

# 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).

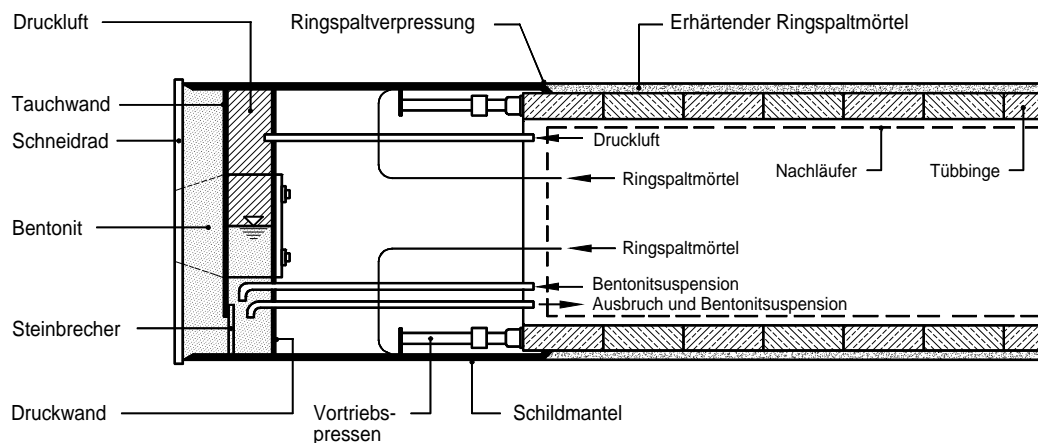


Abbildung 1.1: Aufbau eines Hydroschildes

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 aufgeföhren 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 Überschchnitts, 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 zeitverzögert 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 vortriebsynchronen 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 für das Setzungsverhalten maßgebenden projekt- und situationspezifischen Randbedingungen lassen sich quantitativ nicht immer eindeutig erfassen. Insbesondere die im Projektverlauf variierenden Bodeneigenschaften können messtechnisch nur unvollständig und ungenau erfasst werden und erfordern eine Modellierung, die diese Unschärfe berücksichtigt.
- 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 Datenermaterials zur Abschätzung der Modellparameter nicht an.

### **1.3 Zielsetzung**

Ziel dieser Arbeit ist es daher, ein Verfahren zu entwickeln, das 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 Neuronen 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 Set-

zungen 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 Eingangsparameter 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].

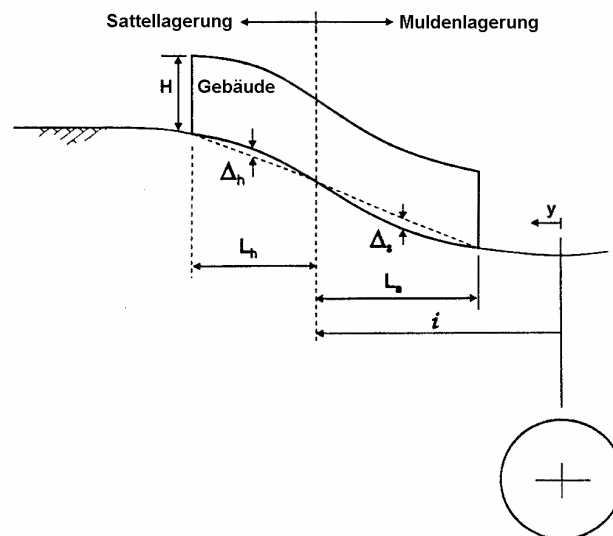


Abbildung 2.1: Deformation eines Gebäudes aufgrund einer durch einen Tunnelvortrieb verursachten Setzungsmulde (zweidimensionale Betrachtung) nach [73]

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.

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

Risiko-klasse	Maximale Neigung [-]	Maximale Setzung [mm]	Risikobeschreibung
1	< 1/500	< 10	oberflächliche Schäden: <i>unwahrscheinlich</i>
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>

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).

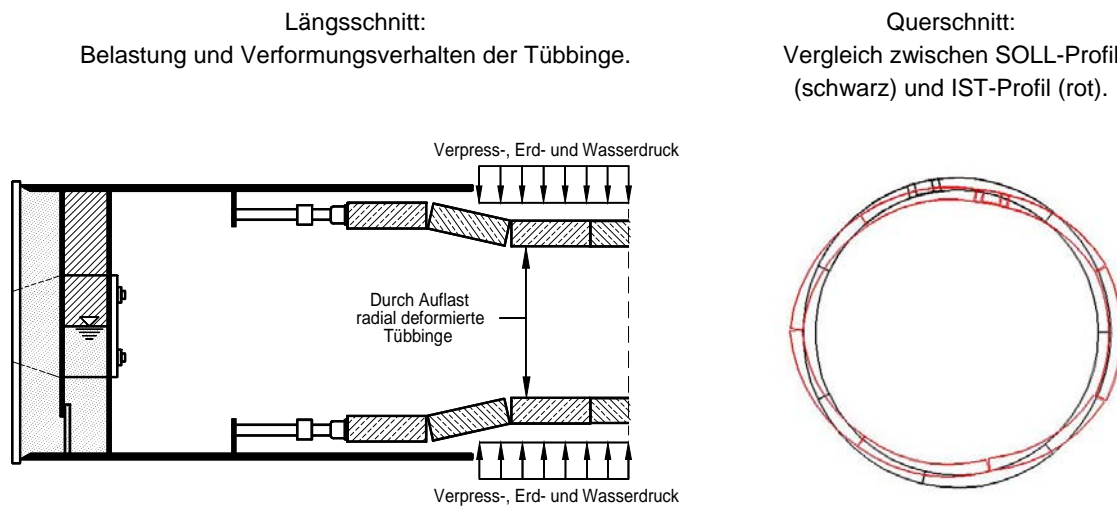


Abbildung 2.2: Verformung der Tübbingröhre beim Verlassen der Schildmaschine

Die Tunnelauskleidung wird aufgrund der Ovalisierung höheren Spannungen aus Biege- und 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 Tübbingren



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 Schildkennendaten (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]:

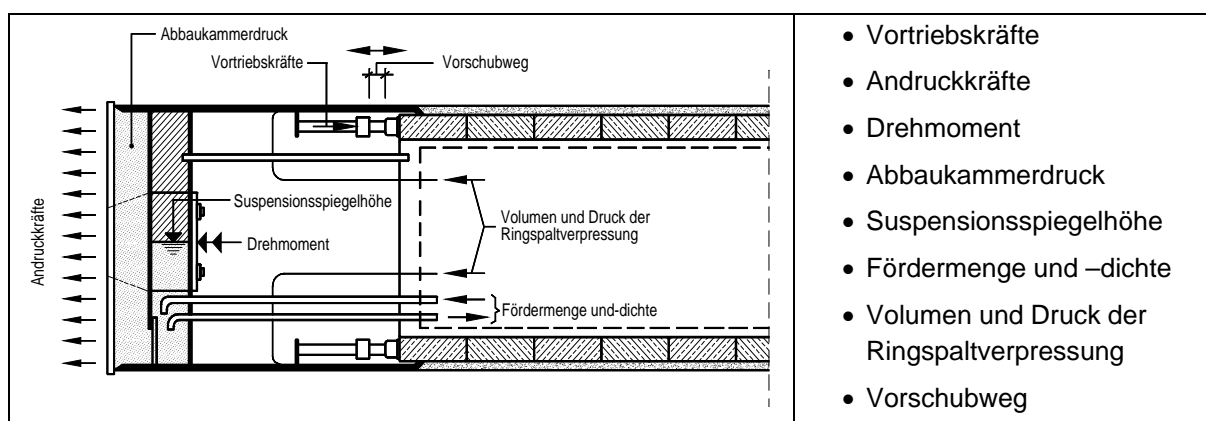


Abbildung 2.5: Graphische Darstellung der nach DAUB bei Flüssigkeitsschildvortrieben an der Schildmaschine mindestens zu erfassenden Vortriebsdaten

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