dichtemessung aufgrund der in Kapitel 2.2.2.2 (S. 12) erklärten Ungenauigkeiten bei den Messungen sowie der in Kapitel 5.2.1.2 (S. 73) erläuterten Ungenauigkeiten bei der Ermittlung der Soll-Werte nicht vorausgesetzt werden kann, sondern separat nachgewiesen werden muss.

Zu diesem Zweck müssen die Ergebnisse der beiden unterschiedlichen Möglichkeiten (mit und ohne Berücksichtigung der Bodenmehrentnahmen) zur Prognose der vorauseilenden Setzungen miteinander verglichen werden können. Daher ist es nicht möglich die Bodenmehrentnahmen einfach optional in dem Ursprungssystem als weiteren Eingangsparameter zu berücksichtigen. Eine solche Veränderung der Anzahl der Eingangsparameter würde insbesondere für die adaptive Verbesserung der Wissensbasen mit dem KNN völlig neue Vorraussetzungen hinsichtlich der Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten und der zum Lernen benötigten Anzahl an Datensätzen bedeuten.

Um die Anzahl der Eingangsparameter konstant zu halten, werden die anhand der Dichteund Durchflussmessungen ermittelten Bodenmehrentnahmen zur Modifikation der Ergebnisse der Stützdruckrate herangezogen. Das heißt, dass die Ergebnisse der Stützdruckrate und der Bodenmehrentnahmen zu einem neuen Parameter "Ortsbruststützung" zusammengefasst werden, wenn verwertbare Ergebnisse der Dichte- und Durchflussmessung vorliegen. Dazu wurde ein weiteres Fuzzy-Subsystem definiert. Die Regelbasen hierfür sind wiederum im Anhang, Kapitel 11.3.4 (S. 178) zu finden.

Der sich daraus ergebende Gesamtaufbau des ersten Fuzzy-Systems ist in Abbildung 5.9 gezeigt. Dargestellt sind jeweils die aufgenommenen Prozessdaten, die daraus gebildeten Eingangsparameter sowie die Struktur des Systems.



Abbildung 5.9: Aufbau des ersten Fuzzy-Systems zur Prognose der vorauseilenden Setzungen

Aufbau des Fuzzy-Systems zur Prognose der nachfolgenden Setzungen

Das zweite Fuzzy-System dient zur Berechnung der nachfolgenden Setzungen hinter der Schildmaschine basierend auf den Eingangsparametern 4,5,6,7 und 9 (siehe Abbildung 5.10).



Abbildung 5.10: Aufbau des zweiten Fuzzy-Systems zur Prognose der nachfolgenden Setzungen

Die zu erwartenden Endsetzungen für einen Punkt werden aus der Addition der beiden Setzungsanteile berechnet.

5.3 Definition der Fuzzy-Mengen

Nachdem alle setzungsrelevanten Ursachen und Einflussfaktoren durch adäquate aussagekräftige Parameter erfasst sind, müssen im nächsten Schritt für die zuvor beschriebenen Eingangsparameter Fuzzy-Mengen definiert werden, um darauf basierend Fuzzy-Regeln zur Auswertung der Daten formulieren zu können. Anhand dieser Fuzzy-Mengen erfolgt im weiteren Verlauf die Fuzzifizierung der Werte im Rahmen der Auswertung mit den manuell erstellten Regelbasen. Unter Fuzzifizierung versteht man den Übergang von einem scharfen Mess- bzw. Rechenwert auf einen zugehörigen Fuzzy-Wert.

Hinsichtlich der Einteilung der Wertebereiche muss für alle Eingangsparameter ein Kompromiss zwischen einer möglichst feinen Einteilung, die aber viele Regeln und damit viele Kombinationsmöglichkeiten zur Folge hat und eine entsprechend hohe Anzahl an Datensätzen in der Lernphase des KNN erfordert, und einer sehr groben Einteilung gewählt werden, die zu Sprüngen in den Ergebnissen führen kann.

Für den hier vorgestellten Lösungsansatz erwies es sich als ausreichend, alle Eingangswerte außer den Werten der Zwischenvariable Bodenmehrentnahme in jeweils drei Bereiche aufzuteilen. Die Bodenmehrentnahme, die keinen Einfluss auf die Anzahl der vom KNN zu optimierenden Regeln hat, wurde in fünf Bereiche unterteilt. Für die Ausgangsgröße (die Setzungen) müssen keine Fuzzy-Mengen bestimmt werden, da für den hier entwickelten Ansatz aufgrund der Kombination mit einem KNN ein Singleton Fuzzy-Modell gewählt wurde, bei dem jeder möglichen Regelkombination ein fester Wert, ein so genanntes Singleton, zugewiesen wird (siehe Kapitel 3.1.3, S. 32).

Die Definition der Wertebereiche erfolgte für die Überdeckung und die Geologie unter Berücksichtigung der im Allgemeinen üblichen Wertebereiche: Der gewählte Bereich der Geologie und der Überdeckung zwischen dem ein- und dreifachen Durchmesser des Schneidrades deckt natürlich nicht das ganze theoretisch mögliche Spektrum ab. Bei zukünftigen Projekten sind daher ggf. Verschiebungen dieser Bereiche notwendig.

Die Stützdruckrate, die Ringspaltverpressrate, der Ringspaltverpresskoeffizient, die Vortriebsgeschwindigkeit, die Massenbilanz, die Volumenbilanz, die Bodenmehrentnahmen, die Ortsbruststützung sowie der Abstand können allerdings als weitestgehend projektunabhängig angesehen werden.

Die Aufteilung des Wertebereichs erfolgte mit Dreiecks- und Trapezfunktionen (siehe Kapitel 3.1.2, S. 26ff.). Die ebenfalls möglichen Gauß'schen oder sigmoiden-Funktionen führten in den meisten Fällen zu einer Erhöhung der Rechenzeit, ohne eine nennenswerte Steigerung der Genauigkeit zu bewirken, und werden deshalb hier nicht verwendet.

Der Eingangsparameter Geologie wurde manuell auf Basis des vorliegenden projektabhängigen Spektrums der Porenanteile, die die unterschiedlichen Bodenschichten kennzeichnen, unterteilt.

Für die beiden Eingangsparameter für den Abstand sowie die Eingangsparameter für das Verhältnis H/D und die Vortriebsgeschwindigkeit wurde nach den Regeln der Rasterpartitionierung der gesamte Wertebereich in äquivalente Abschnitte unterteilt. Ebenso wurde für die Zwischenvariablen der Bodenmehrentnahmen und Ortsbruststützung vorgegangen. Der Wertebereich wurde hier zwischen -1 bis +1 bzw. 0 bis 1 definiert. Für die Bodenmehrentnahmen wurde der Wertebereich in fünf und für die Ortsbruststützung in drei äquivalente Abschnitte aufgeteilt.

Für die neu definierten Verhältniszahlen (Stützdruckrate, Ringspaltverpresskoeffizient Ringspaltverpressrate, Massen- und Volumenbilanz), für die nicht genügend Fachwissen zur Einteilung vorlag, wurde, um eine einfache Interpretierbarkeit der linguistischen Begriffe zur Erstellung der Regelbasis zu gewährleisten, wie folgt vorgegangen:

Als Bezugswert wurde jeweils der Median genommen, d.h. der Wert, der von 50 % der Werte überschritten bzw. unterschritten wird. Im Gegensatz zum Mittelwert bietet er den Vorteil, nicht von großen Ausreißern beeinflusst zu werden. Als Einflussbreite dieses Mittelwertes wurde der Abstand zwischen dem 0,1 und 0,9 Quantil gewählt. Ein Quantil ist derjenige Wert, bei dem die empirische Verteilungsfunktion der Daten den angezeigten Wert annimmt [94]. Das heißt, dass das 0,1 Quantil von 10 % der Werte unterschritten wird, das 0,9 Quantil von 90 % der Werte. Die Zugehörigkeit 1 der Maximal- und Minimalmengen wurde anhand des 0,01 bzw. 0,99 Quantils bestimmt. Die Einflussbreite wurde beginnend vom Median bis hin zum jeweiligen Maximum bzw. Minimum festgelegt.

Die dazugehörige Darstellung der Fuzzy-Mengen ist im Folgenden, aufgeteilt in die Bereiche vorauseilende Setzungen, optionale Subsysteme und nachfolgende Setzungen gezeigt.



Tabelle 5.2: Fuzzy-Sets zur Beschreibung der Eingangsparameter des ersten Fuzzy-Systems zur Prognose der vorauseilenden Setzungen

Tabelle 5.3: Fuzzy-Sets zur Beschreibung der zusätzlichen Eingangsparameter für die beiden Fuzzy-Subsysteme zur optionalen Berücksichtigung der Werte der Volumen- und Massenbilanz bei der Prognose der vorauseilenden Setzungen mit dem ersten Fuzzy-System





Tabelle 5.4: Fuzzy-Sets zur Beschreibung der Eingangsparameter des zweiten Fuzzy-Systems zur Prognose der Setzungen nach der Schneidradpassage



5.4 Entwicklung der Regelbasen

Basierend auf den gewählten Eingangsparametern beträgt die Anzahl der zu definierenden Regeln (vgl. Formel 5.2, S. 70):

- 3⁵ = 243 Regeln für das erste Fuzzy-System
- 3⁴+3·5 = 96 Regeln für die optionalen Systeme zur Berücksichtigung der Volumenund Massenbilanz
- 3⁵ = 243 Regeln für das zweite Fuzzy-System

Insgesamt sind somit 582 Regeln zu definieren.

5.4.1 Systeme zur Prognose der Setzungen

Für die beiden Fuzzy-Systeme zur Prognose der Setzungen gilt Folgendes:

Die einzelnen Parameter in der Prämisse der Regeln wurden mit einem UND-Operator verknüpft. Um eine Kompensation unterschiedlich hoher Zugehörigkeitsgrade der einzelnen Parameter zu gewährleisten bzw. um zu verhindern, dass nur die jeweils geringste Zugehörigkeit maßgebend ist, wurde dafür nicht das Minimum der Zugehörigkeitsfunktionen gewählt, sondern eine der bereits erwähnten t-Normen: Das algebraische Produkt der Zugehörigkeitsfunktionen (siehe Kapitel 3.1.2.2, S. 28).

Da alle Regeln gleichgewichtet sein müssen, um das KNN mit der Fuzzy-Regelbasis kombinieren zu können [75], entfällt im Rahmen der Inferenz die Gewichtung der Ergebnisse der Aggregation bzw. der Auswertung der Regelprämissen mit zuvor definierten Gewichtsfaktoren.

Die Akkumulation der Ergebnisse entfällt hier ebenfalls, da die Regeln aufgrund des Sugeno-Fuzzy-Systems als Schlussfolgerungen jeweils einen numerischen Wert besitzen und daher nicht zwischen mehreren gleichen Schlussfolgerungen abgewägt werden muss.

Die Berechnung des Ausgabewertes erfolgt anhand des gewichteten Durchschnitts aller Ergebnisse der einzelnen Regeln. Die einzelnen Ergebnisse werden dabei mit dem jeweiligen Erfüllungsgrad multipliziert, aufsummiert und durch die Summe der Erfüllungsgrade geteilt.

Für jede dieser Regeln muss nun für das gewählte Sugeno-Fuzzy-System ein Singleton, d.h. ein einzelner numerischer Wert, der die verursachten Setzungen bei Erfüllung der Regeln beziffert, gefunden werden. Im späteren Verlauf eines Projektes, d.h. wenn ausreichend Vortriebsdaten vorliegen, wird diese Aufgabe von dem KNN übernommen. Zur Initialisierung des Systems sollen hier allerdings Regeln manuell vorgegeben werden.

Die Definition der Regeln zur Initialisierung des Systems erfolgte unter Berücksichtigung der in Kapitel 4 herausgearbeiteten Zusammenhänge und der gemachten Praxiserfahrungen. Zur Prognose der resultierenden Setzungen wurden den Regeln vom Autor aufgrund eigener Projekterfahrungen Noten von 1 bis 10 zugewiesen, wobei eine 1 für sehr geringe erwartete Setzungen pro Zeitintervall oder sogar Hebungen und eine 10 für sehr große erwartete Setzungen pro Zeitintervall steht. Die Regeln inklusive der Bewertung sind im Anhang Kapitel 11.3.1 (S.165ff.) und Kapitel 11.3.2 (S.171ff.) dargestellt.

Im darauf folgenden Schritt wurden zur Berechnung der Singletons den vergebenen Noten diskrete Setzungswerte entsprechend der aufgezeichneten Bandbreite der Setzungen pro Zeitintervall zugewiesen.

5.4.2 Optionale Subsysteme zur Berücksichtigung der Bodenmehrentnahmen

Für die Subsysteme zur optionalen Berücksichtigung der Bodenmehrentnahmen gilt:

Im Gegensatz zu den vorherigen Fuzzy-Systemen kommen hier Mandami-Modelle zum Einsatz. Da keine Kombination mit einem KNN erforderlich ist, bieten sich diese Modelle aufgrund ihrer intuitiveren Art und der einfacheren und besser nachvollziehbaren Möglichkeit zur Modellierung eines Systems an (vgl. Kapitel 3.1.3, S. 32).

Die einzelnen Parameter werden weiterhin mit einem UND-Operator (hier: algebraisches Produkt der Zugehörigkeitsfunktionen) verknüpft. Auf eine Gewichtung der Regeln zur Feinjustierung wird verzichtet.

Die Akkumulation der Ergebnisse erfolgt mit dem Summen-Operator, das heißt, die Teilergebnisse der Auswertung der Regelprämissen werden entsprechend ihrer Zugehörigkeiten zu den Konklusionsteilen der Regeln addiert.

Bei Mandami-Fuzzy-Modellen müssen im Gegensatz zu Sugeno-Modellen auch die Ausgabewerte fuzzifiziert vorliegen, daher müssen die Ergebnisse anschließend defuzzifiziert werden. Zur Berechnung des Ausgabewertes wird hier eine Defuzzifikation nach der Schwerpunktsmethode vorgenommen (vgl. Kapitel 3.1.2.2, S.28ff.).

Die beiden Regelbasen sind wiederum im Anhang Kapitel 11.3.3 (S. 176) und Kapitel 11.3.4 (S. 178) gegeben.

5.5 Softwaretechnische Umsetzung des neuen Ansatzes zur Setzungsberechnung

Zur Umsetzung des hier entwickelten neuro-fuzzy-basierten Ansatzes zur vortriebssynchronen Setzungsprognose wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Programm zur Prognose der Setzungen mit der Entwicklungsumgebung MATLAB entwickelt.

5.5.1 Entwicklungsumgebung MATLAB

MATLAB ist eine Programmiersprache für technische Berechnungen und eine interaktive Umgebung für die Entwicklung von Programmen und Algorithmen, die die Visualisierung und Analyse von Daten sowie numerische Berechnungen ermöglicht.

MATLAB-Programmcode lässt sich in andere Programmiersprachen (C/C++, Fortran, Java, etc.) übersetzen, zu eigenständigen Programmen (stand-alones) kompilieren, in Anwendungen integrieren (z.B. Excel Add-Ins) oder auch in Form von MATLAB-Algorithmen und Programmen von der Entwicklungsumgebung einsetzen.

MATLAB beinhaltet verschiedene Sammlungen anwendungsspezifischer Funktionen, so genannte "Toolboxen", die die Entwicklungsumgebung erweitern. Der vorliegende Programmcode wurde unter Verwendung der Fuzzy-Logic Toolbox entwickelt.

Daneben bietet MATLAB die Möglichkeit mit verschiedenen externen Anwendungen (z.B. Excel) zu interagieren und Daten in den unterschiedlichsten Formaten zu im- und exportieren.

5.5.2 Modellierung der fuzzy-logischen Auswertung der Prozessdaten

Fuzzy-Systeme können in MATLAB zum einen mit vorgefertigten Funktionen von der Eingabezeile aus erstellt werden, zum anderen besteht die Möglichkeit, einen so genannten "Fuzzy-Inference-System-Editor" (FIS-Editor) zu nutzen, der es erlaubt, Fuzzy-Systeme mit Hilfe einer graphischen Benutzeroberfläche zu entwickeln. Für die Auflistung der möglichen Funktionen wird auf [39] und [75] verwiesen. Abbildung 5.11 zeigt beispielhaft die Editor Ansicht des ersten Fuzzy-Systems.

🤌 FIS Editor: FuzS	vor		_ 🗆 ×
File Edit View			
		FuzSvor (sugeno)	
	\leq		output
FIS Name:	FuzSvor	FIS Type:	sugeno
And method	prod	Current Variable	
Or method	probor	▼ Name	Abstand
Implication	min		input
Aggregation	max		-0.0071799616707721
Defuzzification	wtaver	Help	Close
Saved FIS "FuzSvor	" to disk		

Abbildung 5.11: Editor Ansicht des ersten Fuzzy-Subsystems in MATLAB

Eine detaillierte Erläuterung der Arbeitsweise des Fuzzy-Systems befindet sich im Anhang (Kapitel 11.2, S.160)

5.5.3 Modellierung der adaptiven Verbesserung der Wissensbasen mit einem KNN

Zur Kombination eines Fuzzy-Systems mit einem künstlichen neuronalen Netzwerk steht in MATLAB das so genannte "Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System" (ANFIS) zur Verfügung.

ANFIS ist eine Funktion der Fuzzy-Logic Toolbox. Mit ihrer Hilfe können die Regelbasen und die Zugehörigkeitsfunktionen von Sugeno-Fuzzy-Systemen durch überwachtes Lernen basierend auf vorhandenen Daten angepasst werden, so dass ein Fehlerkriterium (hier die Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Setzungen) minimiert wird.

Bei dem verwendeten KNN handelt es sich um ein 5-lagiges Netz ohne Rückkopplung [28]. Grundsätzlich stehen zwei verschiedene Lernverfahren zur Verfügung:

- 1. Der Backpropagation Algorithmus, der auf einem Gradientenabstiegsverfahren beruht
- Der hier verwendete hybride Lernalgorithmus, der eine Kombination aus einer Methode zur Minimierung der Fehlerquadrate und dem Backpropagation Algorithmus ist

Im Folgenden wird zunächst die Architektur des KNN gezeigt und im Anschluss der verwendete hybride Lernalgorithmus erläutert.

5.5.3.1 Architektur des KNN

Die Architektur des KNN ist der folgenden Abbildung zu entnehmen. Mit Rechtecken dargestellte Lagen sind adaptiv, d.h. dass ihre Werte während der Trainingsphase mit dem erwähnten hybriden Lernalgorithmus des Netzwerkes verändert werden; mit Kreisen dargestellte Lagen bleiben dagegen unverändert. Die Arbeitsweise ist hier mit zwei Eingabewerten, denen jeweils zwei Zugehörigkeitsfunktionen zugeordnet werden, erklärt. Dabei sollen zwei Regeln aktiv sein, die zwei inaktiven Regeln (Verknüpfung FM₁-FM₄ und FM₂-FM₃) wurden nicht dargestellt.



Abbildung 5.12: ANFIS Architektur nach [28]

1. Lage: Jeder Knoten dieser Lage berechnet die Zugehörigkeiten O_i der Eingaben *x* bzw. *y* zu den jeweiligen Fuzzy-Menge *FM*_i:

$$O_i = \mu_{FM_i} (x \text{ bzw. } y) \tag{5.24}$$

2. Lage: Jeder Knoten dieser Lage berechnet die so genannte "Firing Strength" der Regeln. Die eingehenden Signale werden entsprechend der Regelverknüpfung kombiniert (hier multipliziert) und bestimmen das Verbindungsgewicht w_i :

$$w_i = \mu_{FM_i}(x) \times \mu_{FM_i}(y)$$
, $i = 1, 2$ (5.25)

3. Lage: Die Verbindungsgewichte werden normalisiert, d.h. ins Verhältnis zur Summe aller Verbindungsgewichte gesetzt:

$$\overline{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}$$
, $i = 1, 2$ (5.26)

4. Lage: Berechnung der einzelnen Ausgaben analog zur gewählten Art der Ausgabefunktion (hier: nullter Ordnung mit den Singletons s_1 und s_2 , die diskrete Werte zur Veränderung des Setzungsverhaltens darstellen):

$$\overline{w} \cdot f_i = \overline{w_i} \cdot s_i \tag{5.27}$$

5. Lage: Hier wird das Gesamtergebnis aus der Summe aller eingehenden Signale berechnet. Für das vorliegende System ist das die berechnete Veränderung des Setzungsverhaltens, die dann mit den Vorgabewerten der gemessenen Setzungen verglichen werden kann.

$$f = \sum \overline{w_i} \cdot f_i = \frac{\sum_i w_i \cdot f_i}{\sum_i w_i}$$
(5.28)

5.5.3.2 Hybrider Lernalgorithmus

Bei dem hybriden Lernalgorithmus werden im ersten Schritt iterativ durch die Minimierung der Fehlerquadrate die bestmöglichen Parameter des Konklusionteils der Fuzzy-Regeln ermittelt, während die Parameter der Regelprämissen unverändert bleiben. Das bedeutet, dass die Ausgabefunktionen der vierten Lage des Netzwerkes angepasst werden. In einem zweiten Schritt werden dann die Parameter der Prämissen mit dem Backpropagation Algorithmus optimiert, während die Parameter der Konklusion unverändert bleiben [44]. Das heißt, dass die Fuzzy-Mengen der ersten Lage des Netzwerkes angepasst werden. Dieser hybride Lernalgorithmus bietet im Gegensatz zu einem reinen Gradientenabstiegsverfahren den Vorteil, dass die Dimension des Suchraums des Gradientenabstiegsverfahrens und die Konvergenzzeit verringert wird [28],[44]. Die mathematische Vorgehensweise hierbei wird im Folgenden erklärt.

Der Ausgabewert eines Knotens (Lage *k*, Position *i*) eines KNN mit *L* Lagen hängt von den eingehenden Signalen aus der vorherigen Lage sowie den Knotenparametern des betreffenden Knotens ab. Der Ausgabewert eines Knotens kann daher wie folgt angegeben werden (vgl. [44]):

$$O_{i}^{k} = O_{i}^{k} (O_{1}^{k-1}, \dots, O_{nk_{k-1}}^{k-1}, a, b, c, \dots)$$
mit:

$$O_{i}^{k} : Ausgabewert des Knotens, Lage k, Position innerhalb der Lage i$$

$$nk_{k-1} : Anzahl der Knoten der Lage k - 1$$

$$a, b, c : Knotenparameter des Knotens (k, i)$$
(5.29)

Das Fehlermaß (*E*) zur Bestimmung der optimalen Knotenparameter wird allgemein durch das Quadrat der Abweichung zwischen den vorgegebenen Zielwerten (*T*) und den berechneten Werten des KNN, d.h. den Ausgabewerten der Knoten der letzten Lage (O^L) bestimmt. Für einen Trainingsdatensatz (*p*) eines Vektors mit Trainingsdatensätzen mit *P*-Elementen, wobei gilt $1 \le p \le P$, ergibt sich das jeweilige Fehlermaß (*E_p*) wie folgt (vgl. [44]):
$$E_{p} = \sum_{m=1}^{nk_{L}} (T_{m,p} - O_{m,p}^{L})^{2}$$
(5.30)
mit:
$$1 \le p \le P$$

$$E_{p} \qquad : \text{Fehlermaß des Trainingsdatensatzes p}$$

$$nk_{L} \qquad : \text{Anzahl der Knoten der letzten Lage (L)}$$

$$T_{m,p} \qquad : \text{m-te Komponente des Zielvektors des Trainingsdatensatzes p}$$

$$O_{m,p}^{L} \qquad : \text{m-te Komponente des Ausgabevektors, basiert auf dem Eingabewerten}$$

$$des Trainingsdatensatzes p$$

Anmerkung: Falls die Ausgabeschicht nur aus einem einzigen Knoten besteht, entfällt die Summation über m.

Das Gesamtfehlermaß einer Matrix mit Trainingsdatensätzen ergibt sich demzufolge zu (vgl. [44]):

$$E = \sum_{p=1}^{P} E_p \tag{5.31}$$

mit:

E : Gesamtfehler aller Trainingsdatensätze

Die zur Berechnung des Fehlers maßgeblichen Ausgabewerte (O^L) der letzten Lage des KNN hängen allgemein von den Eingabewerten des Trainingsdatensatzes (I) und den Parametern des Systems (S) ab. Der hybride Lernalgorithmus basiert nun darauf, dass sich der Vektor (S) in einen linear von den Ausgaben abhängigen Teil (S_1) und einen nicht-linear abhängigen Teil (S_2) aufteilen lässt. Die optimalen Parameter des linearen Teils werden auf Basis der Fehlerquadratminimierung bestimmt, die bestmöglichen Parameter des nicht-linear Teils mittels des Backpropagation-Algorithmus.

Bestimmung der linearen Parameter mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate

Da es sich bei den mit ANFIS zu kombinierenden Fuzzy-Systemen um Sugeno-Systeme (vgl. Kapitel 3.1.3.2, S. 33) mit Ausgabefunktionen nullter oder erster Ordnung handeln muss, sind die linearen mit den Ausgaben gekoppelten Parameter des Systems (die Werte des Vektors S_1) die Parameter des Konklusionsteils der Regeln des Fuzzy-Systems. Zur Bestimmung der optimalen Konklusionsparameter anhand von Trainingsdaten wird wie folgt vorgegangen:

Bei bekannten oder vorübergehend festen Werten in S_2 ergibt sich für einen Vektor mit *P* Trainingsdatensätzen zur Bestimmung der Parameter in S_1 folgendes Standardproblem der linearen Regression (vgl. [44]):

AX = B	(5.32)
$E^2 = AX - B ^2$	(5.33)
mit:	

- A: Matrix mit den normalisierten Erfüllungsgraden jeder Regel, zeilenweise angeordnet
(enthält eine Zeile je Trainingsdatensatz, Dimension $P \times M$)
- *X* : unbekannter Vektor mit den Parametern S_1 bzw. den Konklusionsparametern jeder Regel (Dimension $M \times 1$)
- B : Spaltenvektor der die Ausgaben der Trainingsdatensätze enthält (Dimension $P \times 1$)
- *E* : Fehlermaß
- *M* : Anzahl der Konklusionsparameter

 $= k \cdot (n+1)$

- k : Anzahl der Regeln
- *n* : Anzahl der Eingangsknoten bei Sugeno-Systemen mit Ausgabefkt. 1.-Ordnung
 = 0 bei Sugeno-Systemen mit Ausgabefkt. 0.-Ordnung

Da die Anzahl der Trainingsdatensätze (P) in der Regel größer ist als die Anzahl der Konklusionsparameter (M), ist das Gleichungssystem überbestimmt und es existiert keine exakte Lösung der Gleichung 5.32. Die optimalen Parameter (X) müssen daher unter Berücksichtigung des zu minimierenden Fehlerquadrats (Gleichung 5.33) bestimmt werden. Im Rahmen der ANFIS-Routine erfolgt die Bestimmung der Parameter nicht durch rechenzeitaufwendige Matrizeninversion, sondern iterativ, sequentiell (siehe [44]). Damit kann der lineare Teil bzw. der Konklusionsteil der Regeln, in diesem Fall die Singletons oder die Parameter der Funktion erster Ordnung, die das Regelresultat repräsentieren, direkt bestimmt werden.

Backpropagation-Algorithmus (Gradientenabstiegsverfahren)

Bei der Bestimmung der Prämissenparameter handelt es sich um ein nicht-lineares Optimierungsproblem, für das hier der Backpropagation-Algorithmus verwendet wird. Der Backpropagation-Algorithmus besteht aus zwei Schritten:

- 1. Die Eingabedaten des Trainingsdatensatzes (I_p) werden durch alle Lagen des Netzwerkes verarbeitet und ein Ausgabewert der letzten Lage (O_p^L) wird berechnet. Dieser wird mit dem Zielwert des Trainingsvektors (T_p) verglichen und das Fehlermaß (E_p) berechnet.
- 2. Der Fehler wird durch alle verborgenen Schichten des Netzwerkes "zurückgeführt". Die Gewichte der einzelnen Knoten werden dabei modifiziert. Dies geschieht durch ein Gradientenabstiegsverfahren, in dem für jede Beobachtung die Gewichte in die Richtung verändert werden, in der sie zu einer Minimierung der Fehlerfunktion *E_p* beitragen. Die mathematische Vorgehensweise hierbei wird im Folgenden näher er-klärt.

Die Fehlerrate des Ausgabevektors jedes Trainingsdatensatzes ergibt sich aus der partiellen Ableitung der Formel 5.30 nach den jeweiligen Knotenwerten (vgl. [44]):

$$\frac{\partial E_p}{\partial O_{i,p}^L} = -2(T_{i,p} - O_{i,p}^L)$$
mit:
 ∂E_p
(5.34)

 $\frac{\partial L_p}{\partial O_{i,p}^L}$: Fehlerrate des Ausgabevektors des Knotens *i* der Lage *L*, Trainingsdatensatz *p*

Die Fehlerrate eines internen Knotens kann daraus gemäß der Kettenregel der Ableitung als lineare Kombination der Fehlerraten der Knoten der darauf folgenden Lage ausgedrückt werden (vgl. [44]):

$$\frac{\partial E_{p}}{\partial O_{i,p}^{k}} = \sum_{m=1}^{k+1} \frac{\partial E_{p}}{\partial O_{m,p}^{k+1}} \cdot \frac{\partial O_{m,p}^{k+1}}{\partial O_{i,p}^{k}}$$

$$1 \le k \le L - 1$$

$$1 \le i \le nk_{k}$$
mit:
$$\frac{\partial E_{p}}{\partial O_{i,p}^{k}} \qquad : \text{Fehlerrate eines internen Knotens } i \text{ der Lage } k \text{ beim Trainingsdatensatz } p$$

$$L \qquad : \text{Anzahl der Lagen des KNN}$$

$$(5.35)$$

Für jeden adaptiven Parameter (α) des KNN, der hier einen veränderbaren Parameter einer Zugehörigkeitsfunktion $\mu(x)$ repräsentiert, ergibt sich also die Fehlerrate (vgl. [44]):

$$\frac{\partial E_p}{\partial \alpha} = \sum_{O^*} \frac{\partial E_p}{\partial O^*} \cdot \frac{\partial O^*}{\partial \alpha}$$
mit:
(5.36)

 α : adaptiver Parameter des KNN bzw. einer Zugehörigkeitsfunktion des Fuzzy-Systems

 O^* : Knotenausgaben der Knoten, die von α abhängen

Die Ableitung des Gesamtfehlers aller Trainingsdatensätze nach α berechnet sich daraus zu (vgl. [44]):

$$\frac{\partial E}{\partial \alpha} = \sum_{p=1}^{P} \frac{\partial E_p}{\partial \alpha}$$
(5.37)

Entsprechend der Lernrate (η) kann damit die Verbesserung des Parameters α berechnet werden:

$$\Delta \alpha = -\eta \cdot \frac{\partial E}{\partial \alpha} \tag{5.38}$$

mit:

 $\Delta \alpha$: Veränderung des Parameters des KNN/der Zugehörigkeitsfunktion

 η : Lernrate

Die konkrete Veränderung der Prämissen der Fuzzy-Regeln bzw. der Parameter der Zugehörigkeitsfunktion lassen sich daraus wie folgt ableiten: Für ein einfaches Anfis-Netzwerk mit n Eingabevariablen, k Regeln und einem Ausgabewert berechnet sich der Ausgabewert der letzten Schicht (vgl. auch Formel 5.28) nach:

$$O^{L} = \frac{\sum_{i=1}^{k} w_{i} \cdot f_{i}}{\sum_{i=1}^{k} w_{i}} = \sum_{i=1}^{k} \overline{w}_{i} \cdot f_{i}$$
(5.39)

Die Veränderung eines beliebigen Parameters einer aktiven Zugehörigkeitsfunktion einer Regel *r* nach Gleichung 5.38 lässt sich somit wie folgt schreiben (vgl. auch [28]):

$$\Delta \alpha = -\eta \cdot \frac{\partial E}{\partial \alpha} = -\eta \cdot \frac{\partial E}{\partial O^{L}} \cdot \frac{\partial O^{L}}{\partial \overline{w_{r}}} \cdot \frac{\partial \overline{w_{r}}}{\partial w_{r}} \cdot \frac{\partial w_{r}}{\partial \mu_{jr}} \cdot \frac{\partial \mu_{jr}}{\partial \alpha}$$
$$= \eta \left(T - O^{L} \right) \cdot O_{r} \cdot \frac{\overline{w_{r}} \cdot \left(1 - \overline{w_{r}} \right)}{w_{r}} \cdot \frac{w_{r}}{\mu_{jr}} \cdot \frac{\partial \mu_{jr}}{\partial \alpha}$$
(5.40)

wobei hier gilt:

$$w_{r} = \prod_{i=1}^{n} \mu_{jr}(x_{i})$$

$$\overline{w_{r}} = \frac{w_{r}}{\sum_{i=1}^{k} w_{i}}$$
(5.41)
(5.42)

mit:

 w_r : Erfüllungsgrad der Regel r $\mu_{jr}(x_i)$: Zugehörigkeitsgrad zur Fuzzy-Menge j entsprechend der Eingabe x_i für die Regel r x_i : Eingabewert i $\overline{w_r}$: normalisierter Erfüllungsgrad der Regel r

Die Ableitung der jeweiligen Zugehörigkeitsfunktion einer Fuzzy-Menge nach dem jeweils zu verbessernden Parameter:

$$\left(\frac{\partial \mu_{jr}}{\partial \alpha}\right) \tag{5.43}$$

hängt von der Wahl der Zugehörigkeitsfunktion ab und muss je nach Anwendungsfall bestimmt werden.

Die Lernrate des KNN η (vgl. [44]):

$$\eta = \frac{k}{\sqrt{\sum_{\alpha} \left(\frac{\partial E}{\partial \alpha}\right)^2}}$$
(5.44)

mit:

k :Schrittweite

wird während des Lernvorgangs durch Veränderung der Schrittweite (k) in Abhängigkeit vom ermittelten Fehler angepasst. Wurde der Fehler in vier aufeinander folgenden Berechnungsdurchläufen vermindert, wird k um 10 % erhöht. Bei einem oszillierenden Fehlerver-

lauf, das heißt bei einem wechselnden Vorzeichen des Fehlers von einem Berechnungsdurchlauf zum nächsten innerhalb der letzen vier Berechnungsdurchläufe wird k um 10 % verringert ([44]).

5.5.4 Modellierung der Anpassung des Verlaufs der Setzungsmulde

Die Anpassung des Verlaufs der Setzungsmulde in Querrichtung anhand der in Kapitel 4.4.3 (S. 62) entwickelten funktionalen Beschreibung an ggf. vorhandene Werte der Setzungsmessung bzw. die Berechnung des erwähnten Korrekturfaktors (k_i , vgl. Gleichungen 4.10,4.11, S. 64) zur Verschiebung des Flexionspunktes erfolgt mit der Funktion "*Isqnon-lin()*". Diese Funktion basiert auf einer nichtlinearen Minimierung der Fehlerquadrate einer durch den Benutzer definierten Funktion. Dabei kann gezielt festgelegt werden, welcher Parameter (hier: Korrekturfaktor k_i) zur Optimierung des Fehlerkriteriums variiert werden soll.

Zur Anpassung des Korrekturfaktors wird jeweils auf die Messungen der letzten zurückliegenden Messreihe quer zur Tunnelachse zurückgegriffen und eine dreidimensionale Setzungsmulde erzeugt.

5.5.5 Programmablauf

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Programm dient derzeit zur Simulation und zu Testzwecken basierend auf den aufgezeichneten Daten der Referenzprojekte. Eine Implementierung in die Software einer Schildmaschine ist bis dato nicht realisiert.

Einen Überblick über das Programm und seine Arbeitsweise zeigt das folgende Flussdiagramm (siehe Abbildung 5.13). In den nachfolgenden Unterkapiteln wird der zum Flussdiagramm gehörige Ablauf erläutert. Eine detailliertere Darstellung des Programmcodes ist zudem im Anhang (Kapitel 11.3.5, S. 179) in Form von Struktogrammen gezeigt.



Abbildung 5.13: Flussdiagramm zur Darstellung des entwickelten Programmablaufs

5.5.5.1 Datenabfrage und Bestimmung der Position sowie des Einflussbereiches

Die vorverarbeiteten, im xls-Format vorliegenden Daten der Projekte werden mittels Datenimport eingelesen (Zur Vorverarbeitung wird auf die Erläuterungen in Kapitel 6.2, S. 114 verwiesen). Die Vortriebsstrecke ist dabei in diskrete Berechnungsstellen, virtuelle Messpunkte genannt, mit einem Abstand von zwei Metern eingeteilt.

Mit Hilfe einer graphischen Benutzeroberfläche, die gleichzeitig zur Visualisierung der Ergebnisse dient, kann vom Benutzer das Simulationsende t_e eingegeben werden, bis zu dem der Vortrieb simuliert werden soll. Das Zeitintervall Δt zwischen zwei Simulationsschritten entspricht hier dem Zeitintervall zwischen zwei Setzungsmessungen, da für die Testzwecke in dieser Arbeit nur Ergebnisse zu Zeitpunkten interessant sind, zu denen auch Referenzergebnisse (d.h. Setzungsmessungen) vorliegen. Unterschiedliche Setzungsmesswerte innerhalb eines Simulationsschrittes werden maximal eine Stunde lang als aktuell angesehen und graphisch angezeigt.

Die nachfolgenden Vorgänge werden in einer Schleife solange wiederholt, bis das vom Benutzer eingegebene Simulationsende erreicht ist.

Zunächst wird basierend auf dem aktuellen Zeitschritt die Position der Maschine bestimmt und die virtuellen und realen Messpunkte im Einflussbereich der Schildmaschine ermittelt. Analog zur Aufteilung der Fuzzy-Systeme erfolgen die Ermittlung der maßgebenden Punkte sowie die weitere fuzzy-logische Auswertung der Daten jeweils getrennt für einen Bereich vor der Schildmaschine und einen Bereich hinter der Schildmaschine.

5.5.5.2 Fuzzy-logische Auswertung und adaptive Verbesserung der Wissensbasen

Im Rahmen der fuzzy-logischen Auswertung erfolgt als erstes die Abfrage, ob bereits genügend Datensätze zur adaptiven Verbesserung der Wissensbasen vorliegen. Die hierfür mindestens erforderliche Anzahl an Datensätzen wird im Rahmen der Validierung in Kapitel 6.3.3 (S. 120ff.) ermittelt, da sich die benötigte Anzahl nicht vorab theoretisch festlegen lässt, sondern auch von der Qualität der vorhandenen Daten abhängt (vgl. Kapitel 3.2.4.2, S. 42).

Falls die Anzahl der Datensätze nicht ausreicht, werden die Daten anhand der zuvor beschrieben Fuzzy-Systeme ggf. unter Berücksichtigung der Bodenmehrentnahmen mittels der manuell erstellten Wissensbasen ausgewertet.

Sobald die Anzahl der Datensätze ausreicht, werden die Wissensbasen hier berechnungsbegleitend verbessert. Bei einem Einsatz des Programms auf einer Schildmaschine würde dies einer vortriebsbegleitenden Verbesserung entsprechen. Die adaptive Verbesserung der aktuellen Regelbasen und Zugehörigkeitsfunktionen erfolgt jeweils anhand der aufgezeichneten Daten bis zum letzten Simulationsschritt, exklusive der im derzeitigen Simulationsschritt aktuellen Daten.

5.5.5.3 Berechnung der Setzungsmulde und Ergebnisausgabe

Die daraus berechneten Veränderungen des Setzungsverhaltens werden anhand der Längen des jeweiligen Zeitintervalls in Setzungen umgerechnet und zum vorhandenen Ergebnisvektor addiert. In diesem Vektor sind die bisherigen Setzungen der diskreten Punkte basierend auf den zurückliegenden Vortriebsintervallen gespeichert. Ist der vorgegebene Simulationsschritt erreicht, erfolgt die Visualisierung der Ergebnisse oder der Datenexport zur Dokumentation und Analyse der Ergebnisse.

Mit Hilfe des aktuellen Funktionsverlaufs der Setzungsmulde quer zur Tunnelachse wird anschließend die vollständige Setzungsmulde berechnet.

Die Visualisierung der Ergebnisse erfolgt getrennt in Setzungen vor dem Schneidrad (vorauseilend) und Setzungen hinter dem Schneidrad (nachfolgend). Der Verlauf der Setzungsmulde in Längs- und Querrichtung kann abschließend in unterschiedlichen Ansichten dargestellt werden. Die folgenden drei Abbildungen zeigen beispielhaft die unterschiedlichen Darstellungsmöglichkeiten. Der Export der Ergebnisse erfolgt im xls-Format.



Abbildung 5.14: Darstellung der Setzungen hinter dem Schneidrad im Längsschnitt

Anmerkung: Rot dargestellt ist der berechnete Verlauf der Setzungsmulde, blaue Punkte kennzeichnen die berechneten Setzungen der diskreten Punkte des verwendeten Rasters, blaue Kreise kennzeichnen die Messwerte von Messpunkten auf der Geländeoberfläche. Aktuelle Messergebnisse, die weniger als eine Stunde zurückliegen, werden zusammen mit der Messpunktnummer, der Kilometrierung und dem Ergebnis der Messung angezeigt. Wie dargestellt können auch Zwischenergebnisse des berechneten Kurvenverlaufs per Mausklick angezeigt werden.



Abbildung 5.15: 3D-Ansicht der Setzungsmulde hinter dem Schneidrad. Mit der Maus kann die Ansicht bei Bedarf gedreht werden.



Abbildung 5.16: Darstellung der Setzungsmulde auf Höhe des Schneidrades

Anmerkung: Die Flexionspunkte der Setzungsmulde sind jeweils durch * dargestellt, Werte (x/y-Koordinaten) können per Mausklick angezeigt werden

6 Validierung des neuen Ansatzes zur Setzungsprognose anhand von Praxisdaten

In diesem Kapitel soll die Eignung des in dieser Arbeit entwickelten Verfahrens zur neurofuzzy-basierten Prognose von Setzungen anhand der Prozessdaten zweier bereits abgeschlossener Projekte mit Flüssigkeitsschildvortrieben überprüft werden.

6.1 Referenzprojekte

Bei den Referenzprojekten handelt es sich um den Pannerdenschkanaltunnel und den Sophiaspoortunnel. Beide Tunnel sind Teil der Güterverkehrstrecke "Betuweroute" der Niederlande.

6.1.1 Pannerdenschkanaltunnel

Das Projekt besteht aus einem mit einem Flüssigkeitsschild aufgefahrenen 2-röhrigen Tunnel mit je ca. 1600 m Vortriebslänge und einem Außendurchmesser von ca. 9,50 m. Die Überdeckung schwankt zwischen dem ein- bis dreifachem Tunneldurchmesser.

Für die Validierung des Verfahrens zur Berechnung der Setzungen wurden die Daten der zuerst aufgefahrenen Südröhre verwendet, da hier das Setzungsverhalten des ungestörten Bodens beobachtet werden konnte. Das Setzungsverhalten beim Auffahren der Nordröhre wurde durch die dicht danebenliegende, bereits fertig gestellte Südröhre beeinträchtigt.

6.1.1.1 Geologie

Der Tunnelquerschnitt liegt zum überwiegenden Teil in mittel- bis grobkörnigen Sanden und Kiesen. Bereichsweise nehmen schluffige Tone und Torflagen einen Teil und über zwei kurze Abschnitte den gesamten Röhrenquerschnitt ein. In beiden Uferbereichen des zu unterfahrenden Kanals stehen im Sohlbereich Tonschichten bzw. Sand-Ton-Wechsellagerungen an. Der Tunnel durchquert östlich des Kanals eine wiederverfüllte Sandgrube (siehe Abbildung 6.1).



Abbildung 6.1: Geologischer Längsschnitt des Tunnels Pannerdenschkanal nach [77]

6.1.1.2 Datenaufzeichnung

Während des Vortriebs wurden 199 verschiedene Vortriebsparameter im 1-Sekunden Takt gemessen. Zur Reduzierung der gewaltigen, weitestgehend ungenutzten Datenmenge wurde allerdings auf der Baustelle entschieden, die Daten mit einer geringeren Frequenz aufzuzeichnen, so dass sie nur im 10-Sekunden Takt abgespeichert wurden. Aber selbst im 10-Sekunden Takt fielen ca. 5 GB Vortriebsdaten an. Bei dem Projekt wurde zur Kontrolle der Bodenmehrentnahmen eine radiometrische Dichtemessung und eine induktive Durchflussmessung eingesetzt und regelmäßig kalibriert.

6.1.1.3 Bestimmung der dynamischen Druckverluste in den Lisenen

Zur Auswertung der Ringspaltverpressdaten müssen die mittleren dynamischen Druckverluste in den Lisenen abgeschätzt werden. Dazu werden hier die Ergebnisse eines zu Projektbeginn eingebauten Tübbingmessrings mit außenliegenden Druckmessdosen zur Messung des Drucks im Ringspalt herangezogen.

Den Vergleich zwischen dem im Ringspalt gemessen Druck und dem Druck in den Lisenen zeigt Abbildung 6.2. Die mittleren dynamischen Verluste ergeben sich daraus zu 0,75 bar.



Abbildung 6.2: Vergleich der an einem Messring mit außenliegenden Druckmessdosen gemessenen Drücke im Ringspalt mit den aufgezeichneten Drücken in den Verpresslisenen während des Pumpvorgangs und während der Ruhephasen beim Referenzprojekt Pannerdenschkanal

6.1.1.4 Setzungsmessungen

Zur Kontrolle der Setzungen wurden an der Geländeoberfläche oberhalb der Trassierung im Abstand von ca. 25 m auf freier Strecke Messpunkte angeordnet. Zusätzlich dazu wurden zur genaueren Untersuchung der Einflüsse des Vortriebs fünf Messquerschnitte mit deutlich erhöhter Anzahl an Messpunkten eingerichtet. In Trassierungsrichtung betrug der Abstand zwischen diesen Messpunkten nur ca. 5 m. Die Erfassung der Setzungen erfolgte automatisiert mittels Messrobotern, die in drei Stunden Intervallen sämtliche im Bereich befindlichen Punkte einmaßen. Insgesamt existierten damit 328 Messpunkte, wovon 75 direkt über der jeweiligen Röhre lagen.

In Kapitel 2.2.3 wurde bereits grundsätzlich die schwankende Qualität der Setzungsmessdaten gezeigt. Zusätzlich zu den mit Messrobotern aufgenommenen Daten wurden beim Projekt Pannerdenschkanal jedoch auch manuell Setzungen gemessen und den Verläufen der Setzungsmesspunkte zugeordnet. Bei der Auswertung der Daten stellte sich heraus, dass diese manuellen Messwerte teilweise deutlich von dem Verlauf der automatisch erfassten Setzungen abwichen. Abbildung 6.3 zeigt beispielhaft den Vergleich zwischen den Werten der automatischen Setzungsmessungen und denen der zusätzlichen manuellen Setzungsmessungen eines Messpunktes des Referenzprojektes. Auf der x-Achse sind die Datenpunkte dargestellt, die jeweils einer Messung entsprechen, auf der y-Achse die Setzungen.



Abbildung 6.3: Vergleich zwischen den Werten der automatischen Setzungsmessungen und denen der zusätzlichen manuellen Setzungsmessungen anhand des Setzungsverlaufes eines Messpunktes des Referenzprojektes Pannerdenschkanal

Wie zu sehen ist, weichen die manuellen Messwerte in den Bereichen zwischen 100-160 und 260-300 deutlich von dem automatisch gemessenen Verlauf ab und stellen nur in den Bereichen, in denen keine automatisch aufgezeichneten Daten vorliegen (hier Bereich 165-180) sowie im Bereich zwischen Messung 60 bis 80, eine sinnvolle Ergänzung der Messdaten dar.

Aus diesem Grunde werden die zusätzlichen manuellen Messungen in Bereichen mit ausreichend automatisch gemessenen Setzungen bei erheblichen Abweichungen vom Setzungsverlauf nicht berücksichtigt, da die automatischen Setzungsmessungen als übergeordnet genau angesehen werden.

6.1.2 Sophiaspoortunnel

Das Projekt besteht ebenfalls aus zwei nacheinander mit einem Flüssigkeitsschild aufgefahrenen Röhren, die eine Länge von 4240 m und einen Durchmesser von ca. 9,80 m besitzen.

Das eingesetzte Flüssigkeitsschild wurde im Zuge der Weiterentwicklung der Vortriebstechnik für einen kontinuierlichen Vortrieb ausgelegt. Dazu waren diverse Veränderungen der Maschinentechnik, z.B. ein verlängerter Schildschwanz, verlängerte Vortriebspressen sowie technische Veränderungen bei der Steuerung der Vortriebspressen notwendig, so dass sich die Maschine in wesentlichen Bereichen von der des Pannerdenschkanaltunnels unterscheidet. Der kontinuierliche Vortrieb selbst wurde allerdings nur bei weniger als 1 % der 5648 Vortriebsintervalle eingesetzt [46].

Für die Validierung des Verfahrens zur Berechnung der Setzungen wurden wiederum die Daten der zuerst aufgefahrenen Nordröhre verwendet, da eine Beeinflussung des zweiten Vortriebs durch den ersten aufgrund des geringen Abstandes der beiden Röhren nicht ausgeschlossen werden konnte.

6.1.2.1 Geologie

Die Röhren befinden sich hauptsächlich in pleistozänen Sandschichten, die eine Abfolge von festen bis sehr festen, teilweise kieshaltigen Sanden aufweisen. Charakteristisch für das Projekt sind die sehr weichen, feinkörnigen holozänen Decklagen aus Torf- und Tonschichten mit sehr geringem spezifischem Gewicht [45]. Stellenweise sind Lagen oder Linsen aus locker gelagertem Schluff eingeschaltet, im Sohlbereich stehen partiell Tonschichten an. Der Tunnel unterquert überwiegend unbebautes, landwirtschaftlich genutztes Gebiet, im Mittelbereich werden zwei Flüsse, sowie im östlichen Teil eine Autobahn und eine Gasleitung unterfahren (siehe Abbildung 6.4). Die Überdeckung liegt im Mittel beim 2,2-fachen Durchmesser.



Abbildung 6.4: Geologischer Längsschnitt des Sophiaspoortunnels

6.1.2.2 Datenaufzeichnung

Hinsichtlich der Datenaufzeichnung wurden hier sogar noch mehr Werte als beim Pannerdenschkanaltunnel erfasst. Aufgrund der hohen bauverfahrenstechnischen Anforderungen des kontinuierlichen Vortriebs sowie des Einsatzes innovativer Messinstrumente (z.B. Druckmessdosen im Schildschwanz) ergaben sich insgesamt 400 aufzuzeichnende Mess- und Rechenwerte. Diese wurden ebenfalls im 10-Sekunden Takt erfasst.

Bei der Aufzeichnung und Archivierung der Daten wurde allerdings oft nicht mit der notwendigen Sorgfalt vorgegangen, so dass die Daten durch häufige große Lücken gekennzeichnet sind.

Die ebenfalls vorhandene radiometrische Dichtemessung und die induktive Durchflussmessung zeigten hier keine verwertbaren Ergebnisse an und wurden daher nach kurzer Zeit deaktiviert und im Projektverlauf ausgebaut [46]. Auf diese Daten kann bei dem Projekt daher nicht zurückgegriffen werden.

6.1.2.3 Bestimmung der dynamischen Druckverluste

Beim Projekt Sophiaspoortunnel wurden zusätzlich außen im Ringspalt Drucksensoren angebracht, die kontinuierlich den Verlauf der Drücke im Ringspalt aufzeichneten. Anhand von Vergleichen zwischen den aufgezeichneten Werten in den Verpressleitungen in der Firste und der Druckmessdose im Ringspalt in der Firste konnten in [118] mittlere dynamische Druckverluste von 0,50 bar festgestellt werden.

6.1.2.4 Setzungsmessungen

Das geotechnische Messprogramm entspricht in seinem Umfang dem des Pannerdenschkanaltunnels. Aufgrund der größeren Vortriebsstrecke wurden hier neun Messquerschnitte eingerichtet. Die Erfassung der Setzungen erfolgte allerdings rein manuell in stark variierenden Zeitintervallen (3,5 bis zu 27,5 Std.). Insbesondere an Wochenenden und in der Nacht waren deutlich größere Abstände zwischen den Messungen zu verzeichnen.

6.2 Aufbereitung der Prozessdaten

Im Rahmen der Datenaufbereitung müssen die an den unterschiedlichen Prozessstellen aufgenommenen analogen und digitalen Prozessdaten, die in unterschiedlichen Formaten, mit variierenden Datendichten und vor allem fehlerbehaftet vorliegen, zur weiteren Nutzung vorbereitet werden.

Die relevanten Daten eines Projektes werden zwar zentral erfasst, es existiert aber keine einheitliche Norm zur Speicherung der Daten. Die Datenformate sind daher nicht aufeinander abgestimmt. So werden beispielsweise die Maschinendaten abhängig von der Uhrzeit in Tages- oder Ringdateien, geologische und hydrologische Daten in der Regel abhängig von der Kilometrierung in Dateien, die den einzelnen Messquerschnitten zugeordnet sind, und Positionsdaten sowie statische Richtwerte bezogen auf den derzeit gebohrten Ring aufgezeichnet. Die Verknüpfung der unterschiedlichen Datengruppen und die Zuordnung der korrespondierenden Daten erfordert daher umfangreiche Sortier- und Verknüpfungsvorgänge.

Zudem müssen die erwähnten deutlichen Fehler in den aufgezeichneten Messdaten korrigiert werden. Der hohe Fehleranteil und die häufigen groben Messausreißer würden sonst die Ergebnisse der Datenauswertung erheblich verfälschen und keine sinnvolle Interpretation zulassen.

6.2.1 Verknüpfung der unterschiedlichen Datengruppen

Die Umsortierungsvorgänge sind projektspezifisch, die Speicherung der Daten ist von der vor Ort eingesetzten Hard- und Software abhängig. Unterschiedliche Projekte und damit unterschiedliche Schildmaschinen, Messinstrumente sowie Aufzeichnungshard- und -software führen zu stets variierenden Konzepten zur Datenerfassung und -speicherung.

Da die Daten im dB-Format vorlagen, wurde die Verknüpfung der unterschiedlichen Datengruppen im Rahmen dieser Arbeit mit einer Excel basierten Visual Basic Programmierung realisiert. Als maßgebliche Bezugsgrößen wurden Datum und Uhrzeit gewählt.

6.2.2 Reduzierung des Fehleranteils

Eine erste Reduzierung des Einflusses der Fehler ist bereits durch die Wahl der repräsentativen Eingangsparameter unter Vernachlässigung fehleranfälliger Messinstrumente und durch die erwähnte intervallhafte Mittelung der Maschinendaten realisiert. Allerdings treten wie erwähnt insbesondere bei den Messeinrichtungen, die direkt mit dem abzubauenden Boden, dem Verpressmörtel oder der Bentonitsuspension in Berührung kommen, teilweise gravierende Fehlmessungen oder Ausfälle auf (siehe Kapitel 2.2.2.2, S.12).

Datenreihen mit offensichtlichen, gravierenden Abweichungen müssen daher vorab aussortiert werden, um die Auswertung nicht unnötig zu verfälschen, einzelne grob fehlerhafte bzw. fehlende 10-Sekundenwerte können durch den Mittelwert aus dem vorhergehenden und nachfolgenden Messwert ersetzt werden.

Die angewendeten Kriterien zur Identifizierung eindeutiger Fehler sind:

- Für Werte, die aus physikalischen Gründen größer Null sein müssen (z.B. Vortriebsgeschwindigkeit, Drücke, Durchflüsse, etc.), dürfen keine negativen Werte aufgezeichnet werden.
- Aufgezeichnete Werte, die außerhalb des theoretisch möglichen Bereichs liegen (z.B. Vortriebsgeschwindigkeit > 200 mm/min, Druck in den Leitungen > 10 bar, gefördertes Volumen übersteigt die theoretischen Fördermöglichkeiten der Pumpen) werden aussortiert.
- Druckmesswerte in den Leitungen des Verpressmörtels oder der Speise- und Förderleitung dürfen nicht geringer als der anstehende Wasserdruck sein.
- Wenn die Pumpen arbeiten (Stromaufnahme, Hubzählung, etc.), aber der entsprechende Druck in den Leitungen unverändert bleibt, sind sowohl die Druck als auch die Volumenwerte als falsch anzusehen.

Eine sinnvolle Auswertung ist ohne solch eine vorherige Fehlerfindung nur schwer möglich, da gravierende Abweichungen ansonsten zu zwischenzeitlich unsinnigen Ergebnissen führen würden. Die Kriterien sind bewusst sehr weit gefasst und dienen nur zur Identifizierung offensichtlicher Fehler in Messdaten. Bei engeren Grenzen besteht die Gefahr, auch richtige, ungewöhnliche Messwerte auszusortieren.

6.2.3 Anzahl der vorhandenen Datensätze und Testablauf

Für das Projekt Pannerdenschkanal lagen für den Bereich der vorauseilenden Setzungen insgesamt 1661 und für den Bereich der nachfolgenden Setzungen insgesamt 2440 vollständige Datensätze, d.h. Prozessdaten inklusive Setzungsmessungen, vor. Für das Projekt Sophiaspoortunnel lagen aufgrund der geringeren Messfrequenz und der teilweise gravierenden Ausfälle bei der Datenarchivierung nur 348 bzw. 426 vollständige Datensätze dreier Messquerschnitte vor.

Die Tests werden in erster Linie anhand der Daten des Pannerdenschkanaltunnels durchgeführt, da die Ergebnisse hier aufgrund der wesentlich größeren Anzahl an Datensätzen zuverlässiger sind. Die Daten des zweiten Projekts Sophiaspoortunnel dienen zur Überprüfung der Übertragbarkeit der trainierten Wissensbasen auf weitere Projekte.

6.3 Vergleichsrechnungen – Prognose der verursachten Setzungen

In den folgenden Kapiteln wird der zuvor beschriebene Ansatz zur neuro-fuzzy-basierten Prognose der Setzungen anhand der aufgezeichneten Daten der Referenzprojekte getestet. Dabei werden die Setzungen jeweils mit dem neu entwickelten Verfahren prognostiziert und mit den tatsächlich gemessenen Setzungen verglichen.

Die einzelnen Teilbereiche werden in unterschiedlichen Schritten überprüft:

- 1. Eignung der manuell erstellten Wissensbasen
- 2. Möglichkeit der adaptiven Verbesserung der manuellen Wissensbasen mit Hilfe des KNN
- 3. Eignung des Subsystems zur Erfassung der nur ungenau ermittelbaren Bodenmehrentnahmen
- 4. Übertragbarkeit der mit Hilfe des KNN verbesserten Wissensbasen zur Prognose der Setzungen vergleichbarer Projekte
- 5. Funktionale Beschreibung der Setzungsmulde quer zur Tunnelachse

6.3.1 Testkriterien

Maßgeblich für die Güte der Prognose der Setzungen sind die Ergebnisse des Setzungsverlaufs der jeweiligen Messpunkte, d.h. die summierten Werte der einzelnen Berechnungsschritte, die mit den aufgezeichneten Verläufen verglichen werden. Die Abweichungen in jedem einzelnen Berechnungsschritt sind dabei nur von geringem Interesse, da sie aufgrund der geringen Zeitabstände zwischen den Messungen (wie erwähnt in der Regel drei Stunden) zwangsläufig klein sind.

Für das erste Fuzzy-System wird der durchschnittliche Fehler bei der Prognose der Setzungen am Schneidrad, für das zweite Fuzzy-System der durchschnittlichen Fehler bei der Prognose der endgültigen nachfolgenden Setzungen (Schildmaschine 100 m entfernt) bestimmt. Aus den Ergebnissen beider Systeme wird zudem der Gesamtfehler bei der Prognose der endgültigen Setzungen bestimmt.

Daneben werden die Werte der absoluten Korrelationen zwischen den berechneten und den gemessenen einzelnen Setzungsverläufen als weitere Vergleichsgrößen herangezogen. Die Korrelation gibt den Grad des Zusammenhangs zwischen den Verläufen an und kennzeichnet, inwieweit die einzelnen Verläufe der Setzungen grundsätzlich richtig berechnet bzw. wiedergegeben werden können.

6.3.2 Test der manuell erstellten Wissensbasen

Als erstes wird die Eignung der zuvor manuell erstellten Wissensbasen getestet. Diese Wissensbasen dienen zur Initialisierung des Systems und zur Prognose der Setzungen in den Anfangsbereichen des Vortriebs, in denen noch nicht genug Prozessdaten vorliegen, um eine Anpassung der Wissensbasis mit Hilfe des KNN zu ermöglichen. Die Regelbasen sind im Anhang abgedruckt. Tabelle 6.1 zeigt die Ergebnisse der Vergleichsrechnung.

	Mittlerer absoluter Fehler der Ergebnisse	Mittlere absolute Korrelation d Setzungsverläufe	
Vorauseilende Setzungen	± 2,3 mm (19,3 %)	0,29	
Nachfolgende Setzungen	± 4,6 mm (12 %)	0,75	
Gesamtsetzungen	± 5,6 mm (11,1 %)	0,85	

Tabelle 6.1: Ergebnisse des Vergleichs zwischen den gemessenen Setzungen und den mittels der manuell erstellten Wissensbasen berechneten Setzungen.

6.3.2.1 Vorauseilende Setzungen

Im Bereich der vorauseilenden Setzungen wurde der geringste absolute Fehler bei der Prognose der Setzungen mit den manuellen Wissensbasen ermittelt. Aufgrund der deutlich geringeren Setzungen im Bereich vor der Schildmaschine im Vergleich zu den anderen Bereichen entspricht der hier gemessene Fehler von $\pm 2,3$ mm jedoch der höchsten prozentualen Abweichung. Die an den Messpunkten des Referenzprojektes gemessenen Setzungen vor der Passage des Schneidrades betrugen zwischen -3,4 und 8,25 mm. Ausgehend von dieser Spanne von 11,65 mm beträgt der Fehler der Berechnung hier 19,3 %.

Der im Vergleich zu den anderen Bereichen hohe Fehleranteil zeigt sich auch in der geringen Übereinstimmung zwischen den berechneten und den gemessen Setzungsverläufen (Korrelationskoeffizient 0,29).

Bei einer genaueren Betrachtung der Ergebnisse der Berechnung der vorauseilenden Setzungen zeigt sich, dass neben einzelnen großen Abweichungen um Messpunkt 35 und 45 die vorauseilenden Setzungen im Bereich der Messpunkte 53 bis 62 sehr ungenau berechnet wurden (siehe Abbildung 6.5). Dargestellt sind die Ergebnisse der jeweiligen Messpunkte im Vergleich zur anstehenden Geologie. Auf der x-Achse sind die Messpunktnummern aufgetragen. Die Ergebnisse in den übrigen Bereichen korrespondieren deutlich besser mit den gemessenen Werten.

Die Zusammenhänge in den erwähnten Bereichen wurden demzufolge noch unbefriedigend eingeschätzt. Eine mögliche Erklärung für die hohen Abweichungen ist für Messpunkt 35 eine 90-stündige Stillstandszeit der Maschine unmittelbar vor Erreichen des Messpunktes (Abstand ca. 1,1 m). Die Setzungen nahmen in diesem Intervall entgegen der Prognose nur gering zu, die Differenz zwischen den berechneten Setzungen und den gemessenen Setzungen vergrößerte sich in diesem Zeitintervall von 3,6 auf 6,4 mm. Bei Messpunkt 45 wurden während des gesamten Vortriebs sehr niedrige Werte für den Stützdruck aufgezeichnet, die hier entgegen der Prognose jedoch nur sehr geringe Setzungen hervorriefen. In dem Bereich der Messpunkte 53 bis 62 durchquert der Vortrieb eine wiederverfüllte Sandgrube, das Setzungsverhalten weicht hier von dem in einer normalen Sandschicht ab.



Abbildung 6.5: Ergebnisse der mit Hilfe der manuellen Wissensbasen berechneten und der gemessenen Verläufe für jeden Messpunkt im Vergleich zur anstehenden Geologie, Bereich vorauseilende Setzungen

6.3.2.2 Nachfolgende Setzungen

118

Die Ergebnisse der nachfolgenden Setzungen zeigen einen relativ geringen Fehleranteil (± 4,6 mm entspricht 12 % der Spannweite) und eine hohe Korrelation (0,75) der Setzungsverläufe. Das Fuzzy-System liefert hier eine akzeptable Approximation, obwohl vier große Abweichungen bei den gemessen Setzungen an Messpunkt 2, 20, 26 und 50 nicht prognostiziert werden (siehe Abbildung 6.6). Für diese ungewöhnlichen Werte der gemessenen Setzungen konnte anhand der aufgezeichneten Maschinendaten keine eindeutige Erklärung gefunden werden, die Maschinendaten schwanken hier innerhalb des normalen Wertebereichs.



Abbildung 6.6: Ergebnisse der mit Hilfe der manuellen Wissensbasen berechneten und der gemessenen Verläufe für jeden Messpunkt im Vergleich zur anstehenden Geologie, Bereich nachfolgende Setzungen

6.3.2.3 Gesamtsetzungen

Aufgrund des nur geringen Einflusses der ungenau bestimmten vorauseilenden Setzungen auf die Gesamtgröße der Setzungen werden auch die Gesamtsetzungen akzeptabel wiedergegeben, allerdings verbleiben die erwähnten Abweichungen aus dem Bereich der nachfolgenden Setzungen (siehe Abbildung 6.7). Der durchschnittliche absolute Fehler ist mit 5,6 mm (entspricht 11,1 % der Spannweite) gering. Die einzelnen Verläufe der Setzungen weisen eine hohe Übereinstimmung auf (Korrelationskoeffizient = 0,85).



Abbildung 6.7: Ergebnisse der mit Hilfe der manuellen Wissensbasen berechneten und der gemessenen Verläufe für jeden Messpunkt im Vergleich zur anstehenden Geologie

6.3.2.4 Schlussfolgerung

Mit dem entwickelten Fuzzy-System lassen sich bereits bei manuell aufgestellten Regelbasen und Zugehörigkeitsfunktionen verwertbare Setzungsergebnisse prognostizieren, die teilweise gut mit den gemessenen Setzungsverläufen korrespondieren. Lokale starke Abweichungen ließen sich jedoch nur teilweise prognostizieren. Trotzdem ist bereits zum Projektstart eine Prognose der Setzungen auf Basis der Betriebsdaten möglich, bevor ausreichend Daten zur Anpassung der Wissensbasis zur Verfügung stehen.

6.3.3 Test der schrittweisen adaptiven Verbesserung der Wissensbasen durch ein KNN

Gemäß dem entwickelten Ansatz zur neuro-fuzzy-basierten Prognose sollen die der Berechnung der Setzungen zugrunde liegenden Wissensbasen nach jedem neuen Messzyklus mit Hilfe eines KNN modifiziert werden, um eine ständige Anpassung der Wissensbasis an die in situ Verhältnisse zu ermöglichen. Dazu soll überprüft werden, inwieweit eine Verbesserung der Ergebnisse der vorherigen Auswertungen mit Hilfe des KNN auf Basis der bereits zurückgelegten Vortriebsstrecke zu erreichen ist. Daneben soll bestimmt werden, wie viele Datensätze im Testfall zur signifikanten Verbesserung des Systems erforderlich sind bzw. inwieweit der Fehler im Rahmen der stetigen Anpassung der Wissensbasen zu- oder abnimmt.

Für den Test der schrittweisen Anpassung des Systems bedeutet das, dass vor jeder neuen Berechnung der Setzungen die Wissensbasen anhand der im vorherigen Intervall gemessenen Setzungen verbessert werden.

ausschließlich nur aus bereits zurückliegenden Daten lernen kann.

Als Trainingsdaten für das KNN wurden jeweils die zuvor aufgezeichneten Prozessdaten, die über die jeweiligen Intervalle der Setzungsmessungen gemittelt wurden, sowie die dazugehörigen Setzungsdaten verwendet. Testdaten waren die jeweils über das letzte Intervall gemittelten Prozessdaten sowie die aktuellen Setzungsdaten. Die aktuellen Setzungsmesswerte, die zum Vergleich mit den Berechnungsergebnissen dienen, werden dementsprechend nicht zur Anpassung der Regelbasis oder der Zugehörigkeitsfunktionen verwendet. Dadurch wird das Verhalten während des Vortriebs simuliert, bei dem das KNN

Die Anzahl der Trainingsepochen in einem Lerndurchgang, d.h. die Anzahl der Wiederholungen, mit denen jeweils aus den vorliegenden Daten erlernt wird, beträgt im vorliegenden Fall n=3. Die maßgebliche Epochenanzahl ergibt sich in der Regel durch den Vergleich zwischen dem Fehler, der bei der Bestimmung der Trainingsdaten gemacht wird, und dem Fehler bei der Berechnung so genannter "Checkdaten". Diese Checkdaten können z.B. nicht zum Trainieren verwendete Datensätze oder auch Trainingsdatensätze sein, die mit geringen zufälligen Fehlern versehen sind [75]. Nimmt der Fehler der Checkdaten im Laufe der Epochen zu, ist die maximale Anzahl der Epochen erreicht. Weitere Epochen würden zwar den Fehler beim Erlernen der Trainingsdaten reduzieren, aber ab einer gewissen Anzahl zu einem so genannten "Overfitting" führen und damit die Generalisierungsfähigkeit des Netzes verringern. Das zeigt sich dann durch den Zuwachs des Fehlers der Checkdaten.

Vortriebsbegleitend kann die Anzahl der Epochen ggf. anhand des Vergleichs zwischen Trainings- und Checkdaten neu bestimmt werden; für die Daten der Referenzprojekte erwies sich die gewählte Anzahl der Epochen jedoch als zuverlässiges Mittel.

Die Trainingsphase wurde bereits mit 486 vollständigen Datensätzen begonnen (der doppelten Anzahl der zu optimierenden Regeln), um die Einflüsse der Anzahl der zum Lernen verwendeten Datensätze zu zeigen. Eine geringere Anzahl an Datensätzen erscheint nicht sinnvoll, da sonst oftmals kein Lernergebnis erzielt werden konnte. Für die vorauseilenden Setzungen entspricht diese Anzahl bei dem Referenzprojekt Pannerndenschkanal einer Vortriebsstrecke von ca. 290 m, für die nachfolgenden Setzungen aufgrund der hier vorhandenen wesentlich größeren Datenmenge jedes Messpunkts einer Vortriebsstrecke von ca. 90 m.

Da im Gegensatz zum vorherigen Test die Entwicklung des Fehlers mit Zunahme der zur Verfügung stehenden Datensätze und nicht nur der mittlere Wert des Fehlers interessiert, werden hier zusätzlich die Trends in den Fehlerverläufen betrachtet. Für die absoluten Fehler sind dies lineare Trendlinien, für die Verläufe der Korrelation gleitende Durchschnitte mit jeweils fünf Perioden.

Die Entwicklung des mittleren absoluten Fehlers der Ergebnisse der Messpunkte und der mittleren absoluten Korrelation der einzelnen Setzungsverläufe ist in den folgenden Abbildungen dargestellt. Auf der x-Achse sind jeweils die Messpunkte angetragen, auf der y-Achse die Differenzen zwischen gemessenen und berechneten Setzungen bzw. der Korrelationskoeffizient. Als Referenzwerte sind jeweils die mit den manuell erstellten Wissensbasen erzielten Ergebnisse eingezeichnet. Die Ergebnisse sind getrennt für die einzelnen Fuzzy-Systeme und abschließend als Gesamtergebnis des Fehlerverlaufs dargestellt.



6.3.3.1 Vorauseilende Setzungen

Abbildung 6.8: Vorauseilende Setzungen - Verlauf des absoluten Fehlers bei der Berechnung der Ergebnisse jedes Setzungsmesspunktes bei der schrittweisen Anpassung der Wissensbasen mit einem KNN im Vergleich zu den Ergebnissen der manuellen Wissensbasen

Wie zu sehen ist, nimmt der absolute Fehler der Berechnung der Ergebnisse jedes Messpunktes von anfangs 15,9 mm auf 2,5 mm (entspricht 20,7 % der Spannweite) im Trend ab. Der hohe Anfangswert sowie der hohe Trend resultieren maßgeblich aus dem sehr großen Fehler am Anfang (beim zweiten Messpunkt). Der Referenzwert der manuellen Setzungen wird daher erst am Ende der Auswertung erreicht (Abbildung 6.8). Die Ausreißer resultieren hier aus vorübergehend nicht zufrieden stellend angepassten Wissensbasen aufgrund der zu Beginn noch nicht ausreichenden Anzahl an Trainingsdatensätzen.



Abbildung 6.9: Vorauseilende Setzungen - Verlauf der absoluten Korrelation der einzelnen Setzungsverläufe mit zunehmender Anzahl an Messpunkten bei der schrittweise Anpassung der Wissensbasen mit einem KNN im Vergleich zu den Ergebnissen der manuellen Wissensbasen

Der gleitende Durchschnitt der Korrelation der Setzungsverläufe ist erwartungsgemäß am Anfang zunächst niedrig, liegt aber ab ca. 20 Messpunkten (entspricht ca. 1200 Datensätzen) deutlich über dem Referenzwert der manuellen Auswertung. Die Passage der wiederverfüllten Sandgrube führt nur vorübergehend zu einer Abnahme des Durchschnitts der Korrelationen (Bereich Messpunkt 34 bis 39), danach steigen die Korrelationen wieder deutlich an, d.h. die Wissensbasis wurde an die geänderte Situation angepasst (Abbildung 6.9).



6.3.3.2 Nachfolgende Setzungen

Abbildung 6.10: Nachfolgende Setzungen, Verlauf des absoluten Fehlers bei der Berechnung der Ergebnisse jedes Setzungsmesspunktes bei der schrittweisen Anpassung der Wissensbasen mit einem KNN im Vergleich zu den Ergebnissen der manuellen Wissensbasen

Der Vergleich der nachfolgenden Setzungen zeigt ein ähnliches Bild. Der Trend des absoluten Fehlers der Berechnung nimmt von Anfangs 25,7 mm auf 4,6 mm (entspricht 11,9 % der Spannweite) ab. Der Verlauf ist deutlich durch einzelne sehr große Ausreißer gekennzeichnet, die wiederum auf vorübergehend nicht ausreichend angepasste Wissensbasen zurückgeführt werden können.

Der Referenzwert wird vom Verlauf des Fehlers bereits am Messpunkt 34 (entspricht 1734 Datensätzen) dauerhaft überschritten. Vom Trend wird er aufgrund der erwähnten anfänglichen Ausreißer allerdings erst gegen Ende der Auswertung erreicht (Abbildung 6.10).



Abbildung 6.11: Nachfolgende Setzungen, Verlauf der absoluten Korrelation der einzelnen Setzungsverläufe mit zunehmender Anzahl an Messpunkten bei der schrittweisen Anpassung der Wissensbasen mit einem KNN im Vergleich zu den Ergebnissen der manuellen Wissensbasen

Der gleitende Durchschnitt der Korrelation der Setzungsverläufe steigt von dem niedrigen Anfangswert von ca. 0,3 kontinuierlich auf über 0,82 an; gegen Ende fällt er allerdings wieder leicht ab. Der sehr hohe Referenzwert der manuellen Wissensbasen wird hier erst ab Messpunkt 43 (entspricht ca. 2120 Datensätzen) überschritten (siehe Abbildung 6.11). Die Passage der wiederverfüllten Sandgrube hat wie auch schon bei der manuell erstellten Wissensbasis für die nachfolgenden Setzungen nur einen geringen Einfluss auf den Verlauf der Korrelation.

6.3.3.3 Gesamtsetzungen

Die Addition der Werte zu einem Gesamtverlauf zeigt Abbildung 6.12. Die Differenzen nehmen im Trend nur von 28,3 mm auf 8,7 mm ab, während mit den manuellen Wissensbasen durchschnittliche Abweichungen von 5,6 mm erzielt werden konnten. Allerdings täuscht dieser Vergleich aufgrund des Einflusses der einzelnen großen Ausreißer. Vernachlässigt man nur den größten Wert (Messpunkt 28: 135 mm), ergibt sich bereits ein Fehler von 5,8 mm im Trend.



Abbildung 6.12: Verlauf des gesamten absoluten Fehlers bei der Berechnung der Ergebnisse jedes Setzungsmesspunktes bei der schrittweisen Anpassung der Wissensbasen mit einem KNN im Vergleich zu den Ergebnissen der manuellen Wissensbasen

6.3.3.4 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Verbesserung der manuellen Wissensbasen mit Hilfe des KNN bei ausreichender Anzahl an Trainingsdaten erwartet werden kann. Es erscheint daher lohnenswert, die hier vorgestellten Ansätze hybrid arbeitender Neuro-Fuzzy-Systeme zur Setzungsprognose weiterzuverfolgen.

Zur deutlichen Verbesserung der manuell erstellten Wissensbasen mit Hilfe des KNN ist allerdings eine hohe Anzahl an Datensätzen erforderlich. Zufriedenstellende Ergebnisse ohne größere Ausreißer können im Bereich der nachfolgenden Setzungen erst ab ca. 30 Messpunkten (entspricht ca. bzw. 1570 Datensätzen) erreicht werden. Bei der Berechnung der vorauseilenden Setzungen traten große Fehler nur zu Beginn auf. Zur zuverlässigen Verbesserung der manuellen Wissensbasen mit Hilfe eines KNN scheint daher ein Minimum von etwa 1600 Datensätzen erforderlich.

Die Trendverläufe des Fehlers erreichen aufgrund der hohen Ausreißer zu Beginn der adaptiven Verbesserung die Referenzwerte der manuellen Wissensbasen erst gegen Ende der Auswertung, dass heißt bei 1720 bzw. 2441 Datensätzen. Die Korrelationen zwischen den einzelnen Berechnungsverläufen und den gemessenen Setzungsverläufen liegen jedoch bereits ab Messpunkt 20 bzw. 1200 Datensätzen (vorauseilende Setzungen) bzw. ab Messpunkt 43 bzw. 2120 Datensätzen (nachfolgende Setzungen) über denen mit Hilfe der manuell erstellten Wissensbasen ermittelten Korrelationen, und zeigen damit eine zutreffendere Prognose der Einzelverläufe an.

Unerwartete Veränderungen der Geologie, die nicht anhand der geologischen Eingangsdaten des Systems zu erkennen waren, wie im Bereich der wiederverfüllten Sandgrube bei der Prognose der vorauseilenden Setzungen, die nur als normaler "Sand" klassifiziert war, führen nur zu kurzzeitigen Verschlechterungen der Ergebnisse. Die Wissensbasen passen sich den veränderten Verhältnissen innerhalb weniger Messpunkte an.

6.3.4 Test des Systems unter Berücksichtigung der Bodenmehrentnahmen

Aufgrund der in Kapitel 5.2.1.2 (S. 73) erwähnten Ungenauigkeiten bei der Erfassung der Bodenmehrentnahmen und des noch nicht standardmäßigen Einsatzes der zugehörigen Messtechniken, wird die Eignung des Systems unter Berücksichtigung der Bodenmehrentnahmen hier separat getestet und mit den zuvor ermittelten Werten des Systems ohne Berücksichtigung der Massen- und Volumenbilanz verglichen.

Da sich durch die Berücksichtigung der Bodenmehrentnahmen nur für das erste Fuzzy-System Änderungen ergeben, werden nur die Ergebnisse der vorauseilenden Setzungen verglichen.

6.3.4.1 Manuelle Wissensbasen unter Berücksichtigung der Bodenmehrentnahmen

Hinsichtlich der Prognose der vorauseilenden Setzungen mit Hilfe der manuell erstellten Wissensbasen bleibt der mittlere absolute Fehler mit 2,3 mm unverändert (vgl. Kapitel 6.3.2.1, S. 117). Abbildung 6.13 zeigt den Vergleich zwischen den unter Berücksichtigung der gemessenen Bodenmehrentnahmen berechneten Ergebnissen mit den tatsächlich gemessen Setzungen sowie den zuvor ohne Berücksichtigung der Bodenmehrentnahmen berechneten Werten.

Deutliche Abweichungen treten hier um Messpunkt 41 im Bereich des Übergangs von einer sandigen in eine tonige Bodenschicht auf. In diesem Bereich ergaben sich hohe Werte für die Ortsbruststützung, die zu den sehr niedrigen berechneten Setzungswerten führten. Ob die hohen Werte der Ortbruststützung gegebenenfalls an nicht exakt bestimmten geologischen Schichtgrenzen und damit nicht zutreffenden Einschätzungen hinsichtlich der Bewertung des Mehraushubs liegen, ließ sich anhand der vorliegenden Daten allerdings nicht feststellen. Im Bereich der wiederverfüllten Sandgrube (Messpunkte 53 bis 62) stimmt der Verlauf hingegen besser mit den gemessenen Setzungen überein.

Die mittlere Korrelation liegt mit durchschnittlich 0,57 deutlich über den Werten der manuellen Wissensbasen ohne Berücksichtigung der Bodenmehrentnahmen (vgl. Kapitel 6.3.2.1, S. 117: Korrelation = 0,29).



Messpunkte [-]

Abbildung 6.13: Vergleich der Ergebnisse der manuellen Wissensbasen unter Berücksichtigung der Massen- und Volumenbilanz mit den gemessenen Setzungen und den vorherigen Ergebnissen ohne Berücksichtigung der Massen- und Volumenbilanz

6.3.4.2 Schrittweise Adaptive Verbesserung unter Berücksichtigung der Bodenmehrentnahmen

Für die Überprüfung der Möglichkeiten der schrittweisen adaptiven Verbesserung der Regelbasen und der Zugehörigkeitsfunktionen wurde wie in Kapitel 6.3.3 (S. 120) beschrieben vorgegangen. Die Anzahl der betrachteten Datensätze blieb unverändert.

Die Ergebnisse des Vergleichs mit der vorherigen adaptiv verbesserten Wissensbasis sind in Abbildung 6.14 dargestellt.



Abbildung 6.14: Vergleich des Verlaufs des absoluten Fehlers bei der Berechnung der Ergebnisse bei der schrittweisen Anpassung der Wissensbasen mit einem KNN unter Berücksichtigung der Bodenmehrentnahmen im Vergleich zu den Ergebnissen ohne Berücksichtigung der Bodenmehrentnahmen

Wie bereits zuvor bei der adaptiven Verbesserung der Wissensbasen ist der Verlauf zu Beginn durch deutliche Ausreißer gekennzeichnet. Erst ab ca. 1455 Datensätzen (Messpunkt 25) ist eine zuverlässige Prognose der Setzungen gewährleistet. Trotz der großen Ausreißer am Anfang nimmt der Fehler von anfangs 21,5 mm (177,5 %) auf 1,1 mm (9,1 % der Spannweite) ab, und liegt damit unter dem Referenzwert der Prognose ohne Berücksichtigung der Bodenmehrentnahmen.

Der Vergleich der Korrelationsverläufe bei der schrittweisen adaptiven Verbesserung der Wissensbasen mit und ohne Berücksichtigung der Bodenmehrentnahmen ist in Abbildung 6.15 gezeigt. Der Verlauf des gleitenden Durchschnitts stimmt in etwa mit dem zuvor ermittelten Verlauf überein, hier ist keine Verbesserung der Prognose zu erkennen. Leichte Abweichungen treten gegen Ende der Auswertung aufgrund eines sehr niedrigen Wertes bei Messpunkt 40 auf.



Abbildung 6.15: Vergleich des Verlaufs der absoluten Korrelation der einzelnen Setzungsverläufe mit zunehmender Anzahl an Messpunkten bei der schrittweisen Anpassung der Wissensbasen mit einem KNN unter Berücksichtigung der Bodenmehrentnahmen im Vergleich zu den Ergebnissen ohne Berücksichtigung der Bodenmehrentnahmen

6.3.4.3 Schlussfolgerung

Trotz der großen Ungenauigkeiten bei der Erfassung sowohl der Messwerte (IST-Mengen) als auch bei der Berechnung der theoretisch zu erwartenden Fördermengen (SOLL-Mengen) zeigt sich, dass die Ergebnisse der Setzungsprognose durch die Berücksichtigung der Bodenmehrentnahmen im Bereich der schrittweisen Verbesserung mit Hilfe eines KNN verbessert werden können.

Bei den manuellen Wissensbasen sowie beim Verlauf der Korrelation sind allerdings keine signifikanten Unterschiede erkennbar.

Eine Weiterentwicklung der Messtechnik zur Durchfluss- und Dichtemessung beinhaltet damit in Zukunft auch ein Potential zur Verbesserung der hier vorgeschlagenen Datenauswertung zur Setzungsprognose. Eine höhere Genauigkeit bei der Bestimmung der geförderten Bodenvolumen und -massen würde zu einer Steigerung der Genauigkeit der Setzungsprognose führen. In [122] gemachte Vorschläge hinsichtlich der Erhöhung der Genauigkeit der Messanlagen, z.B. durch sinnvolle Anordnung der Messinstrumente, Kalibrierung und Wahl des Durchstrahlungswinkels, werden aber bisher in der Praxis noch nicht konsequent genug umgesetzt.

6.3.5 Test der Übertragbarkeit auf vergleichbare Projekte

Wie in den vorhergehenden Tests mit Einsatz des KNN zur adaptiven Verbesserung der Regelbasis und der Zugehörigkeitsfunktionen gezeigt, steigt die Güte der Berechnung der

Setzungen bzw. sinkt der absolute Fehler der Ergebnisse in Abhängigkeit von der Anzahl der dem KNN zur Verfügung stehenden Datensätze.

Da das gesamte System projektunabhängig ausgelegt ist, wird im Folgenden getestet, inwieweit die erforderliche Anzahl an Datensätzen durch die aufgezeichneten Daten weiterer vergleichbarer Projekte gewährleistet werden kann bzw. inwieweit die vorliegenden, bereits trainierten Wissensbasen für die Prognose der Setzungen vergleichbarer Projekte eingesetzt werden können.

Die in den vorherigen Tests anhand der Daten des Pannerdenschkanaltunnels trainierte Wissensbasis wurde dementsprechend genutzt, um die Setzungen des Sophiaspoortunnels zu berechnen. Dabei wurde auf die Wissensbasen ohne Berücksichtigung der Bodenmehrentnahmen zurückgegriffen, da die entsprechenden Messegeräte am Sophiaspoortunnel nach kurzer Zeit abgeschaltet und ausgebaut wurden. Die Vorgehensweise entspricht der des vorangegangen Tests. Zurückliegende Datensätze wurden der Datenbasis hinzugefügt und zur Anpassung der Regeln genutzt. Die jeweils aktuellen Datensätze wurden nicht zum Trainieren des KNN sondern nur zum Test der Berechnung genutzt.

Da die Wissensbasen darauf ausgelegt sind, Veränderungen des Setzungsverhaltens pro Zeitintervall zu berechnen, sollten die im Vergleich zum vorherigen Projekt stark variierenden Aufzeichnungsintervalle der Setzungsmessungen zwischen 3,5 und 27,5 Std. keinen Einfluss auf die Berechnung der Setzungen haben.

Die Abbildungen zeigen wieder den Verlauf des absoluten Fehlers der vorauseilenden und der nachfolgenden Setzungen. Auf die Ermittlung des Verlaufs der Korrelationen innerhalb der Verläufe wird hier aufgrund der durch die teilweise großen Aufzeichnungsintervalle bedingten geringen Anzahl von Berechnungsschritten in jedem einzelnen Verlauf verzichtet.



6.3.5.1 Vorauseilende Setzungen

Abbildung 6.16: Vorauseilende Setzungen, Verlauf des absoluten Fehlers bei der Berechnung der Ergebnisse der Setzungsmesspunkte, Daten: Sophiaspoortunnel

Wie zu sehen ist, schwankt der absolute Fehler bei der Berechnung der Ergebnisse der vorauseilenden Setzungen jedes Messpunktes zwischen 0,5 und bis zu 8 mm, im Mittel beträgt er 2,5 mm, was 46 % der Spannweite entspricht (siehe Abbildung 6.16).

Dieser hohe Fehleranteil hängt aber maßgeblich mit der sehr ungenauen Bestimmung des Zeitpunktes der Schneidradpassage und des damit korrespondierenden Referenzwertes der gemessenen Setzungen zusammen. Aufgrund der großen zeitlichen Abstände zwischen den Messungen konnte der maßgebliche Wert für den Zeitpunkt der Schneidradpassage nur näherungsweise unter groben Annahmen hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs der Setzungen bestimmt werden.

Die Abweichungen sind aber dennoch deutlich niedriger als die zu Anfang der Lernphase am Pannerdenschkanaltunnel berechneten Werte, bei denen Fehler bis zu 120 mm auftraten (vgl. Abbildung 6.8, S. 122).



6.3.5.2 Nachfolgende Setzungen

Abbildung 6.17: Nachfolgende Setzungen, Verlauf des absoluten Fehlers bei der Berechnung der Ergebnisse der Setzungsmesspunkte, Daten: Sophiaspoortunnel

Der absolute Fehler bei der Berechnung der Ergebnisse der nachfolgenden Setzungen ist trotz der Unterschiede zwischen den Projekten äußerst gering. Er schwankt zwischen 0 und 8 mm und liegt im Mittel bei 2,4 mm (siehe Abbildung 6.17). Dies entspricht aufgrund der beim Sophiaspoortunnel gemessenen hohen Setzungen nur 8,6 % der Spannweite der ausgewerteten Daten.

Die wesentlich bessere Qualität im Vergleich zu den vorauseilenden Setzungen ist darauf zurückzuführen, dass die großen zeitlichen Abstände zwischen den Messungen für die nachfolgenden Setzungen nur einen untergeordneten Einfluss haben. Zur Bestimmung des

Endes der Setzungsbewegungen spielen die zeitlichen Abstände keine Rolle, da hier ohnehin nur noch geringe Schwankungen zu verzeichnen sind.

Die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten sind ebenfalls nicht mit denen zu Beginn der Lernphase beim Pannerdenschkanal zu vergleichen. Der maximale Fehler beträgt hier 8 mm, beim Pannerdenschkanal wurden zu Beginn der Lernphase Fehler von bis zu 130 mm gemessen (vgl. Abbildung 6.10, S.124).

6.3.5.3 Gesamtsetzungen

Der Vergleich zwischen den berechneten und gemessenen Gesamtsetzungen bestätigt die Vermutung, dass die hohen Abweichungen bei den vorauseilenden Setzungen maßgeblich mit dem ungenau bestimmten Referenzwert zusammenhängen (siehe Abbildung 6.18). Dargestellt ist der Vergleich zwischen dem Verlauf der gemessenen und berechneten Endsetzungen der jeweiligen Messpunkte. Deutlich zu sehen ist die hohe Übereinstimmung der Kurven (Korrelationskoeffizient 0,89; mittlerer absoluter Fehler 3,5 mm entspricht 12,4 % der Spannweite).



Abbildung 6.18: Vergleich zwischen dem Verlauf der gemessenen und berechneten Endsetzungen der jeweiligen Messpunkte beim Sophiaspoortunnel

6.3.5.4 Schlussfolgerung

Die guten Ergebnisse bei der Prognose der Setzungen des Sophiaspoortunnels mit den anhand der Daten des Pannerdenschkanaltunnels trainierten Wissensbasen zeigen, dass eine weitere Steigerung der Anzahl der verwendeten Datensätze zu einer Steigerung der Genauigkeit der Ergebnisse führt und dass sich die trainierten Wissensbasen mit einer hohen Prognosegenauigkeit auch bei vergleichbaren Projekten einsetzen lassen.

6.3.6 Überprüfung der Anpassung der funktionalen Beschreibung des Setzungsverlaufs quer zur Tunnelachse

Wie in Kapitel 4.4 (S.60) erwähnt ist der Verlauf der Setzungsmulde quer zur Vortriebsrichtung bereits in früheren Studien detailliert untersucht worden. Der angenommene Setzungsverlauf basierend auf der Gauß'schen Normalverteilungskurve eignet sich daher erwartungsgemäß gut zur Beschreibung der Setzungsmulde.

Der im Rahmen dieser Arbeit zusätzlich eingeführte Korrekturfaktor k_i zur Verschiebung des für die Berechnung maßgeblichen Abstands des Flexionspunktes *i* (vgl. Formel 4.10 bzw. 4.11, S.64) von der Tunneltrasse führt zu guten Ergebnissen hinsichtlich der Beschreibung der Setzungsmulde. Der Faktor k_i wurde jeweils anhand der letzten zurückliegenden Messreihe quer zur Tunnelachse bestimmt.

Zur Überprüfung standen 745 Datensätze des Referenzprojektes Pannerdenschkanal zur Verfügung. Der Korrekturfaktor schwankte zwischen 0 und 4,7 und lag im Mittel bei 0,77. In den sandigen Bereichen wurden tendenziell kleinere Korrekturfaktoren (Mittel 0,5) als in den Tonbereichen verzeichnet (Mittel 1,3).

Die Korrelation zwischen dem gemessenen und dem berechneten Verlauf der Setzungsmulde quer zur Tunnelachse zeigt Abbildung 6.19. Wie zu sehen ist, wird über weite Strecken eine hohe Korrelation (nahe 1,0) erzielt. Im Bereich der Datensätze 650-665 werden jedoch deutlich geringere Werte gemessen. Dies liegt zum Teil daran, dass in diesem Abschnitt nur jeweils ein Messpunkt rechts und links neben der Trasse angeordnet ist und damit zur Anpassung des Kurvenverlaufs nur drei Messwerte zur Verfügung standen. Abweichungen eines Messwertes können somit zu einem lokal divergierenden Verlauf der Setzungsmulde und zu großen Unterschieden zwischen dem berechneten und dem gemessenen Verlauf quer zur Tunnelachse führen.



Die durchschnittliche Korrelation beträgt 0,95 und ist damit sehr hoch.

Abbildung 6.19: Verlauf Korrelation zwischen dem gemessenen und dem berechneten Verlauf der Setzungsmulde quer zur Tunnelachse beim Referenzprojekt Pannerdenschkanal

6.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Tests sind in numerischer Form in Tabelle 6.2 zusammengefasst.

Bei der adaptiven Verbesserung der Wissensbasen mit Hilfe des KNN beim Projekt Pannerdenschkanal sind jeweils der Anfangs- und der Endwert des Trends des Fehlerverlaufs gegeben. Dabei ist jedoch zu beachten, dass sowohl der Anfangs- als auch der Endwert durch die großen Ausreißer zu Anfang der mit wenigen Datensätzen begonnenen Trainingsphase geprägt sind.

		Vorauseilende Setzungen		Nachfolgende Setzungen			
				Beginn	Ende	Beginn	Ende
Pannerdenschkanaltunnel	Manuell erstellte Wissens- basen	Ohne Berück- sichtigung der Bodenmehrent- nahmen	Mittlerer absoluter Fehler	2,3 mm 19,3 %		4,6 mm 12 %	
			Korrelation der Einzelverläufe	0,29		0,75	
		Mit Berück- sichtigung der Bodenmehrent- nahmen	Mittlerer absoluter Fehler	2,3 mm 19,3 %		-	
			Korrelation der Einzelverläufe	0,57		-	
			Anzahl Datensätze	1720		2441	
	Adaptive Verbesse- rung der Ergebnisse mit Hilfe des KNN	Ohne Berück- sichtigung der Bodenmehrent- nahmen	Trend der mittleren absoluten Fehler	15,9 mm 131,3 %	2,5 mm 20,7 %	25,7 mm 92,3 %	4,6 mm 11,9 %
			Korrelation der Einzel- verläufe (gleitender Ø)	0,34	0,67	0,26	0,69
		g der bnisse Hilfe s KNN Bodenmehrent- nahmen	Trend der mittleren absoluten Fehler	21,5 mm 177,5 %	1,1 mm 9,1 %	-	-
			Korrelation der Einzel- verläufe (gleitender Ø)	0,32	0,5	-	-
			Anzahl Datensätze	486	1720	486	2441
Sophiaspoortunnel	Adaptive Verbesse- rung der Ergebnisse mit Hilfe des KNN	tive sse- der hisse lilfe (NN	Mittlerer absoluter Fehler	2,5 mm 46 %		2,4 mm 8,6 %	
			Anzahl Datensätze	348		426	

Tabelle 6.2: Zusammenfassung der Ergebnisse der Fuzzy-Systeme
Folgende Schlussfolgerungen ließen sich anhand der Testergebnisse ziehen:

- Die manuellen Wissensbasen und Zugehörigkeitsfunktionen ermöglichen bereits eine verwertbare Prognose der Setzungen. Auch zum Projektstart, bevor ausreichend Daten zur Anpassung des Fuzzy-Systems zur Verfügung stehen, ist somit eine Berechnung der Setzungen auf Basis der Prozessdaten möglich.
- Die manuell erstellten Wissensbasen können vortriebsbegleitend mit Hilfe des KNN adaptiv verbessert werden. Allerdings ist für eine zuverlässige Prognose eine große Anzahl an Datensätzen (mindestens etwa 1600) erforderlich, um große Ausreißer bei den Ergebnissen während der Lernphase zu vermeiden. Eine geringere Anzahl an Trainingsdatensätzen kann zu einer Verschlechterung der Prognose im Vergleich zu den manuell erstellten Wissensbasen führen.
- Je größer die Anzahl an Datensätzen ist, desto größer wird die Prognosegenauigkeit.
- Die mit Hilfe des KNN modifizierten Wissensbasen führen ab einer Anzahl von 1200 Datensätze (vorauseilende Setzungen) bzw. 2120 Datensätzen (nachfolgende Setzungen) zu höheren Korrelationen bei den Einzelverläufen der Messpunkte.
- Die Wissensbasen können sich adaptiv unvorhergesehenen geologischen Situationen anpassen.
- Die Berücksichtigung der mit Hilfe einer Massen- und Volumenbilanz berechneten Bodenmehrentnahmen führt zu einer Verbesserung der Prognose bei der schrittweisen Verbesserung mit Hilfe eines KNN.
- Die trainierten Wissensbasen lassen sich mit hoher Genauigkeit auch bei anderen vergleichbaren Projekten einsetzen.
- Der Verlauf der Setzungsmulde (quer zur Tunnelachse) basierend auf den prognostizierten Werten kann mit hoher Genauigkeit vortriebssynchron funktional berechnet werden.

7 Empfehlungen zum Praxiseinsatz und Ausblick

7.1 Empfehlungen zum Praxiseinsatz

Mit dem in dieser Arbeit entwickelten neuro-fuzzy-basierten System zur Setzungsberechnung lassen sich, wie in Kapitel 6 anhand der vorhandenen Vortriebsdaten gezeigt, die Setzungen vortriebssynchron auf Basis der vor Ort verfügbaren Prozessdaten prognostizieren. Damit ist eine vortriebssynchrone Prozessoptimierung zur Verringerung der Setzungen möglich. Im Rahmen eines zukünftigen Einsatzes vor Ort zeigt Abbildung 7.1 die mögliche Integration des Systems in den Vortriebsablauf.

Auf Basis der prognostizierten und auf der Schildmaschine angezeigten Setzungen kann der Vortriebsprozess manuell durch den Schildfahrer bzw. den Schichtingenieur angepasst werden. Simulationen des Vortriebs, z.B. mit virtuellen Maschinendaten, ermöglichen es, neue Erkenntnisse hinsichtlich der aktuellen Interaktion zwischen Setzungen und Tunnelvortrieb zu erlangen und diese zur Anpassung der Richtwerte des Vortriebs (Soll-Stützdruck, Soll-Mörteldruck/-menge etc.) zu nutzen oder in neue Anweisungen für das Personal im Tunnel umzusetzen. Des Weiteren können die durch die systematische, projektbegleitende Analyse des Vortriebsgeschehens und der prognostizierten Setzungen gewonnenen Erkenntnisse zur Erweiterung des vorhandenen Expertenwissens dienen.



Abbildung 7.1: Integration des Systems zur neuro-fuzzy-basierten Prognose der Setzungen in den Prozessablauf zur Unterstützung einer setzungsminimierenden Prozesssteuerung bei Schildvortrieben

7.2 Ausblick

Hinsichtlich zukünftiger Forschungsarbeiten zur Erweiterung des Systems sind insbesondere eine Erweiterung des Datenbestandes und eine automatische Berechnung von Richtwerten zur Vortriebssteuerung interessant.

Verbesserung der Prognose durch eine Erweiterung der Datenbestandes

Wie bei den Vergleichsrechnungen gezeigt wurde, nimmt die Qualität der Prognose mit der Anzahl der vorhandenen Datensätze zu, und die trainierten Wissensbasen lassen sich auch bei vergleichbaren Projekten mit Flüssigkeitsschildvortrieb einsetzen. Ein großer strukturierter Datenbestand kann dementsprechend genutzt werden, um vor Projektbeginn die Wissensbasen mit den Daten vergleichbarer Projekte zu trainieren und damit vom Projektstart an zuverlässige und genaue Setzungsprognosen zu ermöglichen.

Ziel weiterer Forschungstätigkeiten auf diesem Gebiet sollte es daher sein, eine möglichst umfassende Datenbank zu erstellen, die es erlaubt, unterschiedliche Wissensbasen für verschiedenste Projekte zu trainieren. Eine hierfür notwendige Standardisierung der Speicherung der Daten würde zudem die zeitintensiven Datenaufbereitungsvorgänge vereinfachen. Im Zuge einer solchen Erweiterung könnten außerdem weitere die geologische Situation beschreibende Parameter in die Auswertung integriert werden. Ziel hierbei sollte es sein, eine möglichst große Bandbreite unterschiedlicher Bodenarten und Schichtabfolgen hinsichtlich ihres Setzungsverhaltens zu charakterisieren und diese Charakterisierung in die Auswertung zu integrieren. Eine Vergrößerung des Datenbestandes würde es außerdem erlauben, mehr Parameter bzw. eine feinere Unterteilung der Parameter zu berücksichtigen. Die Anzahl der Regeln, die mit Hilfe des KNN verbessert werden kann, nimmt abhängig von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Datensätze zu.

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Güte der Berechnung der Setzungen durch eine Vergrößerung des Datenbestands bietet der Einsatz von FEM-Modellen. Mit Hilfe von hinreichend sensiblen Modellen, die die bauverfahrenstechnischen Einflussfaktoren berücksichtigen, könnten enorme Mengen an Trainingsdatensätzen produziert werden, die dann zum Trainieren der Wissensbasen verwendet werden könnten. Diese Trainingsphase kann vor Projektbeginn fern ab von der Baustelle auf leistungsfähigen Computern, die die hohen Anforderungen der FEM-Modelle an die Rechenkapazität erfüllen, geschehen. Die trainierten Fuzzy-Systeme könnten anschließend wieder auf einem handelsüblichen PC vor Ort vortriebssynchron eingesetzt werden.

Weiterentwicklung hinsichtlich der Vorgabe von Richtwerten

Die Prognose der vortriebsbedingten Setzungen stellt nur einen Schritt bzw. die Vorarbeit in der Entwicklung eines umfassenden Prozessleitsystems zur setzungsminimierenden Betriebsweise von Flüssigkeitsschildvortrieben dar. In einem nächsten Schritt müssten diese prognostizierten Setzungswerte in Richtwerte für die Maschinensteuerung umgesetzt werden. Dies kann bislang nur durch den Schildfahrer oder durch Fachleute vor Ort geschehen. In Zukunft ist aber auch eine automatische Berechnung der Richtwerte denkbar, die dann vom Personal vor Ort in Steuerbefehle umgesetzt werden kann (vgl. [33]).

Bei der Berechnung neuer Richtwerte für den Vortrieb müssten die erhaltenen Informationen über die verursachten Setzungen mit den Sollvorgaben verglichen und in Steuerbefehle (beispielsweise Erhöhung des Stützdrucks um ... bar, etc.) umgesetzt werden. Dabei müssen neben den prognostizierten Setzungsmesswerten auch die Ergebnisse der statischen Berechnungen, die bisherigen Projekterfahrungen hinsichtlich der Interaktion der Maschine mit dem Baugrund und die Interaktion der Maschinenparameter untereinander berücksichtigt werden.

8 Zusammenfassung

Die Setzungen an der Geländeoberfläche stellen heutzutage das maßgebende Beurteilungskriterium für die Qualität des Tunnelbaus mit Flüssigkeitsschilden dar. Entscheidend für die Verursachung und Vermeidung der Setzungen bei Flüssigkeitsschildvortrieben sind die Ortsbruststützung und die Ringspaltverpressung. Ihre Steuerung beruht maßgeblich auf den manuell durch den Schildfahrer einzustellenden Vortriebsparametern (z.B. Luftpolsterdruck, Pumpengeschwindigkeiten, etc.). Dieser kann sich nur an groben Richtwerten orientieren und ist aufgrund mangelnder Informationen hinsichtlich der situationsspezifischen Randbedingungen und der Auswirkungen des Vortriebs weitestgehend auf sein implizites Prozesswissen, seine Intuition und bisherige Erfahrungswerte angewiesen. Eine direkte Rückkopplung zwischen dem Vortrieb und den an der Geländeoberfläche verursachten Setzungen findet nur unzureichend und erst im Nachlauf statt. Eine Auswertung der Messdaten ließe sich aufgrund der nur begrenzten Anzahl an Setzungsmesspunkten an der Oberfläche auch nur schwer zur vortriebssynchronen Prozessoptimierung verwenden.

Ziel dieser Arbeit war es, das Potential der heute üblichen umfangreichen Datenerfassung und Messungen an der Schildmaschine auszunutzen und ein Verfahren zu entwickeln, mit dem sich die Setzungen auf Basis der vor Ort verfügbaren Daten, den Betriebsdaten der Schildmaschine, unter Berücksichtigung der bisherigen Projekterfahrungen und unter ständigem Abgleich der in situ gemessenen Interaktion zwischen Schildvortrieb und Setzungsbewegungen, prognostizieren lassen. Dazu wurden die Grundlagen der Datenerfassung und der Setzungsberechnung wissenschaftlich aufgearbeitet und ein neuer Ansatz zur Setzungsprognose entwickelt und getestet.

Zunächst wurden die Datenaufnahme und Messwerterfassung bei modernen Flüssigkeitsschildvortrieben untersucht und vor dem Hintergrund der jeweils vor Ort erreichbaren Messgenauigkeit bewertet. Anhand dieser Untersuchung konnte die Zuverlässigkeit der erhaltenen Messwerte abgeschätzt und bei redundant berechenbaren Messwerten die auszuwertenden Messsysteme gewählt werden.

Hinsichtlich der bisher existierenden unterschiedlichen empirischen, analytischen und FEMbasierten Verfahren zur Berechnung der Setzungen zeigte sich, dass diese nur unzureichend zur vortriebssynchronen Prognose der Setzungen geeignet sind und entweder die Bauverfahrenstechnik vernachlässigen, auf vor Ort nur schwer bzw. ungenau ermittelbare Bodenparameter angewiesen oder zu zeit- und kostenintensiv für eine kontinuierliche, vortriebsbegleitende Berechnung sind. Die Unschärfe, die durch die deterministisch nicht eindeutig beschreibbare Interaktion zwischen Schildvortrieb und Bodenbewegung und den damit nur vage formulierbaren Zusammenhängen entsteht, kann in den bisherigen Modellen nicht adäquat berücksichtigt werden.

Zur Berücksichtigung dieser Unschärfe und der Forderung nach einer permanenten Rückkopplung zwischen verursachten und prognostizierten Setzungen wurde im Rahmen dieser Arbeit daher ein hybrid arbeitendes neuro-fuzzy-basiertes System zur Prognose der Setzungen entwickelt.

Dazu wurden die theoretischen Möglichkeiten der beiden Techniken (Fuzzy-Logik und KNN) analysiert und die Vor- und Nachteile für den hiesigen Anwendungsfall im Rahmen der Setzungsprognose aufgezeigt. Die Theorie der Fuzzy-Logik und der KNN, die unterschiedlichen verfügbaren Modelltypen und die Vorteile der Kombination aus KNN und Fuzzy-Systemen wurden explizit dargestellt und daraus ein Systemaufbau abgeleitet.

Neben diesem prinzipiellen Verständnis der Fuzzy-Logik und der KNN stellt das Verständnis der Interaktion zwischen Vortrieb und Setzungen die Grundlage für die anschließende Entwicklung des Verfahrens zur Prognose der Setzungen dar. Die Setzungsursachen, die Einflussfaktoren, die die Größe der Setzungen bestimmen, und der Setzungsverlauf wurden daher detailliert analysiert.

Die maßgeblichsten Ursachen und Einflussgrößen, die die horizontalen und vertikalen Bodenbewegungen und damit Setzungen verursachen oder ihre Größe bestimmen, wurden herausgearbeitet. Diese überlagern sich gegenseitig in ihren Wirkungen und sind im Rahmen des Systems zur Setzungsprognose auch in ihren nur schwer quantifizierbaren Wechselwirkungen zu berücksichtigen. Die Setzungsbewegungen eines Punktes sind zudem das Resultat einer zeitlichen Abfolge von Vortriebssituationen. Zur Beschreibung der Setzungsbewegungen muss daher der gesamte bisherige Prozessverlauf im Einflussbereich eines Punktes herangezogen werden.

Weiterhin konnte festgestellt werden, dass die Beschreibung der Interaktion zwischen Vortrieb und Setzungen grundsätzlich in zwei verschiedene Bereiche (vorauseilende und nachfolgende Setzungen) mit jeweils eigenständigen Regelbasen aufgeteilt werden kann.

Hinsichtlich der Setzungsmulde quer zur Tunnelachse zeigte sich, dass hier kein Fuzzy-System zur Beschreibung der Setzungsbewegungen notwendig war. Zur Berechnung dieser Mulde existierten bereits funktionale Beschreibungen, die es ermöglichten, den Verlauf der Setzungsmulde in Abhängigkeit von den prognostizierten Werten auf der Tunneltrasse zu berechnen. Die Einführung eines Korrekturfaktors erlaubte es, diesen Verlauf der Setzungsmulde vortriebssynchron an die in situ Verhältnisse anzupassen.

Zur Beschreibung der Setzungsursachen und der beeinflussenden Faktoren konnten auf Basis der Analyse der Datenaufnahme und der Setzungen aussagekräftige Parameter entwickelt werden, die die unterschiedlichen Einflüsse des Vortriebs auf die Bodenbewegungen anhand der Vielzahl der aufgenommenen Messwerte erfassen. Darauf basierend wurden ein Systemaufbau, Fuzzy-Mengen zur Fuzzifizierung der Parameter und Regelbasen zur Beschreibung der Interaktion zwischen Vortrieb und Setzungsbewegungen entwickelt.

Durch eine Kopplung mit einem KNN konnte erreicht werden, dass die Wissensbasen zur Beschreibung der Interaktion zwischen Vortrieb und Bodenbewegungen vortriebssynchron adaptiv verbessert werden und sich somit wechselnden Randbedingungen automatisch anpassen.

Dieser neu entwickelte Ansatz zur Prognose der Setzungen wurde mit Hilfe der Entwicklungsumgebung MATLAB in ein Programm umgesetzt. Das Programm ermöglicht es, die erzeugten Setzungen vortriebssynchron auf Basis der aufgenommenen Prozessdaten zu prognostizieren. Die Tauglichkeit des Systems konnte im Rahmen von Vergleichsrechnungen anhand umfangreicher Praxisdaten zweier verschiedener Flüssigkeitsschildprojekte nachgewiesen werden. Basierend auf diesen Erkenntnissen bietet sich ein Praxiseinsatz des Systems im Rahmen einer vortriebsbegleitenden Prognose der Setzungen an.

Zukünftige Einsatz- und Entwicklungsmöglichkeiten wurden darüber hinaus im Rahmen der Praxisempfehlungen und des Ausblicks gegeben.

9 Literatur

- [1] Anagnostou, G.; Kovári, K.: Ein Beitrag zur Statik der Ortsbrust beim Hydroschildvortrieb. In: Technische Universität München (Hrsg.): Probleme bei maschinellen Tunnelvortrieben? - Gerätehersteller und Anwender berichten (Symposium München 22.10-23.10.1992). München: Eigenverlag, 1992, S.179-196
- [2] Anheuser, L.: Gemessene Setzungen über mit dem Hydroschild aufgefahrenen Tunneln. In: STUVA (Hrsg.): Forschung und Praxis 27 (Unterirdisches Bauen Gegenwart und Zukunft, Berlin 1981). Düsseldorf: Alba, 1982, S.120-128
- [3] Attewell, P. B.: Ground movements caused by tunnelling in soil. In: University of Wales Institute of Science and Technology (Hrsg.): Large Ground Movements and Structures (Cardiff 1977). London: Pentech Press, S.812-948.
- [4] Attewell, P. B.; Mice, D.; Woodman, J. P.: Predicting the dynamics of ground settlements and its derivatives caused by tunneling in soil. In: Ground Engineering, 15 (1982), Nr. 8, S. 13-23
- [5] Babendererde, L.; Holzhäuser, J.; Babendererde, S.: Verpressen der Schildschwanzfuge hinter einer Tunnelvortriebsmaschine mit Tübbingausbau. In: Taschenbuch für den Tunnelbau 2002, S.228-254
- [6] Babendererde, S.: Tunnelling machines in soft ground. In: Civil engineering for underground rail transport. London: Butterworth 1990.
- [7] Babendererde, S.: Verpressen der Schildschwanzfuge hinter einer Tunnelvortriebsmaschine mit Tübbingausbau. In: Tunnel, 19 (2000), Nr. 3, S.35-40
- [8] Bae, G.J.; Kim, C.Y.; Shin, H.S.; Hong, S.W.: Development of an expert system of safety analysis of structures adjacent to tunnel excavation sites. In: Environmental and safety concerns in underground constructions, Rotterdam: Balkema,1997, S. 819-824
- [9] Beer, G., et al.: TUNCONSTRUCT, Technology innovation in underground construction. Projektantrag zur Förderung einer europäischen Forschergruppe innerhalb des sechsten Rahmenprogramms der Europäischen Kommission, 2004 (unveröffentlicht)
- [10] Blom, C.B.M.: design philosophy of concrete linings for tunnels in soft soils. Delft, Technische Universität, Dissertation, 2002,
- [11] Bourène, D.: Monitoring procedure for settlement points, Extensometers and Water level. Boortunnel Pannerdensch Kanaal. Eigenverlag, 2001
- [12] Bracegirdle, A., Mair, R.J., Nyren, R.J. and Taylor, R.N.: A methodology for evaluating potential damage to cast iron pipes induced by tunnelling, In: Geotechnical As-

pects of Underground Construction in Soft Ground (London 15.04-17.04.1996), Rotterdam: Balkema,1996, S. 659-664.

- [13] Braach, O.: Risiken und Chancen beim mechanisierten Tunnelbau. In: STUVA (Hrsg.): Forschung und Praxis 34 (Tunnelbau – Neue Chancen aus europäischen Impulsen, Düsseldorf 1991), Düsseldorf: Alba 1992, S.41-45
- [14] Braach, O.; Otten; B.: Der Westerscheldetunnel außerplanmäßige Ereignisse beim Vortrieb und deren Bewältigung. In: Forschung und Praxis, 40 (2003), S.188-195
- [15] Cassinis, C.; Nisio, P.; Capata, V.: Settlement and face stability during boring a large tunnel. In: International Conference of soil mechanics Mexico 1985. Rotterdam: Balkema, 1985
- [16] Chi, S.-Y.; Chern, J.-C.; Lin, C.-C.: Optimized back-analysis for tunneling-induced ground movement using equivalent ground loss model. In: Tunnelling and Underground Space Technology, 16 (2001), Nr. 2, S. 159-165
- [17] Clough, G.W.; Schmidt, B.: Design and performance of excavations and tunnels in soft clay. In: Brand, E. W.; Brenner, R. P. (Hrsg.): Soft Clay Engineering (Developments in Geotechnical Engineering, Bangkok 1977). Amsterdam: Elsevier, 1981, S.569-634
- [18] DAUB: Empfehlungen für die Konstruktion und den Betrieb von Schildmaschinen. In: Tunnel, 19 (2000), Nr. 6, S. 54-76
- [19] Demant; B.: Fuzzy-Theorie oder die Faszination des Vagen: Grundlagen einer präzisen Theorie des Unpräzisen für Mathematiker, Informatiker und Ingenieure. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg, 1993
- [20] DIN 4019-100, Ausgabe 4/1996. Setzungsberechnungen Teil 100: Berechnung nach dem Konzept mit Teilsicherheitsbeiwerten.
- [21] DIN EN ISO 14688-1, Ausgabe 01/2003. Benennung, Beschreibung und Klassifikation von Boden.
- [22] Van Dorn, Th.; Vlijm, H. M.; Kaalberg, F. J.; Hentschel, V.: Besondere Anforderungen an die Schildmaschine bei der U-Bahn Noord/Zuid-Lijn in Amsterdam – Die Minimierung von Setzungen durch einen setzungsorientierten Schildvortrieb. In: Lehrstuhl für Bauverfahrenstechnik, Tunnelbau und Baubetrieb (Hrsg.): Tunneltechnologie für die Zukunftsaufgaben in Europa. Rotterdam: Balkema, 1999, S. 47-58
- [23] Fang, Y.-S.; Lin, S.-J.; Lin J.-S.: Time and settlement in EPB shield tunnelling. In: Tunnels and Tunnelling, 25 (1993), Nr. 11, S.27-28
- [24] Faulkner, J.: Einführung in Neuronale Netze. Institut für Informatik, Universität Tübingen, Skript, 2001
- [25] Fifer, K. B.: Neural Networks as a means for predicting convergence in tunnels. In: Kusakabe, O.; Fujita, M.; Miyazaki, Y. (Hrsg.): Geotechnical Apects of Underground Construction in Soft Ground (Tokyo 19.07-21.07.1999). Rotterdam: Balkema, 2000, S. 363-368

- [26] de la Fuente, P.; Oteo, C.: Theoretical research on the subsidence originated by the underground construction in urban areas. In: Proceedings of the Danube International Symposium, Rumania, 1996
- [27] Gaj, F.; Guglielmetti, V.; Grasso, P.; Giacomin, G.: Experience on Porto EPB Follow-up. In: Tunnels & Tunnelling International, 35 (2003), Nr. 12, S. 15-18
- [28] Grima, M.A.: Neuro-Fuzzy modeling in engeneering geology. Rotterdam: Balkema, 2000
- [29] Grima, M.A., Bruiness, P.A., Verhoef, P. N. W.: Modeling Tunnel Boring Machine Performance by Neuro-Fuzzy Methods. In Tunnelling and Underground Space Technology, Band 15 (2000), Nr. 3, S. 259-269
- [30] Hagiwara, T.; Grant, R.J.; Calvello, M.; Taylor, R.N.: The effect of overlying strata on the distribution of ground movements induced by tunnelling in clay. In: Soils and Foundations, Band 39 (1999), Nr. 3, S. 63-73
- [31] Hartmann, D.: Wissensbasierte Methoden. Vorlesungsmanuskript. Lehrstuhl für Ingenieurinformatik im Bauwesen, Ruhr-Universität Bochum, 2003
- [32] Hartmann, D.; Lehner, K.: Technische Expertensysteme. Berlin: Springer, 1990
- [33] Hartmann, D.; Lohaus, L.; Maidl, B.; Meschke, G.; Triantafyllidis, Th.: Prognosemodelle im Tunnelbau. Antrag auf Einrichtung einer Forschergruppe zur Förderung durch die deutsche Forschungsgemeinschaft, 2001, unveröffentlicht
- [34] Hashimoto, T.; Nagaya, J.; Konda, T.: Prediction of ground deformation due to shield excavation in clayey soils. In: Soils and Foundations, Band 39 (1999), Nr. 3, S. 53-61
- [35] Herrenknecht AG: TBM Specifications Project Pannerdenschkanal. Schwanau: Eigenverlag 2000, unveröffentlicht
- [36] Herzog, M.: Die Setzungsmulde über seicht liegenden Tunneln. In: Bautechnik, 1985, Nr. 11, S. 375-377
- [37] Herzog, M.: Elementare Tunnelbemessung. Düsseldorf: Werner, 1999
- [38] Hintz, S.; Wingmann, J.; Kaundinya, I.; Scheurer, M.: Tunnel Pannerdensch Kanaal, Evaluation realization South tube. Pannerdensch: Eigenverlag 2003, unveröffentlicht
- [39] Hoffmann, J.; Brunner, U.: Matlab & Tools für die Simulation dynamischer Systeme. München: Addison Wesley, 2002
- [40] Ingles, O.G.: Soil Stabilization. Sydney: Butterworth's, 1972
- [41] Iwe, H.: Einführung in die Fuzzy-Technologie. FH Dresden, Fachbereich für Informatik/Mathematik, Vorlesungsskript, 2000
- [42] Jakobs, A.: Analyse der Datenaufzeichnung beim Flüssigkeitsschildvortrieb im Hinblick auf eine setzungsarme Betriebsweise. Bochum, Ruhr-Universität, Lehrstuhl für Bauverfahrenstechnik, Tunnelbau und Baubetrieb, Diplomarbeit, 2003 (unveröffentlicht)

[43]	Jancscez, S.; Frietzsche, W.: Minimierung von Senkungen beim Schildvortrieb am Beispiel der U-Bahn Düsseldorf. In Taschenbuch für den Tunnelbau 2001. Essen: Glückauf, 2001, S. 165-186
[44]	Jang, JS. R.: ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. In: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Band 23 (1993), Nr. 3, S. 665-685
[45]	Jonker, J.: Einsatzerfahrungen bei Schildvortrieben an der Betuwelinie in den Niederlanden. 6. Internationales Symposium für Tunnelbau, München 2001, S. 109-120
[46]	Jonker, J.; Hintz, S.: Betuweroute – Vergleich individueller technischer Lösungen bei der Erstellung der drei Bohrtunnel. In: STUVA (Hrsg.): Forschung + Praxis 40 (U-Verkehr und unterirdische Bauen), BauVerlag 2003, S. 33-39
[47]	Jonker, J.; Maidl, U.; Hintz, S.: Von der Datenauswertung über die Prognosemodelle zu Prozessleitsystemen - Entwicklungsschritte an den Tunnel der Betuwelinie. In: Lehrstuhl für Bauverfahrenstechnik, Tunnelbau und Baubetrieb (Hrsg.): Risikopoten- tial und Bewältigung bei aktuellen Tunneln, Essen: Glückauf, 2003, S. 73-86
[48]	Jun, S.; Yongfu, X.; Hongwei, Y.: A study on environment ground settlement control in urban district under shield tunnelling. In: Teuscher, P.; Colombo, A. (Hrsg.): Progress in Tunnelling after 2000 (AITES-ITA WTC Milano 2001). Bologna: Patron Editore, 2001, S.393-400
[49]	Kaalberg, F.J.; Hentschel, V.: Tunnelvortrieb in weichem Boden mit hohem Wasser- stand und Pfahlgründungen – zur Entwicklung einer setzungsorientierten und set- zungsminimierenden Betriebsweise der TBM. In: STUVA (Hrsg.): Forschung und Praxis 37 (Neue Akzente im unterirdischen Bauen, Berlin 1997). Düsseldorf: Alba, 1998, S. 72-79
[50]	Kahlert, J.; Frank, H.: Fuzzy-Logik und Fuzzy-Control. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg, 1993
[51]	Kasper, T.: Finite Elemente Simulation maschineller Tunnelvortriebe in wasser- gesättigtem Lockergestein. Bochum, Ruhr-Universität, Lehrstuhl für Statik und Dynamik, Dissertation, 2004
[52]	Kasper, T.; Meschke, G.: Three-dimensional finite element simulations of hydroshield tunnelling. In: Saveur, J. (Hrsg.): (Re)Claiming the Underground Space (AITES-ITA WTC Amsterdam 12.04-17.04.2003). Rotterdam: Balkema, 2003, S. 779-786
[53]	Kim, S.H.; Kim, N.Y.; Chung, H.S.: Prediction of final displacement of tunnel section during excavation. Japanese Association of soil mechanics. (AITES-ITA WTC Milano 2001). Bologna: Patron Editore, S. 417-424
[54]	Kim, C.; Park, C.; Bae, G.; Hong, S.: A new methodology for the damage assessment of adjacent structures due to tunnel excavation in urban areas. (AITES-ITA WTC Milano 2001). Bologna: Patron Editore, S.401-408
[55]	Köster, M.: Geländesenkung über oberflächennahen Tunneln. TH Darmstadt: Dis- sertationsschrift des Fachbereichs Geowissenschaften, 1987

- [56] Krause, Th.: Schildvortrieb mit flüssigkeits- und erdgestützter Ortsbrust. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, 1987, Heft 24
- [57] Kuhlmann, H.: Sensorik zielverfolgender Tachymeter. In: Mitteilungen des Landesvereins Baden-Württemberg des DVW, 46, Nr. 2, Stuttgart 1999
- [58] Lake, L. M.; Rankin; W. J.; Hawley, J.: Prediction and Effects of Ground Movements Caused by Tunnelling in Soft Ground beneath Urban Area. CIRIA Report No. 30, Construction Industry Research and Information Association, UK. 1996
- [59] Leca, E.: Modelling and prediction for bored tunnels. In: Mair, R. J.; Taylor, R. N. (Hrsg): Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground (London 15.04-17.04.1996). Rotterdam: Balkema, 1996, S.27-42
- [60] Leca, E., Leblais, Y. & Kuhnhenn, K.: 2000. Underground Works in Soils and Soft Rock Tunneling. In: Proceedings of GeoEng 2000, Melbourne, Australia. S. 220-268.
- [61] Lee, C.-J.; Wu, B.-R.; Chiou, S.-Y.: Soil Movements around a tunnel in soft soils. In: Proc. of the Natl. Science Council, Republic of China, Part A: Physical science and engineering, Band 23, Nr. 2, 1999, S. 235-247
- [62] Lee, K.M.; Rowe, R.K.: An analysis of three-dimensional ground movements: the Thunder Bay tunnel. In: Canadian Geotechnical Journal, Band 28 (1991), Nr.1, S. 25-41
- [63] Lee, K. M.; Rowe, R. K.; Lo, K. Y.: Subsidence owing to tunnelling. I. Estimating the gap parameter. In: Canadian Geotechnical Journal, Band 29 (1992), Nr.6, S. 929-941
- [64] Loganathan, N.; Poulos, H. G.: Analytical prediction for tunnelling-induced ground movements in clays. In: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124 (1998), Nr. 9, S. 846-856
- [65] Maidl, B.: Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus, Band I, 3. Auflage. Essen: Glückauf, 2004
- [66] Maidl, B.; Herrenknecht, M.; Anheuser, L.: Maschineller Tunnelbau im Schildvortrieb. Berlin: Ernst & Sohn, 1995
- [67] Maidl, B.; Maidl, U.; Nellessen Ph.: Strategie der Verbruchvorhersage auf Basis der Auswertung der Auswertung der Vortriebsdaten. In: Felsbau 22 (2004), Nr. 3, S. 8-20
- [68] Maidl, B.; Maidl, U.; Nellessen Ph.: Strategie der Verbruchvorhersage auf Basis der Auswertung der Vortriebsdaten anhand eines Beispiels beim Hydroschildvortrieb. In: Lehner, K. (Hrsg.): Computer im Bauwesen. Aachen: Shaker, 2004, S. 57-74
- [69] Maidl, B.; Meschke, G.; Hartmann, D.; Nellessen, Ph.: Entwicklung von Prognosemodellen und Prozessleitsystemen für den maschinellen Tunnelbau. Forschungsantrag zur Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (2003), unveröffentlicht
- [70] Maidl, U., Nellessen, Ph.: Zukünftige Anforderungen an die Datenaufnahme und auswertung bei Schildvortrieben. In: Bauingenieur 78 (2003), Nr. 3, S. 150-162.

[71]	Maidl, U.; Nellessen, Ph.: Process Controlling for High-Tech shield drive. In: Broch; Rogers; Sterling; Zhao (Hrsg.): Tunnelling and Underground Space Technology Vol. 19, Nr. 4-5 (AITES-ITA WTC Singapore 2004), Oxford: Elsevier, 2004, S. 389 und D01 S. 1-8
[72]	Mair, R.J.; Taylor, R. N.; and Bracegirdle, A.: Subsurface settlement profiles above tunnels in clay. In: Geotechnique, 43 (1993), Nr. 2, S.315-320
[73]	Mair, R.J.; Taylor, R.N.; Burland, J.B.: Prediction of ground movements and as- seessment of risk of building damage due to bored tunnelling. In: Mair, R. J.; Taylor, R. N. (Hrsg.): Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground (London 15.04-17.04.1996). Rotterdam: Balkema, 1996, S. 713-718
[74]	Martos, F.: Concerning an approximate equation of the subsidence trough and its time factors. In: Internal strata control (Internal strata control congress Leipzig 1958). Berlin: Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1958, S.191-205
[75]	Mathworks: Fuzzy-Logic Toolbox. User's Guide Version 2. Eigenverlag: 2002
[76]	Meschke, G.; Kasper, T.: Mit "Virtual Tunnelling" dicht unter den Kellern entlang. In: Rubin, 2002, Nr. 2, S. 16-27
[77]	Ministry of Transport, Public Work and Water Management, Netherlands: Tunnels in the Netherlands, a new generation. Amsterdam, 2003
[78]	Moh, ZC.; Hwang, R. N.; Ju D. H.: Ground movements around tunnels in soft ground In: Mair, R. J.; Taylor, R. N. (Hrsg.): Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground (London 15.04-17.04.1996). Rotterdam: Balkema, 1996, S. 725-730
[79]	Nauck, D.; Klawonn, F.; Kruse, R.: Neuronale Netze und Fuzzy-Systeme. Braun- schweig: Vieweg & Sohn, 1994
[80]	Nauck, D.; Kruse, R.: A neuro-fuzzy method to learn fuzzy classification rules from data source. In: Fuzzy sets and systems, 89 (1997), Nr. 3 (August) S.277-288
[81]	Nauck, D.; Kruse, R.: Fuzzy-Systeme und Soft Computing. In J. Biethan, A. Höhnerloh and V. Nissen (Hrsg.): Fuzzy Set Theorie in betriebswirtschaftlichen Anwendungen, S.1-19. München: Franz Vahlen, 1997
[82]	Negro, A.; de Queiroz, P. I. B.: Prediction and performance: A review of numerical analyses for tunnels. In: Kusakabe, O.; Fujita, M.; Miyazaki, Y. (Hrsg.): Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground (Tokyo 19.07-21.07.1999). Rotterdam: Balkema, 2000, S.409-418
[83]	Nellessen, Ph.: Setzungsorientierte Datenauswertung beim Hydroschildvortrieb. Bochum, Ruhr-Universität, Lehrstuhl für Bauverfahrenstechnik, Tunnelbau und Bau- betrieb, Diplomarbeit, 2002 (unveröffentlicht)
[84]	Ngan-Tillard, D.J.M; Elkadi, A.S.; Swinnen, G.: Dynamic soil modeling for a settle- ment-driven TBM control system. In: Saveur, J. (Hrsg.): (Re)Claiming the Under- ground Space (AITES-ITA WTC Amsterdam 12.04-17.04.2003). Rotterdam: Balkema, 2003, S. 811-816
ro -1	

[85] Nieder, G.: Fuzzy Logic – eine Möglichkeit zur Automatisierung der Richtungsteuerung im unterirdischen Rohrvortrieb. In: TIS, BAND (1995), Nr. 2, S. 11-16

- [86] Obladen, B. K. J.: Device and method for drilling in a subsurface. World Intellectual Property Organization. WO 01/34941 A1, 2001
- [87] O'Reilly, M. P.; New, B. M.: Settlements above tunnels in the United Kingdom their magnitude and prediction. In: Institute of Mining and Metallurgy (Hrsg.): Tunnelling `82. London: Institute of Mining and Metallurgy, S. 173-181
- [88] Peck, R.B.: Deep excavations and tunnelling in soft ground. State of the Art Report. Proc. of 7th ICSMFE, S. 225-290, Mexico (1969).
- [89] Pfeiffer, B.-M.; Jäkel, J.; Kroll, A.; Kuhn, C.; Kuntze, H.-B.; Lehmann, U.; Slawinski, T.; Tews, V.: Erfolgreiche Anwendung von Fuzzy Logik und Fuzzy Control (Teil 1).
 In: Automatisierungstechnik, 50 (2001), Nr.10, S. 461-471
- [90] Pfeiffer, B.-M.; Jäkel, J.; Kroll, A.; Kuhn, C.; Kuntze, H.-B.; Lehmann, U.; Slawinski, T.; Tews, V.: Erfolgreiche Anwebndung von Fuzzy Logik und Fuzzy Control (Teil 2). In: Automatisierungstechnik 50 (2002), Nr.10, S. 511-521
- [91] Piazolla, A.: Modelle zur Prognose der Endsetzungen auf Basis der vorauseilenden Setzungen. Bochum, Ruhr-Universität, Lehrstuhl für Bauverfahrenstechnik, Tunnelbau und Baubetrieb, Diplomarbeit, 2003 (unveröffentlicht)
- [92] Poisel, R.; Tentschert E.; Bach, D.; Zettler, A.: Gebirgsklassifikation und Regelung von Tunnelbohrmaschinen mittels Fuzzy Logik. In: Felsbau, 17 (1999), Nr.5, S. 486-492
- [93] Poisel, R.; Zettler, A.; Bach, D.; Lakovits, D.; Kastner, W.: Rock Mass Rating based on Tunnel Boring Machine Data. In: Felsbau, 17 (1999), Nr.3, S. 168-174
- [94] Rasch, D.: Mathematische Statistik. Heidelberg, Leipzig: Johann Ambrosius Barth, 1995
- [95] Rehkugler, H.; Zimmermann, H.: Neuronale Netze in der Ökonomie. München: Vahlen, 1994
- [96] Romo, M.P.: Soil movements induced by slurry shield tunnelling. In: Proc. XIV. ICSMFE, Hamburg, 1997, S. 1473-1481
- [97] Rowe, R.K., Lee, K.M.: An evaluation of simplified techniques for estimating three dimensional undrained ground movements due to tunnelling in soft soils. In: Canadian Geotechnical Journal, 29 (1992), Nr.1, S. 39-52.
- [98] Rowe, R. K.; Lee, K. M.: Subsidence owing to tunnelling. II. Evaluation of a prediction technique. In: Canadian Geotechnical Journal, Band 29 (1992), Nr.6, S. 941-953.
- [99] Ruland, T.: Einführung in Neuronale Netzte. Universität Ulm, Fachbereich Informatik, Skriptum, URL (01.10.2004): www.informatik.uni-ulm.de/ni/Lehre/SS04/ProsemSC/ausarbeitungen/Ruland.pdf
- [100] Sagaseta, C.: Analysis of undrained soil deformation due to ground loss. In: Geotechnique, 37 (1987), Nr.3, S. 301-320
- [101] Sagaseta, C.: On the role of analytical solutions for the evaluation of soil deformation around tunnels. In: Cividini, A. (Hrsg.): Application of numerical methods to geotechnical problems. CSIM Courses and Lectures Nr. 397 (1998), S. 3-24

[102]	Sagaseta, C.; Uriel, A. O.: Selection for design parameters for underground con- struction. In: Soil Mechanics Vol. 9 (12th International Congress on Soil Mechanics Rio de Janeiro 13-18 August 1989). Rotterdam: Balkema, 1989, S. 2521-2551
[103]	Sakajo, S.; Yoshimaru, T.; Kamimura, M.: Analytical and geotechnical consideration on ground settlement induced by tail void closure of shield tunnel construction. In: Mair, R. J.; Taylor, R. N. (Hrsg): Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground (London 15.04-17.04.1996). Rotterdam: Balkema, 1996, S. 585-590
[104]	Schmid, M.: Prozessoptimierung mit neuronalen Netzen. In: Matlab Select 2003, Nr. 2, S. 20-22
[105]	Schmidt, B.: Settlements and ground movements associated with tunnelling in soft soils. Ph.D. thesis, 1969, University of Illinois
[106]	Schöneburg, E.; Hansen, N.; Gawelczyk, A.: Neuronale Netzwerke. München, Markt&Technik, 1990
[107]	Sellner, P.J.: Prediction of Displacements in Tunnelling. Technische Universität Graz, Institut für Felsmechanik und Tunnelbau, Dissertation, 2000
[108]	Shi J., Ortigao; J. A. R.; Bai, J.: Modular Neural Networks for predicting settlements during tunneling. In: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Band 124 (1998), Nr.5, S. 389-395
[109]	Shirlaw, J. N.: Discussion: Can settlements over tunnels be accurately predicted using advanced numerical methods? In: Kusakabe, O.; Fujita, M.; Miyazaki, Y. (Hrsg.): Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground (Tokyo 19.07-21.07.1999). Rotterdam: Balkema, 2000, S. 471-474
[110]	Simmer, K.: Grundbau, Teil 1: Bodenmechanik und erdstatische Berechnungen. Stuttgart: Teubner, 1994
[111]	Smoltczyk, U. (Hrsg.): Grundbau Taschenbuch, 5. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn, 1996
[112]	Szechy, K.: Tunnelbau. Wien/New York : Springer, 1969.
[113]	Striegler, W.: Tunnelbau. Berlin/München: Verlag für Bauwesen, 1993
[114]	Tan, W. L.;Ranjith, P. G.: Parameters and Consideration in Soft Ground Tunneling. EJGE, Band 8 (2003), Abschnitt D, S. 1-18
[115]	Tawil, M.: Künstliche Neuronale Netzwerke – Methode und Anwendung. TU- Clausthal, Institut für Maschinenwesen, Institutsmitteilung 24 (1999)
[116]	Terano, T.; Asai, K.; Sugeno, M.: Fuzzy Systems Theory and Application. San Diego: Academic Press Inc., 1992
[117]	Triantafyllidis, T.: Arbeitsblätter für Bodemechanik. Bochum, Ruhr-Universität, Lehr- stuhl für Grundbau und Bodenmechanik, Vorlesungsskript Ausgabe 3/99, 1999
[118]	Trettin, D.: Adaption von Modellen zur drucksensiblen Verpressung des Ringspaltes. Bochum, Ruhr-Universität, Lehrstuhl für Bauverfahrenstechnik, Tunnelbau und Bau- betrieb, Diplomarbeit (unveröffentlicht)

- [119] Uijl, J.A.; Vervuurt, A.H.J.M.; Gijsbers, F.B.J.; van der Veen, C.: Full-scale tests on a segmented tunnel lining. In: Saveur, J. (Hrsg.): (Re)Claiming the Underground Space (AITES-ITA WTC Amsterdam 12.04-17.04.2003). Rotterdam: Balkema, 2003, S. 881-887
- [120] Verruijt, A.; Booker, J. R.: Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane. In: Geotechnique, 46 (1996), Nr.4, S. 753-756
- [121] Witten, I.; Frank, E.: Data-Mining. München: Hanser, 2001
- [122] Wehrmeyer, G.: Zur Kontrolle der geförderten Aushubmassen beim Tunnelvortrieb mit Flüssigkeitsschilden. Bochum, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Bauverfahrenstechnik, Tunnelbau und Baubetrieb, Dissertation, 2000
- Yoo, C. S.; Kim, J. H.; Park, Y. J.; Yoo, J.H.: A GIS-based tunnelling-induced building/utility damage assessment system-development. In: Saveur, J. (Hrsg.): (Re)Claiming the Underground Space (AITES-ITA WTC Amsterdam 12.04-17.04.2003). Rotterdam: Balkema, 2003, S. 1079-1087
- [124] Zadeh, L.: Fuzzy Sets, Information and Control, 1965, Nr.8, S. 338-353
- [125] Zettler, A.: A hybrid grouting control algorithm based on fuzzy logic tuned by a neural network. Wien, Technische Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen, Dissertation,1998
- [126] Zettler, A.; Poisel, R.; Stadler, G.: Bewertung geologisch-technischer Risiken mit Hilfe von Fuzzy Logik und Expertensystemen. In: Felsbau, 14 (1996), Nr. 6, S. 352-357
- [127] Zimmermann, H.J.: Fuzzy Technologien Prinzipien, Werkzeuge, Potentiale. Düsseldorf: VDI, 1993

10 Symbole und Abkürzungen

	Abkürzungen		
4D-GCS	4D Geo-Control System		
ANFIS	Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System		
Ер	Eingangsparameter		
EPB	Erdruckschild		
FIS-Editor	Fuzzy-Inference-System-Editor		
IBCS	Interactive Boring Control System		
IBLS	Integrales Bohrleitsystem		
IPS	Informations- und Prozessleitsystem		
KNN	Künstliches neuronales Netzwerk		
RVK	Ringspaltverpresskoeffizient		
RVR	Ringspaltverpressrate		
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerungen		
SR	Stützdruckrate		
TSK	Takagi-Sugeno-Fang-Modell		

Symbol	Bedeutung	Einheit
а	Aktivierungszustand	[-]
A	Matrix mit den normalisierten Erfüllungsgraden jeder Regel	[-]
A_{BS}	Betonit gefüllte Fläche im Querschnitt	[m ²]
В	Halbe Breite der Setzungsmulde	[m]
В	Spaltenvektor der die Ausgaben der Trainingsdatensätze enthält	[-]
D	Tunneldurchmesser	[m]
D_A	Ausbruchsdurchmesser	[m]
D_{Ak}	Durchmesser der Abbaukammer	[m]
D_L	maßgebender Ausbruchsdurchmesser	[m]
$D_{Lh/v}$	maßgebender horizontaler / vertikaler Ausbruchsdurchmesser	[m]

D_s	Durchmesser des Schneidrads inkl. Überschnitt	[m]
D_T	Außendurchmesser der Tübbinge	[m]
е	Eindringtiefe	[m]
$e_{h/v}$	horizontaler / vertikaler Erddruck	[kN/m²]
E	Fehlermaß	[-]
E_{Boden}	E-Modul des Bodens	[N/mm²]
E_p	Fehlermaß des Trainigsdatensatzes p	[-]
$f_{a/o/p}$	Aktivierungs- / Ausgabe- / Propagierungsfunktion	[-]
F_A	Ausbruchsquerschnitt des Tunnels (Abschnitt 2.3.1.1)	[m²]
$\varDelta F$	Hohlraum des Ringspaltes	[m²]
FM	Fuzzy-Menge	[-]
h _{Firste}	Abstand Lisene-Firste	[m]
h _{sus}	Suspensionsspiegelhöhe	[m]
Н, Н _Ü , с	Überdeckung	[m]
i	Abstand des Flexionspunkts von der Tunnelachse	[m]
k	Durchlässigkeit (Abschnitt 4.2.3.1)	[m/s]
k	Seitendruckverhältnis	[-]
k_i	Korrekturfaktor	[-]
k_R	Reibunskoeffizient	[-]
l	zurückgelegte Vortriebsstrecke im Intervall	[m]
l_{AK}	Länge der Abbaukammer	[m]
L	Anzahl Lagen des KNN	[-]
М	Anzahl der Konklusionsparameter (Abschnitt 5.5.3)	[-]
М	Drehmoment	[MNm]
• M _A	Massenstrom des Ausbruchs	[t/h]
• M _{Bil}	Differenz der Massenströme	[t/h]
M _{Ist}	gefördeter Massenstrom	[t/h]
M_{Soll}	Sollmassenstrom des Ausbruchs	[t/h]
n	Porenanteil des Bodens	[-]
$n_{e\!f\!f}$	effektiver Porenanteil des Bodens	[-]
<i>net</i> _i	Nettoinput	[-]
nk_{k-1}	Anzahl Knoten der Lage k-1	[-]
O^{*}	Knotenausgaben der von α abhängigen Knoten	[-]
$O_{i,p}^k$	Ausgabewert des Knotens (Lage k , Position i , Trainingsdatensatz p)	[-]

$p_{Anpr,eff}$	Effektiver Anpressdruck	[MN]
p_L	Luftpolsterdruck	[kN/m²]
$p_{Lis,i}$	Gemessener Druck in den Lisenen	[bar]
$\Delta P_{Lis,dyn}$	Mittlere dynamische Druckverluste in den Lisenen	[bar]
p_o	Oberflächenlast	[kN/m²]
$p_{Rsp,Firste}$	Referenzdruck der Ringspaltverpressung in der Firste	[bar]
$p_{Rsp_soll,Firste}$	erforderlicher Ringspaltverpressdruck in der Firste	[bar]
$p_{\mathit{Stdr},_\mathit{Soll},\mathit{Firste}}$	erforderlicher Stützdruck in der Firste	[kN/m²]
$p_{\mathit{Stdr},\mathit{Firste}}$	Stützdruck in der Firste	[kN/m²]
$p_{Wasser,Firste}$	aktuell anstehender Wasserdruck in der Firste	[KN/m ²]
R_{α}/R_{i}	Außen-/Innendurchmesser der Abbaukammer	[m]
S	Setzungen	[mm]
Δs	Veränderung des Setzungsverhaltens	[mm/h]
• S	Vortriebsweg pro Zeitintervall	[m/h]
S	Stützkraft	[kN]
S_0	Ursprüngliche Stützkraft	[kN]
S _{max}	maximale Setzungen über der Tunnelachse	[mm]
Δt	Zeitdifferenz zwischen den Messungen	[s]
Т	Tiefenlage der Tunnelachse	[m]
$T_{m,p}$	Zielwert (Komponente <i>m</i> , Trainingsdatensatz <i>p</i>)	[-]
v	Vortriebsgeschwindigkeit	[m/min]
$\overset{\bullet}{V_A}$	Volumenstrom des Ausbruchs	[m ³ /h]
V_{Bil}	Differenz der Volumenströme	[m ³ /h]
V_{BS}	Volumenstrom aus Betonitspiegelschwankungen	[m ³ /h]
$\overset{ullet}{V_{F\ddot{o}}}$	Gemessener Volumenstrom in der Förderleitung	[m ³ /h]
V_{Ist}	Geförderter Volumenstrom	[m ³ /h]
V _{Mörtel}	Verpresstes Mörtelvolumen	[m³]
• V soll	Sollvolumenstrom des Ausbruchs	[m3/h]
V_{Sp}^{\bullet}	Gemessener Volumenstrom in der Speiseleitung	[m ³ /h]
w	radiale Verformung des Bodens (Abschnitt 2.4.3)	[mm]
W	Verbindungsgewicht	[-]
W	Gewichtsvektor	[-]
\overline{W}	normalisiertes Verbindungsgewicht	[-]

W _r	Erfüllungsgrad der Regel r (Abschnitt 5.5.3)	[-]
$\overline{W_r}$	normalisierter Erfüllungsgrad der Regel r (Abschnitt 5.5.3)	[-]
x	Element / Eingabe (Input) (Kapitel 3)	[-]
x	Horizontaler Abstand zur Schildmaschine	[m]
X	Grundmenge, Eingabevektor	[-]
X_q	Abstand quer zur Tunnelachse	[m]
у	Ausgabewert	[-]
\overline{y}_{erg}	defuzzifizierte Ausgangswert	[-]
z	Überdeckung des Betrachtungshorizontes	[m]
Z_0	Überdeckung der Tunnelachse	[m]
~	Adaptiver Parameter des KNN	[_]
λα	Veränderung des Parameters des KNN	[-]
B	Gleitflächenneigung im aktiven Rankine'schen Zustand	[°]
p	Raumwichte des Bodens	L J [kN/m³]
y Boden	Wichte Mörtel	[kN/m ³]
$\frac{\partial E_p}{\partial O_{i,p}^k}$	Fehlerrate eines internen Knotens i der Lage k und des Trainings- datensatzes p	[-]
$\mu(x)$	Zugehörigkeitsfunktion	[-]
$\mu_{A,B}(x)$	Zugehörigkeit des Elementes x zur Fuzzy-Menge A bzw. B	[-]
$\mu_{erg}(y)$	Zugehörigkeitsfunktion der Ausgangs- Fuzzy-Menge	[-]
η	Lernrate	[-]
$ ho_{Ak}$	Gemischdichte in der Abbaukammer	[t/m³]
$ ho_r$	Dichte wassergesättigter Bodens	[t/m³]
$ ho_d$	Trockendichte	[t/m ³]
$ ho_w$	Dichte Wasser	[t/m³]
$ ho_{m,F\ddot{o}}$	Gemischdichte in der Förderleitung	[t/m ³]
$ ho_{m,Sp}$	Gemischdichte in der Speiseleitung	[t/m ³]
σ_0	primärer Spannungszustand	[N/mm²]
arphi	Winkel der inneren Reibung	[°]
ω	Rotationsgeschwindigkeit	[1/min]
Θ	Schwellenwert	[-]

11 Anhang

11.1 Fehlerrechnung zur abschnittsweisen zeitlichen Linearisierung des Setzungsverlaufs

Die Setzungen weisen in Abhängigkeit von der Zeit einen hyperbolischen Verlauf auf (vgl. [23]):

$$s(t) = \frac{t}{a+bt}$$
(11.1)

mit:

t : Zeit [d]

s(t) : Setzungen an der Oberfläche [mm]

a,*b* : zu bestimmende Konstanten [-]

Bei der abschnittsweisen zeitlichen Linearisierung stellt das Intervall um die Schneidradpassage (t=0) das ungünstigste Intervall dar, da hier die maximale Krümmung der Funktion vorliegt.

Der Fehler bei der Linearisierung (ϵ) ergibt sich aus der Differenz des anhand der Linearisierung ermittelten Funktionswertes $\tilde{s}(t_1)$ und dem tatsächlichen Funktionswert $s(t_1)$ (vgl. Abbildung 11.1).





Nimmt man zur Berechnung der Funktion den Durchschnitt der von Fang in [23] nach der Auswertung von neun Projekten angegebenen Werte für die Parameter a=0,1527 und b=0,0227, so ergibt sich der Fehler in Abhängigkeit von der Länge des Intervalls wie folgt:



Abbildung 11.2: Entwicklung des maximalen Fehlers bei der Linearisierung in Abhängigkeit von der Länge des Intervalls um den Zeitpunkt t=0

Selbst bei einer Intervalllänge von 48 h wird aufgrund der Linearisierung in dem ungünstigsten Intervall direkt nach der Schneidradpassage ein Fehler von 11,5 % für die verwendeten Parameter a,b gemacht.

Die durchschnittliche Intervalllänge liegt aufgrund der automatischen Aufzeichnung der Messwerte beim Projekt Pannerdenschkanal bei ca. 3 h, was einen durchschnittlichen Fehler von 1 % durch die abschnittsweise Linearisierung bedeutet. Beim Projekt Sophiaspoortunnel beträgt die Intervalllänge zwischen den Messungen bis zu 27,5 h, was im ungünstigsten Fall einen maximalen Fehler von ca. 7,2 % bedeutet.

Für die vortriebssynchrone Prognose der Setzungen sind diese Fehler hier als vernachlässigbar klein eingestuft worden.

11.2 Beispiel zur Arbeitsweise des Fuzzy-Systems

Im Folgenden ist die Arbeitsweise des Fuzzy-Systems beispielhaft am ersten Subsystem (ohne Berücksichtigung der Bodenmehrentnahmen) dargestellt. Gegeben sei die in Tabelle 11.1 dargestellte Vortriebssituation:

Tabelle	11.1:	Ausgangssituation
---------	-------	-------------------

Parameter	Wert
Verhältnis H/D	1,75
Abstand vor	-7 m
Stützdruckrate	1,1
Vortriebsgeschwindigkeit	20 mm/min
Geologie	Porenanteil 0,35

Die Fuzzifizierung dieser Werte anhand der in Kapitel 5.3 (S. 90) aufgestellten Fuzzy-Mengen liefert folgende Ergebnisse:



Tabelle 11.2: Darstellung der Fuzzifiizierung der Eingangswerte

Im nächsten Schritt, der Aggregation, wird nun der Erfüllungsgrad der Prämissen bestimmt. Die Verknüpfung der einzelnen Zugehörigkeitswerte erfolgt mit dem Produkoperator. Die jeweiligen Ergebnisse sind in Tabelle 11.3 gegeben.

Reg	lel	Erfüllungsgrad
1	H/D=gering & Abst=mittel & STDR=mittel & V=mittel & Geol=Sand/Kies	0,01922
2	H/D=gering & Abst=mittel & STDR=mittel & V=mittel & Geol=Übergangsbereich	0,01637
3	H/D=gering & Abst=mittel & STDR=mittel & V=schnell & Geol=Sand/Kies	0,00947
4	H/D=gering & Abst=mittel & STDR=mittel & V=schnell & Geol=Übergangsbereich	0,00807
5	H/D=gering & Abst=mittel & STDR=hoch & V=mittel & Geol=Sand/Kies	0,00374
6	H/D=gering & Abst=mittel & STDR=hoch & V=mittel & Geol=Übergangsbereich	0,00319
7	H/D=gering & Abst=mittel & STDR=hoch & V=schnell & Geol=Sand/Kies	0,00184
8	H/D=gering & Abst=mittel & STDR=hoch & V=schnell & Geol=Übergangsbereich	0,00157
9	H/D=gering & Abst=nah & STDR=mittel & V=mittel & Geol=Sand/Kies	0,04485
10	H/D=gering & Abst=nah & STDR=mittel & V=mittel & Geol=Übergangsbereich	0,03821
11	H/D=gering & Abst=nah & STDR=mittel & V=schnell & Geol=Sand/Kies	0,02209
12	H/D=gering & Abst=nah & STDR=mittel & V=schnell & Geol=Übergangsbereich	0,01882
13	H/D=gering & Abst=nah & STDR=hoch & V=mittel & Geol=Sand/Kies	0,00874
14	H/D=gering & Abst=nah & STDR=hoch & V=mittel & Geol=Übergangsbereich	0,00744
15	H/D=gering & Abst=nah & STDR=hoch & V=schnell & Geol=Sand/Kies	0,00430
16	H/D=gering & Abst=nah & STDR=hoch & V=schnell & Geol=Übergangsbereich	0,00367
17	H/D=mittel & Abst=mittel & STDR=mittel & V=mittel & Geol=Sand/Kies	0,06435
18	H/D=mittel & Abst=mittel & STDR=mittel & V=mittel & Geol=Übergangsbereich	0,05482
19	H/D=mittel & Abst=mittel & STDR=mittel & V=schnell & Geol=Sand/Kies	0,03170
20	H/D=mittel & Abst=mittel & STDR=mittel & V=schnell & Geol=Übergangsbereich	0,02700
21	H/D=mittel & Abst=mittel & STDR=hoch & V=mittel & Geol=Sand/Kies	0,01254
22	H/D=mittel & Abst=mittel & STDR=hoch & V=mittel & Geol=Übergangsbereich	0,01068
23	H/D=mittel & Abst=mittel & STDR=hoch & V=schnell & Geol=Sand/Kies	0,00617
24	H/D=mittel & Abst=mittel & STDR=hoch & V=schnell & Geol=Übergangsbereich	0,00526
25	H/D=mittel & Abst=nah & STDR=mittel & V=mittel & Geol=Sand/Kies	0,15016
26	H/D=mittel & Abst=nah & STDR=mittel & V=mittel & Geol=Übergangsbereich	0,12791
27	H/D=mittel & Abst=nah & STDR=mittel & V=schnell & Geol=Sand/Kies	0,07396
28	H/D=mittel & Abst=nah & STDR=mittel & V=schnell & Geol=Übergangsbereich	0,06300
29	H/D=mittel & Abst=nah & STDR=hoch & V=mittel & Geol=Sand/Kies	0,02925
30	H/D=mittel & Abst=nah & STDR=hoch & V=mittel & Geol=Übergangsbereich	0,02492

Tabelle 11.3: Ergebnisse der Aggregation

31	H/D=mittel & Abst=nah & STDR=hoch & V=schnell & Geol=Sand/Kies	0,01441
32	H/D=mittel & Abst=nah & STDR=hoch & V=schnell & Geol=Übergangsbereich	0,01227

Im zweiten Schritt der Inferenz folgt die Implikation. Aufgrund der Restriktionen der ANFIS-Routine wurden hierbei keine Regelgewichte gesetzt (vgl. Kapitel 5.4, S. 94). Die Akkumulation der Ergebnisse entfällt hier ebenfalls, da die Regeln aufgrund des Sugeno-Fuzzy-Systems als Schlussfolgerungen jeweils einen numerischen Wert besitzen und daher nicht zwischen mehreren gleichen Schlussfolgerungen abgewägt werden muss.

Die Berechnung des Ausgabewertes erfolgt anhand des gewichteten Durchschnitts aller Ergebnisse der einzelnen Regeln. Die einzelnen Ergebnisse werden dabei mit dem jeweiligen Erfüllungsgrad multipliziert, aufsummiert und durch die Summe der Erfüllungsgrade geteilt.

Regel	Erfüllungsgrad	Setzungswert [mm/h]	Gew. Einzelergebnis
1	0,01922	0,16	0,00334
2	0,01637	0,16	0,00285
3	0,00947	0,16	0,00165
4	0,00807	0,16	0,00140
5	0,00374	-0,17	-0,00069
6	0,00319	-0,17	-0,00059
7	0,00184	-0,28	-0,00056
8	0,00157	-0,17	-0,00029
9	0,04485	0,27	0,01316
10	0,03821	0,27	0,01121
11	0,02209	0,27	0,00648
12	0,01882	0,27	0,00552
13	0,00874	-0,06	-0,00057
14	0,00744	-0,06	-0,00049
15	0,00430	-0,17	-0,00080
16	0,00367	-0,06	-0,00024
17	0,06435	0,05	0,00350
18	0,05482	0,05	0,00298
19	0,03170	0,05	0,00172
20	0,02700	0,05	0,00147
21	0,01254	0,05	0,00068
22	0,01068	0,05	0,00058
23	0,00617	-0,06	-0,00040
24	0,00526	0,05	0,00029
25	0,15016	0,16	0,02611
26	0,12791	0,16	0,02225

Tabelle 11.4: Berechnung des Ausgabewertes

27	0,07396	0,16	0,01286
28	0,06300	0,16	0,01096
29	0,02925	-0,06	-0,00191
30	0,02492	0,05	0,00135
31	0,01441	-0,17	-0,00266
32	0,01227	0,05	0,00067
	Summ	0,12	

Anhand der gedachten Länge des Zeitintervalls (beispielsweise 3 h) ergibt sich daraus eine Zunahme der Setzungen von 3.0,12 = 0,36 mm für den betreffenden Punkt.

11.3 Darstellung der entwickelten Regelbasen

In den ersten fünf Spalten der Tabelle 11.5 und Tabelle 11.6 sind die unterschiedlichen Eingangsparameter mit ihren linguistischen Termen angegeben, in der sechsten Spalte ist die dazugehörige Bewertung der jeweiligen Kombination der Eingangsparameter (vgl. Kapitel 5.4, S. 94). Gemäß des gewählten "UND"-Operators ergibt die Lesart der folgenden Tabellen, wie hier exemplarisch für die erste Zeile der Tabelle 11.5 gezeigt:

WENN: EP₁=gering & EP₂=weit & EP₃=gering & EP₄= langsam & EP₅=Sand/Kies

DANN: Bewertung=5

11.3.1 Regelbasis zur Berechnung der vorauseilenden Setzungen

Die Regelbasis für das erste Fuzzy-System berücksichtigt entweder die Stützdruckrate oder die Orstbruststützung, je nachdem ob verwertbare Daten zur Bodenentnahme vorliegen.

Eingangsparameter					Ausgabe
H/D	Abstand vor	Stützdruckrate bzw. Ortsbruststützung	Vortriebsgeschwindigkeit	Geologie	Bewertung
gering				Sand/Kies	5
			langsam	Übergangsbereich	5
				schluffiger Ton	5
				Sand/Kies	6
		gering	mittel	Übergangsbereich	6
				schluffiger Ton	6
				Sand/Kies	7
			schnell	Übergangsbereich	7
				schluffiger Ton	7
				Sand/Kies	5
		weit mittel	langsam	Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	4
			mittel	Sand/Kies	5
	weit			Übergangsbereich	5
				schluffiger Ton	6
				Sand/Kies	5
			schnell	Übergangsbereich	5
				schluffiger Ton	6
			langsam	Sand/Kies	3
				Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	2
				Sand/Kies	3
		hoch	mittel	Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	3
				Sand/Kies	2
			schnell	Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	3
	mittel	gering		Sand/Kies	7
			langsam	Übergangsbereich	7
				schluffiger Ton	7

Tabelle 11.5: Regelbasis zur Berechnung der vorauseilenden Setzungen

	Eingangsparameter			Ausgabe	
H/D	Abstand vor	Stützdruckrate bzw. Ortsbruststützung	Vortriebsgeschwindigkeit	Geologie	Bewertung
				Sand/Kies	8
			mittel	Übergangsbereich	7
				schluffiger Ton	7
				Sand/Kies	7
			schnell	Übergangsbereich	7
				schluffiger Ton	7
				Sand/Kies	6
			langsam	Übergangsbereich	5
				schluffiger Ton	5
				Sand/Kies	6
		mittel	mittel	Übergangsbereich	6
				schluffiger Ton	7
				Sand/Kies	6
			schnell	Übergangsbereich	6
				schluffiger Ton	7
				Sand/Kies	3
			langsam	Übergangsbereich	2
				schluffiger Ton	2
				Sand/Kies	3
		hoch	mittel	Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	3
				Sand/Kies	2
			schnell	Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	3
			langsam	Sand/Kies	7
				Übergangsbereich	7
				schluffiger Ton	7
				Sand/Kies	9
		gering	mittel	Übergangsbereich	9
				schluffiger Ton	10
			schnell	Sand/Kies	8
				Übergangsbereich	8
				schluffiger Ton	9
			langsam	Sand/Kies	7
				Übergangsbereich	6
				schluffiger Ton	7
				Sand/Kies	7
	nah	mittel	mittel	Übergangsbereich	7
				schluffiger Ton	8
				Sand/Kies	7
			schnell	Übergangsbereich	7
				schluffiger Ton	8
			Sand/Kies	3	
		langsam	Übergangsbereich	3	
				schluffiger Ton	3
	hoch		Sand/Kies	4	
		mittel	Übergangsbereich	4	
				schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	3
			schnell	Übergangsbereich	4
			schluffiger Ton	4	

	Eingangsparameter			Ausgabe	
H/D	Abstand vor	Stützdruckrate bzw. Ortsbruststützung	Vortriebsgeschwindigkeit	Geologie	Bewertung
mittel				Sand/Kies	5
			langsam	Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	6
		gering	mittel	Übergangsbereich	5
				schluffiger Ton	5
				Sand/Kies	5
			schnell	Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	5
				Sand/Kies	4
			langsam	Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	3
				Sand/Kies	4
	weit	mittel	mittel	Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	5
				Sand/Kies	4
			schnell	Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	5
			langsam	Sand/Kies	4
				Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	3
			mittel	Sand/Kies	4
		hoch		Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	5
			schnell	Sand/Kies	3
				Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	4
	mittel	gering	langsam	Sand/Kies	6
				Übergangsbereich	6
				schluffiger Ton	6
			mittel	Sand/Kies	6
				Übergangsbereich	6
				schluffiger Ton	6
				Sand/Kies	6
			schnell	Übergangsbereich	6
				schluffiger Ton	7
				Sand/Kies	5
			langsam	Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	5
		mittel	mittel	Übergangsbereich	5
				schluffiger Ton	6
				Sand/Kies	5
			schnell	Ubergangsbereich	5
				schluffiger Ton	6
		hoch		Sand/Kies	4
			langsam	Ubergangsbereich	4
				schluffiger Ton	4
			mittel	Sand/Kies	5

	Eingangsparameter			Ausgabe	
H/D	Abstand vor	Stützdruckrate bzw. Ortsbruststützung	Vortriebsgeschwindigkeit	Geologie	Bewertung
				Übergangsbereich	5
				schluffiger Ton	5
				Sand/Kies	4
			schnell	Übergangsbereich	5
				schluffiger Ton	5
				Sand/Kies	8
			langsam	Übergangsbereich	7
				schluffiger Ton	7
				Sand/Kies	8
		gering	mittel	Übergangsbereich	8
				schluffiger Ton	8
				Sand/Kies	7
			schnell	Übergangsbereich	8
				schluffiger Ton	8
				Sand/Kies	6
			langsam	Übergangsbereich	5
		mittel		schluffiger Ton	5
				Sand/Kies	6
	nah		mittel	Übergangsbereich	6
				schluffiger Ton	7
			schnell	Sand/Kies	6
				Übergangsbereich	6
				schluffiger Ton	7
		hoch	langsam	Sand/Kies	6
				Übergangsbereich	5
				schluffiger Ton	5
			mittel	Sand/Kies	4
				Übergangsbereich	5
				schluffiger Ton	5
				Sand/Kies	3
			schnell	Übergangsbereich	5
				schluffiger Ton	5
hoch	weit			Sand/Kies	5
			langsam	Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	5
		gering	mittel	Übergangsbereich	5
				schluffiger Ton	5
				Sand/Kies	4
			schnell	Übergangsbereich	5
				schluffiger Ton	5
		mittel		Sand/Kies	3
			langsam	Übergangsbereich	2
				schluffiger Ton	2
				Sand/Kies	3
			mittel	Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	4
			schnell	Sand/Kies	3

	Eingangsparameter			Ausgabe	
H/D	Abstand vor	Stützdruckrate bzw. Ortsbruststützung	Vortriebsgeschwindigkeit	Geologie	Bewertung
				Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	2
			langsam	Übergangsbereich	1
				schluffiger Ton	1
				Sand/Kies	3
		hoch	mittel	Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	3
				Sand/Kies	2
			schnell	Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	3
				Sand/Kies	6
			langsam	Übergangsbereich	6
				schluffiger Ton	6
				Sand/Kies	7
		gering	mittel	Übergangsbereich	7
		0 0		schluffiger Ton	7
				Sand/Kies	6
			schnell	Übergangsbereich	7
				schluffiger Ton	7
			langsam	Sand/Kies	4
				Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	3
		mittel	mittel	Sand/Kies	3
	mittel			Übergangsbereich	4
				schluffiger Ten	5
			schnell	Sand/Kies	3
				Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	5
			langsam	Sand/Kies	3
				Übergangsbereich	3
				schluffiger Ten	3
				Sond/Kies	3
		hoch	mittel		4
		noon	THREE I		4
				Sond/Kies	4
			schnell	Übergangsbereich	4
			oormon	schluffiger Ten	4
	nah			Sond/Kies	4
	nan		lanosam	Ühergengebergich	6
			langoann	schluffiger Ten	6
				Sand/Kies	7
		aerina	mittel	Ühergengebergich	7
		901119	mittor	schluffiger Ten	7
				Sand/Kies	6
			schnell	Ühergengebergich	7
				schluffiger Top	7
		mittel	lanosam	Sand/Kies	5
				Gunu/Mos	5

Eingangsparameter					Ausgabe
H/D	Abstand vor	Stützdruckrate bzw.	Vortriebsgeschwindigkeit	Geologie	Bewertung
		Ortsbruststutzung			
				Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	5
				Sand/Kies	5
			mittel	Übergangsbereich	5
				schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	4
			schnell	Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	4
			langsam	Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	3
				Sand/Kies	1
		hoch	mittel	Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	3
				Sand/Kies	1
			schnell	Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	3

11.3.2 Regelbasis zu Berechnung der nachlaufenden Setzungen

	Eingangsparameter			Ausgabe	
H/D	Abstand	Ringspaltverpressrate	Ringspaltverpress-	Geologie	Bewertung
	nach		koeffizient		
gering				Sand/Kies	10
			niedrig	Übergangsbereich	9
				schluffiger Ton	8
				Sand/Kies	7
		gering	mittel	Übergangsbereich	7
				schluffiger Ton	7
				Sand/Kies	8
			hoch	Übergangsbereich	6
				schluffiger Ton	6
				Sand/Kies	5
			niedrig	Übergangsbereich	5
				schluffiger Ton	5
				Sand/Kies	4
	nah	mittel	mittel	Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	3
			hoch	Übergangsbereich	2
				schluffiger Ton	2
				Sand/Kies	6
			niedrig	Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	4
			mittel	Sand/Kies	3
		hoch		Übergangsbereich	2
				schluffiger Ton	2
			hoch	Sand/Kies	3
				Übergangsbereich	2
				schluffiger Ton	1
	mittel		niedrig	Sand/Kies	9
				Übergangsbereich	8
				schluffiger Ton	7
			mittel	Sand/Kies	6
		gering		Ubergangsbereich	6
				schluffiger Ton	6
			hoch	Sand/Kies	7
				Ubergangsbereich	5
				schluffiger Ton	5
				Sand/Kies	5
			niedrig	Ubergangsbereich	4
				schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	4
		mittel	mittel	Ubergangsbereich	4
				schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	4
			hoch	Ubergangsbereich	3
				schluttiger Ton	3
		hoch		Sand/Kies	6
			niedrig	Ubergangsbereich	4
				schluttiger Ton	4
				Sand/Kies	3
			mittel	Ubergangsbereich	2
			I schluttiger Ton	1 2	

Tabelle 11.6: Regelbasis zur Berechnung der nachlaufenden Setzungen
	Eingangsparameter			Ausgabe	
H/D	Abstand	Ringspaltverpressrate	Ringspaltverpress-	Geologie	Bewertung
	nach		koeffizient		
				Sand/Kies	4
			hoch	Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	2
				Sand/Kies	7
			niedrig	Übergangsbereich	6
				schluffiger Ton	6
				Sand/Kies	5
		gering	mittel	Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	6
			hoch	Übergangsbereich	5
				schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	4
			niedrig	Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	3
				Sand/Kies	3
	weit	mittel	mittel	Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	3
				Sand/Kies	2
			hoch	Übergangsbereich	2
				schluffiger Ton	2
				Sand/Kies	5
			niedrig	Übergangsbereich	4
			hoch Sand/Kies Übergangsbereich schluffiger Ton Sand/Kies Übergangsbereich schluffiger Ton Sand/Kies Übergangsbereich schluffiger Ton Sand/Kies Übergangsbereich schluffiger Ton Sand/Kies Übergangsbereich schluffiger Ton Sand/Kies	3	
				Sand/Kies	3
		hoch mittel	mittel	Übergangsbereich	2
				schluffiger Ton	2
				Sand/Kies	2
			hoch	Übergangsbereich	2
				schluffiger Ton	2
mittel				Sand/Kies	9
			niedrig	Ubergangsbereich	8
				schluffiger Ton	7
				Sand/Kies	6
		gering	mittel	Ubergangsbereich	6
				schluffiger I on	6
				Sand/Kies	5
			hoch	Ubergangsbereich	5
				schluffiger I on	5
			u in duin	Sand/Kies	5
			niedrig		5
				Schlumger I on	5
	nah	mittal	mittal	Sand/Kies	4
	Hall	miller	miller		4
				Schlunger Ton	4
			boch	Üborgongsboroich	3
			noon		3
				Sand/Kies	6
			niedria	Übergangsbereich	5
			moung	schluffiger Top	5
				Sand/Kies	<u>л</u>
		hoch	mittel	Übergangshereich	3
		noon	mitter	schluffiger Top	3
				Sand/Kies	3
			hoch	Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	3
	mittel	gering	niedria	Sand/Kies	8

	Eingangsparameter			Ausgabe	
H/D	Abstand	Ringspaltverpressrate	Ringspaltverpress-	Geologie	Bewertung
	nach		koeffizient		
				Ubergangsbereich	7
				schluffiger I on	6
			mittal	Sand/Kies	6
			miller		5
				Schluffiger I on	5
			bach	Sanu/Kies	5
			noch		5
				Sond/Kioc	5
			niedria	Übergangsbereich	5
			moung	schluffiger Ton	5
				Sand/Kies	4
		mittel	mittel	Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	4
			hoch	Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	5
			niedrig	Übergangsbereich	5
			-	schluffiger Ton	5
				Sand/Kies	4
		hoch	mittel	Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	3
			hoch	Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	4
	-			Sand/Kies	6
			niedrig	Übergangsbereich	5
				schluffiger Ton	5
				Sand/Kies	4
		gering	mittel	Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	4
			hoch	Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	3
			niedrig	Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	3
				Sand/Kies	3
	weit	mittel	mittel	Ubergangsbereich	3
				schluffiger Ton	3
			L L	Sand/Kies	3
			hoch	Ubergangsbereich	3
				schluffiger I on	3
			u i a alui a	Sand/Kies	5
			niedrig	Ubergangsbereich	4
				Schluffiger I on	3
		haah	mittel	Jähu/Nes	3
		noch			<u>ئ</u>
				Send/Kice	<u>ی</u>
			hach		3 2
			HOCH		<u>ی</u>
hoch	nah	aerina		Sand/Kies	<u>ع</u>
HUGH	nan	yenny	niedria		0 7
			meany	schluffiger Top	6
			mittel	Sand/Kies	5
			millor	Übergangsbereich	5
	1	1		Coorgangoboroion	

	Eingangsparameter		Ausgabe		
H/D	Abstand nach	Ringspaltverpressrate	Ringspaltverpress- koeffizient	Geologie	Bewertung
				schluffiger Ton	5
				Sand/Kies	6
			hoch	Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	4
			niedrig	Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	3
		mittel	mittel	Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	3
				Sand/Kies	3
			hoch	Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	3
				Sand/Kies	5
			niedrig	Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	3
		hoch	mittel	Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	3
				Sand/Kies	3
			hoch	Ubergangsbereich	3
				schluffiger Ton	3
				Sand/Kies	7
			niedrig	Ubergangsbereich	6
				schluffiger I on	5
		aorina	mittel	Sand/Kies	5
		genng			4
				Schlulliger Ton Sand/Kies	5
			hoch	Übergangsbereich	3
			noon	schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	5
			niedrig	Übergangsbereich	4
			0	schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	4
	mittel	mittel	mittel	Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	3
			hoch	Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	3
				Sand/Kies	4
			niedrig	Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	4
		hoch	mittel Über	Ubergangsbereich	3
				schluffiger Ton	3
				Sand/Kies	3
	hoch	hoch	Ubergangsbereich	3	
				schluttiger I on	3
	weit		niedrig	Sand/Kies	5
					5
				Sand/Kies	G C C C C C C C C C C C C C C C C C C C
		aerina		Ühergengsbereich	4 Λ
		goinig	mitter	schluffiger Top	4
				Sand/Kies	4
			hoch	Übergangsbereich	4
			1001	schluffiger Ton	4

Eingangsparameter					Ausgabe
H/D	Abstand nach	Ringspaltverpressrate	Ringspaltverpress- koeffizient	Geologie	Bewertung
				Sand/Kies	4
			niedrig	Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	4
		mittel	mittel	Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	4
			hoch	Übergangsbereich	4
				schluffiger Ton	4
				Sand/Kies	3
			niedrig	Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	3
				Sand/Kies	3
		hoch	mittel	Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	3
				Sand/Kies	3
			hoch	Übergangsbereich	3
				schluffiger Ton	3

11.3.3 Regelbasis zur Bestimmung der Bodenmehrentnahmen

Eingangsparameter			Ausgabe	
Massenbilanz	Volumenbilanz	Vortriebsgeschwindigkeit	Geologie	Bodenmehrentnahme
			Sand/Kies	normal
		langsam	Übergangsbereich	Minderentnahmen
			Keit Geologie Bodenmehrentnahme Sand/Kies normal Übergangsbereich Minderentnahmen Schluffiger Ton hohe Minderentnahmen Sand/Kies normal Übergangsbereich hohe Minderentnahmen Schluffiger Ton hohe Minderentnahmen Sand/Kies Minderentnahmen Übergangsbereich hohe Minderentnahmen Sand/Kies normal Übergangsbereich Minderentnahmen Sand/Kies normal Übergangsbereich hohe Minderentnahmen schluffiger Ton hohe Minderentnahmen Sand/Kies normal Übergangsbereich hohe Minderentnahmen Schluffiger Ton hohe Minderentnahmen Sand/Kies normal Übergangsbereich hohe Minderentnahmen Schluffiger Ton hohe Minderentnahmen schluffiger Ton hohe Minderentnahmen Sand/Kies normal Übergangsbereich hohe Minderentnahmen schluffiger Ton hohe Minderentnahmen Sand	hohe Minderentnahmen
			Sand/Kies	normal
	niedrig	mittel	KGeologieBodenmehrentnahmeSand/KiesnormalÜbergangsbereichMinderentnahmenschluffiger Tonhohe MinderentnahmenSand/KiesnormalÜbergangsbereichhohe Minderentnahmenschluffiger Tonhohe Minderentnahmenschluffiger Tonhohe MinderentnahmenSand/KiesMinderentnahmenÜbergangsbereichhohe Minderentnahmenschluffiger Tonhohe MinderentnahmenSand/KiesnormalÜbergangsbereichhohe Minderentnahmenschluffiger Tonhohe Minderentnahmenschluffiger Tonhohe Minderentnahmenschluffiger Tonhohe Minderentnahmenschluffiger Tonhohe Minderentnahmenschluffiger Tonhohe Minderentnahmenschluffiger Tonhohe MinderentnahmenSand/KiesMinderentnahmenÜbergangsbereichhohe MinderentnahmenSchluffiger Tonhohe MinderentnahmenSchluffiger Tonhohe MinderentnahmenSchluffiger Tonhohe MinderentnahmenÜbergangsbereichnormalschluffiger Tonhohe MinderentnahmenSand/KiesMehrentnahmenÜbergangsbereichnorma	
			schluffiger Ton	hohe Minderentnahmen
			Sand/Kies	Minderentnahmen
		schnell	Übergangsbereich	hohe Minderentnahmen
			schluffiger Ton	hohe Minderentnahmen
			Sand/Kies	normal
		langsam	Übergangsbereich	Minderentnahmen
			schluffiger Ton	hohe Minderentnahmen
			Sand/Kies	normal
niedrig	mittel	mittel	Übergangsbereich	hohe Minderentnahmen
			schluffiger Ton	hohe Minderentnahmen
			Sand/Kies	Minderentnahmen
		schnell	Übergangsbereich	hohe Minderentnahmen
			Sand/Kies Minde Übergangsbereich hohe schluffiger Ton hohe Sand/Kies norm Übergangsbereich Minde schluffiger Ton hohe Sand/Kies norm Übergangsbereich Minde Schluffiger Ton hohe Schluffiger Ton hohe Sand/Kies norm	hohe Minderentnahmen
			Sand/Kies	normal
		langsam	Übergangsbereich	Minderentnahmen
			schluffiger Ton	hohe Minderentnahmen
			Sand/Kies	normal
	hoch	mittel	mittel Sand/Kies normal Übergangsbereich hohe Mi schluffiger Ton hohe Mi	hohe Minderentnahmen
				hohe Minderentnahmen
			Sand/Kies	Minderentnahmen
		schnell	Übergangsbereich	hohe Minderentnahmen
			schluffiger Ton	hohe Minderentnahmen
mittel			Sand/Kies	Mehrentnahmen
		langsam	Übergangsbereich	normal
			schluffiger Ton	Minderentnahmen
			Sand/Kies	Mehrentnahmen
	niedrig	mittel	Übergangsbereich	normal
			schluffiger Ton	Minderentnahmen
			Sand/Kies	Mehrentnahmen
		schnell	Übergangsbereich	normal
			schluffiger Ton	Ausgabe Geologie Bodenmehrentnahmen argangsbereich Minderentnahmen huffiger Ton hohe Minderentnahmen hd/Kies normal argangsbereich hohe Minderentnahmen huffiger Ton hohe Minderentnahmen huff
			Sand/Kies	Mehrentnahmen
		langsam	Ausgabe Keit Geologie Bodenmehrentnahmen Sand/Kies normal Übergangsbereich Minderentnahmen Schluffiger Ton hohe Minderentnahmen Schluffiger Ton hohe Minderentnahmer Übergangsbereich hohe Minderentnahmen Übergangsbereich hohe Minderentnahmen Übergangsbereich hohe Minderentnahmen Sand/Kies normal Übergangsbereich hohe Minderentnahmen Sand/Kies normal Übergangsbereich Minderentnahmen Sand/Kies normal Übergangsbereich hohe Minderentnahmen Schluffiger Ton hohe Minderentnahmen Sand/Kies normal Übergangsbereich hohe Minderentnahmen Schluffiger Ton hohe Minderentnahmen Schluffiger Ton hohe Minderentnahmen Übergangsbereich hohe Minderentnahmen Schluffiger Ton <t< td=""><td>Minderentnahmen</td></t<>	Minderentnahmen
			schluffiger Ton	Minderentnahmen
			Sand/Kies	Mehrentnahmen
	mittel	mittel	Übergangsbereich	normal
			schluffiger Ton	Minderentnahmen
			Sand/Kies	Mehrentnahmen
		schnell	Übergangsbereich	normal
			schluffiger Ton	normal
	hoch	langsam	Sand/Kies	Mehrentnahmen

Tabelle 11.7: Regelbasis zur Berechnung der Bodenmerhentnahmen

	Eir	ngangsparameter		Ausgabe
			Übergangsbereich	Minderentnahmen
			schluffiger Ton	Minderentnahmen
			Sand/Kies	Mehrentnahmen
		mittel	Übergangsbereich	normal
			schluffiger Ton	Minderentnahmen
			Sand/Kies	Mehrentnahmen
		schnell	Übergangsbereich	normal
			schluffiger Ton	normal
			Sand/Kies	hohe Mehrentnahmen
		langsam	Übergangsbereich	hohe Mehrentnahmen
			schluffiger Ton	Mehrentnahmen
			Sand/Kies	hohe Mehrentnahmen
	niedrig	mittel	Übergangsbereich	hohe Mehrentnahmen
			schluffiger Ton	Mehrentnahmen
			Sand/Kies	hohe Mehrentnahmen
		schnell	Übergangsbereich	hohe Mehrentnahmen
			schluffiger Ton	hohe Mehrentnahmen
			Sand/Kies	hohe Mehrentnahmen
		langsam	Übergangsbereich Mehrer	Mehrentnahmen
			schluffiger Ton	Mehrentnahmen
			Sand/Kies	hohe Mehrentnahmen
hoch	mittel	mittel	Übergangsbereich	hohe Mehrentnahmen
	_		schluffiger Ton	Mehrentnahmen
		schnell (Sand/Kies	hohe Mehrentnahmen
			Übergangsbereich	hohe Mehrentnahmen
			schluffiger Ton	hohe Mehrentnahmen
			Sand/Kies	hohe Mehrentnahmen
		langsam	Übergangsbereich	Mehrentnahmen
			schluffiger Ton	Mehrentnahmen
			Sand/Kies	hohe Mehrentnahmen
	hoch	mittel	Übergangsbereich	hohe Mehrentnahmen
			schluffiger Ton	Mehrentnahmen
			Sand/Kies	hohe Mehrentnahmen
		schnell	Übergangsbereich	hohe Mehrentnahmen
			schluffiger Ton	hohe Mehrentnahmen

11.3.4 Regelbasis zur Berechnung der Ortsbruststützung

Eingangsparan	neter	Ausgabe
Bodenmehrentnahme	Stützdruckrate	Ortsbruststützung
	niedrig	mittel
hohe Minderentnahmen	mittel	mittel
	hoch	hoch
	niedrig	mittel
Minderentnahmen	mittel	mittel
	hoch	hoch
	niedrig	gering
normal	mittel	mittel
	hoch	mittel
	niedrig	gering
Mehrentnahmen	mittel gerin	gering
	hoch	mittel
	niedrig	gering
hohe Mehrentnahmen	mittel	gering
	hoch	gering

Tabelle 11.8: Regelbasis zur Berechnung der vorauseilenden Setzungen

11.3.5 Darstellung des Programmcodes mit Struktogrammen

Start		
uigetdir: Benutzerdialog zur Auswahl de	s Datenverzeichnisses	
Starte SetSim		
SetSim	O	_
Aufbau der graphischen Benutzerschnit	tstelle	
read_pd: Einlesen der Projektdaten		
edit_time_Callback: Abfra	ge der Benutzereingabe	Benutzereingabe: te
t _e :	> t _{akt}	// Startpunkt der Simulations
Ja	Nein	überprüfen: Neue Simulation beginnen oder bestehende
$t_{\text{Start}} = t_{\text{akt}} + 1$	t _{Start} = 1	Simulation fortsetzen
	Werte der letzten Simulation löschen	
Korrespondierenden Zeitschritte (t _{akt,n} , t	_{Start,n} , t _{e,n}) der nachfolgenden	
$t_{akt} = t_{Start}$ to t_e		// Schleife zur Berechnung der
Daten der Durchfluss- u. I	Dichtemessung vorhanden?	vorauseilenden Setzungen
	Noin	
simul3	simul1	// Die Struktogramme der "simul Dateien sind einzeln dargestellt
$t_{akt,n} = t_{Start,n}$ to $t_{e,n}$		// Schleife zur Berechnung der
si	mul2	nachfolgenden Setzungen
Messpunkte ermitteln, die gezeichnet w	erden müssen (vorauseilende	4
Setzungen)		_
Messpunkte ermitteln, die gezeichnet w Setzungen)	erden mussen (nachfolgende	
defk: Berechnung des Korrekturfaktors	s zur Anpassung des	T
Setzungsverlaufs in Querrichtung	orrichtung	Ergebnisse der
Datenexport	ementang	der nachfolgenden Setzungen
		und des Verlaufs der Setzungsmulde guer zur
pushbutton: Län	asschnitt (default)	Roputzoroingoho puohhutt
popu	pinenu i	
= vorauseilende Setzung	= nachfolgende Setzung	
Text setzen (Maschinenposition, m	aximale Setzung. Setzung am	
Schneidrad)	3, 3,	
		- II
pushbutton: S	Setzungsmulde	Benutzereingabe pushbutt
zeichne die Setzungsmulde am Sch	nneidrad]
		, II
pushbuttor	: 3D-Ansicht	Benutzereingabe pushbutt
popu	pmenu 1	
= vorauseilende Setzung	= nachfolgende Setzung	// Anhand der berechneten Setzungswerte entlang der Tras
berechne Gitternetze zeichne vorauseilende 3D-Ansicht	berechne Gitternetze zeichne nachfolgende 3D-Ansicht	und des Funktionsverlaufs in Querrichtung wird ein Gitternetz berechnet
rotate3D: 3D-Rotationsmöglichkeit		
		→

Die "simul"-Dateien haben in Struktogrammform einen gleichen Aufbau, deshalb wird hier nur ein Struktogramm für die drei unterschiedlichen Dateien gezeigt.

simul		// D-finition des Einflussbassisks
Einlesen der Daten im Einflusst	siehe Kapitel 4.3.2	
Daten zum Export bzw. Lernen	zusammenstellen	// Für den Datenexport und für da
Ar < mind. Anzahl	Lernen gilt: Nur die Ergebnisse a den Messpunkten sind interessar da nur hier Referenzwerte zur	
evalfis: Daten auswerten	anfis: Lernen anhand der zurückliegenden Daten evalfis: Daten auswerten	Verfugung stehen. Zum Lernen werden nur zurückliegende Datensätze (exklusive dem derze aktuellen) ausgewählt
Ergebnismatrix mit neuen Wert	en belegen	// Anzahl Datensätze: mindesten

oitel 4.3.2 Datenexport und für das It: Nur die Ergebnisse an punkten sind interessant, er Referenzwerte zur

g stehen. Zum Lernen ur zurückliegende ze (exklusive dem derzeit ausgewählt

Datensätze: mindestens zum Lernen erforderliche Anzahl an Datensätzen, siehe Kapitel 6.3.3.4

zeichne			
maximale Setzungswerte für die Achseneinteilung ermitteln			
Messpunkte vorhanden?			
Ja	Nein		
Messpunkte einzeichnen	Ausgabe: "Es liegen keine Messwerte vor"		
Beschriftung der Messpunkte setzen			
plot: Zeichnen der berechneten Setzungen			
datalabel: Werte können durch anklicken der Punkte abgefragt			

defk			
Setzungsmessdaten neben der Trasse auslesen			
Messpunkte neben der T Schildmasch Ja	rasse im Einflussbereich der ien vorhanden? Nein		
der Fehlerquadrate der vorgegebenen Funktion der Setzungsmulde	k=1		