



Technische Universität Graz

Dekanat für Bauingenieurwissenschaften

Institut für Bodenmechanik und Grundbau

Vorstand: O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Semprich

Bestimmung der Luftdurchlässigkeit gering kohäsiver Böden für die Anwendung im Tunnelbau unter Druckluft

MASTERARBEIT

Vorgelegt zur Erlangung des
akademischen Grades Diplomingenieur
des Masterstudiums

Bauingenieurwissenschaften – Geotechnik und Wasserbau

von

Bernhard HIRSCHER

Betreuer:

O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Semprich

Mitbetreuender Assistent:

Dipl.-Ing. Gerhard Steger

Graz, Dezember 2009

DIPLOMARBEIT/MASTERARBEIT-AUSGABEPROTOKOLL
an der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften der TU Graz

Diplomarbeit/Masterarbeit:

KANDIDAT:	HIRSCHER Bernhard.....	0430565/F 066466
	(Name)	(Mat.Nr.)/(Studienrichtung)
		<i>Bernhard Hirscher</i>
		(Unterschrift)
THEMA der Diplomarbeit/Masterarbeit: Bestimmung der Luftdurchlässigkeit gering kohäsiver Böden für die Anwendung im Tunnelbau unter Druckluft		
ZIELSETZUNG (stichwortartig):		
Literaturrecherche: Labor- und Feldversuche zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit, Modellansätze für die Luftdurchlässigkeit, Inverse Modellierung von Mehrphasenströmungsversuchen		
Feldversuch:	Messtechnik, Durchführung, Inverse Modellierung, statistische Auswertung, Sensitivitätsanalyse	
Laborversuche:	Zur Ergänzung des Feldversuchs	
Anwendungsbeispiel: Luftbedarfsberechnung beim Tunnelbau unter Druckluft		
FACHGEBIET:	Bodenmechanik.....	
ggf. 2. FACHGEBIET:	Grundbau.....	
BETREUER: O.Univ.-Prof. Dr. techn. Stephan Semprich.....	<i>Semprich</i>	(Unterschrift)
	(Name)	
ggf. 2. BETREUER:		(Unterschrift)
	(Name)	
mitbetreuender Assistent: WA Dipl.-Ing. Gerhard Steger.....	<i>Steger G.</i>	(Unterschrift)
	(Name)	
AUSGABEDATUM:	27. Juli 2009.....	
SPÄTESTER ABGABETERMIN:	11. Dezember 2009.....	

Beurteilung:

Beurteilung erfolgt durch den Betreuer
--

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtliche und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, Dezember 2009

.....
(Bernhard Hirscher)

Vorwort

Zum Gelingen dieser Arbeit haben viele Personen beigetragen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Semprich für die Ermöglichung und Begutachtung der vorliegenden Masterarbeit.

Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Gerhard Steger für die intensive Mitbetreuung und die hilfreichen Anregungen. Die gute Zusammenarbeit hat wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Desweiteren möchte ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Bodenmechanik und Grundbau für das angenehme Arbeitsklima sowie den gegebenen Hilfestellungen bedanken.

Mein herzlichster Dank gilt meiner Familie, besonders meinen Eltern Manfred und Elisabeth Hirscher. Danke für den Rückhalt und Unterstützung während meines Studiums.

Kurzfassung

Bestimmung der Luftdurchlässigkeit gering kohäsiver Böden für die Anwendung im Tunnelbau unter Druckluft

In der Geotechnik wird primär die Wasserdurchlässigkeit von Böden untersucht und behandelt. Eine Mehrphasenströmung, wie sie beispielsweise beim Bauverfahren Tunnelbau unter Druckluft induziert wird, verlangt zusätzlich die Betrachtung der Luftdurchlässigkeit. Weitere bedeutende Anwendungsgebiete derartiger Problemstellungen sind das Bodenbelüftungsverfahren sowie die Gasdurchlässigkeit von Mülldeponien. In der Literatur sind bereits Stoffgesetze und entsprechende Methoden zur Parameterbestimmung, z.B. aus Chen et al. (1999), aus der Inversen Modellierung von transienten Labor- und Feldversuchen, zu finden. Eine Zusammenfassung daraus steht am Beginn der vorliegenden Masterarbeit.

Der Hauptteil der Arbeit behandelt die durchgeführten Luftinjektionsfeldversuche und deren inverse Modellierung. Das Prinzip des Versuches ist eine Mehrphasenströmung aufgrund der Luftinjektion zu induzieren. In weiterer Folge werden die Messergebnisse für eine Rückrechnung der für die Mehrphasenströmung zutreffenden Bodenparameter verwendet. Dazu werden die Programme FT2009 (Steger 2010) und UCODE (Poeter et al. 2005) miteinander gekoppelt.

Um eine weite Bandbreite abzudecken wurden drei Böden mit unterschiedlicher Kornverteilung untersucht. Mit der Messinstrumentierung wurden der injizierte Luftvolumenstrom, die Bodenwasserspannung sowie die Änderung des volumetrischen Wassergehaltes erfasst. Die inverse Modellierung basiert auf den Messdaten des Luftvolumenstromes. Um eine grundlegendere Interpretation der Feldversuche zu ermöglichen, werden ergänzende Untersuchungen der Luftdurchlässigkeit und der Kapillarspannung-Sättigungs-Beziehung im Labor durchgeführt.

Numerische Simulationen des Druckluftbedarfs beim Tunnelbau unter Druckluft bilden den Abschluss dieser Arbeit. Dazu werden die aus der inversen Modellierung der Feldversuche bestimmten Parameter für die Mehrphasenströmung verwendet. Nach einer Einführung in den Tunnelbau unter Druckluft wird die durchgeführte Modellbildung eines beispielhaften Tunnelvortriebes angeführt. Die numerische Luftbedarfsberechnung erfolgt mit dem Programm ASCATA (Steger & Semprich 2005), welches um mehrere Luftdurchlässigkeitsfunktionen erweitert wurde. Abschließend werden in diesem Kapitel die Berechnungsergebnisse der unterschiedlichen Vortriebssimulationen diskutiert.

Abstract

Determination of air permeability of low cohesive soils for application in Compressed Air Tunneling

In geotechnical engineering primarily the water permeability of soils is examined and measured. A multiphase flow, as it is for example induced during Compressed Air Tunneling, additionally requires the consideration of air permeability. Other important applications of multiphase flow respectively air permeability problems are the soil venting and the gas permeability of waste disposals. In the literature, constitutive equations and appropriate parameters determined by inverse modeling of transient laboratory and field tests can be found. A brief summary of selected publications is presented at the beginning of the master thesis.

The principle part of the thesis deals with the conducted air injection field tests and their inverse modeling. The aim of the experiments is to induce a multiphase flow due to the air injection. Subsequently the soil parameters will be back-calculated on the basis of measurements during the execution of the field tests. The programs FT2009 (Steger 2010) and UCODE (Poeter et al. 2005) will be coupled.

The field tests were carried out in three soils with different grain size distributions. The measurement device allowed recording the air flow rate, the soil water tension and the change in volumetric water content. The inverse modeling is based on the measurement of the air volume flow. Additional laboratory investigations of the air permeability and the water retention curve enable a more extensive interpretation of the results.

Numerical simulations of the air losses during compressed air tunnel advance complete this master thesis. The determined parameter from the inverse modeling of the field tests are used for this purpose. After an introduction to compressed air tunneling, the numerical modeling of the tunnel advance is explained. The program ASCATA (Steger & Semprich 2005), extended with several new air permeability functions derived from the field tests, is used to calculate the rate of air losses. Finally, the calculation results of the different simulations are discussed in this chapter.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	iii
Vorwort	iv
Kurzfassung	v
Abstract	vi
Inhaltsverzeichnis	vii
1 Einführung und Aufgabenstellung	9
1.1 Problemstellung	9
1.2 Ziel der Arbeit.....	9
1.3 Gliederung der Arbeit.....	9
2 Inverse Modellierung von Mehrphasenströmungsversuchen	11
2.1 Mehrphasenströmung in teilgesättigten Böden.....	11
2.1.1 Kapillarspannungs-Sättigungsbeziehung	12
2.1.2 Relative Durchlässigkeits-Sättigungsbeziehung.....	13
2.1.3 Intrinsische Permeabilität	14
2.2 Konzept der inversen Modellierung	15
2.3 Ansätze zur Extremwertsuche	16
2.4 Bewertung des Ergebnisses einer Optimierung.....	19
2.5 Beispiele aus der Literatur	20
2.6 Schlussfolgerungen	22
3 Luftinjektionsfeldversuche	23
3.1 Allgemeines	23
3.1.1 Versuchsaufbau	23
3.1.2 Lokalität.....	25
3.1.3 Kenngrößen der Versuchsböden	25
3.2 Messtechnik	27
3.2.1 Druckaufnehmer-Tensiometer.....	27
3.2.2 TDR – Sonde.....	29
3.2.3 Bodenfeuchtemessgerät	32
3.2.4 Druckluftmengenmessgerät und Luftdrucksteuerung.....	33
3.2.5 Aufzeichnung der Messdaten	35
3.2.6 Einbau der Messgeräte	36
3.2.7 Genauigkeit der Messinstrumentierung.....	37
3.3 Ergebnisse der Feldversuche	38
3.3.1 Feldversuch 1.....	38
3.3.2 Feldversuch 2.....	41
3.3.3 Feldversuch 3.....	44

3.3.4	Vergleich der Luftvolumenströme.....	48
4	Inverse Modellierung und Interpretation der Feldversuche	49
4.1	Berechnungsverfahren.....	49
4.1.1	Numerisches Grundmodell.....	49
4.1.2	FT2009.....	50
4.1.3	UCODE_2005	53
4.1.4	Kopplung	55
4.2	Ergänzende Versuche im Labor	57
4.2.1	Luftströmungsversuche.....	57
4.2.2	Kapillarspannungsversuche	58
4.3	Inverse Modellierung von Feldversuch 1	60
4.3.1	Funktion 9	60
4.3.2	Funktion 11	61
4.3.3	Funktion 14	62
4.3.4	Zusammenstellung.....	63
4.4	Inverse Modellierung von Feldversuch 2	64
4.4.1	Funktion 9	64
4.4.2	Funktion 11	65
4.4.3	Funktion 14	66
4.4.4	Zusammenstellung.....	67
4.5	Interpretation von Feldversuch 3	68
4.6	Diskussion der Ergebnisse	69
5	Luftbedarfsberechnung beim Tunnelbau unter Druckluft	71
5.1	Tunnelbau unter Druckluft.....	71
5.2	Verhältnisse und Berechnungsvarianten	73
5.3	Numerisches Modell	75
5.4	Berechnungsergebnisse	76
5.4.1	Simulationsreihe 1 (Feldversuch 1).....	76
5.4.2	Simulationsreihe 2 (Feldversuch 2).....	79
5.4.3	Simulationsreihe 3 (Feldversuch 3).....	80
5.4.4	Vergleich des Luftbedarfs.....	82
5.4.5	Schlussfolgerungen.....	83
6	Zusammenfassung und Ausblick	84
7	Verzeichnisse.....	86
7.1	Literatur.....	86
7.2	Abbildungsverzeichnis	89
7.3	Tabellenverzeichnis	91
8	Anhang	92

1 Einführung und Aufgabenstellung

1.1 Problemstellung

In der Geotechnik wird primär die Wasserdurchlässigkeit von Böden untersucht und behandelt. Eine Mehrphasenströmung, wie sie beispielsweise beim Bauverfahren Tunnelbau unter Druckluft induziert wird, verlangt zusätzlich die Betrachtung der Luftdurchlässigkeit. Weitere bedeutende Anwendungsgebiete derartiger Problemstellungen sind das Bodenbelüftungsverfahren sowie die Gasdurchlässigkeit von Mülldeponien. In der Literatur sind bereits zahlreiche Stoffgesetze zur Beschreibung der Luft- und Wasserdurchlässigkeit bei variablen Sättigungsgraden vorhanden. Ein Problem stellt jedoch die Bestimmung zutreffender Parameter dar. In den letzten Jahren wird dazu die inverse Modellierung von transienten Laborversuchen herangezogen.

1.2 Ziel der Arbeit

Das vorrangige Ziel der vorliegenden Masterarbeit ist die Entwicklung und Durchführung eines Feldversuches, bei dem durch Luftinjektion eine Zweiphasenströmung im Boden induziert wird. Um eine weite Bandbreite abzudecken sollen unterschiedliche Böden untersucht werden. Mit der Messinstrumentierung sollen u.a. der injizierte Luftvolumenstrom, die Bodenwasserspannung sowie die Änderung des volumetrischen Wassergehaltes erfasst werden.

Die grundlegende Idee des Luftinjektionsfeldversuches ist die inverse Modellierung des Versuches basierend auf den Messdaten des Luftvolumenstromes. Die weiteren Messgrößen, wie Bodenwasserspannung und volumetrischer Wassergehalt, sollen vorerst nur zur Plausibilitätskontrolle der gewählten Durchlässigkeitsfunktionen in der inversen Parameterbestimmung dienen.

Die daraus gewonnenen Bodenparameter sollen in weiterer Folge modellhaft zur Simulation des Luftbedarfes bei Tunnelbau unter Druckluft verwendet werden.

1.3 Gliederung der Arbeit

Im zweiten Kapitel werden zunächst allgemeine Punkte zur inversen Modellierung von Mehrphasenströmungsversuchen erläutert. Dazu wird eingangs die Mehrphasenströmung in teilgesättigten Böden betrachtet. Das Konzept der inversen Modellierung wird präsentiert. Mehrere verwendete Ansätze zur Extremwertsuche sowie die Bewertung des Ergebnisses einer Optimierung folgen in diesem Kapitel. Die Thematik einer inversen Modellierung wird anhand einiger ausgewählter Beispiele dargelegt und die Erkenntnisse daraus näher beschrieben.

Das Kapitel drei behandelt die durchgeführten Luftinjektionsfeldversuche. Nach dem allgemeinen Versuchsaufbau folgt eine eingehende Beschreibung der verwendeten Messinstrumentierung. Eine Darstellung der Versuchsergebnisse bildet den Abschluss des dritten Kapitels.

Im vierten Kapitel wird die inverse Modellierung und Interpretation der Feldversuche vorgestellt. In verschiedenen Abschnitten werden die verwendeten Programme erläutert und deren Kopplung untereinander beschrieben. Die inverse Modellierung der Feldversuche 1 und 2 mit verschiedenen Stoffgesetzen wird vorgestellt. Für den Feldversuch 3 erfolgt eine verbale Interpretation. Abgerundet wird dieses Kapitel durch eine Diskussion der Ergebnisse.

Im Kapitel fünf folgen die numerischen Simulationen des Druckluftbedarfs für einen Tunnel in den verschiedenen Versuchsböden. Nach einer Einführung in den Tunnelbau unter Druckluft wird die durchgeführte Modellbildung mit Eingangsparametern angeführt. Anschließend werden in diesem Kapitel die Berechnungsergebnisse der unterschiedlichen Simulationen diskutiert. Eine abschließende Diskussion der Ergebnisse bzw. Ausblick bilden den Abschluss dieser Arbeit.

2 Inverse Modellierung von Mehrphasenströmungsversuchen

In diesem Kapitel erfolgt die Beschreibung von Mehrphasenströmung in teilgesättigten Böden. Desweiteren werden das Prinzip der inversen Modellierung sowie einige Ansätze zur Extremwertsuche vorgestellt. Zur Erläuterung der Vor- und Nachteile des Optimierungsverfahrens dienen ausgewählte Beispiele.

2.1 Mehrphasenströmung in teilgesättigten Böden

Aufgrund der großen Bedeutung der Grenzfläche zwischen Wasser und Luft wird nach neuen Erkenntnissen bei teilgesättigten Böden nicht mehr von einem Dreiphasensystem sondern von einem Vierphasensystem gesprochen, (Fredlund & Rahardjo 1993). Diese Schicht stellt eine eigenständige, massen- und volumenfreie Phase dar. Der Boden unterteilt sich somit in folgende vier Komponenten:

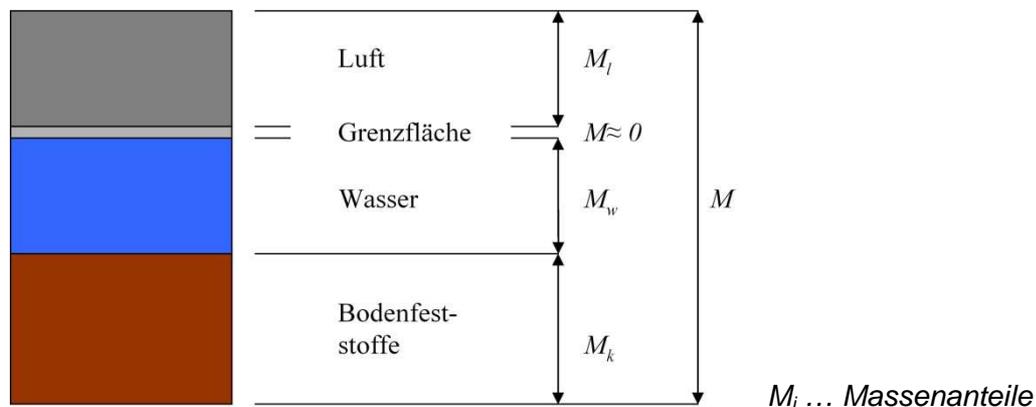


Abb. 2-1: Teilgesättigter Boden als Vierphasensystem (Steger 2004)

Aufgrund der komplexen Strömungsvorgänge in teilgesättigten Böden ist es notwendig eine ingenieurmäßig geeignete Formulierung zu finden. Die umfassendste Vereinfachung trifft dabei den Porenraum. Hierbei wird ein kontinuumsmechanischer Ansatz herangezogen, bei dem die einzelnen Phasen verschmiert über ein repräsentatives Elementarvolumen betrachtet werden (siehe Abb. 2-2).

Dafür werden folgende Festlegungen getroffen:

- Die Strömung der beiden Fluide (Wasser und Luft) wird durch das Gesetz von Darcy beschrieben.
- Wasser und Luft sind Newton'sche Flüssigkeiten → auftretende Schubspannungen sind viskositätsproportional.
- Wasser ist inkompressibel; für Luft gilt das Boyle-Mariott'sche Gasgesetz.
- Das Korngerüst wird als starr betrachtet → Bodenkörner nehmen nicht am Strömungsvorgang teil.
- Phasenübergänge werden nicht berücksichtigt → Vermischung der beiden Fluide wird ausgeschlossen.
- Vernachlässigung des Einflusses der osmotischen Kräfte sowie von chemischen, biologischen und anderen kernphysikalischen Prozessen.

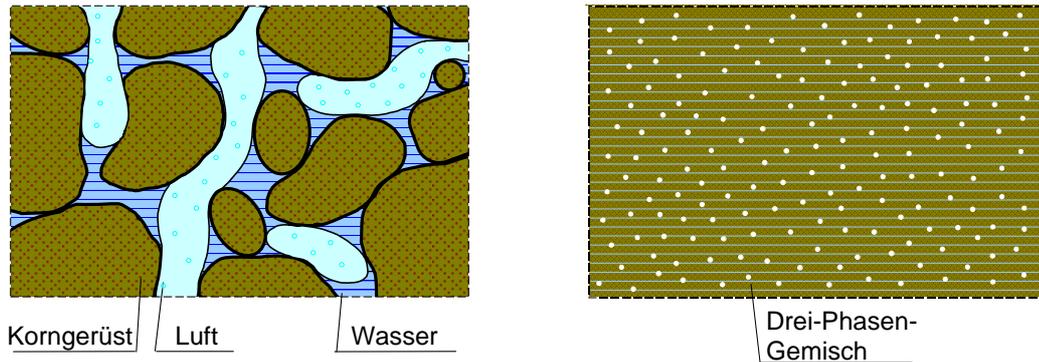


Abb. 2-2: Verteilung der drei Bestandteile des Bodens und kontinuumsmechanische Betrachtungsweise (Stark et al. 1999)

Die Durchlässigkeit von teilgesättigten Böden wird von den Kapillarspannungen und dem Vorhandensein von zwei Fluiden in den Bodenporen stark beeinflusst. Diese Zusammenhänge werden in der Kapillarspannungs-Sättigungsbeziehung und in der Relativen Durchlässigkeits-Sättigungsbeziehung berücksichtigt.

2.1.1 Kapillarspannungs-Sättigungsbeziehung

Die Kapillarspannung ist erheblich von der Porenstruktur des Bodens abhängig. Bei feinkörnigen Böden kommt der Kapillarspannung eine bedeutende Rolle zu. Im Gegensatz zu den grobkörnigen Böden, bei denen sich die Kapillarspannung nur geringfügig auf die Strömung auswirkt. Einen weiteren Punkt stellt die Porengrößenverteilung dar. Bei gleichmäßiger Verteilung der Porengrößen wirkt sich eine Veränderung der Sättigung weniger stark auf die Durchlässigkeit aus, als wie bei einer breitgefächerten Porengrößenverteilung (Steger 2004).

Damit Luft in einen wassergesättigten Boden eindringen kann, muss sie einen Überdruck aufweisen, auch als Lufteintrittswert p_0 bezeichnet. Erst ab diesem Wert wird Wasser aus den Poren im Boden verdrängt. Zuerst aus den größeren Poren und in weiterer Folge, bei zunehmender Entwässerung, auch aus den kleineren Poren. Der Lufteintrittswert ist wiederum von der Bodenart abhängig. Bei Kiesen ist er beispielsweise vernachlässigbar klein bzw. bei Tonen erreicht er Größenordnungen, die keine Strömung mehr zulässt, (Steger 2004).

Wie aus Abb. 2-3 ersichtlich, steigen die Kapillarspannungen bei Erreichen der Residualwassersättigung $S_{w,r}$ theoretisch gegen unendlich an. Somit bildet die Residualwassersättigung eine Grenze für die Entwässerbarkeit eines Bodens.

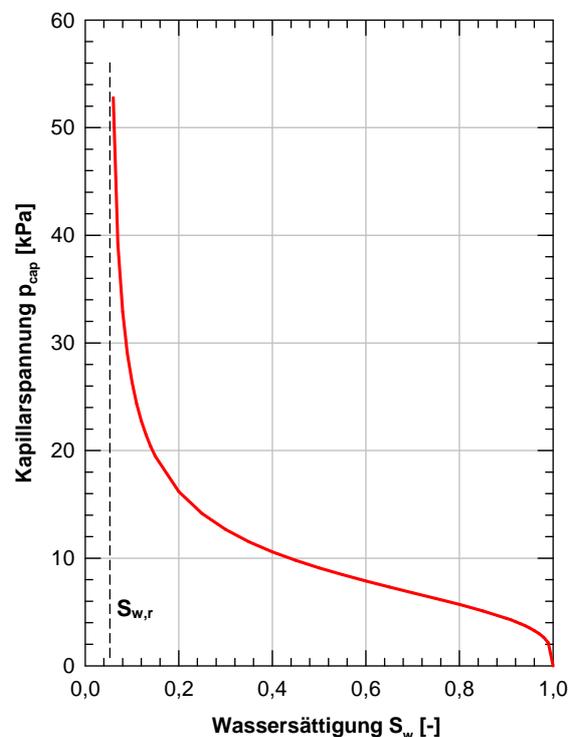


Abb. 2-3: Kapillarspannungs-Sättigungsbeziehung

2.1.2 Relative Durchlässigkeits-Sättigungsbeziehung

Da sich bei teilgesättigten Böden zwei Fluide den Porenraum teilen, wird die Durchlässigkeit für jede Phase anteilmäßig verringert. Es wird dabei vorausgesetzt, dass der jeweilige Teilquerschnitt für das andere Fluid unpassierbar ist.

Zusätzlich muss noch die komplexe räumliche Struktur des Porenraums berücksichtigt werden. Porenwinkelwasser (für Luft) und eingeschlossene Luftblasen (für Wasser) haben zur Folge, dass ein Versperren der einzelnen Strömungswege auftritt. Die zunehmende Verschlungenheit der Strömungswege wird als Tortosität bezeichnet. Die Tortosität τ bewirkt einen nichtlinearen Verlauf der Relativen Durchlässigkeits-Sättigungs-Beziehung für Wasser und Luft, (Steger 2004).

Es stellen wiederum die Residualsättigungen für Wasser $S_{w,r}$ und Luft $S_{l,r}$ Grenzwerte dar. Innerhalb dieser beiden Sättigungswerte ergibt die Summe der relativen Wassersättigung $k_{w,r}$ und Luftdurchlässigkeit $k_{l,r}$ immer kleiner als 1.

In Abb. 2-4 ist exemplarisch die Relative Durchlässigkeits-Sättigungsbeziehung für quartäre sandige schluffige Kiese dargestellt.

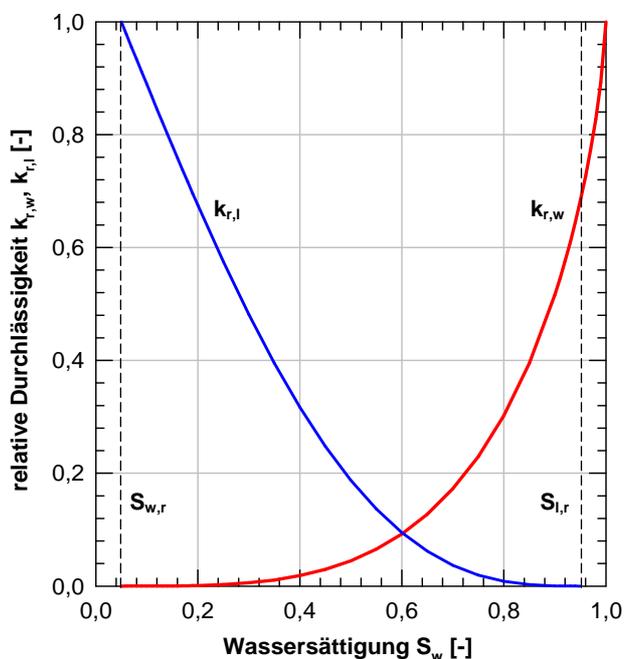


Abb. 2-4: Relative Durchlässigkeits-Sättigungsbeziehung

2.1.3 Intrinsische Permeabilität

Für Mehrphasenströmungen bietet sich an, die intrinsische Permeabilität K als fluid- und temperaturunabhängige Materialkonstante einzuführen. Die Durchlässigkeit für ein bestimmtes Fluid ergibt sich dann unter Berücksichtigung der jeweiligen temperaturbezogenen dynamischen Viskosität μ_i und Dichte ρ_i (Steger et al. 2005).

Der Zusammenhang zwischen der intrinsischen Permeabilität K eines porösen Mediums und der Durchlässigkeit k_i dieses Mediums bezogen auf ein bestimmtes strömendes Fluid lautet:

$$k_i = \frac{\rho_i \cdot g}{\mu_i} \cdot K \quad (2-1)$$

k_i Durchlässigkeit (Wasser oder Luft) [m/s]
 ρ_i Dichte (Wasser oder Luft) [kg/m³]
 g Erdbeschleunigung [m/s²]
 μ_i absolute dynamische Viskosität [Ns/m²]
 K intrinsische Permeabilität [m²]

Somit ergibt sich das Durchlässigkeitsverhältnis K/k_i :

$$\frac{K}{k_i} = \frac{\mu_i}{\rho_i \cdot g} \quad (2-2)$$

Die intrinsische Permeabilität des Bodens dient als Eingabeparameter für numerische Simulationen (siehe Pkt. 4). Dazu werden die aus den Laborversuchen bekannten Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte mit dem Verhältnis K/k_i ($= 1,336 \cdot 10^{-7}$ bei 10 °C Wassertemperatur) multipliziert.

2.2 Konzept der inversen Modellierung

Bei einer inversen Modellierung wird versucht, ein vorgegebenes Modell über die jeweiligen Eingangsparameter eines Stoffgesetzes so anzupassen, dass die Ergebnisse der Modellsimulation möglichst den beobachteten Vorgängen, beispielsweise aus Versuchen, entsprechen. Dazu wird ein automatisiertes Optimierungsverfahren verwendet. Dabei ist das Ziel die Findung eines Parametersatzes, welcher für das genutzte Modell eine möglichst gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Vorwärtssimulation mit Messdaten ergibt, (Meier 2009).

In Abb. 2-5 ist das Schema einer Berechnung von Zielfunktionswerten für inverse Parameteridentifikationen dargestellt. Im Parametervektor x sind alle zu bestimmenden Modellparameter erfasst. Dazu gehören alle geometrischen und stoffspezifischen Größen sowie etwaige Anfangs- und Randbedingungen. Die Bewertung der Ergebnisse einer inversen Modellierung erfolgt basierend auf den Abweichungen zwischen den Ergebnissen der Vorwärtsrechnung p_{calc} und den Messdaten p_{meas} , (Meier 2009).

Die Abweichungen können durch verschiedene Abweichungsfunktionen definiert werden. Das in weiterer Folge verwendete Optimierungsprogramm UCODE_2005 (Poeter et al. 2005) arbeitet u.a. mit den mittleren quadratischen Abweichungen (MSE):

$$f(x) = \frac{1}{m} \sum_{h=1}^m (p_{calc,h} - p_{meas,h})^2 \quad (2-3)$$

- $f(x)$ Zielfunktion für den Parametervektor x
- $p_{calc,h}$ Ergebnis der Vorwärtsrechnung resultierend aus dem Parametervektor x
- $p_{meas,h}$ Messdaten
- m Anzahl der Messdaten
- h Index der Messdaten $h = 1 \dots m$

Gauß hat bereits 1809 diesen Ansatz als Methode der kleinsten Fehlerquadrate bezeichnet. Dabei definieren geringere Werte eine bessere Übereinstimmung zwischen den Messwerten und den Resultaten der Vorwärtssimulation. Für die Minimierung der Zielfunktionswerte $f(x)$ stehen dann mehrere Ansätze zur Verfügung (siehe Punkt 2.3).

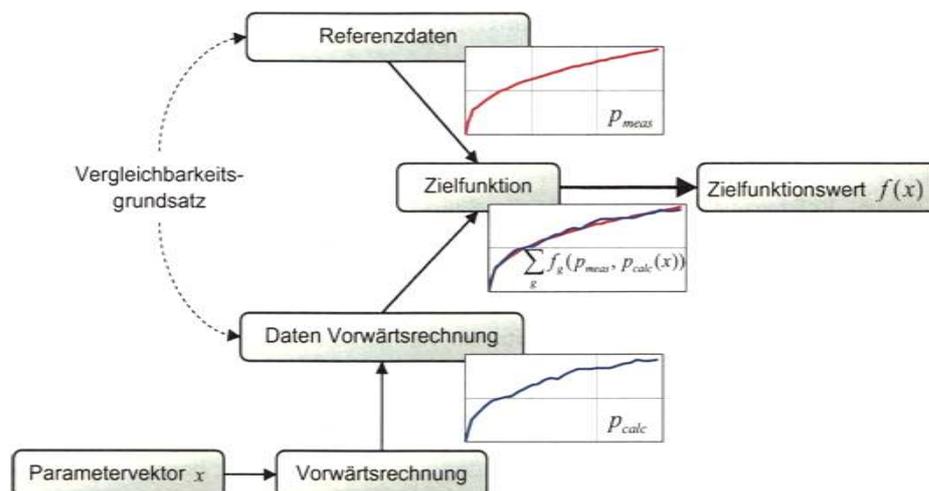


Abb. 2-5: Schema der Berechnung von Zielfunktionswerten für inverse Modellierungen (Meier 2009)

Bei der Problemstellung von Mehrphasenströmungen in teilgesättigten Böden ist die inverse Parameterbestimmung noch nicht weit verbreitet. Einzig für vereinfachte Strömungsversuche sind Parameterstudien in der Literatur veröffentlicht.

Mögliche Gründe hierfür sind nach Finsterle (2004):

- der Mangel an Versuchsdaten, welche zur Verwendung inverser Modellierungen von Mehrphasenströmungen geeignet sind
- die Schwierigkeiten bei der Formulierung und Lösung der Vorwärtsrechnung
- die Komplexität und der damit verbundenen, nichtlinearen inversen Problemstellung
- der Mangel an effizienten und stabilen Modellierungs-Codes für die inverse Parameteroptimierung von Mehrphasenströmungen
- der Mangel an ausreichenden Computer-Ressourcen

2.3 Ansätze zur Extremwertsuche

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit die Extremwertsuche durch

- eine analytische Lösung $f'(x) = 0$,
- eine lineare Optimierung $f'(x) = \sum_{i=1}^n c_i x_i \rightarrow \max/\min$, oder
- eine nichtlineare Optimierung zu bewerkstelligen.

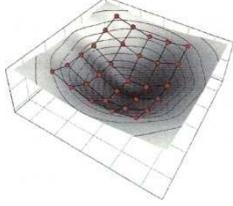
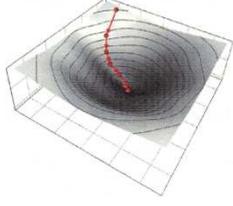
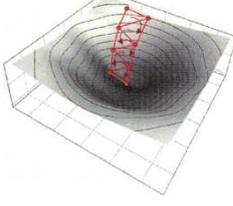
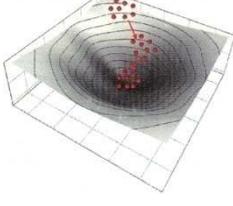
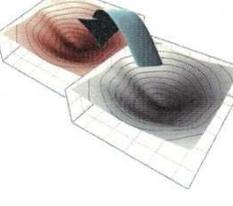
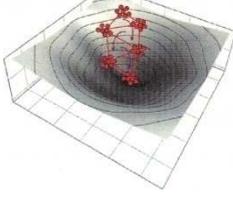
Bei der Thematik von Mehrphasenströmungen in Böden liegt klar eine nichtlineare Problemstellung vor. Die nichtlineare Optimierung erfolgt dabei durch eine iterative, schrittweise Extremwertsuche. Damit für den aktuellen Iterationsschritt eine bestmögliche Bestimmung des Optimums erreicht werden kann, werden vielfach Informationen aus dem vorhergehenden Optimierungsschritt bezogen. Dies wird auch als Sequenzierungsalgorithmus bezeichnet.

Es stehen mehrere Ansätze von zyklisch sequentiellen Optimierungsalgorithmen zur Minimierung der Zielfunktion zur Verfügung (siehe Tab. 2-1). Da der Optimierungsprozess von UCODE_2005 auf Gradienten basierendes Verfahren beruht, werden diese in weiterer Folge eingehend beschrieben.

Die Gradienten basierten Verfahren umfassen folgende Methoden:

- Gradientenabstiegsverfahren
- Newton-Raphson-Verfahren
- Gauß-Newton-Verfahren
- Levenberg-Marquardt-Algorithmus (LMA)
- Quasi-Newton-Verfahren nach Davidon
- Maximum-Likelihood-Methode

Hierbei wird basierend auf den Anstieg der Zielhyperfläche versucht, einen Änderungsvektor zu finden, der zur bestmöglichen Abweichung in der Umgebung führt. Dies ist vergleichbar mit einer Kugel auf einer hügeligen Oberfläche, die immer entgegen der Richtung des größten Anstieges rollt, (Meier 2009).

Verfahrensklasse	Schematische Darstellung der Arbeitsweise	Verfahren (Auswahl)
Stochastische Verfahren		Raster, Monte-Carlo, Latin-Hypercube, Metropolis Algorithm, Gibbs Sampler, Simulated Annealing
Gradienten basierende Verfahren		Newton-Raphson, Davidon, Maximum-Likelihood
Simplex- und Komplex-basierende Verfahren		Simplex-Nelder-Mead
Populationsbasierende Verfahren		Genetische Algorithmen (GA), Evolutionäre Verfahren (EA), Partikel-Schwarm-Optimierer (PSO)
Topologieersatz- und Approximationsverfahren		adaptive Antwortflächenverfahren, Kriging, Moving Least Squares, künstliche neuronale Netze (KNN)
Kombinativverfahren		Shuffled Complex Evolution (SCE), Evolutionary Annealing-Simplex Algorithm (EAS)

Tab. 2-1: Übersicht über die Kategorisierung der Optimierungsverfahren Meier (2009)

Nach Beschreibung aus der Arbeit von Meier (2009) wird für jeden Zyklus j der Parametervektor x^j durch die Addition eines Differenzvektors Δx^j aktualisiert. Für den nachfolgenden Zyklus bildet der Vektor x^{j+1} wiederum den Ausgangspunkt. Allgemein kann für Δx^j auch das Produkt aus dem Richtungsvektor d mit einem Skalar α_j geschrieben werden.

$$x^{j+1} = x^j + \Delta x^j = x^j + \alpha_j d \quad (2-4)$$

- x Parametervektor
- Δx^j Differenzvektor
- $p_{meas,h}$ Messdaten
- α_j Skalar
- d Richtungsvektor

Der Richtungsvektor zeigt dabei im Suchraum Ω in Richtung absteigender Zielfunktionswerte. Der Vektor der partiellen Ableitung an der Stelle x bildet die Grundlage für die Ermittlung des Differenzvektors Δx^j bzw. von d . Bei diesem Verfahren sind Startparameter notwendig, die eine Berechnung des jeweiligen Optimums ermöglichen, da dieser Punkt ansonsten ein Abbruchkriterium darstellt. D.h. der Gradient muss an dieser Stelle berechenbar sein. Die Gleichung (2-5) beschreibt die Sensitivität des Gradienten an der Stelle x .

$$\nabla f(x) = \text{grad}f(x) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f(x)}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial f(x)}{\partial x_n} \end{pmatrix} \quad (2-5)$$

Die Sensitivitätsanalyse untersucht den Einfluss der unterschiedlichen Eingabeparameter auf die Variation der Zielfunktion an einer Stützstelle. Die Wahl des Lösungsvektors bestimmt daher die errechnete Parameterempfindlichkeit maßgebend, (Meier 2009).

Die Nachteile des Gradienten basierten Verfahrens liegen bei „rauen“ Zielfunktionen und Problemen mit mehreren lokalen Optima, weil diese dann in lokalen Senken festliegen können. Als eine „raue“ Zielfunktion wird in diesem Zusammenhang als eine Funktion mit mehreren Senken auf der Zielfunktionstopologie bezeichnet. Desweiteren ist dem relativ hohen Berechnungsaufwand in Form einer hohen Zahl von Aufrufen der Vorwärtsrechnung pro Zyklus ein negativer Aspekt abzugewinnen, (Meier 2009).

UCODE_2005 stützt sich auf das Gauß-Newton-Verfahren, das einem Gradienten basierten Verfahren entspricht. Dabei wird die numerisch aufwändig zu bestimmende Hesse-Matrix (siehe Glg. (2-6)) an der Stelle x^j durch einen nur von der Jacobi-Matrix J abhängigen Ausdruck ersetzt (siehe Gleichungen (2-7) und (2-8)).

$$H(x) = \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_1} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_n} \end{pmatrix} \quad (2-6)$$

$$H(x^j) \approx 2J(x^j)J(x^j)^T \quad (2-7)$$

$$\Delta x^j = -\beta_j \left(J(x^j)^T J(x^j) \right)^{-1} \nabla f(x^j) \quad \text{für } \alpha_j = \beta_j H(x^j)^{-1}, \beta_j = 1 \quad (2-8)$$

2.4 Bewertung des Ergebnisses einer Optimierung

Im Anschluss an jede inverse Modellierung ist durch den Anwender eine Kontrolle hinsichtlich Qualität und Quantität vorzunehmen. Dazu ist ein Vergleich der ermittelten Parameter mit den möglichen Systemparametern anzustellen und anschließend zu beurteilen. Sollte dieser ein unzulängliches Resultat liefern, dann ist der erhaltene Parametersatz auszuschneiden.

Nach Meier (2009) können negative Optimierungsprozesse aus folgenden Punkten herrühren:

- verfrühte Abbrüche aufgrund von ungünstig gewählten Abbruchkriterien
- Abbrüche zufolge des Designs des Optimierungsverfahrens und/oder Fehler im Algorithmus
- Fehler in der Vorwärtssimulation
- Fehler in der Extraktion der Berechnungsergebnisse
- fehlerhafte bzw. unzureichende Messdaten

Wenn alle o.a. angeführten Aspekte ausgeschlossen werden können, dann ist desweiteren zu prüfen (Meier 2009):

- Erkennung von Lösungsmannigfaltigkeit / Bewertung der Eindeutigkeit der Lösung
- Bewertung der Robustheit der Lösung

Die Sensitivitätsanalyse dient zur Beurteilung der Zielfunktionstopologie in der näheren Umgebung des ermittelten Extremwertes. D.h. es wird rund um das Optimum die Steigung der Gradienten untersucht. Besitzt die Steigung in diesem Punkt eine Größenordnung ungleich Null, dann liegt kein Extremwert vor, (Meier 2009).

Nach Ermittlung eines gradientenfreien Parametersatzes, muss die Eindeutigkeit der Lösung bestimmt werden. Zur Visualisierung der Zielfunktionstopologie dienen Response-Surface- oder Scatter-Plots. In der Visualisierung deutet ein „langes Tal“ im Bereich eines Extremwertes auf eine möglicherweise nicht eindeutige Lösung hin. In diesem Fall ist eine weitere Untersuchung mit Hilfe der Korrelationskoeffizienten und der Hauptkomponentenanalyse vorzunehmen, (Meier 2009).

Wenn der Zielfunktionswertebereich um einen minimal größeren Wertebereich als das Optimum erweitert wird, kann das Ergebnis der inversen Modellierung auf deren Robustheit untersucht werden. Jene Lösungen, die innerhalb der geforderten Genauigkeit von der optimalen Lösung abweichen, gelten als zulässige Lösungsvielfalt. Die Lösung ist umso robuster, je größer dieser Bereich ist. Wobei trotz einer marginalen Abänderung des Parametersatzes ein zulässiger Lösungsparameter erhalten wird, (Meier 2009).

Überdies besteht die Möglichkeit durch Variation der Startwerte möglicherweise mehrere Optima zu erkennen. Für jede Variante ist dann die o.a. Bewertung durchzuführen.

2.5 Beispiele aus der Literatur

In diesem Punkt sind ausgewählte Beispiele zur inversen Modellierung von Mehrphasenströmungsversuchen dargelegt.

Die Publikation von Chen et al. (1999) zeigt die Parameterbestimmung der Kapillarspannung-Sättigungs-Beziehung und Durchlässigkeitsfunktionen bei Zweiphasenströmungen. Dabei werden mehrstufige Durchströmungsversuche untersucht. Eine Bodenprobe mit 7,6 cm Höhe und 6 cm Durchmesser wird in eine Tempe Pressure Zelle eingebaut. Zwei unterschiedliche Böden, ein „feinsandiger Colorado-Lehm“ (63,2 % Sand, 27,5 % Schluff und 9,3 % Ton) und ein „Lincoln Sand“ (88,6 % Sand, 9,4 % Schluff und 2,0 % Ton), wurden in den Versuchsreihen untersucht. Bei diesen Versuchen erfolgte die Induktion der Strömung durch Luft oder Öl. Wasser bzw. Öl, bei Luft als strömendes Fluid, diente im Vorfeld zur Erreichung der Vollsättigung der Bodenprobe. Beim „Lincoln-Sand“ beträgt der aufgebrauchte Injektionsdruck für das Luft-Wasser-System: 4, 6, 8, 10, 15, 20 und 40 kPa. Eine Druckstufe dauerte etwa 5 bis 36 h bis sich ein stationärer oder annähernd stationärer Strömungszustand einstellte.

In Abb. 2-6 ist der Versuchsaufbau für einen mehrstufigen Durchströmungsversuch dargestellt. Die Druckaufnehmer T_2 und T_3 dienen zur Messung der Fluidspannung. Für die Messung der Strömungsmenge wird der Druckaufnehmer T_1 verwendet.

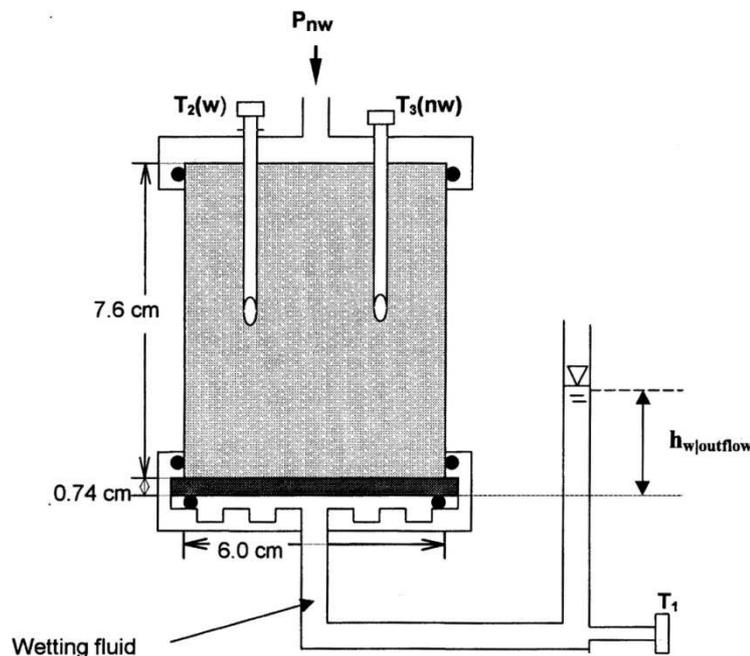


Abb. 2-6: Versuchsaufbau für einen mehrstufigen Durchströmungsversuch (Chen et al. 1999)

Zur Beschreibung des Strömungsverhaltens werden sieben bekannte Modellansätze verwendet. Eine Optimierung findet hierbei für die Kapillarspannungs- sowie Durchlässigkeitsfunktionen statt. Der Wassersättigungsgrad bei Vollsättigung θ_{ws} und die Tortosität $\tau = 0,5$ werden bei dem Van Genuchten-Mualem-Ansatz (VGM, van Genuchten 1980, Mualem 1976) als fixiert angenommen. Die residuale Wassersättigung $S_{w,r}$, die intrinsische Permeabilität K und die Fittingparameter n und α_{vg} werden dem Optimierungsprozess unterzogen. Die

Modelloptimierungen mit den Stoffgesetzen nach Van Genuchten-Burdine (VGB, van Genuchten 1980, Burdine 1953), Brooks-Corey-Mualem (BCM, Brooks & Corey 1964, Mualem 1976) sowie Brooks-Corey-Burdine (BCB, Brooks & Corey 1964, Burdine 1953) liefern keine befriedigenden Ergebnisse und werden somit in dieser Studie nicht weiters behandelt. Die Eindeutigkeit der Lösungsvektoren konnte durch drei verschiedene Startparametersätze überprüft werden. Das optimale Modellierungsergebnis definiert das Minimum aus der Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (RMS). Letztendlich zeigen der Ansatz van Genuchten-Mualem (VGM) und Lognormal Distribution-Mualem (LNM, Kosugi 1994 & 1996, Mualem 1976) die besten Übereinstimmungen mit den Messergebnissen und die geringsten RMS.

Hwang et al. (2003) behandeln ebenfalls in einer Studie die Bestimmung hydraulischer Parameter für sandige Böden von mehrstufigen Durchströmungsversuchen. Insgesamt werden sechs verschiedene Modellansätze in einer numerischen Vorstudie hinsichtlich Konvergenz und Eindeutigkeit der Lösungsmatrix untersucht. Die Ansätze nach VGM, LNM und Gardner-Mualem (GDM, Gardner 1958, Mualem 1976) liefern hierbei die besten Übereinstimmungen. Die meisten Berechnungen in denen der Wassersättigungsgrad bei Vollsättigung θ_{ws} und die residuale Wassersättigung $S_{w,r}$ gleichzeitig optimiert werden, können keine eindeutigen Lösungen erreichen. Die Publikation von Mous (1993) besagt, dass eine gleichzeitige Optimierung θ_{ws} und $S_{w,r}$ beim VGM-Modell nicht möglich sei. Die inverse Parameterbestimmung mit Daten aus den mehrstufigen Durchströmungsversuchen zeigen für Hwang et al. (2003), dass die besten Ergebnisse bei Fixierung von θ_{ws} und der gesättigten Permeabilität k_{sat} und gleichzeitiger Optimierung von τ erzielt werden. Die Begründung für die Fixierung liegt für die Autoren bei dem möglichen Verlust der physikalischen Bedeutung der Parameter. Weitere Untersuchungen lassen erkennen, dass bei geringerer Steigerung der Druckstufen eine noch bessere Modellierung des Versuches möglich wäre. Dabei sind die beiden Parameter θ_{ws} und k_{sat} zu fixieren.

Eching et al. (1994) untersuchten die teilgesättigte Permeabilität von Böden bei transienten mehrstufigen Durchströmungsversuchen. Die inverse Parameteroptimierung beruht auf Messdaten aus der Wasserströmung sowie der Bodenwasserspannung. Dadurch kann die Eindeutigkeit der Lösung deutlich gesteigert werden. Die beiden Parameter θ_{ws} und die Tortosität $\tau = 0,5$ sind bei der Optimierung fixiert.

2.6 Schlussfolgerungen

Die Beispiele im vorangegangenen Punkt weisen einige Widersprüche auf. So ist es nach Chen et al. (1999) nicht zielführend die Tortosität τ in den Optimierungsprozess einzubinden. Dafür soll aber die intrinsische Permeabilität K optimiert werden. Hwang et al. (2003) behaupten exakt das Gegenteil: τ soll mit 0,5 fixiert werden, während die intrinsische Permeabilität K optimiert werden soll. Empfehlenswert ist sicherlich, die beiden Varianten zu prüfen und bei der Variantenstudie τ und K in den Optimierungsprozess mit einzubinden.

Nach Hwang et al. (2003) hat die Wahl der Druckstufen eine Auswirkung auf die Genauigkeit einer nachfolgenden inversen Modellierung. Bei einer Entwicklung eines neuartigen Versuches kommt diesem Aspekt mit Sicherheit eine wesentliche Bedeutung zu. Die Größe der Druckstufen ist je nach Bodenart hinsichtlich der abschätzbaren Durchlässigkeit anzupassen.

Bei allen drei Publikationen ist der Wassersättigungsgrad bei Vollsättigung θ_{ws} fixiert worden. Diese Vorgehensweise ist durchaus berechtigt, da dieser Parameter mit nur geringem Aufwand durch Laborversuche bestimmt werden kann.

Die Publikation von Durner et al. (1999) behandelt die inverse Modellierung von Mehrphasenströmungsversuchen. Die Maximierung der Effizienz dieser Methode für Durchströmungsversuche im Labor wird dabei angestrebt. Insbesondere werden die Auswahl der optimalen experimentellen Randbedingungen, die Annahmen in Bezug auf die Auswahl der Stoffmodelle und die Annahmen der hydraulischen Funktionen, einschließlich Hysterese, überprüft.

Die Autoren geben dabei folgende Empfehlungen:

- Die Mehrphasenströmungsversuche liefern ausreichende Informationen für die eindeutige Parameterbestimmung bei der Durchlässigkeitsfunktion.
- Der klassische einstufige Durchströmungsversuch ist in vielen Fällen mathematisch unterbestimmt, dadurch ist ein mehrstufiger Durchströmungsversuch der Einstufen-Methode vorzuziehen.
- Die gesättigte Wasserdurchlässigkeit K_s kann durch einen Durchströmungsversuch nie genau abgeschätzt werden, da die Wasserdurchlässigkeit unempfindlich im Bereich der vollständigen Sättigung wird.
- Bei Böden mit einem strukturierten Porensystem ist die Nutzung der klassischen unimodalen hydraulischen Funktionen unvorteilhaft.
- Die Parameter einer flexiblen Durchlässigkeitsfunktion können mathematisch eindeutiger definiert werden.

3 Luftinjektionsfeldversuche

3.1 Allgemeines

Dieses Kapitel beschreibt die durchgeführten Luftinjektionsfeldversuche. Der genaue Versuchsaufbau und die Lokalität, sowie die verwendete Messtechnik werden näher erläutert. Abschließend werden die Messergebnisse der Luftinjektionsversuche vorgestellt. Das Versuchsprogramm umfasst drei unterschiedliche, gering kohäsive Böden, welche in die Anwendbarkeit von Tunnelbau unter Druckluft fallen.

3.1.1 Versuchsaufbau

Die Abbildung 3-1 zeigt grafisch die wesentlichen Bestandteile der durchgeführten Luftinjektionsfeldversuche. Durch die Luftinjektion wird im Boden eine Zweiphasenströmung von Wasser und Luft induziert. Im Folgenden wird die Vorgangsweise zur Installation der Versuchseinrichtung sowie der zugehörigen Mess- und Gerätetechnik beschrieben.

Am Beginn wird ein kreisförmiger Mutterbodenabtrag (\varnothing ca. 2,5 m) vorgenommen, um den Einfluss der obersten Deckschicht möglichst zu minimieren bzw. um eine Luftströmung zu ermöglichen. Die weitere Aushubtiefe richtet sich nach der Lage des Grundwasserspiegels (GWSP). Die Luftinjektion soll knapp unterhalb des GWSP erfolgen und andererseits ist eine ausreichende Überdeckung erforderlich, um Ausbläser zu verhindern. Die Aushubtiefe ist weiters durch die Länge der Messgeräte sowie der Standsicherheit des Bohrloches unterhalb des Grundwasserpegels begrenzt, besonders bei feinsandigen Böden.

In der Aushubmitte wird die Injektionslanze im Schutze eines Hüllrohres eingebracht. Das Injektionsrohr ist im unteren Bereich auf einer Länge von 20 cm perforiert. Der am Fußpunkt befestigte Filter dient zum besseren Eintrag der Luftströmung in den umgebenden Untergrund. Die Mitte des Filters liegt etwa 30 cm unterhalb des Grundwasserspiegels. Das Hüllrohr wird nach Einbringen der Injektionslanze wieder gezogen. Die verbleibenden Hohlräume zwischen dem Bohrloch und Injektionsrohr werden mit einem Material geringer Durchlässigkeit (z.B. Ton) verfüllt. Desweiteren ist der Voraushub mit Kies zu verfüllen.

Die Druckluftbeaufschlagung wird durch einen Druckluftkompressor bewerkstelligt, welcher im Vorspann der Luftstrommesseinrichtung installiert ist. Ein gesamter Feldversuch beinhaltet intervallsmäßig Druckstufen von 5 kPa bis 50 kPa, welche eine verlässlichere Rückrechnung der Bodenparameter ermöglichen soll. Die jeweiligen Druckstufen werden durch Druckregler und einem nachgeschalteten Feinmessmanometer reguliert. Die Messdüsen mit unterschiedlichen Querschnitten und angeschlossenem Luftmengenmessgerät erlauben einen großen Messbereich des injizierten Luftvolumenstromes.

Desweiteren werden jeweils zwei Tensiometer bzw. TDR-Sonden gegenüberliegend in zwei unterschiedlichen Abständen zum Injektionsrohr im Boden installiert. Die Bohrlöcher werden mit Hilfe einer Schablone und eines Stechbohrers hergestellt und anschließend die Messgeräte eingebaut (siehe auch Abb. 3-15). Dies ermöglicht eine Plausibilitätskontrolle der Messungen, sowie die Feststellung eines nicht radialsymmetrischen Strömungszustandes. Die

Abstände wurden vor Versuchsbeginn den ingenieurmäßig abgeschätzten Luftdurchlässigkeiten der unterschiedlichen Versuchsböden angepasst. Die Fußpunkte der eingebauten Messgeräte sollen aufgrund einer symmetrischen Anströmung in derselben Höhenlage wie die Mitte des eingebrachten Filters liegen. Besonders bei sandigen Böden ist die Einbautiefe unterhalb des Grundwasserpegels maßgebend von der Standfestigkeit der Bohrlochwand abhängig.

Mit der Messausrüstung werden der Luftvolumenstrom, die Bodenwasserspannung, die Wassertemperatur und der Wassergehalt erfasst.

Die Abb. 3-1 zeigt den Versuchsaufbau der Feldversuche im Grundriss und Schnitt. Eine nähere Beschreibung der Messtechnik erfolgt in Pkt. 3.2.

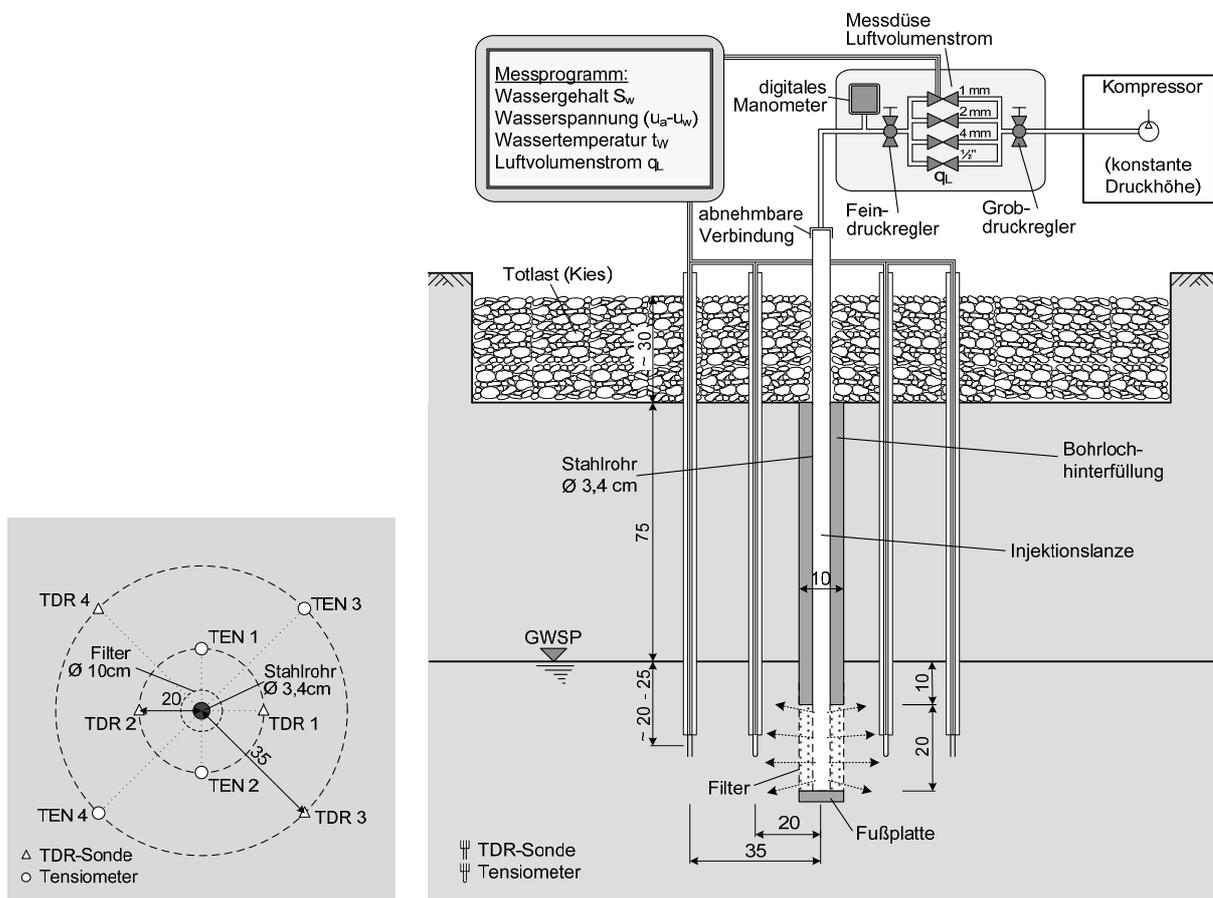


Abb. 3-1: Versuchsaufbau der Feldversuche (Grundriss und Schnitt)

3.1.2 Lokalität

Das Versuchsfeld befindet sich in Uttendorf. Dies liegt im Bundesland Salzburg, etwa 20 km westlich von Zell am See. Im Überschwemmungsbereich der Salzach wurden drei Lokalitäten ausgewählt. Diese liegen jeweils nur ca. 100 m voneinander entfernt, weisen aber Böden mit deutlich unterschiedlicher Kornverteilung auf. An diesen Stellen weisen die Böden z.T. eine Homogenität über die Tiefe auf, sind aber horizontal strukturiert (siehe Abb. 3-4).



Abb. 3-2: Geografische Lage der Feldversuche (aus www.salzburg.gv.at)

3.1.3 Kenngrößen der Versuchsböden

Am Versuchsort wurden mit Hilfe von Stechzylindern an repräsentativen Stellen Bodenproben für Untersuchungen im Labor entnommen. Für die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit wurden Bodenproben in horizontaler und vertikaler Richtung entnommen. In Abb. 3-3 sind die Sieblinien der Versuchsböden angeführt. Dabei ist im Diagramm die Anwendbarkeit von Tunnelbau unter Druckluft (nach Kammerer, 2000) grau hinterlegt. Der Versuchsboden 1 (grün dargestellt) liegt definitionsgemäß an der oberen Grenze dieser Anwendbarkeit und beschreibt einen mittel-grobsandigen Boden mit schwachem Kies- und Feinsandanteil. Der Boden des Feldversuches 2 (blau) ist ein schluffiger Fein- und Mittelsand. Der dritte Feldversuch findet in einem Grobschluff-Feinsand statt (rot).

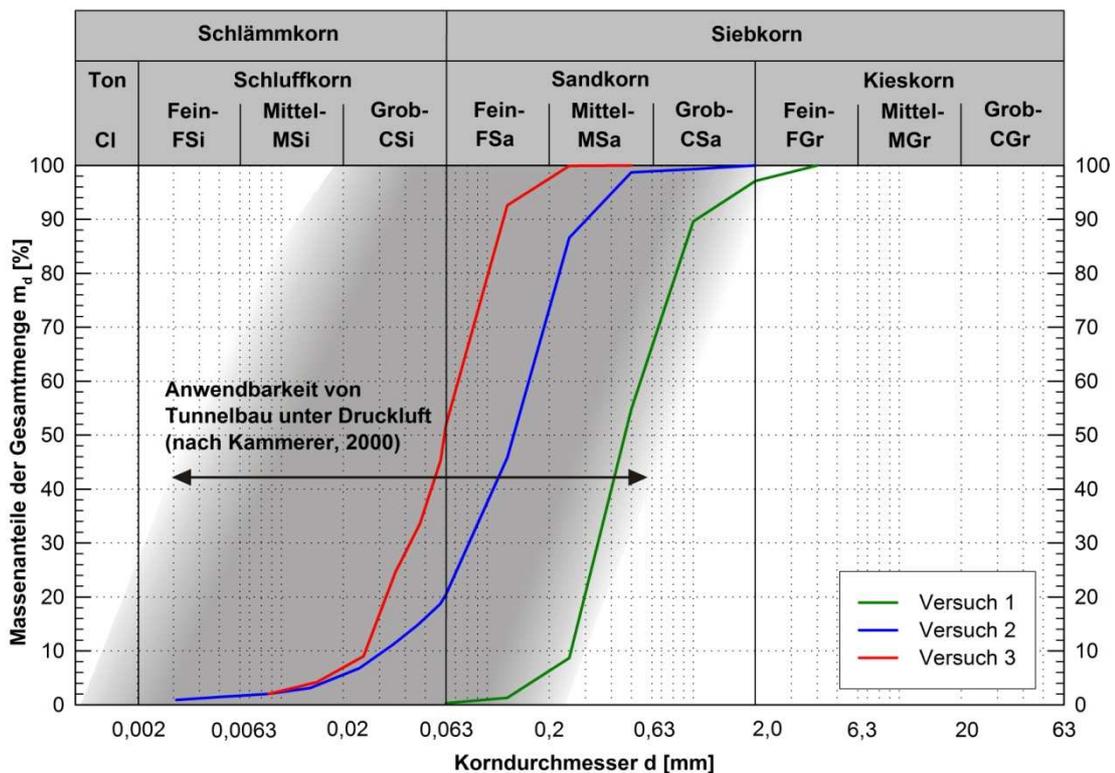


Abb. 3-3: Kornverteilungskurve der Versuchsböden

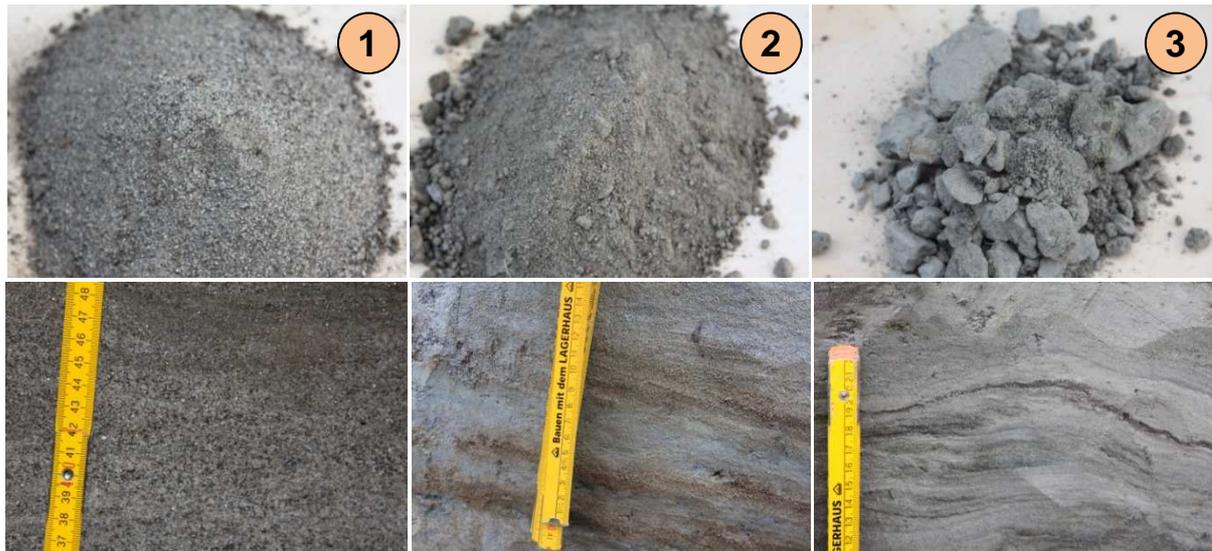


Abb. 3-4: Übersicht der Versuchsböden

Die Abb. 3-4 gibt eine Übersicht der unterschiedlichen Versuchsböden im gestörten (oben) und ungestörten (unten) Zustand: beginnend mit dem mittel-grobsandigen Boden mit schwachem Kies- und Feinsandanteil (links, Feldversuch 1), dem schluffigen Fein- und Mittelsand (mittig, Feldversuch 2) sowie dem Grobschluff-Feinsand (rechts, Feldversuch 3).

In Tab. 3-1 erfolgt eine Zusammenstellung der charakteristischen Größen der Versuchsböden. Die Porosität n sowie die intrinsische Durchlässigkeit K sind wichtige Kenngrößen für die Definition des Bodens im numerischen Modell.

Bezeichnung	Einheit	Feldversuch 1	Feldversuch 2	Feldversuch 3
Bodenart	-	gr ^r Sa	si Sa	Si Sa
Kies <i>Gr</i>	%	2,9	-	-
Sand <i>Sa</i>	%	96,8	79,0	50,9
Schluff <i>Si</i>	%	-	21,0	49,1
<i>d</i> ₁₀	mm	0,25	0,032	0,026
Ungleichförmigkeitszahl <i>U</i>	[-]	2,0	5,0	3,0
Korndichte ρ_s	g/cm ³	2,73	2,72	2,70
Trockendichte ρ_d	g/cm ³	1,61	1,45	1,46
Porosität <i>n</i>	[-]	0,412	0,462	0,461
Wasserdurchlässigkeit vertikal (gesättigt) <i>k</i> _{10,v}	m/s	$2,00 \cdot 10^{-4}$	$1,40 \cdot 10^{-5}$	$3,10 \cdot 10^{-6}$
Wasserdurchlässigkeit horizontal (gesättigt) <i>k</i> _{10,h}	m/s	$2,00 \cdot 10^{-4}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$4,15 \cdot 10^{-6}$
Intrins. Durchlässigkeit vertikal <i>K</i> _{10,v}	m ²	$2,061 \cdot 10^{-11}$	$1,442 \cdot 10^{-12}$	$3,194 \cdot 10^{-13}$
Intrins. Durchlässigkeit horizontal <i>K</i> _{10,h}	m ²	$2,061 \cdot 10^{-11}$	$1,597 \cdot 10^{-12}$	$4,276 \cdot 10^{-13}$

Tab. 3-1: Kenngrößen der Versuchsböden

3.2 Messtechnik

3.2.1 Druckaufnehmer-Tensiometer

Für die Messung der Bodenwasserspannung wird das Produkt „T4-120 Tensiometer“ der Firma UMS GmbH München verwendet. Tensiometer dienen zur kontinuierlichen Bestimmung der Bodenwasserspannung, die gegebenenfalls auch Saugspannung bezeichnet wird.

Dieses Tensiometer arbeitet von +1000 hPa (Stauwasserbereich) bis -850 hPa (Saug-/Wasserspannung). Wird der Boden sehr trocken, läuft das Tensiometer trocken und muss neu befüllt werden. Das Bodenporenwasser und das Wasser im Tensiometer haben über die poröse, wasserdurchlässige Keramik Kontakt. Die Bodenwasserspannung überträgt sich direkt auf den Sensor, der das entsprechende analoge, elektronische Messsignal liefert. Der atmosphärische Referenzdruck wird durch das Kabel und eine Membrane am Kabel übertragen, (UMS GmbH München 2009).

Mit Tensiometern sind nur punktuelle Messungen möglich. Die Auswahl eines repräsentativen Messpunktes ist entscheidend, da die Bodenwasserspannung, besonders bei heterogenen Böden, an einer benachbarten Stelle eine erheblich abweichende Größe einnehmen kann.

Die anschließenden Eigenschaften und Produktbeschreibungen sind der Bedienungsanleitung von UMS GmbH München (2009) entnommen.

▪ **Korpus und Schaft**

Die gesamte Elektronik ist im Korpus, der aus glasfaserverstärktem Kunststoff besteht, integriert. Die Elektronik ist komplett hermetisch im Korpus vergossen. Dadurch ist diese optimal gegen Feuchtigkeit geschützt.

▪ **Piezoelektrischer Drucksensor**

Der piezoelektrische Drucksensor misst die Bodenwasserspannung differenziell gegen den Umgebungsluftdruck. Der Sensor wandelt eine physikalische Kraft durch Ladungstrennung in eine elektrische Spannung in einem Kristall um. Dieser Effekt wird auch als piezoelektrischer Effekt bezeichnet. Aufgrund der Kraft verlagern sich im Sensorinneren Ionen, wobei sich die Ladung verhältnismäßig zur Kraft ändert.

Der Umgebungsluftdruck wird über die wasserabweisende Membran am Kabel in der Nähe des Steckers zur Referenzseite des Drucksensors geleitet.

▪ **Referenzdruck**

Der atmosphärische Referenzdruck wird durch die weiße Teflonmembran am Kabel durch das Kabel hindurch zum Druckaufnehmer geleitet. Die hydrophobe Membran absorbiert kein Wasser und lässt kein Wasser durch. Das Kondenswasser kann jedoch aus dem Kabelinneren entweichen. Die Membran muss während der Messung Luftkontakt haben, da sonst die Messung mit dem auf das Membran wirkenden Wasserdruck als Fehler behaftet würde.

▪ Keramische Kerze

Eine semipermeable Membran ist notwendig, damit die Bodenwasserspannung als Unterdruck in das Tensiometer übertragen werden kann. Die Kerze besteht aus keramischem Al_2O_3 Sintermaterial, welches die mechanisch stabilen, wasserdurchlässigen und gasundurchlässigen Eigenschaften ermöglicht.

Der Lufteintrittspunkt (Bubble Point) liegt bei über 15000 hPa. Wird der Boden „trockener“ als 15000 hPa, dann baut sich der Unterdruck im Tensiometer ab und die Messkurve geht gegen 0 hPa.

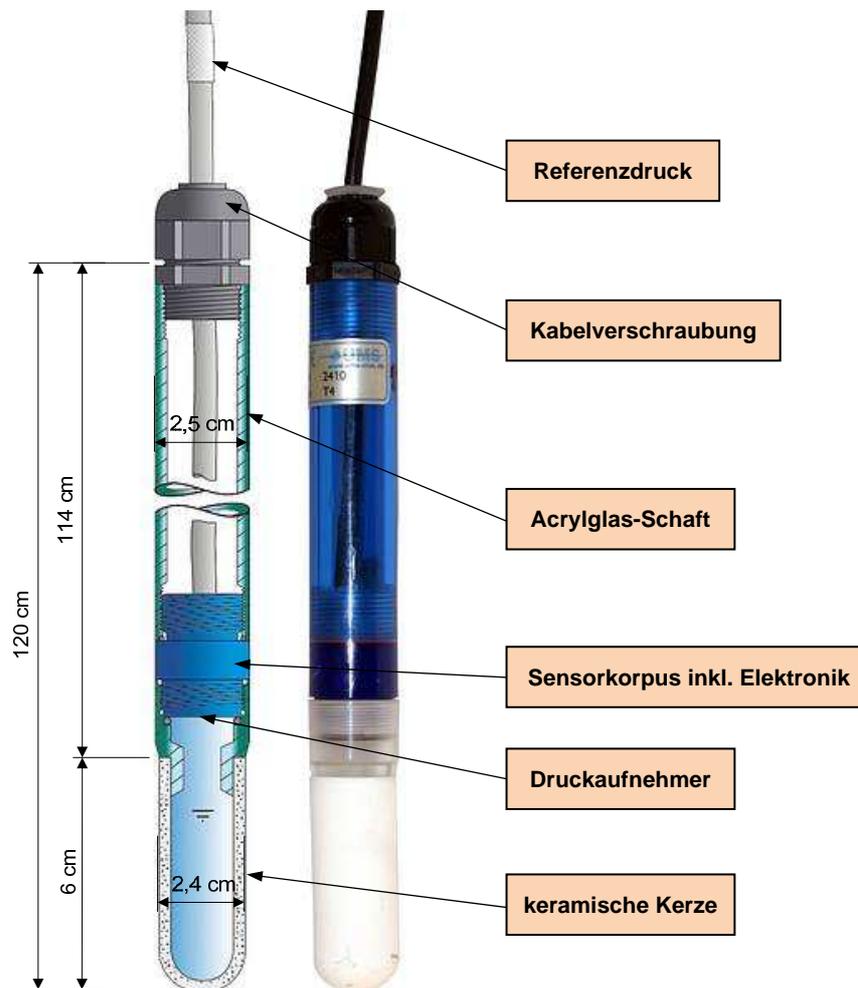


Abb. 3-5: Aufbau eines Tensiometers T4-120 UMS GmbH München (2009)

Das Tensiometer ist für den horizontalen Einbau kalibriert. Beim Feldversuch ist das Messgerät vertikal eingebaut, deshalb ist die am Drucksensor hängende Wassersäule zu kompensieren.

Bei senkrechtem Einbau (0° zur Normalen) ist die Abweichung am größten. In diesem Fall hängt die Wassersäule von 5 cm zusätzlich am Drucksensor. Diese verschiebt den Nullpunkt um 5 hPa. D.h. bei 0 hPa Bodenwasserspannung zeigt das Tensiometer bereits -5 hPa an, (UMS GmbH München 2009).

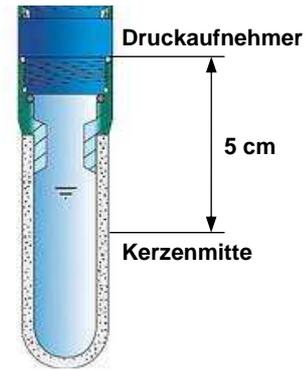


Abb. 3-6: Offset-Korrektur für nicht horizontale Einbaulage UMS GmbH München (2009)

3.2.2 TDR – Sonde

Eine Bestimmung des Wassergehalts mit Hilfe der Ofentrocknung (DIN 18 121 Teil 1 bzw. ÖNORM B 4410) oder eine indirekte Bestimmung über die Bilanzen im Wasserhaushalt sind weit verbreitet. Die Ofentrocknung ist angesichts der Zerstörung des Bodengefüges mit Problemen behaftet. Zudem ist sie nicht für instationäre Strömungsversuche geeignet. Deshalb wurde bei der vorliegenden Arbeit eine zerstörungsfreie Ermittlung des Wassergehalts verwendet. Die TDR-Methode (Time Domain Reflectometry) ist eine indirekte Methode zur Ermittlung des volumetrischen Wassergehalts des Bodens. Dieses Messverfahren basiert im Grunde auf den dielektrischen Eigenschaften des Bodens. Dabei wird die Laufzeit einer elektromagnetischen Welle durch ein Medium gemessen und dann über eine empirische Funktion der volumetrische Wassergehalt ausgewertet. Dieser entspricht im Wesentlichen, dem Verhältnis des Volumenanteils des Wassers zum Gesamtvolumen.

Bei den Feldversuchen wurde der volumetrische Wassergehalt mit der TDR-Sonde „TRIME®-PICO32“ der Firma IMKO Micromodultechnik GmbH gemessen. Mit diesem Messgerät sind wiederum nur punktuelle Messungen möglich, was für die Erreichung repräsentativer Messwerte eine sorgfältige Auswahl der Messpunkte erfordert.

▪ Dielektrizität

Dielektrische Methoden beruhen auf der hohen Dielektrizitätszahl von Wasser ($\epsilon = 81$ bei 20 °C) im Vergleich zu den anderen Komponenten des Bodens ($\epsilon < 5$). Nach Ansoult et al. (1985) gilt unter Berücksichtigung eines 3-Phasenmodelles folgender Zusammenhang:

$$\epsilon = \left(\theta \cdot \epsilon_w^\alpha + (1 - n) \cdot \epsilon_s^\alpha + (n - \theta) \epsilon_A^\alpha \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (3-1)$$

$\epsilon_w, \epsilon_s, \epsilon_A$ Dielektrizitätszahlen von Wasser, Feststoff und Luft

θ volumetrischer Wassergehalt

n Porosität

α Geometrieparameter, abhängig von Bodenklassifikation $0,46 \leq \alpha \leq 0,65$

Die verwendete Messsonde besteht aus zwei parallelen Stahlstäben, die eine Verlängerung des Koaxialkabels bilden. Der Eintritt des Impulses in die Stäbe bzw. in den Boden ist durch

einen starken Abfall des Reflexionskoeffizienten gekennzeichnet, da das Bodenwasser einen starken Impedanzabfall verursacht. Die Auswertung der Messkurve erfolgt, indem die Laufzeit t des Impulses entlang der Stäbe ermittelt wird, (Scapozza 2002).

Aus den ermittelten Impulszeiten kann die Dielektrizitätszahl ε des Bodens berechnet werden. Für die Laufzeit t im Boden entlang der Stäbe und zurück gilt nach Topp et al. (1980) folgender Zusammenhang:

$$t = \frac{2 \cdot l}{c} \quad (3-2)$$

l Stablänge

c Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle im Boden

Die Dielektrizitätskonstante kann dann mit nachstehender Gleichung ermittelt werden:

$$\varepsilon = \left(\frac{c_0 \cdot t}{2 \cdot l} \right)^2 \quad (3-3)$$

c_0 Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

In Abb. 3-7 ist die verwendete TDR-Sonde „TRIME[®]-PICO32“ mit integriertem Temperatursensor dargestellt.

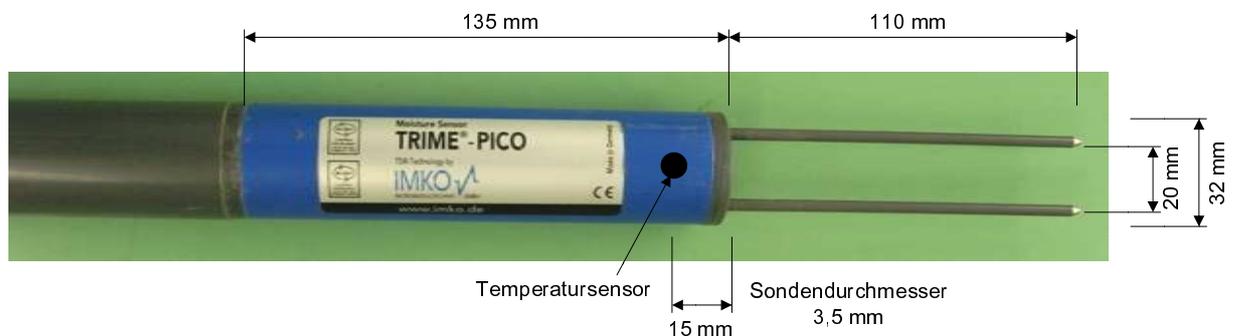


Abb. 3-7: TDR-Sonde TRIME[®] - PICO 32

▪ Die TRIME[®]-Technik

Die TRIME[®]-Technik (Time Domain Reflectometry mit Intelligenten Micromodul-Elementen) ist ein Messsystem speziell für die Wassergehaltsmessung in porösen Medien. Die Elektronik und Peripherie wurde auf die o.a. Aufgabenstellung angepasst, siehe Abb. 3-7.

Nach Stacheder (1996) unterscheidet sich diese Technik von der konventionellen Methode bei der Detektion des Reflexionsmusters. Hierbei wird die Ankunftszeit der reflektierten Impulse an bestimmten vorher definierten Spannungsschwellenwerten gemessen. Dies entspricht einer Umkehrung der konventionellen TDR-Technik, bei der jeder Punkt des Messsignals zu einer bestimmten Zeit gemessen wird.

Eine Beschichtung der Sondenstäbe, welche die Messung mit dieser Technik ermöglicht, bewirkt eine Verstärkung des Messsignals. Der Überzug wirkt dämpfungsmindernd und hat den Anstieg des Messsignals zur Folge (siehe Abb. 3-8).

Beim TRIME[®]-Verfahren kann jene Zeit, an dem der Impuls an der Sondenspitze eintritt nicht bestimmt werden, da die Amplitude tiefer liegt als die des reflektierten Impulses. Daher wird die gesamte Zeit gemessen, die der Impuls von der Quelle bis zur Reflexion der Sondenstäbe benötigt, (Stacheder 1996).

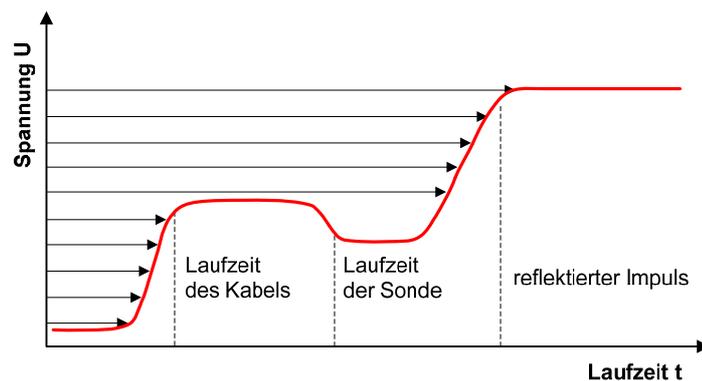


Abb. 3-8: Verlauf und Auswertung der TDR-Reflexionskurve von TRIME – Technik (Stacheder 1996)

Die Abb. 3-9 gibt einen Überblick über die Messwertverarbeitung im TRIME[®]-Gerät. Es kann entweder unter Verwendung der Standardkalibrierung oder unter Verwendung einer speziellen Materialkalibrierung gemessen werden, (Stacheder 1996). Beim Feldversuch erfolgte die Messung mittels Standardmaterialkalibrierung.

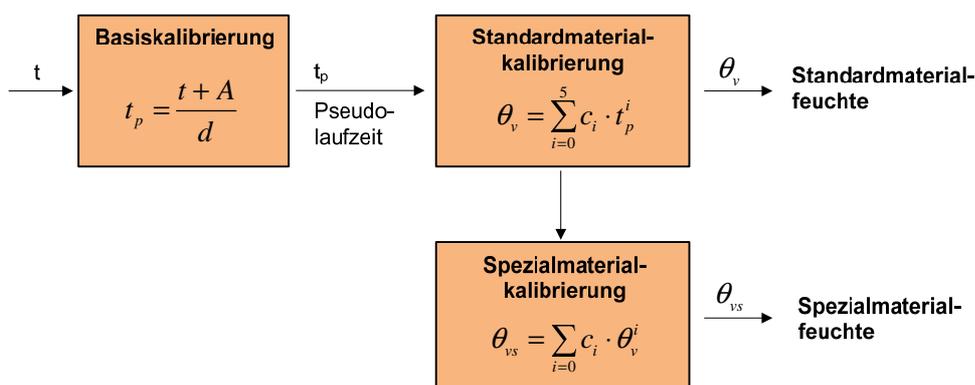


Abb. 3-9: Messwertverarbeitung beim TRIME[®] - Verfahren (Stacheder 1996)

▪ Einschränkungen der TDR-Methode

Bei geringer Einbautiefe, ungeschützter Lage sowie in tonigen Böden sind die Temperatureffekte zu beachten. Somit ist eine genaue Analyse des Versuchsbodens Voraussetzung jeder Messkampagne, (IMKO Micromodultechnik GmbH 2009).

Die Sondenstäbe müssen einen sehr guten Kontakt zum Messmedium haben, da Lufteinschlüsse aufgrund der geringen Dielektrizitätskonstante von Luft ($\epsilon \approx 1$) das Messergebnis erheblich verfälschen. Der Einsatz in quellenden und schrumpfenden Böden ist kritisch, da sich die Risse primär entlang der Stäbe ausbilden, (Scapozza 2002).

Der Salzgehalt des Mediums muss berücksichtigt werden, weil die elektrische Leitfähigkeit zu einer Dämpfung der Amplitude führt. Dies macht eine Messung unmöglich, da die einzelnen Reflexionspunkte der Kurve nicht mehr identifiziert werden können, (Stacheder 1996). Ab einer Leitfähigkeit von 3 dS/m soll lt. Hersteller (IMKO Micromodultechnik GmbH 2009) eine beschichtete Sonde eingesetzt werden.

Der o.a. Hersteller (IMKO Micromodultechnik GmbH 2009) empfiehlt beim Einsatz dieser Messmethode (mit Standardkalibrierung) folgende Einsatzgrenzen:

Böden mit Tonanteil	> 50 %
Böden mit organischem Anteil	> 10 %
Trockendichte	< 1,1 g/cm ³ oder > 1,7 g/cm ³

3.2.3 Bodenfeuchtemessgerät

Bei den Feldversuchen wurde der volumetrische Wassergehalt mit der „Enviro Modulare Bodenfeuchteprofilsonde“ der Firma UMS GmbH München bestimmt (siehe Abb. 3-10). Dieses Messgerät erlaubt eine profilmäßige Messung des Wassergehaltes und dient in weiterer Folge als Grundlage für die Zuweisung der Luftsättigung oberhalb des Grundwasserspiegels im numerischen Modell.

Das Messprinzip dieser Methode basiert auf der FDR-Technik (Frequency Domain Reflectometry). Dabei wird die elektrische Kapazität, abhängig von der Dielektrizitätszahl von Boden, Wasser und Luft, zwischen zwei Elektroden gemessen, (Paltineanu et al. 1995). Die Bodenprofilsonde wird im Schutz eines Hüllrohres eingebaut. Für die Richtigkeit der Messwerte ist hierbei der Kontakt zwischen dem Hüllrohr und dem umgebenden Boden angesichts der unterschiedlichen Leitfähigkeiten entscheidend.

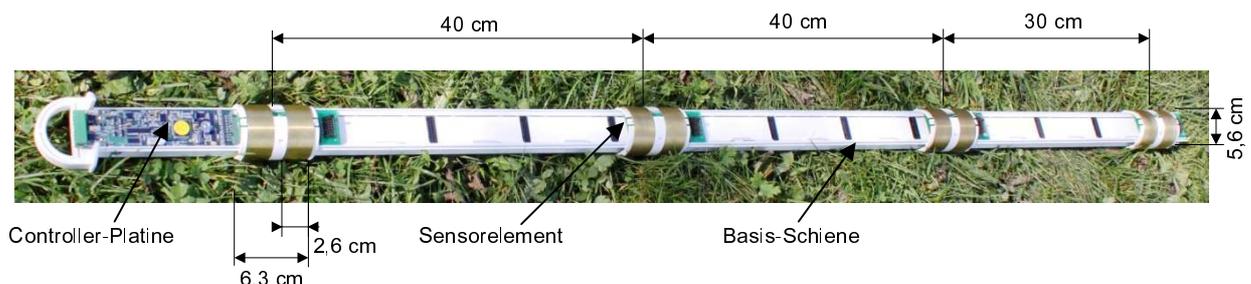


Abb. 3-10: Enviro Modulare Bodenfeuchteprofilsonde

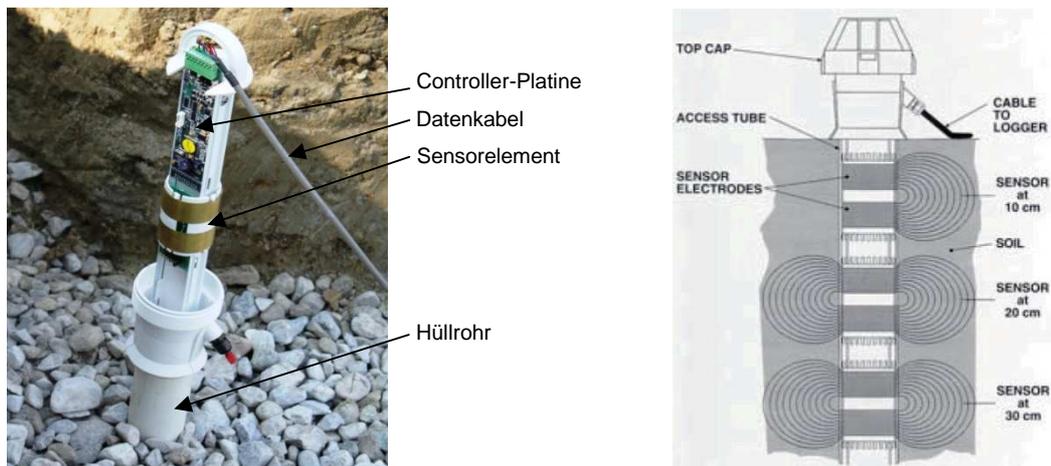


Abb. 3-11: Einbau und Messprinzip (Sentek Pty Ltd. 2006) einer Enviro Modulare Bodenfeuchtesonde

Die Abb. 3-11 zeigt das Bodenfeuchtemessgerät in eingebautem Zustand (links) und eine Darstellung des Messverfahrens zwischen den beiden Sensorelektroden (rechts).

3.2.4 Druckluftmengenmessgerät und Luftdrucksteuerung

Um die jeweils strömende Luftmenge zu ermitteln, wurde das Volumenstrom-Messgerät „VSM-02“ der Firma Optiserve GbR. aus Heilbronn verwendet. Das Messgerät erlaubt die Mengemessung feuchter Gase. D.h., dass die aus der Umgebung angesaugte Luft auch Wasserdampfanteile beinhalten darf. Bei horizontalen Leitungen ist lediglich darauf zu achten, dass die Vorrichtung für die Druckentnahmeschläuche bei den Messdüsen nach oben gerichtet ist.

Die wesentlichen Bestandteile des Volumenstrommessgerätes sind die Messdüse, die je nach Messbereich (siehe Tab. 3-2) gewählt wird, die Verbindungsschläuche sowie das aus mehreren Mikroprozessoren bestehende Bedien- und Anzeigeteil (siehe Abb. 3-12).

In den Düsen wird beim Durchströmen des Mediums durch eine leichte Querschnittsverengung ein geringer Druckabfall erzeugt. Dabei wird der Mediumsdruck vor und nach der Verengung gemessen. Der momentane Volumenstrom setzt sich dann aus der Druckdifferenz der beiden Messwerte (Wirkdruck), dem Systemdruck vor der Düse und der Mediumstemperatur in der Düse zusammen, (Optiserve GbR. 2000).

SerienNr. – Messdüse	Messbereich bei 1 bar Leitungsdruck	Messbereich bei 6 bar Leitungsdruck
SA716001 – 1 mm	0,9 – 16,0 l/min	1,6 – 30,0 l/min
ZC625001 – 2 mm	3,4 – 64,4 l/min	6,4 – 120,0 l/min
XA716001 – 4 mm	13,8 – 257,0 l/min	26,0 – 480,0 l/min
AA71001 – ½"	80,0 – 1675,0 l/min	150,0 – 3125,0 l/min

Tab. 3-2: Messbereich der verwendeten Messdüsen

Damit die o.a. Messdüsen verwendet und der gesamte Messbereich abgedeckt werden kann, ist es notwendig die Kalibrierungsdaten via Datenträger in das VSM-02 einzuspielen. Der Messbereich mit den ausgewählten Düsen erstreckt sich von 0,9 l/min mit der 1 mm – Messdüse und 1 bar Systemdruck bis zu 3125,0 l/min mit der ½ “ – Messdüse und 6 bar Systemdruck.

Die Abb. 3-12 zeigt das Bedien- und Anzeigeteil mit den dazugehörigen Anschlüssen.

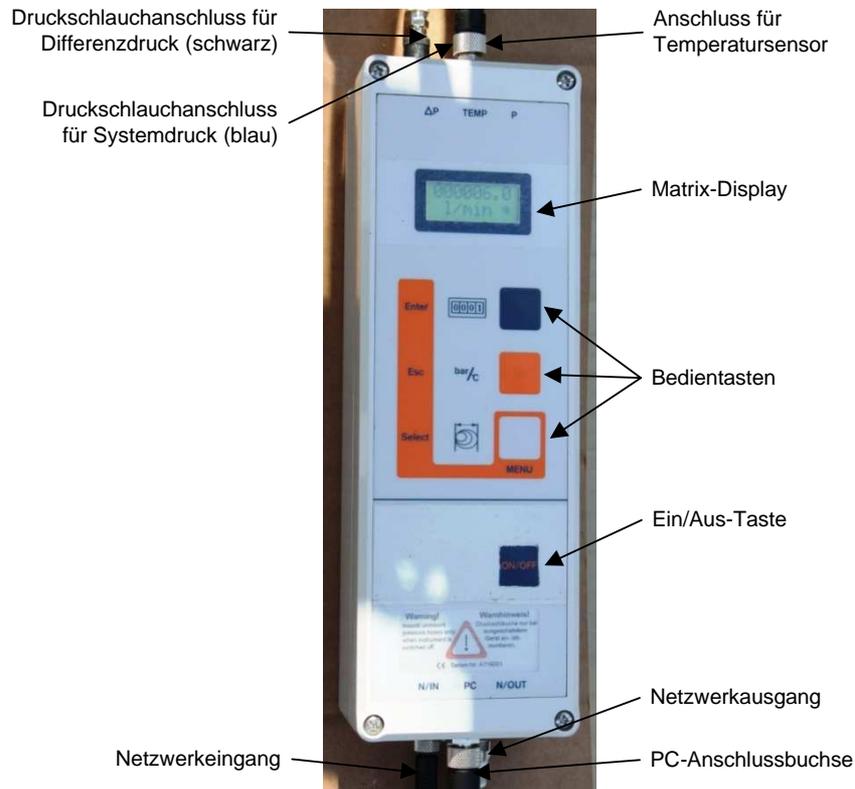


Abb. 3-12: Volumenstrom-Messgerät VSM-02

Die Messdüsen wurden in ein Kontrollboard zur Steuerung des aufgebracht Luftdruckes in der Injektionslanze integriert. Je nach Volumenstrom sind drei Düsen gesperrt und eine offen. Den Messdüsen ist eine Wartungseinheit, bestehend aus einem Filter (5 μ m) und Proportionaldruckregler, vorgeschaltet. Anschließend sind Feindruckregler und Feinmessmanometer positioniert, siehe Abb. 3-13.

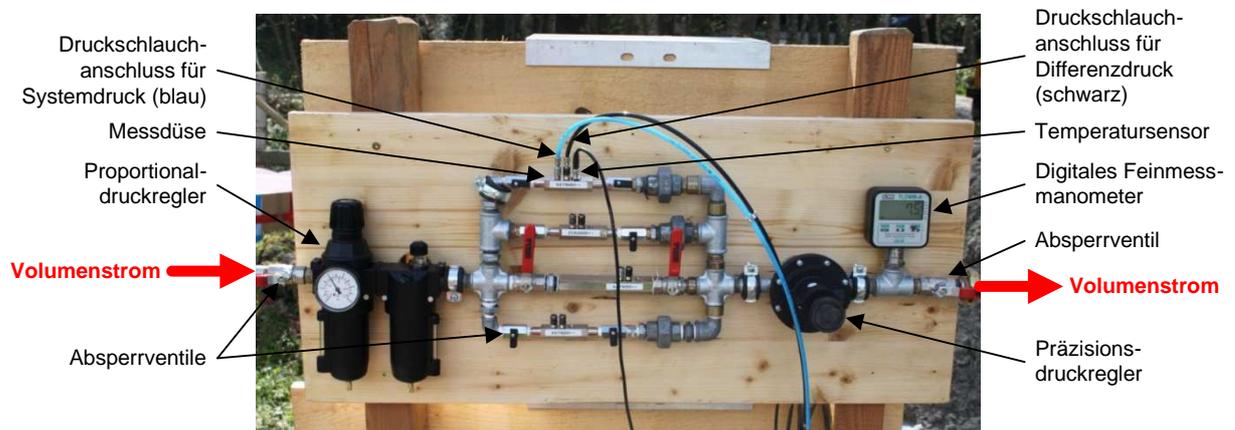


Abb. 3-13: Messeinrichtung des Luftvolumenstromes

3.2.5 Aufzeichnung der Messdaten

Die Datenspeicherung

- der **Bodenwasserspannung** (Tensiometer),
- des **volumetrischen Wassergehaltes** (TDR-Sonde) und
- der **Wassertemperatur** (TDR-Sonde)

erfolgt mit einem Datenlogger „DL2e“ der Firma Delta-T Devices Ltd. Die Messwerteauslesung bewerkstelligt eine vom Hersteller beigestellte Software. Die Stromversorgung wird mit einem Akkumulator sichergestellt. In Abb. 3-14 ist der in einem Messschrank eingebaute Datenlogger inklusive Stromversorgung und zugeführten Messkabeln zu sehen.



Abb. 3-14: Messschrank mit DL2e Datenlogger im Feld

Mithilfe eines Notebooks werden

- der **Luftvolumenstrom** und
- der **volumetrische Wassergehalt** (Enviro Scan)

direkt ausgelesen.

Von der Wetterstation der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG Salzburg) in Uttendorf wurden

- der **atmosphärischer Luftdruck** und
- die **Lufttemperatur**

bezogen. Die Aufzeichnung des atmosphärischen Luftdruckes während der Versuchsdauer dient zur Anpassung des aufgebrachtten Luftdruckes, im Besonderen für die inverse Modellierung der Feldversuche.

3.2.6 Einbau der Messgeräte

In der Abb. 3-15 ist der Einbau der Messgeräte im Feld ersichtlich. Die Bohrungen für die Tensiometer sowie der TDR-Sonden werden unter Zuhilfenahme eines Stechbohrers hergestellt (links oben). Eine Bohrschablone und eine Wasserwaage dienen zur präzisen Positionierung der Messsonden.

Aufgrund einer möglichen Messwertbeeinträchtigung ist auf einen vollen Kontakt zwischen den Messgeräten und dem umgebenden Untergrund besonders zu achten. Jene Hohlräume, die beim Einbau des Injektionsrohres entstehen sind aus denselben Beweggründen mit wenig durchlässigem Material zu verfüllen. Die Abb. 3-15, rechts oben, zeigt die rund um die Injektionslanze installierten Tensiometer und TDR-Sonden. Auf der rechten Seite des Aushubes ist die Enviro Modulare Bodenfeuchtesonde zu sehen.

Um etwaige Hebungen zu minimieren und Feinkornausspülungen zu vermeiden, wird nach dem fertigen Einbau der Messtechnik und des Filterrohres eine Kiesschicht aufgebracht. Zusätzlich wurden Höhenmesspunkte radial in drei Richtungen und Abständen installiert (Abb. 3-15, links unten). Die Höhenmessung erfolgte während der Fortdauer des Feldversuches mit einem Nivelliergerät.

Im Verlauf des Luftinjektionsversuches sind Plausibilitätskontrollen der erhaltenen Messwerte unumgänglich. Die Messdaten werden daher zusätzlich zur Speicherung bei der Versuchsausführung laufend kontrolliert (Abb. 3-15, rechts unten).



Abb. 3-15: Einbau der Messgeräte und Versuchsaufbau

3.2.7 Genauigkeit der Messinstrumentierung

Die Tab. 3-3 gibt einen Überblick über die verwendete Messinstrumentierung. Der Messbereich, die zugehörige Genauigkeit und die Lieferfirma sind angeführt. Die Genauigkeiten aller Instrumente, bis auf jene des Feinmessmanometers, beziehen sich auf den Messwert. Hier ist die Messung mit einer möglichen Abweichung von $\pm 0,1 \%$ vom Endwert behaftet.

Messgröße	Messgerät	Anzahl	Messbereich	Genauigkeit vom Messwert	Hersteller
Luftvolumenstrom	Volumenstrommessgerät VSM-02	1	0,9 l/min (1 mm Düse) bis 3125 l/min (1/2" Düse)	$\pm 2,5 \%$	Optiserve GbR Heilbronn
Atmosphärischer Luftdruck	Digitales Barometer	1	0 bis 1030 mbar	keine Angabe	ZAMG
Lufttemperatur	Thermometer	1	- 50 °C bis + 140 °C	keine Angabe	ZAMG
Sättigung	TDR-Sonden	4	0 bis 100 vol%	bei 0-40 vol% ... $\pm 1 \%$ bei 40-70 vol% ... $\pm 2 \%$	UMS GmbH München
Wassertemperatur	TDR-Sonden	4	- 15 °C bis 50 °C	$\pm 0,2 \text{ °C}$	UMS GmbH München
Bodenwasser-spannung	Tensiometer	4	-850 hPa bis 0 hPa	$\pm 5 \text{ hPa}$	UMS GmbH München
Bodenfeuchte	Enviro Modulare Bodenfeuchteprofilsonde	1	0 bis 100 vol%	$\pm 2,5 \%$	UMS GmbH München
Luftdruck	Feinmessmanometer	1	0 kPa bis 100 kPa	$\pm 0,1 \%$ vom Endwert	Druck & Temperatur Leitenberger GmbH

Tab. 3-3: Genauigkeit der Messinstrumentierung

3.3 Ergebnisse der Feldversuche

Im folgenden Abschnitt sind die Ergebnisse der drei durchgeführten Luftinjektionsfeldversuche angeführt. Die Ergebnisse gliedern sich in Diagramme für den gemessenen Luftvolumenstrom, der Bodenwasserspannung, der Wassertemperatur und der aus dem Wassergehalt ermittelten Luftsättigung des durchströmten Bodens.

An der Abszisse ist die Versuchsdauer aufgetragen und an der rechten Ordinate die aufgebrauchte Druckstufe. Die linke Ordinate beinhaltet dann eine der o.a. gemessenen Größen.

3.3.1 Feldversuch 1

Die Abb. 3-16 zeigt den gemessenen Luftvolumenstrom beim Feldversuch 1. Bei 5 kPa kann noch keine Strömung festgestellt werden. Bei einem Überdruck von 7,5 kPa wächst der Volumenstrom nichtlinear an und nimmt nach etwa einer Stunde einen annähernd stationären Zustand ein. Der Überdruck wurde stufenweise bis 50 kPa angehoben, wobei sich der stationäre Zustand mit steigendem Druck immer rascher einstellt. Ab 25 kPa ergibt sich unmittelbar nach der Drucksteigerung ein gleichbleibender Luftvolumenstrom, der bei 50 kPa eine maximale Größenordnung von 2045 l/min erreicht.

Die Schwankungen im Luftvolumenstrom am Beginn der Druckstufen 15 kPa und 37,5 kPa resultieren aus dem auftretenden Kondenswasser im Druckluftschlauch. Hierbei wurde der Schlauch jeweils vom Injektionsrohr abgetrennt, wodurch die Druckluftversorgung unterbrochen war, und das anstehende Tauwasser entleert.

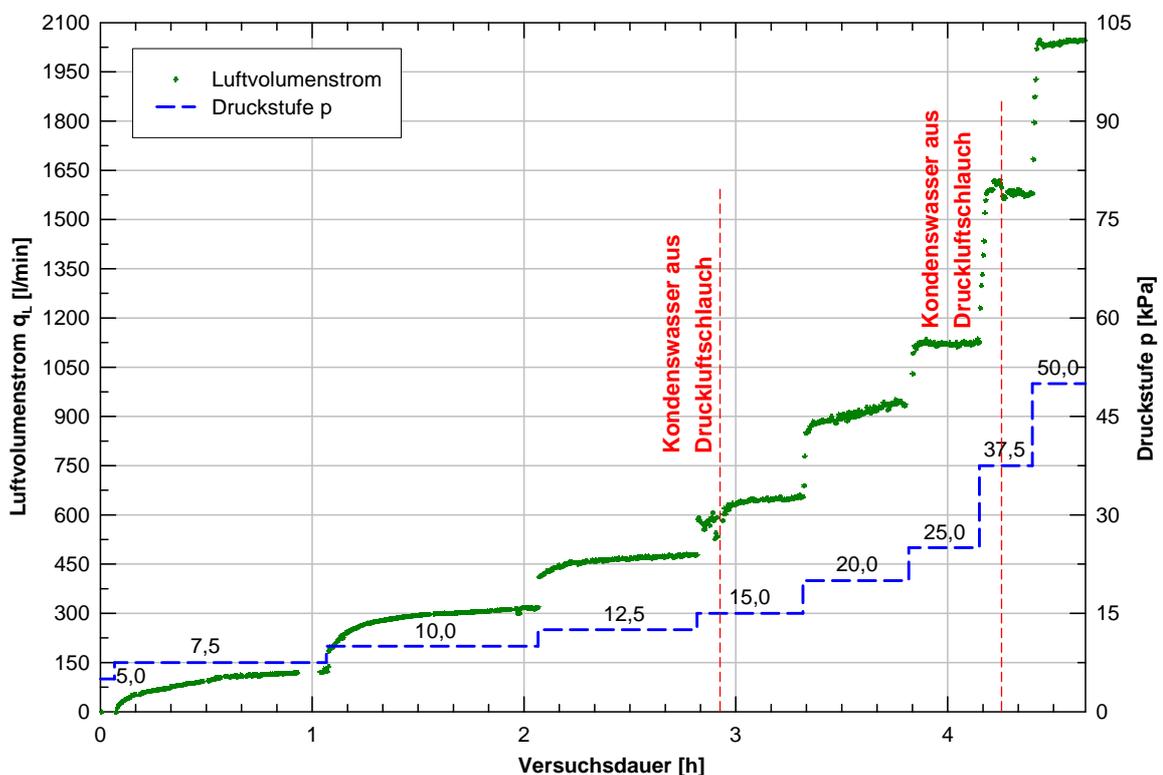


Abb. 3-16: Luftvolumenstrom beim Feldversuch 1

Der Volumenstrom nimmt bis 15 kPa proportional zur Druckstufe annähernd linear zu. Darüber hinaus verringert sich das Verhältnis mit fortlaufendem Druckanstieg. Die Ursache hierfür kann eine Lieferkapazität des Versuchssystems oder ein Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung mit sich bringen.

Die auftretenden Bodenwasserspannungen sind in Abb. 3-17 dargestellt. Die zwei Tensio-
metermessungen wurden in je 28 und 43 cm Entfernung von der Achse der Injektionslanze
und einer Tiefe von 47 cm und 43 cm unterhalb des Grundwasserspiegels durchgeführt. Am
Beginn jeder Druckänderung wird die Wasserspannung auf ein höheres Niveau gehoben. Mit
fortlaufender konstanter Druckstufe verringert sich der Wasserdruck aufgrund zunehmender
Luftsättigung des Bodens wieder. Bei 5 kPa Überdruck konnte noch kein Anstieg am Anfang
festgestellt werden, bei 50 kPa Injektionsdruck wird ein maximaler Wert von 7,75 kPa erreicht.
Die Wasserspannung hat den atmosphärischen Luftdruck als Ausgangsbasis.

Die Unregelmäßigkeit am Beginn der Druckstufe 15 kPa ist wiederum durch die Entleerung
des Kondenswassers begründet.

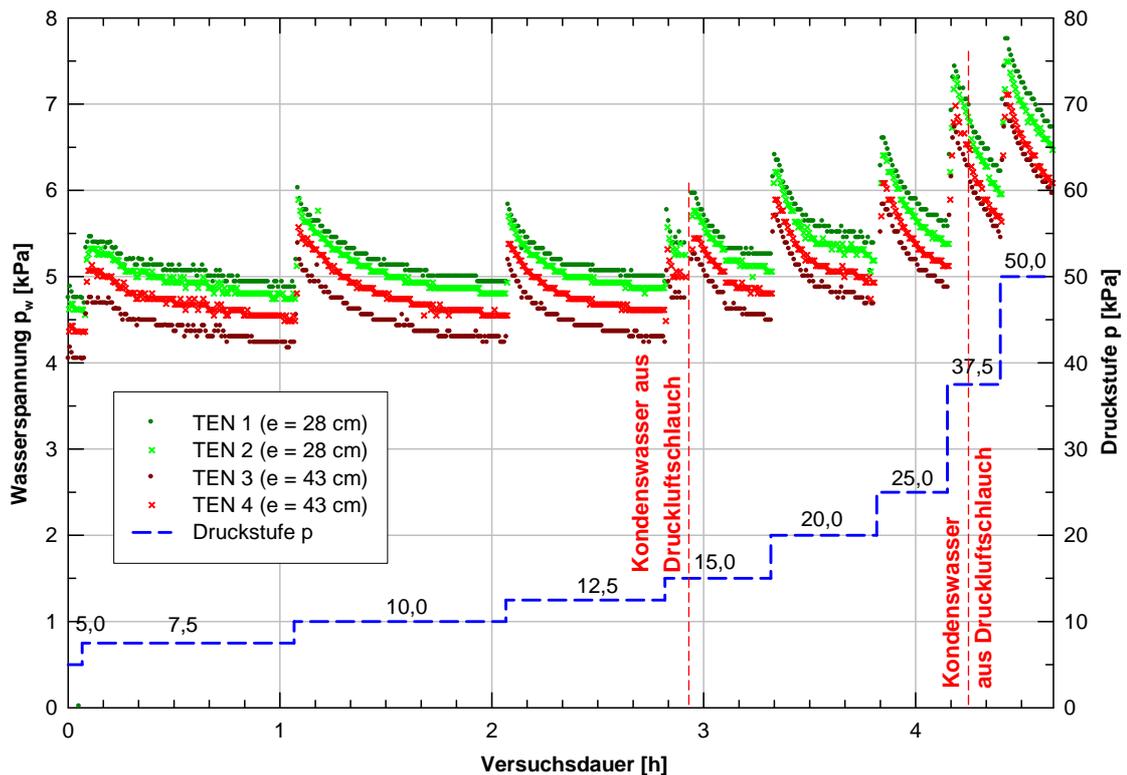


Abb. 3-17: Wasserspannung beim Feldversuch 1

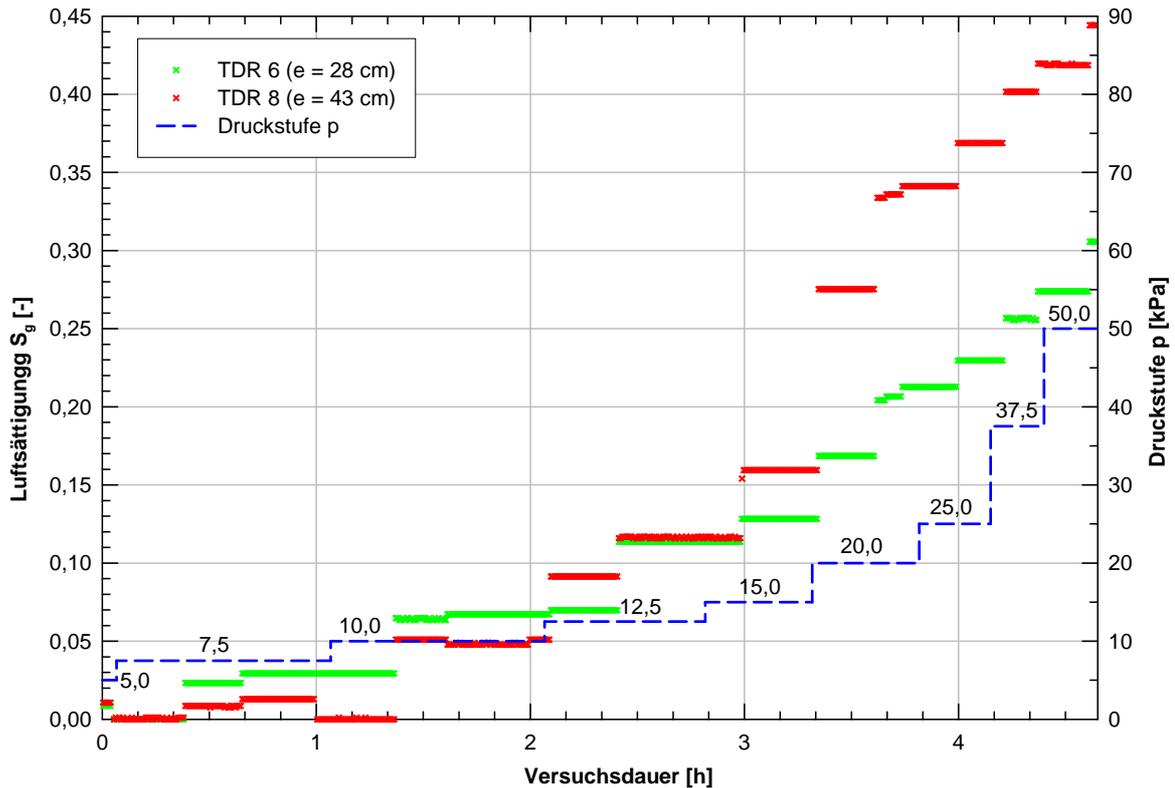


Abb. 3-18: Luftsättigung beim Feldversuch 1

Mit Hilfe der TDR-Sonden wurde der volumetrische Wassergehalt während des Versuches ermittelt (siehe Abb. 3-18). Die Luftsättigung ergibt sich dann aus folgendem Zusammenhang:

$$S_g = 1 - S_w = 1 - \frac{\theta}{n} \quad (3-4)$$

- S_g Luftsättigung im Porenraum [-]
- θ volumetrischer Wassergehalt [-]
- n Porenanteil des Bodens [-]

Das o.a. Diagramm deutet auf eine fehlerhafte Messung hin, oder, dass die angewandten Sonden hier die auftretende Problemstellung nicht wunschgemäß erfassen können. Außerdem erwies sich ein fachgerechter Einbau der Messsonden bei diesem Boden aufgrund der geringen Standfestigkeit der Bohrlochwandung unterhalb des GWSP als problematisch. Im Vergleich zum inneren Radius tritt erstmals ab 12,5 kPa eine höhere Luftsättigung am äußeren Radius auf. Hinsichtlich bekannter Strömungsvorgänge im Boden kann sich dieser Zustand nicht ausbilden. Ein weiterer Hinweis für diese Annahme ist, dass sich aus der Interpretation der gleichmäßig verlaufenden Bodenwasserspannung (siehe Abb. 3-17) ein radial symmetrischer Strömungszustand ausgebildet hat.

Der Temperatursensor in der TDR-Sonde misst zudem die Wassertemperatur, welche in Abb. 3-19 angeführt ist. Die mittlere Temperatur stellt sich bei etwa 13,5 °C ein. Gegen Versuchsende sinkt diese dann auf 12 °C, was mit der t ageszeitlichen Schwankung der Umgebungstemperatur zusammenhängen kann.

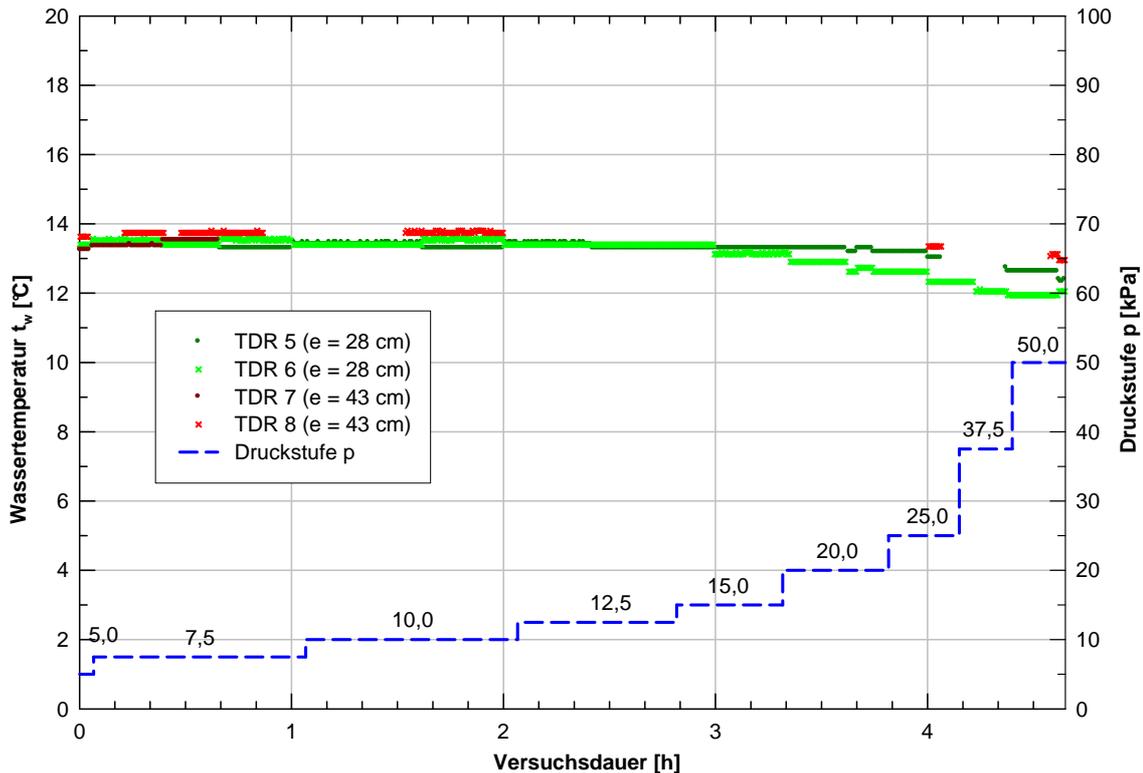


Abb. 3-19: Wassertemperatur beim Feldversuch 1

Beim Feldversuch 1 erfolgte eine regelmäßige Kontrolle der Höhenmesspunkte, jedoch konnten keine Hebungen festgestellt werden.

3.3.2 Feldversuch 2

Beim zweiten Feldversuch bildet sich ein wesentlich geringerer Luftvolumenstrom aus (siehe Abb. 3-20). Die erste Druckstufe beginnt bei 7,5 kPa. Anfangs steigt der Luftvolumenstrom nichtlinear an und nimmt gegen Ende der jeweiligen Druckstufe einen annähernd stationären Zustand ein. Der Überdruck wurde stufenweise bis 50 kPa angehoben, wobei sich der stationäre Zustand mit steigendem Druck immer rascher einstellt. Bei 50 kPa ergibt sich gleich nach der Drucksteigerung ein mittlerer Luftvolumenstrom von 1125 l/min.

Die Unregelmäßigkeiten im Luftvolumenstrom am Beginn der Druckstufen 35 kPa, 42,5 kPa und 50 kPa resultieren aus dem auftretenden Kondenswasser im Druckluftschlauch. Hierbei wurde der Schlauch jeweils vom Injektionsrohr abgetrennt, wodurch die Druckluftversorgung unterbrochen war, und das anstehende Tauwasser entleert.

Die auftretenden Bodenwasserspannungen sind in Abb. 3-21 dargestellt. Die zwei Tensiometermessungen wurden in je 20 und 35 cm Entfernung von der Achse der Injektionslanze und einer Tiefe von 13 cm und 16 cm unterhalb des Grundwasserspiegels durchgeführt. Beginnend bei 35 kPa deuten die Abweichungen der gegenüberliegenden Tensiometer auf eine Erweiterung des Porenraumes sowie eine Ausbildung eines nicht radial symmetrischen Strömungszustandes hin.

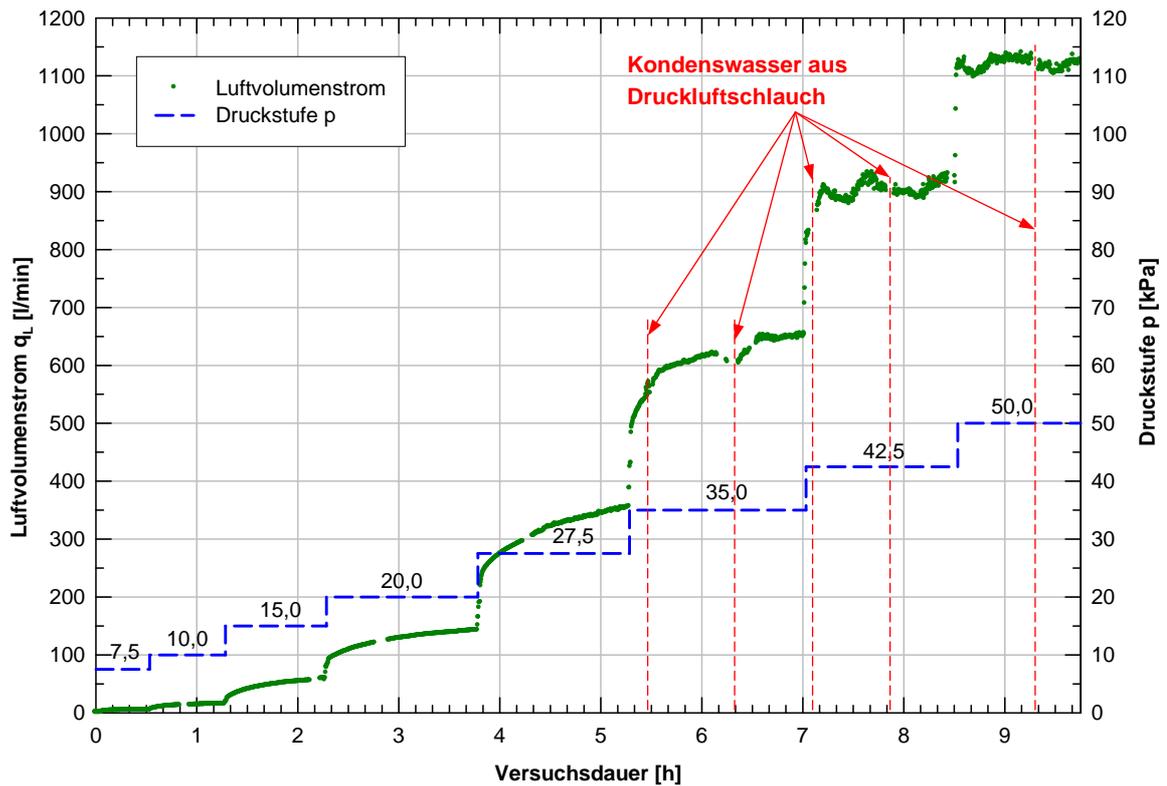


Abb. 3-20: Luftvolumenstrom beim Feldversuch 2

Die Unregelmäßigkeiten bei den Bodenwasserspannungen ergeben sich aus derselben Ursache wie beim Luftvolumenstrom. Am inneren Radius ($e = 20$ cm) erstrecken sich die Spannungen von 2,1 kPa bei der Druckstufe 7,5 kPa bis zu 13,2 kPa bei 50 kPa Überdruck.

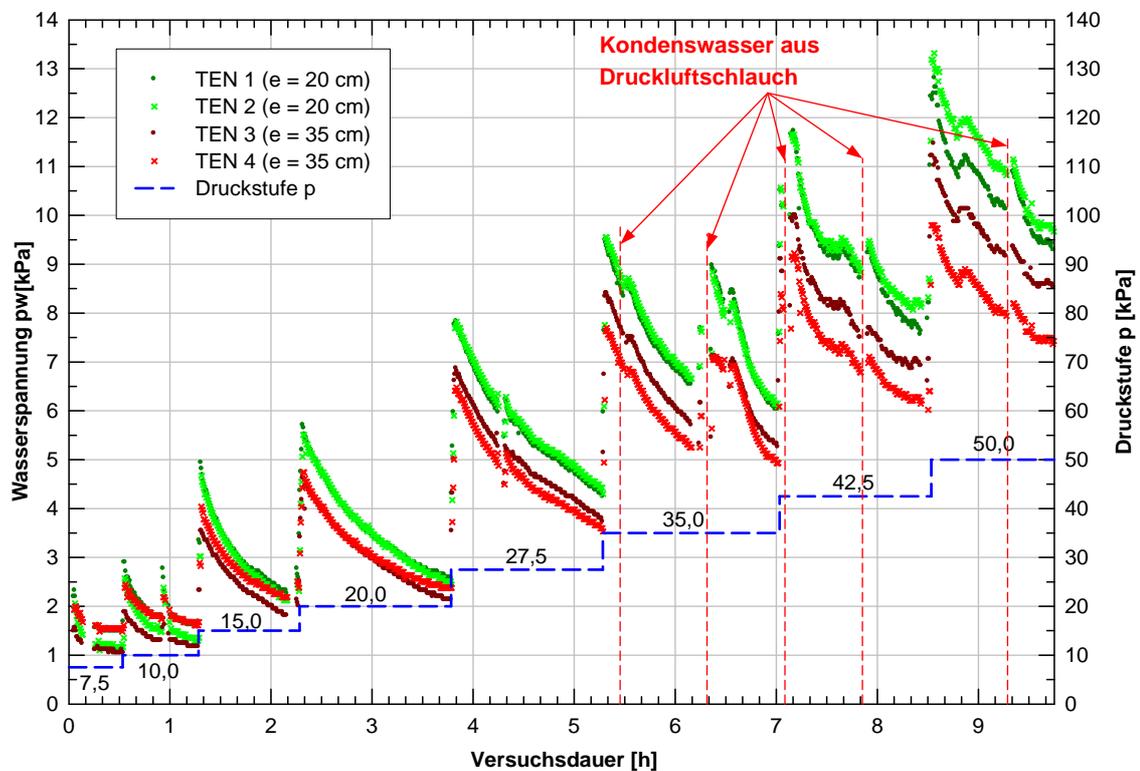


Abb. 3-21: Wasserspannung beim Feldversuch 2

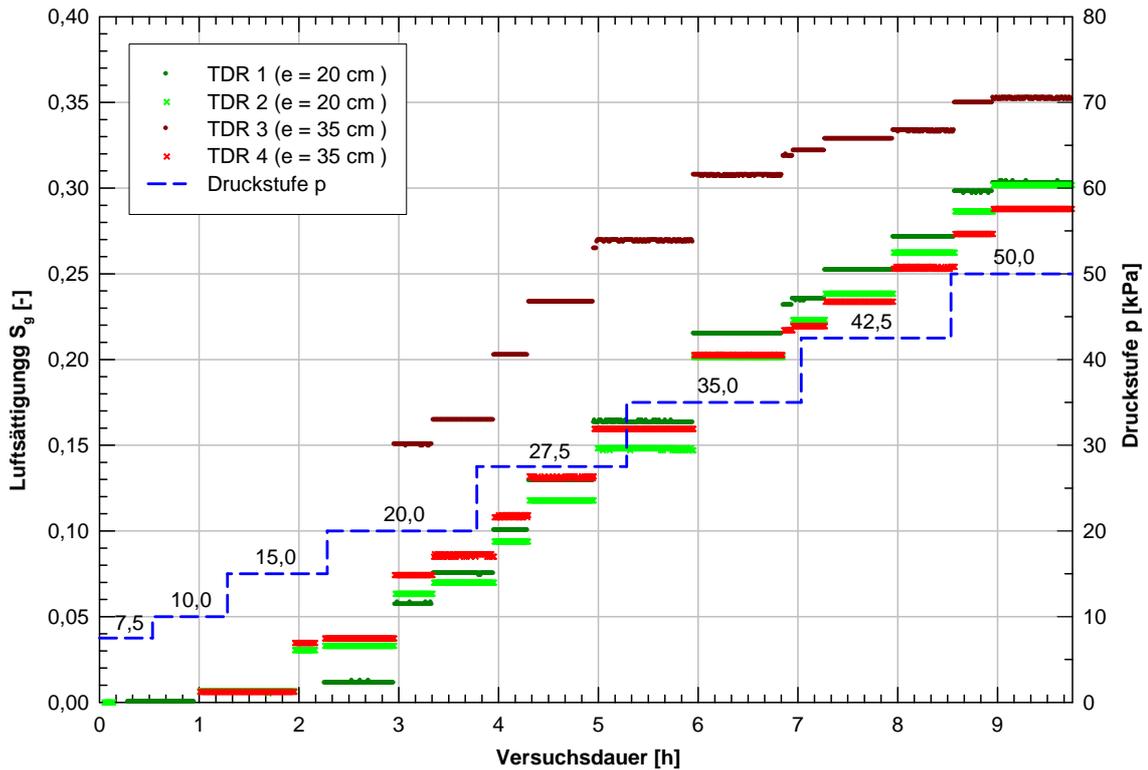


Abb. 3-22: Luftsättigung beim Feldversuch 2

Die Luftsättigungen erreichen Werte von 0,30 (= 30 % des Porenraumes) bei einer Druckstufe von 50 kPa (siehe Abb. 3-22). Die Messwerte der TDR-Sonde 3 sind wahrscheinlich mit einem Fehler behaftet, da dieses Messinstrument am äußeren Radius einen höheren volumetrischen Wassergehalt misst. Die restlichen drei TDR-Sonden sind relativ identisch und zeigen eine etwa linear ansteigende Luftsättigung mit Fortdauer des Versuches.

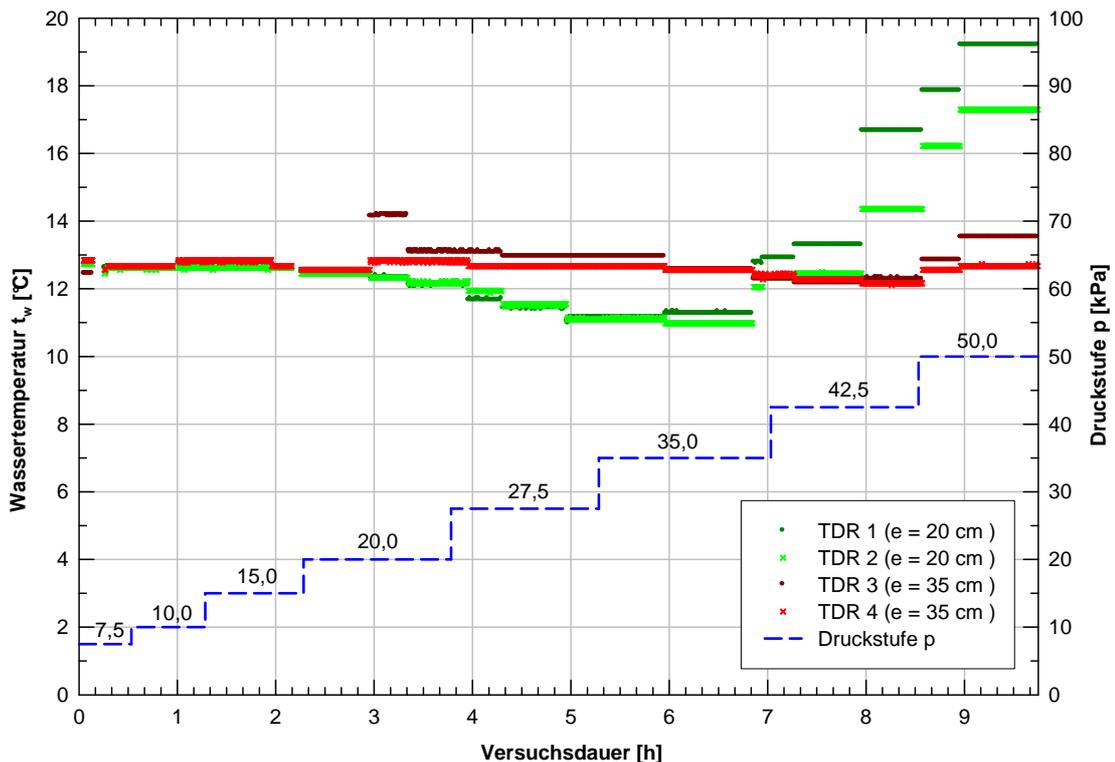


Abb. 3-23: Wassertemperatur beim Feldversuch 2

Die mittlere Wassertemperatur beträgt anfangs etwa 12,7 °C ein (siehe Abb. 3-24). Gegen Versuchsende erhöht sich beim inneren Radius diese dann auf 19,2 °C, was mit dem Eintrag von wärmerer Druckluft aufgrund des erhitzten Kompressors zusammenhängen wird.

Beim Feldversuch 2 wurde keine Höhenmessung durchgeführt.

3.3.3 Feldversuch 3

Beim dritten Feldversuch konnte anfänglich aufgrund der erwartungsgemäß geringen Luftdurchlässigkeit und hohen Kapillarspannungen kein Luftvolumenstrom gemessen werden (siehe Abb. 3-24). Erst ab 10 kPa Überdruck tritt ein geringer Luftstrom von 0,8 l/min auf. Dieser vergrößert sich mit steigender Druckstufe auf 23,3 l/min bei 20 kPa Injektionsdruck. Am Ende der Druckstufe 20 kPa wurde eine Geräusentwicklung im Kiesbett sowie eine Hebung von 5 cm des Mutterbodens seitlich des Aushubes wahrgenommen (siehe Abb. 3-25, rechts). Bei der weiteren Steigerung des Überdruckes auf 25 kPa erhöhte sich der Luftvolumenstrom schlagartig auf 330 l/min.

Am Beginn der letzten Druckstufe (50 kPa) ist schlagartig Wasserdampf aus dem Kiesbett getreten. Dem folgte eine weitere Hebung des Mutterbodens seitlich des Aushubes in ca. 2,25 m Abstand von der Injektionslanze. Diese Hebung von 20 cm bildete sich auf einer Fläche von 2 x 2 m aus (siehe Abb. 3-25, links).

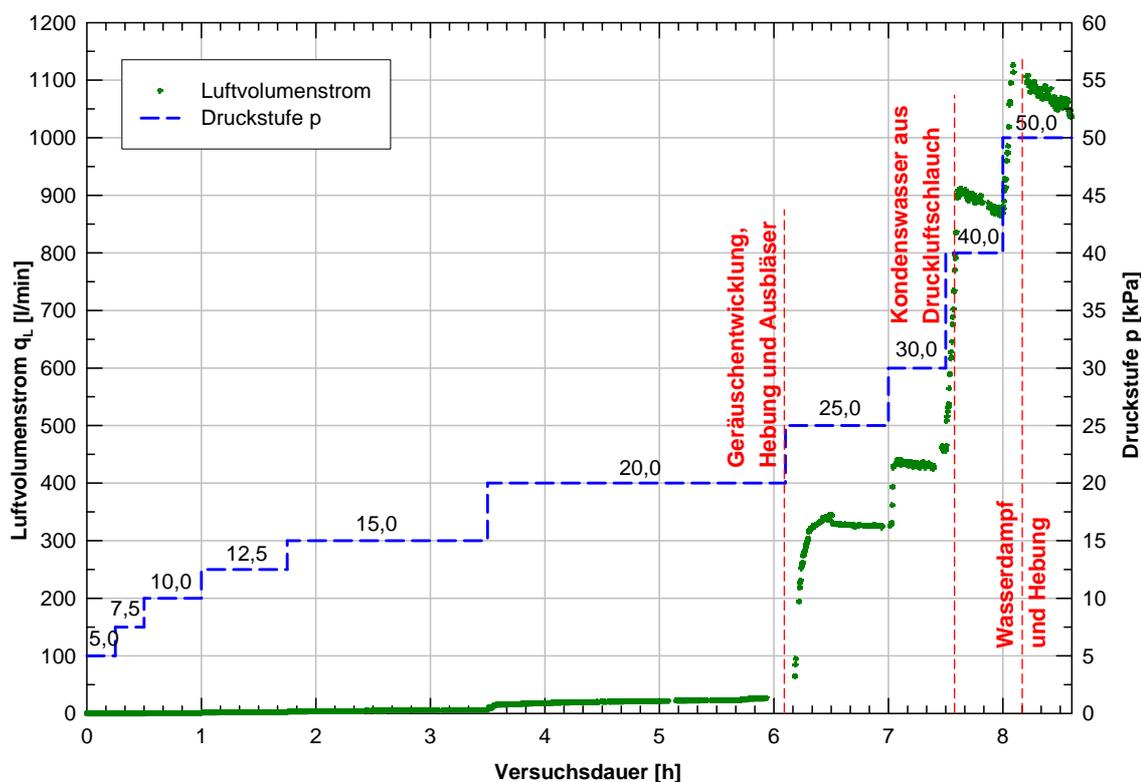


Abb. 3-24: Luftvolumenstrom (Druckstufe 5 kPa – 50 kPa) beim Feldversuch 3



Abb. 3-25: Hebungen beim Feldversuch 3

Wie bereits in Punkt 3.2.6 angeführt, wurde mit Fortdauer des Versuches ein Höhennivellament vorgenommen. Die Ergebnisse in Abb. 3-26 dargestellt. Bis 20 kPa Injektionsdruck treten praktisch keine Hebungen auf. Auffallend ist die asymmetrische Ausbildung der Hebungen. Die Messpunkte 7, 8 und 9 erfahren deutlich größere Hebungen und diese Messpunkte zeigen genau in Richtung der zweiten Blase. Dabei erfährt der Messpunkt 8 nach der Druckstufe 50 kPa die größte Hebung von 1,7 cm.

Messpunkt	20 kPa [cm]	25 kPa [cm]	40 kPa [cm]	50 kPa [cm]
1	0,2	0,4	0,8	0,9
2	0,4	0,7	1,2	1,4
3	0,3	0,7	1,4	1,4
4	0	0,35	0,6	0,9
5	0	0,7	1,1	1,1
6	0	0,7	1,2	1,2
7	0,05	0,85	1,4	1,45
8	0,1	1,0	1,6	1,7
9	0,1	0,8	1,5	1,6

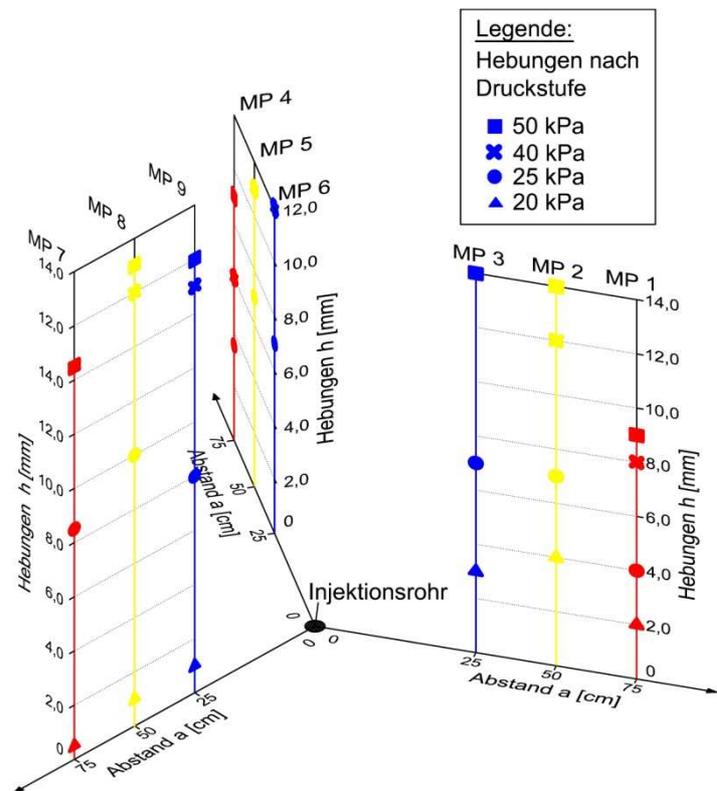
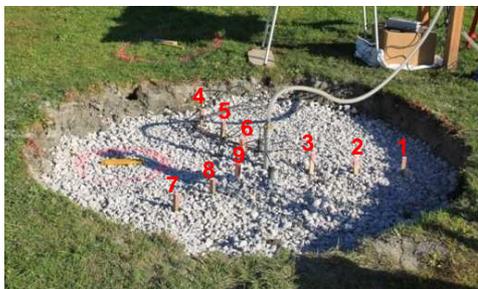


Abb. 3-26: Gemessene Hebungen im Kiesbett beim Feldversuch 3

Die Wasserspannungen bilden sich am äußeren sowie inneren Radius größenordnungsmäßig in ähnlicher Form aus (siehe Abb. 3-27). Am inneren Radius ($e = 17$ cm) erstrecken sich die Spannungen von 3,1 kPa bei der Druckstufe 7,5 kPa bis zu 12,1 kPa bei 50 kPa Überdruck. Auffallend ist dabei der proportional größere Anstieg von 15 kPa ($p_w = 4,9$ kPa) auf 20 kPa ($p_w = 9,6$ kPa) im Vergleich zu den vorhergehenden Drucksteigerungen. Welcher hier möglicherweise einem Druckstau entspricht und später in dem aufgetretenen Ausbläser resultiert. Nach dem Ausbläser sind die Wasserspannungen am äußeren sowie inneren Radius ebenfalls relativ symmetrisch.

Die Unregelmäßigkeiten bei 25 kPa sind durch den Ausbläser sowie vor 40 kPa durch die Entleerung des Kondenswassers bedingt.

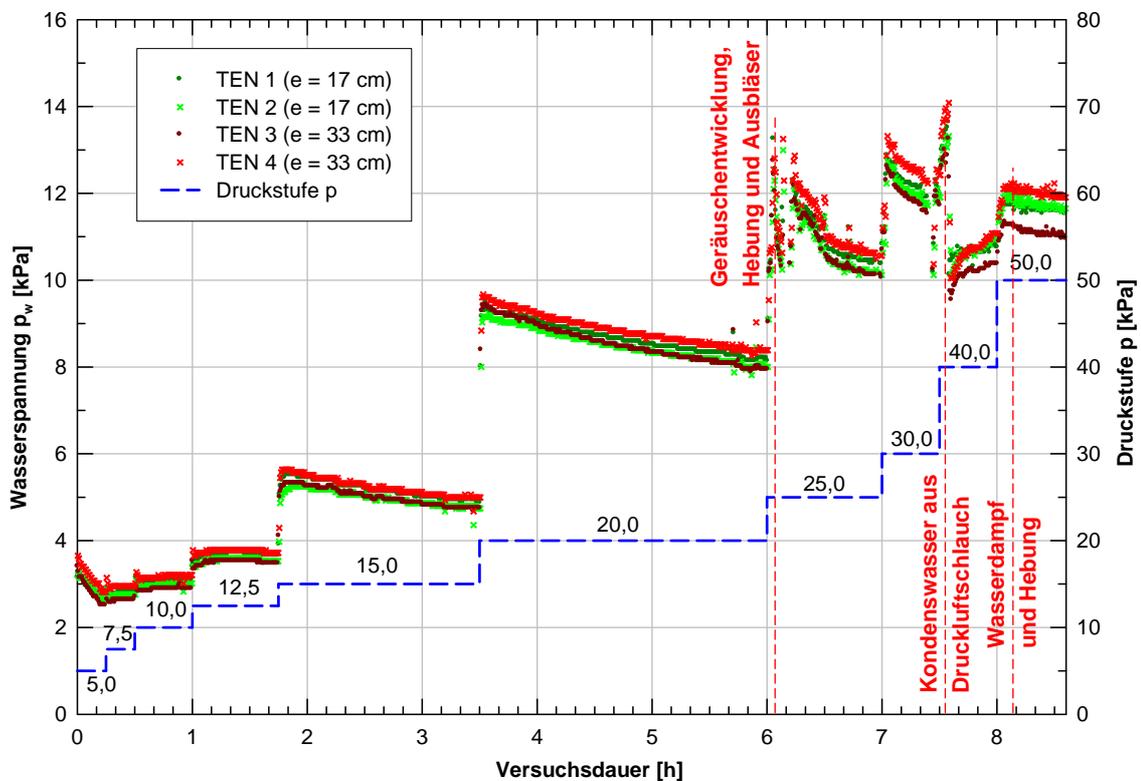


Abb. 3-27: Wasserspannung beim Feldversuch 3

Die Abb. 3-28 zeigt die ermittelte Luftsättigung im Versuchsboden 3. Die Darstellung erfolgt nur für eine TDR-Sonde im inneren Radius, da die restlichen Sonden fehlerhafte bzw. keine Messergebnisse lieferten. Aufgrund des Ausbläserts bei 25 kPa kann keine weitere Angabe hinsichtlich der Plausibilität gemacht werden.

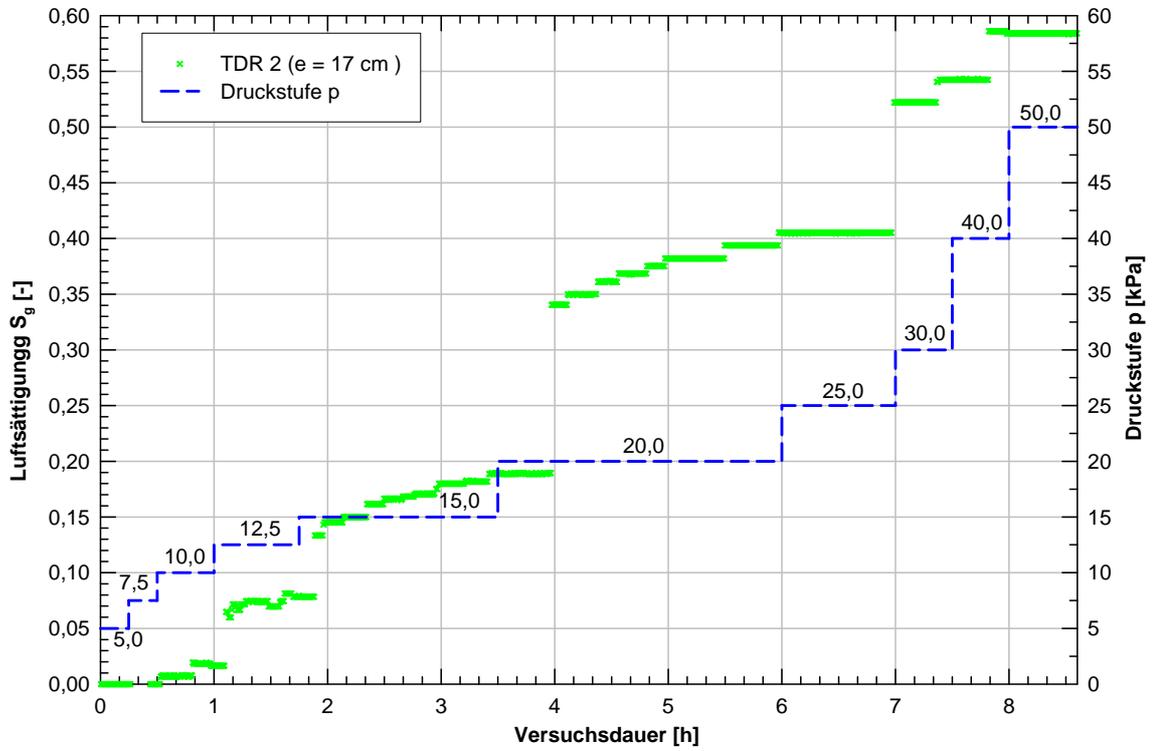


Abb. 3-28: Luftsättigung beim Feldversuch 3

Die mittlere Wassertemperatur beim dritten Feldversuch beträgt 13,5 kPa (Abb. 3-29). Gegen Versuchsende erhöht sich diese auf 16 °C. Dies ist aufgrund der wärmeren eingetragenen Druckluft.

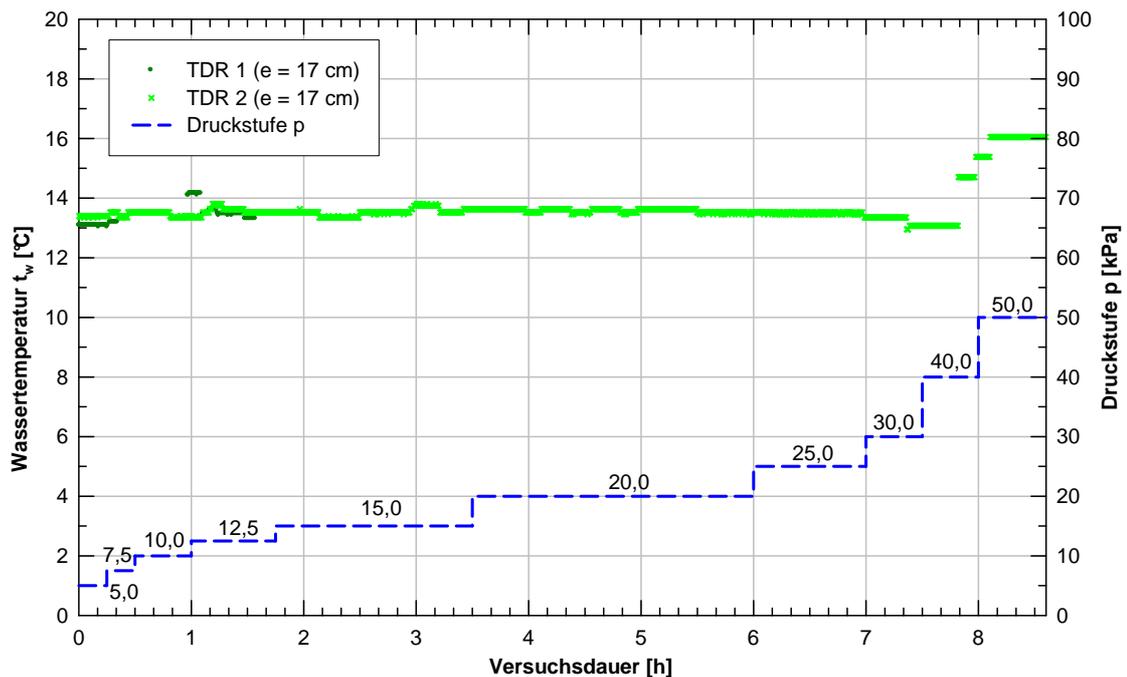


Abb. 3-29: Wassertemperatur beim Feldversuch 3

3.3.4 Vergleich der Luftvolumenströme

In diesem Punkt erfolgt ein Vergleich der gemessenen Luftvolumenströme aller drei Feldversuche (Abb. 3-30). In der Grafik ist der Volumenstrom am Ende der jeweiligen Druckstufe aufgetragen. Beim ersten Feldversuch nimmt der Luftvolumenstrom (grün) zwischen 5 kPa und 20 kPa Injektionsdruck annähernd linear zu, jedoch steiler als im Bereich von 20 kPa bis 50 kPa.

Der Verlauf des Luftvolumenstromes beim zweiten Feldversuch (blau) nimmt bis zu der Druckstufe 27,5 kPa nichtlinear zu. Bei weiterer Drucksteigerung verläuft der Volumenstrom parallel zu jenem aus dem ersten Versuch.

Auffallend ist der rapide Anstieg beim Feldversuch 3 (rot) und der darauffolgende ähnliche Luftvolumenstrom im Vergleich zum Feldversuch 2. Der Luftvolumenstrom vom Feldversuch 2 und 3 nehmen ab 25 kPa Injektionsdruck in etwa dieselbe Größenordnung ein. Die vermuteten Ursachen sind der Darstellung zu entnehmen.

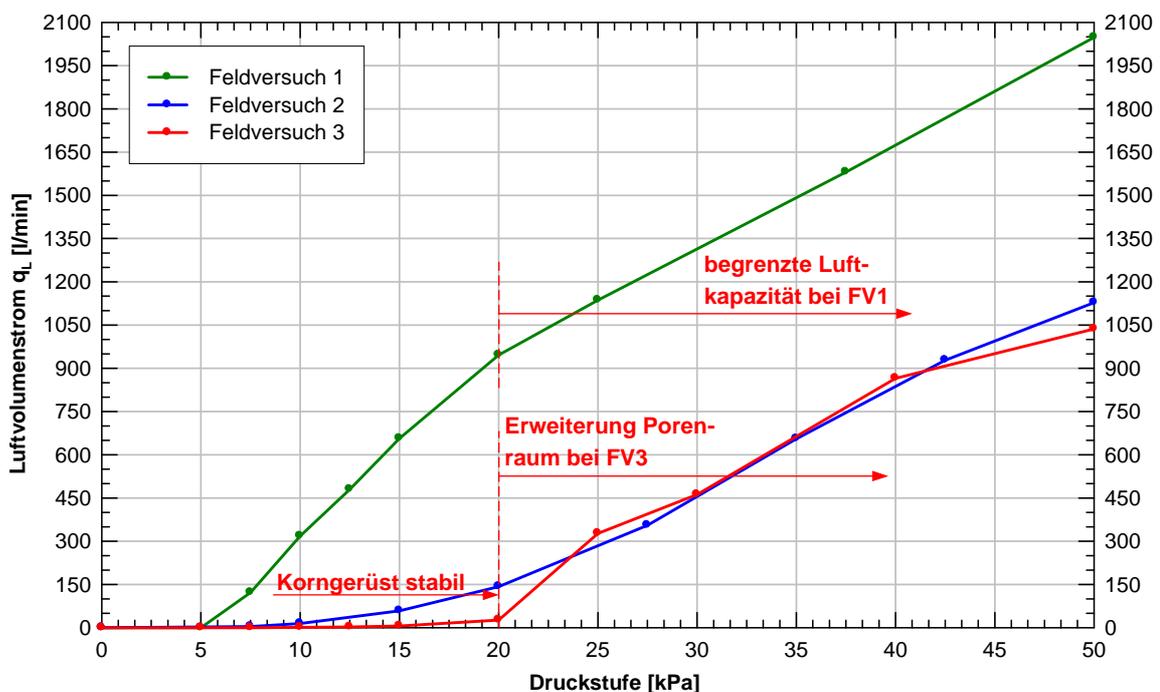


Abb. 3-30: Vergleich der Luftvolumenströme

4 Inverse Modellierung und Interpretation der Feldversuche

Das folgende Kapitel beginnt mit einem Einblick in die verwendeten Berechnungsverfahren. Um eine bessere Daten Interpretation sowie Definition der Startparameter zu ermöglichen, wurden zusätzlich ergänzende Laborversuche durchgeführt, die anschließend beschrieben werden. Abschließend folgen die inverse Modellierung bzw. die Interpretation der Feldversuche.

4.1 Berechnungsverfahren

Die inverse Parameterbestimmung beruht im Wesentlichen auf zwei Berechnungsprogrammen: einerseits FT2009, welches die durchgeführten Feldversuche numerisch simuliert, und andererseits UCODE_2005 für die Parameteroptimierung. UCODE_2005 bezieht sich für den Optimierungsprozess auf die Simulationsergebnisse von dem FT2009 (siehe 4.1.4). Als Vorbereitung für die inverse Modellierung hat eine Diskretisierung der Problemstellung als Grundlage für die numerische Berechnung zu erfolgen.

4.1.1 Numerisches Grundmodell

Der Präprozessor PetraSim (RockWare Inc., Colorado) dient zur Erstellung des axialsymmetrischen Grundmodelles für den Feldversuch (siehe Abb. 4-1). Dabei sollen die Geometrie und Bodenverhältnisse möglichst realitätsnah abgebildet werden. Die Größe des numerischen Modells beträgt 3 x 3 m. Die Zuweisung der Modelleigenschaften erfolgt hierbei über die einzelnen Elemente. Sogenannte TUNEL-Elemente übernehmen die Zuordnung eines stufenweise konstant wirkenden Luftüberdruckes im Bereich des Injektionsfilters. Die Ausgabe des Input1-Files stellt den Abschluss der Modellbildung dar und bildet die Grundlage für das Programm FT2009. Eine nähere Beschreibung zur Diskretisierung des Grundmodelles ist Steger (2010) zu entnehmen.

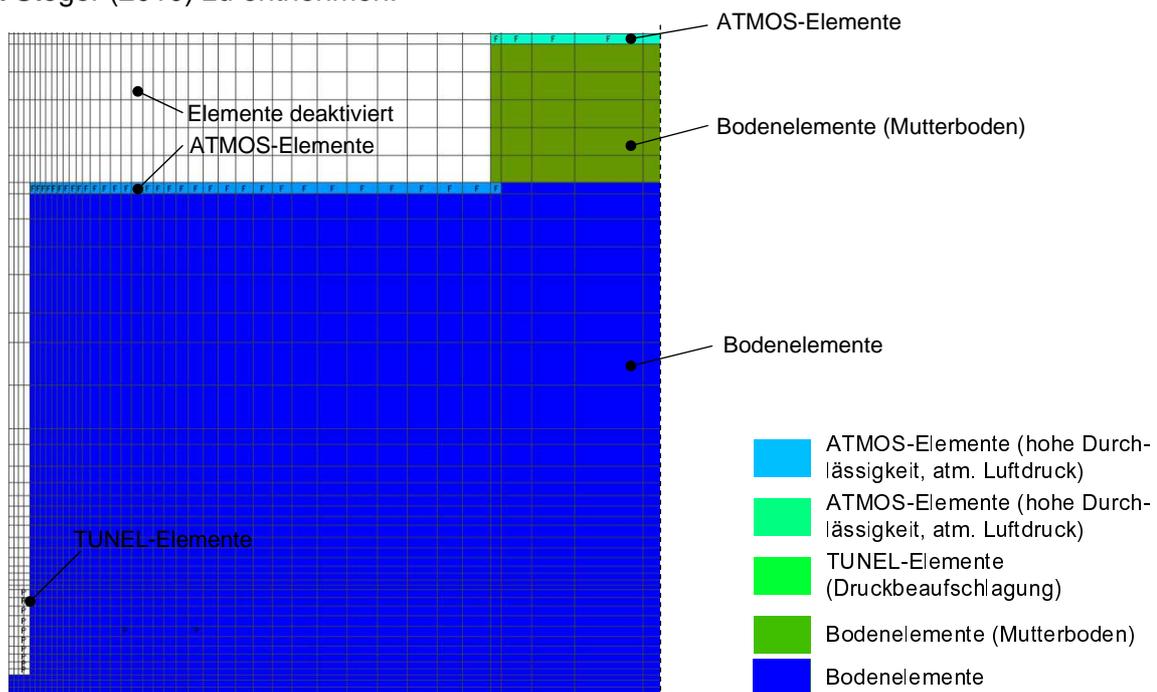


Abb. 4-1: Charakteristischer Querschnitt des numerischen Grundmodelles (Ausschnitt)

4.1.2 FT2009

Das Programm **FT2009** (Field Test 2009) ermöglicht die Simulation einer Mehrphasenströmung im Boden. Die Basis dafür bildet das Softwarepaket TOUGH2 (Transportation Of Unsaturated Groundwater and Heat, Pruess et al. 1999), welches für die Mehrphasenströmungssimulation des o.a. Feldversuches angepasst wurde. Es ermöglicht u.a. die Aufbringung von zeitlich veränderlichen Randbedingungen, wie sie z.B. für Luftinjektion benötigt wird. Das Programm basiert auf der Finite Differenzen Methode. Eine detailliertere Beschreibung ist Steger (2010) entnehmen.

Nach dem Programmstart wird die Subroutine „Eingabe“ aufgerufen und es erfolgt das Einlesen des Input1-Files. Die zentrale Steuerung der Simulation des Luftinjektionsversuches gibt der EINGABE.txt-File vor. In diesem sind die Größenordnung des jeweiligen aufgebrachtten Überdruckes des simulierten Filters, die Dauer und Anzahl der einzelnen Druckstufen gespeichert. Neben reiner Luftinjektion bietet das Programm in Kombination auch die Simulation von Wasserinfiltration an. Im Falle einer reinen Luftinjektion muss die Dauer der ersten Injektionsphase gleich Null gesetzt werden und wirkt somit als „Pseudo-Wasserinfiltrationsphase“.

Nach der Simulation der jeweiligen Druckstufe erstellt die Subroutine „InputNeu“ einen neuen Input-File mit veränderten Rand- (Injektionsdruck) und Anfangsbedingungen (Druck und Sättigung im Boden). Der Kreislauf Mehrphasenströmungssimulation – SR InputNeu mit eingeschobener OUTPUT-Ausgabe wird je nach Anzahl der Druckstufen n-mal durchlaufen. Nach dem letzten Durchgang wird die Subroutine „Luftvolstrom“ aktiviert. Die aufsummierten Luftströmungsmengen werden im COFT-File gesichert, und zusätzlich in einen EXCEL-File geschrieben. In einer SAVE-Datei wird nach jeder Druckstufe die Sättigungs- und Druckverteilung im Modell gespeichert. In Abb. 4-2 ist ein vereinfachtes Flussdiagramm von FT 2009 und die Kombination mit UCODE_2005 dargestellt.

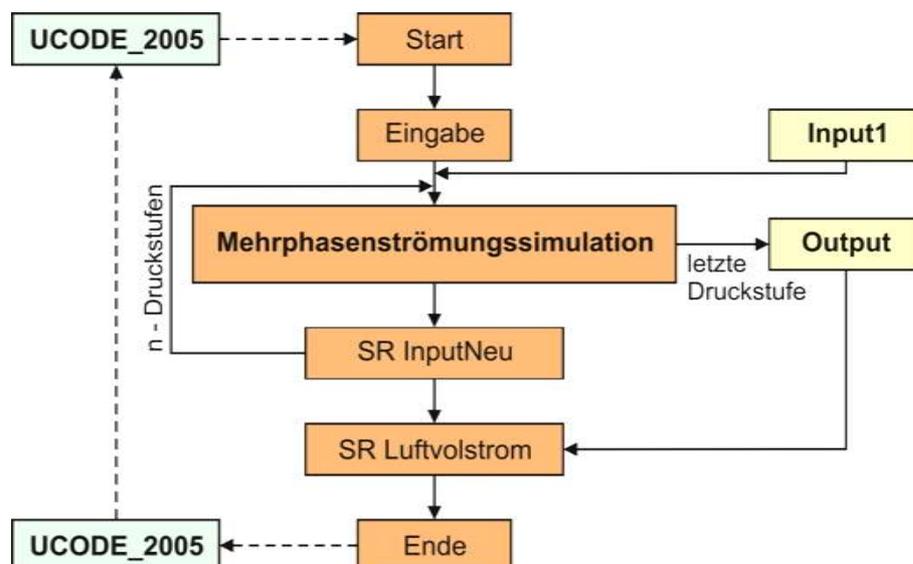


Abb. 4-2: Vereinfachtes Flussdiagramm von FT2009

Das Programm FT2009 beinhaltet zur Berechnung der teilgesättigten Wasser- und Luftdurchlässigkeit mehrere Modellansätze. Bei der numerischen Simulation der Feldversuche wird für die Wasserdurchlässigkeit nur die relative Durchlässigkeits-Sättigungs-Funktion nach Van Genuchten-Mualem (1980,1976), (VGM), verwendet:

$$k_{r,w} = S_e^\tau \cdot \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (4-1)$$

$k_{r,w}$ relative Wasserdurchlässigkeit

$k_{r,l}$ relative Luftdurchlässigkeit

S_e effektive Sättigung nach VGM

$$S_e = \frac{(S_w - S_{w,r})}{(1 - S_{w,r})}$$

τ Tortositätsfaktor

m Kenngröße für Porengrößenverteilung

S_w Wassersättigung

$S_{w,r}$ residualer Sättigungsgrad für Wasser

Für die relative Durchlässigkeit von Luft werden in Kombination zur Wasserdurchlässigkeit verschiedene Varianten verwendet. Die Funktion 7 im FT2009 beschreibt die relative Luftdurchlässigkeits-Sättigungs-Funktion nach Corey (1954):

$$k_{r,l} = (1 - \bar{S})^2 \cdot (1 - \bar{S}^2) \quad (4-2)$$

\bar{S} effektive Sättigung nach Corey

$$\bar{S} = \frac{(S_w - S_{w,r})}{(1 - S_{w,r} - S_{l,r})}$$

$S_{l,r}$ residualer Sättigungsgrad für Luft

Die Luftdurchlässigkeit bei der Funktion 9 (Glg. 4-3) folgt dem Ansatz nach Van Genuchten-Mualem und lautet:

$$k_{r,l} = (1 - S_e)^\tau \cdot \left(1 - S_e^{1/m} \right)^{2m} \quad (4-3)$$

Diesem Modell ist eine residuale Luftsättigung von $S_{l,r} = 0$ zugrunde gelegt. Der Kurvenverlauf wird durch die beiden Parameter τ und m bestimmt.

Die Funktion 11 (Glg. 4-4) beruht ebenfalls auf der Luftdurchlässigkeit-Sättigungsbeziehung nach Van Genuchten-Mualem. Aufgrund der Erweiterung durch eine Hochzahl fließt ein weiterer Parameter in die Bestimmung des Kurvenverlaufs ein. Damit soll eine Schwächung der Kopplung zwischen Wasser- und Luftdurchlässigkeit erreicht werden. Bei einer Hochzahl $power = 1$ entspricht diese Funktion der Funktion 9.

$$k_{r,l} = k_{r,l}^{power} = \left[(1 - S_e)^\tau \cdot (1 - S_e^{1/m})^{2m} \right]^{power} \quad (4-4)$$

$power$ Hochzahl als zusätzlicher Freiheitsgrad

Bei der Funktion 14 (Glg. 4-5) wird die Differenz $(1 - k_{r,l})$ um eine Hochzahl erweitert. Die Hochzahl bestimmt dabei den Krümmungsverlauf der Funktion. Bei geringer Luftsättigung tritt hier ein höherer Anstieg der relativen Durchlässigkeit auf, welche sich jedoch mit zunehmender Entwässerung des Bodens abschwächt (siehe Abb. 4-3). Für größere Hochzahlen nimmt die Funktionskurve eine bimodale Form an. D.h. bei geringer Luftsättigung steigt die Luftdurchlässigkeit nur gering an, die sich mit zunehmender Entwässerung stark steigert und bei hoher Luftsättigung wieder nur schwach zunimmt.

$$k_{r,l} = (1 - k_{r,w})^{power} = \left[S_e^\tau \cdot \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \right]^{power} \quad (4-5)$$

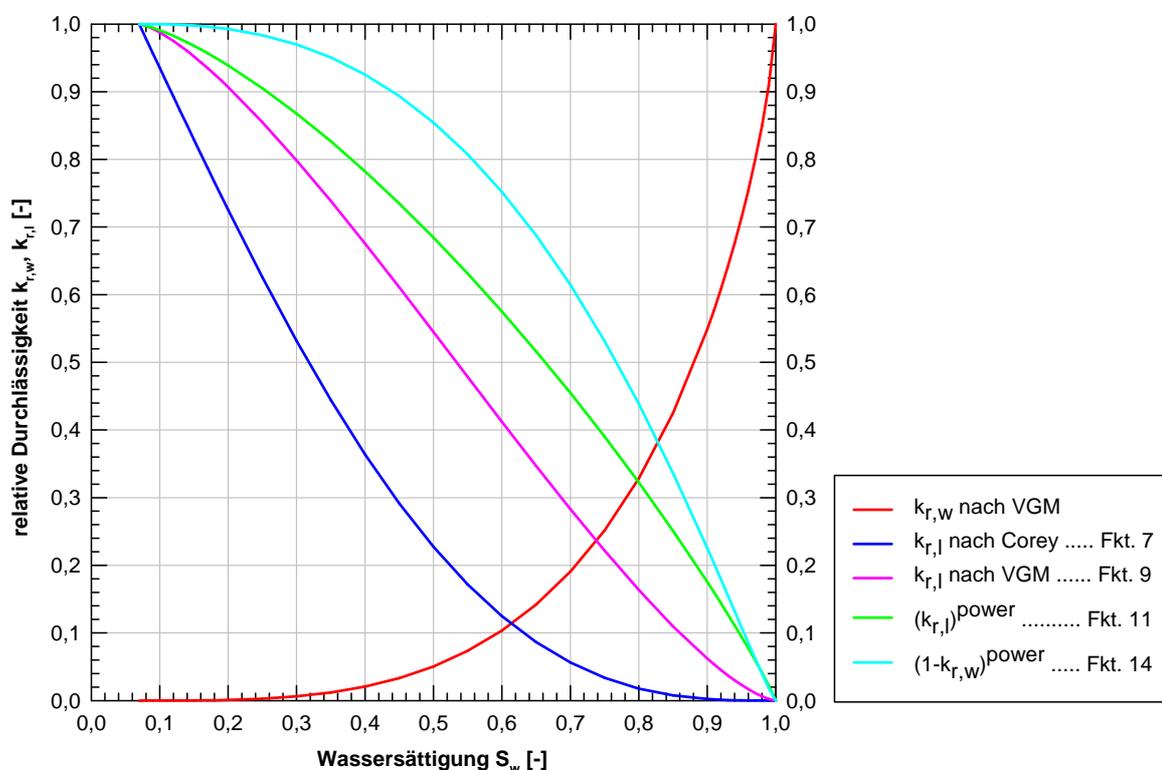


Abb. 4-3: Darstellung der implementierten Luft- und Wasserdurchlässigkeitsfunktionen

4.1.3 UCODE_2005

UCODE_2005 (Poeter et al. 2005) ist eine Software zur Lösung inverser Problemstellungen. Für die Vorwärtsrechnung kann ein beliebiges Programm verwendet werden. Die Kommunikation untereinander erfolgt über ASCII-Dateien. Daher ist die einzige Voraussetzung an das Programm zur Vorwärtssimulation, dass Input- und Output-Files in ASCII- oder Textdateien gelesen und geschrieben werden können.

Das Programm UCODE_2005 dient für die Kommunikation mit der Vorwärtsberechnung über die Input- und Output-Files, die Vorwärtssimulation mit den unterschiedlichen gewählten Parametersätzen, den Vergleich der Messdaten mit den berechneten Werten, die Erstellung einer nichtlinearen Regression und Ausgabe der Statistik zur Bewertung der inversen Parameterbestimmung.

Die Gleichung (4-6) zeigt die zu minimierende Zielfunktion von UCODE_2005. Der Ausdruck $y_i - y'_i(b)$ wird in weiterer Folge als Abweichungen bzw. „residuals“ bezeichnet.

$$O(b) = \sum_{i=1}^{ND} W_i (y_i - y'_i(b))^2 \quad (4-6)$$

$O(b)$	Zielfunktion
b	Parametervektor
y_i	Messwert
y'_i	Simulationswert
ND	Anzahl der Messwerte
W_i	Gewichtung der Messdaten

Für eine inverse Modellierung sind folgende Punkte zu beachten (Chinkulkijniwat 2005):

- Messdaten, Simulationswerte, Toleranzen und gewichtete Toleranzen
- minimale, maximale und mittlere Abweichung (gewichtet)
- Anzahl der Abweichungen größer und kleiner Null
- Zielfunktion mit kleinsten Fehlerquadraten
- gewichteter Zielfunktionswert mit kleinsten Fehlerquadraten
- Berechnung der Fehlervarianz
- Standardabweichung
- Wurzel aus der berechneten Fehlervarianz
- Korrelationskoeffizienten

Die Abb. 4-4 zeigt schematisch das Ablaufschema von UCODE_2005. Das Programm beginnt mit einer Probleminitialisierung und folgt für die Minimierung der Zielfunktion mit einer schrittweisen Iteration. Dabei werden die Parameter nacheinander verändert und der Vorwärtsberechnung des Modelles zugrunde gelegt. Nachdem alle Parameter verändert („gestört“) wurden erfolgt die Sensitivitätsberechnung der Parameter. Die gewichteten Abweichungen der jeweiligen Iteration dienen zur Parameteranpassung der nächsten Iteration. Die Optimierung in UCODE beruht auf der modifizierten Gauß-Newton-Methode (siehe 2.3).

Die Iterationen werden n-mal durchlaufen bis eine Konvergenz erreicht wird, z.B. eine sich nicht mehr verringemde Quadratsumme der Abweichungen oder ein anderes festgelegtes Abbruchkriterium. Abschließend folgt die Sensitivitätsanalyse und Ausgabe der Ergebnisse. Als Ergänzung zur näheren Erläuterung dient das UCODE-Handbuch (Poeter et al. 2005).

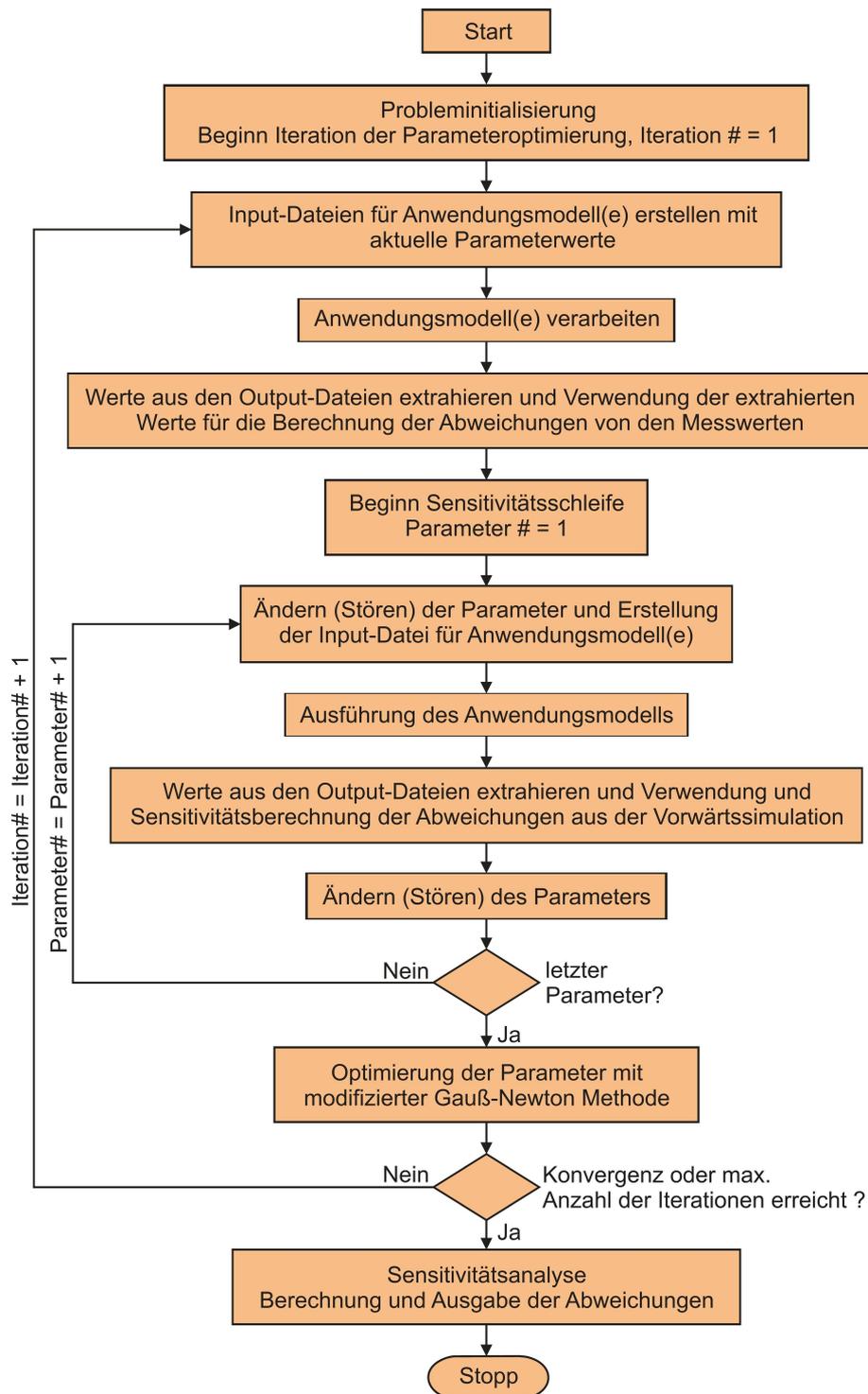


Abb. 4-4: Ablaufschema von UCODE (nach Poeter & Hill 1998)

4.1.4 Kopplung

Für die inverse Modellierung der Luftinjektionsfeldversuche ist es notwendig die eingangs beschriebenen Programme FT2009 und UCODE miteinander zu koppeln.

Folgende Dateien sind für eine inverse Modellierung erforderlich:

- FT2009.exe (Programmdatei)
- Eingabe.txt (Eingabe-Datei für FT2009)
- UCODE.exe (Programmdatei)
- Template-File
- UCODE-Input-File
- Observation-File (Angabe der Messdaten und deren Gewichtung)
- UCODE-Instruction-File

Der UCODE-Input-File steuert im Wesentlichen den Verlauf der inversen Modellierung. In dieser Datei erfolgen die Definition der Abbruchkriterien, die Anzahl und Toleranz der zu optimierenden Parameter sowie die Startparameter. Desweiteren wird der Zugriff zu den Messdaten, die Kommunikation zu FT2009 und die Ausgabe eines Output-Files geregelt.

Die Template-Datei ist ein Input-File in dem die zu optimierenden Größen durch spezielle Platzhalter ersetzt werden. UCODE_2005 ergänzt die Platzhalter durch die angepassten Parameter und gibt den Input-File für die darauffolgende Vorwärtsrechnung frei.

Das Bindeglied zwischen dem Observation-File und dem FT2009-Output-File stellt die UCODE-Instruction-Datei dar. Darin ist der Zeitschritt und die Position im Output-File der auszulesenden Werte genau festgelegt, damit ein Vergleich mit den Messdaten möglich ist.

In Abb. 4-5 ist die Funktionsweise der Optimierung bzw. die Kopplung von FT2009 mit UCODE_2005 dargestellt.

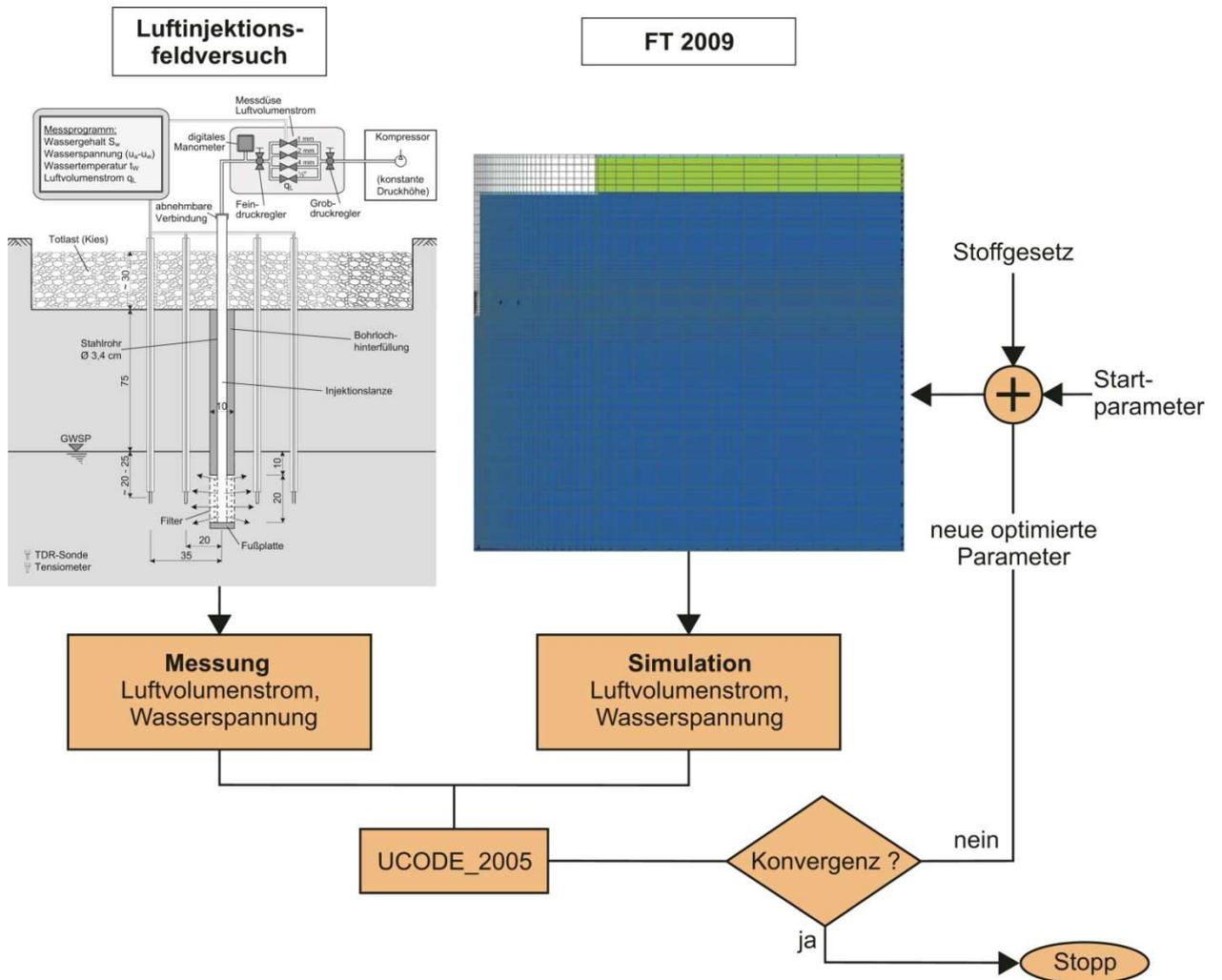


Abb. 4-5: Ablauf der Optimierung mit FT2009 und UCODE_2005

4.2 Ergänzende Versuche im Labor

Als Ergänzung des Feldversuchs wurden zum Zweck der besseren Dateninterpretation und Definition der Startparameter der inversen Simulation weiterführende Versuche im Labor durchgeführt. Dabei wurden die Kapillarspannung-Sättigungsbeziehung sowie die stationäre Luftdurchlässigkeit näher untersucht.

4.2.1 Luftströmungsversuche

Die eindimensionalen Luftströmungsversuche wurden mit Hilfe einer Triaxial-Zelle durchgeführt. Die Bestimmung der Luftdurchlässigkeit erfolgt analog zur Wasserdurchlässigkeit. Die Steuerung und Messung der Luftströmung erfolgte mit dem im Feldversuch verwendeten Steuerboard (siehe Kapitel 3.2.4).

Der Probeneinbau erfolgte mit geringer Residualsättigung und mit derselben Dichte, wie jener der im Feld entnommenen Stechzylinder. Dadurch sind diese Bodenproben als gestörte Proben anzusehen. Die Höhe des Zylinders beträgt 12 cm bei einem Durchmesser von 10 cm.

Mit Gültigkeit des Darcy'schen Gesetzes $v = k \cdot i$ und der Kontinuitätsgleichung $Q = v \cdot A$ ergibt sich für die Luftdurchlässigkeit folgende Beziehung:

$$k_{Luft} = \frac{q \cdot l \cdot \gamma_{Luft}}{A \cdot \Delta p} \quad (4-7)$$

k_{Luft} Luftdurchlässigkeit [m/s]

q strömende Luftmenge [m³]

$\gamma_{Luft} = \rho_{Luft} \cdot g$ Wichte von Luft [kN/m³]

Hydraulischer Gradient i : $i = \frac{\Delta h}{l} = \frac{\Delta p}{l \cdot \gamma_{Luft}}$

l Strömungslänge [m]

A durchströmte Fläche [m²]

Δp Luftüberdruck [kPa]

Bei diesem Versuch wurde der Luftüberdruck stufenweise von 5 kPa bis 25 kPa bei gleichzeitiger Messung des Luftvolumenstromes, gesteigert. Dafür wurde dieselbe Kontroll- bzw. Messeinrichtung wie des Feldversuches verwendet.

Um im Vorfeld eine Abschätzung der zu injizierenden Luftmenge zu erhalten, ist es notwendig eine Berechnung nach Formel (4-7) durchzuführen. Die Luftdurchlässigkeit kann dazu über das Verhältnis aus gesättigter Wasserdurchlässigkeit zu intrinsischer Permeabilität abgeleitet werden (siehe Formel (2-2)). Diese Werte bilden in weiterer Folge den theoretischen Luftvolumenstrom, siehe Abb. 4-6.

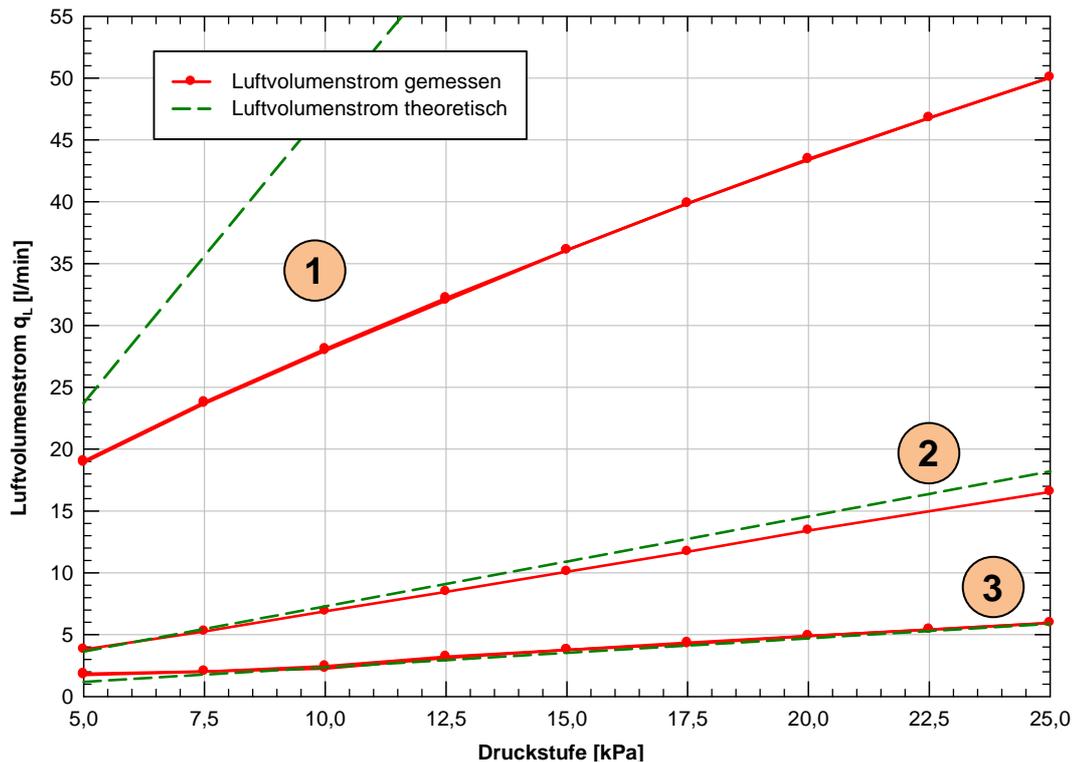


Abb. 4-6: Vergleich theoretischer und gemessener Luftvolumenstrom der eindimensionalen Luftströmungsversuche

In der obigen Darstellung sind der gemessene und theoretische Luftvolumenstrom der eindimensionalen Luftströmungsversuche aufgetragen. Auffallend sind die großen Abweichungen des Luftstromes vom Versuchsboden 1. Diese können auf der Ausbildung einer turbulenten Luftströmung beruhen. Eine weitere Einschränkung kann der Versuchsaufbau der Triaxial-Zelle darstellen und somit eine Begrenzung der Strömungskapazität des Systems bedeuten. Am Versuchsbeginn nehmen die Abweichungen eine Größenordnung von 4,81 l/min an, und wachsen auf 68,63 l/min bei 25 kPa.

Beim Versuchsboden 2 treten geringe Abweichungen ab einer Druckstufe von 10 kPa auf. Der Unterschied beträgt bei 25 kPa Überdruck 1,65 l/min.

Eine sehr gute Übereinstimmung über alle Druckstufen hinweg kann beim dritten Versuchsboden festgestellt werden. Grundsätzlich kann daher festgestellt werden, dass die Berechnung der Luftdurchlässigkeit über die intrinsische Permeabilität v.a. im Hinblick auf die numerische Simulation als zutreffend anzusehen ist.

4.2.2 Kapillarspannungsversuche

Zur näheren Beschreibung der Kapillarspannung-Sättigungs-Beziehung wurde im Labor ein Kapillarspannungsversuch mit einer „Tempe Pressure Cell“ durchgeführt. Eine detaillierte Versuchsbeschreibung ist der Publikation Lu (2004) zu entnehmen. Die Bodenproben sind aufgrund der Probenentnahme und Wiedereinbaus als gestörte Proben anzusehen.

In Abb. 4-7 sind die Kapillarspannung-Sättigungs-Kurven der verschiedenen Versuchsböden dargestellt.

Wie aus Abb. 4-7 ersichtlich steigen die Kapillarspannungen bei Erreichen der Residualwassersättigung $S_{w,r}$ theoretisch gegen unendlich an. Somit bildet die Residualwassersättigung eine Grenze für die Entwässerbarkeit eines Bodens.

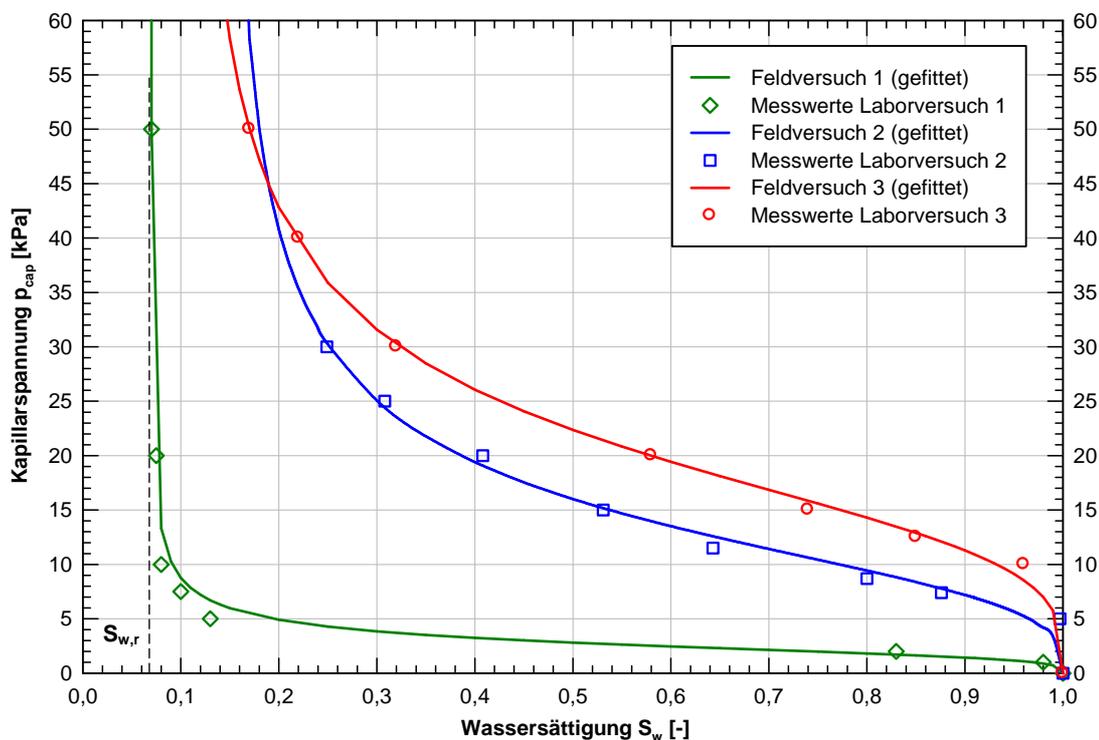


Abb. 4-7: Kapillarspannung-Sättigungs-Kurven der Versuchsböden

Das Fitting der Kapillarspannung-Sättigungskurve erfolgt nach dem Ansatz von Van Genuchten (1980):

$$p_c = -p_0 \cdot \left(S_e^{-\frac{1}{m}} - 1 \right)^{1-m} \quad (4-8)$$

p_c Kapillarspannung [kPa]

p_0 Lufteintrittswert [kPa]

S_e effektive Sättigung nach VGM [-]

$$S_e = \frac{(S_w - S_{w,r})}{(1 - S_{w,r})}$$

m Kenngröße für Porengrößenverteilung [-]

Die Parameter m , $S_{w,r}$ sowie p_0 wurde dabei optimiert. Die daraus erhaltenen Werte sind Tab. 4-1 zu entnehmen. Diese dienen als Anfangsgrößen für die jeweiligen numerischen Modelle.

Bezeichnung	Einheit	Feldversuch 1	Feldversuch 2	Feldversuch 3
Kenngröße für Porengrößenverteilung m	-	0,722	0,689	0,723
res. Wassersättigung $S_{w,r}$	-	0,070	0,145	0,108
Lufteintrittswert p_0	kPa	2,349	11,921	18,168

Tab. 4-1: Gefittete Parameter der Kapillarspannung-Sättigungs-Kurve

4.3 Inverse Modellierung von Feldversuch 1

In diesem Abschnitt erfolgt die nähere Beschreibung der inversen Modellierung zum Feldversuch 1. Die Grundlage hierfür bilden die Messdaten des Luftvolumenstroms.

Im Vorfeld wurde eine inverse Modellierung mit numerisch erzeugten „Messwerten“ aus einer Vorwärtssimulation durchgeführt. Dabei beruhte die Parameterbestimmung einerseits auf den Luftströmungsdaten und andererseits auf der Kombination aus Luftströmungs- und Wasserspannungsdaten. Beide Varianten zeigten sehr gute Übereinstimmung mit den ausgewählten Messwerten. Somit ist sichergestellt, dass theoretisch die Voraussetzungen gegeben sind, um eine solche Problemstellung zu erfassen.

Für die inverse Simulation wurden 25 Messdaten im Bereich der Druckstufen von 5 kPa bis 15 kPa verwendet. Über 15 kPa nicht, da eine Begrenzung der Luftströmungskapazität des Versuchsaufbaus vermutet wird. Am Beginn der Druckstufe 7,5 kPa werden keine Messwerte verwendet, da in diesem Bereich aufgrund der hohen Wassersättigung wahrscheinlich noch kein Strömungsvorgang nach Darcy stattfindet. Aufgrund zu großer Schwankungen ist am Beginn der Druckstufe 15 kPa auch kein Messwert für die inverse Parameterbestimmung herangezogen worden. Inverse Modellierungen wurden mit verschiedenen Ansätzen für die Luftdurchlässigkeit ausgeführt. Brauchbare Resultate wurden mit den Funktionen 9, 11 und 14 erzielt (vgl. 4.1.2).

4.3.1 Funktion 9

Die Wasser- und Luftdurchlässigkeitsfunktion sind bei der ersten inversen Modellierung durch den Ansatz nach van Genuchten-Mualem definiert. Grundsätzlich sind die Parameter intrinsische Durchlässigkeit K , Kenngröße für die Porengrößenverteilung m und Tortosität τ zur Optimierung freigegeben. Das Verhältnis von horizontaler zu vertikaler Durchlässigkeit wird mit 1,0 festgelegt. Die Ergebnisse von drei Varianten sind in Abb. 4-8 dargestellt.

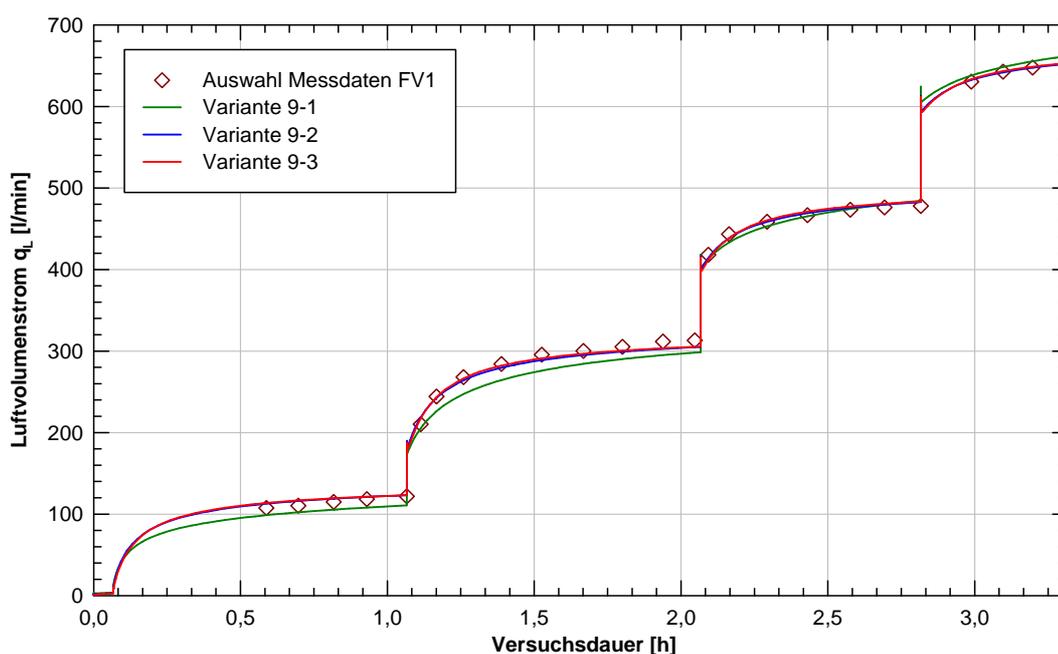


Abb. 4-8: Optimierter Luftvolumenstrom für die Funktion 9 – Feldversuch 1

In einer ersten Untersuchung zeigt sich bei einer Fixierung der residualen Wassersättigung $S_{w,r} = 0,07$ und des Lufteintrittswertes $p_0 = 2,439$ kPa eine mangelhafte Übereinstimmung mit den Messwerten. Es wird keine Konvergenz sowie eine hohe Korrelation der Parameter erreicht, siehe Abb. 4-8 (Variante 9-1).

In einer weiteren Variante folgt die Freigabe der residualen Wassersättigung zur Optimierung (Variante 9-2). Somit werden vier Parameter optimiert. Diese liefert eine gute Übereinstimmung, jedoch nimmt die residuale Wassersättigung mit 0,48 eine unrealistische Größenordnung ein. Die Tortosität beträgt hierbei 0,03.

Auf Basis der obigen Erkenntnisse wird in der Variante 9-3 die Tortosität mit $\tau = 0$ fixiert und der Lufteintrittswert freigegeben. Diese Variante weist zwar die besten Übereinstimmungen, die geringsten Fehlerquadrate und keine Korrelationen auf, jedoch beträgt die residuale Wassersättigung wiederum 0,53. Eine genaue Übersicht der Ergebnisse erfolgt in Tab. 4-2.

4.3.2 Funktion 11

Aus den vorigen Untersuchungen (hohe residuale Wassersättigung) resultiert die Erkenntnis, dass der gewählte Ansatz für die Beschreibung der Luftdurchlässigkeit die auftretende Problemstellung physikalisch nicht befriedigend erfassen kann. Aufgrund dessen wird die im Programm FT2009 enthaltene Funktion 11 (vgl. 4.1.2) für weitere Optimierungen verwendet.

In der Variante 11-1 sind die Kenngrößen K , m , $power$ und $S_{w,r}$ zur Optimierung freigegeben. Der Optimierungsprozess ergibt eine residuale Wassersättigung von 0,52, welche auf eine physikalisch nicht realistische Abbildung der Luftdurchlässigkeit hindeutet.

Bei den Varianten 11-2 und 11-3 erfolgt eine Fixierung von $S_{w,r} = 0,07$ und gleichzeitig die Freigabe des Lufteintrittswertes p_0 . Diese beiden Untersuchungen ergeben zwar gute Übereinstimmungen mit den Messwerten, die fehlende Konvergenz der inversen Modellierungen weist jedoch auf einen nicht eindeutig definierten Parametersatz hin.

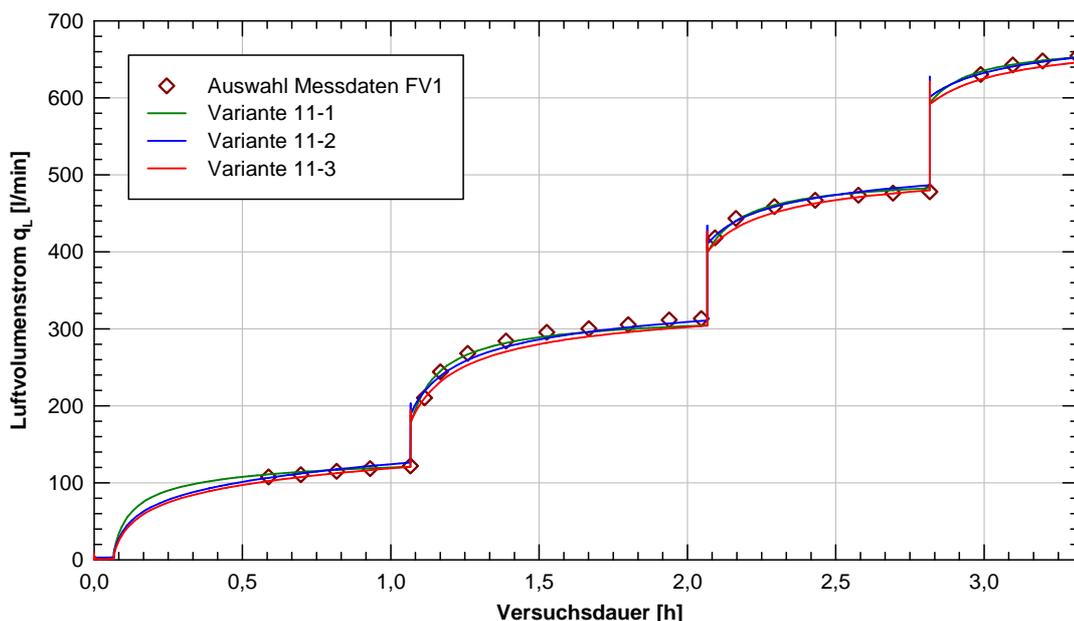


Abb. 4-9: Optimierter Luftvolumenstrom für die Funktion 11 – Feldversuch 1

Der grundlegende Unterschied zwischen der Variante 11-2 und 11-3 liegt im Parameter m (vgl. Tab. 4-3). Bei der Variante 3 erfolgt eine Unterteilung von m einerseits für die relative Durchlässigkeitsfunktion (m_{relp}) und andererseits für die Kapillarspannungsfunktion (m_{pcap}).

4.3.3 Funktion 14

Die Funktion 14 weist relativ hohe Luftdurchlässigkeiten im Bereich geringer Luftsättigungen auf. Der Funktionsverlauf ist im Wesentlichen von der Hochzahl abhängig (vgl. 4.1.2).

In der Variante 14-1 sind die Kenngrößen K , m , $power$ und $S_{w,r}$ zur Optimierung freigegeben. Der Optimierungsprozess ergibt eine residuale Wassersättigung von 0,057, welche auf eine physikalisch realistische Abbildung der Luftdurchlässigkeit hindeutet.

Bei den Varianten 14-2 und 14-3 erfolgt eine Fixierung von $S_{w,r} = 0,07$ und gleichzeitig die Freigabe des Lufteintrittswertes p_0 bei der Variante 2. Bei der Variante 14-3 ist $p_0 = 2,349$ kPa fixiert. Der grundlegende Unterschied dieser beiden Varianten liegt im Parameter m . Bei der Variante 3 erfolgt eine Unterteilung dieses Parameters einerseits für die relative Durchlässigkeitsfunktion (m_{relp}) und andererseits für die Kapillarspannungsfunktion (m_{pcap}).

Alle drei untersuchten Varianten konvergieren innerhalb der gewählten Kriterien. Die Besonderheit der Variante 14-3 ist die voneinander unabhängige Optimierung von m aus der Durchlässigkeits- und Kapillarspannungsfunktion.

Die kleinsten Fehlerquadrate resultieren aus der Variante 2, bei der die Parameter τ und $S_{w,r}$ fixiert sind (siehe Tab. 4-2).

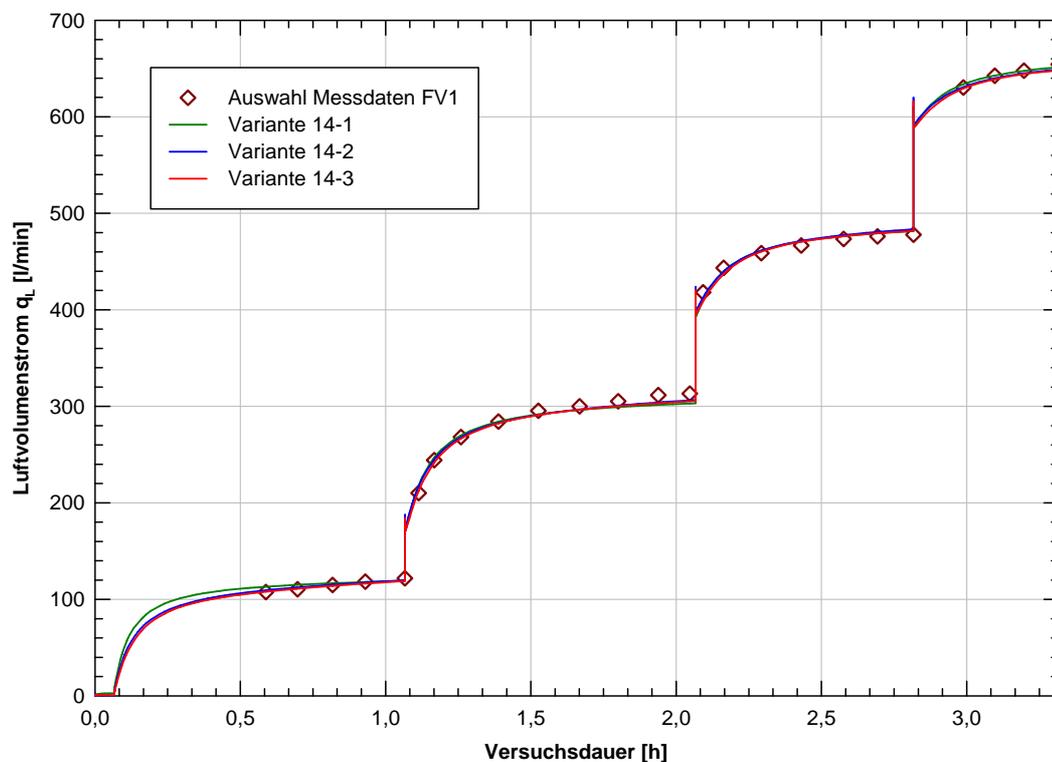


Abb. 4-10: Optimierter Luftvolumenstrom für die Funktion 14 – Feldversuch 1

4.3.4 Zusammenstellung

Die Parameter der inversen Modellierungen des ersten Feldversuches sind in Tab. 4-2 zusammengestellt (vgl. 4.3.1 bis 4.3.3). Die Unterteilung erfolgt in fixierte und optimierte Parameter. Desweiteren ist die Summe der gewichteten quadratischen Abweichungen angeführt.

Bezeichnung		Einheit	Funktion 9		
			Var. 9-1	Var. 9-2	Var. 9-3
fixiert	τ	-	-	-	0
	p_0	kPa	2,349	2,349	-
	$S_{w,r}$	-	0,07	-	-
Optimierte Parameter	K	m ²	$2,03 \cdot 10^{-11}$	$2,05 \cdot 10^{-11}$	$2,02 \cdot 10^{-11}$
	m	-	0,41	0,61	0,72
	$S_{w,r}$	-	-	0,48	0,53
	p_0	kPa	-	-	2,349
	τ	-	0,095	0,026	-
Summe der gewichteten quadr. Abwei-		-	$5,5378 \cdot 10^6$	$8,5465 \cdot 10^5$	$8,1999 \cdot 10^5$

Bezeichnung		Einheit	Funktion 11		
			Var. 11-1	Var. 11-2	Var. 11-3
fixiert	τ	-	0,25	0,25	0,25
	p_0	kPa	2,349	-	-
	$S_{w,r}$	-	-	0,07	0,07
Optimierte Parameter	K	m ²	$2,02 \cdot 10^{-11}$	$2,03 \cdot 10^{-11}$	$2,04 \cdot 10^{-11}$
	m_{relp}	-	0,797	0,668	0,703
	m_{pcap}	-	-	-	0,95
	$S_{w,r}$	-	0,52	-	-
	p_0	kPa	-	0,628	3,632
	power	-	0,642	0,573	0,582
Summe der gewichteten quadr. Abwei-		-	$7,6875 \cdot 10^5$	$8,9253 \cdot 10^5$	$2,8352 \cdot 10^6$

Bezeichnung		Einheit	Funktion 14		
			Var. 14-1	Var. 14-2	Var. 14-3
fixiert	τ	-	0,25	0,25	0,25
	p_0	kPa	2,349	-	2,349
	$S_{w,r}$	-	-	0,07	0,07
Optimierte Parameter	K	m ²	$2,0 \cdot 10^{-11}$	$1,92 \cdot 10^{-11}$	$1,94 \cdot 10^{-11}$
	m_{relp}	-	0,574	0,914	0,833
	m_{pcap}	-	-	-	0,874
	$S_{w,r}$	-	0,057	-	-
	p_0	kPa	-	2,372	-
	power	-	3,397	1,531	2,076
Summe der gewichteten quadr. Abwei-		-	$8,9039 \cdot 10^5$	$6,1682 \cdot 10^5$	$5,5885 \cdot 10^5$

Tab. 4-2: Übersicht der inversen Modellierung – Feldversuch 1

4.4 Inverse Modellierung von Feldversuch 2

In diesem Abschnitt erfolgt die nähere Beschreibung der inversen Modellierung zum Feldversuch 2. Die Grundlage hierfür bilden die Messdaten vom Luftvolumenstrom.

Die Vorgehensweise der inversen Parameterbestimmung von Feldversuch 2 ist identisch mit jener aus dem Feldversuch 1 (vgl. 4.3). Eine Übersicht der Ergebnisse in Abhängigkeit der jeweiligen Funktion ist Tab. 4-3 zu entnehmen.

Für die inverse Simulation wurden 33 Messdaten im Bereich der Druckstufen von 5 kPa bis 35 kPa verwendet. Am Beginn der Druckstufe 7,5 kPa werden keine Messwerte verwendet, da in diesem Bereich aufgrund der hohen Wassersättigung wahrscheinlich noch kein Strömungsvorgang nach Darcy stattfindet. Inverse Modellierungen wurden mit verschiedenen Ansätzen für die Luftdurchlässigkeit ausgeführt. Brauchbare Resultate wurden mit den Funktionen 9, 11 und 14 erzielt (vgl. 4.1.2). Die Beschreibung der Optimierungsergebnisse erfolgt in den weiteren Abschnitten.

Das Verhältnis von horizontaler zu vertikaler Durchlässigkeit wird in diesem Fall basierend auf Laborversuche an ungestörten Bodenproben mit 1,5 festgelegt.

4.4.1 Funktion 9

Die Wasser- und Luftdurchlässigkeitsfunktion sind bei der ersten inversen Parameteroptimierung durch den Ansatz nach van Genuchten-Mualem definiert. Grundsätzlich sind die Parameter intrinsische Durchlässigkeit K , Kenngröße für die Porengrößenverteilung m und Tortosität τ zur Optimierung freigegeben.

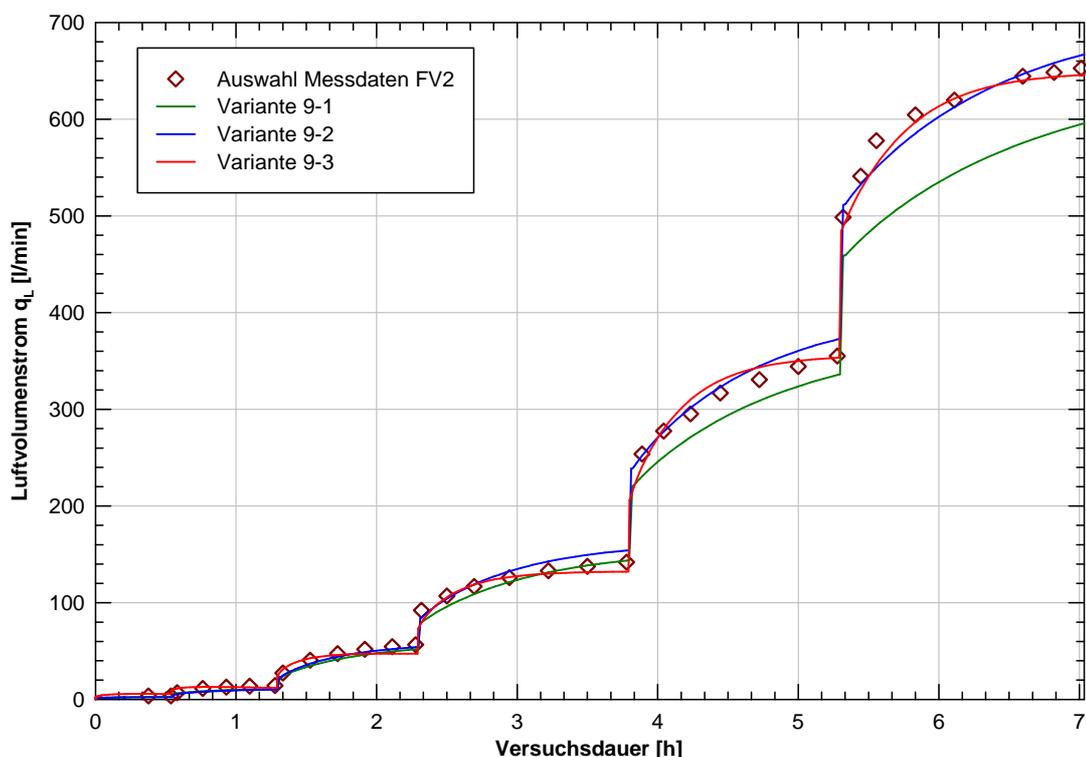


Abb. 4-11: Optimierter Luftvolumenstrom für die Funktion 9 – Feldversuch 2

In einer ersten Untersuchung zeigt sich bei einer Fixierung der residualen Wassersättigung $S_{w,r} = 0,15$ und des Lufteintrittswertes $p_0 = 11,92$ kPa eine schlechte Übereinstimmung mit den Messwerten. Es wird zwar eine Konvergenz, aber auch eine hohe Korrelation der Parameter erreicht, siehe Abb. 4-11 (Variante 9-1).

In einer weiteren Variante folgt die Freigabe der residualen Wassersättigung zur Optimierung (Variante 9-2). Somit werden vier Parameter optimiert. Diese liefert eine gute Übereinstimmung und die residuale Wassersättigung beträgt 0,10. Die Tortosität beträgt hierbei 0,797.

Auf Basis der obigen Erkenntnisse wird in der Variante 9-3 die Tortosität mit $\tau = 0$ fixiert und der Lufteintrittswert freigegeben. Diese Variante weist zwar die besten Übereinstimmungen, die geringsten Fehlerquadrate, jedoch tritt eine hohe Korrelation der Parameter auf. Eine genaue Übersicht der Ergebnisse erfolgt in Tab. 4-3.

4.4.2 Funktion 11

In der Variante 11-1 sind die Kenngrößen K , m , $power$ und $S_{w,r}$ zur Optimierung freigegeben. Der Optimierungsprozess ergibt eine residuale Wassersättigung von 0,47, welche auf eine physikalisch nicht realistische Abbildung der Luftdurchlässigkeit hindeutet.

Bei den Varianten 11-2 und 11-3 erfolgt eine Fixierung von $S_{w,r} = 0,15$ und gleichzeitig die Freigabe des Lufteintrittswertes p_0 . Diese beiden Untersuchungen ergeben zwar gute Übereinstimmungen mit den Messwerten, die hohen Konvergenzen der inversen Modellierungen weist jedoch auf einen nicht eindeutig definierten Parametersatz hin.

Der grundlegende Unterschied zwischen der Variante 11-2 und 11-3 liegt im Parameter m (vgl. Tab. 4-3). Bei der Variante 3 erfolgt eine Unterteilung von m einerseits für die relative Durchlässigkeitsfunktion (m_{relp}) und andererseits für die Kapillarspannungsfunktion (m_{pcap}).

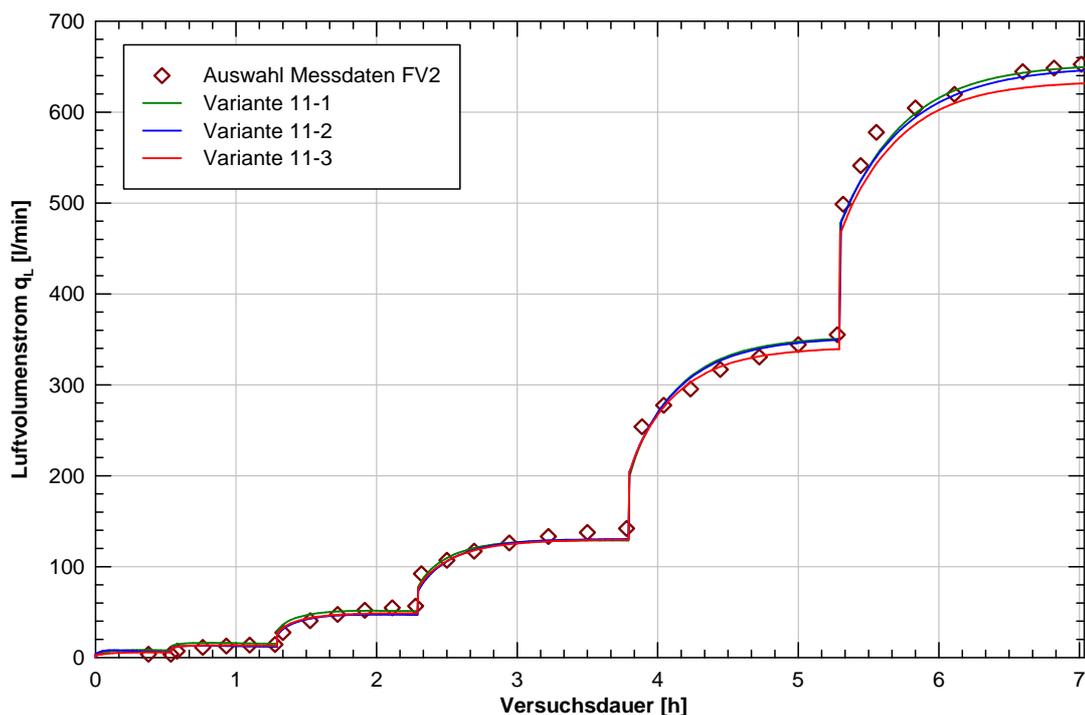


Abb. 4-12: Optimierter Luftvolumenstrom für die Funktion 11 – Feldversuch 2

4.4.3 Funktion 14

In der Variante 14-1 sind die Kenngrößen K , m , p_0 , τ und $power$ zur Optimierung freigegeben. Der Optimierungsprozess ergibt eine Hochzahl $power$ von 5,01 und eine Tortosität von 0,029.

Bei den Varianten 14-2 und 14-3 erfolgt eine Fixierung von $S_{w,r} = 0,15$ und gleichzeitig die Freigabe des Luftpunktswertes p_0 bei der Variante 2. Bei der Variante 14-3 ist p_0 mit 28,571 kPa fixiert.

Alle drei untersuchten Varianten konvergieren innerhalb der gewählten Kriterien. Die Besonderheit der Variante 14-3 ist die voneinander unabhängige Optimierung von m aus der Durchlässigkeits- (m_{relp}) und Kapillarspannungsfunktion (m_{pcap}). Diese Simulation weist keine kritische Korrelation auf.

Die kleinsten Fehlerquadrate resultieren aus der Variante 1, bei der die residuale Wassersättigung fixiert ist (siehe Tab. 4-3).

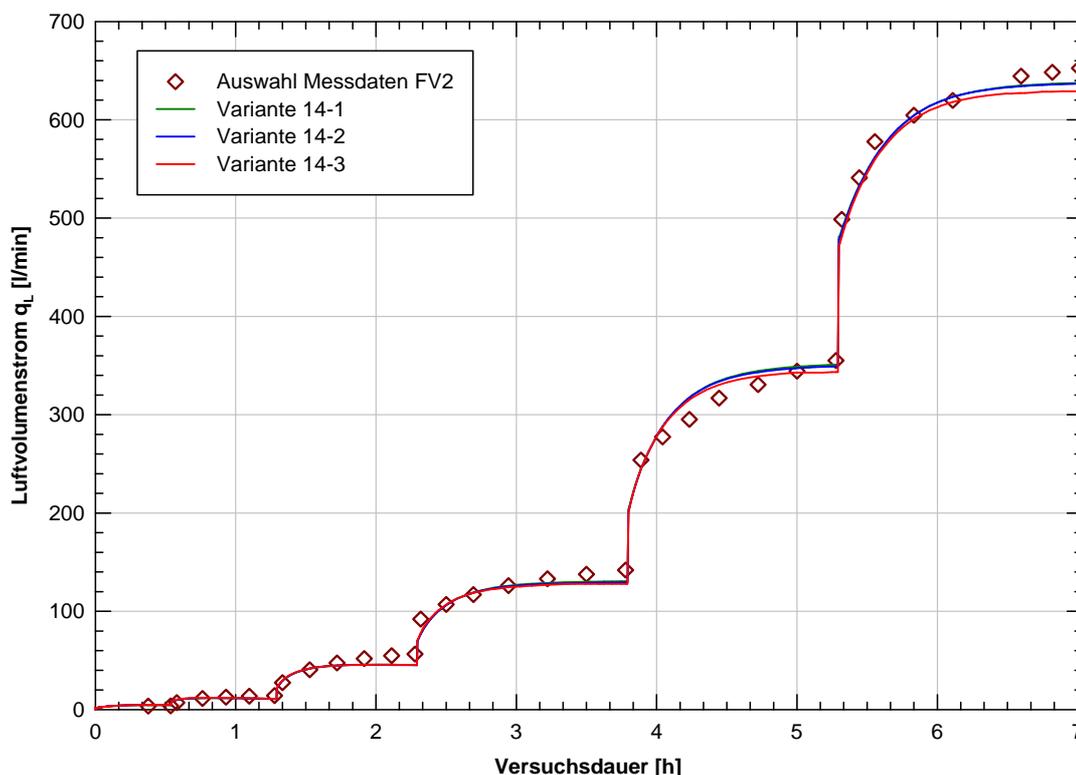


Abb. 4-13: Optimierter Luftvolumenstrom für die Funktion 14 – Feldversuch 2

4.4.4 Zusammenstellung

Eine Übersicht der inversen Parameterbestimmungen des zweiten Feldversuches ist der Tab. 4-3 zu entnehmen (vgl. 4.4.1 bis 4.4.3). Die Unterteilung erfolgt in fixierte und optimierte Parameter. Desweiteren ist die Summe der gewichteten quadratischen Abweichungen angeführt.

Bezeichnung		Einheit	Funktion 9		
			Var. 9-1	Var. 9-2	Var. 9-3
fixiert	τ	-	-	-	0
	p_0	kPa	11,92	11,92	-
	$S_{w,r}$	-	0,15	-	-
Optimierte Parameter	K_v	m ²	$5,17 \cdot 10^{-12}$	$6,695 \cdot 10^{-11}$	$6,924 \cdot 10^{-12}$
	K_h	m ²	$1,034 \cdot 10^{-11}$	$1,339 \cdot 10^{-12}$	$1,039 \cdot 10^{-11}$
	m	-	0,99	0,99	0,907
	$S_{w,r}$	-	-	0,10	0,123
	p_0	kPa	-	-	48,614
	τ	-	0,6096	0,797	-
	Summe der gewichteten quadr. Abwei-	-	$7,1227 \cdot 10^7$	$4,9388 \cdot 10^6$	$3,3293 \cdot 10^6$

Bezeichnung		Einheit	Funktion 11		
			Var. 11-1	Var. 11-2	Var. 11-3
fixiert	τ	-	0,25	0,25	0,25
	p_0	kPa	25,0	-	-
	$S_{w,r}$	-	-	0,15	0,15
Optimierte Parameter	K_v	m ²	$6,362 \cdot 10^{-12}$	$7,075 \cdot 10^{-12}$	$7,819 \cdot 10^{-12}$
	K_h	m ²	$9,543 \cdot 10^{-12}$	$1,061 \cdot 10^{-11}$	$1,173 \cdot 10^{-11}$
	m_{relp}	-	0,95	0,833	0,955
	m_{pcap}	-	-	-	0,792
	$S_{w,r}$	-	0,47	-	-
	p_0	kPa	-	29,087	24,845
	power	-	0,969	0,793	0,955
	Summe der gewichteten quadr. Abwei-	-	$3,7117 \cdot 10^6$	$3,1426 \cdot 10^6$	$2,6840 \cdot 10^6$

Bezeichnung		Einheit	Funktion 14		
			Var. 14-1	Var. 14-2	Var. 14-3
fixiert	τ	-	-	0,25	0,25
	p_0	kPa	-	-	28,571
	$S_{w,r}$	-	0,15	0,15	0,15
Optimierte Parameter	K_v	m ²	$6,453 \cdot 10^{-12}$	$6,507 \cdot 10^{-12}$	$6,632 \cdot 10^{-12}$
	K_h	m ²	$9,679 \cdot 10^{-12}$	$9,761 \cdot 10^{-12}$	$9,948 \cdot 10^{-12}$
	m_{relp}	-	0,762	0,738	0,7985
	m_{pcap}	-	-	-	0,7267
	p_0	kPa	30,845	30,395	-
	τ	-	0,029	-	-
	power	-	5,01	5,5	2,076
	Summe der gewichteten quadr. Abwei-	-	$4,3308 \cdot 10^6$	$4,3801 \cdot 10^6$	$4,4212 \cdot 10^6$

Tab. 4-3: Übersicht der inversen Modellierung – Feldversuch 2

4.5 Interpretation von Feldversuch 3

In diesem Abschnitt erfolgt die Interpretation des dritten Feldversuches.

Eine Inverse Modellierung des dritten Luftinjektionsfeldversuches lässt einerseits der auftretende Ausbläser sowie andererseits der nur bei den Druckstufen 10 und 12,5 kPa repräsentative Luftvolumenstrom nicht zu. Diese beiden Stufen stellen einen zu geringen Bereich dar, um eine breitgefächerte Aussage über das Luftströmungsverhalten im Versuchsboden zu treffen. Die genaue Versuchsauswertung ist in Kapitel 3.3.3 ersichtlich.

Der schlagartige Anstieg des Luftvolumenstroms am Ende der Druckstufe 20 kPa (vgl. Abb. 4-14) wird als Ausbläser bezeichnet und ist im übertragenen Sinne mit einem Tunnelverbruch vergleichbar. Im Tunnelbau kann sich ein Ausbläser ergeben, wenn örtlich der auf die Tunnelfirste wirkende Luftüberdruck höher ist als die Auflast über der entsprechenden Firstfläche. Ausbläser entstehen bevorzugt an künstlichen oder natürlichen Verbindungen zwischen dem Druckraum und der atmosphärischen Oberfläche, (Arz et al. 1994).

Bei genauerer Auflösung des Luftvolumenstroms (Abb. 3-28) ist ersichtlich, dass nach einer Versuchsdauer von 2 h 10 min bereits eine erste Erweiterung des Porenraumes stattgefunden hat, da sich ab diesem Zeitpunkt bei gleicher Druckstufe ein leicht erhöhter Anstieg des Volumenstromes zeigt. Der Ausbläser „kündigte“ sich am Ende von 20 kPa Überdruck, durch einen erheblich steileren Anstieg des Luftvolumenstromes, an.

Der Ausbläser bedingt, wie aus der u.a. Abb. 4-14, nach jeder weiteren Drucksteigerung eine sofortige stationäre Luftströmung, da sich bevorzugte Strömungskanäle gebildet haben.

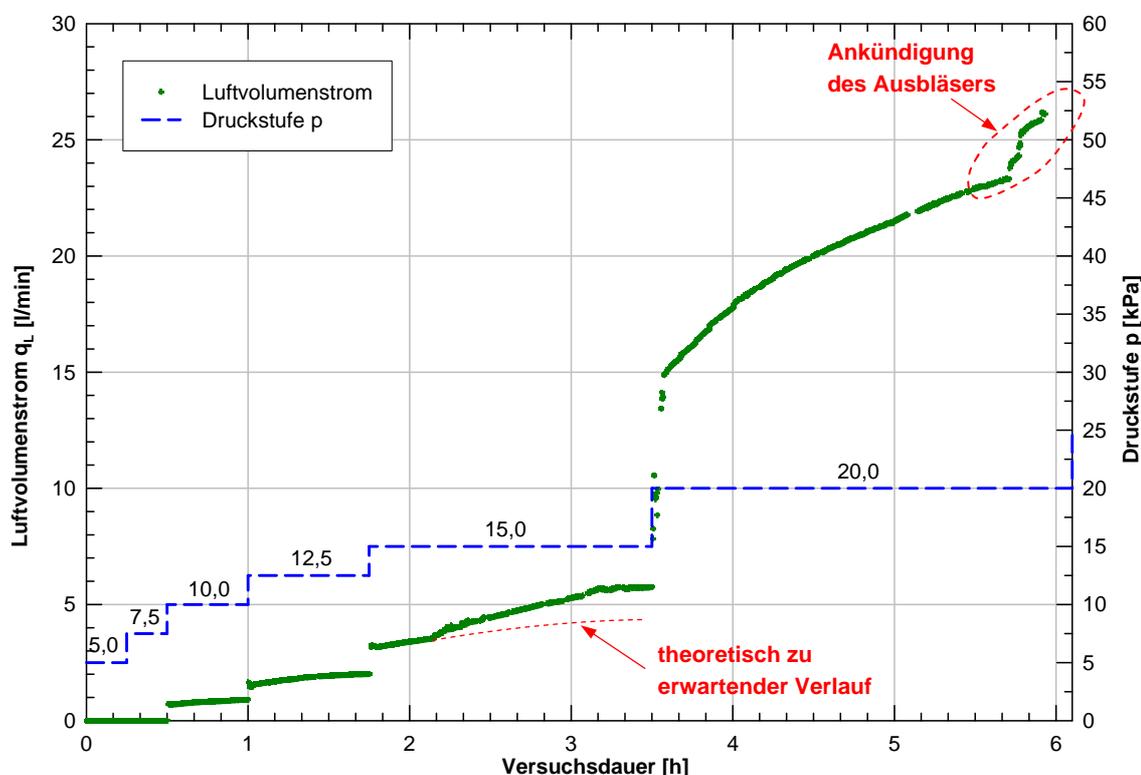


Abb. 4-14: Luftvolumenstrom (Druckstufe 5 kPa – 20 kPa) beim Feldversuch 3

4.6 Diskussion der Ergebnisse

Die durchgeführten inversen Parameterbestimmungen sind hinsichtlich der Optimierung der residualen Wassersättigung teilweise problematisch (ausgenommen Funktion 14). Dies kann häufig nur durch eine Fixierung dieses Parameters behoben werden. Die Größenordnung von $S_{w,r}$ kann durch eine Kapillarspannungsversuch (siehe Punkt 4.2.2) ermittelt bzw. aus der Literatur abgeschätzt werden.

Jene Parametersätze, die einen guten Fit des Luftvolumenstromes ergeben, aber keine Konvergenz erreichen, deuten auf eine nicht eindeutige Lösung hin. Weitere Untersuchungen, bei der nacheinander jeweils ein Parameter fixiert wird, können zur Problemlösung beitragen.

Aus der inversen Parameterbestimmung ist ersichtlich, dass (nur) die Implementierung zusätzlicher Luftdurchlässigkeitsfunktionen eine plausible Abbildung der Luftdurchlässigkeit im Feld ermöglicht. Dadurch kann eine ausreichend genaue Optimierung des gemessenen Luftvolumenstromes erreicht werden. Dabei treten die kleinsten Fehlerquadrate bei Fixierung der Tortosität (bei 0,0 bzw. 0,25) und der residualen Wassersättigung auf. In diesem Fall erfolgt die Parameteroptimierung der intrinsischen Permeabilität K , der Kenngröße für die Porengrößenverteilung m , dem Lufteintrittswert p_0 sowie der Hochzahl $power$.

Für weitere Untersuchungen kann es aufgrund der groben Abweichungen hilfreich sein (Abb. 4-15), die Messdaten der Wasserspannung in die inverse Modellierung mit einzubeziehen. Hierbei ist eine unterschiedliche Gewichtung der beiden Messwertreihen (Luftvolumenstrom und Wasserspannung) vorzunehmen, damit beide Größen denselben Einfluss auf die Berechnung der kleinsten Fehlerquadrate haben.

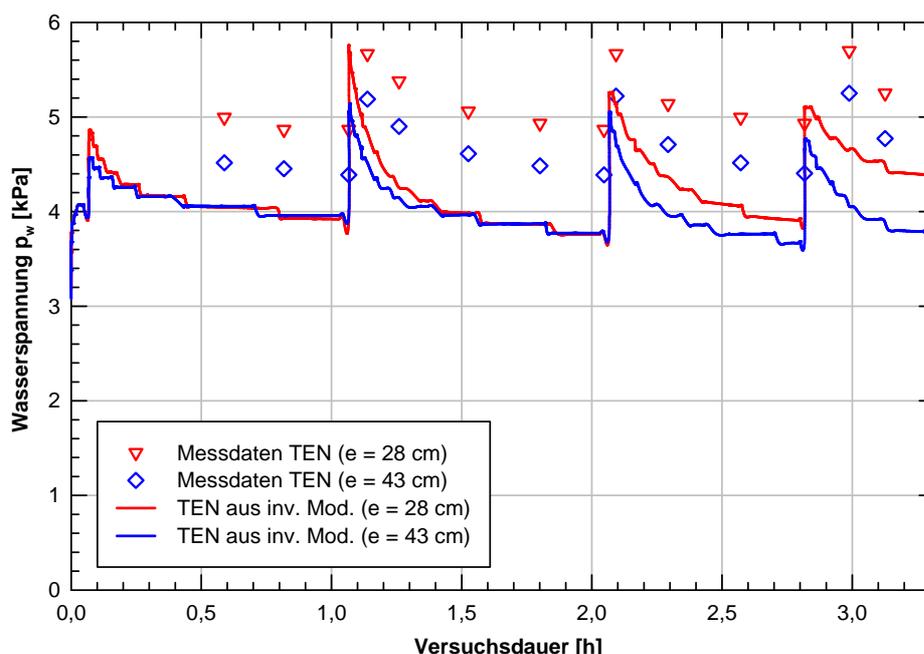


Abb. 4-15: Wasserspannung aus inverser Modellierung bei Feldversuch 1 – Fkt. 14 – Var. 2

Der Versuchsaufbau der Luftinjektionsfeldversuche hat Verbesserungspotenzial, beispielsweise bei der Beseitigung des auftretenden Kondenswassers. Hierbei kann es hilfreich sein ein Entlüftungsventil vor dem Proportionaldruckregler zu montieren. Dadurch ist kein Abtrennen des Druckluftschlauches mehr nötig und der damit einhergehende Druckabfall entfällt.

Die Messung der Bodenwasserspannung und des volumetrischen Wassergehaltes ist problematisch, da die Einbautiefe der Sonden unterhalb der Geländeoberfläche begrenzt ist. Die erreichbare Tiefe wird hauptsächlich durch die Standfestigkeit der Bohrlochwandung unter dem Grundwasserspiegel (GWSP) bestimmt. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass speziell bei gering durchlässigen Böden (vgl. Feldversuch 3) eine größere Einbindetiefe des Filters und der Messgeräte in das Grundwasser aufgrund der höheren Auflast (bzgl. Ausbläsersicherheit) notwendig wäre. Die Länge der Messgeräte und mögliche Instabilität der Bohrlochwandung erschweren hierbei einen fachgerechten Einbau der Messinstrumentierung. Abhilfe kann evtl. durch einen Aushub des Bohrloches im Schutze eines Hüllrohres geschaffen werden. Dies erfordert ein nachträgliches hinterfüllen mit Bentonitschlämme, was im Grundwasser aber nur erschwert möglich ist.

Die Geschwindigkeit der Druckerhöhung hat einen wesentlichen Einfluss auf die Stabilität des Korngerüstes. Kornumlagerungen bzw. Erweiterungen der Porenkanäle können aus abrupten Druckänderungen resultieren. Die Erläuterung dieser Problematik kann unter Umständen ein Teil weiterführender Untersuchungen sein. Daraus kann beispielsweise folgen, dass eine konstante anstelle einer stufenweisen Druckerhöhung vorteilhafter wäre.

Insgesamt sind die Ergebnisse für die erstmalige Durchführung des Feldversuche als zufriedenstellend anzusehen. Der Versuchsaufbau ist prinzipiell geeignet, ausreichend Messdaten zu liefern, um eine inverse Parameterbestimmung der Wasser- und Luftdurchlässigkeit zu gewährleisten.

5 Luftbedarfsberechnung beim Tunnelbau unter Druckluft

Im Vorfeld eines Tunnelvortriebes unter Druckluft ist es immer notwendig die Luftverluste abzuschätzen, um dessen Wirtschaftlichkeit beurteilen zu können und zur Bemessung der Druckluftanlage. Maßgebende Einflüsse sind die geologischen und hydrologischen Verhältnisse, im Speziellen die Durchlässigkeit des Baugrundes. Die Durchlässigkeit der baulich errichteten Konstruktionselemente (Spritzbetonschale, Schlitzwand, Innenschale etc.) spielen ebenfalls eine sehr große Rolle. Das Kapitel 5 beinhaltet neben der Einführung in den Tunnelbau unter Druckluft modellhafte Luftbedarfssimulationen mit den aus den Feldversuchen rückgerechneten Bodenparametern. Eine Diskussion der Ergebnisse bildet den Abschluss dieses Kapitels.

5.1 Tunnelbau unter Druckluft

Druckluft wird im Tunnelbau als Wasserhaltungsmaßnahme bereits seit Jahrzehnten erfolgreich eingesetzt. Hierbei wird mit Hilfe von Kompressoren unter Abschottung des Tunnels durch eine Druckwand in der Arbeitskammer ein Innendruck p_i erzeugt, der sich aus dem Überdruck p_T und dem atmosphärischen Druck p_{atm} zusammensetzt. Dabei dringt Druckluft in den Boden ein und verdrängt das anstehende Grundwasser aus dem Vortriebsbereich. Hierdurch können großflächige Grundwasserabsenkungen bzw. ausgedehnte Injektionsmaßnahmen möglichst reduziert oder vermieden werden. Personen, Material und Geräte werden über getrennte Schleusenkammern in den Arbeitsbereich ein- bzw. ausgeschleust (Steger 2004).

Um das Grundwasser zu verdrängen muss im Tunnelinneren eine Druckhöhe herrschen, die dem hydrostatischen Druck $p_{w,b}$ an der Tunnelsohle entspricht, siehe Abb. 5-1. Nach der Druckluftverordnung (2008) dürfen Arbeitnehmer nicht in Druckluft von mehr als 3,6 bar Überdruck beschäftigt werden. Aus baupraktischer Sicht werden aber meist nur Luftüberdrücke bis 1,5 bar angewandt, da darüber hinaus bereits andere Verfahren technisch und wirtschaftlich überlegen sind. Die Begründung hierfür liegt in den längeren Schleusungszeiten des Personals, kürzeren Arbeitszeiten und den höheren Energiekosten.

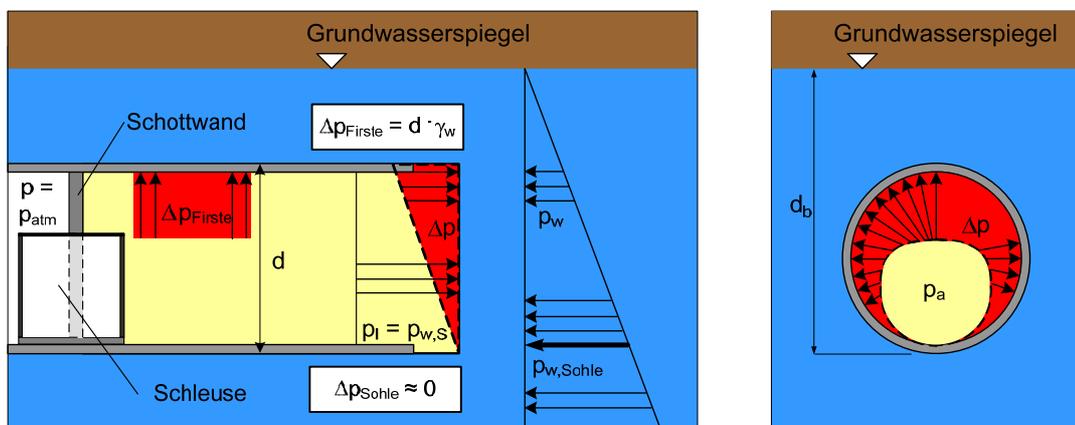


Abb. 5-1: Druckdifferenz Δp an der Ortsbrust und an der Laibung des Tunnels (Steger 2004)

Bei dieser Bauweise tritt folgendes Phänomen auf: an der Ortsbrust stellt sich ein Druckgleichgewicht ein, da der hydrostatische Druck p_w mit der Tiefe linear zunimmt und der

Luftüberdruck im Tunnel über die Höhe konstant ist. Die max. Druckdifferenz berechnet sich aus $\Delta p = \gamma_w \cdot d$ und bildet ein Maximum an der Tunnelfirste. Es entsteht eine Luftströmung vom Tunnel in den umgebenden Untergrund, da sich ein Potentialunterschied aufgrund des Wichteunterschiedes (Wasser, Luft) und des Druckunterschiedes an der Grenzfläche Tunnel und Boden ausbildet. Durch die Verdrängung des Wassers geht der Boden dabei von einem wassergesättigten in einen teilgesättigten Boden über, dessen Porenraum von zwei strömenden Fluiden (Wasser, Luft) eingenommen wird.

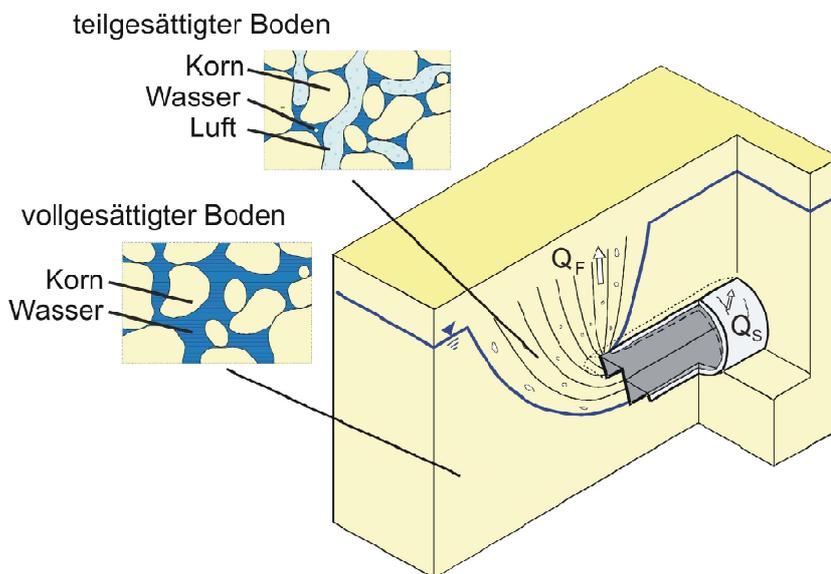


Abb. 5-2: Bodenentwässerung durch Luftströmung bei der NÖT unter Druckluft (Steger 2004)

Für einen Tunnelbau unter Druckluft sind Grobschluffe bis Fein- und Mittelsande mit Wasserdurchlässigkeiten von $k_w = 10^{-7}$ bis 10^{-5} m/s am besten geeignet. Bei Durchlässigkeiten $k_w < 10^{-8}$ m/s ist keine Grundwasserhaltung mehr notwendig und bei $k_w > 10^{-4}$ m/s sind im Vorfeld entsprechende Maßnahme zur Verringerung der Durchlässigkeit, beispielsweise Injektionen, zu treffen (Steger 2004).

Die Abb. 5-3 zeigt nach Arz et al. (1994) die Einsetzbarkeit der Druckluft in Abhängigkeit des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes.

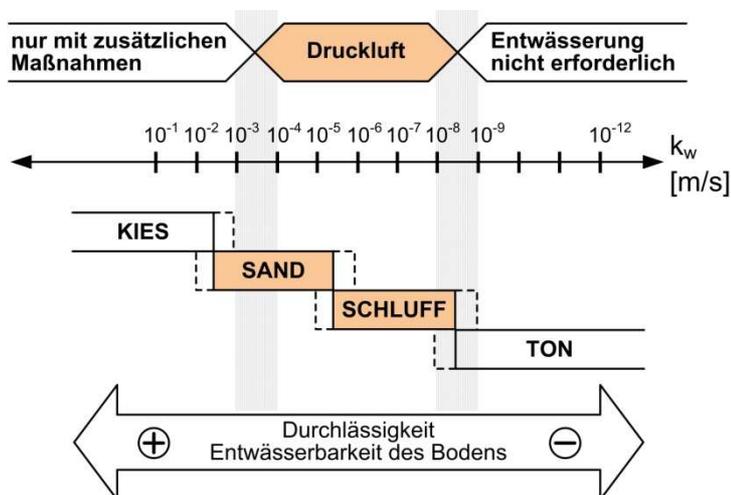


Abb. 5-3: Einsetzbarkeit der Druckluft in Abhängigkeit des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts (Arz et al. 1994)

5.2 Verhältnisse und Berechnungsvarianten

Die Abb. 5-4 zeigt die Geometrie des simulierten Modellvortriebes. Der mauelförmige Tunnelquerschnitt hat einen Durchmesser von ca. 6 m und weist eine Ausbruchsfläche von 28,3 m² auf. Dies entspricht einem typischen U-Bahntunnel mit eingleisiger Linienführung. Der Ausbruch erfolgt im Vollquerschnitt und mit einer Vortriebsgeschwindigkeit $v = 3$ m/d. Die Firstüberdeckung beträgt 6 m und die Lage des GWSP entspricht der Geländeoberfläche.

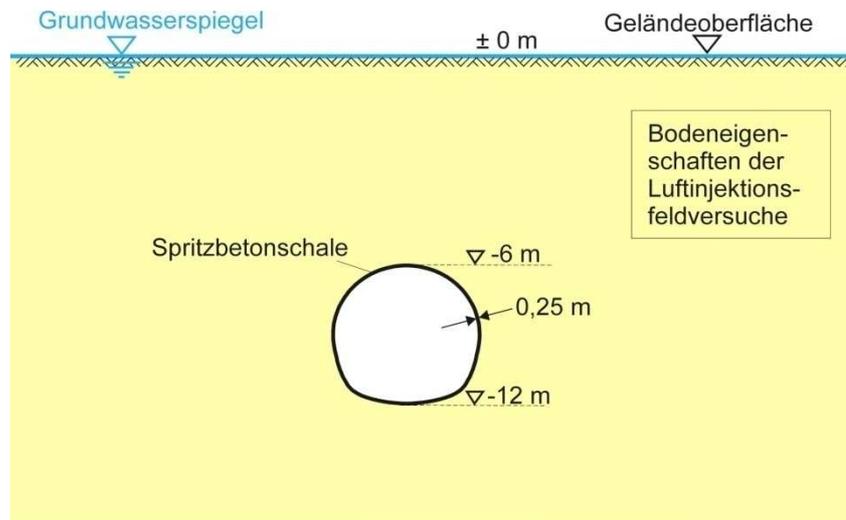


Abb. 5-4: Geometrie und Bodeneigenschaften des Modellvortriebes

Eine Übersicht der Eingabeparameter der Luftbedarfsberechnungen zeigt Tab. 5-1. Die Unterteilung erfolgt in die verwendeten Durchlässigkeitsfunktionen. Bei den Feldversuchen 1 und 2 sind den Simulationen (a) und (b) abgeschätzte Parameter auf Basis der Kapillarspannungsversuche zu Grunde gelegt. Die Parameter der Simulationen (c) bis (d) resultieren dann aus den inversen Modellierungen. Beim dritten Feldversuch beruhen die Parameter aller drei Vortriebssimulationen auf Abschätzung aufgrund des Kapillarspannungsversuches.

Die Bodeneigenschaften werden aus der inversen Parameterbestimmung der Feldversuche entnommen. Für den Feldversuch 3 dienen die Werte aus dem Kapillarspannungsversuch.

FELDVERSUCH 1		Einheit	Funktion 9			Fkt. 11	Fkt. 14
			Sim. (a)	Sim. (b)	Sim. (c)	Sim. (d)	Sim. (e)
K_v		m ²	$2,06 \cdot 10^{-11}$	$2,06 \cdot 10^{-11}$	$2,02 \cdot 10^{-11}$	$2,03 \cdot 10^{-11}$	$1,924 \cdot 10^{-11}$
K_h		m ²	$2,06 \cdot 10^{-11}$	$2,06 \cdot 10^{-11}$	$2,02 \cdot 10^{-11}$	$2,03 \cdot 10^{-11}$	$1,924 \cdot 10^{-11}$
Durchlässigkeitsfunktion	τ	-	0,5	0	0	0,25	0,25
	m	-	0,722	0,722	0,722	0,668	0,914
	$S_{w,r}$	-	0,07	0,07	0,53	0,07	0,07
	$S_{l,r}$	-	0	0	0	-	-
	power	-	-	-	-	0,5728	1,531
Kapillarsp. Fkt.	m	-	0,722	0,722	0,722	0,668	0,914
	$S_{w,r}$	-	0,069	0,069	0,069	0,05	0,04
	p_0	kPa	2,349	2,349	2,349	0,628	2,372

FELDVERSUCH 2		Einheit	Funktion 9			Fkt. 11	Fkt. 14
			Sim. (a)	Sim. (b)	Sim. (c)	Sim. (d)	Sim. (e)
K_v		m ²	$1,442 \cdot 10^{-12}$	$1,442 \cdot 10^{-12}$	$6,924 \cdot 10^{-12}$	$7,267 \cdot 10^{-12}$	$6,507 \cdot 10^{-12}$
K_h		m ²	$1,597 \cdot 10^{-12}$	$1,597 \cdot 10^{-12}$	$1,039 \cdot 10^{-11}$	$1,09 \cdot 10^{-11}$	$9,760 \cdot 10^{-12}$
Durchlässigkeitsfunktion	τ	-	0,5	0	0	0,25	0,25
	m	-	0,689	0,689	0,907	0,817	0,738
	$S_{w,r}$	-	0,145	0,145	0,122	0,15	0,15
	$S_{l,r}$	-	0	0	0	-	-
	power	-	-	-	-	0,8591	5,50
Kapillarsp. Fkt.	m	-	0,689	0,689	0,907	0,817	0,738
	$S_{w,r}$	-	0,145	0,145	0,14	0,14	0,14
	p_0	kPa	11,920	11,920	48,614	28,002	30,395

FELDVERSUCH 3		Einheit	Fkt. 7	Funktion 9	
			Sim. (a)	Sim. (b)	Sim. (c)
K_v		m ²	$3,194 \cdot 10^{-13}$		
K_h		m ²	$4,276 \cdot 10^{-13}$		
Durchlässigkeitsfunktion	τ	-	0,5	0	
	m	-	0,723		
	$S_{w,r}$	-	0,109		
	$S_{l,r}$	-	0		
Kapillarsp. Fkt.	m	-	0,723		
	$S_{w,r}$	-	0,108		
	p_0	kPa	18,169		

Tab. 5-1: Übersicht der Eingangsparameter und Simulationsreihen

Die numerischen Simulationen des beschriebenen Tunnelvortriebes dienen zur beispielhaften Darstellung Druckluftbedarfs für einen Tunnel in den verschiedenen Versuchsböden. Desweiteren soll der Einfluss der unterschiedlichen Durchlässigkeitsfunktionen untersucht werden.

5.3 Numerisches Modell

Die Abb. 5-5 zeigt das numerische Modell der Vortriebssimulation im Quer- und Längsschnitt. Im Längsschnitt ist die Anfahrsituation dargestellt. Die deaktivierten Elemente im Längsschnitt stellen einen bereits fertiggestellten Tunnel dar, welcher mit Hilfe einer Deckelbauweise hergestellt wurde. Das numerische Modell hat eine Abmessung 14 x 14,5 x 70 m und beinhaltet 54.432 aktive Elemente. Der Luftbedarf wird für eine Vortriebslänge von 50 m bei einem Luftüberdruck von 1,25 bar ermittelt. Der Luftüberdruck wird durch die TUNEL-Elemente simuliert. Die Bodenelemente haben wechselweise die Eigenschaften et Abschnitt 5.2.

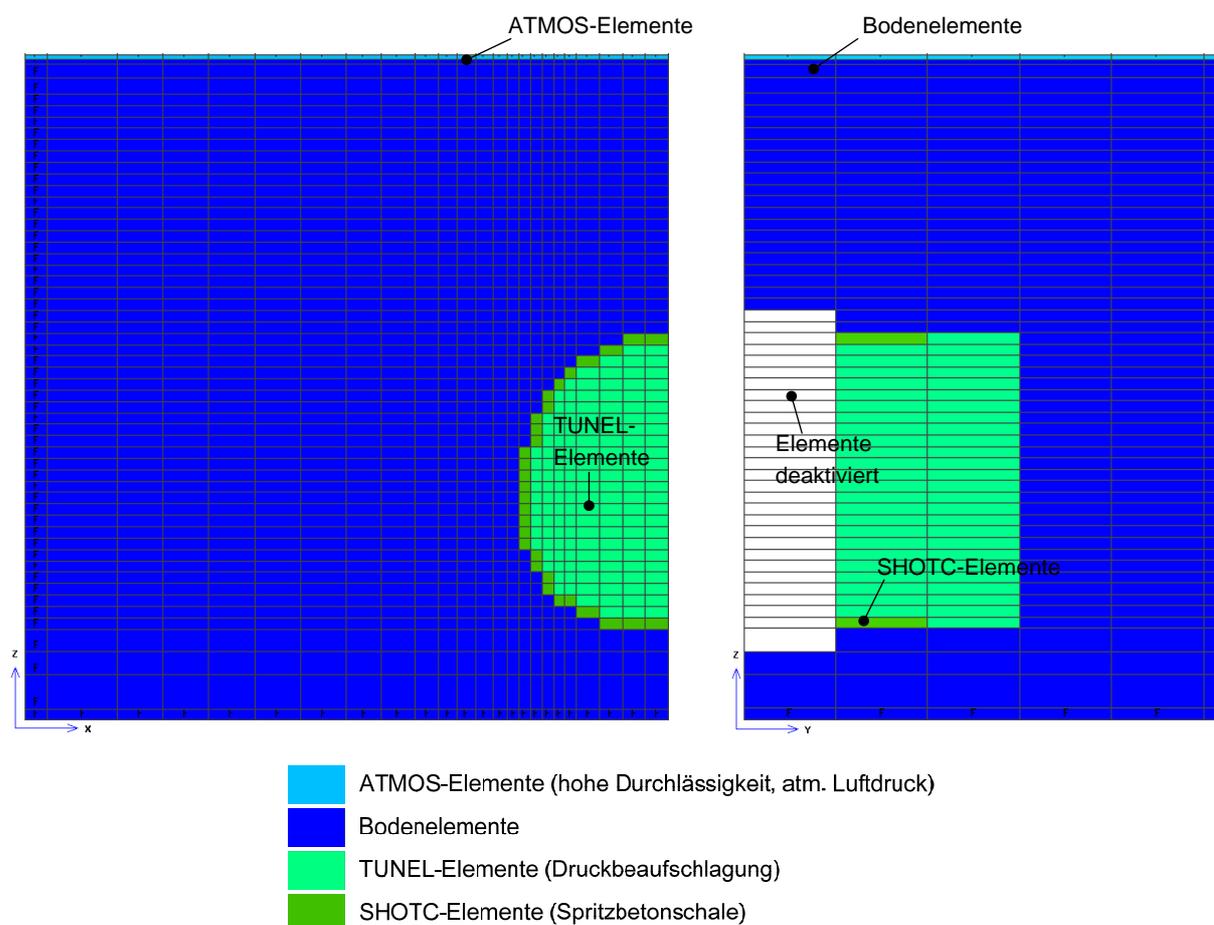


Abb. 5-5: Quer- und Längsschnitt des numerischen Modells

5.4 Berechnungsergebnisse

Die nachfolgenden Punkte beschreiben die Ergebnisse und Diskussion der durchgeführten Luftbedarfsberechnungen bzw. Vortriebssimulationen. Eine Zusammenstellung der Luftverluste ist in Tab. 5-2 enthalten.

5.4.1 Simulationsreihe 1 (Feldversuch 1)

Die Abb. 5-6 stellt die Luftverluste über die Ortsbrust der Simulation (a) bis (e) dar. Auffallend sind hierbei die großen Unterschiede der Luftverluste, von 25 l/min bis 70 l/min, sowie der rasche stationäre Strömungszustand. Mit zunehmendem Verlauf des Vortriebs bleibt die Ortsbrustströmung größenordnungsmäßig konstant. Die Begründung hierfür liegt in den gleichbleibenden Boden-, Druck- und Neigungsverhältnissen (horizontaler Vortrieb).

Der Unterschied von 15 m³/min im Luftvolumenstrom der Simulation (a) und (b) ist durch die höhere Tortosität $\tau = 0,5$ bei Simulation (a) begründet.

Der Differenz des Luftbedarfs der Simulationen (d) und (e) liegen wahrscheinlich in der geringeren intrinsischen Permeabilität bei Sim. (e). Da bei Betrachtung des unterschiedlichen Verlaufes der verwendeten Durchlässigkeitsfunktionen, die Funktion 14 (Sim. (e)) mit fortlaufender Entwässerung des Bodens eine geringere Luftdurchlässigkeit verglichen mit der Funktion 11 aufweist (vgl. 4.1.2). Ein weiterer Grund kann der wesentlich geringere Lufteintrittswert $p_0 = 0,628$ kPa bei Simulation (d) darstellen. Die Ursache für die noch niedrigeren Luftverluste der Simulation (c) beruht bei annähernd gleicher intrinsischer Permeabilität ebenfalls im Verlauf der angewendeten Luftdurchlässigkeitsfunktion (Funktion 9, vgl. 4.1.2).

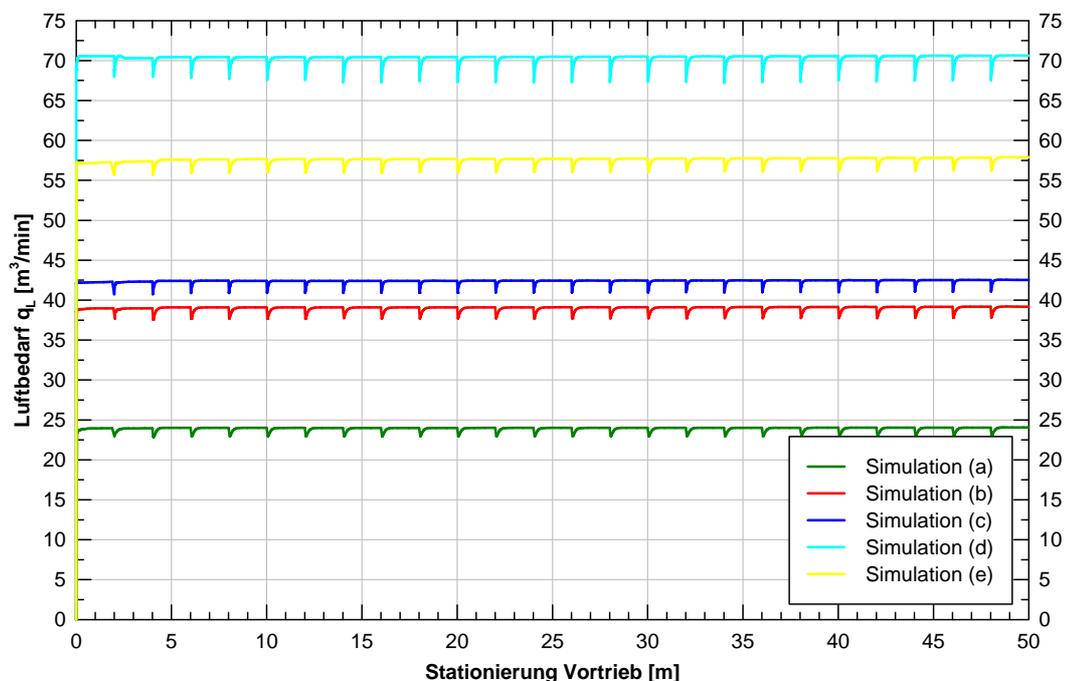


Abb. 5-6: Vergleich des Luftbedarfs über die Ortsbrust (Feldversuch 1)

Die Abb. 5-7 zeigt die Luftströmungen über die Laibungsfläche der ausgewählten Simulationen (a), (c) und (e). Die Verluste nehmen mit zunehmender Vortriebslänge linear zu und betragen zwischen 46 und 48 m³/min bei einer Stationierung von 50 m. Die geringen Diffe-

renzen der Luftverluste über die Laibungsfläche beruhen in der im Vergleich zum Boden relativ undurchlässigen Spritzbetonschale.

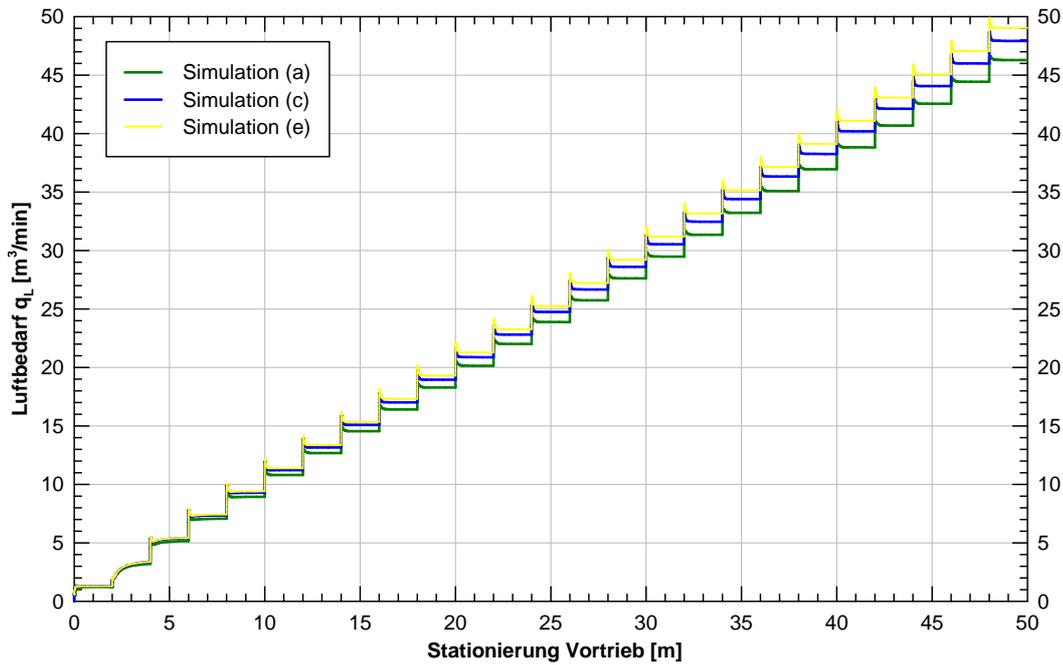


Abb. 5-7: Vergleich des Luftbedarfs über die Laibung (Feldversuch 1)

Die Abb. 5-8 zeigt die Luftdruckverteilung (links) und Luftsättigung (rechts) im Querschnitt für die Simulation (e) und Vortriebsstationierung von 50 m. Der Luftdruck erhöht sich im Bereich der Tunnelfirste und nimmt mit zunehmendem Abstand ab. Aus Abb. 5-8 (rechts) ist ersichtlich, dass die Luft im Ortsbrustbereich vorwiegend nach oben strömt. Die größte Luftsättigung beträgt dabei etwa 0,35 nahe der Geländeoberfläche. Theoretisch wäre eher eine hohe Luftsättigung an der Laibung der Firste zu erwarten.

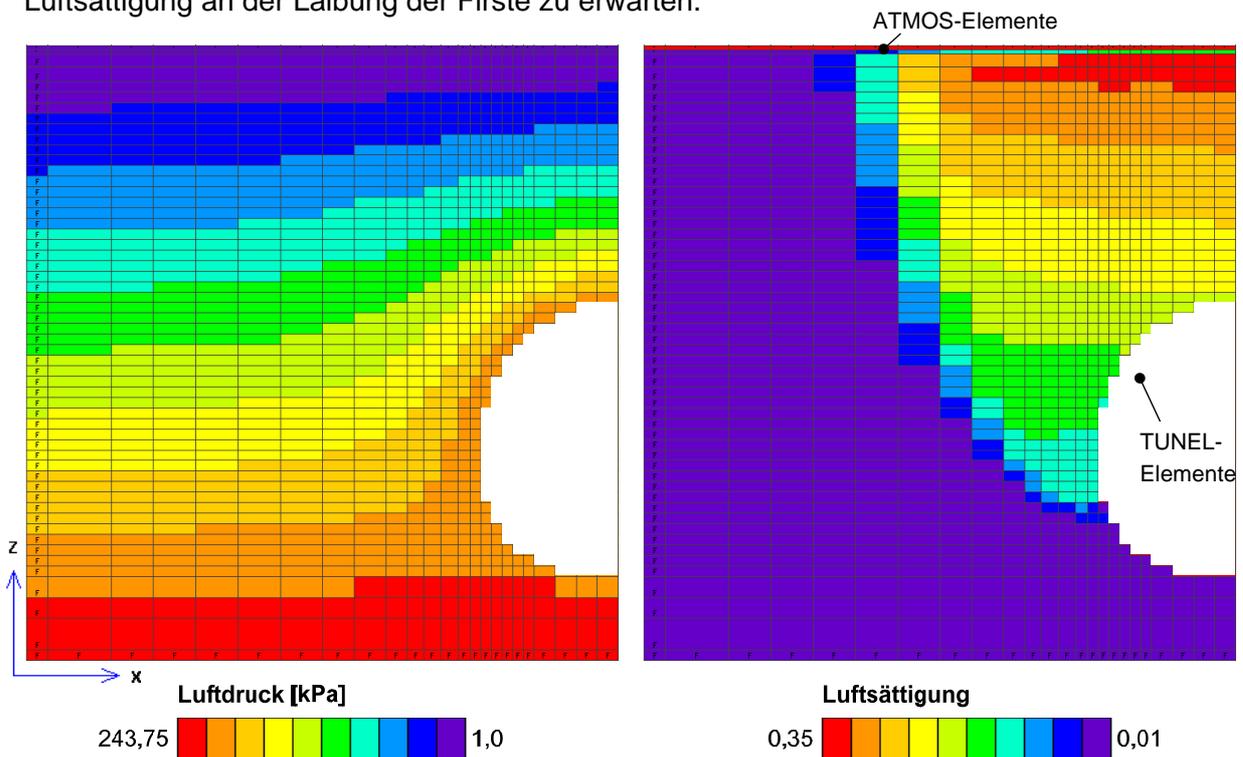


Abb. 5-8: Luftdruckverteilung und Luftsättigung im Querschnitt bei 50 m Vortriebslänge

In Abb. 5-9 ist die dazugehörige Verteilung im Längsschnitt ersichtlich. Im Bereich der Ortsbrust erhöht sich der Luftdruck (Abb. 5-9 (a)) und baut sich weiter hinten wieder ab.

Die Verteilung der Luftsättigung im Längsschnitt ist Abb. 5-9 (b) zu entnehmen. Die größte Luftsättigung bildet sich im Bereich der Ortsbrust aus. Auffallend ist die nur sehr geringe Luftsättigung, dort wo die Spritzbetonschale bereits eingebaut wurde. Die Ursache hierfür liegt im groben Unterschied der Durchlässigkeit des Bodens im Vergleich zur Spritzbetonschale.

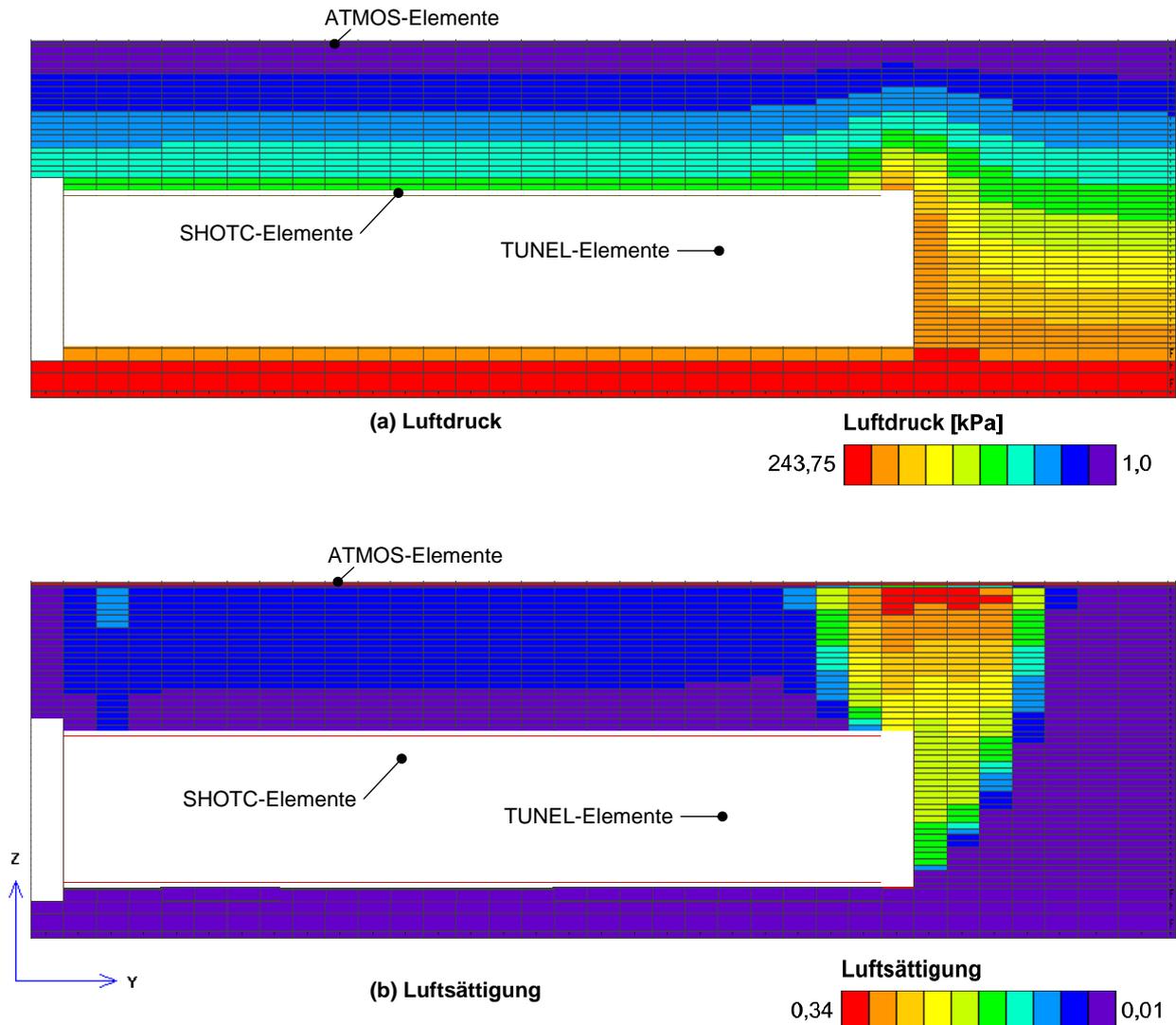


Abb. 5-9: Luftdruckverteilung (a) und Luftsättigung (b) im Längsschnitt in Symmetrieebene

5.4.2 Simulationsreihe 2 (Feldversuch 2)

Die Abb. 5-10 stellt die Luftverluste über die Ortsbrust dar. Diese sind mit Werten zwischen 0,08 bis 1,25 m³/min deutlich geringer als bei der Simulationsreihe 1. Mit zunehmendem Verlauf des Vortriebs bleibt die Ortsbrustströmung größenordnungsmäßig konstant. Die Begründung hierfür liegt in den gleichbleibenden Boden-, Druck- und Neigungsverhältnissen (horizontaler Vortrieb). Auffallend ist der langsame Zuwachs der Luftverluste bei den Simulationen (a) und (b). Dies liegt wahrscheinlich am Verlauf der gewählten Luftdurchlässigkeitsfunktion (Funktion 9), da die Durchlässigkeit im Bereich der Wasservollsättigung nur schwach zunimmt (vgl. 4.1.2). Der Größenunterschied von 0,45 m³/min ist in der unterschiedlichen Tortosität von 0,5 begründet.

Der Luftbedarf der Simulation (a) und (e) nimmt, trotz deutlich unterschiedlicher intrinsischer Permeabilität des Bodens, in etwa dieselbe Größenordnung ein.

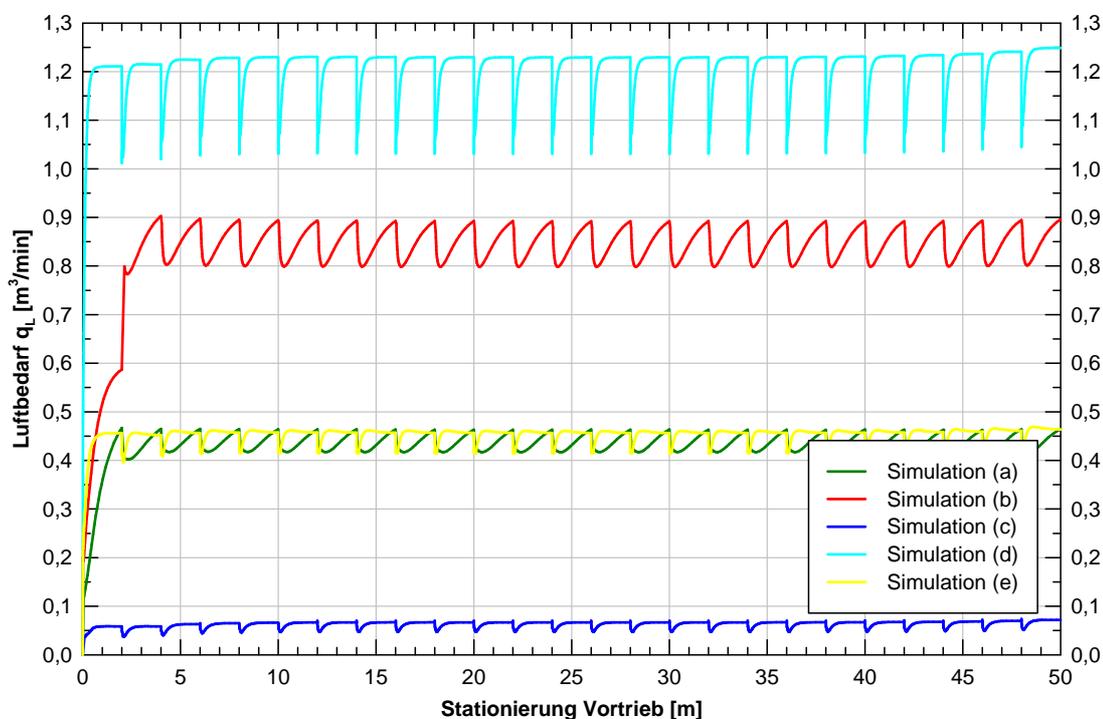


Abb. 5-10: Vergleich des Luftbedarfs über die Ortsbrust (Feldversuch 2)

Die Abb. 5-11 zeigt die Luftströmungen über die Laibungsfläche der Simulationen (a) bis (e). Die Verluste nehmen mit zunehmender Vortriebslänge linear zu und erreichen Werte zwischen 15 und 36 m³/min bei einer Stationierung von 50 m.

In dieser Gegenüberstellung wird der Einfluss des Bodens auf den Luftströmung über die Laibungsfläche deutlich. Der nichtlineare Anstieg des Luftvolumenstromes bei jedem Vortriebsschritt weist auf den reduzierten Einfluss der Spritzbetonschale im Vergleich zum umgebenden Boden hin. Die Simulationen (a) und (b), die nur auf den abgeschätzten Parametern beruht, ergeben deutlich geringere Luftverluste als die Simulationen mit den optimierten Parametern des Feldversuches.

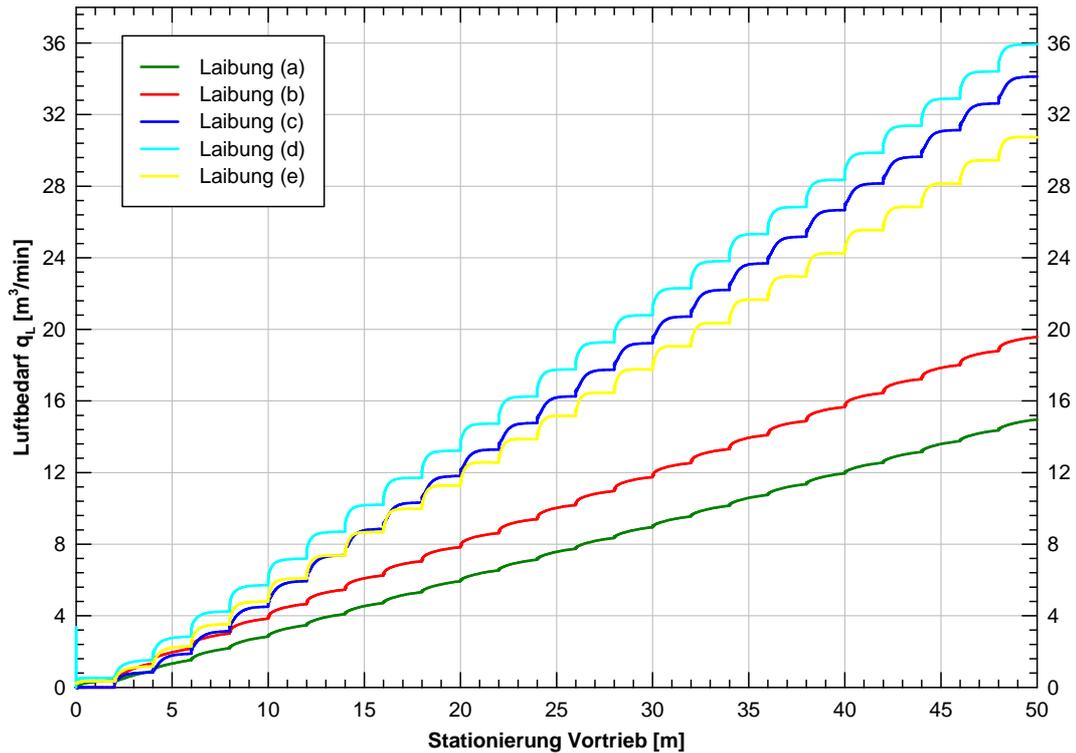


Abb. 5-11: Vergleich des Luftbedarfs über die Laibung (Feldversuch 2)

5.4.3 Simulationsreihe 3 (Feldversuch 3)

Die Abb. 5-12 stellt die Luftverluste über die Ortsbrust dar. Auffallend sind hierbei die geringen Luftverluste von 0,05 l/min bis 0,35 l/min, sowie der stetige Anstieg beim jeweiligen Vortriebsschritt, was auf eine nur langsam stattfindende Verdrängung des Porenwassers deutet. Im Verlauf der einzelnen Abschlagslänge wird aber kein stationärer Zustand erreicht.

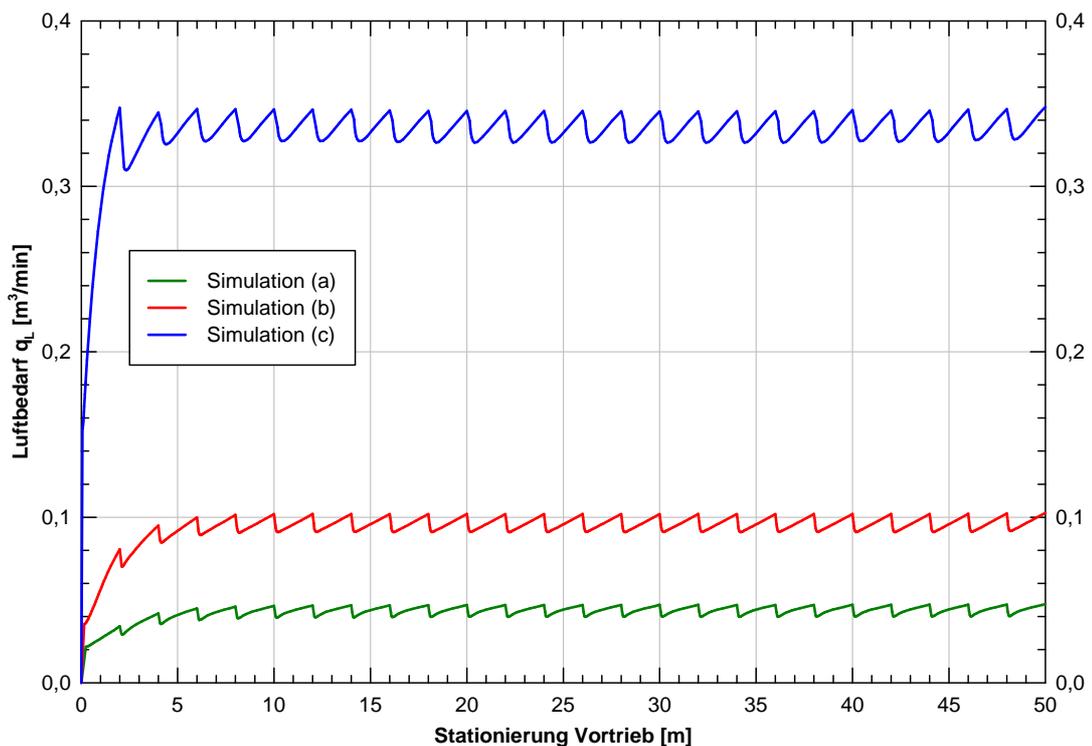


Abb. 5-12: Vergleich des Luftbedarfs über die Ortsbrust (Feldversuch 3)

Mit zunehmendem Verlauf des Vortriebs bleibt die Ortsbrustströmung größenordnungsmäßig konstant. Die Begründung hierfür liegt in den gleichbleibenden Boden-, Druck- und Neigungsverhältnissen (horizontaler Vortrieb).

Die Unterschied in der Ortsbrustströmung bei den Simulation (b) und (c) zeigt den Einfluss der Tortosität, die bei (c) $\tau = 0$ ist, und bei der Simulation (b) $\tau = 0,5$.

Die Abb. 5-13 zeigt die berechneten Luftströmungsmengen über die Laibungsfläche der Simulationen (a) bis (c). Die Verluste nehmen mit zunehmender Vortriebslänge linear zu und erreichen bei der Simulation (c) ein Maximum von $10,3 \text{ m}^3/\text{min}$ bei einer Stationierung von 50 m.

In dieser Gegenüberstellung wird der zunehmend hohe Einfluss des Bodens auf die Luftverluste über die Laibungsfläche deutlich. Der nichtlineare des Luftvolumenstromes bei jedem Vortriebsschritt weist auf den nur mehr geringen Einfluss der Spritzbetonschale im Vergleich zum umgebenden Boden hin. Die vertikale intrinsische Durchlässigkeit des Bodens beträgt $K_v = 3,194 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ im Vergleich zur Spritzbetonschale mit $K = 7,0 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$.

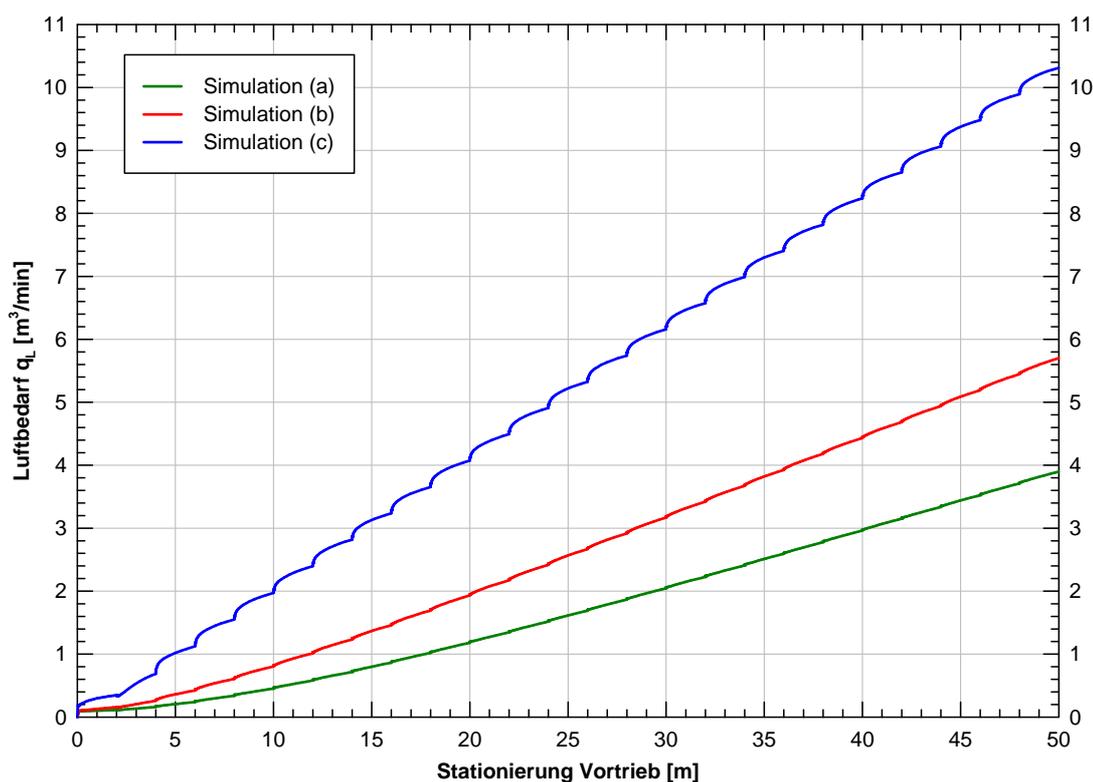


Abb. 5-13: Vergleich des Luftbedarfs über die Laibung (Feldversuch 3)

5.4.4 Vergleich des Luftbedarfs

Die Tabelle 5-2 erlaubt eine Übersicht der Luftverluste des simulierten Luftbedarfes. Zu beachten ist bei der Darstellung der Luftverluste über die Laibung, dass diese auf m^2 Laibungsfläche bezogen sind.

Bezeichnung		Luftverluste über die Ortsbrust q_o [m^3/min]	Luftverluste über die Laibung q_L [$\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{min}$]	Gesamtluftbedarf q_{ges} [m^3/min]
Simulationsreihe 1 (Feldversuch 1)	(a)	24,05	0,0327	70,33
	(b)	39,19	0,0337	86,85
	(c)	42,53	0,0339	90,45
	(d)	70,63	0,0347	119,66
	(e)	57,88	0,0347	106,91
Simulationsreihe 1 (Feldversuch 2)	(a)	0,46	0,0106	15,43
	(b)	0,90	0,0138	20,47
	(c)	0,07	0,0241	34,20
	(d)	1,25	0,0254	37,18
	(e)	0,46	0,0217	31,20
Sim.reihe 1 (Feldversuch 1)	(a)	0,05	0,0028	3,95
	(b)	0,10	0,0040	5,80
	(c)	0,36	0,0073	10,66

Tab. 5-2: Übersicht des simulierten Luftbedarfs

5.4.5 Schlussfolgerungen

Die numerischen Vortriebssimulationen zeigen den Einfluss der unterschiedlichen Böden auf die Luftverluste. Wie bereits aus vorangegangenen Darstellungen ersichtlich, sind große Unterschiede hinsichtlich der Luftverluste zu erkennen. Dabei kommt der Luftdurchlässigkeit der Spritzbetonschale mit ansteigender Durchlässigkeit der Böden eine bedeutendere Rolle zu. So zeigen die Luftverluste über die Laibungsfläche beim Feldversuch 1 zeigen keine wesentlichen Unterschiede zwischen den optimierten Parametern und den aus den ergänzenden Versuchen gewonnen Kennwerten.

Desweiteren wirken sich die Parameter Tortosität τ , intrinsische Permeabilität K und Lufteintrittswert p_0 sowie die verwendete Durchlässigkeitsfunktionen maßgebend auf die Berechnungsergebnisse der Vortriebssimulation aus.

Die Publikation von Arz et al. (1994) gibt für einen feinsandigen Boden Luftverluste über die Laibungsfläche in der Größenordnung von $0,015 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{min}$ bei einem Luftüberdruck von 1 bar. Die berechneten Luftverluste des Feldversuches 2 betragen zwischen $0,01$ und $0,02 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{min}$. Die bezogenen Luftverluste sind somit im Vergleich zu Arz et al. (1994) in etwa derselben Größenordnung.

Auffallend ist, dass in den Simulationen (c) bis (d) der Feldversuche 1 und 2 trotz der optimierten Parameter relativ große Unterschiede auftreten. Dies deutet darauf hin, dass trotz der optimierten Parameter keine eindeutige Beschreibung des Strömungszustandes möglich ist.

Bei der Luftbedarfsberechnung vom dritten Feldversuch wird der zunehmend hohe Einfluss des Bodens auf die Luftverluste über die Laibungsfläche deutlich. Der nichtlineare des Luftvolumenstromes bei jedem Vortriebsschritt weist auf den nur mehr geringen Einfluss der Spritzbetonschale im Vergleich zum umgebenden Boden hin. Der stetige Anstieg beim jeweiligen Vortriebsschritt deutet auf eine nur langsam stattfindende Verdrängung des Porenwassers hin. Im Verlauf der einzelnen Abschlagslänge wird aber kein stationärer Zustand erreicht. Desweiteren ergibt eine höhere Tortosität einen geringeren Luftvolumenstrom über die Ortsbrust sowie die Laibungsfläche.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Hauptthema der vorliegenden Arbeit war die Durchführung von Luftinjektionsfeldversuchen. In weiterer Folge sollen die Messergebnisse für eine Rückrechnung der für die Mehrphasenströmung zutreffenden Bodenparameter verwendet werden. Das Ziel der Luftinjektionsversuche und deren inverse Modellierung ist es, die gewonnenen Erkenntnisse auf den Tunnelbau unter Druckluft zu übertragen.

Im Kapitel zwei wurden zunächst allgemeine Punkte zur inversen Modellierung von Mehrphasenströmungsversuchen erläutert. Die grundlegenden Prinzipien der inversen Modellierung wurden präsentiert und mehrere verwendete Ansätze zur Extremwertsuche sowie die Bewertung des Ergebnisses einer Optimierung vorgestellt. Die Thematik einer inversen Modellierung wurde anhand einiger ausgewählter Beispiele dargelegt und die Erkenntnisse daraus näher beschrieben.

Das Kapitel drei behandelt die durchgeführten Luftinjektionsfeldversuche. Das Prinzip des Versuches ist eine Mehrphasenströmung aufgrund der Luftinjektion zu induzieren. Nach dem allgemeinen Versuchsaufbau folgt eine eingehende Beschreibung der verwendeten Messinstrumentierung. Danach wurden die Messergebnisse der Versuche vorgestellt.

Im vierten Kapitel wurde die inverse Modellierung und Interpretation der Feldversuche durchgeführt. In verschiedenen Abschnitten werden die verwendeten Programme erläutert und deren Kopplung untereinander beschrieben. Die inverse Modellierung der Feldversuche 1 und 2 mit verschiedenen Stoffgesetzen wurde vorgestellt. Für den Feldversuch 3 erfolgte aufgrund des auftretenden Ausbläses und des nur bei den Druckstufen 10 und 12,5 kPa repräsentativen Luftvolumenstroms eine verbale Interpretation. Um eine grundlegendere Interpretation der Feldversuche zu ermöglichen, wurden ergänzende Untersuchungen der Luftdurchlässigkeit und der Kapillarspannung-Sättigungs-Beziehung im Labor durchgeführt.

Aus der inversen Parameterbestimmung ist ersichtlich, dass (nur) die Implementierung zusätzlicher Luftdurchlässigkeitsfunktionen eine plausible Abbildung der Luftdurchlässigkeit im Feld ermöglicht. Dadurch kann eine ausreichend genaue Rückrechnung des gemessenen Luftvolumenstromes erreicht werden.

Die erfolgreich durchgeführten Versuche und deren inverse Modellierung zeigen, dass der Versuchsaufbau prinzipiell geeignet ist, ausreichend Messdaten zu liefern, um eine inverse Parameterbestimmung der Wasser- und Luftdurchlässigkeit zu gewährleisten. Für weitere Untersuchungen kann es aufgrund der groben Abweichungen hilfreich sein, die Messdaten der Wasserspannung in die inverse Modellierung mit einzubeziehen. Hierbei ist eine unterschiedliche Gewichtung der beiden Messwertreihen (Luftvolumenstrom und Wasserspannung) vorzunehmen, damit beide Größen denselben Einfluss auf die Berechnung der kleinsten Fehlerquadrate haben.

Der Versuchsaufbau der Luftinjektionsfeldversuche hat Verbesserungspotenzial, beispielsweise bei der Beseitigung des auftretenden Kondenswassers oder beim Einbau der Messsonden. Bei sandigen Böden ist ein fachgerechter Einbau von TDR-Sonden nur erschwert möglich. Die teils widersprüchlichen Ergebnisse stellen deren Verwendung bei diesem Versuch überhaupt in Frage.

Im Kapitel fünf folgten modellhafte numerischen Simulationen des Druckluftbedarfs für einen Tunnel in den verschiedenen Böden. Dazu wurden die aus der inversen Modellierung der Feldversuche bestimmten Parameter für die Mehrphasenströmungssimulation verwendet. Nach einer Einführung in den Tunnelbau unter Druckluft wurde die durchgeführte Modellbildung mit Eingangsparametern angeführt. Anschließend werden in diesem Kapitel die Berechnungsergebnisse der unterschiedlichen Simulationen diskutiert. Die zum Teil großen Abweichungen der Berechnungsergebnisse von Simulationen mit optimierten Parametern für denselben Versuchsboden zeigen, dass keine eindeutige Beschreibung des Strömungszustandes möglich ist.

Insgesamt wird aber für die numerische Luftbedarfsprognose durch die durchgeführten Feldversuche sicher ein weiterer Fortschritt erzielt. Es wird vorgeschlagen den Versuchsaufbau wie beschrieben weiter zu optimieren und weitere Versuchsreihen durchzuführen.

7 Verzeichnisse

7.1 Literatur

- Ansoult, M.; de Backer, L.W.; Declercq, M., 1985: Statistical relationship between apparent dielectric constant and water content in porous media. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49: 47-50.
- Arz, P.; Schmidt, H.G.; Seitz, J.; Semprich, S., 1994: Grundbau. Abschnitt B des Beton-Kalenders 1994, Teil II. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 487-729.
- Brooks, R.H.; Corey, A.T., 1964: Hydraulic properties of porous media. Colorado Univ., Hydrology paper No. 3.
- Burdine, N.T., 1953: Relative permeability calculations from pore size distribution data. *Petroleum Trans. Am. Inst. Mining Eng.*, 198: 71-77.
- Chen, J.; Hopmans, J.W.; Grismer, M.E., 1999: Parameter estimation of two-fluid capillary pressure-saturation and permeability functions. *Adv. Water Resour.*, Vol. 22, 479-493.
- Chinkulkijniwat, A., 2005: Multiphase Flow in Unsaturated Soils and the Induced Deformation with Respect to Compressed Air Tunnelling. Dissertation. Technische Universität Graz, Gruppe Geotechnik Graz, Österreich, Heft 27.
- Corey, A.T., 1954: The Interrelationship between gas and oil relative permeabilities. *Procedures Montly*, 38-41.
- Druckluftverordnung vom 4. Oktober 1972 (BGBl. I S. 1909), zuletzt geändert durch Artikel 6 der Verordnung vom 18. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2768).
- Durner, W.; Schultze, B.; Zurmühl, T., 1999: State-of-the-art in inverse modeling of inflow/outflow Experiments, In: van Genuchten, M.Th.; Leij, F.J.; Wu, L. (ed.) *Proc. Int. Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*, University of California, Riverside, CA., 661-681.
- Eching, S.O.; Hopmans, J.W.; Wendroth, O., 1994: Unsaturated Hydraulic Conductivity from Transient Multistep Outflow and Soil Water Pressure Data. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:687-695.
- Finsterle, S., 2004: Multiphase inverse modeling: Review and iTOUGH2 applications. *Vadose Zone J.*, 3: 747-762.
- Fredlund D.G.; Rahardjo, H., 1993: *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley&Sons, New York.
- Gardner, W. R., 1958: Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from water table. *Soil Sci.*, 85: 228-232.
- van Genuchten, M.Th., 1980: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 892-898.

- Hwang, S.I.; Powers, S.E., 2003: Estimating unique soil hydraulic parameters from sandy media from multistep outflow experiment. *Adv. Water Resour.*, Vol. 26, 445-456.
- IMKO Micromodultechnik GmbH, 2009: TRIME®-PICO 64/32 Manual. IMKO Micromodultechnik GmbH Ettlingen, Version June 2009.
- Kammerer, G., 2000: Experimentelle Untersuchungen von Strömungsvorgängen in teilgesättigten Böden und Spritzbetonrissen im Hinblick auf den Einsatz von Druckluft im Tunnelbau. Technische Universität Graz, Gruppe Geotechnik Graz, Österreich, Heft 8.
- Kosugi, K., 1994: Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention. *Water Resour. Research*, 30: 891-901.
- Kosugi, K., 1996: Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. *Water Resour. Research*, 32: 2697-2703.
- Lu, N.; Likos, W.J., 2004: *Unsaturated Soil Mechanics*. John Wiley&Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Meier, J., 2009: Parameterbestimmung mittels inverser Verfahren für geotechnische Problemstellungen. Dissertation, Bauhaus Universität Weimar, Schriftenreihe Geotechnik, Heft 19.
- Mous, S.L.J., 1993: Identification of the movement of water in unsaturated soils: the problem of identifiability of the model. *J. Hydrol.*, 143: 153-167.
- Mualem, Y., 1976: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12: 513-522.
- Optiserve GbR., 2000: Bedienungsanleitung Volumenstrom-Messgeräte VSM-02 / VSM-3K für technische / medizinische Gase. Optiserve GbR. Heilbronn.
- Paltineanu, I.C.; Starr, J.L.; Timlin, D.J., 1995: Preferential water flow through corn canopy and soil surface. *Agron. Abstr.* pp. 194.
- Poeter, E.P.; Hill, M.C., 1998: Documentation of UCODE, A Computational Code for Universal Inverse Modeling. U.S. Geological Survey Water Resource Investigations Report 98-4080, Reston, V.A.
- Poeter, E.P.; Hill, M.C.; Banta, E.R.; Mehl, S.; Christensen, S., 2005: UCODE_2005 and Six Other Computer Codes for Universal Sensitivity Analysis, Calibration, and Uncertainty Evaluation. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A11. 283p.
- Pruess, K.; Oldenburg, C.; Moridis, G., 1999: TOUGH2 User's Guide. Version 2.0. Earth Sciences Division. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Scapozza, I., 2002: Untersuchungen zum Verhalten einer Kombinationsbarriere aus Asphalt auf mineralischer Trag- und Dichtungsschicht. Dissertation. ETH Zürich.

- Sentek Pty Ltd., 2006: EnviroScan Solo – Hardware Manual. Sentek Pty Ltd., Version 1.0.
- Stacheder, M., 1996: Die Time Domain Reflectometry in der Geotechnik - Messung von Wassergehalt, elektrischer Leitfähigkeit und Stofftransport. Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, 40.
- Stark, R.F.; Öttl, G.; Hofstetter, G.; Kammerer, G.; Semprich, S., 1999: Tunneling under Compressed Air – Practical Experiences, Experimental Investigations and Finite Element Modelling. Proc. 18th Int. Association for Hydraulic Research (IAHR) Congress, Institut für Hydraulik und Hydrologie (Hrsg.), TU Graz, 019.
- Steger, G., 2004: Implementierung der Vortriebssequenz in ein räumliches numerisches Modell eines Tunnelvortriebs unter Druckluft zur Ermittlung von Luftströmungsvorgängen. Diplomarbeit, Institut für Bodenmechanik und Grundbau, TU Graz.
- Steger, G.; Semprich, S., 2005: Numerische Erstellung von Luftbedarfsprognosen für den Tunnelbau unter Druckluft. In: Verlag Glückauf GmbH (Hrsg.): Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), S. 263-270, Berlin, (Geotechnik 28 (2005), Nr. 4).
- Steger, G., 2010: Experimental and Numerical Investigation of Unsaturated Soils with Application to Tunneling under Compressed Air. Dissertation, Institut für Bodenmechanik und Grundbau, TU Graz.
- Topp, G.C.; Davis, J. L.; Annan, A. P., 1980: Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. Water Resour. Res., 16(3): 574–582.
- UMS GmbH München, 2009: Bedienungsanleitung für T4/T4e Druckaufnehmer-Tensiometer. UMS München, Version 06/2009.

7.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Teilgesättigter Boden als Vierphasensystem (Steger 2004)	11
Abb. 2-2: Verteilung der drei Bestandteile des Bodens und kontinuumsmechanische Betrachtungsweise (Stark et al. 1999)	12
Abb. 2-3: Kapillarspannungs-Sättigungsbeziehung	12
Abb. 2-4: Relative Durchlässigkeits-Sättigungsbeziehung	13
Abb. 2-5: Schema der Berechnung von Zielfunktionswerten für Inverse Modellierungen (Meier 2009)	15
Abb. 2-6: Versuchsaufbau für einen mehrstufigen Durchströmungsversuch (Chen et al. 1989)	20
Abb. 3-1: Versuchsaufbau der Feldversuche (Grundriss und Schnitt).....	24
Abb. 3-2: Geografische Lage der Feldversuche (aus www.salzburg.gv.at)	25
Abb. 3-3: Kornverteilungskurve der Versuchsböden	25
Abb. 3-4: Übersicht der Versuchsböden	26
Abb. 3-5: Aufbau eines Tensiometers T4-120 UMS GmbH München (2009).....	28
Abb. 3-6: Offset-Korrektur für nicht horizontale Einbaulage UMS GmbH München (2009)..	29
Abb. 3-7: TDR-Sonde TRIME® - PICO 32	30
Abb. 3-8: Verlauf und Auswertung der TDR-Reflexionskurve von TRIME – Technik (Stacheder 1996).....	31
Abb. 3-9: Messwertverarbeitung beim TRIME® - Verfahren (Stacheder 1996).....	31
Abb. 3-10: Enviro Modulare Bodenfeuchteprofilsonde	32
Abb. 3-11: Einbau und Messprinzip (Sentek Pty Ltd. 2006) einer Enviro Modulare Bodenfeuchtesonde.....	33
Abb. 3-12: Volumenstrom-Messgerät VSM-02	34
Abb. 3-13: Messeinrichtung des Luftvolumenstromes	34
Abb. 3-14: Messschrank mit DL2e Datenlogger im Feld	35
Abb. 3-15: Einbau der Messgeräte und Versuchsaufbau	36
Abb. 3-16: Luftvolumenstrom beim Feldversuch 1	38
Abb. 3-17: Wasserspannung beim Feldversuch 1	39
Abb. 3-18: Luftsättigung beim Feldversuch 1	40
Abb. 3-19: Wassertemperatur beim Feldversuch 1	41
Abb. 3-20: Luftvolumenstrom beim Feldversuch 2	42
Abb. 3-21: Wasserspannung beim Feldversuch 2	42
Abb. 3-22: Luftsättigung beim Feldversuch 2	43
Abb. 3-23: Wassertemperatur beim Feldversuch 2	43
Abb. 3-24: Luftvolumenstrom (Druckstufe 5 kPa – 50 kPa) beim Feldversuch 3	44
Abb. 3-25: Hebungen beim Feldversuch 3	45
Abb. 3-26: Gemessene Hebungen im Kiesbett beim Feldversuch 3	45

Abb. 3-27: Wasserspannung beim Feldversuch 3	46
Abb. 3-28: Luftsättigung beim Feldversuch 3	47
Abb. 3-29: Wassertemperatur beim Feldversuch 3	47
Abb. 3-30: Vergleich der Luftvolumenströme.....	48
Abb. 4-1: Charakteristischer Querschnitt des numerischen Grundmodelles (Ausschnitt)	49
Abb. 4-2: Vereinfachtes Flussdiagramm von FT2009.....	50
Abb. 4-3: Darstellung der implementierten Luft- und Wasserdurchlässigkeitsfunktionen	52
Abb. 4-4: Ablaufschema von UCODE (nach Poeter & Hill 1998).....	54
Abb. 4-5: Ablauf der Optimierung mit FT2009 und UCODE_2005	56
Abb. 4-6: Vergleich theoretischer und gemessener Luftvolumenstrom der eindimensionalen Luftströmungsversuche	58
Abb. 4-7: Kapillarspannung-Sättigungs-Kurven der Versuchsböden.....	59
Abb. 4-8: Optimierter Luftvolumenstrom für die Funktion 9 – Feldversuch 1.....	60
Abb. 4-9: Optimierter Luftvolumenstrom für die Funktion 11 – Feldversuch 1.....	61
Abb. 4-10: Optimierter Luftvolumenstrom für die Funktion 14 – Feldversuch 1.....	62
Abb. 4-11: Optimierter Luftvolumenstrom für die Funktion 9 – Feldversuch 2.....	64
Abb. 4-12: Optimierter Luftvolumenstrom für die Funktion 11 – Feldversuch 2.....	65
Abb. 4-13: Optimierter Luftvolumenstrom für die Funktion 14 – Feldversuch 2.....	66
Abb. 4-14: Luftvolumenstrom (Druckstufe 5 kPa – 20 kPa) beim Feldversuch 3	68
Abb. 4-15: Wasserspannung aus inverser Modellierung bei Feldversuch 1 – Fkt. 14 – Var. 2	69
Abb. 5-1: Druckdifferenz Δp an der Ortsbrust und an der Laibung des Tunnels (Steger 2004)	71
Abb. 5-2: Bodenentwässerung durch Luftströmung bei der NÖT unter Druckluft (Steger 2004)	72
Abb. 5-3: Einsetzbarkeit der Druckluft in Abhängigkeit des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts (Arz et al. 1994).....	72
Abb. 5-4: Geometrie und Bodeneigenschaften des Modellvortriebes.....	73
Abb. 5-5: Quer- und Längsschnitt des numerischen Modells	75
Abb. 5-6: Vergleich des Luftbedarfs über die Ortsbrust (Feldversuch 1).....	76
Abb. 5-7: Vergleich des Luftbedarfs über die Laibung (Feldversuch 1).....	77
Abb. 5-8: Luftdruckverteilung und Luftsättigung im Querschnitt bei 50 m Vortriebslänge	77
Abb. 5-9: Luftdruckverteilung (a) und Luftsättigung (b) im Längsschnitt in Symmetrieebene	78
Abb. 5-10: Vergleich des Luftbedarfs über die Ortsbrust (Feldversuch 2).....	79
Abb. 5-11: Vergleich des Luftbedarfs über die Laibung (Feldversuch 2).....	80
Abb. 5-12: Vergleich des Luftbedarfs über die Ortsbrust (Feldversuch 3).....	80
Abb. 5-13: Vergleich des Luftbedarfs über die Laibung (Feldversuch 3).....	81

7.3 Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Übersicht über die Kategorisierung der Optimierungsverfahren Meier (2009)	17
Tab. 3-1: Kenngrößen der Versuchsböden	26
Tab. 3-2: Messbereich der verwendeten Messdüsen	33
Tab. 3-3: Genauigkeit der Messinstrumentierung	37
Tab. 4-1: Gefittete Parameter der Kapillarspannung-Sättigungs-Kurve	59
Tab. 4-2: Übersicht der inversen Modellierung – Feldversuch 1	63
Tab. 4-3: Übersicht der inversen Modellierung – Feldversuch 2	67
Tab. 5-1: Übersicht der Eingangsparameter und Simulationsreihen	74
Tab. 5-2: Übersicht des simulierten Luftbedarfs	82

8 Anhang

Datenträger der vorliegenden Masterarbeit und der durchgeführten Berechnungen.