

**Vertikaler Erdstofftransport
beim
Trockendrehbohren mit langer Schnecke im
Mantelrohr
in bindigem Boden**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Harald Schneider

aus Baden-Baden

Tag der mündlichen Prüfung: 23.Juli 2009

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Fritz Gehbauer M.S.

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Manfred Weber

Karlsruhe 2009

Kurzfassung

Ein wichtiger Arbeitsbereich des Spezialtiefbaus befasst sich mit der Herstellung von Großbohrpfählen aus Stahlbeton zu Gründungs- oder Stützzwecken. Ein vergleichsweise neues Herstellungsverfahren dafür ist das „Trockendrehbohren mit langer Schnecke im Mantelrohr“ (BolSiM). Es zeichnet sich – geeignete Untergrundverhältnisse vorausgesetzt – durch hohe Leistungswerte (bzgl. des Baufortschritts) und damit durch große Wirtschaftlichkeit aus. Allerdings beeinflusst die Interaktion zwischen den Stahloberflächen der Werkzeuge und dem bearbeiteten Boden den Verfahrenserfolg dabei in besonderem Maße.

Die verfahrenstechnische Grundlage des BolSiM ist eine kontinuierliche „Senkrechtschneckenförderung“ des Bohrguts innerhalb des Mantelrohres mit entsprechendem kontinuierlichen Materialaustrag am oberen Ende. Der Materialfluss hängt dabei stark vom Fördergut sowie diversen Förderparametern ab und ist beim Bohren bindiger Böden noch mit sehr großen Unsicherheiten behaftet. Für den zugrunde liegenden Erdstoffförderprozess und die verantwortlichen Fördermechanismen gibt es noch keine wissenschaftliche Erklärung. Das Verfahren wird daher bislang nach dem Prinzip *Trial and Error* betrieben wodurch immer wieder auch Misserfolge auftreten.

In der vorliegenden Arbeit werden neben theoretischen Betrachtungen zur Erdstoffförderung beim BolSiM insbesondere auch praktischer Versuche an einem neuen Modellversuchsstand präsentiert. Über die Fördereigenschaften im bisher praktizierten Verfahren hinaus werden dabei auch Modifikationen wie die Unterstützung der Förderung durch Druckluft oder die Anwendung elektrokapillarer Effekte untersucht.

Nach einer Beschreibung des Verfahrens und der dabei auftretenden Probleme wird zunächst versucht, die Förderung beim BolSiM anhand der aus der Fördertechnik bekannten Grundlagen zu erklären. Das Verfahren wird dabei analog zu herkömmlichen Senkrechtschneckenförderern betrachtet wobei sich schnell abzeichnet, dass für die Förderwirkung beim BolSiM noch andere Mechanismen zugrunde gelegt werden müssen. Es werden daher weitere grundsätzliche Überlegungen zu den spezifischen Eigenheiten des Verfahrens und deren möglichen Auswirkungen auf den Förderprozess angestellt.

Im Weiteren werden verschiedene Grundlagen zusammengetragen, welche für eine versuchstechnische Untersuchung und Betrachtung der Förderung beim BolSiM sinnvoll erscheinen. Hierzu zählen insbesondere auch Versuche zur Reibung zwischen Stahloberflächen und dem später für Bohrversuche verwendeten bindigen Boden sowie praktische Voruntersuchungen zu den Auswirkungen elektrokapillarer Effekte bei der Bearbeitung des Versuchsbodens mit Stahlwerkzeugen.

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt dann in der Konzeption und Konstruktion eines geeigneten Bohrversuchsstandes zur Untersuchung des Erdstoffförderprozesses im Modellmaßstab, sowie in der Durchführung mehrerer Reihen von Bohrversuchen. Anhand der Auswertung diverser Versuche mit unterschiedlichen geometrischen und maschinentechnischen Parametern sowie unterschiedlicher Bodenkonsistenz wird schließlich ein qualitatives Fördermodell für das BolSiM entwickelt, mit welchem sich alle auftretenden Beobachtungen zur Förderung erklären lassen. Dies schließt auch das in der Praxis immer wieder beobachtete "Verstopfen" der Bohrschnecke bei "ungünstigen" Randbedingungen ein.

Es zeigt sich, dass die Förderung beim BolSiM letztlich nur wegen besonderer spezifischer Eigenschaften des Förderguts „Erdstoff“ möglich ist. In Abhängigkeit verschiedener Parameterkonstellationen bilden sich unterschiedliche *Förderarten* aus, welche Einfluss auf die Förderwirkung und die auftretenden Drehmomente nehmen. Es können hier vier unterschiedliche Haupt-Förderarten beobachtet und beschrieben werden. Die aktive Überführung in eine jeweils andere Förderart ist durch geeignete maschinentechnische Maßnahmen und Betriebsparameter möglich und kann ggf. in der Praxis zur Verbesserung der Förderwirkung eingesetzt werden.

Abstract

An important field in special foundation construction deals with the manufacturing of large bore piles made of reinforced concrete for foundations and support. A relatively new manufacturing process used is „dry rotary drilling with long auger in column tubes“(BolSiM). Assuming that the underground has suitable conditions, it is known for its high performance (concerning construction progress) and a resulting high economic efficiency. However, the interaction between the instruments' steel surfaces and the processed ground largely influences the success of the procedure.

The procedural background of the BolSiM is a continuous “vertical auger extraction” of the cuttings within the column tube with a corresponding continuous discharge at the top end. The flow of discharge strongly depends on the transported material as well as different transport parameters and is not stable when drilling cohesive ground. So far there are no scientific explanations for the underlying cutter soil extraction process and the responsible extraction mechanisms. Therefore the procedure has been based on 'trial and error' which has over and over lead to disappointing outcomes.

This work presents theoretical views on cutter soil extraction processes with BolSiM and especially practical trials at a new model experiment rig. In addition to the transportation characteristics in the process used so far, modifications such as supporting the extraction with pressured air or by using electrocapillary effects are studied.

After a description of the process and the occurring problems the extraction with BolSiM is explained on the basis of the basic principles of materials handling technology. The process is examined analog to the conventional vertical auger extractors in which it becomes apparent that the effectiveness concerning the extraction has to be based on different mechanisms for BolSiM. Therefore, further basic considerations are made on the specific characteristics of the procedure and their possible impact on the extraction process.

Furthermore, different basic principles are collected which seem sensible for an experimental analysis and observation of extracting with BolSiM. This particularly includes experiments on the friction between steel surfaces and the cohesive ground

later used for the drilling experiments as well as practical preliminary analyses on the impact of electrocapillary effects when working the trial soil with steel tools.

The main focus of the work lies in the conception, design and construction of a suitable experimental drilling rig to test the cutter soil extraction processes in a model scale as well as the accomplishment of several drilling test runs. On the basis of the analysis of several experiments with different geometrical and technical parameters as well as different soil consistencies a qualitative extraction model is developed which is able to explain all occurrences concerning the extraction during the drilling. This also includes the common phenomenon of the 'clogging' of the auger in awkward conditions.

It is shown that the extraction with BolSiM is only possible due to special specific characteristics of the extracted cutter soil. Depending on different parameter constellations different extraction types emerge which have an influence on the extraction impact and the occurring auger torques. Four different main extraction descriptions are surveyed and described. The active transformation from one to the other is made possible by using appropriate technical measures and operating parameters and can probably be set into practice to improve extraction impact.

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb der Universität Karlsruhe und basiert in weiten Teilen auf Erkenntnissen aus dem Forschungsprojekt „Schnelles Scheren“. Für die finanzielle Unterstützung sei hier der Deutschen Forschungsgemeinschaft gedankt. Mein Dank geht an dieser Stelle auch an die Bauer AG in Schrobenhausen, welche sowohl durch Anregungen zur Problemstellung, als auch durch finanzielle Unterstützung für den Bau des Bohrversuchsstandes zum Gelingen beigetragen hat.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Fritz Gehbauer, M.S. für die Betreuung der Arbeit. Er hat mir die Möglichkeit gegeben die Arbeit parallel zu den sonstigen vielfältigen Aufgaben am Institut auch über längere Zeit abzuschließen und die entsprechende Geduld bewiesen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Manfred Weber danke ich herzlich für die Übernahme des Korreferates und die guten Fachgespräche und Diskussionen.

Nicht zuletzt möchte ich allen Kollegen und Mitarbeitern am Institut, die mich unterstützt und ermutigt haben, meinen Dank sagen. Hierin eingeschlossen sind insbesondere auch die Mitarbeiter der Werkstatt sowie die „studentischen Helfer“. Stellvertretend genannt seien Herr Dirk Reusch, für viele fruchtbare Diskussionen und Herr Marcel Zembrot, für die unermüdliche kompetente Unterstützung beim Bau des Bohrversuchsstandes.

Karlsruhe, im Juli 2009

Harald Schneider

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1 Einleitung	1
1.1 Problemkreis.....	1
1.2 Zielsetzung	2
Kapitel 2 Bohren mit langer Schnecke im Mantelrohr (BolSiM)	4
2.1 Allgemeines.....	4
2.1.1 Verfahrensidee	4
2.1.2 Begriffe / Abgrenzung.....	5
2.2 Verfahrensbeschreibungen	6
2.2.1 Vorbemerkung.....	6
2.2.2 Bohrgeräte	6
2.2.3 Herkömmliche Trockendrehbohrverfahren.....	7
2.2.4 BolSiM	10
2.3 Erfahrungen / Probleme.....	13
2.4 Vorüberlegungen zu den Fördermechanismen.....	15
Kapitel 3 Grundlagen	18
3.1 Bodentechnische Hintergründe	18
3.2 Drehendes Bohren im Lockergestein	22
3.2.1 Vorbemerkung.....	22
3.2.2 Lösen des Bodens / Bohrfestigkeit.....	22
3.3 Elektrokapillarität	26
3.4 Bodenconditionierung	29
3.4.1 Vorbemerkung.....	29
3.4.2 Allgemeines.....	29
3.4.3 Tonsuspensionen.....	32
3.4.4 Polymere	33
3.4.5 Schäume	34

Kapitel 4 Theorie der Schneckenförderung	40
4.1 Allgemeines zur Schneckenförderung.....	40
4.2 Schneckenförderung von Schüttgütern.....	41
4.2.1 Vorbemerkung.....	41
4.2.2 Einzelkörperbetrachtung	42
4.2.3 Mehrkörperbetrachtung.....	46
4.2.4 Weitere Aspekte aus der Schüttgutförderung	51
4.3 Schneckenförderung plastischer Massen.....	55
4.3.1 Förderung bei Blockströmung.....	55
4.3.2 Problematik des Wandgleitens.....	60
4.3.3 Weitere Aspekte im Hinblick auf das BolSiM.....	61
4.4 Förderverhalten beim BolSiM aus der Theorie.....	62
Kapitel 5 Versuchseinrichtungen	65
5.1 Versuchsrinnen	65
5.1.1 Scherrinne	65
5.1.2 Schneidrinne.....	67
5.2 Bohrversuchsstand.....	68
5.3 Versuchsboden	73
5.3.1 Auswahl.....	73
5.3.2 Parameter und Probeneinbau.....	74
5.3.3 Bodeneinbau in die Versuchsrinne.....	78
Kapitel 6 Rinnenversuche	80
6.1 Versuche in der Scherrinne	80
6.2 Vorversuche zur Elektrokapillarität	84
Kapitel 7 Untersuchungen am Bohrversuchsstand	88
7.1 Überlegungen zur Abbildung des BolSiM im Modell	88
7.1.1 Anforderungen	88
7.1.2 Übertragung in den Modellmaßstab.....	90
7.1.3 Versuchsparameter im Modellmaßstab.....	92
7.2 Vorbemerkung zu den Bohrversuchen	94

7.2.1	Allgemeines.....	94
7.2.2	Parametervariationen.....	95
7.2.3	Grundlegendes zur Förderung im Versuch	96
7.3	Versuche zum Förderverhalten im Standardverfahren.....	97
7.3.1	Indexversuche und Definitionen	97
7.3.2	Einflüsse von Maschinenparametern	103
7.3.3	Einfluss der Konsistenz.....	114
7.4	Versuche zum Förderverhalten bei Modifizierung des Verfahrens	117
7.4.1	Wasserzugabe und Luftspülung	117
7.4.2	Mantelrohr mit Vertikalleisten (MRV)	121
7.4.3	Beaufschlagung mit elektrischem Gleichstrom (mit MRV)	123
7.5	Zusammenstellung der Versuchsergebnisse.....	127
Kapitel 8	Modellbetrachtung zum Förderverhalten	129
8.1	Allgemeines.....	129
8.2	Beobachtungen zur Förderung	130
8.3	Fördermodell	131
8.3.1	Standardförderung.....	131
8.3.2	Rollkörperförderung.....	133
8.3.3	Förderproblem bei Wasserzutritt.....	134
8.4	Förderarten	135
Kapitel 9	Zusammenfassung / Ausblick	138
Anhang	140
Symbole	142
Abbildungen	145
Literatur	149

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Problemkreis

Am Anfang der Erstellung jeglichen Bauwerkes steht die Konfrontation mit dem Untergrund auf bzw. in welchem das Bauwerk gegründet werden soll. Die dabei zu bewerkstellenden baubetrieblichen Aufgaben sind den Arbeitsfeldern des Erd- und Tiefbaus bzw. dem Spezialtiefbau zuzuordnen.

Die Anforderung immer komplexer werdende Bauwerke bei schwierigen Untergrundgegebenheiten sicher zu gründen, hat der Entwicklung und Verbesserung von Spezialtiefbauverfahren in den letzten Jahrzehnten rasanten Vorschub geleistet. Während der einschlägige Umgang mit körnigen, „rolligen“ Böden weitgehend als gut beherrschbar bezeichnet werden kann, stellt die Bearbeitung von sogenannten „bindigen Erdstoffen“ mit Baumaschinen immer wieder eine besondere Herausforderung dar. Begründet liegt dies im vergleichsweise großen Anteil an feinsten Bodenpartikeln (Tonmineralen) bei denen Oberflächeneffekte eine große Rolle für strukturbildende Vorgänge spielen. Solche Vorgänge sind in diesem Zusammenhang noch weitgehend unerforscht. Diese Strukturbildung beeinflusst jedoch das Materialverhalten und damit die Interaktion zwischen Werkzeug und Boden bei der maschinellen Bearbeitung, insbesondere auch in der Grenzfläche zwischen Boden und Metalloberfläche nachhaltig. In neuerer Zeit wird folgerichtig – insbesondere in der Bodenmechanik – Grundlagenforschung zu diesen sogenannten Umlagerungs- und Grenzflächenphänomenen bei feinstkörnigen Böden betrieben (z.B. GUDEHUS & KÜLZER, 2002). Andererseits muss dringend auch auf der baupraktischen Seite nach Lösungen gesucht werden, negativen Auswirkungen aus diesem Bereich bei konkreten Bauverfahren wissenschaftlich zu begegnen.

In der vorliegenden Arbeit wird vor diesem Hintergrund nun ein vergleichsweise neues Verfahren aus dem Spezialtiefbau näher betrachtet und untersucht, bei welchem die Interaktion zwischen den Stahloberflächen der Werkzeuge und dem bearbeiteten Boden den Verfahrenserfolg in besonderem Maße beeinflusst: das „Trockendrehbohren mit

langer Schnecke im Mantelrohr“. Dieses Bohrverfahren dient vornehmlich der Herstellung von Großbohrpfählen zu Gründungs- oder Stützzwecken. Es zeichnet sich – geeignete Untergrundverhältnisse vorausgesetzt – durch hohe Leistungswerte (bzgl. des Baufortschritts) und damit durch große Wirtschaftlichkeit aus. Ermöglicht wird das Verfahren durch die heute realisierbaren immensen Maschinenleistungen. Es können damit Drehmomente zur Verfügung gestellt werden, die ein gleichzeitiges Eindrehen von förderndem Bohrwerkzeug und stützendem Mantelrohr auch in größere Tiefen erlauben.

Die verfahrenstechnische Grundlage ist eine kontinuierliche „Senkrechtschneckenförderung“ des Bohrguts innerhalb des Mantelrohres mit entsprechendem kontinuierlichen Materialaustrag am oberen Ende. Der Materialfluss hängt dabei stark vom Fördergut sowie diversen Förderparametern ab und ist beim Bohren bindiger Böden noch mit sehr großen Unsicherheiten behaftet.

1.2 Zielsetzung

Im Gegensatz zum herkömmlichen „Kelly-Bohrverfahren“, bei welchem laufend zwischen Mantelrohr- und Bohrschneckenantrieb gewechselt werden muss, kommt beim Trockendrehbohren mit langer Schnecke im Mantelrohr durch den Einsatz einer sog. „langen Schnecke“ (Endlosschnecke) ein kontinuierlicher Bohrfortschritt zustande. Voraussetzung hierfür ist allerdings ein kontinuierlicher Bodenförderprozess. Bei geeigneten Untergrundverhältnissen ist das Verfahren dadurch bis zu viermal so schnell wie das Kelly-Bohrverfahren.

Schwierigkeiten verursachen jedoch immer wieder bindige Böden. Diese werden nämlich durch den Bohrprozess in ihrer Struktur und ihren Eigenschaften stark verändert. In Abhängigkeit von den gegebenen Randbedingungen kann es dabei zu Förderproblemen und sehr großen Drehmomentanstiegen kommen. Der kontinuierliche Bohrprozess muss dann oft unterbrochen werden und ggf. ist sogar ein gesondertes Ausfahren und Entleeren der Bohrschnecke erforderlich.

Die vorliegenden Untersuchungen befassen sich mit dieser Problematik. Es sollen Mechanismen aufgezeigt und bewertet werden, die in Abhängigkeit von diversen Randbedingungen die Bohrgutförderung bei bindigen Böden beeinflussen. Dies soll zunächst im Wesentlichen zum Verständnis der am Verfahren beteiligten (maß-

gebenden) interaktiven Prozesse zwischen „Werkzeugen“ (Schnecke und Mantelrohr) und „Erdstoff“ dienen. Der Begriff Erdstoff wird zur besseren Unterscheidung anstelle von „Boden“ für das aus diesem entstehende Bohrgut verwendet. Im Weiteren sollen mithilfe der beschriebenen Mechanismen die Prozesse erklärt werden können, welche zu den immer wieder auftretenden Förder- bzw. Verstopfungsproblemen beim Bohren in bindigen Böden führen. Schließlich soll durch neue Erkenntnisse auch eine Grundlage für mögliche Verfahrensverbesserungen geschaffen werden.

Es werden grundlegende Untersuchungen in Theorie und Praxis (im Modellmaßstab) durchgeführt, welche dazu beitragen sollen, die auftretenden Mechanismen zu erkennen und zu verstehen. Daraus können dann ggf. Verbesserungen des Verfahrens, sowohl verfahrenstechnisch (Wahl von Betriebsparametern) als auch in der Maschinentchnik (z.B. Werkzeuggeometrie und -beschaffenheit oder Konditionierungseinrichtungen) entwickelt werden.

Die theoretischen Untersuchungen befassen sich zum einen mit den bislang gesammelten praktischen Erfahrungen, zum anderen bestehen sie in einer Literaturrecherche zur Grundlagentheorie der Schneckenförderung und darauf aufbauenden theoretischen Überlegungen. Hierbei sollen insbesondere auch Mechanismen gefunden bzw. betrachtet werden, mithilfe derer sich die bei der Verfahrensdurchführung auftretenden Förderprobleme erklären lassen. Zur Verfahrensverbesserung in der Praxis sollen außerdem – neben allgemeinen Betrachtungen zu Möglichkeiten der Boden-konditionierung – die Chancen der Ausnutzung elektrokapillarer Effekte untersucht werden.

Bei den praktischen Untersuchungen handelt es sich hauptsächlich um Bohrversuche an einem eigens entwickelten Modellversuchsstand. Bei Bohrungen in einem ausgewählten bindigen Boden sollen dabei die Parameter Schneckendrehzahl, Mantelrohrdrehzahl und Vortriebsgeschwindigkeit für verschiedene Schneckengeometrien variiert werden. Wegen der aufwändigen Versuchsdurchführung und der großen Zahl möglicher Parameterkombinationen wird dabei das Augenmerk im Wesentlichen auf grundsätzliche Zusammenhänge dieser Parameter mit den Messgrößen zu Kraftbedarf und Förderung an der Anlage gelegt.

Weitere praktische Versuche dienen der Voruntersuchung des Wandgleitens (Grenzfläche Metall/Boden) sowie einer möglichen Beeinflussung des Fördervorganges durch elektrokapillare Effekte in verschiedenen speziellen Versuchsrinnen.

Kapitel 2

Bohren mit langer Schnecke im Mantelrohr (BolSiM)

2.1 Allgemeines

2.1.1 Verfahrensidee

Im Bereich der Bohrpfahlherstellung im Spezialtiefbau werden aufgrund großer Fortschritte in der Maschinenbautechnik immer größere Durchmesser bei steigender Bohrleistung ermöglicht. Während früher große Durchmesser nur mit gesonderten Verrohrungsmaschinen durchführbar waren, reicht die Leistung bzw. das aufbringbare Drehmoment moderner Drehbohrgeräte heute durchaus auch aus, um Stützrohre mit mehr als 1 m Durchmesser bis in größere Tiefen in den Boden zu drehen. Besonders wirtschaftlich ist dabei – bei entsprechend geeignetem Untergrund – der Einsatz eines zweiten hydraulischen Drehantriebes am Mäkler des Bohrgerätes. Dies ermöglicht das gleichzeitige Eindrehen eines stützenden Mantelrohres zusammen mit dem eigentlichen Bohrwerkzeug. Wählt man nun als Bohrwerkzeug eine sog. „lange Schnecke“ (Endlosschnecke), so kann diese zusammen mit dem Mantelrohr einen Senkrechtschneckenförderer vorstellen. Bei geeigneten Untergrundverhältnissen kommt dann eine kontinuierliche Bodenförderung zustande, die dieses Verfahren – im Vergleich zu anderen, chargenweise arbeitenden Bohrverfahren – sehr schnell und damit wirtschaftlich macht (vgl. Unterkapitel 2.2). Als Erfinder des Verfahrens gilt nach RIETHMÜLLER (2001) die Firma SOILMEC. Einschlägige Bohrgeräte stellen verschiedene Firmen wie BAUER MASCHINENBAU, WIRTH, LIEBHERR und auch DELMAG her.

Die Idee der Senkrechtschneckenförderung beim Trockendrehbohren findet sich allerdings schon früher, beim sogenannten Schneckenortbetonverfahren (SOB-Verfahren (siehe auch Unterkapitel 2.2), welches auch den im Baubereich einge-

bürgerten Begriff „lange Schnecke“ geprägt hat. Dort wird allerdings ohne Mantelrohr gebohrt, so dass die Bohrlochstützung im Wesentlichen durch den Erddruck des auf der Schneckenwendel geförderten Bohrgutes erfolgt.

2.1.2 Begriffe / Abgrenzung

Das Trockendrehbohren mit langer Schnecke im Mantelrohr ist also quasi eine Symbiose aus herkömmlichem Trockendrehbohren (Kelly-Bohrverfahren) und dem SOB-Verfahren. Es erweitert den Einsatzbereich des SOB-Verfahrens hin zu Untergründen, die einer technischen Stützung bedürfen. Mit dem Einsatz des stützenden Mantelrohres ändert sich allerdings auch der Verfahrensanspruch in Bezug auf die Bodenförderung (vertikaler Erdstofftransport); diese wird unabhängig vom Stützanspruch und darf daher maximiert werden, um eine möglichst große Bohrleistung zu erzielen. Außerdem sind die Randbedingungen der für die Senkrechtschneckenförderung wesentlichen Interaktion mit der „Umhüllung“ der Bohrschnecke deutlich verschieden (vgl. Unterkapitel 2.4).

Wesentlich für das hier untersuchte Verfahren sind die folgenden Punkte:

- Eine rotierende Endlosschnecke aus Stahl mit Hohlseele („lange Schnecke“)
- Ein Mantelrohr aus Stahl, welches gleichzeitig mit der Schnecke in den Boden geführt wird
- Eine Differenz in der Rotationsgeschwindigkeit zwischen Schnecke und Mantelrohr (vgl. Unterkapitel 2.4)

Unter diesen Prämissen ist streng genommen eine Eigenrotation des Mantelrohres für die Funktion des Verfahrens nicht erforderlich. Bei stehendem Mantelrohr käme die Abteufung derjenigen bei einer Brunnengründung gleich; die Bohrschnecke besorgt dabei den „Aushub“. Eine solche Verfahrensidee wurde sogar bereits als Patent angemeldet (SCHORR, 2001). Allerdings erleichtert die Eigendrehung des Mantelrohres das Eindringen und die gegensinnige Drehung im Vergleich zur Schnecke unterstützt u.U. den Erdstoffförderprozess.

Weil dabei, wie bereits beschrieben, zwei hydraulische Drehantriebe (auch: „Kraftdrehköpfe“) zum Einsatz kommen, wird oft vom „Doppelkopfbohren“ oder auch „Doppelkopfsystem“ gesprochen. Dabei handelt es sich aber um Oberbegriffe für z.T.

sehr verschiedene Verfahren. Im Bereich der Bohrtechnik werden diese Begriffe z.B. auch beim Spülbohren verwendet, wenn zwei Bohrköpfe zum Einsatz kommen. LIEBHERR (2002) fasst unter dem Begriff „Doppelkopf-Bohrverfahren“ gar drei sehr unterschiedliche Verfahren aus dem Spezialtiefbau zusammen, welche mit demselben Grundgerät und verschiedenen Werkzeugen ausgeführt werden können. Für die allgemeinen Betrachtungen in dieser Arbeit wird daher der eindeutige und sinnerschließende Verfahrensname: *(Trockendreh-) Bohren mit langer Schnecke im Mantelrohr* verwendet, im Folgenden ersetzt durch die Abkürzung *BolSiM*.

2.2 Verfahrensbeschreibungen

2.2.1 Vorbemerkung

Dieses Unterkapitel soll insbesondere dem nicht im Spezialtiefbau beheimateten Leser den (bau-) praktischen Hintergrund zur später behandelten Thematik verdeutlichen.

Das BolSiM verbindet, wie bereits erwähnt, wesentliche Aspekte des Kelly-Bohrverfahrens mit Verrohrung und des SOB-Verfahrens zu einem neuen, im Regelfall sehr wirtschaftlichen Drehbohrverfahren für den Spezialtiefbau. Der Vollständigkeit halber werden hier neben dem BolSiM auch diese beiden anderen Verfahren sowie die zugehörigen Bohrgeräte in ihren wesentlichen Grundzügen vorgestellt.

2.2.2 Bohrgeräte

Bei allen drei hier vorgestellten Verfahren kommen für die baupraktische Ausführung i.d.R. selbstfahrende Großbohrgeräte zum Einsatz. Das Grundgerät ist dabei ein „Hydraulikbagger“, bestehend aus einem Unterwagen mit einem breiten, oft auch teleskopierbaren Raupenfahrwerk, auf welchem um 360° drehbar ein Oberwagen mit Dieselantriebsaggregat, Hydraulikversorgung und einer Fahrerkabine sitzt. Die eigentliche Arbeitseinheit ist beweglich mit dem Oberwagen verbunden und besteht aus einem hohen Mäkler (auch Bohrmast genannt), an welchem ein vertikal verfahrbarer Schlitten mit einem sog. Kraftdrehkopf (ein meist hydraulisch angetriebenes Drehgetriebe) angebracht ist. Der Vertikaltrieb des Schlittens erfolgt dabei meist über einen Seilzug. Über den Kraftdrehkopf lassen sich sowohl Drehmomente als auch

Vertikalkräfte auf ein Bohrwerkzeug übertragen. Dies kann über zusätzliche kraftübertragende Elemente oder auch durch direktes Anflanschen geschehen (siehe auch Abb. 2.1). Auch Bohrrohre zur Stützung des Bohrloches lassen sich so mit dem Drehantrieb in den Untergrund einbringen. Für große Durchmesser und Bohrtiefen kann alternativ auch eine hydraulische Verrohrungsmaschine an das Bohrgerät angebaut werden. Dies spielt aber für die hier angestellten Betrachtungen zum BolSiM keine weitere Rolle.

Das Drehbohrgerät verfügt weiterhin über i.d.R. zwei Seilwinden mit Umlenkrollen an der Mäklerspitze zum Heben von Lasten (Haupt- und Nebenwinde). Diese ermöglichen, neben direkt dem Bohrvorgang zuzuordnenden Hubvorgängen, wie dem Ausfahren des Bohrwerkzeuges beim Kelly-Bohrverfahren, auch Nebenarbeiten in Kranfunktion.

Bohrgeräte für das BolSiM sind mit einem zweiten Kraftdrehkopf ausgerüstet, welcher sich ebenfalls auf einem Schlitten am Mäkler befindet. Die beiden Drehantriebe sind über vertikale Hydraulikzylinder miteinander verbunden und werden über einen gemeinsamen Vertikaltrieb gleichzeitig verfahren. Allerdings ist die relative Stellung beider Drehantriebe zueinander, d.h. der vertikale Abstand, über die Hydraulikzylinder veränderbar.

Im Spezialtiefbau üblich sind Bohrgeräte mit einem maximalen Drehmoment am Drehantrieb von bis zu ca. 350 kNm und einer Mäklerhöhe bis ca. 30 m. Solche Geräte haben ein Einsatzgewicht von bis zu 150 t. Für besondere Einsätze, z.B. im Diamantenbergbau, gibt es allerdings auch Bohrgeräte mit bis zu 250 t Einsatzgewicht und aufbringbaren Drehmomenten bis fast 500 kNm.

2.2.3 Herkömmliche Trockendrehbohrverfahren

Kelly-Bohrverfahren

Das i.d.R. mit dem Begriff Trockendrehbohren verbundene Verfahren ist das sogenannte „Kelly-Bohrverfahren“ mit Verrohrung. Der Name rührt von der Mitnehmerstange (Kellystange) her, die es ermöglicht, ohne herkömmliches Bohrgestänge große Drehmomente auf ein Bohrwerkzeug in wechselnde Tiefen zu übertragen. Die Kellystange hängt dabei an einer Seilwinde (Hauptwinde) und wird durch den Kraftdrehkopf geführt, welcher ihr sein Drehmoment durch Formschluss

überträgt. Um größere Tiefen erreichen zu können, wird meist eine mehrfach teleskopierbare Kellystange eingesetzt. Ist diese „verriegelbar“ ausgeführt, können auch Vertikalkräfte auf das Bohrwerkzeug übertragen werden. Der Kraftdrehkopf verfügt zudem über eine Flanschaufnahme mittels der (abwechselnd mit dem Bohrwerkzeug) auch ein Stützrohr (Mantelrohr) in den Untergrund eingedreht werden kann (Abb. 2.1).

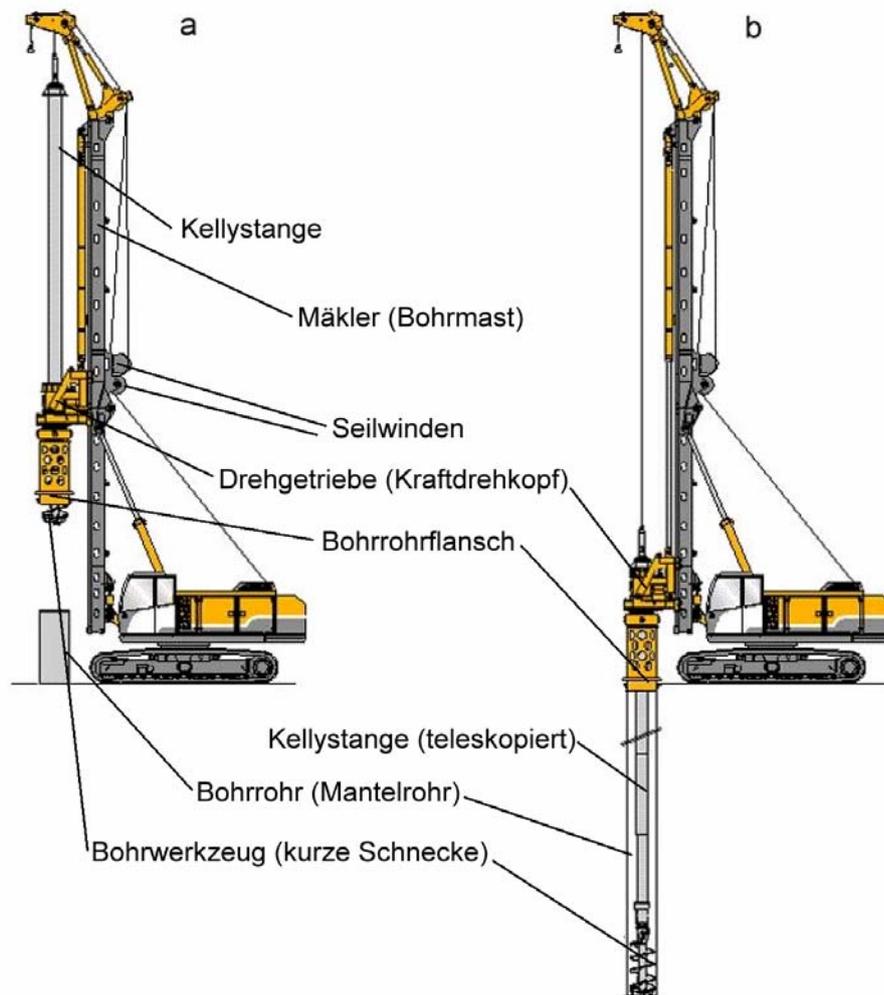


Abb. 2.1: Kellybohrgerät: a: vor Bohrbeginn; Bohrwerkzeug ganz eingefahren
b: beim Bohren; Bohrwerkzeug im Bohrlochtieftsten

Zur Erstellung einer Bohrung wird zunächst ein Bohrrohr mit Schneidkrone (Anfängerrohr) so weit wie möglich in den Untergrund eingedreht. Dann wird mit einem Bohrwerkzeug an der Kellystange der Boden innerhalb des Bohrrohres chargenweise gelöst und gefördert. Als Bohr- bzw. Förderwerkzeug wird i.d.R. eine

kurze Schnecke eingesetzt, deren Schneckengänge sich beim Bohren mit Boden füllen. Nach dem Ausfahren mit gefüllter Schnecke schwenkt der Oberwagen des Bohrgerätes zur Seite und die Schnecke wird durch schnelles Drehen entleert.

Durch weiteres Eindrehen des Bohrrohres, welches immer wieder nach oben verlängert wird, im Wechsel mit der chargenweisen Förderung, entsteht eine verrohrte Bohrung bis in die gewünschte Tiefe. Sollen Böden gebohrt werden, die wegen ihrer Konsistenz nicht mit der Bohrschnecke transportiert werden können (z.B. zu flüssig), wird anstelle der Schnecke meist ein sog. Bohreimer als Bohr- bzw. Förderwerkzeug eingesetzt.

Zur Herstellung eines Bohrpfahles kann in die fertige Bohrung mithilfe der Hilfswinde ein Bewehrungskorb eingestellt werden. Betoniert wird dann im Kontraktorverfahren bei gleichzeitigem Ziehen des Bohrrohres.

SOB-Verfahren

Beim SOB-Verfahren handelt es sich um eine sehr wirtschaftliche Variante der unverrohrten Bohrpfahlherstellung. Hierbei wird eine Endlosschnecke mit Hohlseele („lange Schnecke“) mäklergeführt in den Untergrund gebohrt. Die Stützung der Bohrlochwand erfolgt dabei lediglich über den Erddruck, der vom Bohrgut in den Schneckengängen aufgebracht wird. Entscheidend für den Erfolg ist dabei – neben der generellen Eignung des Bodens – die richtige Wahl der Bohrparameter. Eindringung und Schneckendrehzahl müssen dabei so aufeinander abgestimmt sein, dass die Schneckengänge möglichst voll bleiben. Im Idealfall sollte also nur so viel Erdstoff gefördert werden, wie durch die Schnecke selbst an Volumen verdrängt wird. Eine zu starke Förderung hat u.U. Ausbrüche aus der Bohrlochwand zur Folge.

Im Vergleich zur Bohrpfahlherstellung mit dem Kelly-Bohrverfahren ist auch die Bohrtiefe deutlich beschränkt, da eine Kopplung mehrerer Schnecken wirtschaftlich nicht in Betracht gezogen werden kann. Die Bohrtiefe entspricht also der Länge der Bohrschnecke, welche wiederum durch die Führungslänge des Kraftdrehkopfes am Mäkler beschränkt ist. Nach STÖTZER & SCHÖPF (2003) ermöglicht der Einsatz von Kellyverlängerungen oberhalb des Kraftdrehkopfes jedoch eine Erhöhung der Bohrtiefe um bis zu 10 Meter. So können mit großen Bohrgeräten Pfähle bis ca. 30 m Länge hergestellt werden. Hier ist dann jedoch die Bohrlochstützung im Verlängerungsbereich sicherzustellen.

Die Betonage des Bohrpfahles erfolgt im Kontraktorverfahren durch die Hohlseele der Bohrschnecke bei gleichzeitigem Ziehen derselben mit dem sich noch auf der Wendel befindenden Bohrgut. Der Bewehrungskorb muss anschließend in den noch frischen Beton eingebracht werden. Um ein Einknicken der Längseisen zu verhindern, geschieht dies bei größeren Pfahllängen i.d.R. durch Einziehen mithilfe eines Stahlprofils innerhalb des Bewehrungskorbes unter Vibrationsunterstützung durch einen Aufsatzrüttler.

Im Vergleich zum Kelly-Bohrverfahren zeichnet sich das SOB-Verfahren für die Bohrpfahlherstellung wegen des kontinuierlichen Vorgehens durch wesentlich höhere Leistungswerte aus. Nachteile ergeben sich aber zum einen durch die eingeschränkte Bodeneignung (mangels Stützrohr) und die deutlich beschränkte Bohrtiefe.

2.2.4 BolSiM

Das BolSiM stellt quasi ein verrohrtes SOB-Verfahren dar. Mit einem zweiten Kraftdrehkopf wird dabei zugleich mit der Endlosbohrschnecke ein stützendes Mantelrohr gegensinnig zur Schnecke in den Boden gedreht. Die Bohrtiefe ist wie beim SOB-Verfahren durch die Mäklerlänge beschränkt. Da die beiden Kraftdrehköpfe übereinander angeordnet sind (vgl. Abb. 2.2) und wegen des Mantelrohres auch keine Kellyverlängerung eingesetzt werden kann, können selbst mit den größten Bohrgeräten (Mäklerhöhen bis ca. 30 m) Pfahllängen von maximal ca. 22 m realisiert werden. Für den Bohrvorgang kann dann die (vertikale) Stellung der Schnecke zum Mantelrohr eingestellt werden. Es kann also – je nach Untergrundverhältnissen – vorauseilend, auf gleicher Höhe oder nachgezogen zum Mantelrohr gebohrt werden. Weil neben der Schnecke auch das Mantelrohr einen Einfluss auf den Löse- insbesondere aber auf den Transportvorgang hat, sollte von beiden als „Bohrwerkzeuge“ gesprochen werden.

Wesentliche Vorteile gegenüber dem SOB-Verfahren ergeben sich aus der Verrohrung, welche die Stützwirkung unabhängig vom Boden und der Bodenförderung macht. Der Anwendungsbereich wird dadurch erweitert und die Bohrlochqualität gesichert. Außerdem kann notfalls das Bohrrrohr abgekoppelt und die Schnecke ausgefahren werden, um den Bewehrungskorb vor dem Betonieren einzustellen. Dies verringert allerdings die Gesamtbohrleistung erheblich. Im Regelfall wird daher die Schnecke – während der Betonage durch die Hohlseele – gemeinsam mit dem Mantelrohr gezogen. Hierzu wird die Schnecke zunächst etwas zurückgezogen, um dann im Schutze des Mantelrohres zu betonieren. Der Bewehrungskorb wird dann wie beim SOB-Verfahren

nachträglich eingerüttelt. Nach der Betonage werden die Bohrwerkzeuge komplett aus der Bohrung ausgefahren und durch schnelles, entgegengesetztes Drehen neben der Bohrstelle restentleert (s.a. Abb. 2.3).

Auf Abb. 2.2 ist ein entsprechendes Bohrgerät während des Betoniervorganges (kurz nach Erreichen der Solltiefe) zu sehen. Am oberen Kraftdrehkopf ist die Betonleitung über eine Drehverbindung an das Seelenrohr der Bohrschnecke angeflanscht. Rechts im Hintergrund ist ein Bewehrungskorb samt Einziehvorrichtung (Stahlprofil mit Aufsatzrüttler) zu sehen, welcher gerade von einem Seilbagger verschwenkt wird.



Abb. 2.2: Bohrgerät für das BolSiM mit zwei Kraftdrehköpfen am Mäkler

Durch das mitgeführte Mantelrohr und die damit definierten Randbedingungen für den Erdstofftransport beim Bohren, wird beim BolSiM die gesamte Bohreinheit zu einem vollwertigen Senkrechtschneckenförderer. Die Förderhöhe bleibt dabei konstant und

die Förderleistung darf – im Gegensatz zum SOB-Verfahren – maximiert werden. Auf Abb. 2.3 ist gut zu erkennen, dass der Materialaustrag beim Bohren tatsächlich schon sehr früh beginnt. Es ist zu beachten, dass dabei freie Fallhöhen von bis zu ca. 20 m auftreten (Arbeitsschutz).

Abb. 2.3 zeigt neben dem Materialauswurf beim Bohren von rolligem Boden auch den Materialstand auf der Schneckenwendel im oberen Bereich bei angehaltener, teilweise ausgefahrner Schnecke. Man sieht, dass die Schneckengänge weniger als halb gefüllt sind. Die beiden unteren Fotos auf der Abbildung zeigen die Restentleerung der Bohrwerkzeuge und gehören zur selben Bohrung. Es wird deutlich, dass in der Bohrpraxis oft keine homogenen Böden angetroffen werden. Im vorliegenden Fall wurde in einem von rolligem Boden überlagerten bindigen Boden gebohrt, was durchaus zu Problemen führte (vgl. Unterkapitel 2.3).



Abb. 2.3: Materialaustrag beim BolSiM
links und oben links: freier Fall aus großer Höhe zu Beginn der Bohrung
oben rechts: Material auf der Schneckenwendel (hier teilweise ausgefahren)
unten: Restentleerung (links, vor Beginn des „Leerdrehens“)

Abschließend kann gesagt werden, dass das BolSiM dann, wenn die Randbedingungen gut passen, dem sehr universell einsetzbaren Kelly-Bohrverfahren leistungsmäßig deutlich überlegen ist. Wenn aber während der Bohrarbeiten Förderprobleme auftreten, die entsprechende Sondermaßnahmen erfordern, kann es sehr schnell zu hohen wirtschaftlichen Verlusten kommen. Die hinsichtlich Leistung und Energieeinsatz günstigste Variante bietet aber das SOB-Verfahren, sofern es eingesetzt werden kann.

2.3 Erfahrungen / Probleme

Obwohl das BolSiM ursprünglich ohne vorhergehende wissenschaftliche Entwicklung direkt aus bestehenden Verfahren bzw. Geräteteilen gewissermaßen „zusammengestellt“ worden ist, konnten damit von Beginn an große Leistungssteigerungen im Vergleich zu anderen Bohrverfahren erzielt werden. Allerdings gab und gibt es auch immer wieder Förderprobleme, welche die Gesamtbohrleistung derart mindern, dass ganze Bauvorhaben zum wirtschaftlichen Misserfolg werden können.

Beim Bohren in rein rolligen Böden treten i.d.R. unabhängig vom Grundwasserstand keine größeren Probleme auf. Die Förderung funktioniert dort so gut, dass meist schon nach Erreichen geringer Bohrtiefen ein Materialaustrag am oberen Mantelrohrende stattfindet. Wird trocken und kompakt anstehender bindiger Boden gebohrt, bilden sich beim Lösen durch den Schneckenanfänger kleinere, feste Aggregate („Chips“), welche sich in Bezug auf die weitere Förderung durchaus wie rolliges Material verhalten und dann keine Probleme verursachen. Auch feuchter, bindiger Boden, welcher sich mehr oder weniger pastös verhält, lässt sich fördern. Schwierigkeiten bereiten jedoch oft bindige Böden im Zusammenspiel mit Grundwasser. Hier kann es zu Förderproblemen kommen, wenn der bindige Boden zu weich wird und durch Wasserzutritt die Reibung am Mantelrohr soweit herabgesetzt wird, dass die Förderung zum Erliegen kommt. Dem kann u.U. mit höheren Schneckendrehzahlen begegnet werden. Ist damit keine Eigenförderung mehr in Gang zu bringen und kann die Endtiefe durch reine Verdrängung nicht mehr erreicht werden, müssen die Werkzeuge ausgefahren werden. Eine Entleerung der Schnecke ist dann meist problemlos durch Umkehr der Drehrichtung beider Werkzeuge möglich. Es kann in diesem Fall daher meistens noch wirtschaftlich gearbeitet werden.

Große Probleme treten immer wieder dann auf, wenn beim Bohren in fest anstehenden bindigen Böden ein Wasserzutritt stattfindet. Dies verursacht einen Verstopfungseffekt und kann zu so enormen Drehmomentanstiegen führen, dass die Drehzahl stark absinkt. Abgesehen von im Untergrund angeschnittenen Wasserlinsen tritt dieser Fall häufig auf, wenn die bindige Bodenschicht von wassergesättigten, gut durchlässigen rolligen Böden (Sande bzw. Kiese) überlagert wird. Beim Anschneiden der bindigen Schicht steht dann nämlich innerhalb des Mantelrohres kontinuierlich Wasser an. Mit dem Absinken der Schneckendrehzahl kommt dann u.U. auch die Förderung des in der Schnecke befindlichen rolligen Materials zum Erliegen. Dieses kann dann zurückrutschen und als zusätzliche Auflast auf dem bindigen Erdstoff zu weiterer „Kompaktion“ führen, bis die maximale Leistungsfähigkeit der Kraftdrehköpfe erreicht wird. Der Boden setzt sich dabei in der Schnecke so fest, dass diese komplett aus dem Mantelrohr gezogen und mitunter in Handarbeit entleert werden muss. Geschieht das während einer Bohrung mehrfach, dann sinkt die Bohrleistung u.U. sogar deutlich unter die des Kelly-Bohrverfahrens.

Bislang ist es nicht gelungen die Förderung in solchen extremen Untergrundverhältnissen alleine durch umsichtiges Variieren der Umdrehungsgeschwindigkeiten von Mantelrohr und Schnecke oder der Vortriebsgeschwindigkeit in Gang zu halten. Versuche mit zusätzlicher Wasserspülung beim Bohren durch die Hohlseele der Schnecke brachten auch nicht den gewünschten Erfolg. Verstopfungen konnten damit weder verhindert noch aufgelöst werden. Erfolgversprechend scheint dagegen die Spülung mit Luft. Durch das Einblasen von Luft durch die Hohlseele über einen Kompressor (6 bis 7 bar) mit Austritt an der Schneckenspitze kann die Förderung aufrechterhalten werden. Allerdings treten dabei immer noch sehr große Drehwiderstände auf, wodurch die Gesamtleistung des Verfahrens deutlich gemindert wird.

Interessant ist die Beobachtung, dass Förderprobleme mit bindigen Böden auf ein und derselben Baustelle bei gleichbleibenden Untergrundverhältnissen immer wieder erst nach einigen Bohrungen auftreten. Es wurde festgestellt, dass dies mit der Oberflächenbeschaffenheit der Wendel auf der Bohrschnecke zusammenhängen muss. Direkt nach der Anlieferung und dem Aufbau des Bohrgerätes ist die Schnecke i.d.R. noch stark angerostet und damit rau. Mit zunehmendem Bohrfortschritt wird sie durch die Erdstoffförderung glatt geschliffen und erstaunlicherweise verschlechtert sich damit – entgegen der vermeintlich logischen Vermutung – dann auch die Förderwirkung. In der Praxis durchgeführte Bohrversuche mit künstlich aufgerauten Schneckenwendeln bestätigen diesen Effekt (SCHMIDMAIER & HARTTIG, 2004).

2.4 Vorüberlegungen zu den Fördermechanismen

Wie schon in der Einleitung zu dieser Arbeit angesprochen, kann der Förderprozess beim BolSiM als kontinuierliche „Senkrechtschneckenförderung“ des Bohrguts innerhalb des Mantelrohres mit kontinuierlichem Materialaustrag am oberen Ende beschrieben werden. Es handelt sich also fördertechnisch gesehen eigentlich um einen vertikalen Schneckenförderer, der allerdings – wie später näher erläutert wird – besonderen Randbedingungen unterliegt, welche sich bestimmend auf die Förderparameter auswirken. Dies liegt in den Eigenheiten des BolSiM als spezielles Drehbohrverfahren begründet (vgl. Unterkapitel 4.4 und 7.2).

Zunächst muss davon ausgegangen werden, dass für die Förderwirkung die Reibkraft des Erdstoffes am Rohrmantel in Kombination mit der Drehung durch die Schnecke die entscheidende Rolle spielt (vgl. Kapitel 4). Wie diese Reibkraft letztlich mobilisiert wird und ob die Zentrifugalkraft der bewegten Erdstoffmasse dabei tatsächlich eine Rolle spielt, ist noch zu ergründen. Fest scheint jedenfalls zu stehen, dass eine Erhöhung dieser Reibkraft ebenso wie eine Verringerung der Gleitreibung des Erdstoffes auf der Schnecke die Förderung begünstigen muss. Dies kann – unabhängig von der jeweiligen Normalkraft – durch die Veränderung der jeweiligen Reibungskoeffizienten geschehen. Ein „Rauermachen“ der inneren Mantelrohroberfläche müsste dazu also ebenso beitragen wie eine „Glättung“ der Schneckenoberflächen. Wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, scheint dieser Schluss jedoch – wenigstens was die Rauigkeit der Schneckenoberfläche betrifft – nicht zutreffend zu sein. Die praktische Erfahrung zeigt, dass anscheinend gerade mit rauerer Schnecke Förderproblemen begegnet werden kann. Ein vergleichsweise neues Patent (SCHMIDMAIER & HARTTIG, 2004) macht sich dies zunutze, indem die Schneckenwendel auf der Oberseite z.B. durch Auftragsschweißen mit punkt- oder linienförmigen Erhöhungen versehen wird. Die in der Patentschrift angegebene Begründung für die verbessernde Wirkung bei bindigen Böden ist allerdings nicht wirklich nachvollziehbar. Hier wird eine angebliche verbesserte Gleitwirkung durch Verkleinerung der tatsächlichen Berührungsfläche zwischen Wendel und Erdstoff und damit geringeren (tangentialen) Adhäsionskräften ins Feld geführt. Alleine schon der „Ursprung“ dieser Verbesserungsidee, nämlich die zunächst angerosteten Wendeloberflächen, lassen diese Begründung ausscheiden. Für die in der Praxis beobachtete verbesserte Förderwirkung bei rolligen Böden wird denn auch keine Begründung angeführt. Beide Phänomene lassen sich jedoch durchaus wissenschaftlich erklären, wie später noch gezeigt wird. Die im Rahmen dieser Arbeit aufgrund eigener Versuche beobachteten, verschiedenen

„Förderarten“ und deren Auftreten in Abhängigkeit von den jeweils vorliegenden Randbedingungen liefern eine Erklärung für dieses Phänomen (Abschnitt 7.4.3 und Kapitel 8).

Die Erhöhung des Reibungskoeffizienten zwischen Erdstoff und Mantelrohr muss die Förderung jedoch tatsächlich verbessern, da die rückhaltende Reibkraft in jedem Fall zumindest eine Komponente des „Förderantriebes“ darstellt. Hierzu gibt es bisher aber noch keine konkreten praktischen Erfahrungen. Allerdings stimmt hier der beobachtete Zusammenhang mit der allmählichen Entrostung der Stahloberflächen beim Bohren: Mit glatter werdender Mantelrohrinnenfläche verschlechtert sich der Förderprozess.

Ein reines „Hochschieben“ des Erdstoffes bei komplett gefülltem Schneckengang wird in der Praxis nie beobachtet; bei einem Verdrängungsanteil des erbohrten Volumens von 30 bis 40 % durch gebräuchliche Werkzeugkombinationen wäre damit eine sehr hohe Kompression bzw. Volumenverdrängung des Erdstoffes in den Schneckengang verbunden. Im Zusammenspiel mit den besonders hohen Reib- und Adhäsionskräften durch den dabei vollgefüllten Wendelgang kommt es daher eher zum Stillstand des Verfahrens bzw. zu einer Verstopfung der Schnecke. Ein gewisser aktiver Förderanteil durch entsprechende Reibverhältnisse ist für das Verfahren also unabdingbar.

In diesem Zusammenhang kann bzgl. der Förderung in Abhängigkeit von den Reibverhältnissen folgende Überlegung angestellt werden:

Je weniger die auftretenden Wandreibungskräfte durch unterschiedliche Normalkräfte aus Massenkräften geprägt sind, desto größer wird die Rolle der Reibungsoberflächen zwischen Erdstoff und Werkzeugen. Es könnte also durchaus sinnvoll sein die jeweils betroffenen Reibflächen, die der Förderung dienen (Innenseite Mantelrohr) und die der Förderung quasi entgegen wirken (Schneckenoberfläche) über die Förderhöhe geometrisch zu bilanzieren, um qualitative Aussagen über die Förderwirkung einer Werkzeugkombination zu treffen. Allerdings müssten in solche Überlegungen auch Betrachtungen zur Verteilung des Erdstoffes innerhalb des Schneckenganges einfließen.

Nicht nur das Phänomen der verbesserten Förderung bei rauerer Schnecke deutet darauf hin, dass die Förderung beim BolSiM zumindest nicht für alle „Betriebszustände“ mit der herkömmlichen Fördertheorie für vertikale Schneckenförderer (vgl. Kapitel 4) beschrieben werden kann. Spezielle praktische Untersuchungen sind also angezeigt.

Vergleicht man den Erdstoffförderprozess schließlich mit dem beim SOB-Verfahren, so ergeben sich für das BolSiM folgende Unterschiede:

- das Mantelrohr ist aus Stahl und damit glatter als die umhüllende Oberfläche beim SOB-Verfahren (→ Nachteil!)
- das Mantelrohr wird beim Bohren mit abgeteuft im Gegensatz zur „stehenden“ Bohrlochwand beim SOB-Verfahren (→ Nachteil!)
- das Mantelrohr dreht sich entgegen der Schnecke (→ Vorteil!?)
- die Förderhöhe ist immer konstant und beläuft sich über die gesamte Schneckenlänge (→ Nachteil!)
- um die Drehmomente gering zu halten muss möglichst viel Erdstoff während des Bohrvorganges gefördert werden (→ Nachteil!)

Der große Vorteil der weitgehenden Unabhängigkeit von Untergrundbedingungen durch die Verrohrung wird also mit deutlichen Nachteilen den Förderprozess betreffend erkauft. Hinzu kommt, dass – unabhängig von der Förderleistung – beim BolSiM ein zusätzlicher hoher Energie- bzw. Leistungsanteil in das Eindrehen des Mantelrohres (äußere Mantelreibung) investiert werden muss. Dieser steht damit dem eigentlichen Bohr- und Förderprozess nicht mehr zur Verfügung. Letztere Betrachtung hat allerdings im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine Bedeutung.

Kapitel 3

Grundlagen

3.1 Bodentechnische Hintergründe

Die Überschrift weist schon darauf hin, dass im Folgenden weniger klassische bodenmechanische Grundlagen vorgestellt werden sollen, sondern vielmehr einige Zusammenhänge, die speziell in Verbindung mit entsprechenden Bearbeitungsmaschinen wichtig erscheinen.

Ein wichtiger Punkt ist dabei seit Anbeginn der wissenschaftlichen Untersuchung von maschinellen Bodenbearbeitungsprozessen die Frage nach den Kräften, die der Boden auf die Maschinenkomponenten überträgt, bzw. den Kräften, die letztlich überwunden werden müssen. Wenn der Boden sich bei der Bearbeitung in seinem Aufbau und seiner Struktur nicht wesentlich verändert, lassen sich über Laborversuche tatsächlich verwendbare Aussagen über wichtige Parameter machen. Dies sind im Wesentlichen anstehende Normalspannungen, Reibkräfte und – bei der Betrachtung bindiger Böden – Adhäsionskräfte. SCHUMACHER (2003) gibt einen guten Überblick über die in dieser Richtung durchgeführten Forschungsarbeiten und Ergebnisse, die er durch eigene theoretische und praktische Untersuchungen noch ergänzt hat. Ein wesentlicher Aspekt für bindige Böden ist dabei die Adhäsion im Boden-Werkzeug-System, mit der sich SCHLICK (1989) eingehend befasst hat.

Ändert sich der Boden jedoch bei der Bearbeitung stark in seiner Struktur bzw. kommt es zu großen Umformungen und unbestimmter Aggregatbildung, dann lassen sich im Vorfeld kaum Aussagen über die zu erwartenden Eigenschaften bzw. das weitere Verhalten im Inneren einer Maschine treffen. Der Umformungsprozess selbst kann aber untersucht und dabei auftretende Kräfte können quantifiziert werden (z.B. BERETITSCH, 1992). Auch beim BolSiM treten am unteren Schneckenende solche Boden-Schneidvorgänge auf. Diese können jedoch im Rahmen der hier angestellten Förderbetrachtungen vernachlässigt werden. Eine kurze Abhandlung hierzu erfolgt in Abschnitt 3.2. Wichtiger ist für das Förderverhalten beim BolSiM in bindigen Böden

aber das, was nach dem Lösen mit dem Boden passiert. Er wird zu Beginn und wahrscheinlich auch noch während der Förderung so sehr in seiner (Makro-) Struktur verändert, dass im Rahmen dieser Arbeit anstelle von „Boden“ dann von „Erdstoff“ als Fördergut gesprochen wird.

Die bereits angesprochenen auftretenden Reibkräfte spielen für diese Erdstoffförderung insofern eine wichtige Rolle, als dass der ganze Förderprozess in vertikaler Richtung – und damit entgegen der Schwerkraft – letztlich nur mithilfe des Zusammenspiels unterschiedlicher Reibungszustände innerhalb des Schneckenganges zustande kommen kann. Reibungswinkel für innere Reibungskräfte von bindigen Böden lassen sich ebenso wie Reibungsbeiwerte für Wandreibungskräfte zwischen Boden und Stahloberflächen aus der Literatur entnehmen. Zu beachten ist dabei allerdings, dass letztere sowohl vom Wassergehalt und Dichtezustand des Bodens, als auch von der Reibgeschwindigkeit abhängen. NICHOLS (1925 & 1931) hat das schon vor über 80 Jahren erkannt und belegt.

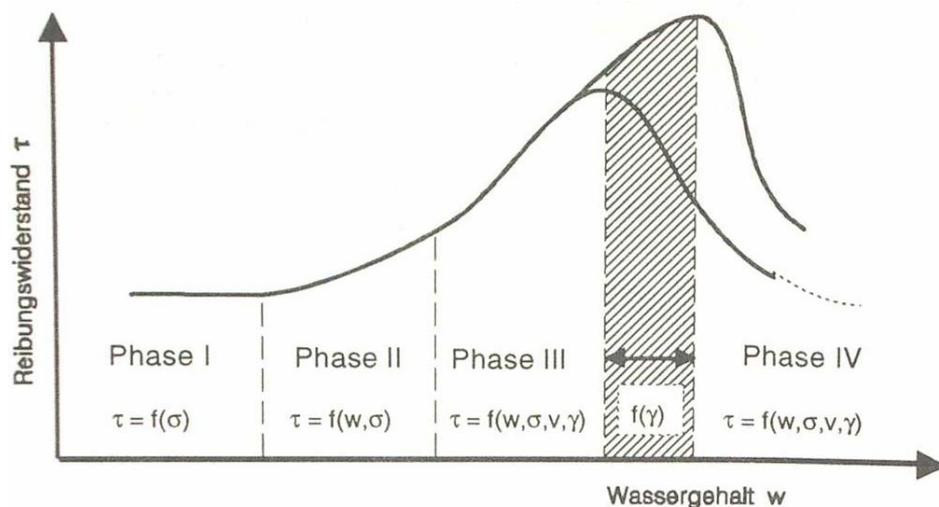


Abb. 3.1: Phaseneinteilung in Abhängigkeit vom Wassergehalt (BERETITSCH, 1992)

Wie BERETITSCH (1992) zeigt, kann das Reibverhalten in Abhängigkeit vom Wassergehalt in vier verschiedene Phasen eingeteilt werden (vgl. Abb. 3.1):

- Phase I: geringer Wassergehalt – die Reibspannungen sind unabhängig von Wassergehalt und Reibgeschwindigkeit – der Reibkoeffizient μ_w (mit $\mu_w = \tau / \sigma$) ist also konstant.

- Phase II: mittlerer Wassergehalt – die Reibspannungen steigen mit zunehmendem Wassergehalt leicht an, bleiben dabei aber unabhängig von der Reibgeschwindigkeit – der Reibkoeffizient μ_w steigt also mit dem Wassergehalt.
- Phase III: hoher Wassergehalt – die Reibspannungen steigen mit zunehmendem Wassergehalt bis zu einem absoluten Maximum schnell an. Anstieg und Maximum sind dabei umso größer, je größer die Geschwindigkeit und die Normalspannung sind – der Reibkoeffizient μ_w steigt also mit dem Wassergehalt und mit der Geschwindigkeit.
- Phase IV: sehr hoher Wassergehalt / weiche Konsistenz – die Reibspannungen nehmen mit zunehmendem Wassergehalt degressiv ab. Das Wasser in der Grenzfläche zwischen Boden/Stahl wirkt dabei „schmierend“ – der Reibkoeffizient μ_w nähert sich asymptotisch einem „Schmierreibungsbeiwert“.

Zunehmende Vorverdichtung des Bodens verlängert dabei den Anstieg der Reibspannungen mit zunehmendem Wassergehalt in Phase III (bei gleicher Steigung) und damit auch die Höhe des Reibspannungsmaximums. Die Ursachen für den beobachteten Reibspannungsanstieg sind in Adhäsionsanteilen zu finden, die je nach Wassergehaltsbereich mit zunehmendem Wassergehalt linear oder progressiv steigen. Unter Schmierreibungsbedingungen, also am Ende der Phase IV, ist die Reibspannung für konstante Reibgeschwindigkeiten wieder proportional zur Normalspannung. Es stellt sich somit ein konstanter Reibkoeffizient μ_w ein. Allerdings, wie SCHUMACHER (2003) nachweisen konnte – abhängig von der sog. „Normalspannungslage“ – auf jeweils zwei unterschiedlich hohen Niveaus:

- „Tieflage“: In niederem Normalspannungsbereich findet reine Coulombsche Reibung statt. Es ist dabei keine Adhäsionskomponente nachweisbar – der Reibkoeffizient μ_w ist bis zu einem gewissen Normalspannungswert auf niederem Niveau konstant.
- „Hochlage“: Ab einem gewissen (höheren) Normalspannungswert setzt verstärkter Abrasionsverschleiß an der Stahloberfläche ein. Mit weiter zunehmender Normalspannung steigt die Reibung wieder linear an – der Reibkoeffizient μ_w bleibt nun auf deutlich höherem Niveau konstant.

Diese beiden Lagen sind durch einen undefinierten „Steilanstieg“ des Reibungsbeiwertes verbunden. Das heißt, der Reibungsbeiwert μ_w steigt bei minimaler Anpressdruckerhöhung auf das 1,5 bis 3-fache in die Hochlage. Diese wird i.d.R. allerdings nach SCHUMACHER (2003) erst bei Normalspannungen oberhalb von 10 kN/m² erreicht.

Die Reibverhältnisse unter Schmierbedingungen in der Tieflage können im Rahmen des BolSiM durchaus von Bedeutung sein. Die Hochlage ist jedoch für die vorliegenden Untersuchungen unter „normalen“ Förderbedingungen nicht relevant. Die hier auftretenden deutlich erhöhten Reibungsbeiwerte könnten jedoch zur Erklärung der immensen Drehmomentanstiege beim Verstopfen der Bohrschnecke unter Wasserzutritt beitragen. Die dabei auftretenden Kompressionsspannungen könnten die eventuelle Schmierreibung tatsächlich in die Hochlage überführen, wo durchaus Reibungsbeiwerte von $\mu_w > 0,6$ auftreten können.

Es kann nicht erwartet werden, dass die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Reibung zwischen Erdstoff und Stahl für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen eine große Relevanz hat. In den eigens zur Reibung zwischen dem verwendeten Versuchsboden und einer glatten Stahloberfläche durchgeführten Versuchen konnte eine solche Abhängigkeit allerdings beobachtet werden (vgl. Unterkapitel 6.1). Für in der Praxis auftretende Geschwindigkeitsbedingungen und Bodenverhältnisse muss dieser Zusammenhang u.U. berücksichtigt werden.

Insgesamt muss betont werden, dass der hier betrachtete Förderprozess so komplex ist, dass die Erfassung in einem Stoff- oder gar Rechenmodell noch lange nicht möglich sein wird, insofern dies überhaupt je der Fall sein kann. Mit Stoffgesetzen der Bodenmechanik kann das Verformungsverhalten nichtbindiger Böden heute recht gut mithilfe der Hypoplastizität beschrieben werden. Beispielsweise erlaubt es die sog. Vibro-Hypoplastizität mittlerweile, die Vorstellung, dass Korngerüste bei Vibrationen sich ähnlich wie temporär erwärmte Flüssigkeiten verhalten, mit zu berücksichtigen (GUDEHUS, 2006). Allerdings sind für die Anwendung solcher Stoffgesetze vergleichsweise „einfache“ und gut beschreibbare äußere Randbedingungen Voraussetzung; solche sind jedoch beim BolSiM keinesfalls gegeben. Noch viel schwieriger wird es bei der Betrachtung des BolSiM in bindigem Boden; hier fehlen geeignete Stoffgesetze gänzlich. Auch mithilfe der Kontinuumsmechanik lassen sich die hier auftretenden Vorgänge kaum beschreiben, geschweige denn vorhersagen.

Die durchgeführten Untersuchungen zum Förderverhalten beim BolSiM in bindigem Boden müssen daher im Wesentlichen auf die „äußere“ Beschreibung der beobachteten Vorgänge und geeignete Überlegungen zu deren Verständnis abzielen. Der Fördervorgang selbst kann dabei nur als stationärer Vorgang (steady state) sinnvoll betrachtet und beurteilt werden. Dass von dieser Voraussetzung zumindest im Mittel tatsächlich ausgegangen werden kann, bestätigen die Versuchsergebnisse (vgl. Kapitel 7).

3.2 Drehendes Bohren im Lockergestein

3.2.1 Vorbemerkung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung des vertikalen Erdstofftransportes, also der „Senkrechtschneckenförderung“ beim Bohrvorgang. Hierzu wird die Förderung in einer Elementbetrachtung quasi als Endlosvorgang – ohne Berücksichtigung der Randbedingungen beim Lösen am Bohrlochtiefsten – betrachtet. Dies ist zulässig, weil in den durchgeführten Versuchen für die Förderung global tatsächlich ein quasi stationärer Zustand beobachtet wird (vgl. Abschnitt 7.3.1).

Allerdings hängt der Fördervorgang durch Vertikalschnecken generell auch von der Gutaufgabe ab, worauf in der Literatur immer wieder hingewiesen wird. Da die „Gutaufgabe“ beim hier betrachteten Verfahren durch das Bohrwerkzeug an der Schneckenspitze (*Anfänger*) erfolgt, ist auch streng genommen ein Einfluss der Geometrie dieses Anfängers auf den Materialtransport gegeben. Bei den hier durchgeführten praktischen Untersuchungen wurde dieser Einfluss nicht berücksichtigt; alle Bohrversuche wurden ohne gesonderten Anfänger lediglich mit scharf angefasster Wendel (waagerechte Schneide) durchgeführt. Im folgenden Abschnitt soll der Vollständigkeit halber dennoch wenigstens in der Theorie kurz auf den Einfluss des Schneidens für den Bohrfortschritt eingegangen werden.

3.2.2 Lösen des Bodens / Bohrfestigkeit

Beim drehenden Bohren wird der Boden durch ein Bohrwerkzeug gelöst und dann der Förderung übergeben. Diese Förderung kann entweder der Füllung eines Transportgefäßes dienen (kurze Schnecke, Bohreimer etc.) oder aber – wie im vorliegenden Fall – kontinuierlich über die gesamte Bohrtiefe erfolgen. Im Folgenden soll nun kurz auf die Mechanismen beim Lösen des Bodens eingegangen werden, wie sie SCHULER (1979) beschreibt. Bei seiner wissenschaftlichen Untersuchung des Erdbohrens im Lockergestein legte er ein besonderes Augenmerk auf die Wechselwirkungen zwischen Werkzeug und Boden in Bezug auf die „Bohrbarkeit“, wie er es nennt. Er versuchte dabei die optimalen arbeitstechnischen Kenngrößen zu finden, um einen maximalen Bohrfortschritt erzielen zu können.

Das drehende Bohren unterteilt er in das *spanende* und das *rollende* Bohren. Beim rollenden Bohren erfolgt die „Bodenzerstörung“ an der Bohrlochsohle durch abrollende Werkzeuge, beim spanenden Bohren hingegen durch den ständigen Eingriff eines auf der Bohrlochsohle arbeitenden Werkzeuges. Ist dieses Werkzeug mit einer Anzahl kleiner Schneiden bestückt und wird der Boden fein zerspannt, spricht man vom *feinspannenden Bohren*. Beim *grobspannenden Bohren* hingegen ist das Werkzeug mit einer Anzahl großer Schneiden bestückt, die den Boden grob zerspannen. SCHULER (1979) beschränkte sich in seinen Untersuchungen auf das „grobspannende Trocken-drehbohren in rolligen und bindigen Böden“. Er erkannte, dass eine maximale Bohrgutförderung dann erfolgt, wenn das Gut gleichmäßig auf die Wendel übergeben wird. Der Transportvorgang ist also umso günstiger, je gleichmäßiger der Span von der Schneide auf die Wendel übergeben werden kann. Deshalb sollte der Schnittwinkel im Idealfall dem Steigungswinkel der Wendel entsprechen.

Mithilfe der Ergebnisse aus seinen Bohrversuchen, die er mit jeweils konstanter „Bohrandruckkraft“ durchgeführt hat, zieht SCHULER (1979) für die Bohrpraxis diverse qualitative und quantitative Schlussfolgerungen. Sie lassen sich in drei Bereiche einteilen und sollen im Folgenden kurz zusammengefasst werden, da sie u.U. auch für weitere Untersuchungen zum BolSiM eine gewisse Relevanz haben:

I. Die Zusammensetzung und die Beschaffenheit des Bodens bestimmt die Bohrbarkeit in wesentlichem Maße. Allerdings können in Bezug auf die in der Bodenmechanik gebräuchlichen Parameter nur qualitative Aussagen getroffen werden:

- Die Mindestspanstärke wird durch den wirksamen Korndurchmesser bestimmt und sollte mindestens $\frac{2}{3}$ davon betragen.
- Das Porenvolumen bestimmt die Bohrfestigkeit; diese nimmt mit zunehmendem Porenvolumen ab.
- Der Wassergehalt hat besonders in weichen Böden einen großen Einfluss auf die Bohrbarkeit. Die Bohrfestigkeit nimmt mit zunehmendem Wassergehalt zwar ab, aber der Fördervorgang erschwert sich, da die „Klebrigkeit“ zunimmt.
- Die Kohäsion stellt den aussagekräftigsten Wert bzgl. der Bohrbarkeit dar. Je größer die Kohäsion eines Bodens ist, desto schwerer ist er zu bohren.

II. Mithilfe der mit einer Flügelsonde ermittelten Drehscherfestigkeit τ_F' können folgende quantitative Aussagen über die Bohrbarkeit getroffen werden:

- Die Bohrbarkeit verhält sich umgekehrt proportional zu der mit der Flügelsonde ermittelten Drehscherfestigkeit.
- Der spezifische Schnittwiderstand verhält sich (ab einer gewissen Spanstärke) proportional zu der Drehscherfestigkeit und berechnet sich zu:

$$w_S = 3,2 * \tau_F' - 0,5 \quad [\text{daN/cm}^2]$$

- Mit dem spezifischen Schnittwiderstand kann der Gesamtwiderstand und daraus resultierend das erforderliche Drehmoment berechnet werden.
- Die Bohrandruckkraft F_A sollte im Verhältnis zu der erforderlichen Drehmomentenschnittkraft F_{MD} nicht zu groß werden. Optimal erscheint:

$$F_A/F_{MD} \approx 0,5$$

- Es stellte sich als vorteilhaft heraus mit möglichst großer Spanstärke, d.h. daraus resultierend mit geringer Drehzahl, zu bohren.
- Für den wirtschaftlichen Bohreinsatz empfiehlt es sich mit großen Drehmomenten und geringen Drehzahlen zu bohren.
- Die Drehscherfestigkeit charakterisiert die Böden hinreichend genau. Mit ihrer Hilfe kann die Nettobohrgeschwindigkeit für jeden beliebigen Betriebsfall sowohl rechnerisch als auch graphisch ermittelt werden.

III. Zur Schneidengeometrie des Bohrwerkzeuges kann Folgendes gesagt werden:

- Es muss zwischen Werkzeugwinkeln und Arbeitswinkeln unterschieden werden (siehe Abb. 3.2). Die Arbeitswinkel ergeben sich in Abhängigkeit der Translations- und Rotationsbewegung der Schneide. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass sich der Vorschubwinkel φ mit dem Abstand r von der Drehachse nach außen hin verringert.

Die Arbeitswinkel sind definiert als: Arbeits-Freiwinkel: $\alpha' = \alpha - \varphi$

Arbeits-Schnittwinkel: $\delta' = \delta - \varphi$

Arbeits-Spanwinkel: $\gamma' = \gamma + \varphi$

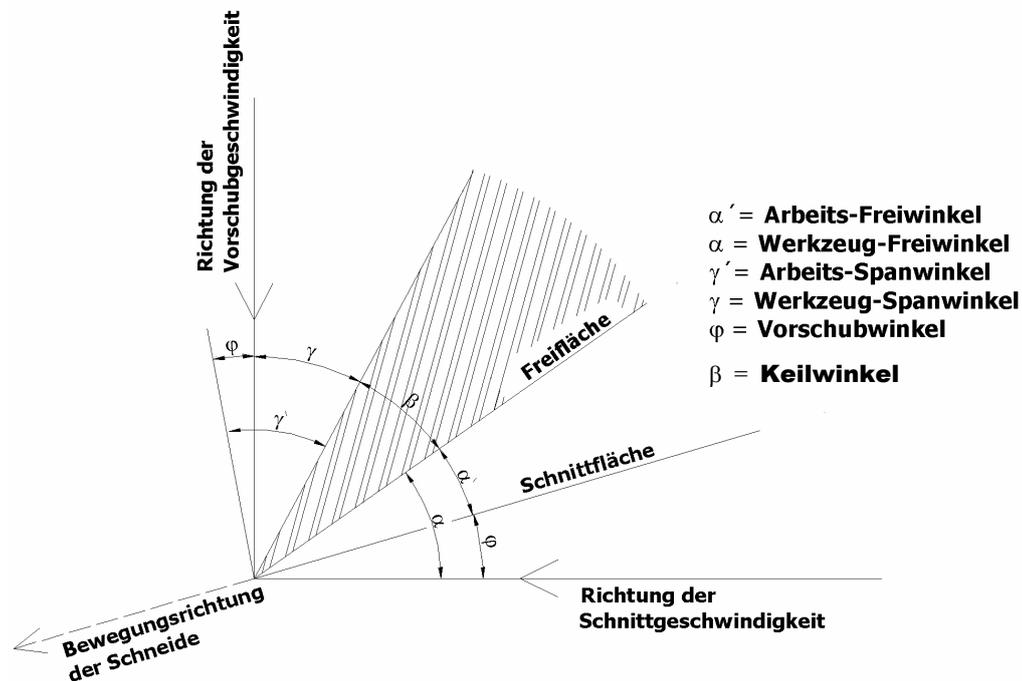


Abb. 3.2: Werkzeug- und Arbeitswinkel am Bohrwerkzeug (nach SCHULER, 1979)

Es empfiehlt sich die Schneide innen steiler und außen flacher zu fertigen, damit mit konstanten Arbeitswinkeln gebohrt werden kann. Zusätzlich wird so der freie Ablauf des Spans nicht gestört.

- Der Arbeitsschnittwinkel sollte möglichst klein gehalten werden, was aber automatisch einen kleineren Keilwinkel verursacht. Der Keilwinkel kann aber nicht zu klein sein, da die Schneide sonst zu lange würde und nicht mehr die geforderte Materialfestigkeit besäße. Es bietet sich eine Universalschneide an, deren Werkzeug-Spanwinkel sich an der Steigung der Wendel orientieren sollte.
- Damit die auftretenden Schneidenbelastungen nicht zu groß werden, sollte der Keilwinkel β 25° nicht unterschreiten.
- Der Arbeits-Freiwinkel α' sollte stets größer als 0 sein, damit kein unnötiger Verschleiß oder Energieverlust auftritt. Dies kann durch die geeignete Wahl des Werkzeug-Freiwinkels oder aber auch durch die Erhöhung der Schnecken-drehzahl erreicht werden.

Abschließend bemerkt SCHULER (1979): „Weitere Untersuchungen speziell in Bezug auf den Fördervorgang des anfallenden Bohrkleins und den daraus resultierenden Kraftbedarf sind allerdings dringend erforderlich.“

Dies zeigt, dass die Problematik der Senkrechtschneckenförderung beim Erdbohren und der diesbezügliche Forschungsbedarf schon damals als solcher erkannt wurde.

3.3 Elektrokapillarität

Elektrokinese bezeichnet genau genommen das Hervorrufen von Bewegungen in einem Medium durch Elektrizität. Im Allgemeinen versteht man darunter jedoch die Beeinflussung und Veränderung physikalischer und chemischer Eigenschaften von Stoffen unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes. Elektrokinetische Effekte werden im Bauwesen schon seit langem eingesetzt. Stichworte sind hier z.B. Entwässerung und Böschungsstabilisierung. Doch auch die Idee, durch den Einsatz elektrokinetischer Effekte den mechanischen Widerstand von Bodenbearbeitungswerkzeugen zu reduzieren, ist vom Grundsatz her schon recht alt. Vor über 70 Jahren befasste sich WEBER (1932) bereits mit dem Einfluss des elektrischen Stromes auf den Zugkraftbedarf beim Pflügen und stellte dabei Abhängigkeiten zwischen Reibungsbeiwert, Schergeschwindigkeit, angelegter Spannung und Bodenfeuchte fest (vgl. Abb. 3.3).

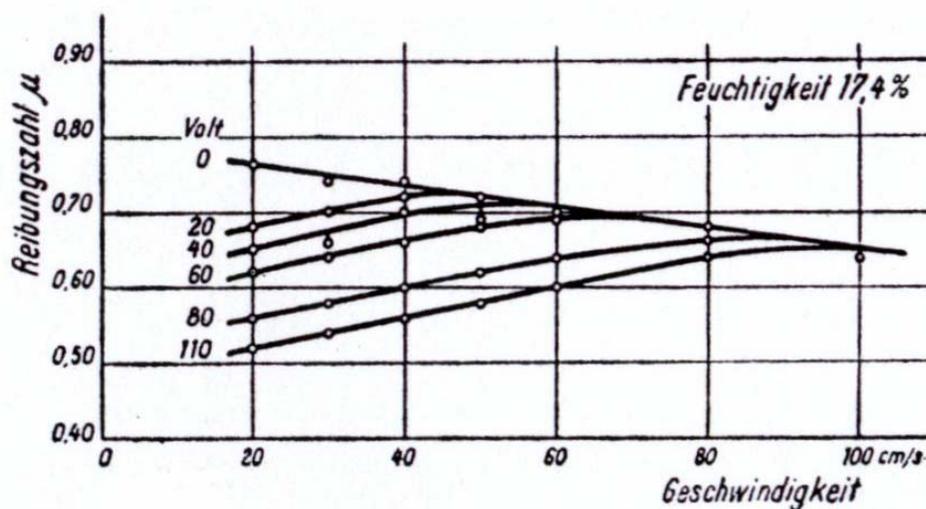


Abb. 3.3 Veränderung der Reibungszahl durch Variation von Geschwindigkeit und elektrischer Spannung (WEBER, 1932)

Dass die Nutzung elektrokinetischer Effekte in der Bauverfahrenstechnik auch heute durchaus aktuell ist bzw. sein sollte, wird von SCHMIDT et al. (1988) recht nachdrücklich dargelegt. Die dort vorgestellten Ergebnisse, insbesondere zur „Verminderung der Mantelreibung zwischen Stahlelementen und dem sie umgebenden Erdstoff“, geben einen deutlichen Hinweis auf das hier vorhandene Potential für die Weiterentwicklung von Bauverfahren im Tiefbau. Nicht zuletzt wird auch im Bereich der Bodenmechanik die Grundlagenforschung zur elektrischen Leitfähigkeit in Böden und damit zusammenhängenden Bodeneigenschaften weiter vorangetrieben (z.B. ZOU, 1998). Für eine praktische Anwendung im Spezialtiefbau müssen allerdings die recht „rauen“ Bedingungen beim Maschineneinsatz ebenso wie der Personenschutz Berücksichtigung finden.

Setzt man einen Elektrolyten einem elektrischen Gleichspannungsfeld aus, dann wirkt auf die Ionen in diesem Elektrolyten (als elektrisch geladenen Teilchen) eine Kraft in Richtung der Elektroden. Negativ geladenen Ionen werden zur Anode „gezogen“ und Positive zur Kathode. Kommt es dabei zu einer „Teilchenwanderung“, so nennt man diesen Effekt *Elektrophorese*. In einer Tonprobe lösen sich dabei (bei ausreichender Kraft) H^+ -Ionen aus der diffusen Doppelschicht der Tonminerale und wandern zur Kathode. Dabei ziehen sie durch Hydratisierung Wassermoleküle mit sich (KAUER, 2001); es entsteht ein sogenannter *elektroosmotischer Fluss*.

Der Aufbau eines elektrischen Feldes im Boden kann generell über eine entsprechende Anordnung von Elektroden erfolgen. Da zur Reduktion der Scherkräfte der Effekt der Elektrosmose über eine Wasserbewegung im Boden in Richtung Werkzeug genutzt werden soll, muss grundsätzlich entweder das Werkzeug als Kathode ausgebildet werden, oder aber es müssen Kathoden entsprechend in Werkzeugnähe angeordnet werden.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang noch die Tatsache, dass bei elektrokinetischen Anwendungen im Boden zwangsläufig pH-Wert-Änderungen auftreten. Durch die Wanderung der OH^- - bzw. der H^+ -Ionen bilden sich basische bzw. saure Fronten aus. Bei einem „statischen“ elektrischen Feld kommt es dabei langfristig zu einer Erhöhung des pH-Wertes, weil durch die größere Beweglichkeit der H^+ -Ionen ein Überschuss an OH^- -Ionen entsteht (AZZAM & OEY, 1999). Interessant ist dabei für die vorliegende Untersuchung die tatsächliche Auswirkung auf den Schneidvorgang durch ein Werkzeug als Kathode. Hier ist hauptsächlich die direkte Umgebung der Kathode (Werkzeug) zu betrachten, welche durch vermehrte Ansammlung von H^+ -Ionen eher sauer wird. Begünstigt werden könnte dieser Effekt noch durch die Bewegung des Werkzeuges, wodurch sich das elektrische Feld zwangsläufig ständig ändert.

Grundsätzlich wirkt sich eine Veränderung des pH-Wertes auf die Struktur von Tonen und damit auch auf das Gefüge von bindigen Böden aus. Bei niedrigem pH-Wert neigen Schichtsilikate – bedingt durch unterschiedliche Ladungsbelegung an Kanten und Flächen – dazu, sogenannte Kante-zu-Kante Verknüpfungen zu bilden (vgl. Abb. 3.4), die zu kartenhausartigen Gefügen führen. Die Zwischenräume dieser äußerst lockeren Gefügestruktur sind dabei meist mit Wasser gefüllt (HEIM, 1990), wodurch sich eine hohe Fließgrenze und gute plastische Eigenschaften ergeben. Diese Struktur des Gefüges könnte dazu beitragen, dass sich Adhäsionskräfte weniger stark ausbilden können. WELSCH (2003) konnte über Versuche in einem Ringschergerät dann auch tatsächlich eine direkte Abhängigkeit der Scherkraft zwischen Boden und Stahloberfläche vom pH-Wert nachweisen. Eine pH-Wert-Änderung von pH 8 auf pH 5 ergab beispielsweise für den in der vorliegenden Arbeit für die Bohrversuche verwendeten Boden eine Reduktion der Scherspannung um bis zu ca. 25%. Der Einsatz einer elektrischen Potentialdifferenz mit der Schnecke als Kathode könnte sich also für die Förderwirkung beim BolSiM durchaus auch unter diesem Gesichtspunkt positiv auswirken.

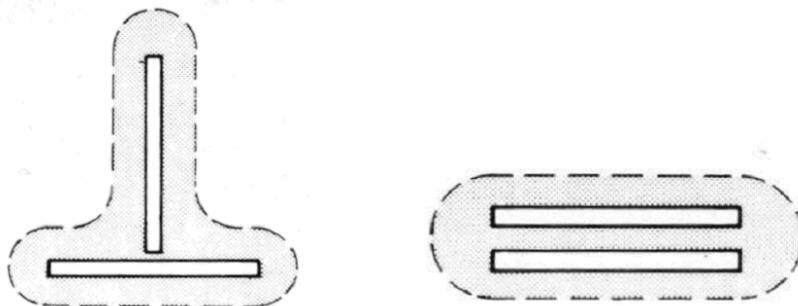


Abb. 3.4: Kante-zu-Kante-Kontakt (links) und parallele Anordnung (rechts) zweier Tonplättchen (GUDEHUS, 1981)

Bei höherem pH-Wert verändert sich die Ladung an den Kanten der Schichtsilikate, so dass sich die nun gesamt gleich (negativ) geladenen Tonplättchen gegenseitig abstoßen, was zu einer eher parallelen Anordnung führt. Damit verbunden ist eine erhöhte Beweglichkeit und eine niedrigere Fließgrenze. Es kann vermutet werden, dass diese Gefügestruktur zusammen mit dem durch den elektroosmotischen Effekt hervorgerufenen Wasserentzug an der Anode zu großen Adhäsionskräften führt.

Inwieweit die beschriebenen Effekte beim BolSiM verfahrenverbessernd eingesetzt werden können, wurde zunächst in einfachen Vorversuchen zum Bodenschneiden untersucht (vgl. Unterkapitel 6.2). Die Ergebnisse führten dann zur Entwicklung und

Implementierung der erforderlichen Einrichtungen in den verwendeten Bohrversuchsstand und zu entsprechenden Bohrversuchen unter elektrischen Potentialdifferenzen (vgl. Abschnitt 7.4.3).

3.4 Bodenconditionierung

3.4.1 Vorbemerkung

Unter dem Stichwort „konditionieren“ findet man in DUDEN (2000) folgende Angabe: „Werkstoffe vor der Bearbeitung an die erforderlichen Bedingungen anpassen“. Eine Veränderung des Bodens vor der Bearbeitung und damit vor dem Bohrvorgang – wie sie durchaus auch vorstellbar wäre – ist aber im Allgemeinen mit der Bezeichnung *Bodenconditionierung* nicht gemeint. Vielmehr sollen theoretische, Betrachtungen zur möglichen Veränderung der „Bearbeitungseigenschaften“ des zu fördernden Erdstoffes während seiner Bearbeitung vorgestellt werden. Hintergrund ist dabei der Gedanke, dass sich die Förderung durch Veränderung der Erdstoffeigenschaften u.U. gezielt günstig beeinflussen lässt, wenn die Transportmechanismen verstanden werden. Hierzu könnten beim Bohren am Bohranfänger und/oder entlang der Schnecke entsprechende Stoffe injiziert werden. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die Möglichkeiten der Conditionierung und deren Auswirkungen auf das Erdstoffverhalten bekannt sind. Hierzu soll in diesem Unterkapitel ein Überblick gegeben werden, welcher in wesentlichen Teilen direkt auf den Ausführungen von MAIDL (1995) beruht, der sich mit Bodenconditionierung im Bereich des maschinellen Tunnelvortriebs befasst hat. Insbesondere die Betrachtungen zur chemischen Conditionierung erscheinen im Rahmen der vorliegenden Arbeit zunächst vielleicht zu umfangreich. Vor dem Hintergrund, dass diese Thematik im Bereich des Spezialtiefbaus bisher noch sehr wenig beachtet wird, ist eine etwas ausführlichere Einführung – insbesondere im Hinblick auf weiterführende Verfahrensverbesserungen – an dieser Stelle jedoch angebracht.

3.4.2 Allgemeines

Generell kann unterschieden werden zwischen mechanischer Bodenconditionierung und der Zugabe von Conditionierungsstoffen. Letztere lassen sich in natürliche

(Wasser, Luft und Mineralstoffe) und künstliche oder chemische (Polymere und Schäume) Stoffe unterscheiden. *„Unter mechanischer Conditionierung versteht man die Modifikation der Bodeneigenschaften durch das alleinige Einwirken der rotierenden Abbau- und Mischwerkzeuge auf das Bodengefüge.“* (MAIDL, 1995). Eine solche Conditionierung findet beim BolSiM verfahrensbedingt immer statt. Da sie weitestgehend unkontrolliert abläuft wird sie als Maßnahme hier nicht weiter betrachtet. Allerdings muss sie bei der Zugabe von Conditionierungsstoffen wegen des Durchmischungseffektes als Bestandteil des Conditionierungskonzeptes Beachtung finden.

Der Einsatz von Wasser und Mineralstoffen als Hilfsmittel ist im Bereich des Erd- und Tiefbaus weit verbreitet (Sütsuspensionen, Bodenverbesserung mit Kalk etc.). Wasser als Conditionierungsmittel für Böden verändert bei guter Durchmischung die Konsistenz in Richtung *flüssig*, mit allen damit verbundenen bodenmechanischen Eigenschaften. Es wird ihm oft eine gewisse „Schmierwirkung“ zugeschrieben, aber es kann z.B. auch Adhäsionskräfte erhöhen. *„In weichen bindigen Böden mit gutem Wasserbindevermögen besteht durch die alleinige Zugabe von Wasser die Möglichkeit, dem Boden die gewünschten Verformungseigenschaften zu verleihen. In sehr festen, wenig quellfähigen Tonen und nichtbindigen Böden ist die Zugabe von Wasser nicht mehr wirkungsvoll, sondern sogar schädlich. Hier werden üblicherweise Tone, Polymere oder beides als Suspension aufbereitet in die Abbaukammer injiziert.“* (MAIDL, 1995). Speziell beim BolSiM werden mit Wasserzugabe bei Förderproblemen mit bindigen Böden eher negative Erfahrungen verbunden (vgl. Unterkapitel 2.3). Entwässernde Conditionierungsmittel wie z.B. Kalke, verändern die Konsistenz in Richtung *fest*. Sie werden zur sogenannten „Bodenverbesserung“ eingesetzt. Die erzielbaren Eigenschaften sind gut vorstellbar und sollen hier nicht weiter erläutert werden.

Die Auswirkungen der Conditionierung mit Luft hängen sehr stark von der Konsistenz des Bodens und der Art des Eintrages ab. Vermischt sie sich nach dem Lösen mit dem (flüssigen) Erdstoff, werden die Dichte sowie die plastischen Eigenschaften verändert. Ansonsten kann Luft (wie Wasser) spülend wirken, Wasser fern halten (unter Druck) oder/und auch den Erdstoff zumindest an der Oberfläche trocknen.

Die bisherigen Haupteinsatzbereiche für chemische Bodenconditionierungsstoffe sind der maschinelle Tunnelbau (mit Erddruckschild) und die Tiefbohrtechnik. Allerdings unterscheiden sich die dort gewünschten „Werkstoffeigenschaften“ u.U. von denen, die der besseren Erdstoffförderung beim BolSiM dienen. Die Anwendbarkeit kann aber anhand der spezifischen Eigenschaften der Stoffe auch in Verbindung mit dem zu fördernden Erdstoff vorüberlegt werden und muss dann anhand von Praxisversuchen

getestet und optimiert werden. Auf die Erläuterung dieser chemischen Stoffe und deren Eigenschaften soll hier deswegen neben den Tonsuspensionen noch näher eingegangen werden.

Im Allgemeinen soll durch die Conditionierung eine Reduktion der inneren Reibung und der Kohäsion des Erdstoffes erreicht werden. Mitunter dient sie aber auch dazu Verklebungen an den Lösewerkzeugen zu verhindern. In Tabelle 3.1 sind verschiedene mögliche Conditionierungsmaßnahmen mit den jeweils geeigneten Conditionierungsmitteln für bindige und nichtbindige Böden aufgelistet. Die Aufstellung stammt zwar aus dem Bereich des Tunnelbohrens mit Erddruckschild, lässt sich aber natürlich auch auf andere Bereiche übertragen. Schäume als Conditionierungsmittel sind dabei nicht aufgeführt; diese werden später noch gesondert behandelt.

Tabelle 3.1: Zuordnung von Conditionierungsmitteln zu Maßnahmen der Bodenconditionierung beim Bohren mit dem Erddruckschild (MAIDL, 1995)

Maßnahme	NICHTBINDIGE BÖDEN	BINDIGE BÖDEN
Reduktion des inneren Reibungswinkels	♦ (T,P)	⊗ (W)
Erhöhung des Feinanteils $d < 0,002\text{mm}$	♦ (T)	
Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit	♦ (T, P)	nur bei Klüftung (T)
Erhöhung der Kohäsion	♦ (T, P)	
Erhöhung der Konsistenzzahl	♦ (T, P)	
Verdrängung des Porenwassers	♦ (T, P)	
Bindung des Restporenwassers	♦ (T, P)	
Erhöhung der Aktivitätszahl	♦ (T)	
Erhöhung des Wassergehaltes		⊗ (W)
Reduktion der Kohäsion		⊗ (W)
Reduzierung des Verschleisses	♦ (T, P)	⊗ (T, P)
Verminderung des Verklebens		⊗ (P)

♦ in der Regel erforderlich
 ⊗ zustandsabhängig

P = Polymer
 T = Ton
 W = Wasser

3.4.3 Tonsuspensionen

Der Einsatz von Tonsuspensionen als Bodenconditionierungsmittel dient generell der Anpassung der Körnungslinie (Erhöhung des Feinkornanteils) bzw. der Verbesserung der Fließeigenschaften. In Abhängigkeit von den Anforderungen an den konditionierten Erdstoff kann es durchaus sinnvoll sein, in einer Suspension Tonminerale mit verschiedenen Eigenschaften einzusetzen. Die beiden wichtigsten in Deutschland für solche Suspensionen zum Einsatz kommenden Tone werden hier kurz vorgestellt:

Bentonite

Bentonit wird im Bauwesen i.d.R. als stark quellfähiger Ton mit starkem Wasserbindevermögen geschätzt und eingesetzt. Seine Eigenschaften werden im Wesentlichen durch das Dreischicht-Tonmineral Montmorillonit als Hauptbestandteil des Bentonits bestimmt. In Deutschland werden ausschließlich wenig quellfähige Erdalkali-Bentonite gewonnen, die durch chemische Aktivierung in hochquellfähige Aktiv-Bentonite umgewandelt werden können. Der Austausch von Ca- und Mg-Kationen durch Na-Kationen erhöht dabei das Wasserbindevermögen, wodurch auch die Filtratwasserabgabe reduziert wird.

Tonerden (Kaolinit)

Tonerden mit einem hohen Kaolinitanteil stehen in Deutschland als Conditionierungsmittel-Komponente in ausreichender Menge zur Verfügung. Das Zweischichtmineral Kaolinit besitzt nur sehr schwache Oberflächenladungen und hat damit nur ein geringes Basenaustauschvermögen. Wegen der sehr starken Hydrogenbindungen zwischen den Kristallschichten können hier Wassermoleküle deutlich schlechter eingelagert werden als bei Bentoniten. Kaolinit dispergiert daher in Wasser kaum und bildet größere Teilcheneinheiten mit geringem Wasserbindevermögen. Das Quellvermögen ist damit gering. Setzt man Kaolinit in Suspensionen ein, so erhält man im Vergleich zu Bentonitsuspensionen mit gleichen Massenanteilen eine geringere Viskosität und Stabilität sowie eine niedrigere Fließgrenze. Damit ergibt sich eine höhere Filtratwasserabgabe und eine schnellere Sedimentation der Kaolinit suspension. Tonerden (mit hohem Kaolinitanteil) eignen sich also vorrangig zur Reduzierung der Wasserdurchlässigkeit (Auffüllung der Körnungslinie mit Feinkorn) ohne große Veränderung der sonstigen Fließeigenschaften.

Im maschinellen Tunnelvortrieb mit Erddruckschilden werden auch zähflüssige Tonsuspensionen hoher Dichte eingesetzt. In neuerer Zeit spricht man dabei von *High-*

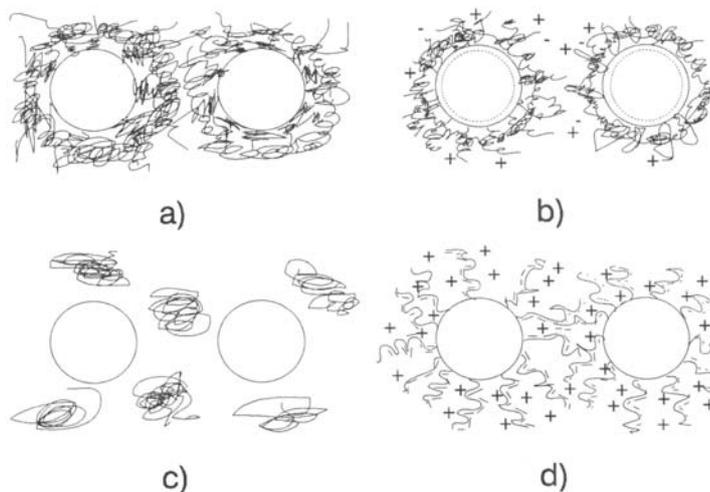
Density-Slurry (HDS) während sie in der älteren Literatur als *Mud-Making-Agent* bezeichnet werden. Sie können prinzipiell aus allen Tonarten bestehen, wobei genauere Angaben über die jeweilige Zusammensetzung nicht zu finden sind. In jedem Fall verringert ein hoher Bentonitanteil in diesen Suspensionen insbesondere die Reibung sowohl im Inneren des Materials als auch an den Oberflächen der Lösewerkzeuge. Außerdem erhöht sich damit auch die Stabilität der Suspension wodurch einer Entmischung beim Einbringen in den Erdstoff (Kolmation) entgegengewirkt wird. Da beim BolSiM weder eine Stützwirkung noch eine Filterkuchenbildung erforderlich sind, spricht nichts dagegen zur Herstellung von Tonsuspensionen zur Conditionierung neben Bentonit auch weniger quellfähige Tone, wie beispielsweise Kaolinit zu verwenden.

3.4.4 Polymere

Durch die geordnete Verknüpfung von Einzelmolekülen (Monomeren) zu Kettenmolekülen (Makromolekülen) entstehen chemische Verbindungen, die als Polymere bezeichnet werden. Die Eigenschaften der Polymere werden durch die atomare Zusammensetzung der Monomere, den Polymerisationsgrad und die Kettenmolekülstruktur bestimmt. Der Polymerisationsgrad ergibt sich aus der Anzahl der in einem Makromolekül enthaltenen Monomere und ist bei langkettigen Polymeren höher als bei kurzkettigen. In der Natur kommen Polymere sehr häufig vor, man denke nur an Stärke, Zellulose, Proteine und Nucleinsäuren. Synthetisch können Polymere durch Polymerisation, Polykondensation oder Polyaddition hergestellt werden.

Durch entsprechende chemische Steuerung wird die Herstellung von hochmolekularen Suspensionen mit sehr hohem Polymerisationsgrad ermöglicht. Solche *synthetische Polymere* sind z.B. Kunststoffe, Elastomere und Kunstfasern. Zur Herstellung von Polymersuspensionen sind vor allem die Polyacrylamide von Bedeutung. Bei der Sonderform der *Copolymer* sind in jedem Makromolekül mindestens zwei Arten von monomeren Einheiten enthalten. Aus Japan ist beispielsweise ein granulatförmiges Copolymer aus Acrylamid und Vinylalkohol bekannt, welches nicht kolloidal löslich sondern rein quellfähig ist. Das Produkt kann die 500-fache Wassermenge des Eigengewichts adsorbieren und ist so viskos, dass die einzelnen Körner auch nach abgeschlossenem Quellvorgang – selbst unter hohem Druck – als Einzelaggregate erhalten bleiben.

Im Tunnelbau und Spezialtiefbau haben sich besonders anionische halbsynthetische Polymere, die auch als „natürlich-modifizierte“ Polymere bezeichnet werden, bewährt. Ein wichtiger Vertreter dieser Gruppe ist die *Carboxymethylcellulose* (CMC), die aus natürlichem Zellstoff, Natronlauge und Monochloressigsäure oder deren Natriumsalz hergestellt wird. Aufgrund der negativen Aufladung der CMC-Makromoleküle weist CMC einen anionaktiven Charakter auf und ist stark hydrophil. Bei der Lösung in Wasser bildet CMC damit stabile kolloidale Lösungen, die in Abhängigkeit von der Konzentration in Sol- und Gel-Lösungen unterschieden werden. Bei den niedrig konzentrierten Sol-Lösungen sind die Fadenmoleküle unabhängig voneinander im Lösungsmittel verteilt. Durch eine Erhöhung der Konzentration durchdringen und verknäulen sich die Fadenmoleküle und die Viskosität nimmt zu, bis die Moleküle ein lockeres Netz bilden. Die Lösung geht dann in eine Gel-Lösung über. Die Ausrichtung der Fadenmoleküle kann allerdings mechanisch beeinflusst werden. Die Viskosität verringert sich zum Beispiel durch den Einfluss von Scherbeanspruchung, da sich die Fadenmoleküle dabei entwirren.



- a) Adsorption des Polymers ohne elektrisch wirksame Kräfte
 b) Adsorption des Polymers an geladenen Partikeloberflächen
 c) unlösliche und nichtadsorbierende Polymere zwischen den Bodenpartikeln
 d) Adsorption ionogener Polymere an ungeladenen Partikeloberflächen

Abb. 3.5: Wechselwirkung zwischen Kettenmolekül und Bodenpartikel (MAIDL, 1995)

Aufgrund der Manipulierbarkeit während der Herstellung können Polymere die unterschiedlichsten Eigenschaften aufweisen und hervorrufen. Je nach Kettenlänge kann durch die Zugabe eines Polymers die Viskosität gesenkt oder gesteigert werden. Betrachtet man zusätzlich noch die Ionogenität und Konzentration, lassen sich die

Suspensionseigenschaften außerdem in Richtung ausflockend oder dispergierend beeinflussen. In Abb. 3.5 werden die grundsätzlichen Wechselwirkungen der Kettenmoleküle und Partikel im Korngerüst einer Polymer-Boden-Suspension gezeigt. Bei nicht ionogenen Polymeren und ungeladenen Partikeln können die Kettenmoleküle entweder auf der Kornoberfläche adsorbiert werden (a) oder als nicht adsorbierende Polymere zwischen den Bodenpartikeln bleiben (c); es werden dabei keine elektrostatischen Kräfte wirksam. Wenn die Partikeloberflächen allerdings ein elektrisches Ladungspotential aufweisen (b), oder die Polymerlösung ionogenen Charakter besitzt (d), entstehen elektrische Attraktionskräfte, die für eine starke Bindung zwischen Partikel und Polymer sorgen können.

Zusammenfassend kann nach MAIDL (1995) festgestellt werden:

- Bei ausreichender Kettenlänge des Polymers wird das gesamte Korn in eine Gelstruktur mit eingebunden; die Molekülketten *verfilzen* quasi mit den Partikeln und untereinander (Gelbildung). Die innere Reibung nimmt ab und es kann selbst in nichtbindigem Erdstoff eine kohäsive Matrix entstehen.
- Bei geringem Polymerisationsgrad sind in erster Linie elektrostatische Wechselwirkungen im Korngerüst maßgebend, weil sich die Molekülketten nicht ineinander *verknäulen*. Durch eine verstärkte Abstoßwirkung der Teilchen kann so z.B. die Stabilität einer Suspension verbessert werden.
- Bei Tonen, welche beim Abbau unter Wasserzutritt zum Kleben neigen, kann durch anionaktive synthetische Polymere das Quellen und damit das Kleben weitgehend verhindert werden. Die Sorbtion der Makromoleküle an den positiv geladenen Kanten der Tonchips hemmt dabei den Wasserzutritt in die Tonschichtpakete.

3.4.5 Schäume

Bei den hier betrachteten Schäumen handelt es sich ausschließlich um sogenannten *physikalischen Schaum*, der durch mechanische Verwirbelung eines großen Gasvolumens (hier Luft) in einer niedrigviskosen, schäumfähigen Flüssigkeit entsteht. Diese Schäume besitzen keine ansetzbare Eigenfestigkeit. In der Tiefbohrtechnik werden solche Schäume schon seit längerem eingesetzt. Sie sollen sowohl die Bohrspülung stabilisieren und deren Dichte reduzieren als auch das Verkleben der Bohrwerkzeuge verhindern. Die Schaumerzeugung erfolgt dabei an der Bohrlochsohle

während des Bohrprozesses durch die mechanische Verwirbelung des Bohrkleins und der schäumfähigen Flüssigkeit mit Druckluft. Eine andere Variante, welche im maschinellen Tunnelvortrieb eingesetzt wird, ist die Injektion von fertigem extern erzeugtem Schaum. Dort dient der Einsatz von Tensidschäumen der Conditionierung grobkörniger Böden. Eine solche Technik ist generell auch beim BolSiM vorstellbar. Zwar treten hier bei grobkörnigen Böden weniger Probleme auf, aber u.U. kann das Verhalten des aus – für die Förderprobleme verantwortlichen – „festen“ bindigen Einzelaggregaten bestehenden Erdstoffs günstig beeinflusst werden (vgl. Abschnitt 8.3.3). Ob und in welchen Fällen die Conditionierung mit Schaum erfolgversprechend ist, muss jedoch erst noch näher untersucht werden. Die folgenden Erläuterungen sollen zunächst dem Verständnis für die Wirkweise von Schäumen als Bodenconditionierungsmittel dienen.

Durch Zugabe von geringen Mengen sogenannter Schaumbildner in gewöhnlichem Wasser entsteht eine schäumfähige Flüssigkeit. Die Schaumqualität lässt sich steigern, wenn statt Wasser Flüssigkeiten mit geeigneten Schaumstabilisatoren verwendet werden. Schaumbildner bestehen aus organischen Kohlenstoffverbindungen, die aufgrund ihrer Grenzflächenaktivität schon seit Jahrzehnten in der Waschmittelindustrie erforscht und eingesetzt werden. Diese sogenannten Tenside erhalten ihre Grenzflächenaktivität durch einen langkettigen hydrophoben Molekülteil und einen am dessen Ende gebundenen stark hydrophilen elektrisch geladenen Molekülteil. Diese bipolare Molekülstruktur ist dafür verantwortlich, dass ein Tensid aufgelöst in Wasser einen Oberflächenfilm bildet und somit die Oberflächenspannung herabgesetzt wird. Die Bildung von kugelförmigen Gebilden aufgrund der Affinität zwischen den hydrophoben Gruppen wird Mizellenbildung genannt (siehe Abb. 3.6). Durch die Herabsetzung der Oberflächenspannung wird beispielsweise das Adsorptionsverhalten einer Flüssigkeit an Festkörpern verbessert; damit werden Kornoberflächen besser benetzt.

Bei Tensiden werden die grenzflächenaktiven Verbindungen bezüglich ihres ionogenen Verhaltens in Abhängigkeit von den zugeführten hydrophilen Gruppen in *anionaktive*, *kationaktive*, *ampholytische* und *nichtionogene* Verbindungen unterschieden. Die drei ersteren können in Wasser mehr oder weniger stark in Anionen oder Kationen dissoziieren und heißen deshalb ionogene Tenside. Elektrisch neutral verhalten sich dagegen die nichtionogenen Verbindungen. Im Hinblick auf die Bodenconditionierung eignen sich zur Schaumerzeugung besonders anionaktive Verbindungen. Die kationaktiven Tenside werden von den meist negativ geladenen Bodenfeinstteilchen adsorbiert und gehen damit „verloren“ (*Auszieheffekt*). Sie werden daher eher als Flockungs- und Flotationsmittel, sowie in der Textilindustrie zur Imprägnierung eingesetzt.

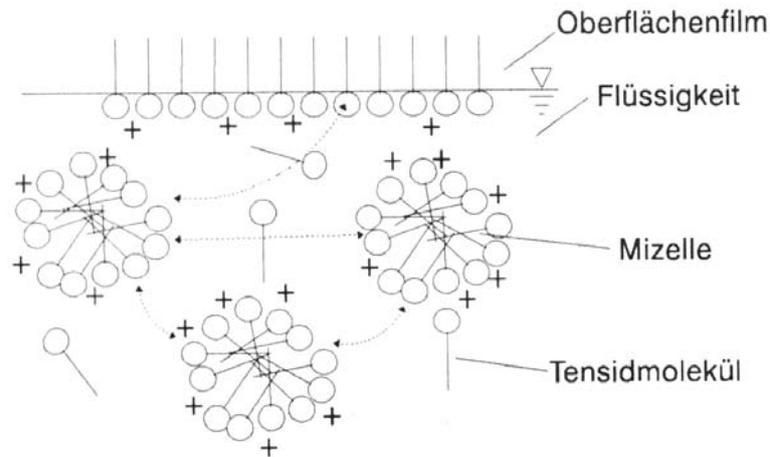


Abb. 3.6: Oberflächenfilm- und Mizellenbildung in einer tensidhaltigen Flüssigkeit (MAIDL, 1995)

Zum Schaumverhalten im Boden schreibt MAIDL (1995): „*Ein Boden befindet sich im Zustand eines Zweiphasensystems, wenn er entweder unterhalb des Grundwassers (fest, flüssig) vollständig wassergesättigt oder oberhalb des Grundwassers vollständig trocken (fest, gasförmig) ansteht. Durch die Injektion von Schaum ... wird das Zweiphasensystem in ein Dreiphasensystem (fest, flüssig, gasförmig) überführt. ... Die Eigenschaften des neu entstandenen Dreiphasensystems sind maßgeblich von der Volumenverteilung der festen, flüssigen und gasförmigen Phasen beeinflusst. Die Volumenverteilung ist jedoch keine Konstante, sondern von der Stabilität des injizierten Schaums abhängig und somit als zeitlich veränderlich zu betrachten.*“

Bei den weiteren Betrachtungen der Anordnung von Bodenteilchen im Schaum soll nur auf anionische Tenside und Schaumstabilisatoren eingegangen werden, die sich – wie bereits erwähnt – besonders für die Bodenconditionierung eignen. Die auf der nächsten Seite folgende Abb. 3.7 zeigt jeweils zwei Bodenteilchen innerhalb des Korngerüsts eines Schaum-Bodengemisches ohne Polymere bei verschiedenen Tensidkonzentrationen. Die hydrophile Kornoberfläche führt dazu, dass es an dieser zu einer Hydratisierung der ebenfalls hydrophilen Tensidmolekülgruppe kommt. Dadurch wird der Schaumlösung zwangsläufig ein Teil der aktiven Tensidsubstanz entzogen. Wie in Abb. 3.7a zu sehen, führt dies bei zu geringer Tensidkonzentration zu einer Hydrophobierung des Bodenteilchens: die hydrophobe Gruppe weist nach außen und ist damit dem Wasser zugewandt. Hierdurch verstärkt sich das Aneinanderhaften von feinen Partikeln. Im Dreiphasensystem führt die Hydrophobierung der Kornoberflächen bei Kontakt mit einer Schaumblase unmittelbar zu deren Zerstörung, solange bis das

Korn von einem ausreichend dicken, oberflächenaktiven Film umhüllt ist. Erhöht man die Tensidkonzentration dann lagern sich an den hydrophoben Enden der Moleküle weitere Tensidmoleküle an. Damit entsteht nach außen wieder eine hydrophile Gesamtheit und es bildet sich zwischen den Schaumblasen und der Kornoberfläche ein stabilisierendes Polster (vgl. Abb. 3.7b). Außerdem wird durch den anionischen Charakter der Tenside die negative Oberflächenladung erhöht, was zu einer verstärkten Abstoßung der Partikel führt und einen weiteren Schutz der Blasen bewirkt.

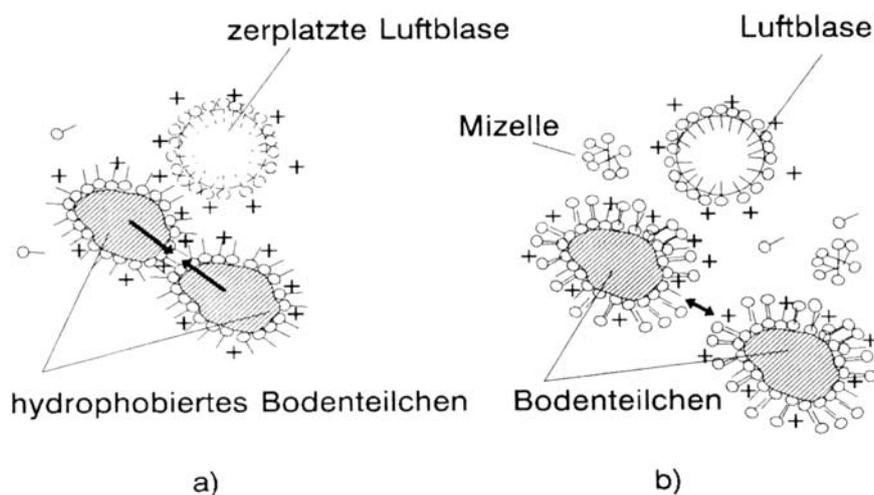


Abb. 3.7: Adsorption der Tensidmoleküle an der Grenzfläche flüssig-fest bei a) zu geringer Tensidkonzentration; b) ausreichender Konzentration (MAIDL, 1995)

Bei Schaumlösungen, die anionaktive Polymere enthalten, adsorbieren die stark hydrophilen und negativen Kettenmoleküle sehr fest an der Kornoberfläche was dazu führt, dass eine diffuse Schicht aus dissoziierten Tensid- und Polymermolekülen das gesamte Korn umschließt (siehe Abb. 3.8). Die Polymer-Tensidschicht wirkt als Schutzhülle und schirmt das Korn vor elektrischen Einflüssen ab, so dass keine positiven Kationen zur Kornoberfläche diffundieren und die Oberflächenladung schwächen können. Durch das insgesamt deutlich höhere negativere Ladungspotential, wird die Stabilität des Schaums verbessert. Eine mechanische Zerstörung der Blasen durch die ursprünglich raue Kornoberfläche wird zudem durch den gelartigen Charakter der umhüllenden Schicht und die damit deutlich reduzierte Korn-zu-Kornreibung im Dreiphasensystem vermindert. Des Weiteren führt der Polymerschaum zum Verkleben der gesamten Matrix, wodurch eine weitgehende Wasserundurchlässigkeit entsteht.

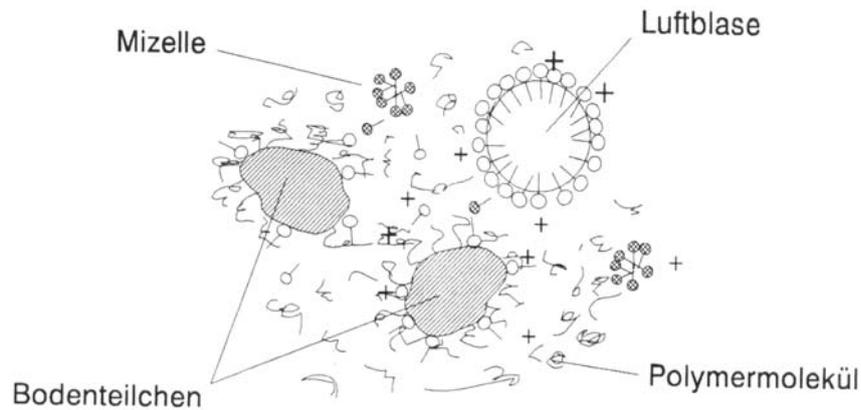


Abb. 3.8 Adsorption einer polymerhaltigen Schaumlösung an der Grenzfläche flüssig-fest (MAIDL, 1995)

„Der innere Zusammenhalt des Dreiphasensystems beruht auf den wirksamen Adhäsionskräften und Kapillarspannungen. ... Ist der Schaumanteil im Dreiphasensystem so hoch, daß die Körner einander nicht berühren, entspricht die innere Scherfestigkeit (Kohäsion) des Dreiphasensystems der Fließfestigkeit des Schaums.“ (MAIDL, 1995). Verringert man den Schaumanteil bis zur lockersten Dichte des Bodens, so verbleibt zwischen den Körnern nur eine dünne Flüssigkeitsbrücke, was eine gewisse Kapillarkohäsion hervorruft. Wegen der reduzierten Oberflächenspannung und der Gleitwirkung des Tensids ist der innere Zusammenhalt jedoch geringer als mit reinem Wasser. „Eine weitere Zunahme der Kohäsion bewirken die im Schaum enthaltenen Polymere, da durch die Vernetzung der Kettenmoleküle untereinander und Adhäsion des Polymers an den Kornoberflächen die Bodenpartikel besser aneinander haften.“ (MAIDL, 1995).

Es soll noch darauf hingewiesen werden, dass beim Einsatz von Tensiden und Polymeren immer auch die Umweltverträglichkeit der verwendeten Stoffe berücksichtigt werden muss. Der Gesetzgeber schreibt zum Beispiel vor, dass Tenside nur so eingesetzt werden dürfen, dass nach ihrem Gebrauch jede vermeidbare Beeinträchtigung der Beschaffenheit der Gewässer, insbesondere im Hinblick auf den Naturhaushalt und die Trinkwasserversorgung, sowie eine Beeinträchtigung des Betriebs von Abwasseranlagen unterbleibt. Polymere sind in ihrer Umweltverträglichkeit nicht pauschal einzuordnen. Natürliche Polymere sind als unbedenklich einzustufen; synthetisch hergestellte jedoch können teilweise krebserregend und nur sehr langsam bzw. nur teilweise biologisch abbaubar sein.

Kapitel 4

Theorie der Schneckenförderung

4.1 Allgemeines zur Schneckenförderung

Schneckenförderer sind mit die ältesten Stetigförderer. Sie gehen auf eine Entwicklung von Archimedes vor ca. 2.200 Jahren zurück, die sog. Archimedesschraube, die ursprünglich als „Wasserpumpe“ (z.B. zur Feldbewässerung) eingesetzt wurde. Schneckenförderer bestehen im Ursprung aus einem schräg gestellten Trog (oder Rohr) und einer darin gelagerten umlaufenden Rohrwelle mit schraubenförmig umwundener Voll-, Ring- oder Segmentwendel als Schubelement. Das eingeführte Fördergut wird durch sein Eigengewicht und die Reibung an der Trogwand am Mitdrehen gehindert und schiebt sich somit – ähnlich der von einer Spindel angetriebenen Wandermutter – stetig vorwärts (ZILLICH, 1972). Anders ausgedrückt wird bei der horizontalen und leicht geneigten Förderung das Fördergut bei jeder Drehung der Schnecke um eine Ganghöhe in Axialrichtung bewegt. Dabei wird ein Mitdrehen des Fördergutes durch seine Gewichtskraft und die daraus resultierende Reibung an Trog oder Rohr verhindert (PAJER, 1988).

Im Weiteren wird – wegen der Parallelen zum hier untersuchten Bohrverfahren – im Wesentlichen nur noch auf vertikale Schneckenförderer eingegangen. Das Prinzip der Wandermutter gilt im Allgemeinen auch hier für die Förderung; lediglich die Ursache zur Erzeugung der notwendigen Rohrreibung ist eine andere (RONG, 2004).

In der Literatur sind zahlreiche Veröffentlichungen zu Transportvorgängen auch in vertikalen Schneckenförderern zu finden. Es handelt sich dabei jedoch meist um Untersuchungen zu sehr speziellen Problemen aus dem Bereich der Schüttgutförderung (z.B. STAHL, 1994 oder GREINWALD, 1994) oder zu schnelldrehenden Hochleistungsförderern (z.B. BLOMEYER, 2008), welche in der hier betrachteten Problematik kaum weiterführen. Dennoch soll im Folgenden auf einige Grundlagen aus der Schüttgutförderung mit vertikalen Schneckenförderern eingegangen werden, um das Verständnis von Transportvorgängen in solchen Schneckenförderern zu erleichtern.

4.2 Schneckenförderung von Schüttgütern

4.2.1 Vorbemerkung

Die in diesem Unterkapitel behandelte Förderung von Schüttgütern dient der allgemeinen Vorstellung der bekannten Fördermechanismen in Senkrechtschneckenförderern als Grundlage für das Verständnis der Erdstofftransportvorgänge beim BolSiM. Die Darstellungen der meisten Autoren gehen auf SINHA (1959) zurück, der erstmals Transportgeschwindigkeit und Durchsatz im vertikalen Schneckenförderer über eine Einzelkornbetrachtung mathematisch formuliert hat und seine Ergebnisse auch anhand von Versuchen bestätigen konnte. BÖTTCHER (1963) konnte dann eine allgemeingültige Bewegungsgleichung für ein Einzelkorn in Schneckenförderern beliebiger Neigung aufstellen, die sich jedoch nicht geschlossen lösen lässt. Über die mathematische Formulierung experimentell gewonnener Erkenntnisse gelang es ihm aber, praktisch verwertbare Bestimmungsgleichungen für verschiedene Förderparameter zu entwickeln. Wie sich zeigt „...bedingt schon das Erforschen der Förderung eines Einzelkörpers einen großen mathematischen und experimentellen Aufwand.“ (BÖTTCHER, 1963). So existiert auch bis heute lediglich für horizontale bis leicht geneigte, jedoch nicht für vertikale Schneckenförderer, eine genormte Auslegungsvorschrift (DIN 15262, 1983). Eine sehr detaillierte Zusammenstellung des bisherigen Standes der Forschung im Bereich geneigter und vertikaler Schneckenförderer sowie von Grundlagen zur zugehörigen Kornbewegung bietet RONG (2004).

Für die folgenden Erläuterungen der Grundlagen zur Einzelkörperförderung werden im Wesentlichen Darstellungen und Ausführungen von PAJER (1988) als Quelle benutzt. Die auftretenden Mechanismen und Eigenarten lassen sich allerdings nur teil- oder ansatzweise auf den hier untersuchten Bohrprozess übertragen. Dies liegt daran, dass einige Voraussetzungen für den Förderprozess fehlen bzw. manche Randbedingungen zu verschieden sind. So ist, ganz abgesehen von den sehr unterschiedlichen Materialgegebenheiten, z.B. alleine schon die Rotationsgeschwindigkeit der Schnecke beim Bohren sehr viel niedriger als in herkömmlichen Senkrechtschneckenförderern. Die heute von den meisten Autoren als „Antrieb“ für die Förderung beschriebene Fliehkraft des Fördergutes verliert hier dadurch u.U. ihre Bedeutung als zentrale Ursache für die erforderliche Rohrreibungskraft. Es ist also erforderlich weitere Fördermechanismen zu erkennen und zu beschreiben, wenn das BolSiM verstanden werden soll.

4.2.2 Einzelkörperbetrachtung

Vertikale Schneckenförderer werden zur Förderung von staubförmigem, feinkörnigem oder stückigem Fördergut, zum Beispiel bei der Schiffsentladung oder der Silobefüllung, eingesetzt. Hierbei gleitet jedes Fördergutteilchen auf der Schneckenwendel nach oben, was bedeutet, dass es bei gleichem Radius eine kleinere horizontale Umfangsgeschwindigkeit haben muss als die Schnecke selbst (PAJER, 1988). Die aus seiner Kreisbahngeschwindigkeit resultierende Fliehkraft drückt das Teilchen gegen den inneren Rohrmantel des Förderers und die dadurch hervorgerufene Wandreibung sorgt für die zur Förderung erforderliche Bremsung des Teilchens. Die Fördergeschwindigkeit v ergibt sich als Vertikalkomponente der resultierenden Teilchengeschwindigkeit. Damit mittels dieses Fördermechanismus eine Steigförderung überhaupt möglich ist, muss die Schneckendrehzahl oberhalb eines kritischen Grenzwerts gewählt werden. Bei dieser sogenannten kritischen Schneckendrehzahl n_k befindet sich das Gutkorn in einem Kräftegleichgewicht und bewegt sich am Rohrmantel tatsächlich auf einer waagerechten Kreisbahn, so dass keine Förderung stattfindet.

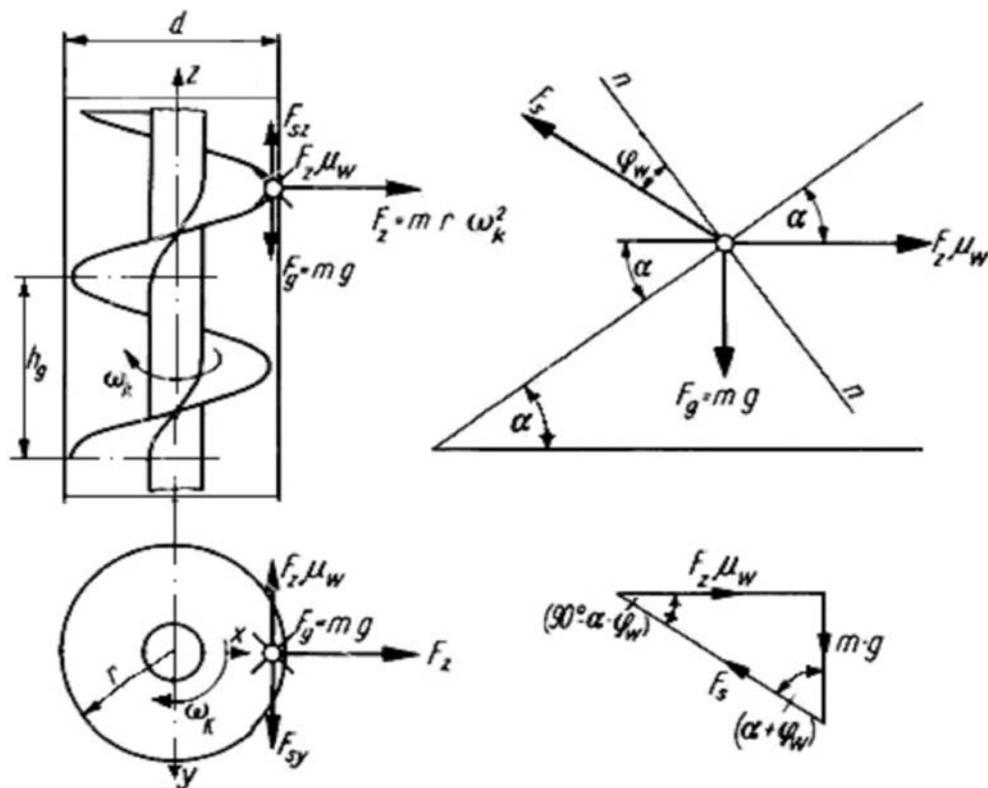


Abb. 4.1: Kräfteplan bei der Schüttgutschneckenförderung für ein Schüttgutkorn bei waagerechter Kreisbahn (PAJER, 1988)

Die Kräftewirkung im Schneckenförderer lässt sich durch eine Abwicklung des Mantelrohrs darstellen. Der äußersten Wendellinie entspricht dabei eine Gerade mit dem Neigungswinkel α (Abb. 4.1). Die auf das Gutkorn wirkende Zentrifugalkraft F_z bewirkt als Normalkraft eine entgegen der waagerechten Drehrichtung gerichtete Reibkraft $F_{z\mu_w}$ an der Rohrwand. Die Kräftesumme aus dieser Reibkraft und der Korngewichtskraft steht (bei $n = n_k$) mit der Stützkraft F_s der Wendelfläche im Gleichgewicht. Der Winkel zwischen F_s und der Normalen zur Wendelfläche ergibt sich als Wandreibungswinkel φ_w . Die kritische Drehzahl n_k lässt sich aus dem Kräftedreieck ermitteln:

$$\tan(90^\circ - \alpha - \varphi_w) = \frac{mg}{r\omega_k^2\mu_w}$$

und somit:

$$n_k = \frac{30}{\pi} \omega_k = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g}{r\mu_w} \tan(\alpha + \varphi_w)}$$

Um eine (vertikale) Förderung erreichen zu können, muss – unter den hier getroffenen Voraussetzungen – die Schneckendrehzahl also höher sein, als die kritische Drehzahl n_k . Zur Ermittlung der relevanten Größen für den Zustand der Förderung wird nun außer dem Kräfteplan auch der Geschwindigkeitsplan (siehe Abb. 4.2) betrachtet.

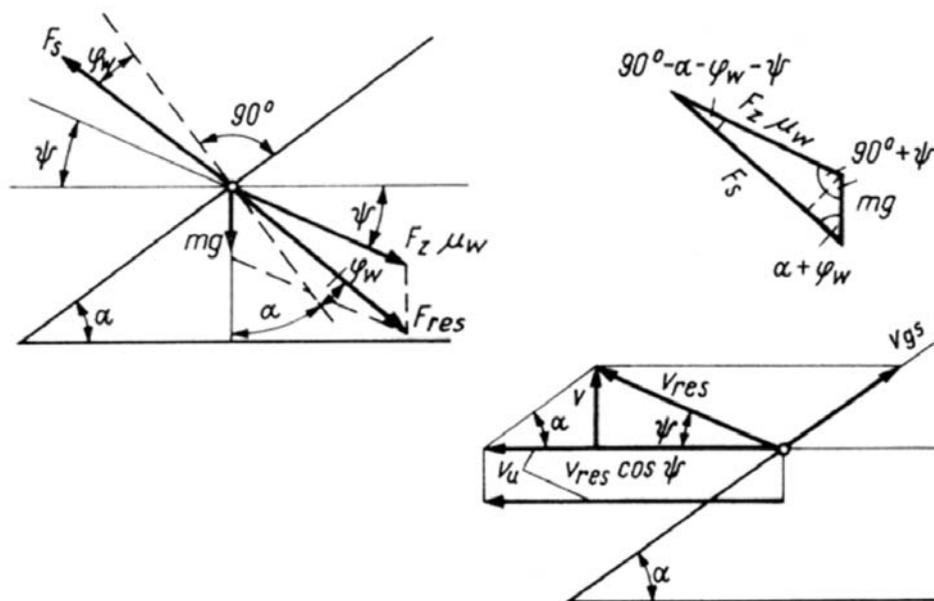


Abb. 4.2: Kräfte- und Geschwindigkeitsplan bei der Schüttgutschneckenförderung für ein Schüttgutkorn bei vertikalem Transport (PAJER, 1988)

Die eigentliche Fördergeschwindigkeit ergibt sich als Vertikalkomponente v der resultierenden Korngeschwindigkeit v_{res} , welche zur Horizontalen die Neigung ψ als Steigungswinkel der Bewegungsbahn aufweist. Die Fördergeschwindigkeit v kann für eine gegebene Umfangsgeschwindigkeit berechnet werden, wenn man den unbekanntem Steigungswinkel ψ eliminiert. Die aus der Zentrifugalkraft resultierende Reibkraft $F_z\mu_w$ wirkt entgegen der Richtung der Geschwindigkeit v_{res} . Die Resultierende aus der Korngewichtskraft mg und der Reibkraft $F_z\mu_w$ muss der um den Wandreibungswinkel φ_w gegen die Normale der Wendelfläche geneigten Stützkraft F_S das Gleichgewicht halten. Für die im Kräftedreieck gestrichelt gekennzeichnete Höhe h gilt:

$$\begin{aligned} h &= mg \sin(\alpha + \varphi_w) = F_z \mu_w \sin(90^\circ - \alpha - \varphi_w - \psi) \\ &= F_z \mu_w \cos[(\alpha + \varphi_w) + \psi] \\ &= F_z \mu_w [\cos(\alpha + \varphi_w) \cos \psi - \sin(\alpha + \varphi_w) \sin \psi] \end{aligned}$$

Für die Beschreibung der Zentrifugalkraft F_z muss beachtet werden, dass die Bewegung des Gutkorns nun einer Schraubenlinie folgt. Mit der Neigung ψ der Schraubenlinie ergibt sich deren Krümmungsradius zu $r/\cos^2\psi$ und damit die Zentrifugalkraft F_z zu:

$$F_z = \frac{mv_{\text{res}}^2 \cos^2\psi}{r} = \frac{mv^2 \cos^2\psi}{r \sin^2\psi} = \frac{mv^2}{r} \cot^2\psi$$

Setzt man diesen Ausdruck in die obige Gleichung für h ein, so erhält man nach Umformung die gesuchte Fördergeschwindigkeit v :

$$v = \sqrt{\frac{gr}{\mu_w \cot^2\psi [\cot(\alpha + \varphi_w) \cos \psi - \sin \psi]}}$$

Aus dem Geschwindigkeitsplan ergibt sich für die Neigung ψ der Bahn des Gutkorns:

$$v_u = v \cot \alpha + c \cot \psi$$

$$\cot \psi = \frac{v_u}{v} - \cot \alpha.$$

Berücksichtigt man die Beziehungen

$$\sin \psi = \frac{1}{\sqrt{1 + \cot^2\psi}} \quad \text{und} \quad \cos \psi = \frac{\cot \psi}{\sqrt{1 + \cot^2\psi}}$$

ergibt sich schließlich eine Bestimmungsgleichung für die Fördergeschwindigkeit v eines Einzelkorns in einem Senkrechtschneckenförderer mit v als implizite Funktion der Umfangsgeschwindigkeit v_u :

$$\frac{gr}{\mu_w} \cdot \frac{1}{v^2 \left(\frac{v_u}{v} - \cot \alpha \right)^2} = \frac{\cot(\alpha + \varphi_w) \left(\frac{v_u}{v} - \cot \alpha \right) - 1}{\sqrt{1 + \left(\frac{v_u}{v} - \cot \alpha \right)^2}}$$

Unter der vereinfachenden Annahme, dass die Vertikalkomponenten der tatsächlichen Geschwindigkeiten der einzelnen Gutteilchen auf verschiedenen Radien gleich sind, ergibt sich der Durchsatz als Produkt aus der so ermittelten Fördergeschwindigkeit und der Füllung des Förderers. Die komplette Schneckenfüllung wird dabei quasi als ein Körper betrachtet. SINHA (1959) ging dabei von folgenden geometrischen Überlegungen zu Füllung und Füllquerschnitt in der Schnecke aus:

Das Fördergut füllt den Schneckenangang i.d.R. nicht vollständig; die Materialhöhe steigt zum Außenrand der Schnecke hin an. Das ausgebildete Profil lässt sich theoretisch schwer erfassen und wird daher, wie in Abb. 4.3 dargestellt, für die Berechnung vereinfachend als lineare Böschung angenommen.

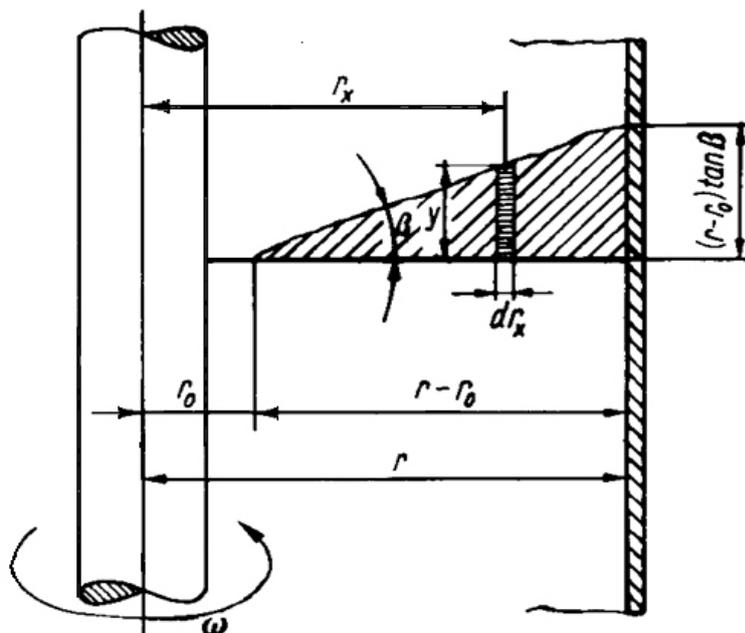


Abb. 4.3: Geböschte Fördergutverteilung auf der Schneckenwendel (PAJER, 1988)

Der Radius r_0 der Böschungsfußlinie bedingt einen inneren Hohlraum und vergrößert sich mit der Drehzahl, weil die zunehmende Zentrifugalkraft bewirkt, dass die Gutteilchen mehr nach außen geschleudert werden. Unter vereinfachenden Annahmen hat SINHA (1959) diesen Radius r_0 sowie das Volumen V einer Umdrehung des schraubenförmigen Körpers berechnet und daraus dann den theoretischen Fördergutstrom in Abhängigkeit von der Schneckendrehzahl ermittelt. Er konnte seine Theorie anhand praktischer Versuchsergebnisse gut bestätigen, so dass sie in der Fördertechnik – bei entsprechenden Randbedingungen – auch heute noch Bestand hat. Allerdings werden in neueren Untersuchungen mehrere verschiedene Füllungskonfigurationen unterschieden (vgl. Abb. 4.4), was denn auch kompliziertere Betrachtungen erfordert.

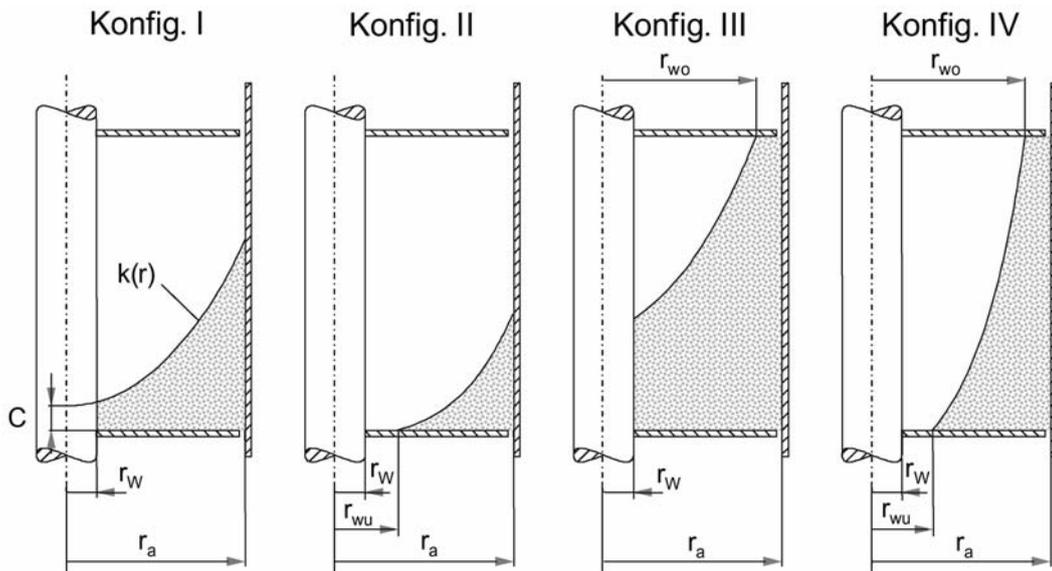


Abb. 4.4: Vier mögliche Füllungskonfigurationen in der Schneckenkammer (RONG, 2004)

4.2.3 Mehrkörperbetrachtung

In den Betrachtungen zur Einzelkörperförderung werden nur die Vorgänge an den Rändern eines Einzelkörpers, also zwischen Einzelkörper und Schneckenwendel bzw. Rohrrinnenwand berücksichtigt. Werden dem Fördergut – wie es bei der Schneckenförderung der Fall ist – von außen Belastungen aufgeprägt, so wird seine Bewegung jedoch auch von den Vorgängen im Inneren geprägt. Diese müssen also ebenfalls berücksichtigt werden (RONG, 2004).

Über seine theoretischen Untersuchungen zur Einzelkörperförderung in vertikalen Schneckenförderern (welche den hier dargestellten entsprechen) hinaus, hat MECHIAS (1975) bereits Betrachtungen zur Mehrkörperförderung in Schneckenförderern angestellt, die hier etwas näher erläutert werden sollen.

Bei der Einkörperbetrachtung wird zur Ermittlung der Bewegungsgleichung jedes einzelnen Kornes die Annahme getroffen, dass es während der Förderung einen ständigen direkten Kontakt mit der Wendeloberfläche und der Rohrrinnenwand besitzt. Diese Bedingung ermöglicht es theoretisch, die auf das Korn einwirkenden Kräfte mathematisch exakt zu beschreiben. Wenn mehrere Teilchen sich im Schneckenengang gegenseitig beeinflussen, ist eine solche Annahme aber nicht zulässig, auch wenn sich auf der Basis der Einkörperbetrachtung in vielen Fällen gute Vorhersagen treffen lassen.

Genaugenommen können die Körner des Fördergutes – ausreichenden Füllungsgrad des Förderers vorausgesetzt – zwischen Seelenrohr und Mantelrohrwandung jede Position einnehmen. „Das bedeutet, dass die Bewegung der Teilchen und damit die Transportmechanismen bei Schüttgutförderung erheblich komplizierter sind als bei der Einzelkörperförderung und eine Ermittlung der Bewegungsgleichungen laut nicht möglich ist.,“ (MECHIAS ,1975). Der Massenstrom lässt sich also nicht in Abhängigkeit von den Daten des Förderers und des Fördergutes sowie den Betriebsbedingungen analytisch ermitteln. Um dennoch Aussagen treffen zu können, sind daher Modellvorstellungen erforderlich. GREINWALD (1994) z.B. teilt den Schüttgutkörper in der Schneckenkammer in zwei Zonen mit unterschiedlichen Spannungszuständen ein (siehe Abb. 4.5).

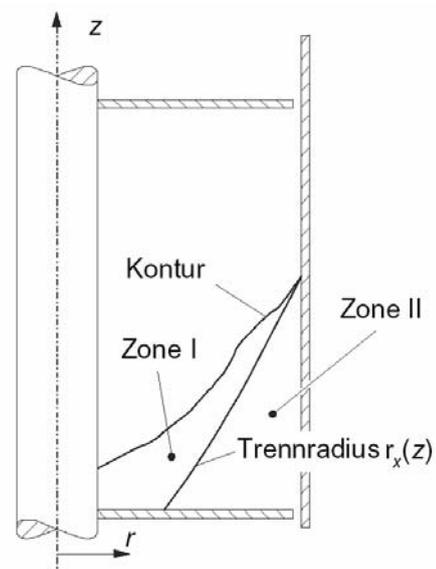


Abb. 4.5: Unterteilung des Schüttgutes in der Schneckenkammer in zwei Zonen (nach GREINWALD, 1994)

- Zone I: wandschubspannungsfrei
- Zone II: mit Wandschubspannung

Diese Zonen sind durch einen Trennradius $r_x(z)$ voneinander abgegrenzt. Der Trennradius r_x bezeichnet den Radius, bis zu dem die Wandschubspannungen in Abhängigkeit von der Tiefe im Gutinneren wirken. Die Annahme der linear abnehmenden Wandschubspannung über einen Verteilfaktor ins Gutinnere wird dabei aus der Theorie der Siloauslegung für den vertikalen Schneckenförderer übernommen.

Eine weitergehende Betrachtung stellt RONG (2004) vor. Dabei wird der Fördergutkörper in radiale Sektoren unterteilt, welche zwar alle stetig gefördert werden, aber zueinander Relativbewegungen durchführen können (vgl. Abb. 4.6). Dies erfolgt auf Grundlage der Beobachtung, dass die Einzelkörner meist eine einmal eingenommene radiale Lage für die Dauer des Transportes durch den Förderer beibehalten.

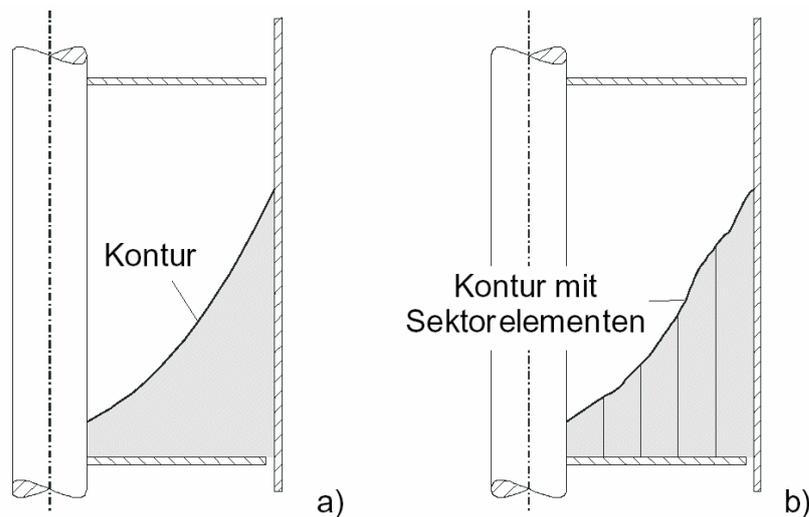


Abb. 4.6: Betrachtung der Gutfüllung a) als kompakten Block analog zur Einzelkörpertheorie und b) bestehend aus Sektorelementen (RONG, 2004)

Unter Festlegung verschiedener vereinfachender Randbedingungen kann auf der Basis solcher Modellvorstellungen dann eine Berechnung des Förderstromes erfolgen (z.B. FOTTNER, 2002).

MECHIAS (1975) hat bereits Überlegungen zu konstruktiven Einflussfaktoren auf den Förderstrom angestellt und dazu eigene Messwerte mit solchen aus der Literatur verglichen. Dort werden zur Widergabe von Messwerten zwei dimensionslose Kenngrößen η und B verwendet, um zu allgemein gültigen Aussagen zu gelangen. Der Wirkungsgrad η der Förderung setzt dabei den geförderten Massenstrom \dot{m} zu einem

theoretisch maximal förderbaren Massenstrom \dot{m}_{th} ins Verhältnis, welcher sich aus dem Produkt des theoretisch verdrängten Volumens je Schneckenumdrehung und der Schüttgutdichte errechnet.

$$\eta = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{th}} \qquad \dot{m}_{th} \approx \rho \frac{\pi}{4} (D^2 - D_w^2) H n$$

mit: ρ = Schüttdichte
 D = Schneckendurchmesser
 D_w = Seelenrohräußendurchmesser
 H = Wendelsteigung
 n = Drehzahl

Die Beschleunigungskennzahl B wird für den Vergleich von Förderern unterschiedlicher Abmessungen bei verschiedenen Schneckendrehzahlen verwendet und setzt die Zentrifugalbeschleunigung zur Fallbeschleunigung ins Verhältnis.

$$B = \frac{D\omega^2}{2g} \qquad (\omega = \text{Winkelgeschwindigkeit})$$

Durch den Vergleich von Messwerten diverser Wissenschaftler konnte MECHIAS (1975) zeigen, dass die Werte für η auch bei gleicher Beschleunigungskennzahl B sehr unterschiedlich ausfallen können. Da sich diese Unterschiede nicht auf etwa vorhandene, geringe Abweichungen in den Fördereigenschaften der Schüttgüter zurückführen ließen stellt MECHIAS (1975) fest „... dass der Transportvorgang in einem Schneckenförderer offensichtlich noch durch Größen beeinflusst wird, die in η und B nicht erfasst sind.“

Maßgebend ist für ihn die Tatsache, dass ein kompletter Schneckenförderer bei realer Schüttgutförderung aus drei Einheiten besteht. Neben dem eigentlichen Stetigförderer sind auch Einrichtungen zur Einspeisung und zum Austrag des Fördergutes vorhanden und entgegen der Annahmen für die Einzelkörperbetrachtung wird die Größe des geförderten Massenstromes auch durch alle drei Bereiche (Einspeisung, Transport und Austrag) mitbestimmt. Solange der Gutaustrag ohne Behinderung erfolgt, was in den betrachteten Fällen gegeben ist bzw. angenommen werden kann, ist hierdurch kein Einfluss auf den Transportvorgang zu erwarten. „Die Ausbildung des Guteinlasses beeinflusst (aber) in entscheidendem Maße den geförderten Massenstrom. Die in

dimensionsloser Form in der Literatur dargestellten Messergebnisse gelten deswegen zunächst nur für die jeweils vorliegenden speziellen Versuchsbedingungen. Ob Messergebnisse, die an Modellförderern gewonnen werden, mit Hilfe der Kenngrößen B und η überhaupt auf maßstäblich vergrößerte Förderer übertragen werden können, ist noch ungeklärt.“ (MECHIAS, 1975).

In der Literatur wird eine Mehrkörperförderung in einem vertikalen Schneckenförderer bei Scheckendrehzahlen von $n < n_k$ (n_k = kritische Drehzahl) weiterhin nicht diskutiert. Der Einzelkörper rutscht oder rollt bei diesen Betriebszuständen unter dem Einfluss des Eigengewichtes zwangsläufig auf der Schneckenwendel nach unten. Die von MECHIAS (1975) durchgeführten Versuche zeigen aber, dass ein Schüttgut auch unter diesen Bedingungen gefördert werden kann und das teilweise sogar mit einem hohem effektiven Förderwirkungsgrad. Allerdings bleiben die Massenströme dabei gering und im Gegensatz zum Transport bei Drehzahlen von $n > n_k$ kommt der Fördervorgang nach Abschalten der Gutzufuhr sofort zum Erliegen. Die dabei vorliegenden Transportmechanismen, für die offensichtlich die Gutzufuhr eine entscheidende Rolle spielt, weichen von den bisher geschilderten völlig ab (MECHIAS, 1975).

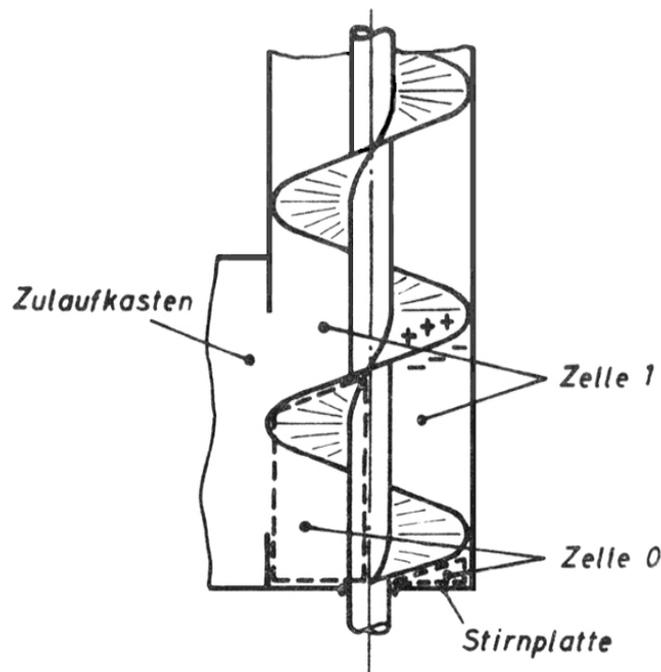


Abb. 4.7: Fördermodell zur „Verdrängungsförderung“ (MECHIAS, 1975)

MECHIAS (1975) entwarf dafür ein neues Fördermodell (vgl. Abb. 4.7) und erklärt die Förderwirkung wie folgt: Es soll „... die Seite der Schraubenfläche, auf der das

Schüttgut liegt, als belastete (+) und die andere als unbelastete (-) bezeichnet werden. Die erste vollständige Zelle des Förderers beginnt mit der Schraubenfläche auf der Druckseite des Schneckenganges. Dabei bleibt, wie in der Abbildung angedeutet, im Förderer ein Teilvolumen übrig, das der 0. Zelle zuzuordnen ist. Mit jeder Umdrehung der Schnecke hat das Schüttgut Gelegenheit, auf der Saugseite der Wendel in die 0. Zelle einzufließen. Da dieses Schüttgut auf der feststehenden Stirnplatte des Schneckenzyllinders liegt, läuft es mit der Schnecke nicht um und gelangt dadurch nach einer Umdrehung in die 1. Zelle, d.h. auf die Druckseite der Schraubenwendel. Das hier schon vorhandene Schüttgut kann weder in den Zulaufkasten noch in die 0. Zelle ausweichen und wird deswegen im Schneckengang emporgeschoben. Dieses Emporschieben im Schneckengang wird – durch die auch bei niedrigen Schneckendrehzahlen erfolgende Reibung der rotierenden Gutfüllung an der Zylinderwand – unterstützt.“ MECHIAS (1975) bezeichnet diesen Fördervorgang als „Verdrängungsförderung“.

Tatsächlich lässt sich mithilfe dieses Modells ein Transportvorgang im Bereich $n < n_k$ erklären, wenn vorausgesetzt werden kann, dass an der Materialaufgabe immer genug Material nachrutscht. Der Materialaustrag beginnt allerdings erst dann, wenn alle Zellen (nacheinander) gefüllt sind und kommt sofort zum Erliegen, sobald kein Fördergut mehr nachgeführt wird. Massenstrom und effektiver Förderwirkungsgrad η_{eff} werden durch die Masse des periodisch mit der Schneckendrehung in das Förderrohr einrutschenden Materials bestimmt. MECHIAS (1975) stellte fest, dass sich bei Verdrängungsförderung der Füllungsgrad der Schnecke nahezu unabhängig von Massenstrom und Drehzahl einstellt und formulierte folgende Zusammenhänge: Eine Erhöhung der Drehzahl verursacht eine Verminderung von η_{eff} , weil damit dem nachrutschenden Fördergut pro Umdrehung weniger Zeit zum Eintritt in das Förderrohr zur Verfügung steht. Erst wenn die Schneckendrehzahl über n_k hinaus gesteigert wird, wird der Transportvorgang (nicht jedoch die Förderrate) von den Bedingungen der Guteinspeisung unabhängig. Der Materialaustrag wird nach Abschalten der Gutzufuhr nicht mehr sofort unterbrochen, sondern das im Förderer noch vorhandene Gut wird ausgetragen. Für $n > n_k$ nimmt die Größe η_{eff} mit zunehmender Drehzahl höhere Werte an.

4.2.4 Weitere Aspekte aus der Schüttgutförderung

In der kunststoffverarbeitenden Industrie werden häufig sogenannte Einschneckenextruder eingesetzt. Diese müssen Pulver oder Granulat über einen Teil der Schnecken-

länge gegen hohen Druck fördern. Die Förderung erfolgt auch hier aufgrund der unterschiedlichen Reibverhältnisse an Schnecke und Rohr (Zylinder), wobei meist Blockströmung auftritt. Bei gegebenem Gegendruck und gegebener Drehzahl wird der Durchsatz umso höher, je größer die Reibung an der Rohrwand im Vergleich zu der an der Schnecke ist. Aufgrund dieser qualitativen Erkenntnisse wird seit langem die Reibung am Förderrohr z.B. durch eingearbeitete achsenparallele Nuten erhöht. Diese Nuten werden bei kunststoffverarbeitenden Maschinen konisch ausgeführt, um die Selbstreinigung des thermisch empfindlichen Materials sicherzustellen. LANGECKER (1977) untersuchte hierzu Schneckenförderer mit unterschiedlichen Oberflächenstrukturen (vgl. Abb. 4.8).

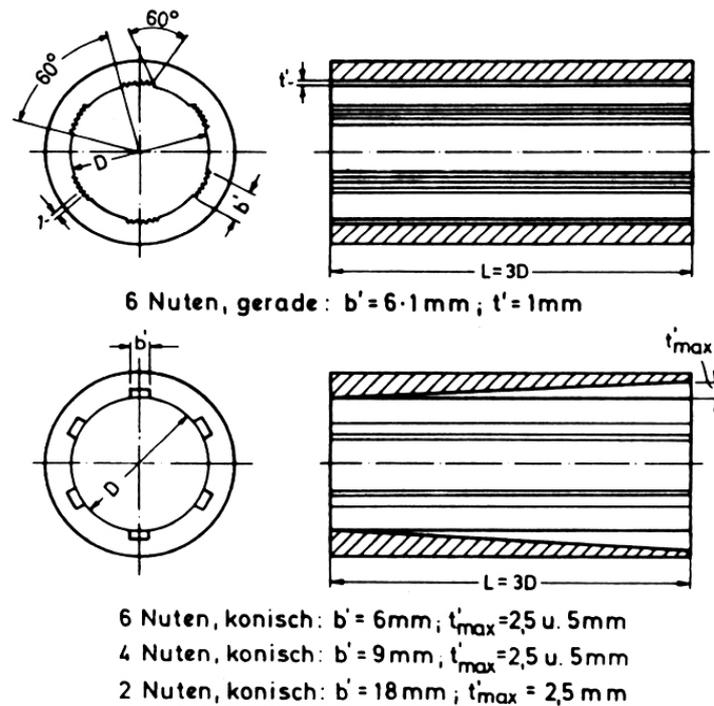


Abb. 4.8: Nuten im Mantelrohr eines Schneckenförderers (LANGECKER, 1977)

Er versuchte die Stütz- und Normalkräfte die an den Nuten angreifen durch „Nutenfunktionen“ darzustellen. Über die Stützkkräfte an den Nuten lässt sich dann der effektive Reibwert berechnen. Leider geht er in seiner Arbeit nicht auf die Förderungsverbesserung bei Förderern mit Nuten im Vergleich zu solchen ohne Nuten ein. Auch sonst konnten zu diesem Thema in der Literatur keine Erfahrungsberichte gefunden werden.

Ein optimaler Betrieb von vertikalen Schneckenförderern ist laut STAHL (1994) nur dann möglich, wenn mithilfe von geeigneten konstruktiven Maßnahmen ein möglichst hoher Füllungsgrad der Schnecke erreicht wird. Dieser Füllungsgrad kann an der Gutaufgabe, also kurz vor Beginn der eigentlichen Förderstrecke, beeinflusst werden. Ein konischer Förderabschnitt im Einlaufbereich kann dabei zu einem erhöhten Füllungsgrad führen. Eine entsprechende „Schneckenmaschine“ hat laut STAHL (1994) den Vorteil, dass der Massendurchsatz im Vergleich zu zylindrischen Schnecken erhöht wird und zugleich die Drehgeschwindigkeit herabgesetzt werden kann.

Bei der Förderung feuchter, feinkörniger Schüttgüter besteht generell die Problematik, dass das Fördergut an den Wänden anbackt. HOLLINDERBÄUMER (1993) untersuchte die Mechanismen der Schüttgut/Wand-Haftung und ging dabei speziell auf die durch Feuchtigkeit verursachten Haftmechanismen ein.

Der Hauptverursacher von Haftkräften in feuchten Schüttgütern ist die Flüssigkeit im Material, die zwischen den Partikeln und zwischen Wandwerkstoffen und Partikeln Flüssigkeitsbrücken bildet. Die Bindungskräfte dieser Flüssigkeitsbrücken sind um ca. eine Größeneinheit größer als die nichtkapillaren Kräfte (z.B. van der Waals- und elektrische Kräfte) und können aufgrund ihrer großen Reichweite Oberflächenrauigkeiten überbrücken. Diese Beobachtung beschreibt z.B. auch schon SCHLICK (1989). Für die Problematik der Anbackungen in Schneckenförderern interessieren vorrangig Flüssigkeitsbrücken zwischen Schüttgutpartikeln und einer Wand. Durch die Idealisierung des Schüttgutpartikels durch eine glatte Kugel und die Wand durch eine glatte Platte erhält HOLLINDERBÄUMER (1993) ein Modell, das unter Berücksichtigung des Wandmaterials, des Partikelmaterials und der Haufwerksflüssigkeit zu einer Bestimmungsgleichung für die Haftkräfte führt, die nur numerisch lösbar ist. Numerische Rechenergebnisse werden in Tabellen und Graphiken dargestellt. Vereinfachend können aber auch Näherungsformeln zur Berechnung der Haftkräfte herangezogen werden. Eine für die Anbackungen an Wänden interessante Näherungslösung für die Schüttgut/Wand-Haftspannung gibt er wie folgt an:

$$\sigma_h = \frac{\pi\gamma (\cos \delta_k + \cos \delta_w)}{d}$$

d: Korndurchmesser

γ : Oberflächenspannung

δ_w und δ_k : Benetzungswinkel von Wand- und Partikelmaterial

Daran lässt sich ablesen, dass Schüttgut/Wand-Haftspannung umgekehrt proportional zum Korndurchmesser und proportional zur Oberflächenspannung der Haufwerksflüssigkeit ist. Die Benetzungswinkel gehen mit dem Kosinus in die Haftspannung ein. Allerdings gilt diese Formel nur für rundes Korn. HOLLINDERBÄUMER (1993) „entdeckte“ bei seinen Versuchen zur Überprüfung der theoretischen Erkenntnisse noch zwei weitere Einflussgrößen, nämlich die Vorverdichtung und die Kornform der realen Partikel wobei der Einfluss der Vorverdichtung auf Adhäsionskräfte von Boden z.B. auch schon von BERETITSCH (1992) beschrieben wird. Der Einfluss der Vorverdichtung auf die Haftspannung ist nach HOLLINDERBÄUMER (1993) relativ gering. Die Partikelform hat jedoch einen so großen Einfluss, dass die Haftspannungsberechnung durch die obige Gleichung bei realen Schüttgütern oft nicht realistisch möglich ist.

Durch Untersuchungen an Wänden beliebiger Neigung konnte HOLLINDERBÄUMER (1993) außerdem einen Zusammenhang zwischen dem Neigungswinkel und der maximalen Anbackungsdicke herausfinden. (vgl. Abb. 4.9).

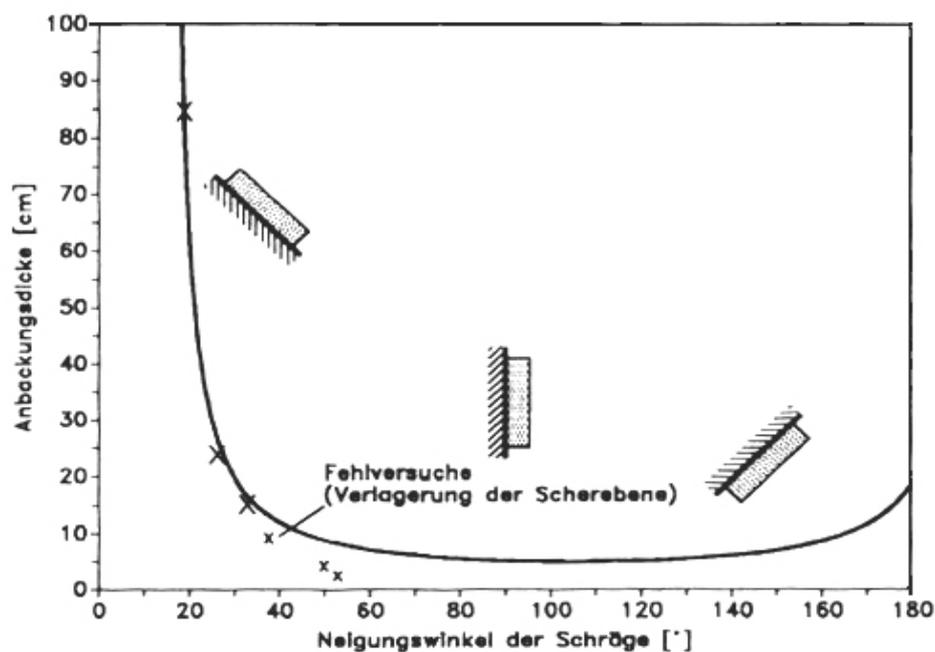


Abb. 4.9: Anbackungsdicke als Funktion des Neigungswinkels (HOLLINDERBÄUMER, 1993)

Als optimalen Neigungswinkel α_{opt} ermittelte er $\alpha_{\text{opt}} = 90^\circ + \varphi_w$ (φ_w = Wandreibungswinkel). Allerdings wäre eine vertikale „Gleitwand“, wie sie bei der Senkrechtschneckenförderung vorhanden ist, danach sehr gut einzuordnen

Unter Berücksichtigung der Einflussgrößen lassen sich für Schüttgüter folgende Lösungsmöglichkeiten zur Anbackungsreduzierung vorschlagen:

- Vergrößerung der Korngröße durch Granulierung, Pelletierung, Brikettierung.
- Verringerung der Oberflächenspannung der Haufwerksflüssigkeit durch Zumischen von z.B. Tensiden zur Senkung der Schüttgut/Wand Haftspannungen.
- Veränderung des Benetzungswinkels des Wandwerkstoffes Der Werkstoff muss dabei neben geringen Haftkräften auch einen kleinen Wandreibungswinkel aufweisen damit die Adhäsion müsste möglichst klein sein.
- Veränderung des Neigungswinkels der Wand.

4.3 Schneckenförderung plastischer Massen

4.3.1 Förderung bei Blockströmung

Allgemeine theoretische Grundlagen zur Schneckenförderung plastischer Massen finden sich kaum. Für den Anwendungsbereich der Schneckenextrusion hat RASCHKA (1990) jedoch Untersuchungen zum Transport feuchter Schüttgüter und plastischer Massen in Schneckenmaschinen durchgeführt. Einige seiner Überlegungen und Erkenntnisse sollen im vorliegenden Abschnitt kurz wiedergegeben werden. RASCHKA (1990) stellte fest, dass Materialien in Schneckenmaschinen nur dann überhaupt sinnvoll förderbar sind, wenn sie sich bei an das Leistungsvermögen der Maschine angepassten Drücken plastisch verhalten. Weiter merkt er an, „ ... dass bei der Förderung feuchter Schüttgüter und plastischer Massen in tiefgeschnittenen Schnecken in vielen Fällen die Annahme von Blockströmung gerechtfertigt ist.“ Bei nicht ausreichender Plastizität – z.B. aufgrund von zu geringem Flüssigkeitsgehalt – kommt es zu einer Pfropfenbildung und damit zum Blockieren der Anlage. Er geht daher näherungsweise davon aus, „ ... dass die Gleitschubspannung für Normalspannungen größer Null einen konstanten Wert besitzt, der nur noch von der Wandbeschaffenheit abhängig ist und für verschwindende Normalspannungen ebenfalls zu Null wird.“

RASCHKA (1990) stellt den Schneckenkanal vereinfachend als Abwicklung in der „Ebene“ dar und entwickelt daraus einen Zusammenhang zwischen den geometrischen Schneckenabmessungen und dem Volumenstrom für plastische Massen bei druckbeaufschlagter Förderung unter Blockströmung. Die geometrischen Verhältnisse im Schneckenkanal sind mit den von ihm verwendeten Bezeichnungen auf Abb. 4.10 und die entsprechende Abwicklung als ebener Kanal auf Abb. 4.11 dargestellt.

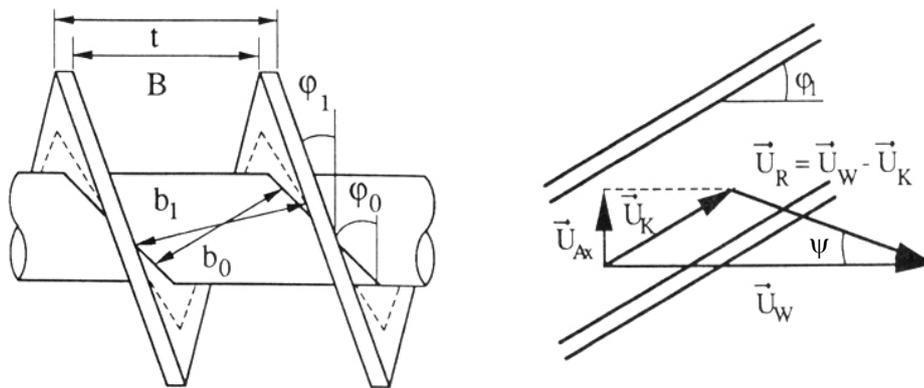


Abb. 4.10: Geometrische Verhältnisse im Schneckenkanal und Definition des Förderwinkels ψ (RASCHKA, 1990)

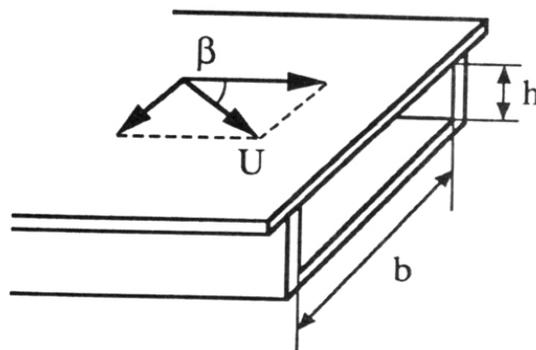


Abb. 4.11: Abwicklung des Schneckenkanals (RASCHKA, 1990)

Die auf Abb. 4.11 dargestellte „Deckelplatte“ entspricht der Innenwandung des Förderrohres und wird mit der Geschwindigkeit U sozusagen über den Kanal „gezogen“.

Der Steigungswinkel φ und die Kanalbreite b werden von RASCHKA (1990) in Abhängigkeit vom Schneckenradius r ausgedrückt:

$$\tan \varphi(r) = \frac{t}{2\pi r} = \frac{T}{r} \qquad b(r) = B \cdot \cos \varphi(r)$$

Für seine weiteren Überlegungen und Herleitungen verwendet er bei allen Größen den Index 0 für die Schneckenwelle, den Index 1 für die Innenseite des Förderrohres und den Index 2 für die Wendelflächen.

Betrachtet man wie RASCHKA (1990) den Kanal als ruhendes Bezugssystem, so bewegt sich die Wand mit der Geschwindigkeit $U_w = r_1 \omega$ (ω = Winkelgeschwindigkeit der Schneckenwelle) in Umfangsrichtung, das Fördergut bewegt sich am Radius r_1 mit der Geschwindigkeit U_k in Kanallängsrichtung. Der Winkel zwischen den Geschwindigkeiten $\vec{U}_R = \vec{U}_w - \vec{U}_k$ und \vec{U}_w wird als Förderwinkel ψ definiert (vgl. Abb. 4.10.). Im Grenzfall $\psi = 0$ dreht das Fördergut nur mit der Schnecke mit und wird also nicht gefördert; relativ zum Schneckenkanal ruht es. Die bestmögliche Förderung ergibt sich bei $\psi = \pi/2 - \varphi_1$, weil U_k dann der Projektion von U_w auf die Kanalrichtung entspricht. Auch die axiale Geschwindigkeit U_{Ax} und damit der Volumenstrom sind durch den Förderwinkel festgelegt. Der Volumenstrom Q berechnet sich zu:

$$\frac{Q}{r_1^3 \omega} = \frac{B}{t} \pi \left(1 - \frac{r_0^2}{r_1^2} \right) \frac{\tan \varphi_1 \tan \psi}{\tan \varphi_1 + \tan \psi}$$

Abb. 4.12 zeigt ein Material-Volumenelement im Schneckenkanal mit den daran angreifenden Kräften. RASCHKA (1990) nimmt vereinfachend an, dass alle angetragenen Spannungen über die Flächen, auf die sie wirken, jeweils konstant sind. Folgende Spannungen greifen an:

- an der Schneckenwelle die Schubspannung τ_0 (in Kanalrichtung)
- am Förderrohr die Schubspannung τ_1 (in Richtung der Relativbewegung von Fördergut und Wand, d.h. in Richtung von UR)
- an den Wendelflächen die Schubspannung τ_2 (in Kanalrichtung)
- die Normalspannung p (in Kanalrichtung)

- an den Wendelflächen die Normalspannungen $p_{2,a}$ und $p_{2,p}$ (Index a für die aktive und Index p für die passive Wendelfläche). Für die weitere Rechnung verwendet RASCHKA (1990) jedoch nur deren Differenz $\Delta p_2 = p_{2,a} - p_{2,p}$.

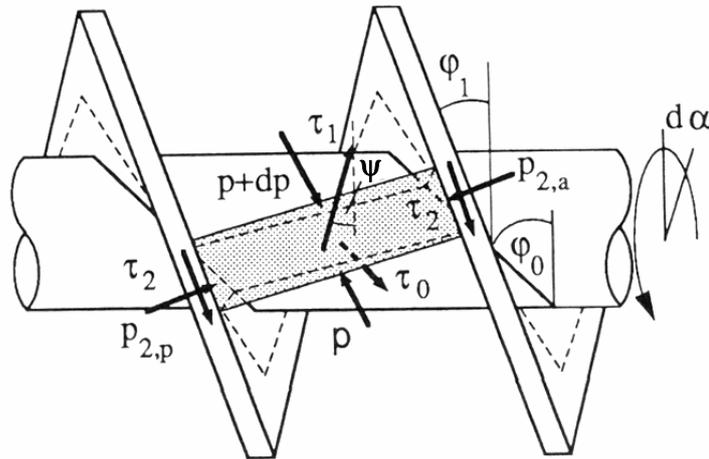


Abb. 4.12: Am Volumenelement angreifende Kräfte (RASCHKA, 1990)

Die Ausdehnung des betrachteten Elementes in Umfangsrichtung wird durch den Winkel $d\alpha$ beschrieben, der in der Ebene senkrecht zur Axialrichtung liegt. Nach geometrischer Linearisierung mit $r_2 = (r_0 + r_1)/2$ und $\varphi_2 = \varphi_2(r_2)$ stellt RASCHKA (1990) die Kräftebilanz in Axialrichtung zu

$$\begin{aligned}
 & -dp (r_1 - r_0) b_2 \sin \varphi_2 + \Delta p_2 \frac{r_1^2 - r_0^2}{2} \frac{d\alpha}{\cos \varphi_2} \cos \varphi_2 - \tau_1 b_1 \frac{r_1 d\alpha}{\cos \varphi_1} \sin \psi \\
 & - \tau_0 b_0 \frac{r_0 d\alpha}{\cos \varphi_0} \sin \varphi_0 - r_2 \gamma \frac{r_1^2 - r_0^2}{2} \frac{d\alpha}{\cos \varphi_2} \sin \varphi_2 = 0
 \end{aligned}$$

und die Momentenbilanz um die Längsachse zu

$$\begin{aligned}
 & -dp (r_1 - r_0) b_2 r_2 \cos \varphi_2 - \Delta p_2 \frac{r_1^2 - r_0^2}{2} \frac{d\alpha}{\cos \varphi_2} r_2 \sin \varphi_2 + \tau_1 b_1 \frac{r_1 d\alpha}{\cos \varphi_1} r_1 \cos \psi \\
 & - \tau_0 b_0 \frac{r_0 d\alpha}{\cos \varphi_0} r_0 \cos \varphi_0 - \tau_0 \gamma \frac{r_1^2 - r_0^2}{2} \frac{d\alpha}{\cos \varphi_2} r_2 \cos \varphi_2 = 0
 \end{aligned}$$

auf.

Mit der Größe γ berücksichtigt RASCHKA (1990) den Unterschied zwischen der aktiven und passiven Wendelfläche. Wenn an der passiven Wendelfläche keine Normalspannung (und damit auch keine Schubspannung) auftritt ist $\gamma=1$. Wenn an beiden Wendelflächen gleiche Bedingungen (Spannungen) vorliegen wird $\gamma=2$.

Durch die bewusste Wahl unterschiedlicher Oberflächenrauigkeiten von Rohrwandung und Schnecke wird in der Praxis versucht unterschiedliche Reibverhältnisse zu erzielen. Diesen Sachverhalt berücksichtigt RASCHKA (1990) durch den Verhältnisfaktor k :

$$\tau_0 = \tau_2 = k\tau_1 = k\tau$$

Nach einigen Umformungen erhält er damit aus den obigen Bilanzgleichungen folgenden Zusammenhang zwischen dem dimensionslosen Druckanstieg im Schneckenkanal Λ und dem Förderwinkel ψ , der den Volumenstrom festlegt:

$$\Lambda = -\frac{dp}{d\alpha \cdot \tau} = \frac{B_2}{A_1 + B_1} \cos \psi - \frac{A_2}{A_1 + B_1} \sin \psi - k \frac{A_3 + B_3}{A_1 + B_1}$$

mit den dimensionslosen Koeffizienten:

$$A_1 = \frac{2B}{r_0 + r_1} \sin \varphi_2 \cos \varphi_2$$

$$A_2 = \frac{2Br_1}{r_1^2 - r_0^2}$$

$$A_3 = \frac{2Br_0}{r_1^2 - r_0^2} \sin \varphi_0 + \gamma \frac{2T}{r_0 + r_1}$$

$$B_1 = \frac{B}{T} \cos^2 \varphi_2$$

$$B_2 = 2 \frac{B}{T} \frac{r_1^2}{r_1^2 - r_0^2}$$

$$B_3 = 2 \frac{B}{T} \frac{r_0^2}{r_1^2 - r_0^2} \cos \varphi_0 + \gamma \frac{r_0 + r_1}{2T}$$

Die dimensionslosen Koeffizienten A_i und B_i beinhalten dabei nur geometrische Größen und die Variable γ . Bei vorgegebenem Volumenstrom (durch die Einzugszone bestimmt) ist somit der der dimensionslose Druckanstieg Λ im Schneckenkanal aus den geometrischen Schneckenabmessungen berechenbar. Außerdem ist Λ laut

RASCHKA (1990) proportional zur Fließschubspannung des Fördergutes. Demzufolge steigt der Druckgradient in der Schnecke bei einer Zunahme des Unterschiedes zwischen der Schubspannung an der Förderrohrwand und der Schnecke, also einer Abnahme von k . Bei vertikaler Förderung mit – im Vergleich zur Schneckenextrusion – nicht durch ein Ausformorgan behindertem Austritt des Fördergutes, wird der Schneckendruck durch die „Hydrostatische Druckhöhe mitbestimmt.

4.3.2 Problematik des Wandgleitens

Da der Fördervorgang in Schneckenmaschinen sehr von dem unterschiedlichen Reibungsverhalten an den Schneckenwendeln und am Mantelrohr abhängt, soll hier noch auf das Wandgleiten dispers-plastischer Materialien eingegangen werden. SCHLEGEL (1982) beschreibt das Phänomen des Wandgleitens auf folgende Weise: *„Die anisotropen Feststoffteilchen werden bei Scherbeanspruchung unmittelbar an der Wand parallel zueinander unter einem geringen Neigungswinkel zur Wand umgelagert. Dadurch wird eine dichtere Packung eingenommen, was dazu führt, dass die vorhandene flüssige Phase zur Wand hin abgedrängt wird.“* (vgl. Abb. 4.13).

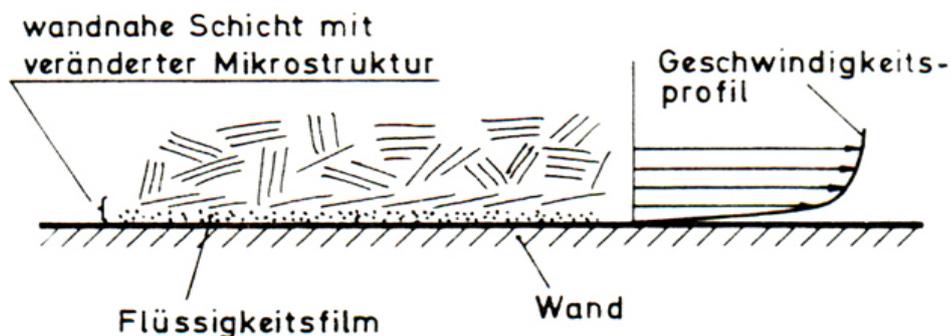


Abb. 4.13 Schematische Darstellung der Mikrostruktur von dispers-plastischen Materialien beim Wandgleiten (SCHLEGEL, 1982)

Je nachdem wie groß der Anteil der flüssigen Phase in dem dispers-plastischen Material ist, bildet sich an der Wand ein mehr oder weniger durchgehender Flüssigkeitsfilm aus. Dieser Film verhindert die unmittelbare Berührung der Feststoffteilchen mit der Wand. Die Dicke dieser wandnahen Schicht mit veränderter Mikrostruktur entspricht laut SCHLEGEL (1982) etwa der Länge der anisotropen

Feststoffteilchen. Kräfte können durch den Flüssigkeitsfilm nur durch Scherströmungen übertragen werden. Es leuchtet daher ohne weiteres ein, dass die so übertragbaren Schubkräfte deutlich geringer sind, als die im Inneren des Materials. Deshalb treten bei gleicher Schubspannungen in der wandnahen Schicht beim beschriebenen Wandgleiten wesentlich höhere Schergeschwindigkeiten als im Inneren des dispers-plastischen Materials auf.

4.3.3 Weitere Aspekte im Hinblick auf das BolSiM

SCHLEGEL (1982) konnte mit seinen Untersuchungen experimentell bestätigen, dass Modellübertragungen von Schneckenmaschinen in praktisch brauchbarer Näherung möglich sind, aber nur dann, wenn bei hinreichend hoher Fließgrenze und hinreichend kleinem Druckanstieg im Schneckenkanal Blockströmung auftritt. Letztere ist beim BolSiM allerdings nur im Ausnahmefall anzutreffen.

ARNOLD (1993) untersuchte das Bohrverhalten von Endlosschnecken in zähen bis bindigen Böden bei verschiedenen Schneckensteigungen und stellte fest, dass die besten Bohrergergebnisse bei Schneckensteigungen erzielt wurden, die zwischen dem 0,5- bis 0,7- fachen des Schneckendurchmessers lagen. Bei KÜHN (1992) und SCHULER (1979) wurden Werte zwischen 0,4 bis 0,6 angegeben. Bei trockenen, mittelharten Schichten empfiehlt ARNOLD (1993) Werte von 0,86 bis 1,0 und weist darauf hin, dass zur Vermeidung von übermäßigem Wendelverschleiß der Bohrerwerkzeugdurchmesser um ca. 10% größer als der Bohrschneckendurchmesser zu wählen ist. Diese Erkenntnisse beinhalten allerdings im Wesentlichen den Aspekt des Lösens an der Bohrlochsohle. Die später untersuchten Schnecken 1 und 2 des BolSiM sind in der Praxis nach diesen Werten ausgelegt. Die Schneckensteigungen liegen hier beim 0,8- (Schnecke 1) und 0,6- fachen (Schnecke 2) Durchmesser der Bohrschnecke.

BACHUS (1961) geht in seiner Veröffentlichung über die Entwicklung von Schraubenspindeln auch auf die Problematik des Zusetzens der Schneckenwendel ein. Er beschreibt in diesem Zusammenhang die Verwendung von aufgelösten Schneckenblechen, bei denen die Wendel nicht mehr im ganzen Umfang einmal komplett um das Seelenrohr befestigt ist. Die Schneckenwendeln überdecken sich somit nur noch teilweise oder gar nicht mehr. Solche Modifikationen könnten durchaus auch beim BolSiM verbessernd wirken. Allerdings treten dabei Förderbedingungen auf, die ganz neue Betrachtungen und Untersuchungen erfordern.

4.4 Förderverhalten beim BolSiM aus der Theorie

Vergleicht man nun die Senkrechtschneckenförderung beim BolSiM mit der in der Fördertechnik, so gibt es teilweise sehr unterschiedliche Randbedingungen. In der Fördertechnik kann gewissermaßen von einem unendlichen Gutaufgabepotential ausgegangen werden; der Förderer „holt“ sich die Menge an Fördergut, die er fördern kann quasi aus einem Reservoir. Beim BolSiM hingegen wird der Fördergutnachschieb direkt durch die vertikale Eindringgeschwindigkeit vorgegeben. Die dabei vorhandene Schneckendrehzahl bestimmt im Zusammenspiel mit den Lösewerkzeugen zunächst auch die Aggregatbildung bzw. die „Art“ und Körpergröße (Chips oder Span) des Erdstoffes. Diese Schneckendrehzahl liegt Herstellerangaben zufolge bei 10 bis max. 40 U/min. Nach eigenen Beobachtungen in der Praxis kann von eher geringen tatsächlichen Schneckendrehzahlen von im Mittel 10 bis 20 U/min ausgegangen werden. Sollen die entstandenen Erdstoffaggregate nun als Einzelkörper gefördert werden, müsste der Theorie zufolge die kritische Schneckendrehzahl n_k überschritten werden. In Abb. 4.14 ist diese für zwei beim BolSiM in der Praxis eingesetzte Schnecken mit gleichem Durchmesser aber verschiedenen Wendelsteigungen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Wandreibungsbeiwerten für Schnecken- und Rohrmantelreibung aufgetragen.

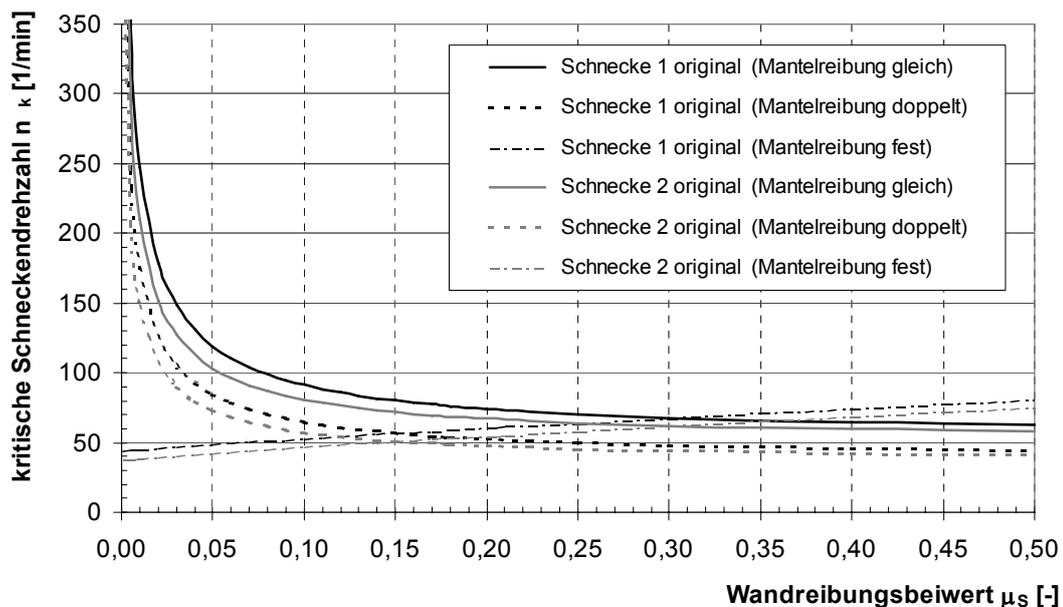


Abb. 4.14: Kritische Schneckendrehzahlen für zwei Originalbohrschnecken des BolSiM in Abhängigkeit von verschiedenen Wandreibungsbeiwerten

Auf der Abszisse findet sich dabei der Wandreibungsbeiwert μ_S zwischen Einzelkörper und Schneckenwendel. Die jeweils durchgezogenen Linien bilden die kritische Schneckendrehzahl bei gleichen Reibverhältnissen Einzelkörper/Schnecke und Einzelkörper/Mantelrohr ab. Um den Einfluss unterschiedlicher Wandreibungsbedingungen zu demonstrieren, zeigen die gestrichelten Linien den Fall, dass der Reibungsbeiwert μ_M zwischen Einzelkörper und Mantelrohr jeweils immer doppelt so hoch angesetzt wird wie μ_S . In beiden Fällen wird die kritische Drehzahl mit zunehmenden Reibungsbeiwerten immer kleiner, wobei diese Abnahme bei Werten von $\mu_S > 0,2$ nur noch sehr gering ist. Die beiden aufsteigenden nahezu linearen Kurven ergeben sich unter der Voraussetzung, dass μ_M im Gegensatz zu μ_S einen konstanten Wert behält (im dargestellten Fall ist $\mu_M = 0,3 \rightarrow$ Schnittpunkt mit der Kurve $\mu_M = \mu_S$). Die Betrachtung dieses Falles kann dann interessant sein, wenn die Wendelreibung im Betrieb (z.B. durch elektrokapillare Effekte) herabgesetzt wird. Es fällt jedoch auf, dass die Werte für n_k allesamt deutlich höher liegen, als die in der Praxis angewendeten Schneckendrehzahlen. Die Zentrifugalkraft kann damit nicht als zentrale treibende Kraft für die Förderung ins Feld geführt werden.

Die Betrachtungen von Senkrechtschneckenförderern befassen sich i.d.R. nur mit dem Drehzahlbereich oberhalb von n_k , wie auch schon bei SINHA (1959), obwohl dieser bereits darauf hingewiesen hat, dass es sich bei n_k nicht um eine tatsächliche Fördergrenze, sondern eigentlich um die Selbstentleerungsgrenze handelt: „... obwohl eine Förderung [unterhalb von n_k] möglich ist, falls an der Aufgabestelle kontinuierlich Fördergut nachgedrückt wird.“ SINHA versteht darunter allerdings eine druckbeaufschlagte Zufuhr des Fördergutes, die soviel Material zur Verfügung stellt wie der Förderer „verbrauchen kann“. Beim BolSiM ist der Nachschub zwar zwangsweise gegeben, jedoch ist dieser auch direkt linear zur Bohrtiefe begrenzt. Und selbst wenn man dieses „Nachschieben“ mit berücksichtigt, lassen sich die in der Praxis festzustellenden Förderergebnisse mit der Theorie der Einzelkörperförderung nicht erklären. Hier wird nämlich meist schon nach Erreichen geringer Bohrtiefen ein Materialaustrag am oberen Mantelrohrende beobachtet. Der von MECHIAS (1975) beschriebene Vorgang der *Verdrängungsförderung* (vgl. Abschnitt 4.2.3) reicht zur Erklärung also auch nicht aus, da diese eine entsprechende Gutaufgabe und i.d.R. die Vollfüllung des kompletten Schneckenganges voraussetzt. Wie die Praxis des BolSiM jedoch zeigt, kommt gerade bei letzterer die Förderung bindiger Erdstoffe meist zum Erliegen.

Die Überlegungen allerdings, welche MECHIAS (1975) zur Theorie dieser „reinen“ *Verdrängungsförderung* geführt haben, können teilweise auch für das BolSiM angewendet werden. Es muss beim BolSiM – insbesondere bei der Förderung rolliger Materialien – in irgendeiner Weise ein förderwirksamer Einfluss des neu in den Förderer gelangenden Materials auf das bereits dort Vorhandene ausgeübt werden. Für bindige Erdstoffe bietet sich eventuell folgender weiterer Aspekt: Durch größere tangential Adhäsionskräfte an der Rohrwand im Vergleich zur Schneckenwendel kann die erforderliche Reibkraftdifferenz u.U. auch ohne Unterstützung von Zentrifugalkräften erreicht werden. Ein solcher Effekt könnte z.B. durch die dem Erdstoff beim Bohren aufgezwängte plastische Verformung aus der Kreisbewegung begünstigt werden, welche ein leichtes Anpressen an die Rohrwand hervorrufen kann.

Wichtig erscheint in diesem Zusammenhang die von RASCHKA (1990) getroffene Annahme, dass die Gleitschubspannung bei der Förderung plastischer Massen für Normalspannungen größer Null einen konstanten Wert besitzt und für verschwindende Normalspannungen zu Null wird. Betrachtet man unter diesem Aspekt eine teilgefüllte Schneckenkammer, dann kann eine Förderung – unabhängig von der Schnecken-drehzahl – leichter stattfinden, wenn die vom Erdstoff berührte Rohrwandfläche größer ist als die Schneckenberührungsfläche. Beobachtungen aus der Praxis des BolSiM lassen ebenso wie die später hier durchgeführten Versuche jedenfalls eine solche „Wandbildung“ erkennen.

Betrachtet man abschließend nochmals die komplexen Zusammenhänge, welche die Senkrechtschneckenförderung schon bei vergleichsweise einfachen Randbedingungen (Einzelkörpermodell) kaum „berechenbar“ machen, dann ist an eine analytisch richtige Erfassung der Förderung beim BolSiM nicht zu denken. Es spielen dabei – nicht zuletzt durch das nicht definierbare Verhalten des Erdstoffes im Förderer – zu viele teils unbekannte Faktoren eine Rolle. Die weiteren Schritte zum Verständnis der Zusammenhänge der Erdstoffförderung beim BolSiM können daher auf absehbare Zeit nur in der empirischen qualitativen Forschung liegen. Es gilt dabei die mit den eintretenden Erdstoffumlagerungen verbundenen Fördermechanismen zu beobachten und zu beschreiben. Ansätze aus den vorgestellten theoretischen Grundlagen und Forschungen können jedoch dabei helfen, beobachtete Effekte zu erklären.

Kapitel 5

Versuchseinrichtungen

5.1 Versuchsrinnen

5.1.1 Scherrinne

Zur Durchführung von Versuchen zur Ermittlung der Boden-Boden-Reibung und insbesondere der Reibkräfte zwischen Boden und glatten Stahloberflächen, wurde ein bestehender Schneidrinnenversuchsstand entsprechend umgebaut. Am linear geführten Versuchswagen wurde die Schneidwerkzeughalterung durch einen frei aufgehängten quadratischen Scherrahmen mit 20 cm innerer Seitenlänge ersetzt (siehe Abb. 5.1). Bei einem Scherweg von ca. 1,4 m können damit „Scherversuche“ mit Geschwindigkeiten bis 1,2 m/s durchgeführt werden.



Abb. 5.1: Die verwendete Scherrinne mit frei aufgehängtem großem Scherrahmen

Die doppelt parallelkinematische Aufhängung des Scherrahmens erlaubt es, diesen über eine einstellbare Federaufhängung in Schwebelage zu halten, um einen unerwünschten Einfluss des Rahmens auf die Versuchsergebnisse zu verhindern. Außerdem ist die komplette Rahmenaufhängung höhenverstellbar, so dass mit einer Rinnenfüllung mehrere Versuche in verschiedenen Höhenniveaus durchgeführt werden können (vgl. Abb. 5.2). Die aufgewendete Gesamtreibkraft wird über eine Kraftmessdose direkt am Scherrahmen gemessen. Um einen exakt ebenen Scherweg zu erreichen, welcher insbesondere für die Versuche Boden-Stahl von großer Wichtigkeit ist, wurde der Scherwagen mit einer justierbaren Vorschneideeinrichtung ausgerüstet. In den Scherrahmen kann alternativ ein Stahlblock oder aber Boden mit verschiedenen Auflasten und damit Normalspannungen eingebaut werden.

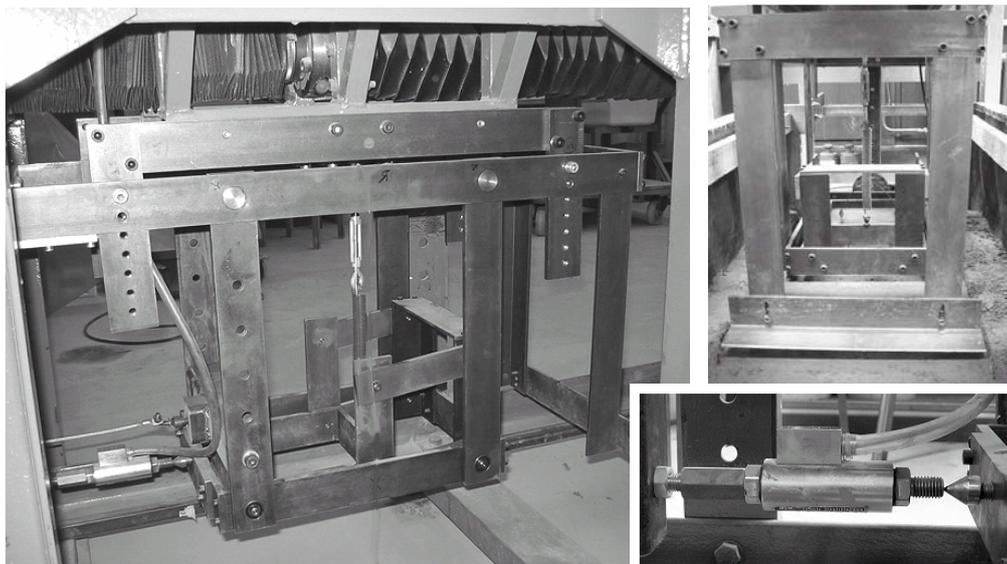


Abb. 5.2: Scherrahmenaufhängung, Vorschneideeinrichtung und Kraftmessung

Angetrieben wird der Scherwagen über einen Kugelgewindetrieb mittels eines Gleichstrommotors. Dieser ist mit 6,3 kW für eine hohe Beschleunigung ausgelegt. Wegen der hohen auftretenden Massenkräfte bei der Beschleunigung des Scherwagens, sind die Schergeschwindigkeiten bei großen Auflasten begrenzt. Allerdings waren für die vorliegenden Untersuchungen keine hohen Normalspannungen zu betrachten, da im Wesentlichen realistische absolute Reibwerte zwischen Stahl und dem verwendeten Boden interessiert. Für die untersuchten Geschwindigkeiten bis zu 0,6 m/s wurden so Normalspannungen bis ca. 0,6 N/cm² realisiert.

Die Wegmessung erfolgt mittels eines induktiven Weggebers. Die über Messverstärker und Datenerfassungskarte abgenommenen Messgrößen (elektrische Spannungswerte) für Weg, Zeit und Kraft werden über ein entsprechendes Messprogramm (LABVIEW) direkt auf einem PC abgelegt und können so weiterverarbeitet werden.

5.1.2 Schneidrinne

Für die Durchführung von Schneidversuchen zur Oberflächenscherfestigkeit (Boden/Stahloberfläche) unter elektrischen Potentialdifferenzen wurde eine spezielle Versuchsrinne gebaut (Abb. 5.3). Diese erlaubt es, im eingebauten Boden elektrische Felder mit unterschiedlicher geometrischer Anordnung von Elektroden zu erzeugen. Über den Schneidwiderstand an einem durch die Rinne fahrenden Schneidblech kann auf den Scherwiderstand zwischen Boden und Stahloberfläche geschlossen werden.

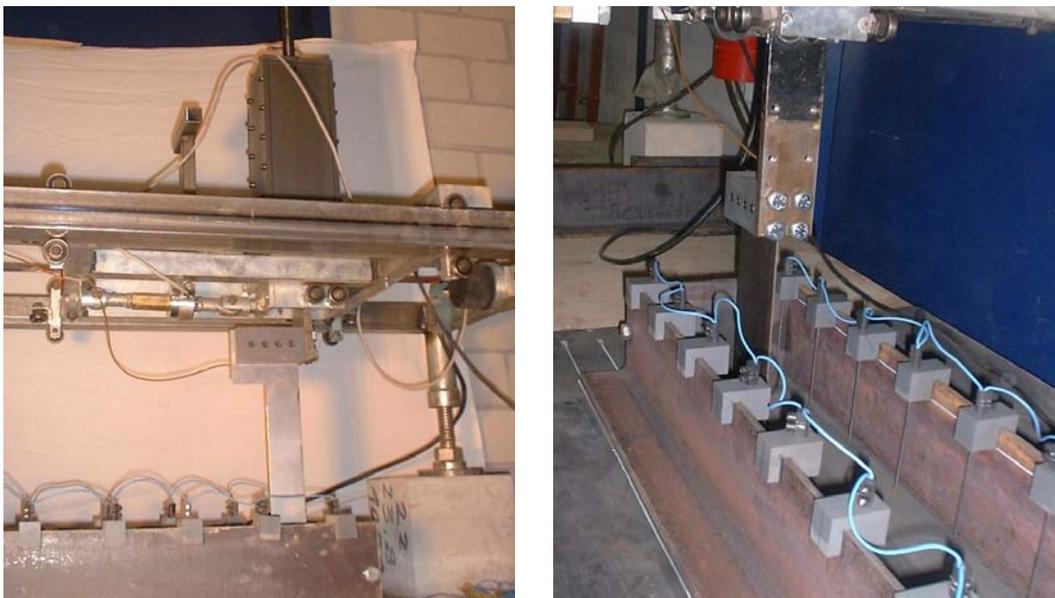


Abb. 5.3: Rinne für Schneidversuche im Boden unter Einfluss eines elektrischen Feldes

Die Eintauchtiefe des Schneidbleches lässt sich stufenlos einstellen und es kann leicht ausgewechselt werden um so die Geometrie (Länge) zu variieren. Die Stirnseite des Bleches ist beidseitig scharf angeschliffen, um den durch das Aufschneiden des Bodens auftretenden Messfehler möglichst gering zu halten. Die Kraftmessung erfolgt über

eine Kraftmessdose an einem kugellagergeführten Messschlitten innerhalb des Schneidwagens (vgl. Abb. 5.3) und die Wegmessung über einen Seilzugwegaufnehmer. Für die Messdatenerfassung werden die entsprechenden Einrichtungen der Scherrinne mitverwendet. Als weiterer Messparameter kommt dabei jedoch noch die während des Versuches auftretende Stromstärke im Boden als Elektrolyten hinzu.

Die eigentliche Rinne (Bodenbehälter) ist variabel aufgebaut. Sie besteht aus Winkelstahlprofilen auf einer isolierenden Kunststoffoberfläche und lässt sich durch verschiedene anschraubbare Stirnbleche in der Breite variieren. Ein elektrisches Feld lässt sich in der Schneidrinne zum einen über Stabelektroden zum anderen auch über die Verwendung der kompletten Stahleinfassung als eine der Elektroden aufbringen. Außerdem kann das Schneidblech selbst als Elektrode dienen, was eigentlich ja bezweckt werden sollte. Da elektrische Spannungen über 40 V für den Menschen gefährlich werden können, wurden die Spannungen für die Versuche im Regelfall auf max. 30 V begrenzt. Höhere Spannungen erscheinen aus dem gleichen Grund auch nicht praxistauglich für das BolSiM. Unter besonderen Sicherheitsvorkehrungen können mit der Schneidrinne aber auch Versuche mit bis zu 100 V durchgeführt werden.

5.2 Bohrversuchsstand

Zur Untersuchung der Erdstoffförderung beim BolSiM wurde ein spezieller Bohrversuchsstand konzipiert und gebaut. Im vorliegenden Kapitel wird der Aufbau und die Funktion dieses Versuchsstandes beschrieben. Die Überlegungen zur Übertragung des BolSiM in den Modellmaßstab und zur Konzeption des Versuchsstandes finden sich wegen des Sinnzusammenhanges in Kapitel 7 („*Untersuchungen am Bohrversuchsstand*“).

Der Versuchsstand realisiert das BolSiM in seinen wesentlichen verfahrenstechnischen Funktionen im Modellmaßstab 1:10 bzw. 1:7,5, abhängig vom Durchmesser des Bohrrohres im Originalmaßstab. Allerdings weicht die konstruktive Ausführung sehr stark vom Vorbild eines Drehbohrgerätes ab. Das Augenmerk wurde bei der Konstruktion des Versuchsstandes auf die Notwendigkeiten für die Versuchsdurchführung sowie eine größtmögliche Variabilität gelegt.

Das Traggerüst des Versuchsstandes ist aus verschweißten und verschraubten Walzstahlprofilen aufgebaut und auf einer horizontal über einer Bodenrinne verfahrbaren

Traverse montiert (vgl. Abschnitt 5.3.3). Auf einem vertikal über einen Spindeltrieb verfahrbaren Schlitten ist das Mantelrohr drehbar gelagert angebracht. Zwei ebenfalls an diesem Schlitten seitlich angebaute lange Hydraulikzylinder halten die Bohrschnecke auf vertikaler Position und ermöglichen durch den langen Hubweg das Ein- bzw. Ausfahren der gesamten Schnecke aus dem Mantelrohr. Bei festgesetzten Hydraulikzylindern ist die Vertikalbewegung der Schnecke gleich mit der des Schlittens und damit des Mantelrohres. Alle Drehantriebe bestehen aus robusten Elektromotoren mit direkt angebauten stufenlosen Verstellgetrieben. Die Kraftübertragung auf Schlittenspindel, Mantelrohr und Bohrschnecke erfolgt über Kettentriebe. Während der Drehantrieb für das Mantelrohr mit dem Schlitten verfährt, sitzt der Schneckenantriebsmotor fest am Traggerüst. Die Drehmomentübertragung erfolgt dabei über eine Kellystange.

Auf Abb. 5.4 ist der Versuchsstand in Frontalansicht zu sehen. Das linke Bild zeigt die Situation vor Beginn eines Standardversuches; das Mantelrohr ist noch nicht in den Boden eingedrungen. Auf dem rechten Bild sieht man einen laufenden Bohrversuch unter Aufbringung eines elektrischen Feldes zur Untersuchung elektrokapillarer Effekte.



Abb. 5.4: Versuchsstand zur Untersuchung des Erdstoff-Förderverhaltens beim BoSiM
links oben: Mantelrohr mit Vertikalleisten (Isolationsleisten)

Über dem Erdstoffauffangbehälter (Wiegebehälter) ist dabei das Schleifringelement zur Stromversorgung der Bohrschnecke zu erkennen. Ganz links oben auf der Abbildung ist das modifizierte Mantelrohr mit Vertikalleisten aus einem speziellen Teflonwerkstoff zu sehen. Diese dienen der Isolation zwischen den beiden Elektroden Mantelrohr und Bohrschnecke.

Durch Messaufnehmer können sämtliche Wegänderungen und Drehgeschwindigkeiten, sowie das über die Bohrschnecke übertragene Drehmoment, die Anpresskraft und der Materialaustrag aus der Schnecke während des Vortriebs erfasst werden. Außerdem kann für Versuche mit angelegter Gleichspannung der Verlauf der im Erdstoff übertragenen Stromstärke aufgezeichnet werden. Alle Messwerte werden über eine Messkarte an ein Datenerfassungsprogramm übertragen, welches auch während des Versuches ein Verfolgen aller Einstellungen und Messgrößen über eine graphische Oberfläche am Computermonitor erlaubt. Eine Prinzipschaltbild der Messeinrichtung ist auf Abb. 5.5 dargestellt.

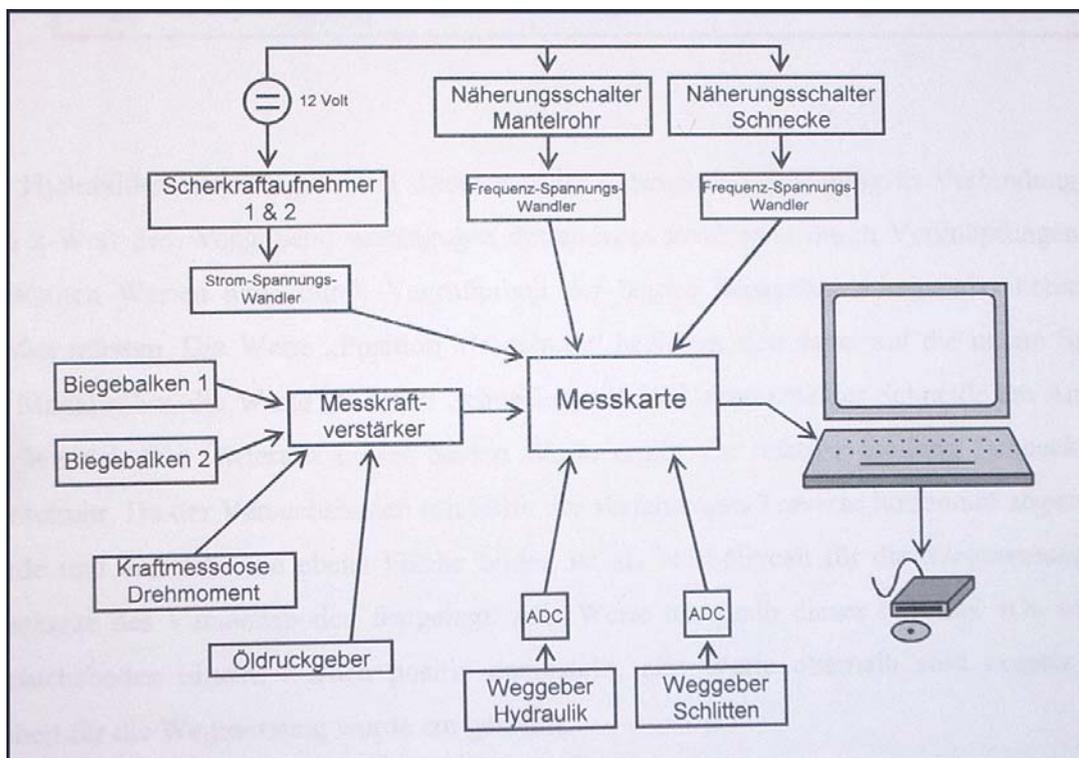


Abb. 5.5: Prinzipschaltbild der Messeinrichtung für den Versuchsstand (ZEMBROT, 2001)

Als Messgeber für die Drehgeschwindigkeiten werden induktive Näherungsschalter verwendet, die jeweils so nah an den Kettenritzeln von Mantelrohr- und Bohrschneckenantrieb montiert sind, dass quasi die vorbeilaufenden Zähne gezählt werden. Zur vertikalen Wegmessung für Schlitten und Schneckenlager werden analoge Seilweggeber verwendet. Zur Messung des Schneckendrehmomentes wurde deren Antriebsmotor mit Kugellagern frei drehbar gelagert montiert. Über einen definierten Hebelarm stützt er sich bei Drehung auf eine Kraftmessdose ab, mit deren Hilfe somit das Drehmoment gemessen werden kann (vgl. Abb. 5.6).

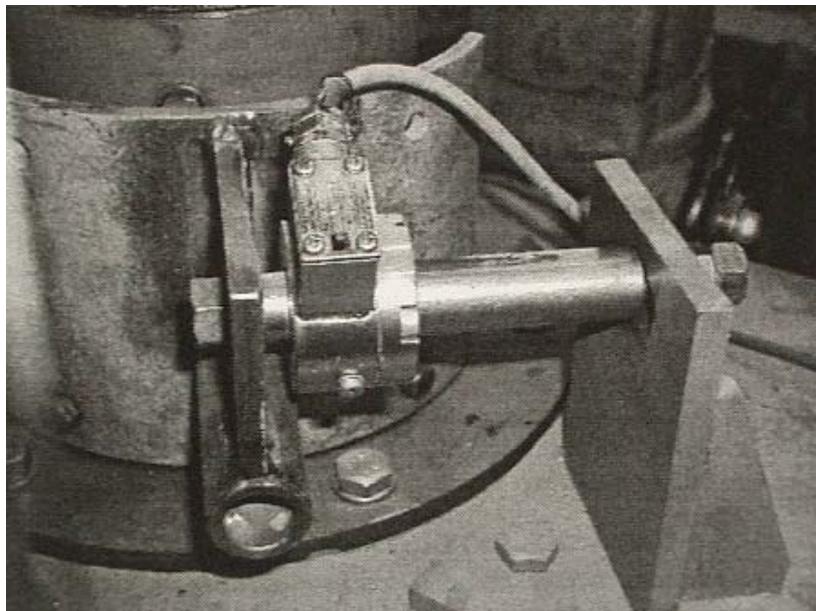


Abb. 5.6: Einrichtung zur Messung des Schneckendrehmomentes

Die laufende Erfassung der geförderten Erdstoffmasse erfolgt über Summationswägung. Dazu wurde ein Auffang- und Wiegebehälter konzipiert, der über zwei Biegebalken mit temperaturkompensierter DMS-Messung am Schlitten aufgehängt ist. Der geförderte Erdstoff fällt oberhalb des Mantelrohrendes über einen Konusring in diesen Behälter und wird sofort mitgewogen.

Schwierigkeiten bereitete die Messung der Schneckenanpresskraft. Zunächst sollte diese einfach über den Hydraulikdruck der beiden Hydraulikzylinder bestimmt werden, mit denen die Schneckenlagerung ja fest verbunden ist. Diese Messung erwies sich bei den ersten Versuchen als sehr ungenau, weil die Reibung der Gleitdichtungen in den Zylindern doch erheblich war. Als zweite Lösung wurde ein mit DMS bestücktes Ring-

dynamometer entwickelt und in die Schneckenlagerung eingebaut. Bei statischen Versuchen konnten damit zwar gute Messergebnisse erzielt werden, aber in der Bohrversuchspraxis war die Streuung der Messwerte zu groß. Schließlich wurde das Problem über zwei Scherkraftaufnehmer (Biegebalkenprinzip) gelöst, welche zwischen den Hydraulikzylindern und dem Querjoch mit der Schneckenlagerung eingebaut wurden. Diese Lösung ist auf Abb. 5.7 zu sehen.

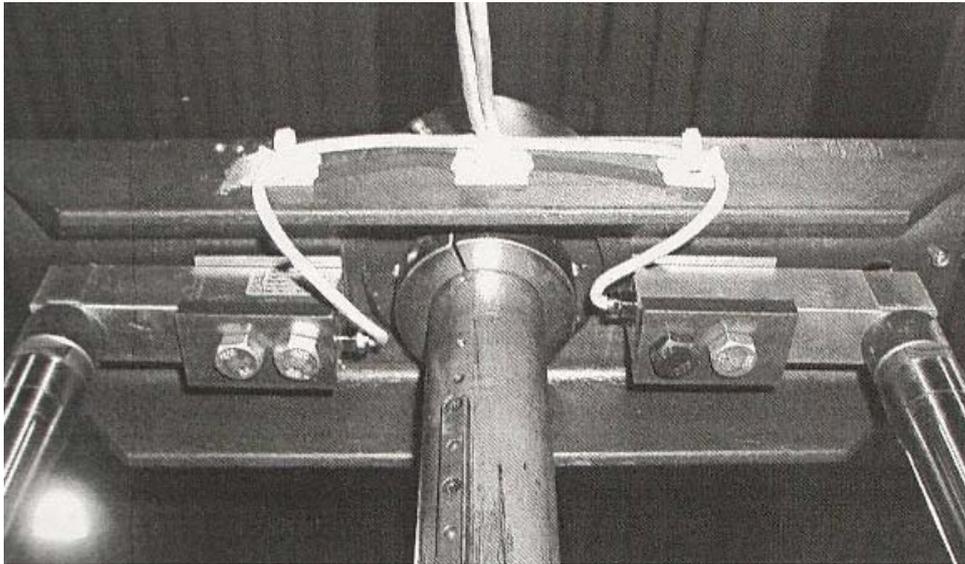


Abb. 5.7: Einrichtung zur Messung der Anpresskraft über Scherkraftaufnehmer

Im Laufe der Versuchsdurchführungen wurde der Versuchsstand immer wieder den Anforderungen entsprechend angepasst. So wurde neben der beschriebenen Verbesserung zur Messung der Anpresskraft in späteren Versuchen auch eine Schneckenverlängerung eingesetzt, um die Störung des austretenden geförderten Erdstoffes durch den Schneckenanschlussflansch zu verhindern. Weiterhin wurde die Einrichtung zur Untersuchung elektrokapillarer Effekte entwickelt und bedarfsweise eingebaut. Außerdem wurde eine Drehdurchführung konstruiert und gebaut, die beim Bohren das Einbringen von zwei unterschiedlichen Medien über die Schneckenspitze in den Erdstoffstrom („Spülen“ mit Wasser und Luft) erlaubt.

5.3 Versuchsboden

5.3.1 Auswahl

Jeder einzelne Bohrversuch war sowohl in der Vorbereitung als auch in der Durchführung sehr aufwändig, was die Gesamtzahl der Versuche beschränkte. Das Hauptaugenmerk sollte deswegen auf die Variation der verschiedenen Verfahrensparameter bei einem geeigneten Versuchsboden gelegt werden (vgl. Abschnitt 7.1.1). Wichtig war dabei jedoch auch die Variation der Bodenkonsistenz und damit des Wassergehaltes. Bei einer in großen Bereichen stufenlos möglichen Einstellung von drei unabhängigen mechanischen Parametern (Schnecken- und Mantelrohdrehzahl sowie Eindringgeschwindigkeit) und vier unterschiedlichen Schneckengeometrien war von vornherein eine stark einschränkende Auswahl der Parameterkombinationen unabdingbar. Durch die weiterhin im Fokus stehende Untersuchung der Auswirkungen elektrokapillarer Effekte und die variablen Einwirkungen der Wasser- und Luftspülung erschien eine zusätzliche Variation des Versuchsbodens im Rahmen dieser Arbeit nicht angebracht. Die mögliche Datenbasis hätte eine sinnvolle Auswertung der Ergebnisse nicht zugelassen.

Um praxisnah untersuchen zu können, sollte als Versuchsboden für die Bohrversuche ein „echter“, natürlicher bindiger Boden verwendet werden. Weil möglichst viele Transportzustände abzubilden waren, durfte es kein „Extremboden“ mit zu hoher Klebneigung (ausgeprägt plastischer Ton) oder sehr geringem Tonanteil (reiner Schluff) sein. Gewählt wurde ein schluffiger Ton, der nach DIN 18196 als leicht plastisch anzusprechen ist (TL, vgl. Abb. 5.10). Dieser Boden war in ausreichender Menge und Homogenität verfügbar, um eine große Bodenrinne zu füllen, die für die Bohrversuche verwendet werden sollte (siehe Abschnitt 5.3.3). Auch die Vorversuche zum Reibverhalten zwischen Boden und Stahloberfläche in der Scherrinne wurden mit diesem Boden durchgeführt.

Für die Vorversuche zur Elektrokapillarität wurde als weiterer Boden ein reiner Löss mit geringem Tonanteil eingesetzt. Hintergrund für diese Auswahl war die Überlegung, für diese in der Bodenbearbeitung „neue Anwendung“ noch einen Vergleichsboden mit geringerem Tonmineralanteil und damit geringerem Eigenionenanteil zu verwenden.

Da der Boden beim Bohren sein Gefüge bzw. seine Makrostruktur stark ändert und somit während der hier durchgeführten Versuche nicht mehr als „Boden“ im

ursprünglichen Sinn vorliegt, wird in dieser Arbeit – wie auch sonst oft in der Literatur – nach dem Löseprozess von *Erdstoff* bzw. *Erdstofftransport* gesprochen.

5.3.2 Parameter und Probeneinbau

Die genauen bodenmechanischen Parameter sowie die mineralische Zusammensetzung der verwendeten Böden sind für die hier durchgeführten Untersuchungen im Wesentlichen von untergeordnetem Interesse. Im Vordergrund steht – wie bereits erläutert – das unterschiedliche Erdstoffverhalten bei wechselnden verfahrensspezifischen Randbedingungen. Allerdings lässt sich die Plastizität des Bodens, wegen der damit direkt zusammenhängenden Adhäsionsneigung, u.U. zur Erklärung von Fördereffekten heranziehen (vgl. Abb. 5.8). Um die Versuchsergebnisse bei ggf. durchzuführenden weiterführenden Forschungsarbeiten mit anderen Böden einordnen zu können, werden einige wesentliche Parameter angegeben.

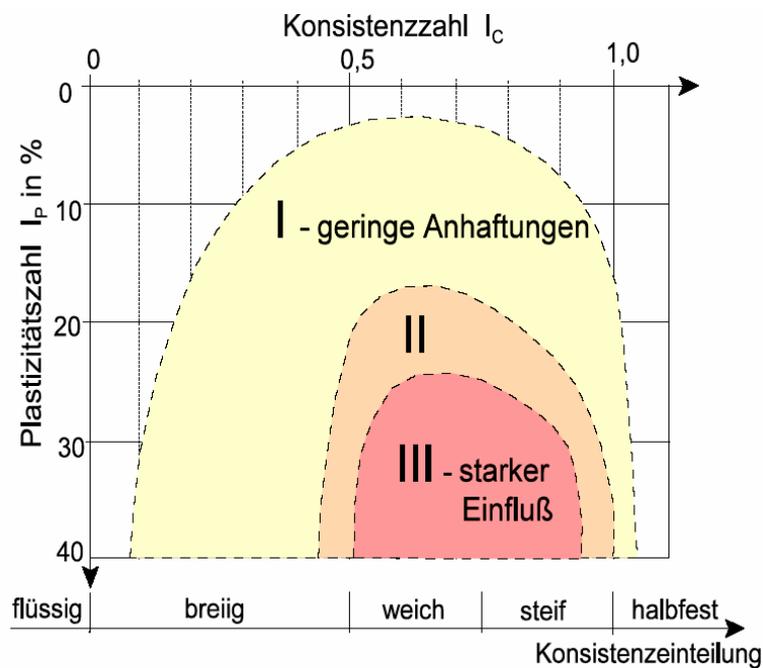


Abb. 5.8: Adhäsionswirkungsbereiche in Abhängigkeit von Plastizität und Konsistenz (nach SCHLICK, 1989)

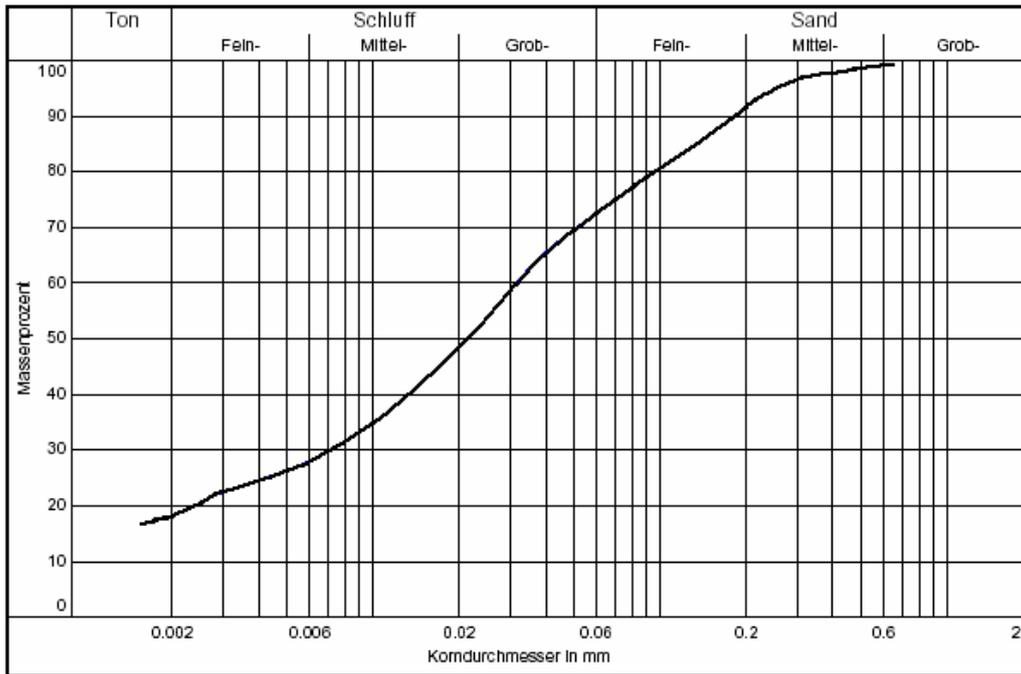


Abb. 5.9: Kornverteilungskurven des verwendeten bindigen Versuchsbodens (TL)

Neben der in Abb. 5.9 dargestellten Kornverteilungskurve sind vor allem die Konsistenzgrenzen sowie der für die Baupraxis wichtige Proctorwassergehalt oder auch optimale Wassergehalt w_{opt} von Interesse. Diese finden sich in Tabelle 5.1. Die Einordnung des Bodens im Plastizitätsdiagramm nach DIN 18196 zeigt Abb. 5.10.

Tabelle 5.1: Bodenkennwerte des verwendeten Versuchsbodens (leichtplastischer Ton)

Fraktionsanteile [%]				d 50 [mm]	Konsistenzgrenzen [%]			Proctor w_{opt} [%]
Ton	Schluff	Sand	Kies		w_p	w_L	I_p	
18	56	26	0	0,02	14,5	27,0	12,5	17,0

Der Proctorwassergehalt w_{opt} und die zugehörige Proctordichte ρ_{Pr} spielen für die durchgeführten Versuche deswegen eine Rolle, weil einerseits ein Einbaukriterium für die Vergleichbarkeit der Versuche festgelegt werden musste und andererseits eine hohe Einbaudichte gewünscht war, um beim Bohren hohe Scherkräfte zu bekommen. Anhand der Proctorkurve (Abb. 5.11) lässt sich die mit einem bestimmten Wassergehalt bei gleicher Verdichtungsarbeit (mit „Proctorenergie“) erreichbare Trockendichte ablesen.

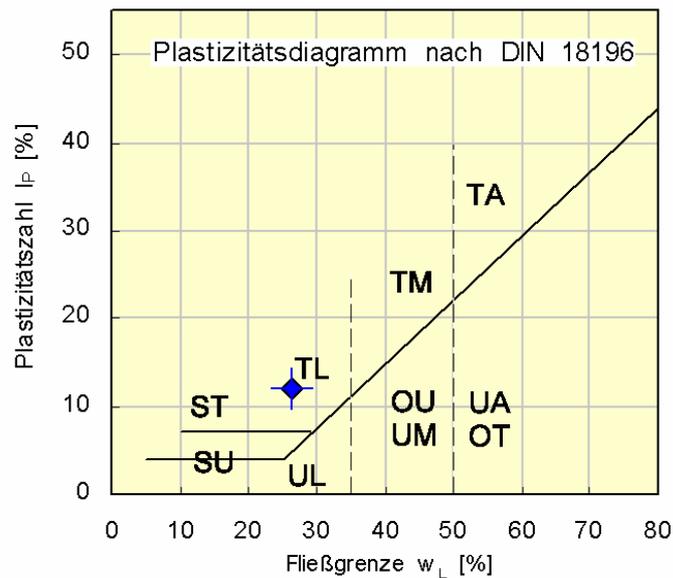


Abb. 5.10: Einordnung des Versuchsbodens nach DIN 18196

Der Einbau des Bodens erfolgte sowohl in die Versuchsrinne als auch beim Einzel- einbau immer mit möglichst gleicher Verdichtungsarbeit pro Volumen. Diese Verdich- tungsarbeit wurde mittels Einbauversuchen und Dichtemessungen so auf die Proctor- arbeit abgestimmt, dass die Einbautrockendichte zu den entsprechenden Einbauwasser- gehalten aus der Proctorkurve abgelesen werden kann. In Abb. 5.11 ist zur späteren Massenermittlung zusätzlich die dazugehörige Einbaufeuchtdichte aufgetragen.

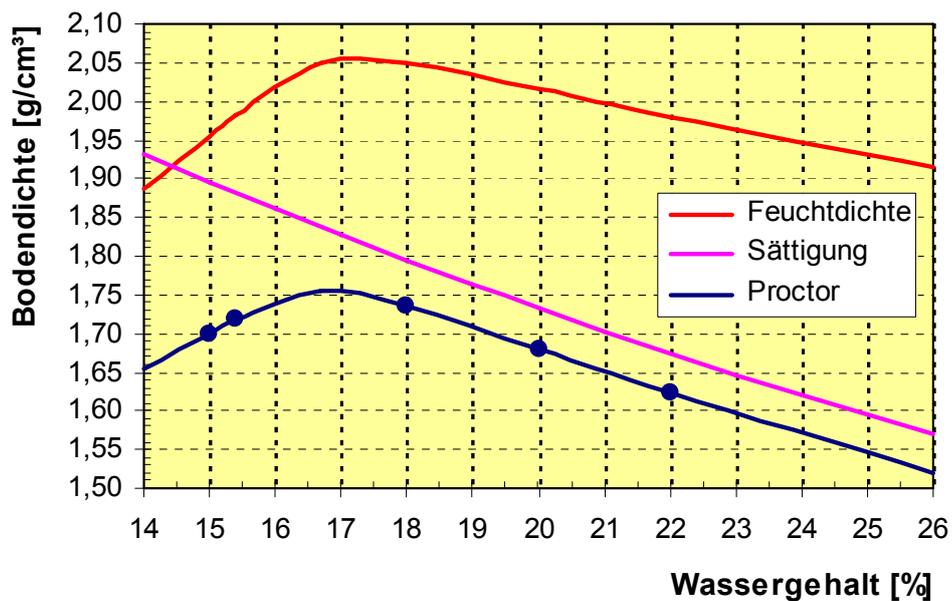


Abb. 5.11: Proctorkurve (ρ_d) und zugehörige Feuchtdichte für den Versuchsboden

Eine grobe Einordnung der zu erwartenden Reibwiderstände zwischen Boden und Stahloberfläche kann anhand zusammengestellter Werte von SCHUMACHER (2004) vorgenommen werden, die in Abb. 5.12 aufgetragen sind. In dieser Darstellung lässt sich die von BERETISCH (1992) beschriebene Phaseneinteilung in Abhängigkeit vom Wassergehalt (vgl. Unterkapitel 3.1) und damit der Konsistenz wieder erkennen. Der verwendete Versuchsboden müsste dabei zwischen den Bereichen für TM und UL eingestuft werden.

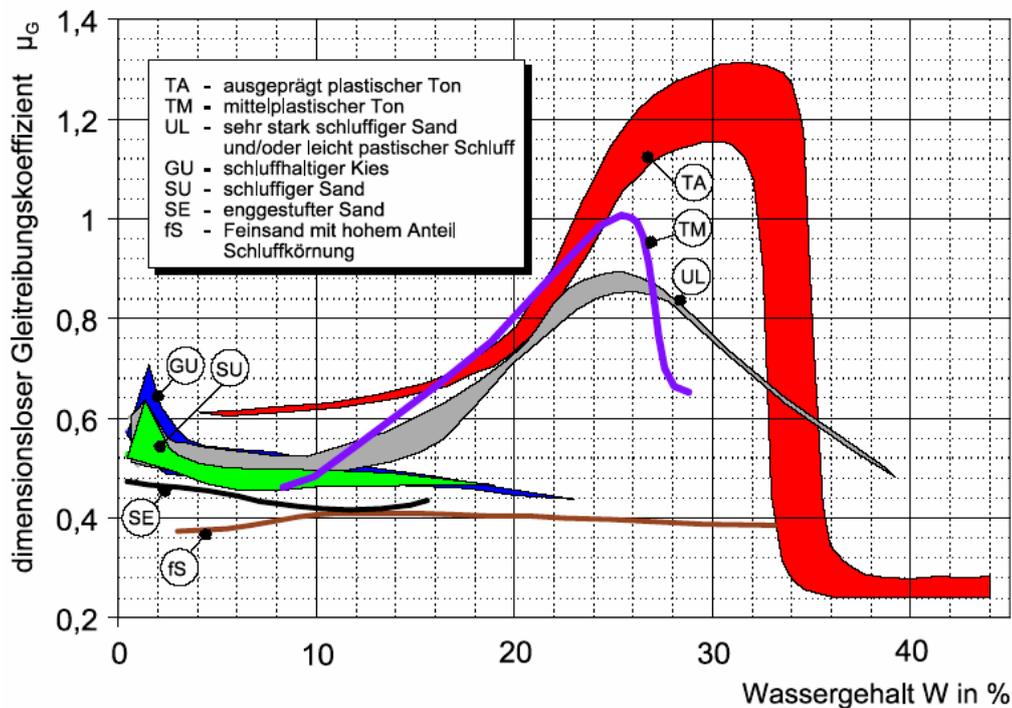


Abb. 5.12: Gleitreibungskoeffizient in Abhängigkeit von Wassergehalt und Bodenart (SCHUMACHER, 2004)

Allerdings wurden speziell für den verwendeten Boden eigene Reibungsuntersuchungen durchgeführt, um die auftretenden Reibungsverhältnisse und vor allem Reibungsunterschiede bei Boden-Stahl- und Boden-Boden-Reibung realistischer betrachten zu können.

Schließlich wurden zur eindeutigen Einordnung der Böden, insbesondere auch im Hinblick auf das elektrokapillare Verhalten, für beide dort verwendeten Böden auch quantitative Mineralbestimmungen auf röntgenographischer Basis durchgeführt. Dies erlaubt außerdem bei späteren weiteren Untersuchungen ggf. Aussagen über Zusammenhänge zwischen Scherverhalten und mineralogischen Merkmalen. Wie bei

allen durchgeführten Untersuchungen zu den Bodenparametern wurden wegen der großen verwendeten Bodenmassen auch hier mehrere Proben untersucht (pro Boden). Die Ergebnisse für die Einzelproben lagen dabei trotz der großen Bodenmengen und der sehr unterschiedlichen Probennahmestellen dicht beieinander, so dass die in Tabelle 5.2 aufgeführten Mittelwerte als repräsentativ angenommen werden können.

Tabelle 5.2: Analytische Daten und quantitative Mineralbestimmung der Versuchsböden

	Löss [Massen-%]	bindiger Boden [Massen-%]
Kohlenstoff	4,37	0,57
Carbonatgehalt	14,49	1,87
nicht im CO ₂ gebundener Kohlenstoff	0,41	0,06
Schwefelgehalt	0,02	0,01
Quarz	39	51
Feldspat	10	11
Calcit	20	3
Dolomit	12	1
Illit	8	11
Kaolinit	5	8
quellfähige Tonminerale	6	15

Wie aus dem Anteil an nicht im Carbonat gebundenen Kohlenstoff geschlossen werden kann, sind organische Bestandteile in beiden Böden vernachlässigbar gering. Mineralogisch unterscheiden sich die beiden Böden im Wesentlichen im Carbonatgehalt, was sich am Anteil der Carbonatminerale Calcit und Dolomit sowie am Anteil und der Zusammensetzung der Tonminerale widerspiegelt. Der Löss weist hier neben dem insgesamt deutlich geringeren Tonmineralanteil insbesondere auch einen viel geringeren Anteil an quellfähigen Tonmineralen (Montmorillonit, Vermiculit) auf. Zu beachten ist allerdings, dass u.U. auch ein Teil des Illits (sog. „offener“ Illit) quellfähig sein kann.

5.3.3 Bodeneinbau in die Versuchsrinne

Um ein ausreichend großes Bohrfeld zu bekommen, wurde der Bohrversuchsstand in zwei Achsen verfahrbar auf einer großen 80 cm tiefen Bodenversuchsrinne in der Versuchshalle des TMB aufgebaut (vgl. Unterkapitel 5.2). Bei einer Breite von 1,8 m und einer Länge von 8,5 m bietet diese – unter Einhaltung entsprechender Abstände –

Platz für ca. 300 Bohrversuche im Originalboden. Darüber hinaus war es möglich, bereits ausgebohrte Löcher in der Rinne wieder mit neu aufbereitetem Bodenmaterial zu füllen. Dies erlaubt – außer mit dem Originalboden – Versuche mit beliebiger Konsistenz durchzuführen, weil das Drehmoment des Mantelrohres für die Förderversuche keine Rolle spielt. Wenn das Bohrgerät zwischen den Versuchen nicht verfahren wird, kann exakt in die bestehende Bohrung gebohrt werden (vgl. Abb. 5.13).



Abb. 5.13: Boden in der Rinne mit zwei wiederverfüllten Bohrungen

Da der Bodeneinbau für die Bohrversuche auch wegen der davon abhängigen Struktur des gelösten und zu transportierenden Erdstoffes eine wichtige Rolle spielt, soll er hier näher beschrieben werden. Der Einbau des Versuchsbodens in die Versuchsrinne (ca. 23 t) erfolgte über eine Höhe von 75 cm mit aufbereitetem Boden mit einem Wassergehalt von 18 bis 19 %, weil ein auf dem nassen Ast der Proctorkurve gelegener Wassergehalt zu einem homogeneren Einbau des Materials führt. Dies war wichtiger als die Optimierung der Enddichte, um für die vergleichsweise kleinen Bohrgeometrien gute gleichmäßige Bedingungen zu schaffen. Es konnte dennoch eine Trockendichte von 97 % ρ_{Pr} erreicht werden.

Der eigentliche Einbau erfolgte in Handarbeit möglichst homogen in vier einzelnen, gleichen Lagen. Diese wurden jeweils mittels einer handgeführten Vibrationswalze mit Glattmantelbandagen verdichtet. Die Enddichte wurde dabei jeweils nach fünf Walzenübergängen erreicht. Auf diese Weise entstanden vier Verdichtungshorizonte, welche zwar in den späteren Versuchsaufzeichnungen teilweise zu erkennen sind, die aber die Ergebnisse nicht beeinträchtigen.

Kapitel 6

Rinnenversuche

6.1 Versuche in der Scherrinne

Die Versuche in der „großen Scherrinne“ sollten dazu dienen, die Scherspannungen des in den Bohrversuchen verwendeten Bodens unter den bei maschineller Bearbeitung auftretenden Bedingungen zu ermitteln. Dazu wurden Versuchsreihen unter verschiedenen Randbedingungen durchgeführt. Neben der Untersuchung der Reibkräfte zwischen Boden und einer „glatten“ Stahloberfläche sollten auch Aussagen über die Reibkräfte in einer vorgegebenen Boden-Boden-Scherfuge getroffen werden können, wie sie bei der Verwendung des modifizierten Mantelrohres bei den Versuchen zum BolSiM auftritt. Variiert wurde im Wesentlichen die Schergeschwindigkeit und zwar im Bereich von 0,06 bis 0,7 m/s. Die Obergrenze orientierte sich dabei an der größten theoretisch möglichen Wandreibungsgeschwindigkeit bei den späteren Bohrversuchen, welche sich aus der Differenzumfangsgeschwindigkeit von Mantelrohr und Schnecke zu $v_w = 0,56$ m/s errechnen lässt.

Der Anteil der tangentialen Adhäsion a an der Gesamtreibkraft ist dabei von der Normalkraft unabhängig, verändert sich aber mit der Konsistenz. Nach SCHUMACHER (2004) kann a [KN/m²] für den Konsistenzbereich $0,55 < I_C < 1,05$ (weich bis halbfest) näherungsweise mit folgender „Gebrauchsgleichung“ abgeschätzt werden:

$$a \approx I_p \cdot \left(1 - 4 \cdot |I_C - 0,8| \right)$$

mit I_p : Plastizitätszahl in % nach DIN 18122-1

I_C : dimensionslose Konsistenzzahl nach DIN 18122-1

Für den hier untersuchten Versuchsboden ergibt sich aus dieser Beziehung der Verlauf für die tangentiale Adhäsion in Abhängigkeit vom Wassergehalt nach Abb. 6.1.

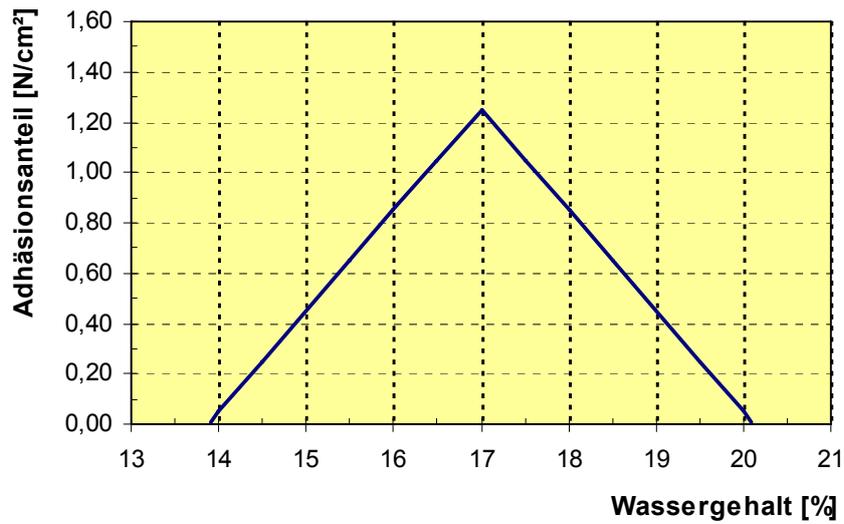


Abb. 6.1: Tangentiale Adhäsionskraft für den Versuchsboden nach der Abschätz-Beziehung von SCHUMACHER (2004)

Interessant ist dabei, dass danach die höchste Adhäsionskraft beim optimalen Wassergehalt nach Proctor zu erwarten ist.

Abb. 6.2 zeigt die Abhängigkeit der Wandschubspannung von der Reibgeschwindigkeit für zwei verschiedene Wassergehalte bei einer Normalspannung von $\sigma = 0,33 \text{ N/cm}^2$.

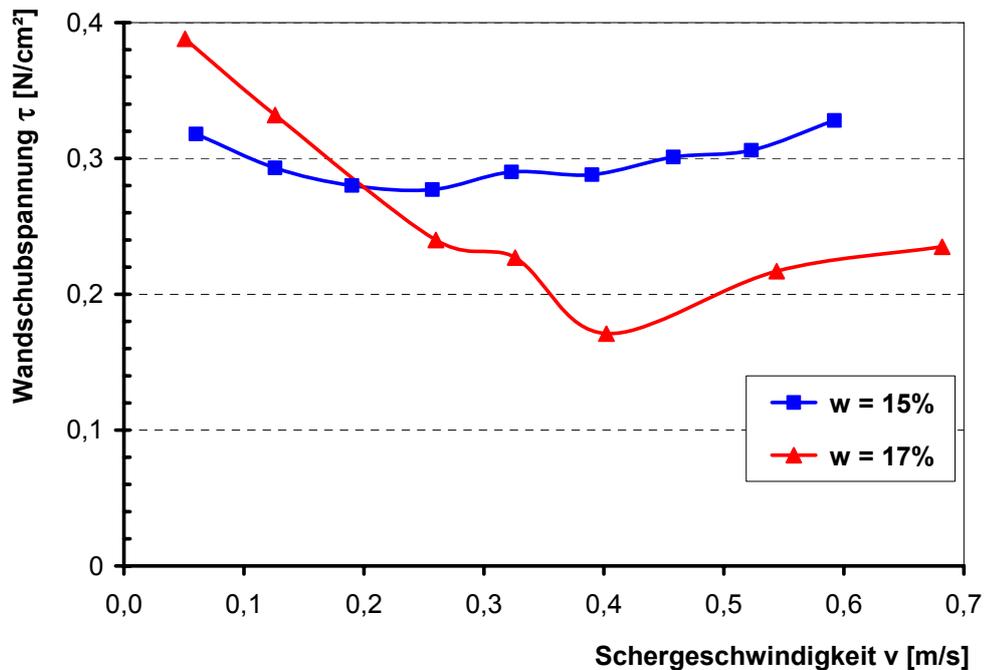


Abb. 6.2: Wandschubspannungen für verschiedene Schergeschwindigkeiten

Die Kurvenpunkte stellen dabei jeweils die mittleren Werte mehrerer Einzelversuche dar. Zur Ermittlung der Wandschubspannungen wurde bei einem gesamten Scherweg von 1,45 m jeweils nur die gemessene Scherkraft über 80 cm Scherweg (von 0,6 bis 1,4 m) ausgewertet, um Anfahr- und Bremseffekte auszuschließen.

Es zeigt sich, dass im untersuchten Bereich die Abhängigkeit der Wandschubspannung von der Geschwindigkeit für den Boden nahe der Ausrollgrenze ($w_p = 14,5\%$) deutlich geringer ist, als für den bei Proctorwassergehalt ($w_{opt} = 17\%$). Bei letzterem ist insbesondere die starke Abnahme der Wandschubspannung im Bereich bis $v = 0,4$ m/s von Bedeutung. Die stärkere Geschwindigkeitsabhängigkeit beim Boden mit 17% weist auf einen höheren Adhäsionsanteil hin, was die Beziehung von SCHUMACHER (2004) bestätigt. Die damit abgeschätzte tangentielle Adhäsion konnte in dieser Höhe allerdings nicht gemessen werden.

Im Hinblick auf die Beobachtungen der starken Förderprobleme beim BolSiM bei Wasserzutritt, wurden spezielle Versuche mit unterschiedlicher Befeuchtung der Bodenoberfläche in der Rinne vor den Reibversuchen durchgeführt.

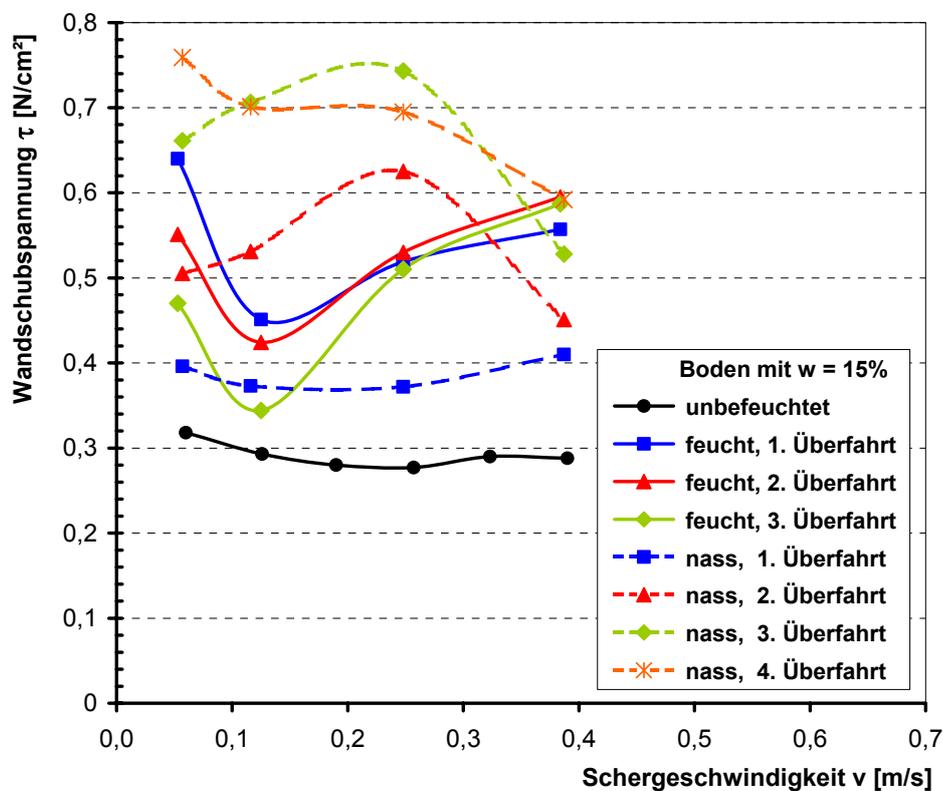


Abb. 6.3: Wandschubspannungen nach Befeuchtung der Bodenoberfläche

Dazu wurde jeweils eine definierte Wassermenge gleichmäßig verteilt auf die gesamte Scherfläche aufgesprüht. Um die Verhältnisse der realen Bedingungen möglichst gut zu simulieren (fester kompakter zu bohrender Boden mit Wasserzutritt) wurden diese Versuche mit Boden mit einem Wassergehalt $w = 15\%$ durchgeführt, der wie oben gezeigt eine vergleichsweise gleichmäßig hohe Wandschubspannung über die Geschwindigkeit aufweist. Es zeigte sich dabei, dass sich die Wandschubspannung bei nasser Bodenoberfläche deutlich (teilweise auf mehr als das Doppelte) erhöhen kann. Bei mehrfacher Überfahrt mit dem Stahlblock ohne weitere Zwischenbefeuchtung konnte zudem qualitativ eine Abhängigkeit der Wandschubspannungen vom Grad der Befeuchtung beobachtet werden (vgl. Abb. 6.3). Bei schwacher Befeuchtung („feucht“, 30 ml/m^2 Wasser) nimmt die Wandschubspannung bei einer zweiten und dritten Überfahrt ab, während sie bei starker Befeuchtung („nass“, 100 ml/m^2 Wasser) zunimmt.

Bei den Boden-Boden-Scherversuchen mit vorgegebener Scherfuge wurden erwartungsgemäß höhere Scherspannungen festgestellt, als zwischen Boden und Stahloberfläche. Wie Abb. 6.4 zeigt, ist dabei im für die späteren Bohrversuche relevanten Bereich aber kaum eine Geschwindigkeitsabhängigkeit erkennbar.

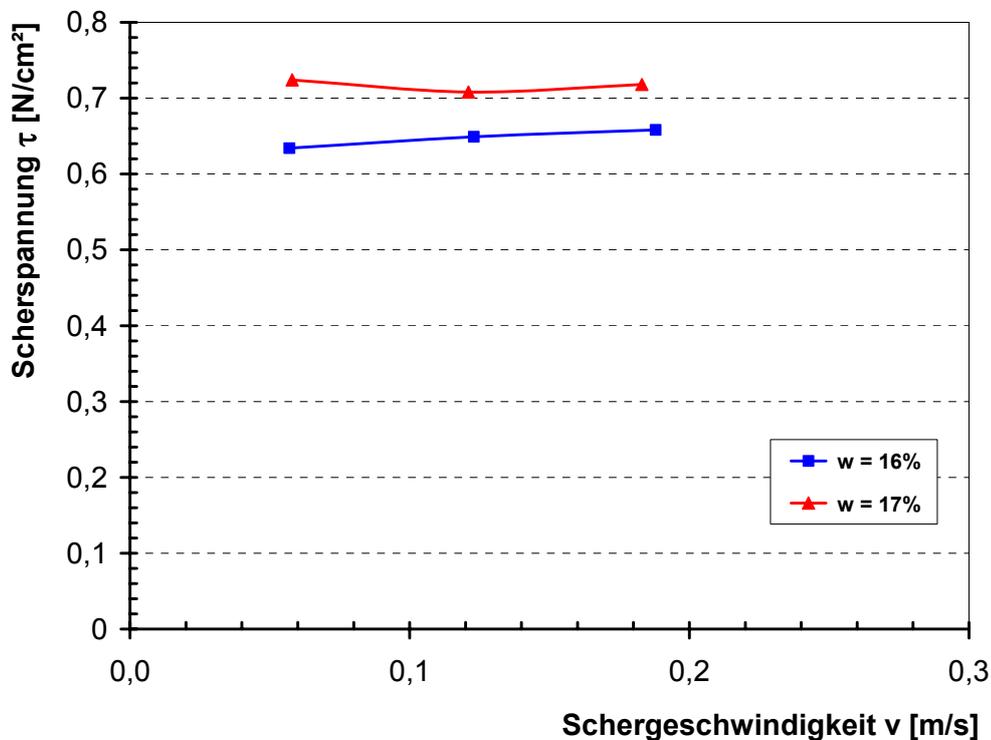


Abb. 6.4: Scherspannungen Boden-Boden für verschiedene Schergeschwindigkeiten (Normalspannung $\sigma = 0,33\text{ N/cm}^2$)

6.2 Vorversuche zur Elektrokapillarität

Zur Untersuchung der Wirkung eines elektrischen Feldes auf die Bodenbearbeitung mit Stahlwerkzeugen wurden Versuche mit unterschiedlichen Elektrodenanordnungen in der Schneidrinne durchgeführt. Neben der angelegten Spannung wurden insbesondere der Wassergehalt und der Ionengehalt des Bodens bei kleinen Schneidgeschwindigkeiten (25 bis 60 mm/s) variiert. Gemessen wurde neben der Schneidkraft jeweils auch der Verlauf der während des Schneidvorganges aufgetretenen Stromstärke im Boden.

Zunächst wurden Versuche mit geringer Ionenkonzentration im Boden (entionisiertes Anmachwasser) bei gleichbleibendem Wassergehalt durchgeführt. Als Anoden wurden Stabelektroden in regelmäßigen Abständen beiderseits des Schneidweges angeordnet; die Kathode bildete dabei das Werkzeug selbst. Mit diesen Versuchen konnte zum einen das Versuchswerkzeug optimiert werden und zum anderen wurden auch erste Aussagen zum Einfluss der Schneidgeschwindigkeit sowie der angelegten elektrischen Spannung auf die auftretende Schneidkraft möglich.

Es stellte sich heraus, dass insbesondere die Dauer der Einwirkung einer elektrischen Potentialdifferenz auf eine Bodenkontaktstelle in Verbindung mit dem tatsächlichen Kathodenkontakt (Werkzeugkontakt) von Bedeutung ist. Dies bedingt, dass die zu erwartende Wirksamkeit elektrokapillarer Effekte stark vom gewählten „Bearbeitungsverfahren“ abhängt. Die Zeitdauer, über die hinweg eine beliebige Bodenstelle die Kathode (Werkzeug) berührt, wird im Weiteren als Bodenkontaktzeit T_{kb} definiert. Die Gesamtdauer der elektrischen Einwirkung auf eine Bodenstelle, welche im Laufe des Arbeitsprozesses mit der Kathode in Kontakt kommt, bis zu dem Zeitpunkt, an dem der Prozess an ihr vorüber ist, soll Einwirkzeit T_{eb} genannt werden. Während in verschiedenen Untersuchungen (z.B. WEBER, 1932) die Bodenkontaktzeit über den Parameter Fahrgeschwindigkeit mit berücksichtigt ist, wird die Abhängigkeit von der Zeit bei der Betrachtung anderer Anwendungen, z.B. beim „Pfahlziehen“ (SCHMIDT et al., 1988) nicht erfasst. Da hier die Elektroosmoseeffekte jedoch zur Reduktion der Ziehenergie von Stahlprofilen eingesetzt wurde, war generell ein im „Arbeitsbereich“ quasi stationäres elektrisches Feld gewährleistet; T_{eb} ergibt sich dabei als Summe der Vorhaltezeit T_v (Dauer der elektrischen Vorbeaufschlagung vor Prozessbeginn) und dem linearen Zeitzuwachs Δt . Bei entsprechender Vorhaltezeit kann also keine Verschlechterung des Prozessergebnisses mehr stattfinden. Beim beschriebenen Schneidversuch in der Rinne wird allerdings ein linearer Vorgang simuliert, wie er beispielsweise beim Einsatz von Baggern auftritt. Das elektrische Feld verlagert sich dabei ständig linear.

Als eine Kenngröße für die Effektivität in Bezug auf die Einwirkzeit kann das Verhältnis T_{kb} zu T_{eb} dienen; es soll Kontaktkoeffizient k_{ke} genannt werden. In Abb. 6.5 ist dieses Verhältnis zusammen mit T_{kb} beispielhaft für die beiden beschriebenen Fälle aufgetragen; als Kathode fungiert dabei ausschließlich das Stahlprofil bzw. das Schneidwerkzeug.

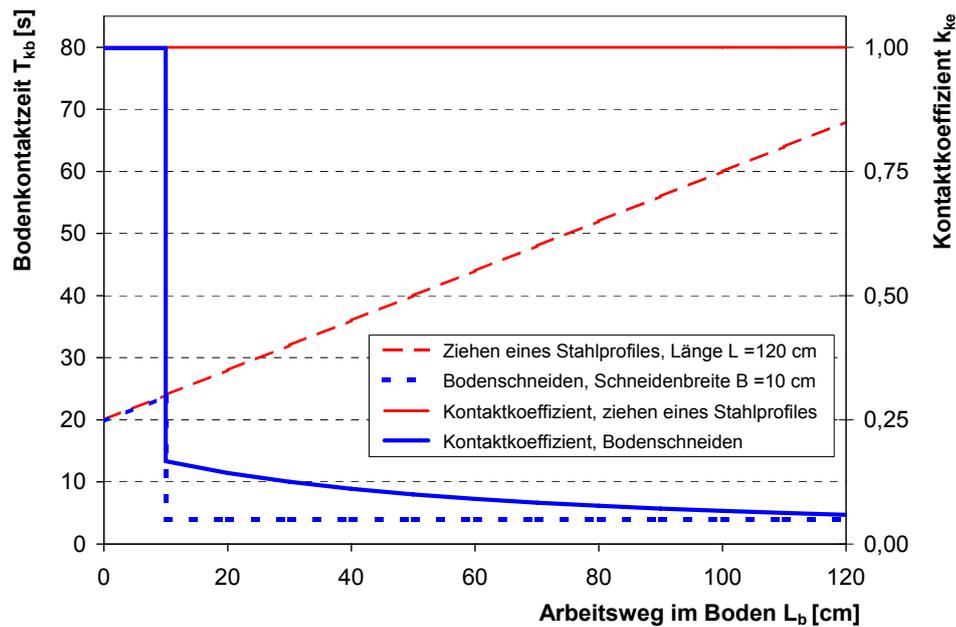


Abb. 6.5: Bodenkontaktzeiten und -koeffizienten für $T_v = 20$ s und $v = 25$ mm/s

Der lineare Schneidvorgang erweist sich dabei im Vergleich zum Verfahren mit quasi stationärem elektrischen Feld als deutlich ungünstiger. Qualitativ spiegelt k_{ke} außerdem die Auswirkung des zeitlich veränderten elektrischen Feldes im Boden in Abhängigkeit von der Vorhaltezeit wider, welches auch noch in einigem Abstand vom Werkzeug (Kathode) den Schneidvorgang beeinflussende Wasserbewegungen hervorruft. In der Tat war bei den Schneidversuchen mit Vorhaltezeit ein kontinuierlicher Anstieg der Schneidkraft mit dem Schneidweg zu verzeichnen, der sich über die Einwirkdauer des elektrischen Feldes im Boden vor dem Werkzeug (als Kathode) erklären lässt.

Im Weiteren folgten Versuche bei gleichbleibender Schneidgeschwindigkeit, jedoch mit verschiedenen Wassergehalten und Ionenkonzentrationen (Zugabe von NaCl ins Anmachwasser) jeweils mit und ohne elektrisches Feld. Auf diese Weise konnte eine erste Quantifizierung der Schneidkraftreduzierung durch die auftretende Elektroosmose

vorgenommen werden. Neben der Verwendung des Werkzeuges als einzige Kathode wurde dabei die Möglichkeit untersucht, den zu schneidenden Bodenbereich durch eine zusätzliche Elektrodenreihe (Kathoden) gewissermaßen vorzubeaufschlagen. Dabei blieb der Anstieg der Schneidkraft mit dem Schneidweg aus bzw. es trat in geringem Maße sogar eine zusätzliche Absenkung ein. In Abb. 6.6 sind (für diese Verfahrensweise) beispielhaft Schneidkraftkurven bei verschiedenen elektrischen Potentialdifferenzen für den bindigen Boden (bei gleichem Wassergehalt und Anfangs-pH-Wert) dargestellt.

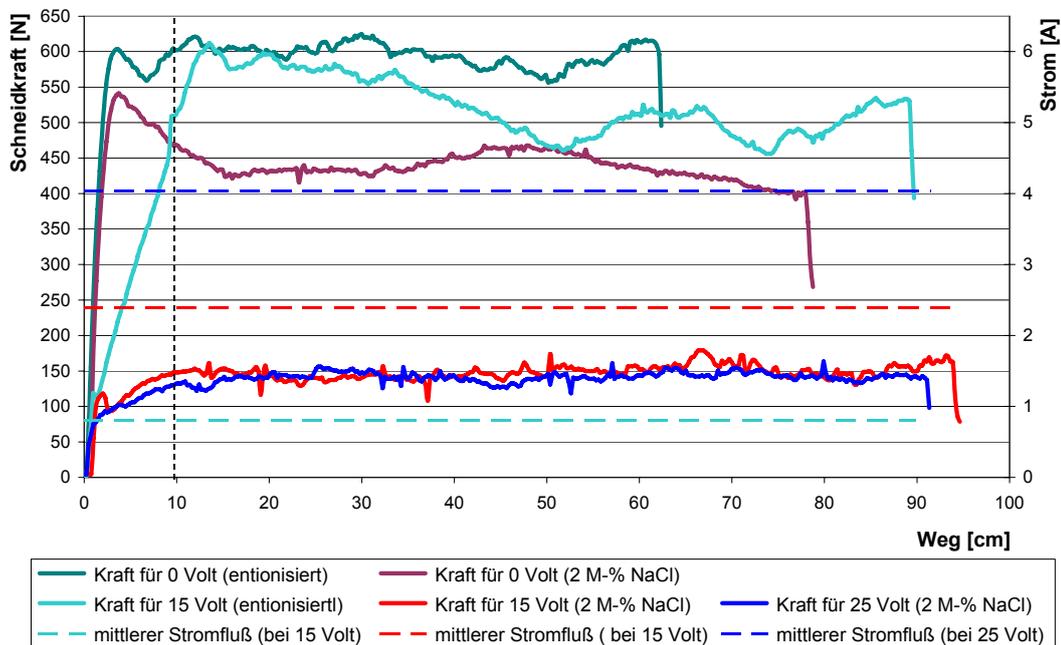


Abb. 6.6: Schneidkräfte und Stromstärken bei gleichem Wassergehalt und gleicher Schneidgeschwindigkeit für verschiedene elektrische Potentialdifferenzen

Die grünen Kurven zeigen Versuchsboden mit entionisiertem Anmachwasser, während die anderen Kurven Boden mit einem Massenanteil von 2% NaCl im Anmachwasser repräsentieren. Es ist dabei gut zu erkennen, dass alleine schon der höhere Anteil an Kationen im Boden eine deutliche Schneidkraftreduzierung hervorruft; die Auswirkungen der elektrischen Potentialdifferenzen sind erwartungsgemäß auch vielfach größer. Die gestrichelte vertikale Linie markiert die Breite des Werkzeuges (10 cm). Bis zu dieser Marke ist bei den Versuchen mit angelegter elektrischer Spannung am flachen Kurvenanstieg der schneidkraftmindernde Einfluss der Vorhaltezeit T_v gut zu erkennen.

Insgesamt können auf Basis der Ergebnisse aus den durchgeführten Schneidrinnenversuchen folgende Aussage getroffen werden:

- Bei geringem Ionengehalt im Bodenwasser ist eine Reduzierung der Schneidkraft in Böden mit geringem Tonmineralanteil auch bei hohen Wassergehalten nur mit sehr hohen elektrischen Spannungen zu erreichen. Im Löss war mit entionisiertem Anmachwasser bei stufenweiser Steigerung der Spannung bis 30 V beispielsweise keine Reduzierung erkennbar. Bei einer angelegten Spannung von 100 V konnte jedoch eine Reduzierung um im Mittel ca. 30 % erreicht werden.
- Bei größerem Tonmineralanteil bzw. höherem Eigenionengehalt des Bodens hingegen können auch geringe elektrische Spannungen Schneidkraftreduzierungen hervorrufen. Im bindigen Boden konnte beispielsweise auch mit entionisiertem Anmachwasser bereits bei einer angelegten Spannung von 15 V eine Reduktion der Schneidkräfte um 10 bis 15 % beobachtet werden.
- Bei ausreichendem Ionengehalt im Anmachwasser treten auch bei geringen elektrischen Spannungen bereits große Schneidkraftreduktionen auf, die dann ab einer gewissen Spannung nur noch in geringem Maße von dieser abhängig sind. Mit einer 2 M%-igen NaCl-Lösung als Anmachwasser traten bei Spannungen von 15 und 25 V jeweils Schneidkraftreduktionen bis ca. 60 % auf.

Die Ergebnisse der Versuche in der Schneidrinne lassen vermuten, dass die Nutzung elektrokinetischer Effekte beim BolSiM hilfreich eingesetzt werden kann. Die auftretenden Gesamtreibkräfte (Schneidkräfte) zwischen Boden und einer Stahloberfläche lassen sich damit gezielt beeinflussen, wenn die Einwirkzeit des elektrischen Feldes bzw. der Kontaktkoeffizient k_{ke} ausreichen groß ist. Beim BolSiM kann der Erdstoff – mit den Werkzeugen (Mantelrohr und Schnecke) als Elektroden – während seiner gesamten Verweildauer im Förderrohr unter Einfluss einer elektrischen Potentialdifferenz gehalten werden. Allerdings kann auf theoretischem Weg nicht abgeschätzt werden, wie effektiv eine Beaufschlagung mit einem elektrischen Feld einsetzbar ist, weil sowohl die geometrischen Randbedingungen als auch die kinetischen Prozesse hier sehr komplex sind. Je besser die aus der Fördertheorie stammende Annahme, dass die meisten Förderteilchen eine einmal eingenommene Radialposition während der Förderung beibehalten (vgl. Abschnitt 4.2.3) zutrifft, desto eher scheint die elektrokapillare Beeinflussung des Erdstofftransportes möglich. Allerdings ist hierfür eine elektrische Entkoppelung von Bohrschnecke und Mantelrohr erforderlich.

Kapitel 7

Untersuchungen am Bohrversuchsstand

7.1 Überlegungen zur Abbildung des BolSiM im Modell

7.1.1 Anforderungen

Mit der vorliegenden Arbeit sollen wissenschaftliche Grundlagen für ein reales baubetriebliches Verfahren erarbeitet werden, welche letztlich für die Verbesserung und Weiterentwicklung in der Praxis dienlich sein können. Ein solcher Anspruch ist mit Untersuchungen an einer Modell-Versuchsanlage (Labormaßstab, vgl. Unterkapitel 5.2) von vornherein nur begrenzt zu erfüllen, da infolge der hohen Komplexität der Bewegungsvorgänge entsprechende Modellgesetze kaum formulierbar bzw. anwendbar sind. Ein wichtiger Aspekt bleibt hier also durchaus auch die eigentliche Betrachtung des Transports von bindigen Erdstoffen in einem Senkrechtschneckenförderer gewählter Größe. Abmessungen und Geometrie des Modellversuchsstandes sollen sich dabei jedoch am Original orientieren.

Die Versuchsparameter sind im Wesentlichen so zu wählen, dass entsprechende Realitätsbezüge hergestellt bzw. Rückschlüsse auf das Verfahren im Originalmaßstab gezogen werden können. Dennoch haben die Versuche zunächst hauptsächlich Modellcharakter. Es müssen z.B. auch Versuche durchgeführt werden, die im Rahmen von Parameterstudien nur für den Vergleich innerhalb des Modellversuchsrahmens geeignet sind. Diese ermöglichen ggf. Rückschlüsse auf grundlegende Zusammenhänge und Transportmechanismen, die sich mit den aktuell in der Praxis verwendeten Verfahrensparametern u.U. (noch) nicht nachvollziehen lassen.

Ein weiterer Anspruch besteht darin, dass Verfahrensverbesserungen, welche sich ggf. aus den Versuchsergebnissen ableiten lassen, möglichst auch bereits mit dem Bohrversuchsstand untersucht werden können. Dies erfordert eine gewisse Variabilität desselben.

Im Einzelnen sind für die Übertragung des BolSiM in den Modellmaßstab und die Konzeption und Konstruktion eines geeigneten Modellversuchsstandes folgende Aspekte zu berücksichtigen:

Konzeptionelle Aspekte:

- Bei der Betrachtung von Erdstoffen in Versuchsapparaturen im Labormaßstab spielt generell das vorhandene Größtkorn im Vergleich zu den gewählten Abmessungen eine wichtige Rolle.
- Die absoluten Schergeschwindigkeiten zwischen Erdstoff und Metalloberflächen der Werkzeuge haben ggf. einen Einfluss auf das Reibverhalten und auf die Strukturbildung im Erdstoff.
- Die Drehzahl der Bohrschnecke spielt sowohl absolut als auch im Verhältnis zur Wendelsteigung (Transportmaß) eine wichtige Rolle.
- Der Förderprozess soll möglichst unabhängig vom Lösevorgang (eigentliche Erdstoffaufgabe in die Bohrschnecke als „Schneckenförderer“) untersucht werden. Dennoch muss letzterer in geeigneter Weise berücksichtigt werden.
- Die Förderleistung bzw. -geschwindigkeit muss in geeigneter Weise erfasst bzw. parametrisiert werden.
- Es sind Kraftgrößen zu messen, die Rückschlüsse auf „Verfahrenszustände“ und damit auch auf Transportvorgänge zulassen.
- Der Zustand (Größe, Form, Konsistenz, ...) des austretenden Fördergutes muss qualitativ dokumentiert werden können.
- Die erforderliche Variabilität für Verfahrensmodifikationen (z.B. Untersuchungen unter elektrischer Gleichspannung) muss in der Konzeption des Modellversuchsstandes bereits Berücksichtigung finden.

Konstruktive Aspekte:

- Der Versuchsstand muss statisch ausreichend robust ausgeführt sein. Insbesondere ist auf eine möglichst spielfreie und dennoch leichtgängige Ausführung der hochbelasteten Dreh- und Linearlager zu achten, um Messergebnisse nicht zu verfälschen.
- Für Mantelrohr und Schnecke sind voneinander unabhängige Drehantriebe erforderlich.

- Das Mantelrohr muss gemeinsam mit der Schnecke vertikal bewegt werden können.
- Alle Antriebe müssen auch unter Last möglichst konstante Geschwindigkeiten ermöglichen.
- Zur Kontrolle ist eine laufende automatische Erfassung aller Geschwindigkeitsdaten während der Versuchsdurchführung erforderlich.

7.1.2 Übertragung in den Modellmaßstab

Zunächst war ein Modellmaßstab festzulegen, der sowohl die im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Erfordernisse, als auch die Gegebenheiten am Institut berücksichtigt. Nach KORZEN (1981) wird bzgl. Modellversuchen zu bodenbearbeitenden Zwecken in drei Kategorien unterschieden:

- Echte Modelle: Alle charakteristischen Größen entsprechen der Großausführung
- Hinreichende Modelle: Nicht alle charakteristischen Größen entsprechen der Großausführung
- Gestörte Modelle: Es können einige Voraussetzungen nicht eingehalten werden, deshalb müssen Korrekturfaktoren eingeführt werden

Allgemein kann nach KORZEN (1981) bei Modellen zu Betrachtungen bei bindigen Böden ein Maßstab von bis zu 1:8 als hinreichend angesehen werden.

Ein weiteres Kriterium war die Wahl des „Versuchsterrains“. Hierzu bot sich die Nutzung einer in der Versuchshalle des Institutes vorhandenen große Bodenrinne an (vgl. Abschnitt 5.3.3). Bei einer Rinnentiefe von 80 cm bot sie die Möglichkeit Bohrungen bis ca. 70 cm Tiefe durchzuführen. Setzt man ein minimales Verhältnis zwischen Bohrdurchmesser und Bohrtiefe von 1:6 an, ergibt sich ein Außendurchmesser des Mantelrohres im Modell von 11,7 cm. In Bezug zu im Original eingesetzten Bohrdurchmessern beim BolSiM von 880 mm und 1180 mm ergeben sich daraus Modellmaßstäbe von 1:7,5 und 1:10. Beide versprechen nach obiger Betrachtung noch Ergebnisse, die auch für den Vergleich mit dem Originalverfahren verwertbar sind.

Gewählt wurde ein Außendurchmesser des Mantelrohres von 112 mm, an dem sich dann die weiteren Maße für Innendurchmesser und die verschiedenen Bohrschnecken orientierten. Der gewählte Maßstab schließt bei dem hier verwendeten bindigen Boden mit Größtkorn im Schluff- bis Mittelsandbereich auch einen negativen Einfluss des Verhältnisses Größtkorn zu Schneckenkanalgröße aus.

Während der komplette Bohrversuchsstand in Eigenarbeit am Institut aufgebaut werden konnte, mussten die Modellbohrschnecken von einer Fachfirma hergestellt werden. Der Außendurchmesser der Schnecken musste sich am Innendurchmesser des Mantelrohres (103 mm) orientieren und beträgt bei allen Schnecken 100 mm. Es wurden in Anlehnung an Originalverfahren vier unterschiedliche Geometrien ausgewählt, und maßstäblich gefertigt (Seelenrohrdurchmesser und Steigung). Schnecke 1 und 2 entsprechen dem Originalverfahren mit 880 mm Bohrdurchmesser (M 1:7,5), Schnecke 3 dem mit 1180 mm (M 1:10) und Schnecke 4 einem Verfahren mit 410 mm Bohrdurchmesser (M 1:3,7). Die meisten Bohrversuche wurden mit den Schnecken 1 und 2 durchgeführt. Dies beinhaltet eine Variation der Schneckensteigung für einen Originalbohrdurchmesser von 880 mm im Modellmaßstab 1:7,5. Mit den weiteren Schnecken erfolgten nur einzelne Versuche zu Vergleichszwecken. Abb. 7.1 zeigt die verwendeten Bohrschnecken und Tabelle 7.1 deren geometrische Abmessungen.



Abb. 7.1: Bohrschnecken 1 bis 4 mit Schraubspitzen (von links nach rechts)

Tabelle 7.1: Geometrische Abmessungen der vier Modellschnecken

Schnecke	Außen- durchmesser	Seelenrohr- durchmesser	Wendel- steigung	Wendelstärke
Nr. 1	100 mm	51 mm	83 mm	6 mm
Nr. 2	100 mm	51 mm	60 mm	6 mm
Nr. 3	100 mm	35 mm	82 mm	6 mm
Nr. 4	100 mm	43 mm	69 mm	6 mm

Ein wichtiger Punkt bei der Übertragung ins Modell ist auch die Gestaltung des Schneckenanfängers. In der Realität ist dieser meist als Doppelschneide mit zusätzlichen Schneidwerkzeugen ausgebildet. Zudem wird die Querschnittsfläche des Seelenrohrs beim Bohren meist mit zusätzlichen Werkzeugen in Form eines Zentrumschneiders freigeräumt. Da für die vorliegenden Untersuchungen ein möglichst geringer Einfluss des Schneidvorganges erwünscht war, wurde als „Schneidwerkzeug“ lediglich das untere Wendelende scharf angefast, was ein freies Abgleiten des „Bohrspanes“ ermöglicht. Der Materialabfluss vor der Schneckenseele wird durch einen einfachen Verdrängungskonus mit einheitlichem Spitzenwinkelwinkel von 60° erreicht. Diese Schneckenspitze erhöht zwar den Anpressdruck beim Bohren, was jedoch für die weiteren Betrachtungen keine große Rolle spielt, da hier im Wesentlichen die Massenförderung und das Schneckendrehmoment betrachtet werden sollen. Die Konusspitzen sind abschraubbar und können für Konditionierungsversuche entsprechend ausgetauscht werden (vgl. Abb. 7.1).

7.1.3 Versuchsparameter im Modellmaßstab

Zur Untersuchung im Modellmaßstab sollten Werte für die Drehzahlen von Schnecke und Mantelrohr sowie für die Vortriebsgeschwindigkeit festgelegt werden, die sich an den Verfahrensparametern des Originalmaßstabes orientieren. Dazu kann die Vortriebsgeschwindigkeit als lineare Weggröße einfach in den Modellmaßstab umgesetzt werden. Für Drehgeschwindigkeiten aber müssen verschiedene Überlegungen angestellt werden. Wird darauf Wert gelegt, dass auch die Eindringung der Schneckenschneide pro Umdrehung und damit die theoretische Schneidspanstärke im maßstäblichen Verhältnis erfolgt, dann muss die Schneckendrehzahl gleich gewählt werden wie im Original. Soll jedoch der Einfluss der Zentrifugalkraft mit betrachtet werden (vgl. Unterkapitel 4.4) dann ist die Schneckendrehzahl entsprechend mit der

Wurzel des Maßstabfaktors zu multiplizieren, weil hier die Drehgeschwindigkeit quadratisch eingeht. Für Schnecke 2 (M 1:7,5) ergibt das einen Multiplikator von 2,74. In Abb. 7.2 sind beispielhaft für Schnecke 2 die kritischen Schneckendrehzahlen nach der Einzelkörpertheorie für Original- und Modellmaßstab aufgetragen. Eine Übersicht über die geometrischen Verfahrensparameter im Originalmaßstab und die zugehörigen Modellparameter findet sich in Tabelle 7.2. Es ist dabei zu beachten, dass in bindigem Boden einen Schneckendrehzahl > 25 U/min in der Praxis eher unrealistisch ist. Daraus ergibt sich eine maximale Drehzahl im Modell von ca. 70 U/min.

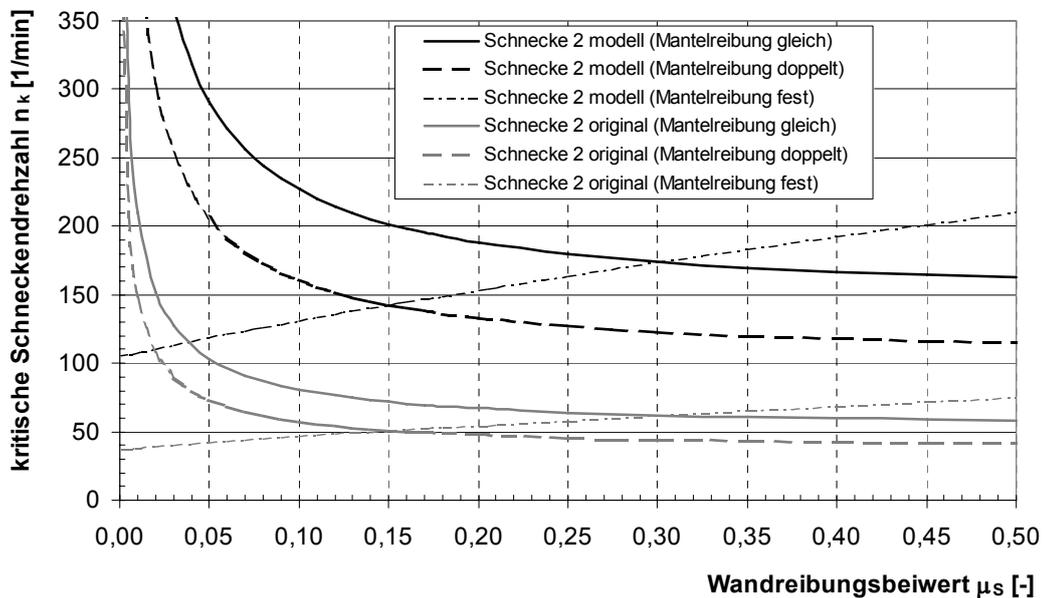


Abb. 7.2: Kritische Schneckendrehzahlen von Original- und Modellschnecke 2

Tabelle 7.2: Geometrische Verfahrensparameter im Original und im Modell

Parameter	Original	Modellentsprechung	Im Modell verwendet
Umdrehung der Schnecke unter Last [U/min]	10 – 40	10 – 110	3 – 75
Umdrehung des Mantelrohres unter Last [U/min]	ca. 10	ca. 10	3 – 30
Mittlere Eindringgeschwindigkeit [m/min]	1 – 1,5	0,13 – 0,20	0,10 – 0,26

7.2 Vorbemerkung zu den Bohrversuchen

7.2.1 Allgemeines

Wie schon in den beiden vorangestellten Abschnitten angesprochen, haben die hier durchgeführten Versuche in erster Linie Modellcharakter und dienen der Grundlagenforschung. Dennoch sollen sich, neben den Ergebnissen „im Kleinen“, in möglichst weiten Bereichen auch Rückschlüsse auf die Praxis im Originalmaßstab ziehen lassen. Dies gilt sowohl für die Versuche, welche direkt dem realen Verfahren nachgebildet sind, als auch für Versuche mit real (noch) nicht praktizierten Modifikationen. Bei der Betrachtung der hier durchgeführten Bohrversuche wird unterschieden in „Versuche im Standardverfahren“ (Unterkapitel 7.3) und „Versuche bei unterschiedlicher Modifizierung des Verfahrens“ (Unterkapitel 7.4). Die Versuche unter Einsatz der Spülmedien Wasser und Luft werden dabei den letzteren zugerechnet, auch wenn entsprechende Spülungen in der Praxis teilweise bereits eingesetzt werden.

Ein sehr interessanter Aspekt, für den es z.Z. jedoch noch keine Praxis-Entsprechung gibt, ist die Verwendung des Mantelrohres mit vertikalen Innenleisten (MRV, vgl. Unterkapitel 5.2). Die Idee ein Mantelrohr mit solchen Leisten zu versehen, entstand ursprünglich aus der Erfordernis einer elektrischen Entkoppelung von Mantelrohr und Förderschnecke. Unter Berücksichtigung der theoretischen Fördermechanismen (vgl. Unterkapitel 4.1) war aber zu erwarten, dass eine solche Modifikation alleine, also auch ohne einen elektrischen Potentialunterschied, einen deutlichen Einfluss auf die Förderung haben könnte. Während des Bohrvorganges kommt es beim verwendeten bindigen Boden nämlich unweigerlich zur Füllung der Leistenzwischenräume. Dies verändert die Reibverhältnisse zwischen gefördertem Erdstoff und Mantelrohr; da das Mantelrohr damit – bis auf die unterbrechenden Leistenoberflächen – quasi aus dem gleichen Erdstoff besteht. Im Gegensatz zu einem ungestützten Bohrloch, wie es beim SOB-Verfahren gewissermaßen als „Förderrohr“ vorliegt, ist die Geometrie aber weiterhin eindeutig definiert und auch die für das BolSiM charakteristische Eigendrehung des Mantelrohres bleibt erhalten. Weiterhin ist durch die vertikale Orientierung der Leisten u.U. entlang der Leistenkanten eine Begünstigung der Vertikalbewegung des Erdstoffes denkbar.

Die Versuche mit dem MRV müssen also auch ohne elektrischen Potentialunterschied als Modifizierung des Verfahrens angesehen werden und werden als solche im Unterkapitel 7.4 behandelt.

7.2.2 Parametervariationen

Bei der Vielzahl von möglichen Parametervariationen war eine Vorauswahl bzw. eine den Versuchsergebnissen ständig angepasste Auswahl unerlässlich. Es sollten dabei in erster Linie signifikante Unterschiede im Förderverhalten in Abhängigkeit von der Veränderung einzelner Parameter bzw. Parameterkombinationen gefunden und belegt werden. Eine entsprechende Parameteranpassung in Folgeversuchen konnte dabei dazu dienen, die Ergebnisse genauer zu interpretieren. Dennoch stand von Beginn an fest, dass im Rahmen dieser Forschungsarbeit nicht unbedingt durchgängige Abhängigkeiten von einzelnen Parametern ermittelt werden sollten. Dies erfordert eine Vielzahl von gleichartigen Versuchen bei jeweils geringer Veränderung nur eines Parameters und wird erst sinnvoll, wenn eben nur ein solcher Aspekt beleuchtet werden soll. Mit der vorliegenden Arbeit musste jedoch erstmals ein Überblick über die möglichen Förderspezifika geschaffen werden, der künftig nähere Untersuchungen im Fokus einer speziellen Fragestellung erlaubt.

Tabelle 7.3: Verwendete „geometrische“ Parameterkombinationen

Kombination	Drehzahl Schnecke n_s [U/min]	Drehzahl Mantelrohr n_M [U/min]	Vortriebsgeschwindigkeit v_v [cm/min]	Schnecken (Nummern)	Anzahl der Versuche
A	15	3	10	1	3
B	75	3	10	1	2
C	15	30	10	1 / 2	4
D	75	30	10	1	2
E	75	3	26	1 / 2 / 3 / 4	8
F	15	30	26	1 / 2	31
G	75	18	26	1 / 2 / 3 / 4	16
H	75	10	26	1	2
I	3,1 – 4,5	3,1 – 4,5	26	1 / 2 / 3 / 4	10
J	6,2 – 9,0	6,2 – 9,0	26	1 / 2	4
K	6,2	3,1	26	1	2
M	30	15	10	2	12
S	15	30	15	2	3
T	30	15	15	2	3
W	30	15	7	2	2
X	30	15	25	2	2
Y	30	15	20	2	9
Z	15	15	26	1	1

Anm.: Die Kombinationen I und J sind geometrisch an die jeweiligen Schnecken angepasst.

Die meisten Parameter wurden in sinnvoll erscheinenden „Sprüngen“ variiert, um jeweils möglichst deutlich veränderte Bedingungen und damit auch Ergebnisse zu erreichen (vgl. Tabelle 7.3). Um sicher zu gehen, dass die Einzelversuche auch aussagekräftig sind, wurde die Reproduzierbarkeit mit diversen Zusatzversuchen nachgewiesen. Im übertragenen Sinne entstehen damit in der Blackbox der Fördermechanismen des BolSiM einzelne verteilte „Sichtfenster“, welche einige sehr interessante Aufschlüsse vermitteln. Darüber hinaus werden gute Ansatzpunkte für weiterführende Untersuchungen mit Fokus auf einzelne gezielte Abhängigkeiten gegeben.

Ein zusätzliches Kriterium zur Parametermodifikation war der Versuch, gezielt „schwierige“ Förderbedingungen zu schaffen. Dies sollte dazu dienen, die in der Realität auftauchenden Förderprobleme in gewissem Rahmen nachvollziehen zu können. Es wurde dabei versucht vergleichsweise hohe auftretende Schneckendrehmomente zu erreichen bzw. die Förderung zum Erliegen zu bekommen.

7.2.3 Grundlegendes zur Förderung im Versuch

Die Erdstoffförderung und deren Beobachtung bei den durchgeführten Versuchen unterliegen bestimmten Randbedingungen, die hier vorab angesprochen werden sollen. Ein wesentlicher Faktor ist die „Materialverfügbarkeit“. Es kann im Durchschnitt maximal soviel Erdstoff pro Zeit bzw. Tiefe gefördert werden, wie dem Förderer zur Verfügung gestellt wird (*Aufgabemenge*). Diese Menge ist direkt durch die Vortriebsgeschwindigkeit begrenzt und ergibt sich aus dem durch die Außenkontur des Mantelrohres vorgezeichneten Bohrvolumen (vgl. Unterkapitel 4.4). Dieses Bodenvolumen wird i.d.R. durch die Bohrschnecke aufgenommen und **aktiv** als Erdstoff gefördert. Dies zeigt sich an den Förderkurven der einzelnen Versuche, die den Materialaustrag aus dem Mantelrohr (also am oberen Ende) über die Zeit bzw. die erbohrte Tiefe wiedergeben (vgl. z.B. Abb. 7.3). Aus der Zeit bis zum Beginn des Austrages und der anschließend verzeichneten Förderrate im Vergleich zur Aufgabemenge (*spezifischer Erdstofftransport*) lassen sich Schlüsse über die Förderwirkung ziehen.

Bei nicht oder zu langsam drehenden Werkzeugen kann auch eine einfache Verdrängung des Bodens in den Schneckengang stattfinden, wodurch eine gewisse Förderwirkung zustande kommt. Der Erdstoff steigt dabei im voll gefüllten

Schneckengang in Abhängigkeit des Verhältnisses vom Eigenvolumen der Werkzeuge (Verdrängungsvolumen) zum erbohrten Volumen. Dieser Fall wäre als rein **passive** Förderung zu bezeichnen. In der Praxis des BolSiM kommt die Förderung in diesem Fall allerdings durch Verstopfung der Schnecke zum Erliegen (vgl. Unterkapitel 2.3). Ein geringer spezifischer Erdstofftransport beim Bohren ist u.U. auch mit einer zusätzlichen Bodenverdrängung nach außerhalb des Mantelrohres verbunden, was sich dann in einer negativen Massenbilanz nach der Bohrung äußert. Im normalen Bohrbetrieb kann, wie die Wägungen des geförderten Erdstoffes nach Versuchsende gezeigt haben, diese Außenverdrängung allerdings vernachlässigt werden.

Zu betrachten ist weiterhin die Frage, inwieweit der Erdstoffnachschieb die laufende Förderung beeinflusst, also ob einem geförderten Erdstoffelement durch nachfolgenden Erdstoff gewissermaßen eine Förderhilfe zuteil wird. Dies würde eine teilweise passive Förderung bedeuten. Solche Fragen lassen sich über die Betrachtung der Förderrate nach Erreichen des Bohrlochtiefsten und mithilfe von Überlegungen zu den Fördermechanismen, welche den einzelnen beobachteten Förderarten zugrunde liegen, klären. Aufschluss über die jeweilige Förderart, also die Bewegungsform des Fördergutes im Förderer während des Bohrvorganges, gibt – wie sich später herausstellte – vor allem die visuelle Betrachtung der austretenden Erdstoffkörper. Sie erweist sich damit als ein ganz wesentlicher Aspekt zur Beurteilung der Förderung insgesamt und erlaubt letztlich die Zuordnung des jeweiligen Förderprozesses im Einzelversuch zu einer bestimmten Förderart (vgl. Unterkapitel 8.4).

7.3 Versuche zum Förderverhalten im Standardverfahren

7.3.1 Indexversuche und Definitionen

Die ersten am Bohrversuchsstand durchgeführten Versuche mussten – neben dem Nachweis der generellen Eignung der Apparatur – vor allem zeigen, ob die gewählten Messparameter tatsächlich auch verwertbare Aussagen über die Erdstoffförderung erlauben. Ein Problem besteht darin, dass die Mengenförderung nur über den Materialaustrag am oberen Ende des eigentlichen Förderers erfasst werden kann und der Werdegang innerhalb des Mantelrohres während des Versuches zunächst im wahrsten Sinne des Wortes „im Dunkeln“ bleibt. Es bestand dabei jedoch die Hoffnung, dass sich eine einigermaßen gleichmäßige (messbare) Mengenförderung

einstellt, so dass die Förderung in einem gewissen Bereich als *steady state* betrachtet werden kann und dadurch auch gute Rückschlüsse auf die Förderung im Mantelrohr möglich sind. Diese Hoffnung bzw. Vermutung hat sich erfüllt. Die meisten (auch später) durchgeführten Versuche weisen einen Fördermengenverlauf auf, der „global“ gesehen durchaus als linear zu bezeichnen ist. Beispielhaft ist dies auf Abb. 7.3 zu sehen, die später noch näher erläutert wird. Einzelne Versuche zeigen in der Förderkurve zwar eine mehr oder weniger ausgeprägte Wellenstruktur, aber die Abweichungen sind dabei so gering, dass auch hier im betrachteten Bereich von einer konstanten Förderrate gesprochen werden kann. Bei sehr hoher Mantelrohrgeschwindigkeit in Verbindung mit einer geringen Schneckendrehzahl kommt es allerdings zu einer Abflachung der Förderkurve. Dies bedeutet dann, dass sich der Förderer nach und nach mit Erdstoff füllt, d.h., dass sich der Füllungsgrad erhöht. Generell stellt sich bei den Versuchen zumindest bereichsweise ein stationärer Förderzustand ein, wodurch recht gute vergleichende Aussagen getroffen werden können.

Neben der Förderrate spielt die tatsächliche Fördergeschwindigkeit im Förderer die eigentlich wesentliche Rolle für den Förderprozess. Die Förderrate alleine sagt nämlich nichts über die vertikale Erdstoffverteilung im Förderer bzw. den quantitativen Füllungsgrad aus. Wegen der nachgewiesenen nahezu stationären Förderung, lässt sich die tatsächliche *Fördergeschwindigkeit* aber über den Zeitpunkt des Beginns des Materialaustrages aus dem Förderer und der Förderhöhe als Länge des Förderers bis zur Austragsstelle berechnen; dieser Zeitpunkt soll *Förderbeginn* genannt werden.

Normalerweise wird in der Fördertechnik der Materialtransport über die Zeit betrachtet, was der Förderleistung entspricht. Im vorliegenden Fall erweist es sich aber als sinnvoller, die Fördermenge über die Bohrtiefe aufzutragen, weil letztere die Randbedingung für die überhaupt förderbare Materialmenge darstellt (vgl. Abschnitt 7.2.3). Auf diese Weise wird ein anschaulicher direkter Vergleich der Förderung aller Einzelversuche bezogen auf die theoretisch mögliche Förderung erreicht. Dieser Zusammenhang beschreibt also die eigentliche Förderwirkung auch für verschiedene Eindringgeschwindigkeiten. Die eigentliche Bohrleistung (Bohrmeter pro Zeit) ist durch die jeweils konstante Abteufgeschwindigkeit bei allen Versuchen fest vorgegeben. Wegen dieses direkten linearen Zusammenhangs zwischen Versuchsdauer und Bohrtiefe lässt sich die für den Abbohrvorgang hier wenig aussagekräftige und daher untergeordnete Förderleistung (als Fördermenge pro Zeit) im Bedarfsfall leicht berechnen. Die hier vorgestellten Zusammenhänge sollen anhand eines Versuchsverlaufes nochmals näher erläutert werden.

Abb. 7.3 zeigt den Verlauf der Erdstoffmassenförderung (oberes Diagramm) und das dabei aufgezeichnete Schneckendrehmoment (unteres Diagramm). Es handelt sich dabei um zwei unter gleichen Randbedingungen durchgeführte Bohrversuche im Originalboden ($w = 17\%$) der Kombination A1 (Schnecke 1, Parameter vgl. Tabelle 7.3). Die beiden Versuche wurden an jeweils unterschiedlichen Stellen der Versuchsrinne mit größerem zeitlichen Versatz durchgeführt.

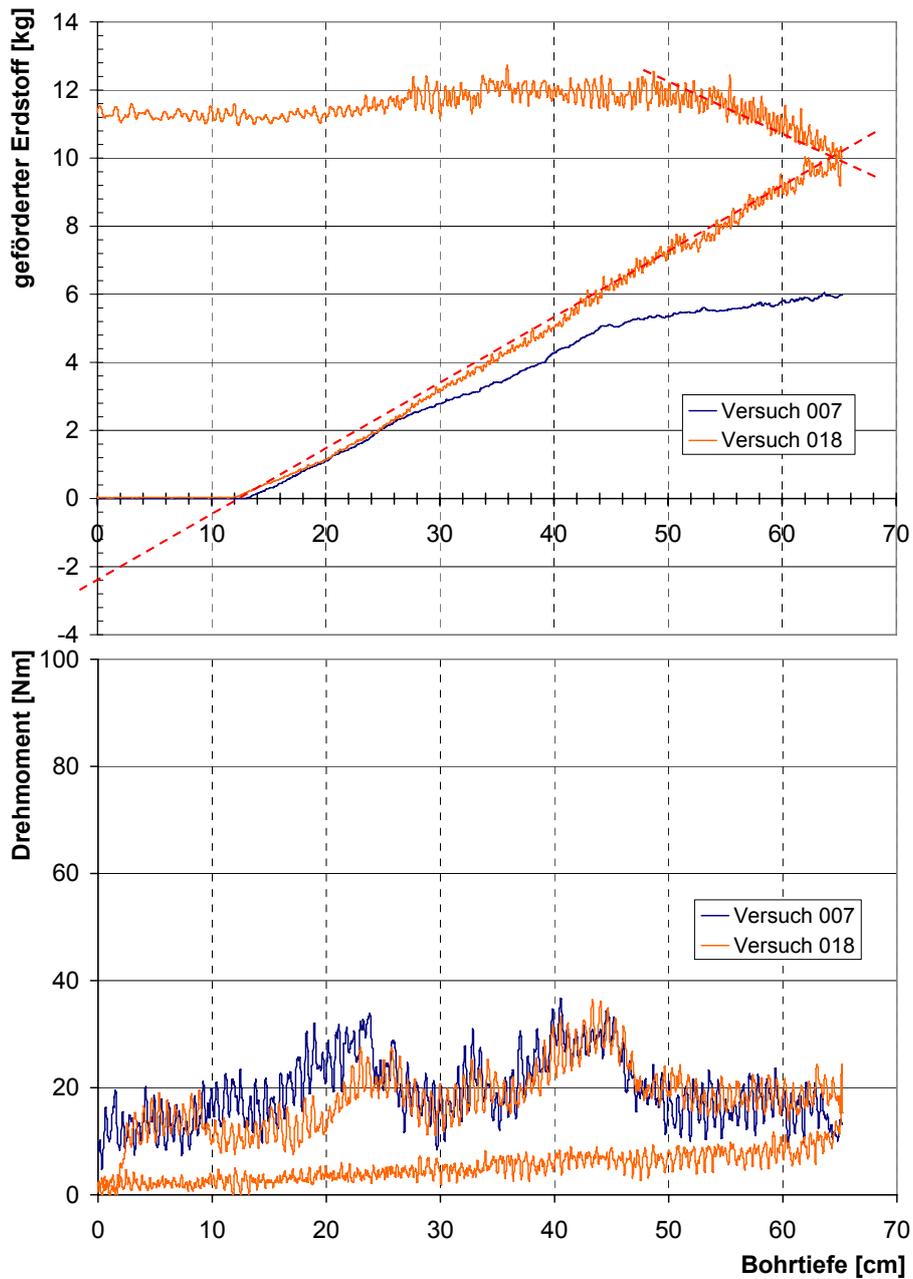


Abb. 7.3: Erdstoffförderung und Schneckendrehmoment in Abhängigkeit von der Bohrtiefe im Originalboden (Kombination A1– Originalboden, $w = 17\%$)

Versuch 007 war einer der ersten Versuche und noch mit technischen Schwierigkeiten behaftet, wie der Verlauf der Förderkurve zeigt. Am gleichen Förderbeginn und an der anfänglich gleichen Steigung sowie auch am Momentenverlauf sieht man allerdings die gute Übereinstimmung.

Dass die Förderkurve ab ca. 3 kg gefördertem Boden abflacht liegt daran, dass zunächst nicht erkannt wurde, dass ab dieser Belastung der Boden des Auffang- bzw. Wägebekalters in Kontakt mit dem Schlitten kam (auflag) und so das Gewichtsmessergebnis kontinuierlich verfälscht wurde. Ab Versuch 015 war dieser Fehler dann behoben. Auch die weitere Aufzeichnung der Versuchsdaten nach Erreichen der Solltiefe auf dem „Rückweg“ wurde ab Versuch 015 erst eingeführt.

Anhand der folgenden exemplarischen Auswertung der Versuchskurven von Versuch 018 sollen einige Kennwerte für die Förderung eingeführt werden. Es lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Die Förderung ist bis zur maximalen Bohrtiefe von 65 cm „stationär“ und die **massenbezogene Förderrate f_m** entspricht mit ca. 200 g/cm der **Aufgabemenge m_A** , was *Vollförderung* bedeutet.
- Bei Vollförderung ergibt die Verlängerung der Förderkurve zur Massenachse die **ständige Füllmasse m_F** des Förderers (hier 2,2 kg).
- Aus dem **Förderbeginn** bei $T_f = 12$ cm Tiefe, der Vortriebsgeschwindigkeit von 10 cm/min und der **Mantelrohrlänge l_M** von 107 cm ergibt sich **die Fördergeschwindigkeit zu $v_F = (107 \cdot 10) / (60 \cdot 12)$ cm/s = 1,5 cm/s.**
- Der weitere lineare Anstieg der Förderkurve nach der „Wende“ an der Bohrlochsohle mit gleicher Steigung bis zu Maximalmasse von 12 kg zeigt, dass der Förderer (nahezu) leergefördert wurde. Die Nachwägung ergab, dass nur etwa 0,8 kg der Füllmasse von 2,2 kg (s.o.) auf der Wendel verblieben sind.
- Das **Schneckendrehmoment M_S** verläuft bei beiden Versuchen nahezu gleich. Die beiden Erhöhungen lassen sich durch die Erhöhung der erforderlichen Lösekraft beim Durchfahren der Verdichtungshorizonte im Originalboden mit recht geringer Schneckenfrequenz erklären. Bei der Rückfahrt (nur Versuch 018) vermindert sich das Drehmoment kontinuierlich.

Die **theoretische Spanstärke d_S** lag bei $d_S = v_v / n_S = 0,67$ cm. Der **Aktivfaktor k_{AS}** , der die theoretische Förderhöhe eines in horizontaler Lage festgehaltenen

Erdstoffteilchens pro cm Vorschub wiedergibt, ergibt sich für die vorliegende Parameterkombination A und Schnecke 1 (mit **Wendelsteigung** $H = 8,3\text{cm}$) zu $k_{AS} = (n_S * s_W) / v_V = 12,5$. Der **frühest mögliche Förderbeginn** T_{fS} (ohne Berücksichtigung des Mantelrohres) liegt damit bei $T_{fS} = l_M / k_{AS} = 8,6\text{ cm}$. Die **schneckenbezogene Fördereffizienz** E_{fS} liegt somit bei $E_{fS} = T_{fS} / T_f = 0,72$.

Schon diese exemplarisch durchgeführte Auswertung der Förderkurve eines Versuches zeigt sehr interessante Aspekte auf. Der Versuch wurde mit „Originaldrehzahl“ der Schnecke (also weit unterhalb der kritischen Drehzahl n_k) und langsamem Mantelrohr mit mittlerem (maßstäblichem) Originalvortrieb in kompaktem „trockenem“ bindigem Boden durchgeführt. Das Fördergut besteht aus kleinen Erdstoffaggregaten, die sich letztlich als einzelne „rollige“ Körner verhalten „sollten“. Dennoch ist die Förderung hocheffizient und kommt auch nach dem Einstellen der Gutzufuhr nicht zum Erliegen! Allerdings wird die Schnecke nicht vollkommen leergefördert; es bleibt über die ganze Schnecke verteilt eine Restmenge von ca. 35 % der ständigen Füllmasse liegen. Für dieses Verhalten bietet die bekannte Fördertheorie keine Erklärung.



Abb. 7.4: Auffangbehälter nach Versuchsende (Originalboden)

Abb. 7.4 zeigt den geöffneten Auffangbehälter nach Beendigung eines Versuches vor der Kontrollwägung. Gut zu erkennen ist das kleinstückige, fast „rollige“ Fördergut. Ursprünglich war – wie auf der Abbildung zu sehen – im Versuchsstand am Material-

austrag zur effektiveren Massenmessung eine Abstreifvorrichtung montiert, die das Fördergut in den Auffangbehälter verteilte. Wegen der engen Austragsverhältnisse war das auch erforderlich. Später wurde der Materialaustrag über ein Schneckenwellen-Zwischenstück so verändert, dass das Fördergut „ungestört“ austreten und auch entsprechend fotografisch dokumentiert werden konnte.

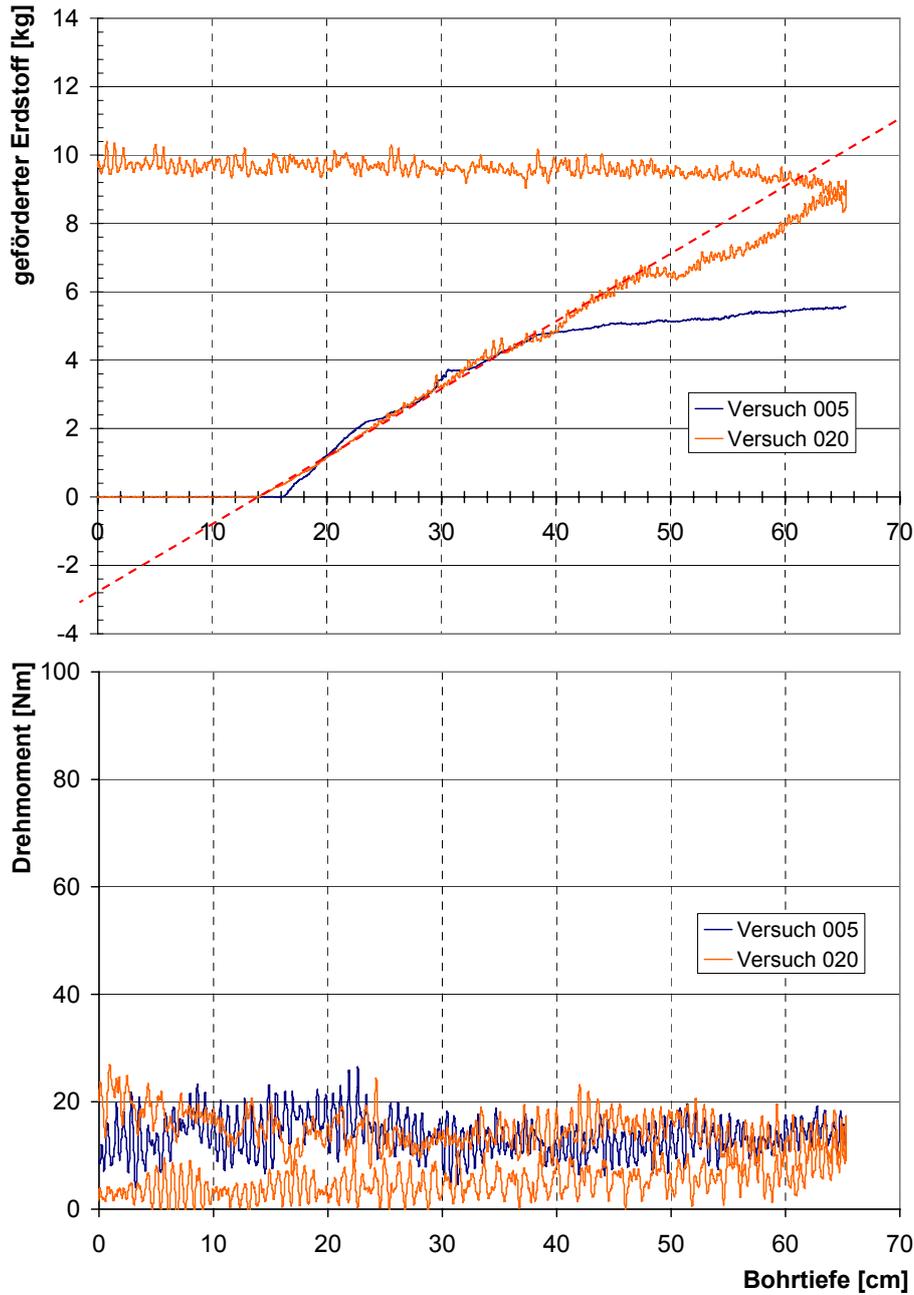


Abb. 7.5: Erdstoffförderung und Schneckendrehmoment in Abhängigkeit von der Bohrtiefe im Originalboden (Kombination C1– Originalboden, $w = 17\%$)

Zum exemplarischen Vergleich zweier Versuchsverläufe sei noch eine zweite Versuchskombination im Originalboden in gleicher Weise dargestellt (vgl. Abb. 7.5). Bei diesen Versuchen der Kombination C war lediglich die Mantelrohdrehzahl deutlich erhöht (von 3 auf 30 U/min). Alle anderen Versuchsparameter waren identisch. Versuch 020 ist dabei der Nachversuch zu Versuch 005; letzterer weist wieder die noch fehlerhafte Massenmessung bei größerer Fördermenge auf (s.o.).

Auch in diesen Versuchen ist zumindest am Anfang Vollförderung zu beobachten. Der Förderbeginn ist dabei aber um ca. 2 cm nach hinten verschoben, woraus sich eine etwas geringere Fördergeschwindigkeit von $v_F = 1,3$ cm/s und damit verbunden eine Füllmasse von $m_F = 2,4$ kg ergibt; die Fördereffizienz liegt somit bei $E_{FS} = 0,61$. Insgesamt scheint die Förderung jedoch nicht nur etwas langsamer, sondern auch weniger stabil zu sein. Dies zeigt sich sowohl am Einbruch der Förderrate bei ca. 48 cm Bohrtiefe, als auch an der nahezu fehlenden Weiterförderung auf der Rückfahrt. Die Nachwägung ergab dann auch einen Resterdstoffmasse auf der Wendel von ca. 1,9 kg. Auch die anderen Versuche bei einem entsprechenden Drehzahlverhältnis $n_M \gg n_S$ im Originalboden (und später in aufbereitetem Boden mit gleichem Wassergehalt) zeigen – unabhängig von der Wendelsteigung – solche Förderschwierigkeiten. Die Parameterkombination $n_M = 30$ und $n_S = 15$, allerdings mit Schnecke 2 und $v_V = 26$ cm/min (Kombination F), wurde daher auch für die Untersuchung der Verstopfungsneigung durch Wasserzugabe gewählt (siehe Abschnitt 7.4.1).

7.3.2 Einflüsse von Maschinenparametern

Mantelrohdrehung

Wie schon ganz zu Beginn angemerkt, ist die Eigenrotation des Mantelrohres für die Förderung und damit die Funktion des Verfahrens eigentlich nicht erforderlich (vgl. Abschnitt 2.1.2). Auch beim klassischen Senkrechtschneckenförderer ist das Mantelrohr statisch. Beim BolSiM dient die Drehbewegung also hauptsächlich der Erleichterung des Eindringens. Der Eindringwiderstand des Mantelrohres ist aber ebenso wie das dort auftretende Drehmoment nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen zum Förderverhalten. Allerdings wurden – wegen der zu hohen auftretenden Kräfte am Versuchsstand – keine Bohrungen mit stehendem Mantelrohr durchgeführt. Die minimale Mantelrohdrehzahl betrug in den Versuchen $n_M = 3$ U/min.

Interessant ist dennoch die Frage, inwiefern sich die Eigendrehung des Mantelrohres auf die Erdstoffförderung auswirkt. Entscheidend für die Förderung ist, wie bereits beschrieben, das „Zurückhalten“ des Erdstoffes entgegen der Drehung der Schnecke. Die Drehung des Mantelrohres sollte also – der logischen Anschauung folgend – der Förderung eher dienlich sein, da sie gegenläufig zur Schnecke erfolgt.

Rein physikalisch betrachtet findet zwischen Erdstoff und Mantelrohr entweder Gleitreibung oder ggf. eine Art Rollreibung (bei „krümeligen“ Aggregaten) statt. Kontinuierliche Haftreibung ist wegen der gegenläufigen Wendel und deren Steigung nicht möglich. Diese bedingt nämlich zumindest eine vertikale Verschiebung des Erdstoffes, sobald dieser sich nicht vollständig mit der Schnecke mitdreht. Da die Eigendrehung des Mantelrohres auch keinen Einfluss auf die Anpresskraft des Erdstoffes ausübt, muss die Kraftwirkung auf den Erdstoff an der Rohrwand also theoretisch von deren Drehbewegung unabhängig sein. Es ist daher davon auszugehen, dass die gute beobachtete Förderwirkung bei $n_M = 3$ U/min auch mit stehendem Mantelrohr erreicht worden wäre. Dennoch kann zunächst vermutet werden, dass die Eigendrehung des Mantelrohres die Förderung grundsätzlich eher unterstützt. Vorstellbar ist z.B., dass einzelne Erdstoffaggregate ohne direkten Wendelkontakt zeitweise am Mantelrohr haften bleiben und sich ein kleines Stück mitdrehen, bis sie wieder abgestreift werden.

Schnell drehendes Mantelrohr

Auch ein schneller drehendes Mantelrohr sollte – bei sonst gleichen Parametern – der Förderung beim BolSiM eher dienlich sein. Wie in Abschnitt 7.3.1 schon dargestellt, zeigen die Versuche aber das Gegenteil. Hierfür wird nach Erklärungen gesucht.

Beim Vergleich zwischen den dargestellten Versuchen der Kombinationen A ($n_M = 3$ U/min) und C ($n_M = 30$ U/min) ist zu beobachten, dass das aufgebrachte Schnecken-drehmoment bei Kombination C etwas geringer ist als bei A. Dies könnte auf eine geringere Wandreibung am Mantelrohr hindeuten, was auch die schlechtere Förderung mit erklären würde. Hierzu soll folgende Betrachtung angestellt werden:

Die Fördereffizienz E_{fS} ist ein Maß für die Drehung der Erdstoffteilchen mit der Schnecke. Bei $E_{fS} = 1,0$, also wenn die Förderung zum frühest möglichen Zeitpunkt eintritt, bewegen sich die Erdstoffteilchen nur vertikal. In diesem Fall

ist die Reibgeschwindigkeit zwischen Mantelrohr und Erdstoffteilchen gleich der **inneren Umfangsgeschwindigkeit** v_M des Mantelrohrs. Je geringer E_{fS} , desto größer also die Relativgeschwindigkeit zwischen Erdstoffteilchen und Mantelrohr.

Im vorliegenden Fall C ($n_M = 30$ U/min, $n_S = 15$ U/min) ergibt sich aus der Mantelrohrgeometrie $v_M = 0,16$ m/s. Vernachlässigt man die um mehr als eine Potenz kleinere Vertikalgeschwindigkeit v_F , so ergibt sich die Reibgeschwindigkeit im stationären Bereich der Förderung am Mantelrohr für die Versuche 005 und 020 mit $v_S = v_M/2$ zu $v_{RM} = v_M + v_S * (1 - E_{fS}) = 0,19$ m/s. Die maximale Reibgeschwindigkeit an der Schneckenwendel, nämlich ganz außen, ergibt sich zu $v_{RS} = v_S * E_{fS} = 0,05$ m/s. Für Kombination A (Versuche 007 und 018) ergibt sich in gleicher Weise $v_{RM} = 0,04$ m/s und $v_{RS} = 0,06$ m/s. Bei einer unabhängig von der Normalkraft angenommenen Gesamtreibung zwischen Erdstoff und Wandung ist nach den für $w = 17$ % in den Rinnenversuchen ermittelten Gesamtreibungswerten (vgl. Abb. 6.2) die Erdstoffreibung am Mantelrohr damit bei Kombination C – infolge der höheren Reibgeschwindigkeit – tatsächlich deutlich geringer anzunehmen (nur ca. 70 %). Die Reibung auf der Schneckenwendel hingegen ist bei beiden Kombinationen nahezu gleich.

Eine weitere Begründung für die instabile Förderung ergibt sich aus dem später dargelegten gefundenen Fördermodell zum BolSiM (siehe Kapitel 8). Danach ist für die Förderung ein möglichst stetiger Kontakt der einzelnen Erdstoffaggregate untereinander entlang der Schnecke wichtig („Spanwirkung“). Dieser Kontakt wird bei schnell drehendem Mantelrohr möglicherweise immer wieder unterbrochen, wenn einzelne Erdstoffaggregate zeitweise am Mantelrohr haften bleiben und sich ein Stück (schnell) mitdrehen (s.o.). Eine solche lokal zwar zunächst verbesserte Förderung einzelner Aggregate behindert dann die Bildung eines quasi stationären Spanes aus Spankörpern und damit eine stabile Gesamtförderung.

Auch die mit Schnecke 2 (um ca. $\frac{1}{4}$ reduzierte Wendelsteigung, vgl. Tabelle 7.1) durchgeführten Versuche mit der Kombination C ($T_{fS} = 11,9$ cm) weisen eine deutliche erkennbare Störung der Förderung auf und bestätigen damit die negative Wirkung eines schnell drehenden Mantelrohres auf die Förderung (vgl. Abb. 7.6). Diese Versuche wurden jedoch mit aufbereitet eingebautem Boden der Wassergehalte $w = 18\%$ (Versuch 107) und 17% (Versuch 108) durchgeführt. Versuch 108 weist eine (anfängliche) Fördereffizienz von $E_{fS} = 0,60$ auf, was tatsächlich der Kombination C1 bei gleichem Wassergehalt (Versuch 020) entspricht. Bei Versuch 107 wird durch den höheren Wassergehalt $E_{fS} = 0,74$ erreicht.

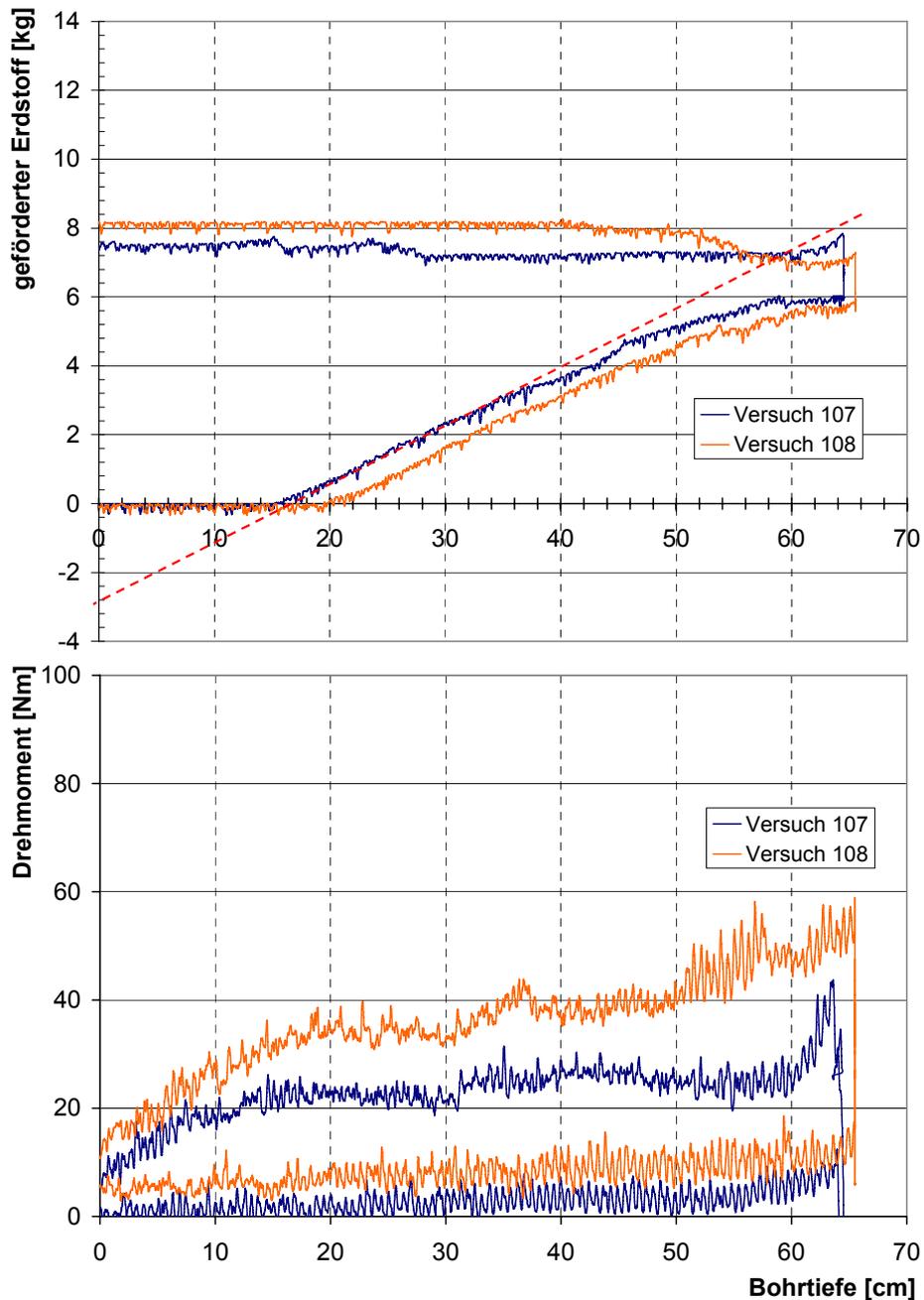


Abb. 7.6: Erdstoffförderung und Schneckendrehmoment in Abhängigkeit von der Bohrtiefe in aufbereitetem Boden (Kombination C2, $w = 18\%$ bzw. 17%)

Beide Versuche lassen außerdem einen klaren Zusammenhang zwischen der Erdstoffförderung und dem Schneckendrehmoment erkennen. Bei Tiefe 0 cm kann quasi das Lösemoment abgelesen werden. Der folgende einigermaßen lineare Anstieg ergibt sich durch die fortschreitende Füllung der Werkzeuge und ab dem Förderbeginn bleibt das Schneckendrehmoment dann zunächst erwartungsgemäß auf einem Niveau. Die Phase

der schlechteren Förderung wird von einem erneuten Momentenanstieg begleitet, der einen höheren Füllungsgrad der Schnecke und damit eine höhere Gesamtreibung im Mantelrohr widerspiegelt. Der höhere Wassergehalt in Versuch 107 wirkt sich dabei – neben dem etwas früheren Förderbeginn – in einer deutlich erkennbaren Reduktion des Drehmomentes aus (vgl. Abschnitt 7.3.3).

Auf Abb. 7.7 ist der nach dem Versuch auf der Schneckenwendel verbliebene Erdstoff für beide Versuche zu sehen; rein optisch ist kein Unterschied zu erkennen. Typisch für beide Versuche ist ein „Auftürmen“ des Erdstoffes am äußeren Wendelrand zum Mantelrohr hin, was eine größere Kontaktfläche zwischen Erdstoff und Mantelrohr bedeutet und als *Wandbildung* bezeichnet werden soll.



Abb. 7.7: Erdstoffkörper auf der Wendel nach dem Versuch (Kombination C2)
links: Versuch 107 (w = 18%) rechts: Versuch 108 (w = 17%)

Wie im nächsten Abschnitt noch gezeigt wird, wirkt sich das Verhältnis von Mantelrohr- zu Schneckendrehzahl auf Form und Zustand des geförderten Erdstoffes aus. Versuche mit identischer Konsistenz und gleicher Vortriebsgeschwindigkeit können ganz verschiedene Arten von Erdstoffkörpern in der Schnecke hervorrufen. Andererseits wird die *Förderart* auch durch eine Veränderung der Konsistenz stark beeinflusst. Bei sehr hohen Wassergehalten verschwindet daher der negative Einfluss des schnell drehenden Mantelrohres auf die Förderung.

Schneckendrehzahl und Vortriebsgeschwindigkeit

Der Einfluss der Schneckendrehzahl auf die Erdstoffförderung muss immer im Zusammenhang mit der Vortriebsgeschwindigkeit betrachtet werden, weil beide Parameter zusammen die theoretische Spanstärke d_S definieren. Durch diese wird letztlich die Größe der Erdstoffaggregate nach dem Lösen des Bodens bestimmt. Bei gleicher Vortriebsgeschwindigkeit bedeutet eine höhere Schneckendrehzahl also zunächst kleinere Erdstoffaggregate. Proportional mit der Schneckendrehzahl erhöht sich auch der Aktivfaktor k_{AS} , was einen entsprechend früheren T_{fS} bedeutet. Letzterer hängt allerdings außerdem noch linear von der Wendelsteigung ab, welche jedoch nur in vergleichsweise kleinem Rahmen variiert werden kann.

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass sich der tatsächliche Förderbeginn T_f auch bei durch die Erhöhung der Schneckendrehzahl stark vermindertem T_{fS} nur vergleichsweise wenig vermindert. Das bedeutet, dass zwar durchaus eine etwas höhere Fördergeschwindigkeit v_F erreicht wird, die Fördereffizienz E_{fS} dabei aber deutlich geringer ausfällt. Ein Vergleich dieser Werte für Schnecke 1 und $v_V = 10$ cm/min ist in Tabelle 7.4 dargestellt.

Im Vergleich der Förderkurven der Kombinationen C1 und D1 fällt darüber hinaus auf, dass die Förderung bei D trotz gleicher (schneller) Mantelrohdrehzahl stabil bleibt. Das oben beschriebene Faktum „schnell drehendes Mantelrohr“ ist hier nicht gegeben, weil die Schneckendrehzahl deutlich über der Mantelrohdrehzahl liegt. Eine geschwindigkeitsbedingte Verringerung der Wandreibung wirkt sich dadurch auch auf die Gleitfläche zwischen Erdstoff und Wendel aus.

Tabelle 7.4: Förderbeginn und Fördereffizienz bei Schnecke 1 im Originalboden

Kombination	n_S [U/min]	n_M [U/min]	v_V [cm/min]	d_S [cm]	k_{AS} [-]	T_{fS} [cm]	T_f [cm]	v_F [cm/s]	E_{fS} [-]
A1	15	3	10	0,67	12,5	8,6	12,0	1,5	0,72
B1	75	3	10	0,13	62,3	1,7	10,0	1,8	0,17
C1	15	30	10	0,67	12,5	8,6	14,0	1,3	0,61
D1	75	30	10	0,13	62,3	1,7	10,0	1,8	0,17

Allerdings zeigt die geringe Fördereffizienz bei den Kombinationen B1 und D1, dass der Erdstoff nach dem Lösen in der Schnecke deutlich „umgeformt“ wird, bis ein stationärer Fördervorgang erfolgt. Dies ist, wie sich später mit dem Modell der

Spankörperförderung erklären lässt, in der geringen theoretischen Spanstärke d_s begründet. Diese reicht hier bei weitem nicht aus, um einen *Primärspan* auszubilden, der ausreichend große Abstützkräfte für den Spanvorschub mobilisieren kann. Die Förderung innerhalb der Schnecke kommt daher erst in Gang, wenn sich aus den Erdstoff-Einzelaggregaten ein Spankörper mit ausreichender Dicke, bzw. ausreichendem Querschnitt gebildet hat (vgl. Abschnitt 8.3.1).

Eine äußerst interessante Beobachtung betrifft die unterschiedliche Ausbildung von Erdstoffkörpern während der Förderung. Bei einer weiteren Variation von Schnecken- und Mantelrohdrehzahl bei gleicher Vortriebsgeschwindigkeit mit Schnecke 2 (Kombination M2) konnte nämlich tatsächlich ein durchgängiger Span als geförderter Erdstoffkörper festgestellt werden. Obwohl der Förderkörper während der Förderung auf der Wendel naturgemäß nicht eingesehen werden konnte, lässt die Beschaffenheit des ausgetretenen bzw. des auf der Schnecke verbliebenen Erdstoffes diesen Schluss eindeutig zu wie Abb. 7.8 bestätigt. Links auf der Abbildung sind die Bruchstücke des geförderten Spanbandes zu sehen, welches auf der rechten Seite auch nach dem Versuch in Teilen noch recht gut erhalten auf der Wendel zu sehen ist. Diese Beobachtung gab den entscheidenden Hinweis für die später entwickelte Modellvorstellung der Spanförderung, mit der alle in den Versuchen aufgetretenen Phänomene erklärt werden können.



Abb. 7.8: Erdstoffkörper nach dem Versuch (Versuch 109, Kombination M2, $w = 18\%$)

Das durchgängige Spanband entspricht in seiner Dicke dabei nicht der Spanstärke unter Berücksichtigung der Werkzeugverdrängung $d_s \cdot k_p = 0,57 \text{ cm}$ (Schnecke 2: $k_p = 1,73$) aus dem Lösevorgang. Mit $E_{fs} = 5,9 \text{ cm}$ (M2) ergibt sich die **tatsächliche Spanstärke** d_{sp} rechnerisch zu $d_{sp} = d_s \cdot k_p / E_{fs} = 1,16 \text{ cm}$. Dieser Wert ließ sich auch tatsächlich durch direkte Messung am Spanband in etwa bestätigen. Die zugehörigen Verläufe von Erdstoffförderung und Schneckendrehmoment sind auf Abb. 7.9 wiedergegeben.

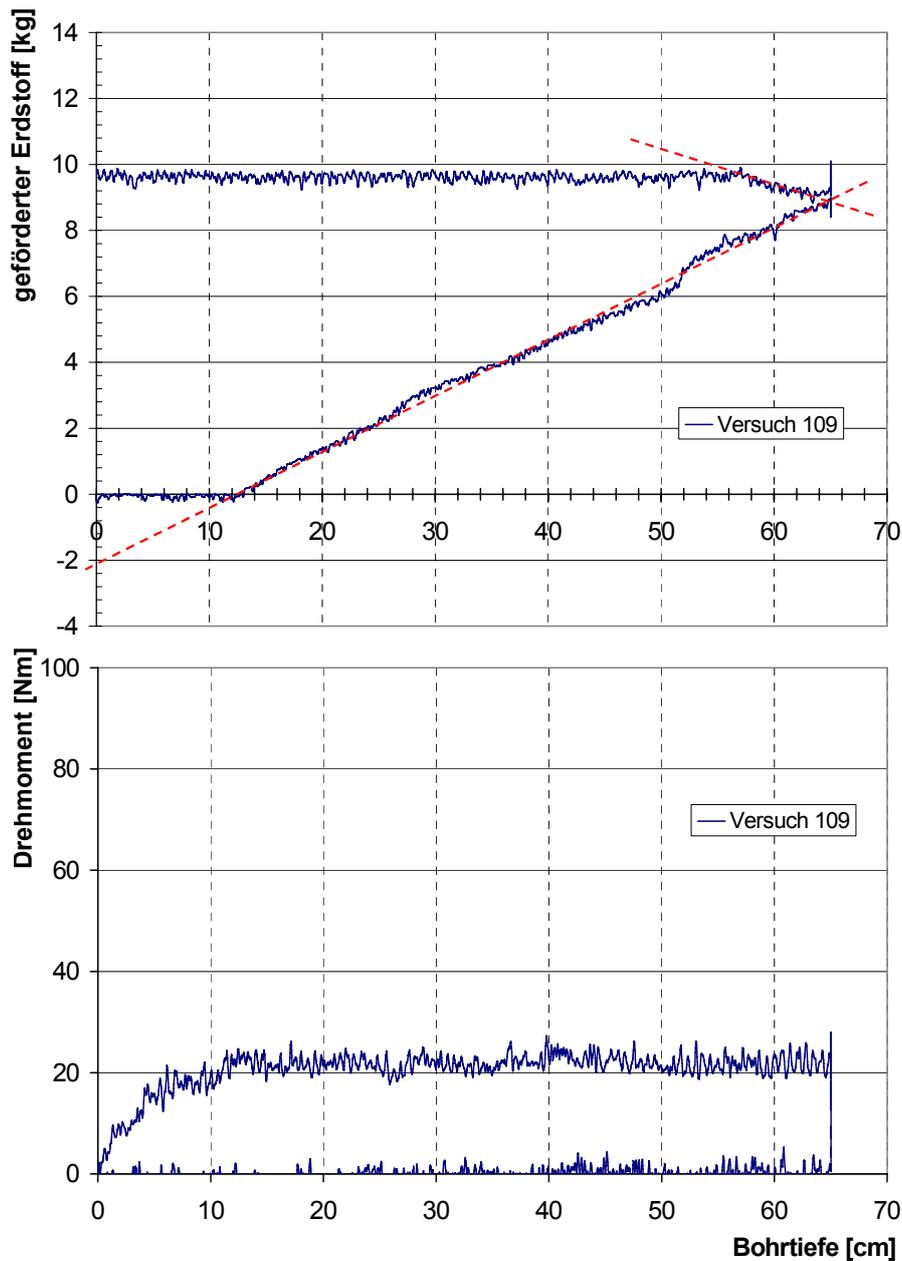


Abb. 7.9: Erdstoffförderung und Schneckendrehmoment in Abhängigkeit von der Bohrtiefe in aufbereitetem Boden (Kombination M2, $w = 18\%$)

Der Vergleich mit dem früher besprochenen Versuch 107 (Kombination C2 bei gleicher Vortriebsgeschwindigkeit und gleichem Wassergehalt) zeigt deutlich, dass das Verhältnis von Schnecken- zu Mantelrohdrehzahl für die Art der Förderung maßgeblich sein kann. Das durchgehende Spanband der Dicke $d_{sp} = 1,16 \text{ cm} \approx 2 * d_s * k_p$ in Versuch 109 bedingt eine entsprechende Verlangsamung der Relativgeschwindigkeit von Erdstoff und Wendelfläche nach dem Lösen um Faktor 2. Während der stationären Förderung sind damit die Relativgeschwindigkeiten zwischen Erdstoff und beiden Werkzeugen (Mantelrohr und Wendelaußenseite) etwa gleich groß.

Bei zu hoher Mantelrohdrehzahl kann anscheinend kein durchgängiger bandförmiger Span mehr entstehen. Die einzelnen Erdstoffaggregate bilden einen aufgelösten Span mit unregelmäßigem Querschnitt (Wandbildung) und innerer Relativbewegung der Aggregate. Diese Förderart soll als *Spankörperförderung* bezeichnet werden.

Weiterhin wurde beobachtet, dass sich mit zunehmender Schneckendrehzahl das Schneckendrehmoment tendenziell verringert. Der Vergleich diverser Versuche legt allerdings nahe, dass die Ursache dafür weniger in der Reduktion der Reibung zwischen Erdstoff und Wendel, sondern vielmehr im geringeren Füllungsgrad der Schnecke gegeben ist. Dieser wiederum ist aber direkt vom tatsächlichen Förderbeginn abhängig, der bei schnelleren Schneckendrehzahlen – wie bereits beschrieben – tatsächlich geringfügig früher einsetzt.

Um die Förderung bei möglichst vollgefülltem Schneckengang, also quasi bei einer „Blockströmung“ zu untersuchen und die zugehörigen maximalen Schneckendrehmomente messen zu können, waren auch Versuche mit extrem langsamen Schneckendrehzahlen erforderlich. Diese orientierten sich am Verhältnis von Wendelsteigung zu Vortriebsgeschwindigkeit. So wurden Versuche mit $k_{AS} = 1,0$ (Schnecke eindrehen wie einen Korkenzieher) und $k_{AS} = 2,0$ (doppelte Schneckendrehzahl) durchgeführt. Die zugehörigen Förderparameter für die Schnecken 1 und 2 finden sich in Tabelle 7.5.

Tabelle 7.5: Förderparameter bei extrem langsamer Schneckendrehzahl ($w = 25 \%$)

Kombination	n_s [U/min]	n_M [U/min]	v_v [cm/min]	d_s [cm]	k_{AS} [-]	T_{fs} [cm]	k_p [-]	T_v [cm]	T_f [cm]
I1	3,1	3,1	26	8,39	1,0	108,6	1,68	63,7	(81,0)
I2	4,5	4,5	26	5,78	1,0	103,0	1,73	61,8	(72,0)
J1	6,2	6,2	26	4,19	2,0	54,1	1,68	63,7	50,0
J2	9,0	9,0	26	2,89	2,1	51,5	1,73	61,8	45,0
K1	6,2	3,1	26	4,19	2,0	54,1	1,73	63,7	62,0

Die Mantelrohdrehzahl wurde dabei der Schneckendrehzahl angepasst. Mit Schnecke 1 wurden darüber hinaus auch Versuche mit der doppelten „Korkenzieherdrehzahl“ und halber Mantelrohdrehzahl durchgeführt (Kombination K), um den Einfluss der Mantelrohdrehnung zu untersuchen. Abb. 7.10 zeigt einen Vergleich der Versuchsverläufe mit Kombinationen I (Versuch 053) und J (Versuch 062) bei Schnecke 2.

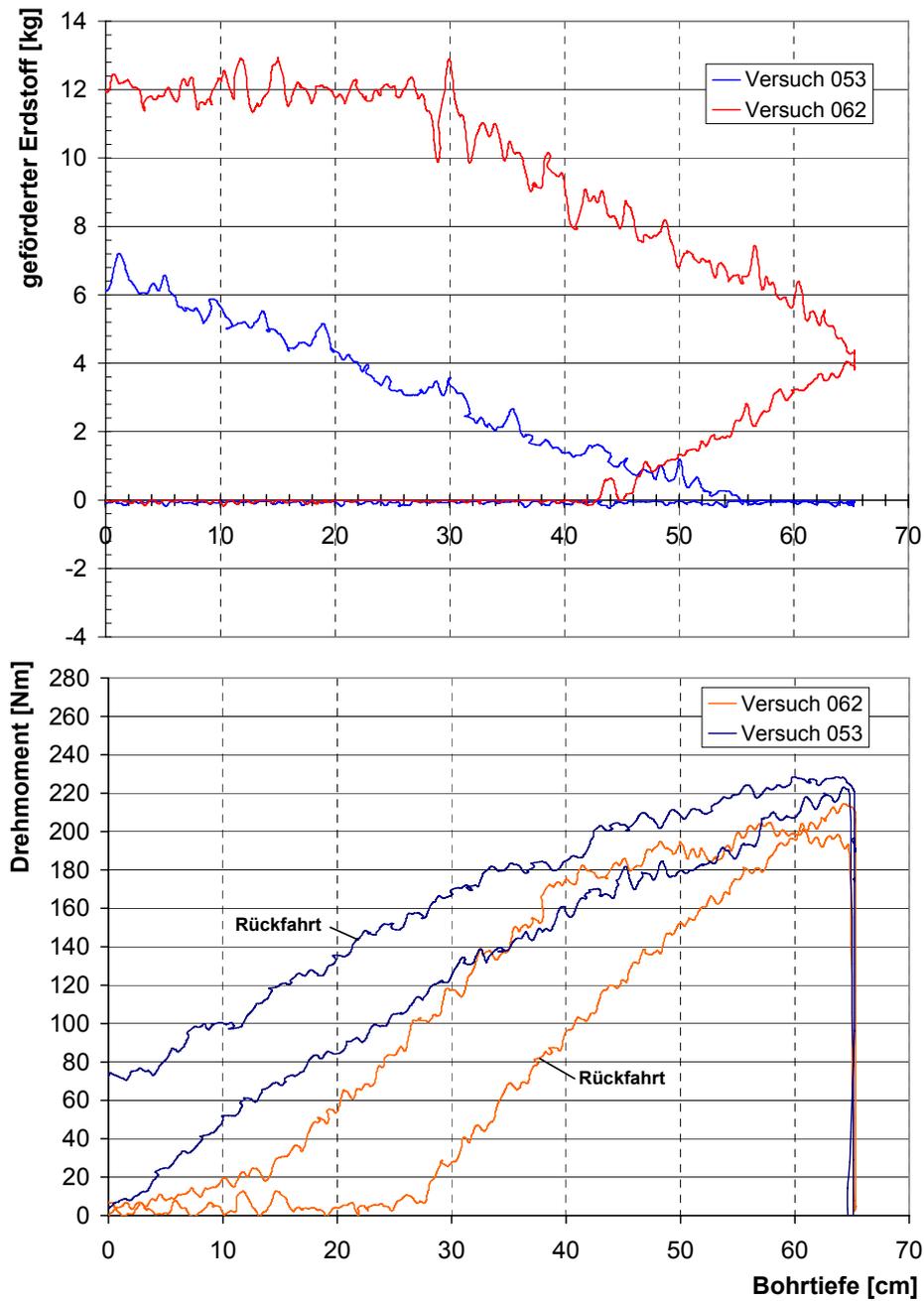


Abb. 7.10: Erdstoffförderung und Schneckendrehmoment in Abhängigkeit von der Bohrtiefe in aufbereitetem Boden (Kombinationen I2 und J2, $w = 25\%$)

In Verbindung mit den Werten aus Tabelle 7.5 wird deutlich, dass der Förderbeginn bei Kombination I mit reiner aktiver Förderung während des Abbohrens noch nicht eintreten kann. Allerdings wird beim Abbohren im Erdstoff immer auch das Eigenvolumen der Werkzeuge verdrängt. Daraus ergibt sich bei Vollfüllung des Schneckenganges eine passive Förderung, die entsprechend des Verdrängungsvolumens größer ist als die reine Bohrtiefe. Der **Passivfaktor k_P** drückt als rein geometrischer Schneckenparameter aus, wie hoch der Erdstoff bei reiner Verdrängung in den Werkzeugen im Verhältnis zur Bohrtiefe ansteigen müsste. Daraus ergibt sich der **Verdrängungsförderbeginn T_V** als quasi spätest möglicher Förderbeginn. Obwohl dieser bei allen Schnecken kleiner ist als die Bohrlochtiefe, war der tatsächliche Förderbeginn bei allen „Korkenzieherversuchen“ erst auf der Rückfahrt zu verzeichnen. Dies bedingt zum einen eine deutliche Kompression des Erdstoffes in der Schnecke und zum anderen eine aktive Förderung als Blockförderung auf der Rückfahrt, da es dabei ja keinen Erdstoffnachschieb aus dem Bohrloch mehr gibt. Diese Förderung setzte sich in allen Fällen linear bis zum Ende des Versuches fort.

Bei Kombination J ist von Beginn an eine aktive Förderung festzustellen; T_f liegt hier in allen Fällen unterhalb von T_V . Dass T_f allerdings sogar unterhalb T_{fS} liegt, bedeutet eine eindeutig auch durch die Mantelrohdrehung bedingte Erdstoffförderung! Bei den Versuchen der Kombination K (wie J, nur mit reduziertem n_M) fällt hingegen T_f mit T_V zusammen. Die Förderung entspricht somit mengenmäßig einer reinen Verdrängungsförderung. Allerdings setzt sich die Förderung auf der Rückfahrt kontinuierlich linear auch hier ohne „Erdstoffnachschieb“ fort.

Deutlich ist bei all diesen Versuchen auch das vermutete hohe Drehmoment festzustellen. Bei Kombination I wurden mit allen Schnecken Drehmomente zwischen 200 und 240 Nm gemessen. Bei Kombination J waren die Drehmomente ca. 10 % geringer (vgl. z.B. Abb. 7.10). Interessant ist in allen Fällen der Drehmomentverlauf auf der Rückfahrt. Bei Kombination I liegt das Drehmoment dabei (beim Leerfördern der Schnecke) immer oberhalb der Kurve des Abbohrens (Füllen der Schnecke). Bei Kombination J ist dies umgekehrt. Dies bedeutet, dass der Erdstoff in der Schnecke auf der Rückfahrt durch aktive Förderung aufgelockert wird.

Bei Kombination K waren die höchsten Drehmomente zu verzeichnen. Die Messgrenze der Versuchseinrichtung für das Drehmoment von 260 Nm wurden jeweils vor Erreichen der maximalen Bohrtiefe erreicht bzw. überschritten. Die Verläufe auf der Rückfahrt lagen dabei nur wenig über denen beim Abbohren.

Die bei Kombination K im Vergleich zur Kombination I bessere Förderung durch Unterstützung über eine erhöhte Schneckendrehzahl bringt also auch ein größeres Schneckendrehmoment mit sich. Eine deutliche Verminderung konnte über eine ebenfalls erhöhte Mantelrohdrehzahl erreicht werden (Kombination J). Das bedeutet, dass bei hohem Schneckenfüllungsgrad über eine Erhöhung der Mantelrohdrehzahl sowohl die Fördergeschwindigkeit erhöht, als auch das Schneckendrehmoment vermindert werden kann.

Wendelsteigung

Der Einfluss der Wendelsteigung spielte bei allen durchgeführten Versuchen eine untergeordnete Rolle. Wurden sonst alle Parameter festgehalten, ergaben sich durch die veränderte Wendelsteigung weder für die Förderwirkung noch für die auftretenden Drehmomente charakteristische Unterschiede. Es war jedoch zu erkennen, dass die Förderung bei besonders hoher Schneckendrehzahl mit größerer Wendelsteigung tendenziell etwas gleichmäßiger verlief, wobei das Schneckendrehmoment marginal geringer ausfiel. Bei extrem langsamer Schnecke war dieses Verhalten umgekehrt.

Die etwas unterschiedlichen Drehmomente lassen sich über die jeweilige Anzahl von Schneckengängen innerhalb des Förderers erklären. Bei angenommener gleicher Spandicke bzw. gleicher Berührungsfläche von Wendel und Mantelrohr im Spanquerschnitt addiert sich die Gesamtreibungsfläche bei kleinerer Wendelsteigung (mehr Schneckengänge) zu einer größeren Summe. Dies bewirkt ein höheres Drehmoment. Bei vollgefüllten Schneckengängen reduziert sich Reibfläche zwischen Erdstoff und Mantelrohr hingegen mit zunehmender Zahl an Schneckengängen. Außerdem ist der Torsionskraftbedarf zur Vertikalförderung bei gleicher Drehzahl – ähnlich wie bei einer Schraube mit flacherem Gewinde – dann auch geringer.

7.3.3 Einfluss der Konsistenz

Eine Variation der Konsistenz war in den Versuchen auf zweierlei Art möglich. Im Originalboden konnte durch die Wahl der Bohrungsstelle in der Versuchsrinne neben der Standardkonsistenz bei ca. 17 % Wassergehalt auch in trockenerem Boden von ca. 15 % Wassergehalt gebohrt werden. Generell mussten im Originalboden leichte

Schwankungen des Wassergehalts über die Tiefe in Kauf genommen werden (vgl. Anhang, Abb. A.1). Die zweite Möglichkeit war die Wiederverfüllung von Bohrungen mit neu aufbereitetem Boden, was einen recht homogenen Bodenaufbau mit beliebiger Konsistenz erlaubte. Durch die mit einer vergleichsweise langen Vorlaufzeit verbundene Entfeuchtung und Konsolidierung hat der Originalboden allerdings eine andere „festere“ Struktur, als der neu aufbereitete. Dieser Umstand sollte insbesondere für die Versuche zur Verstopfungsneigung bei trockenerem Boden und Wasserzutritt ausgenutzt werden (vgl. Abschnitt 7.4.1).

Für die Vergleiche im Standardverfahren wurden neben Wassergehalten von 20 % und 25 % auch solche nahe dem Proctorwassergehalt von 17 %, (16, 17 bzw. 18%) in aufbereitetem Boden eingestellt. Tendenziell wirkt sich ein erhöhter Wassergehalt beim Bohren in einem etwas früheren Förderbeginn und damit einer höheren Fördergeschwindigkeit aus. Bei „normalen“ Drehzahlverhältnissen (Mantelrohr langsamer als Schnecke) sind dabei auch niedrigere Schneckendrehmomente zu verzeichnen. Dieser Effekt ist nahe dem Proctorwassergehalt am deutlichsten zu erkennen (vgl. auch Abb. 7.6). Bei schnell drehendem Mantelrohr und schneller Vortriebsgeschwindigkeit (Kombination F) kann bei erhöhtem Wassergehalt im Gegensatz dazu bis zum Förderbeginn eine Steigerung des anfänglich deutlich niedrigeren Schneckendrehmomentes bis hin zum Doppelten beobachtet werden (vgl. Abb. 7.11). Es ist daher davon auszugehen, dass sich bei hohen Wassergehalten die Kontaktfläche des Erdstoffes mit dem Mantelrohr erhöht, was sich durch verbesserte plastische Eigenschaften des Erdstoffes erklären lässt. Dabei bildet sich im Schneckengang wieder eine Art durchgängiger Spankörper aus, was auch die bereits angesprochene Verbesserung der sonst schlechteren Förderung bei schnell drehendem Mantelrohr bei hohen Wassergehalten erklärt.

Ein weiterer Effekt zeigte sich in einer verbesserten Restentleerung der Bohrschnecke (also auf der Rückfahrt) bei Erhöhung des Wassergehaltes. Besonders ausgeprägt war dies bei sehr hoher Schneckendrehzahl und schneller Vortriebsgeschwindigkeit (Kombination G) zu beobachten. Die zugehörigen Versuche bei $w = 17\%$ im Originalboden und bei $w = 20\%$ in aufbereitetem Boden zeigten sowohl bei der Förderung als auch im Drehmomentverlauf nahezu gleiche Ergebnisse. Bei Schnecke 1 verblieben auf der Wendel nach Versuchsende bis 1,3 kg Erdstoff. Die Wassergehaltsveränderung von 20 auf 25 % sorgte jedoch dafür, dass die Schnecke bis auf 0,2 kg leergefördert wurde, was quasi einer vollständigen Entleerung entspricht. Auch bei Kombination G war eine

Erhöhung des Drehmomentes bei hohem Wassergehalt zu erkennen, welche allerdings deutlich geringer ausfiel als bei Kombination F.

Alle diese Effekte traten bei beiden untersuchten Schnecken 1 und 2 – also unabhängig von der Wendelsteigung – gleichermaßen auf.

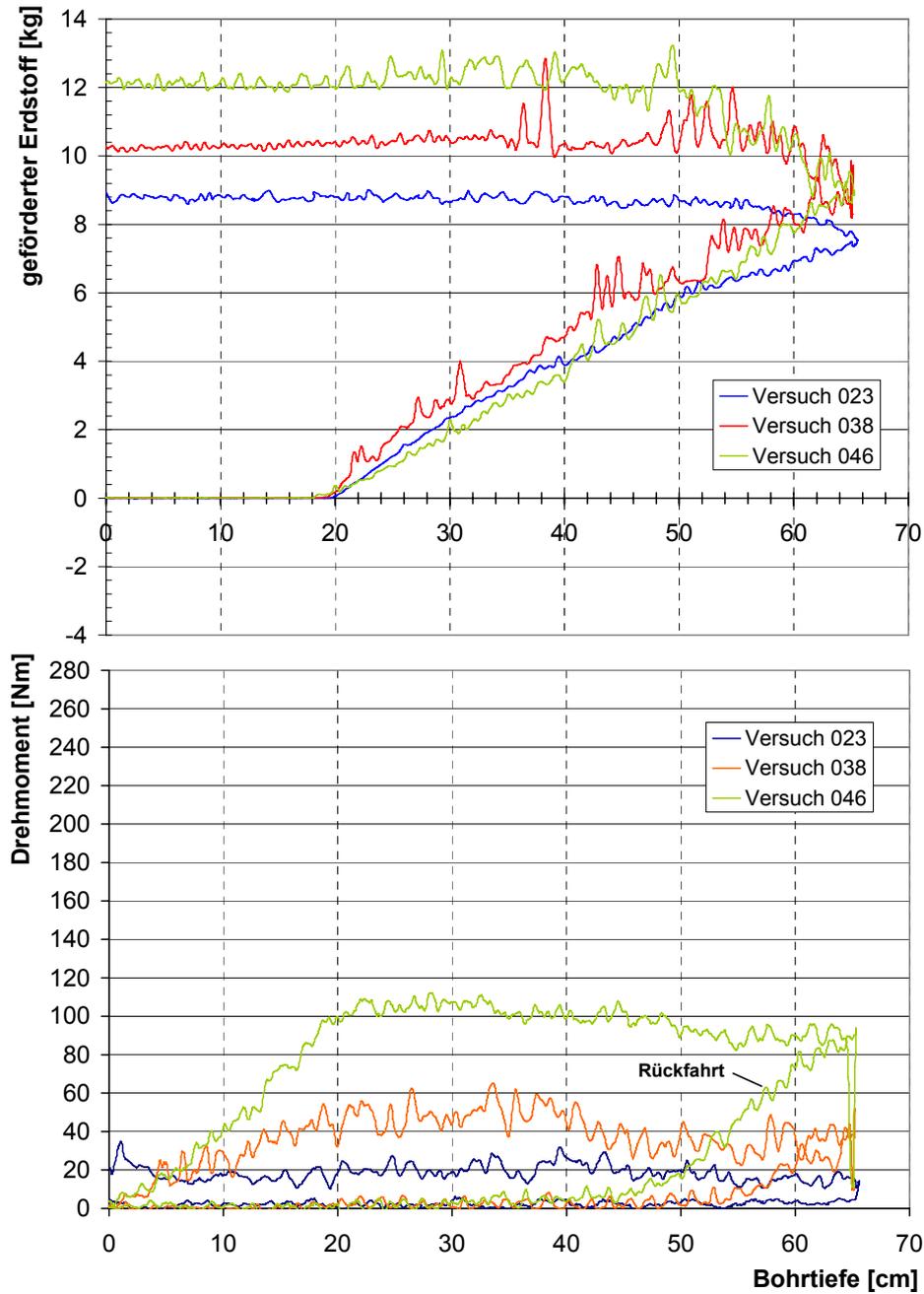


Abb. 7.11: Erdstoffförderung und Schneckendrehmoment in Abhängigkeit von der Bohrtiefe bei Kombination F mit Schnecke 1 ($w = 17\%$, 20% und 25%)

7.4 Versuche zum Förderverhalten bei Modifizierung des Verfahrens

7.4.1 Wasserzugabe und Luftspülung

Die Versuche mit Wasserzugabe wurden wegen der Beobachtung von z.T. extremen Förderproblemen bei Wasserzutritten in der Praxis durchgeführt. Es sollten möglichst Verstopfungen oder zumindest starke Drehmomentanstiege durch bestimmte Versuchsrandbedingungen erzeugt werden, um Erklärungen für den zugehörigen Mechanismus zu finden bzw. zu bestätigen. In der Praxis wird solchen Förderproblemen teilweise mit Erfolg durch „Druckluftspülung“ begegnet. In einzelnen Versuchen wurde deshalb auch die Auswirkung einer Druckluftzuführung beim Bohren auf die Erdstoffförderung untersucht. Dies geschah sowohl ohne als auch mit gleichzeitiger Wasserzugabe.

Alle diesbezüglichen Versuche wurden im Originalboden oder in aufbereitetem Boden bei Wassergehalten von 15, 16 und 17 % mit Schnecke 2 durchgeführt. Für die Zugabe von Wasser und Luft beim Bohren wurde eigens eine Doppel-Drehdurchführung konstruiert und gebaut. Die Wasserzugabe erfolgte über zwei Öffnungen an einer modifizierten Schneckenspitze und die Luftzuführung über zwei Düsen am Seelenrohr der Schnecke innerhalb der ersten Hälfte des ersten Schneckenganges.

Wie in Abschnitt 7.3.2 gezeigt werden konnte, können bei Vollfüllung des Schneckenganges die Schneckendrehmomente immens anwachsen, selbst wenn der gebohrte Boden sehr feucht ist. Dort wurde jedoch mit sehr geringen Drehzahlen gearbeitet, die diese Vollfüllung bedingten. Soll nun bei „normalen“ Betriebsparametern eine solche Füllung erreicht werden, müssen sich die Förderwirkung materialbedingt verschlechtern. Die Beobachtungen aus der Praxis (vgl. Unterkapitel 2.3) legen folgenden Mechanismus nahe:

- Vergleichsweise trockener bindiger Boden wird bei nicht allzu großer Schneckendrehzahl und damit nicht zu kleinem d_s beim Lösen in feste (flache) Einzelaggregate zerspannt,
- durch Wasserzutritt am unteren Ende des Mantelrohres werden die Oberflächen dieser Aggregate befeuchtet,
- die Erdstoffaggregate können gegenseitig kaum mehr die für eine Spankörperförderung erforderlichen Reibungskräfte mobilisieren und verschieben sich untereinander bzw. türmen sich auf,

- die vergleichsweise geringe Wasserdurchlässigkeit der bindigen Erdstoffaggregate verhindert zunächst eine plastische Verformung,
- es kommt zur Füllung des Schneckenganges bzw. zu einer Verkeilung der Aggregate im Schneckengang und damit zum Erliegen der Förderung.

Um diesen Mechanismus nachzuvollziehen, wurden diverse Versuche der Kombination F im Originalboden mit Wasserzugabe durchgeführt. Bei einem Wassergehalt von $w = 15\%$ musste ein Versuch dann auch tatsächlich abgebrochen werden, weil der Überlastungsschutz des Versuchsstandes ansprach. Die Förderung setzte mit $T_f = 56$ cm recht spät ein ($T_{fs} = 30,9$ cm, $T_v = 61,8$ cm). Überschüssiges Wasser wurde nach oben ausgepresst und sorgte zunächst für eine recht nasse Fördermasse in Form eines Blockstromes (vgl. Abb. 7.12).



Abb. 7.12: Erdstoffaustrag beim Bohren mit Wasserzugabe im Originalboden
(Versuch 098: Kombination F2, $w = 15\%$)

Nach etwa 3 kg Fördermasse kam die Förderung zum Erliegen. Der Erdstoff hatte sich so fest mit dem Mantelrohr verbacken, dass die Schnecke wie aus einem Gewinde herausgedreht werden musste. Der beschriebene Problemfall konnte somit im Versuch tatsächlich nachvollzogen werden, was auch den vermuteten Mechanismus bestätigt. Abb. 7.13 zeigt Aufnahmen nach dem Abbruch dieses Versuches und dem Ausbau der Schnecke.



Abb. 7.13: Versuchsabbruch wegen Überlastung des Versuchsstandes beim Bohren mit Wasserzugabe im Originalboden (Kombination F2, $w = 15\%$)

In Versuchen der Kombinationen M, S und T wurde ebenfalls mit Schnecke 2 noch weitere Versuche mit Wasserzugabe durchgeführt. Das Augenmerk lag hier jedoch nicht darauf einen Problemfall zu erzeugen. Es sollte vielmehr der Einfluss von zutretendem Wasser beim Bohren mit Parameterkombinationen untersucht werden, welche ohne Wasser eine sehr gute Förderung zeigten. Erstaunlicherweise war dabei kein (negativer) Einfluss auf die Förderwirkung zu erkennen.

Im Rahmen dieser Versuche wurde z.B. auch der oben als Beispiel für die Spanbandförderung vorgestellte Versuch (Versuch 109) mit Wasserzugabe nachgefahren. Auch hierbei stellte sich wieder ein vollständiges Spanband ein, welches allerdings an der Außenflanke zum Mantelrohr eine deutliche Schmierschicht aufwies (vgl. Abb. 7.14). Auch der geförderte Erdstoff im Auffangbehälter zeigte Oberflächennässe, die dort dann zur Verklumpung der Bandbruchstücke führte.

Festgestellt werden konnte außerdem, dass sich in allen so durchgeführten Versuchen das Schneckendrehmoment leicht reduzierte. Bei geeigneten Randbedingungen kann eine „Spülung“ mit Wasser beim BolSiM also tatsächlich auch Vorteile mit sich bringen.



Abb. 7.14: Erdstoffkörper nach Versuch mit Wasserzugabe
(Versuch 112, Kombination M2, $w = 18\%$)

Bei den diversen Spülbohrverfahren wird als Transportmedium außer Wasser oder sonstigen flüssigen Spülmedien auch Luft eingesetzt. In der Praxis wurde auch beim BolSiM bereits versucht Förderproblemen durch Einblasen von Druckluft zu begegnen.

Zur Untersuchung der Auswirkung von beim Bohren eingeblasener Druckluft wurden im Modellversuchsstand diverse vergleichende Versuche durchgeführt. Dazu wurde Luft sowohl als ausschließliches Spülmedium als auch in Verbindung mit Wasserzugabe eingesetzt. Die Förderwirkung konnte dabei durch das Einblasen von Druckluft in allen Fällen verbessert werden. Insbesondere die Restentleerung der Schnecke wurde in den meisten Fällen immens verbessert. Abb. 7.15 zeigt in Analogie zu Abb. 7.8 (bis auf Luftzufuhr sonst gleiche Randbedingungen) den Auffangbehälter und die Bohrschnecke nach dem Versuch. Die Luftzufuhr sorgte dafür, dass die Spanbandbruchstücke dabei oberflächlich ganz abgetrocknet sind. Darüber hinaus wurde die Schnecke nahezu restlos leergefördert.



Abb. 7.15: Erdstoffkörper und leergeförderte Schnecke nach Versuch mit Luftspülung (Versuch 110, Kombination M2, $w = 18\%$)

Um die Auswirkung von Druckluft in Verbindung mit Wasserzugabe bei schlechten Förderbedingungen zu untersuchen, wurden auch Versuche mit „schnell drehendem Mantelrohr“ (Kombination S2) durchgeführt. Bei ausschließlicher Wasserzugabe war dabei eine Förderstörung in Form einer instabilen Förderung zu verzeichnen. Im Versuch mit zusätzlicher Beaufschlagung durch Druckluft besserte sich die Förderstabilität erkennbar. Außerdem reduzierte sich unter diesen Bedingungen auch das Schneckendrehmoment deutlich.

Die gefundene positive Wirkung einer Druckluftspülung auf die Förderung beim BolSiM beruht auf zwei verschiedenen Mechanismen. Zum einen wird durch das Abtrocknen der Aggregatoberflächen die Reibung verbessert und zum anderen unterstützt der Luftdruck die Förderung direkt. In der Praxis kann ein im Lösebereich der Werkzeuge aufgebauter Luftüberdruck darüber hinaus das Grundwasser fernhalten.

7.4.2 Mantelrohr mit Vertikalleisten (MRV)

Das Mantelrohr mit Vertikalleisten (MRV) verändert die Förderbedingungen in der Art, dass durch die Füllung der Leistenzwischenräume mit Erdstoff beim Bohren, die

Reibverhältnisse zwischen Erdstoff und Mantelrohr verändert werden. Bei kompakter Füllung der Bohrschnecke findet quasi eine Scherung mit vorgegebener Scherfuge im Erdstoff statt. Gemäß der Fördertheorie in Senkrechtschneckenförderern (vgl. Unterkapitel 4.2) bzw. der hier angestellten theoretischen Vorüberlegungen, müsste diese Erhöhung der Reibung als solche die Förderung begünstigen. Es zeigt sich, dass den Reibverhältnissen zwischen Erdstoff und den Werkzeugen durchaus eine weitere, größere Rolle zukommt: es kann durch sie die Art der Förderung und damit der ganze Förderprozess verändert werden.

Mit dem MRV wurden – wohl wegen den guten Reibungsverhältnissen zwischen Erdstoff und Mantelrohr – generell sehr gute Förderergebnisse erzielt; es traten bei keinem Versuch Förderprobleme auf. Außerdem wurde bei den Versuchen mit dem MRV die Abhängigkeit der Förderart von der Bodenkonsistenz am deutlichsten. Auf Abb. 7.16 und Abb. 7.17 ist der Erdstoffaustrag während der Versuchsdurchführung zweier Bohrversuche mit dem MRV zu sehen. Beide Versuche sind mit der Parameterkombination M2 durchgeführt und unterscheiden sich lediglich im Wassergehalt des eingebauten Bodens.



Abb. 7.16: Unterschiedliche Förderarten bei Versuchen mit dem MRV Kombination M2, Versuch 081, $w = 26,5\%$ → *Blockförderung*



Abb. 7.17: Unterschiedliche Förderarten bei Versuchen mit dem MRV Kombination M2, Versuch 079, $w = 24\%$ → Rollkörperförderung

7.4.3 Beaufschlagung mit elektrischem Gleichstrom (mit MRV)

Von besonderem Interesse war die Untersuchung der Auswirkungen einer elektrischen Potentialdifferenz auf das Erdstoffförderverhalten. Als Ergebnis aus den Versuchen in der Schneidrinne sollte dabei die Schnecke als Kathode und das Mantelrohr als Anode fungieren, um die Reibungsverhältnisse günstig zu gestalten. Wegen des an den Rändern sehr geringen Abstandes der Schnecke vom Mantelrohr und der ständigen Materialbewegung bei verschiedenen Förderarten konnte der eintretende Effekt vorher allerdings kaum abgeschätzt werden. Vorversuche zur Abhängigkeit des Stromflusses bei drehender Schnecke und Mantelrohr in entionisiertem Wasser, Leitungswasser und NaCl-Lösung ergaben weitgehend lineare Zusammenhänge der Abhängigkeiten zwischen angelegter Spannung und Eintauchtiefe. Wie die Bohrversuche dann zeigten, wird während des Bohrens im Erdstoff auf der Wendel tatsächlich ein wirkungsvolles elektrisches Feld aufgebaut.

Der Effekt lässt sich gut am Beispiel dreier Versuche verdeutlichen, welche abgesehen von der Strombeaufschlagung unter sonst gleichen Randbedingungen durchgeführt wurden. Diese Versuche der Kombination M2 mit $w = 26,5\%$ wurden einmal ohne angelegte elektrische Spannung, einmal mit einer Spannung von 30 V und der

Schnecke als Kathode und einmal mit der gleichen Spannung, aber der Schnecke als Anode durchgeführt. Die zugehörigen Versuchverläufe sind auf Abb. 7.18 wiedergegeben.

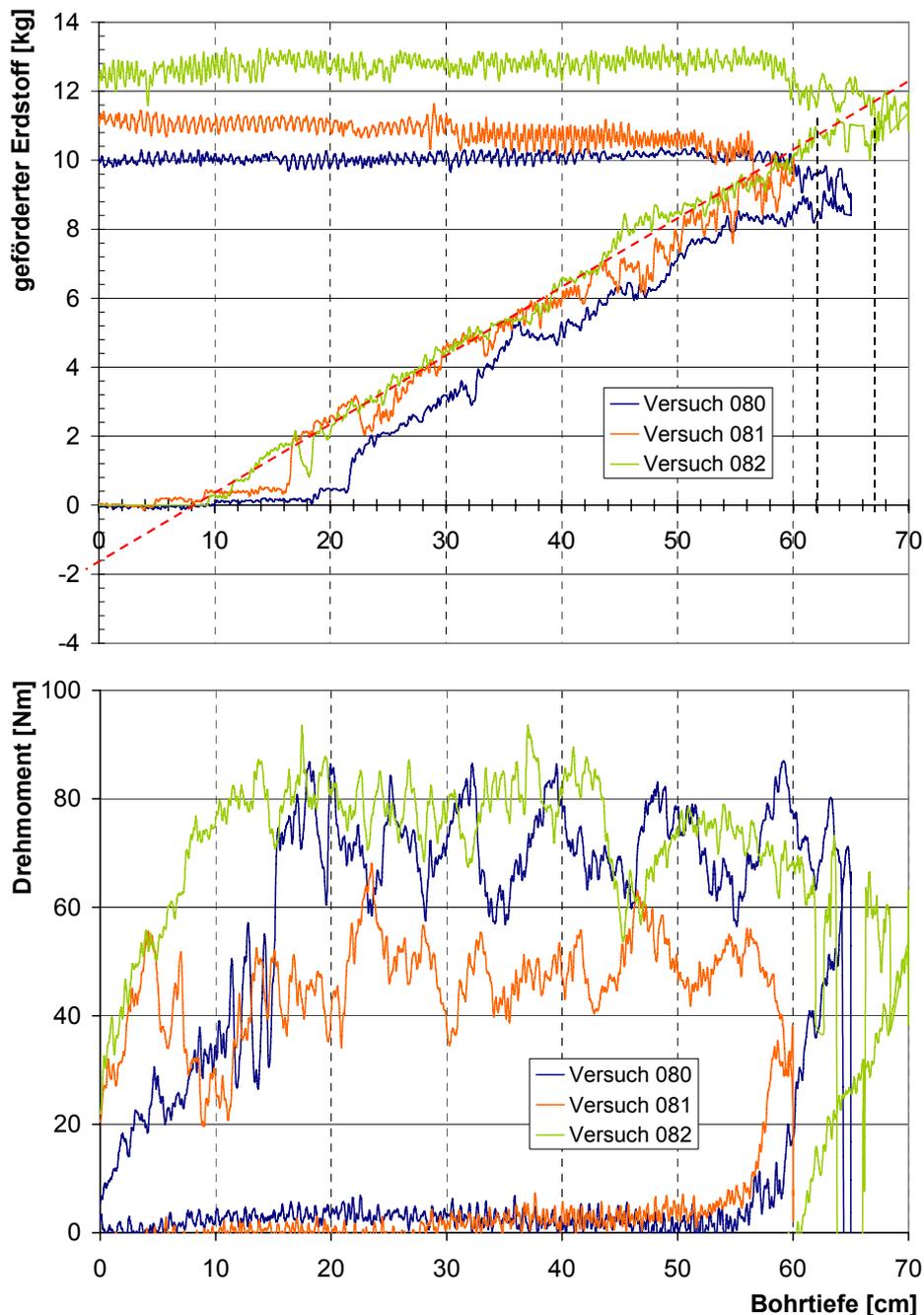


Abb. 7.18: Einfluss einer elektrischen Potentialdifferenz auf Erdstoffförderung und Schneckendrehmoment (Kombination M2, aufbereiteter Boden, $w = 26,5\%$)
 Versuch 080: 0 Volt; Versuch 081: 30 Volt; Versuch 082: 30 Volt, „verpolt“

Die Ergebnisse zeigen, dass die Förderung wie vermutet durch Anlegen einer elektrischen Spannung mit der Bohrschnecke als Kathode verbessert werden kann. Insbesondere das Schneckendrehmoment konnte so deutlich reduziert werden. Überraschend war allerdings, dass sich die Förderung auch bei umgepolt angelegter Spannung in gleichem Maße verbesserte (der in der Verlaufskurve deutlich erhöhte Gesamtaustrag an Erdstoff ist dabei jedoch im Wesentlichen auf die bei diesem Versuch größere Bohrtiefe zurückzuführen). Allerdings liegt bei dieser Variante das Drehmoment noch (wenig) über der Kurve ohne elektrische Spannung. Die gewissermaßen „elektrisch aufgeraute“ Schneckenwendel verbessert also die Förderwirkung mit nur geringer Erhöhung des Drehmomentes.

Abb. 7.19 zeigt die Schnecke nach den Versuchen 081 und 082. Deutlich sind die Anbackungen von Boden auf Wendel und Seelenrohr nach dem Versuch mit „Verpolarung“ zu erkennen. Das Schneckendrehmoment verhält sich dabei wie bereits erwähnt vergleichbar einem Versuch mit gleichen Parametern ohne angelegte Spannung, während es sich bei gleicher Spannung und „richtiger“ Orientierung um ca. 30% reduziert; gleichzeitig verändert sich die Förderart von Blockförderung hin zur Rollkörperförderung. Die infolge der Elektrokapillarität rauere Schnecke in Verbindung mit dem MRV als Mantelrohr, welches auch ohne elektrokapillare Unterstützung stark reibungsbegabt ist, bewirkt also eine Änderung der Förderart.



Abb. 7.19: Bohrschnecke nach dem Versuch mit elektrischer Gleichspannung: links, als Kathode (Regelfall), rechts als Anode („verpolt“)

Alle hier betrachteten Versuche, auch die ohne angelegte elektrische Spannung, wurden mit dem modifizierten Mantelrohr (MRV) durchgeführt. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die bei diesem Bohrverfahren normalerweise vorhandene Scher-

fläche Boden/Mantelrohr durch eine quasi innere Scherfuge Boden+Leisten/Boden ersetzt ist, können für den verwendeten Boden folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Mit dem Einsatz einer elektrischen Potentialdifferenz zwischen Mantelrohr und Schnecke durch Elektroosmose werden trotz der ständigen Bewegung des Erdstoffes deutlich messbare Veränderungen der Wassergehaltsverteilung im Fördergut erzielt.
- Mit der Bohrschnecke als Kathode kann durch die damit einhergehende elektrokinetische Wasseransammlung der Drehwiderstand der Schnecke erheblich vermindert werden. Die Förderrate bleibt dabei nahezu unverändert.
- Die Reduktion der Scherkräfte zwischen Schnecke (als Kathode) und gefördertem Boden in Verbindung mit der erhöhten inneren Reibung in der Scherfuge zwischen Wendel und Mantelrohr (Kohäsion aus elektrokinetisch bedingter Kapillarwirkung) führt zu einer Erhöhung der Fördergeschwindigkeit, d.h. der Füllungsgrad der Wendel verringert sich, was sich zusätzlich günstig auf das Schneckendrehmoment auswirkt.
- Die Umkehrung der elektrischen Potentialdifferenz (Schnecke als Anode) führt zu elektrokapillarbedingten Anbackungen an der gesamten Schnecke. Hierdurch wird die Schnecke „rauer“. Dies führt im Zusammenhang mit der „Entwässerung“ des Förderguts an der Schnecke u.U. zur Änderung der Förderart in Richtung Rollkörperförderung. Die Förderwirkung wird dabei je nach Bodenkonsistenz sogar verbessert.
- Das Schneckendrehmoment erhöht sich im Falle der Umkehrung der elektrischen Potentialdifferenz (Schnecke als Anode) nur unwesentlich im Vergleich zum Versuch ohne elektrisches Feld.
- Sowohl mit Schnecke als Kathode als auch als Anode erhöht sich die Gesamtfördermenge im Vergleich zum Versuch ohne elektrische Potentialdifferenz.

7.5 Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

An dieser Stelle soll in Form einer Aufzählung ein kurzer Überblick über Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Randbedingungen, Maschinenparametern und Fördereigenschaften gegeben werden, wie sie aus den durchgeführten Modellversuchen abgeleitet werden konnten. Eine auf den Versuchsergebnissen basierende Tabelle mit Hinweisen auf günstige Parameterkombinationen für verschiedene Bodenverhältnisse findet sich im Anhang. Es ist jeweils zu berücksichtigen, dass es sich bei den durchgeführten Versuchen nicht um durchgängige Parameterstudien handelt und dass exemplarisch auch nur ein Boden untersucht werden konnte.

Es sei hier nochmals darauf hingewiesen, dass im Rahmen dieser Arbeit unter „Boden“ der anstehende bzw. zu bohrende Boden verstanden wird, während – wegen der strukturellen Umformung des Bodens beim Lösen – das Fördergut innerhalb des Förderers als *Erdstoff* bezeichnet wird. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird bei dieser Auflistung auf Querverweise verzichtet.

Folgende Beobachtungen konnten gemacht bzw. Schlüsse konnten gezogen werden:

- Eine Erklärung der Förderung beim BolSiM ist mit den bekannten Grundlagen aus der Senkrechtschneckenförderung nicht möglich.
- Im Regelfall ist für die Förderung beim BolSiM eine Abstützung der Erdstoffaggregate untereinander erforderlich; es findet eine Art *Spanförderung* statt.
- Es treten vier unterschiedliche Förderarten auf.
- Hohe Verhältnisse $n_M : n_S$ können die Förderung nachteilig beeinflussen („schnell drehendes Mantelrohr“); dieser Effekt tritt jedoch beim Bohren von Böden mit hohen Wassergehalten nicht mehr auf.
- Um Förderproblemen zu begegnen erweist sich – nahezu unabhängig von Konsistenz, Vortriebsgeschwindigkeit und Wendelsteigung – ein Verhältnis von $n_S : n_M \approx 2$ als vorteilhaft.
- Ideal für die Förderung scheint eine gleiche Relativgeschwindigkeit zwischen Erdstoff und beiden Werkzeugen zu sein.
- Bei Blockförderung kann die Förderung durch eine höhere Mantelrohdrehzahl verbessert bzw. beschleunigt werden; das Drehmoment wird dabei erheblich reduziert.

- Im Konsistenzbereich um w_{opt} und darunter verringern sich die Schnecken-drehmomente mit zunehmendem Wassergehalt bei sonst gleichen Randbedingungen.
- Oberhalb eines gewissen spezifischen Wassergehaltes steigen die Schnecken-drehmomente bei sonst gleichen Randbedingungen teilweise erheblich an, auch wenn die Förderwirkung erhalten bleibt.
- Über eine Wasserzugabe an der Bohrspitze konnte beim Bohren im Boden mit geringem Wassergehalt bei ungünstiger Parameterkombination eine Verstopfung der Werkzeuge erzeugt werden.
- Eine Wasserzugabe an der Bohrspitze ist bei Parameterkombinationen mit sonst guter Förderung (in „normalem“ Drehzahlbereich und mit einem Drehzahlverhältnis $n_S : n_M \approx 2$) unproblematisch; teilweise kann dadurch ohne Beeinträchtigung der Förderwirkung sogar das Schneckendrehmoment reduziert werden.
- Hohen Drehmomenten bei Wasserzutritt kann durch Einblasen von Druckluft begegnet werden; dadurch verbessert sich auch eine ggf. instabile Förderung.
- Das Einblasen von Druckluft unterstützt die Förderung in allen Fällen; insbesondere die Restentleerung der Bohrschnecke wird deutlich verbessert.
- Ohne Wasserzutritt erhöht sich das Drehmoment durch das Einblasen von Druckluft in geringem Maße.
- Durch die Einwirkung einer elektrischen Gleichspannung kann die Förderung innerhalb der Werkzeuge über elektrokapillare Effekte beeinflusst werden.
- Über elektrokapillare Effekte lässt sich die Reibung zwischen Schnecke und Erdstoff in beide Richtungen verändern.
- Das Aufrauen der Schneckenwendel kann ebenso wie das Aufrauen der Mantelrohroberfläche die Förderung begünstigen bzw. in Problemfällen verbessern.
- Durch das Aufrauen der Schneckenwendel kann die Förderart beeinflusst werden.
- Bei entsprechend rauen Werkzeugen kann es zu einer Rollkörperförderung kommen.
- Geringe Unterschiede in der Konsistenz können bei rauen Werkzeugen eine Änderung der Förderart bewirken.

Kapitel 8

Modellbetrachtung zum Förderverhalten

8.1 Allgemeines

Die in Kapitel 7 beschriebenen Förderarten unterscheiden sich ganz wesentlich durch den der jeweiligen Förderung zugrundeliegenden mechanischen Bewegungsprozess im Erdstoff. Dieser wird den vorliegenden Versuchsergebnissen zufolge bei ein und demselben Boden und den hier vorgegebenen Versuchsbedingungen durch die Parameter Schneckendrehzahl und Eindringgeschwindigkeit sowie durch die Konsistenz des Bodens festgelegt. Interessant ist dabei die Änderung dieser Bewegungsprozesse – bei festgehaltenen mechanischen Verfahrensparametern – alleine durch die Veränderung der Konsistenz. Eine Änderung der Förderart kann sich hier durch sehr geringe Wassergehaltsunterschiede ergeben, so dass durchaus von einem Grenzübergang bzgl. der Förderart gesprochen werden kann.

Ein weiterer in diesem Zusammenhang wichtiger Parameter, der allerdings bei den vorgestellten Untersuchungen nicht gezielt variiert werden konnte, ist die Rauigkeit der Werkzeuge. Erst im Verlauf der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass diese Rauigkeit über den einfachen Aspekt der damit verbundenen Änderung der Gleitreibung zwischen Erdstoff und Werkzeug hinaus, für die Förderung von großer Bedeutung ist. Die Rauigkeit kann nämlich auch die Förderart beeinflussen. Festgestellt werden konnte dieser Zusammenhang durch die Verwendung des MRV, insbesondere aber durch den Einsatz elektrischer Potentialdifferenzen zwischen den Werkzeugen beim Bohren (vgl. Abschnitt 7.4.3). Die damit erzeugte Wasserbewegung im Erdstoff kann z.B. durch Wasserentzug in der Grenzfläche zwischen Werkzeug und Erdstoff eine Erhöhung der Reibung bewirken. Die durch solchen Wasserentzug an den Metalloberflächen auch beobachteten „Erdstoff-Anbackungen“ bewirken gar eine echte strukturelle Erhöhung der Rauigkeit dieser Oberflächen, welche durchaus mit einer mechanisch-technisch erreichten Erhöhung der Rauigkeit vergleichbar ist.

8.2 Beobachtungen zur Förderung

Die Förderung beim BolSiM ist mit den bekannten Fördermodellen nicht zu beschreiben. Für die Förderung nach der Einzel- bzw. Mehrkörperkörpertheorie aus der Fördertechnik, welche auf Reibungskräften am Mantelrohr durch Zentrifugalkräfte aufbaut, sind die Schneckendrehgeschwindigkeiten viel zu gering.

Für die Verdrängungsförderung nach MECHIAS 1975 sind die Randbedingungen der Materialaufgabe nicht gegeben. Eine reine Verdrängungsförderung ist dennoch möglich, weil das Fördergut beim BolSiM – mit zunehmendem Vortrieb – letztlich zwangsweise in den Förderer gelangt. Allerdings ist dies beim BolSiM bei den betrachteten Bodenkonsistenzen dann mit Drehmomenten verknüpft, welche das Verfahren zum Erliegen bringen. Bei breiiger bis flüssiger Bodenkonsistenz ist solch eine Förderung jedoch möglich. Bei entsprechenden Versuchen mit der Modellbohranlage wäre dann allerdings kein *Förderbeginn* zu verzeichnen, weil der gesamte Boden einer 65 cm tiefen Bohrung in den Förderer passt, ohne oben auszutreten. Selbst bei Versuchen, die darauf angelegt waren den Boden möglichst nur zu verdrängen (durch Wahl sehr langsamer Schneckendrehzahl, quasi als „Korkenzieher“) fand eine über die reine Verdrängung hinausgehende Förderung statt.

Der sowohl in der Praxis als auch in den hier durchgeführten Modellversuchen sehr frühe *Förderbeginn* erfordert eine andere Modellvorstellung. Der Schlüssel zu diesem neuen Fördermodell ergibt sich aus der beobachteten Tatsache, dass der Förderbeginn oft sehr nahe am frühest überhaupt möglichen Förderbeginn T_{fS} (ohne Mantelrohrwirkung) liegt. Das bedeutet, dass sich der Erdstoff im Förderer nur marginal mit der Schnecke mitdreht! Der Erdstoff bleibt nach dem Lösen also nahezu an seiner „horizontalen Position“ und bewegt sich nahezu senkrecht mit der Wendel nach oben. In einigen Versuchen konnte dieses Verhalten dann auch insofern „direkt“ beobachtet werden, als der Erdstoff als durchgängiges „Band“ am oberen Ende des Förderers austrat (vgl. Abb. 7.8).

Bei Böden mit weicher Konsistenz ($w = 20\%$ und 25%) konnte sogar beobachtet werden, dass der tatsächliche Förderbeginn T_f kurz vor T_{fS} ($T_f < T_{fS}$) lag. Das bedeutet wiederum, dass die Mantelrohdrehung ein Mitdrehen des Erdstoffes mit der Schnecke ganz verhindert und den Erdstoff quasi auf der Schneckenwendel nach oben (t)reibt.

8.3 Fördermodell

8.3.1 Standardförderung

Eine Antwort auf die Frage nach dem eigentlichen Förderantrieb kann aus dem beschriebenen beobachteten „Band“ (z.B. Versuch 109) entwickelt werden. Betrachtet man die Füllung der Schnecke nach dem Versuch, dann erschließt sich die Art der Förderung als eigentlicher *Bohrspan*. Das bedeutet, dass sich der Erdstoff nach dem Lösevorgang als durchgängiger Span erhält. Dieser Span wird zwar durch die Schneckendrehung in Verbindung mit der Wandreibung der Wendel während der Förderung verformt, aber er erhält sich bei entsprechenden Bedingungen als durchgängiger Span. Jedes Erdstoffteilchen stützt sich also innerhalb des Spans am Nachfolgenden gegen die Reibkraft der Schneckenwendel ab. Dabei kann sich der Gesamtkörper (Span) infolge der entstehenden Druckkräfte durch Mitdrehen mit der Schnecke verkürzen und dabei „dicker“ werden. Definiert man nun den Quotienten aus *Spanquerschnittsfläche* A_{Sp} und *Wendelbreite* b_W als *Spandicke* d_{Sp} so ergibt sich die Verdickung im Vergleich zur theoretischen Schneidspanstärke unter Berücksichtigung der Erdstoffverdrängung (über den Faktor k_P) z.B. aus dem Verhältnis zwischen T_f und T_{fS} . Bei $T_f = T_{fS}$ wäre demnach $d_{Sp} = d_S \cdot k_P$. Abb. 8.1 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Spandicke und Spangeschwindigkeit. Die Spandicke erhöht sich im gleichen Verhältnis, in dem sich die Spangeschwindigkeit im Vergleich zur Schneidengeschwindigkeit (Schneckengeschwindigkeit) vermindert.

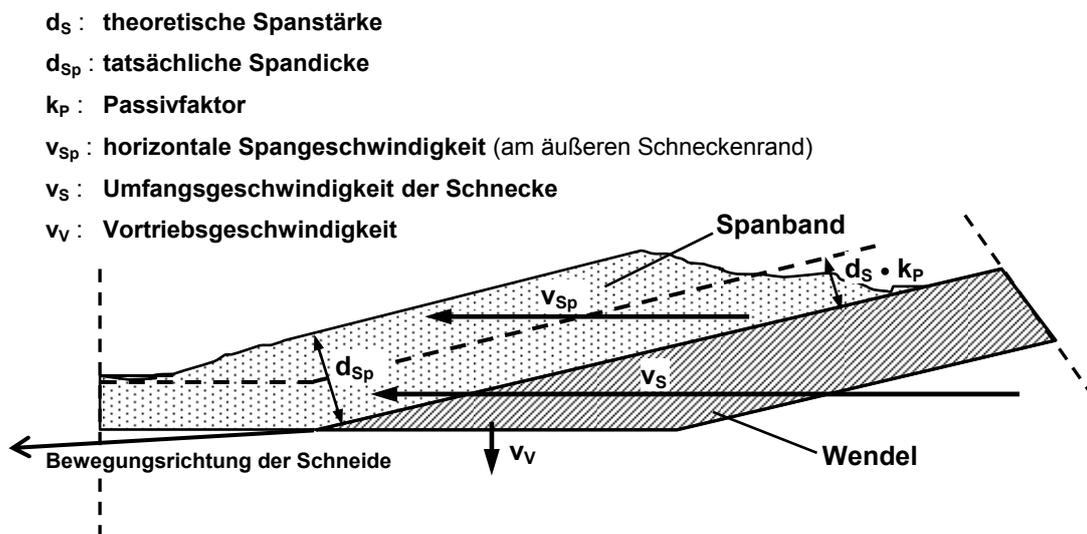


Abb. 8.1: Spandicke und -geschwindigkeit bei der Spanförderung (Spanbandförderung)

Der weiter oben beschriebene Fall mit $T_f < T_{fS}$ bedeutet dann, dass der Span infolge von Zugspannungen, die aus der Mantelrohrdrehung und -reibung herrühren müssen, quasi „zerreißt“ und die Einzelteile ohne Stützung durch nachfolgende Teile gefördert werden. Dies lässt sich nur über eine erhöhte Reibung am Mantelrohr im Vergleich zur Schnecke (z.B. über Adhäsionskräfte) erklären.

Aus der Überlegung des *Förderspans* heraus wird auch eine Erklärung der Förderung des gebohrten Bodens als „körnig zerspanter“ Erdstoff möglich. Obwohl in der Struktur aufgelöst, bildet sich quasi ein Span aus einzelnen Erdstoffaggregaten. Die Förderung ist dabei aber nicht an die der Einzelkörpertheorie angelehnt, sondern es handelt sich eben um ein Gebilde, was sich wie ein durchgehender Span nach unten abstützt. Wichtig ist dafür allerdings, dass die einzelnen Erdstoffaggregate untereinander ausreichend große Reibkräfte übertragen können, um insgesamt einen solchen *Spankörper* bilden zu können. Die nach dem Lösen auftretende Umstrukturierung bietet in Verbindung mit den besonderen Eigenschaften des Erdstoffes und der Eigendrehung des Mantelrohres günstige Förderverhältnisse. Je höher die Schneckendrehzahl desto geringer ist allerdings die theoretische Spanstärke d_s . Die Erdstoffaggregate müssen sich also nach dem Lösevorgang erst kontinuierlich zu einem Spankörper zusammenschieben. Sobald die Spankörperdicke bzw. der Spankörperquerschnitt ausreicht, beginnt eine stationäre Förderung mit konstanter Spanstärke. Neben der abstützenden Wirkung ist hier im Vergleich zum durchgehenden Span „Wandbildung“ möglich und damit eine im Vergleich zur hemmenden Wendelfläche größere treibende Wandfläche. Um den Spanquerschnitt bzw. das Spankörpervolumen zu erhalten, muss sich der Spankörper während des gesamten Fördervorganges kontinuierlich in Schneckenrichtung drehen. Die Relativbewegung zwischen Erdstoff und Wendel wird dadurch im Verhältnis $d_s : d_{sp}$ verringert.

Im Vergleich zu herkömmlichen Schüttstoffen bewirken die plastischen Eigenschaften des Erdstoffes in Verbindung mit Kohäsion und Adhäsion Reibverhältnisse an der Rohrrinnenwand, welche einigermaßen normalkraftunabhängig sind und daher auch keine hohen Zentrifugalkräfte erfordern. Die Förderung von rolligem Material war hier nicht Gegenstand der Untersuchung weshalb hiezu keine genaueren Aussagen über die Förderung (Förderbeginn, Eigendrehung des Materials...) getroffen werden können. Die in der Praxis beobachtete „gute“ und schnelle Förderung von rolligem Erdstoff legt aber nahe, dass es sich auch hier um eine Spankörperförderung handeln muss, wobei die inneren Kräfte im Spankörper durch kapillare Kräfte und aus Roll-Reib-Bewegungen der Einzelkörner gebildet werden könnten. Eine entscheidende Rolle

dürfte dabei auch die Kornverteilung spielen. Eine etwaige Förderung trockener, runder gleichförmiger Einzelkörper ließe sich mit dem vorgestellten Modell nicht erklären.

Insgesamt kann man also sagen, dass es sich bei der in den Modellversuchen beobachteten Förderung beim BolSiM um eine Förderung handelt, die im Wesentlichen auf der Stützwirkung des jeweils nachfolgenden Erdstoffteilchens basiert. Durch die unterstützenden Reibkräfte aus der Eigendrehung des Mantelrohres sind dabei nur kleine Abstützkräfte nach unten erforderlich. Bei besonderen Bedingungen ist sogar in geringem Maße eine Förderung ohne Abstützkraft möglich.

Die Förderung beim BolSiM soll daher insgesamt in den meisten Fällen als *Spanförderung* bezeichnet werden. Der meist beobachtete Fall des aufgelösten Spanes soll dabei als *Spankörperförderung* definiert werden. Bei durchgängigem Span (Sonderfall) soll von *Spanbandförderung* gesprochen werden.

8.3.2 Rollkörperförderung

Bei den Versuchen mit dem MRV (Schnecke 2) konnte ein besonderer Fall der Förderung beobachtet werden. Bei entsprechender Konsistenz ($w = 24,5 \%$) und Parameterkombination M ($n_S = 30 \text{ U/min}$, $n_M = 15 \text{ U/min}$, $v_V = 10 \text{ U/min}$) traten bei Förderbeginn fast kugelförmige Erdstoffkörper aus. Der zugehörige Förderprozess lässt sich wie folgt erklären:

Bei einer theoretischen Spanstärke von $d_S = 0,33 \text{ cm}$ und der sehr weichen Konsistenz, formt sich der Erdstoff nach dem Lösen zu Klumpen, weil sich ein durchgängiger Span dieser Dimension und Konsistenz nicht halten kann. Nun besteht die Möglichkeit, dass sich diese Klumpen zu einem Block zusammenschieben und in Blockströmung gefördert werden, oder dass sie als Einzelklumpen in eine Roll- bzw. Wälzbewegung kommen und als Spankörper gefördert werden. Bei entsprechenden Reibverhältnissen und idealer Drehzahlkombination kann diese Roll- und Wälzbewegung in eine reine Rollbewegung übergehen, so dass die Erdstoffklumpen sich zwischen Schnecken-seelenrohr und Mantelrohr wie Kugeln in einem Kugellager bewegen. Da der Seelenrohrdurchmesser D_W bei Schnecke 2 genau die Hälfte des Außendurchmessers D (entspricht dem Innendurchmesser des Mantelrohrs) beträgt, würde sich bei dem hier gegebenen Verhältnis $n_S = 2 * n_M$ eine solche Kugel in der horizontalen Ebene auf der Stelle drehen. Durch die Wendelsteigung könnten alle Erdstoffkugeln, die sich bilden,

als „aufgelöster Span“ aus einzelnen Rollkörpern gefördert werden. Bei ausreichend guten Reibbedingungen tritt genau dieser Fall ein! Entscheidend scheint dabei für die Kugelbildung die große Reibkraft am Mantel des MRV zu sein. Es konnte gezeigt werden, dass auch die Reibung an den Schneckenoberflächen ausreichend groß sein muss, um die Wälz- und schließlich die Rollbewegung zu initiieren. Durch Beaufschlagung mit Gleichstrom (Schnecke als Kathode) konnte beispielsweise eine Rollkörperförderung (bei $w = 24,5 \%$) in eine Blockkörperförderung „umgewandelt“ werden. Ebenso war es möglich durch „rauer machen“ der Schnecke (über eine Umpolung des elektrischen Feldes mit Mantelrohr als Kathode) bei $w = 26 \%$ statt einer nahezu vollständige Blockförderung, eine Förderung aus sich wälzenden „Einzelklumpen“ einzustellen.

Interessant ist dabei, dass sich die Erdstoffkörperform (Block, Klumpen oder Rollkörper) sowohl durch die Konsistenz als auch durch Veränderung der Reibverhältnisse beeinflussen lässt.

8.3.3 Förderproblem bei Wasserzutritt

Vor dem Hintergrund der beschriebenen Fördermechanismen lässt sich auch das Problem der Förderung bei kompakten bindigen Böden unter Wasserzutritt erklären.

Beim Lösen von vergleichsweise trockenem festen bindigem Boden bilden sich einzelne feste Bodenchips, welche sich durch Reibung untereinander und durch rollende Bewegungen zu einem Spankörper mit Stütz- und Förderwirkung ausbilden. Bei äußerem Wasserzutritt wird die Oberfläche der Chips „schmierig“, aber wegen der geringen Wasserdurchlässigkeit durchfeuchten die Chips nur langsam und behalten ihre innere Druckfestigkeit. Die Chips können sich wegen der geringen gegenseitigen Reibung nun nicht mehr untereinander als Spankörper stützen und verschieben sich ineinander. Es bildet sich also kein Spankörper, sondern es füllt sich der Schnecken-gang. Unterstützt wird dieser Prozess noch durch ggf. auftretende erhöhte Adhäsionskräfte zwischen den feuchten Chips und der Wendeloberfläche. Bei fortwährender Füllung des Wendelganges verkeilen und verspannen sich die in sich noch druckfesten Chips zu einem festen Erdstoffkörper, der eine Förderung mit den bereitgestellten Maschinenkräften nicht mehr erlaubt.

Auch im Modellversuch konnte dieser Effekt beim Bohren in ausgetrocknetem Originalboden ($w = 15\%$) bei simuliertem Wasserzutritt über die Schneckenspitze erzielt werden. Die Schnecke musste letztlich von Hand ausgebaut werden.

Eine mögliche Lösung für dieses Problem bietet sich durch Einblasen von Luft an der Schneckenspitze. Der Luftüberdruck kann einerseits den Wasserzutritt verhindern oder wenigstens vermindern und der Luftstrom sorgt andererseits für eine Trocknung der Chipsoberflächen und damit für ausreichende Reibungsbeibehaltung der Chips untereinander. Darüber hinaus kann das nach oben entweichende Luftvolumen die Förderung noch direkt unterstützen.

Eine andere Möglichkeit bietet sich in einer erzwungenen bzw. begünstigten Rollbewegung der Chips durch Aufrauen der Schneckenoberfläche. Werden die Erdstoffchips nach dem Lösen in rollende Bewegung gebracht, so wird das Zusammenschieben und Verkeilen behindert; vorher setzt die Spankörperförderung ein. So lässt sich erklären, dass Praxisversuche mit aufgerauter Schnecke im beschriebenen Problemfall die Förderung verbessern. Entscheidend ist dabei eine rollende bzw. wälzende Bewegung des Fördergutes.

Bei den durchgeführten Modellversuchen konnte dieser Rolleffekt bei quasi aufgerauter Schneckenwendel an den Versuchen mit MRV unter elektrischem Potential gezeigt werden.

8.4 Förderarten

Aus den durchgeführten Versuchen und den dargestellten Modellüberlegungen ergeben sich vier verschiedene grundsätzliche Förderarten, die an dieser Stelle nochmals zusammen aufgeführt werden sollen.

Spanbandförderung

Beim Lösen des Bodens entsteht direkt ein zusammenhängender Bohrspan, welcher sich wegen Schneckendrehung und Wendelreibung durch langsames Mitdrehen mit der Schnecke weiter verdickt. Wenn ein ausreichend großer innerer Widerstand aufgebaut ist um einer weiteren Verformung (Verdickung) entgegenzuwirken, beginnt die Förder-

ung und der Span wird tatsächlich als durchgängiges *Spanband* bis zum Materialaustrag am oberen Mantelrohrende gefördert.

Bei den Versuchen in denen Spanbandförderung auftrat, erreichte die tatsächliche Spanstärke $d_{SP} \approx 2 * d_s$. Die Spandrehgeschwindigkeit lag somit etwa bei $n_S / 2$. Bei der zugrunde liegenden Parameterkombination M mit dem Verhältnis $n_S / n_M = 2$ bedeutet dies, dass die Relativgeschwindigkeit zwischen Erdstoff und Mantelrohr derjenigen zwischen Erdstoff und äußerem Wendelrand entspricht. Mit anderen Kombinationen konnte bisher keine Spanbandförderung erreicht werden. Es ist also durchaus möglich, dass ein solches ausgewogenes Geschwindigkeitsverhältnis eine Voraussetzung darstellt. Eine zu große Mantelrohdrehzahl könnte zum Zerreißen des Spanes führen, während eine Minimaldrehzahl erforderlich sein dürfte, um den kompakten Span zu erhalten.

Spankörperförderung

Kommt wegen ungeeigneter Randbedingungen kein durchgängiger kompakter Span zustande, so bildet sich aus den einzelnen Erdstoffaggregaten entweder ein aufgelöster Spankörper (Regelfall) oder aber es kommt zur Blockförderung (s.u.). Anhand der gemachten Beobachtungen (vgl. z.B. Abb. 7.7) kann vermutet werden, dass sich ein solcher aufgelöster Spankörper über seinen Querschnitt in verschiedene Zonen einteilen lässt. An der Innenwandung des Mantelrohres bildet sich meist eine Erhöhung im Querschnitt, welche durch die Stützwirkung des Mantelrohres (Reib- und Adhäsionskräfte) einen vergleichsweise guten inneren Verbund erreicht und damit eine gute Förderung erfährt. Nach innen, in Richtung Seelenrohr, finden sich vermehrt krümelige Einzelaggregate, welche über Stütz- und Reibkräfte benachbarter Aggregate mitgefördert werden. Es ist dabei durchaus möglich, dass solche Einzelaggregate immer wieder in Richtung des Seelenrohr bewegt werden und sich dort – mangels ausreichender Stützung – auch wieder nach unten bewegen. Die Förderung findet also wahrscheinlich im Wesentlichen in der Randzone nahe des Mantelrohres statt.

Rollkörperförderung

Die Rollkörperförderung stellte eine Sonderform der Spankörperförderung dar (vgl. Abschnitt 8.3.2). Bei geeigneter Parameterwahl bilden sich unter besonderen geometrischen Randbedingungen aus den gelösten Erdstoffaggregaten einzelne kugelförmige Erdstoffkörper. Der Durchmesser dieser Rollkörper entspricht dabei der

Wendelbreite b_w . Diese Rollkörper bewegen sich innerhalb des Schneckenganges als aufgelöster Spankörper mit nur geringer erforderlicher gegenseitiger Stützung wie in einem Kugellager nach oben.

Blockförderung

Die Blockförderung ist gewissermaßen eine Sonderform der Spanbandförderung. Sie tritt auf, wenn die aktive Förderung aufgrund der Randbedingungen zu schwach ausgeprägt ist und damit die passive Förderung (Verdrängung) eine größere Rolle spielt. Dies ist insbesondere bei sehr geringen Schneckendrehzahlen und damit vergleichsweise großem d_s der Fall. In der Regel handelt es sich dabei aber nicht um eine (passive) *Blockströmung*. Das zeigt sich daran, dass auch nach Erreichen des Bohrlochtiefsten, also auf der Rückfahrt mit unveränderten Werkzeugdrehzahlen, die Förderung nicht zum Erliegen kommt. Bei Blockförderung treten mitunter sehr große Drehmomente auf, wenn der Schneckengang einen hohen Füllungsgrad erreicht und die Wandreibung infolge der Erdstoffkonsistenz vergleichsweise groß ist.

Ein Sonderfall der Blockförderung ist die Blockkörperförderung. Der ansonsten durchgängige Blockkörper reißt dabei immer wieder ab, weil durch die aktive Förderwirkung des Mantelrohres Zugspannungen im Erdstoffblock entstehen.

Kapitel 9

Zusammenfassung / Ausblick

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Erdstoffförderprozess beim Bohren mit langer Schnecke im Mantelrohr (BolSiM), für den es noch keine wissenschaftliche Erklärung gibt. Das Verfahren wird bislang nach dem Prinzip *Trial and Error* betrieben wodurch immer wieder auch Misserfolge auftreten. Neben theoretischen Betrachtungen werden insbesondere auch praktischer Versuche an einem Modellversuchsstand präsentiert. Über die Fördereigenschaften im bisher praktizierten Verfahren hinaus werden dabei auch Modifikationen wie die Unterstützung der Förderung durch Druckluft oder die Anwendung elektrokapillarer Effekte untersucht.

Nach einer Beschreibung des Verfahrens und der dabei auftretenden Probleme wird zunächst versucht, die Förderung beim BolSiM anhand der aus der Fördertechnik bekannten Grundlagen zu erklären. Das Verfahren wird dabei analog zu herkömmlichen Senkrechtschneckenförderern betrachtet wobei sich schnell abzeichnet, dass die Förderung beim BolSiM anderen Gesetzen gehorcht. Es werden daher grundsätzliche Überlegungen zu den förderspezifischen Eigenschaften angestellt.

Im Weiteren werden verschiedene Grundlagen zusammengetragen, welche für eine versuchstechnische Untersuchung und Betrachtung der Förderung beim BolSiM sinnvoll erscheinen. Hierzu zählen insbesondere auch Versuche zur Reibung zwischen dem untersuchten Boden und Stahloberflächen oder praktische Voruntersuchungen zu den Auswirkungen elektrokapillarer Effekte bei der Bodenbearbeitung mit Werkzeugen.

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt dann in der Konzeption und Konstruktion eines geeigneten Bohrversuchsstandes sowie den eigentlichen Bohrversuchen. Anhand diverser Versuche mit unterschiedlichen geometrischen und maschinentechnischen Parametern sowie unterschiedlicher Bodenkonsistenz wird schließlich ein qualitatives Fördermodell für das BolSiM entwickelt. Es zeigt sich dabei, dass die Förderung beim BolSiM letztlich nur wegen besonderer spezifischer Eigenschaften des Förderguts „Erdstoff“ möglich ist. In Abhängigkeit verschiedener Parameterkonstellationen bilden

sich unterschiedliche *Förderarten* aus, welche Einfluss auf die Förderwirkung und die auftretenden Drehmomente nehmen. Es werden hier vier unterschiedliche Förderarten beobachtet und beschrieben.

Im Rahmen der Untersuchungen können aufgrund der aufwandsbedingt beschränkten Versuchsanzahl vorwiegend nur einzelne Abhängigkeiten von Förderung und Randbedingungen beschrieben und erklärt werden. Dennoch wird es damit möglich, Aussagen über maschinentechnische Maßnahmen und Betriebsparameter zu treffen, die ggf. auch in der Praxis zur Verbesserung der Förderwirkung eingesetzt werden können.

Ausblick

Zum endgültigen Verständnis des Förderverhaltens und der Beeinflussbarkeit über diverse Förderparameter sind weitere umfangreiche praktische Untersuchungen erforderlich. Insbesondere sollte versucht werden, durch geeignete versuchstechnische Maßnahmen den Förderprozess auch im Inneren des Förderers sichtbar zu machen. Ggf. können aber – aufbauend auf den Erkenntnissen aus dieser Arbeit – auch einfachere analoge Modellversuche entwickelt werden, mit deren Hilfe sich spezielle Fragen der Fördermechanismen beim BolSiM klären lassen. Denkbar wäre hier z.B. die Simulation von Schneckenkanal und Mantelrohr mittels ebener Flächen mit Relativbewegung.

Aber auch die Fortführung der hier beschriebenen Versuche mit dem nun vorhandenen Bohrversuchsstand verspricht weitere aufschlussreiche Erkenntnisse. Mit den vorgestellten Ergebnissen aus den bereits durchgeführten Versuchen lassen sich gezielt geschlossene Versuchsreihen entwickeln, um konkreteren Parameterabhängigkeiten nachgehen zu können. Der Boden ist zum jetzigen Zeitpunkt noch in der Bohrversuchsrinne eingebaut; weitere Versuchen sowohl im „Originalboden“ als auch in neu aufbereitetem Boden sind daher kurzfristig möglich. Eine Forschungsaufgabe könnte dabei auch darin bestehen, die Untersuchungen auf andere (bindige) Böden auszuweiten.

Schließlich müssen die im Modellversuchsstand gewonnen Erkenntnisse im Hinblick auf die Baupraxis interpretiert und eingeordnet werden. Dazu sind genau genommen gezielte, wissenschaftlich überwachte Versuche mit Originalgeräten erforderlich. Ein erster Schritt dahin wäre allerdings auch schon eine konkrete wissenschaftliche Begleitung von regulären Praxiseinsätzen des BolSiM. Ggf. könnte dabei sogar bereits gezielt (positiver) Einfluss auf die Erdstoffförderung genommen werden.

Anhang

- Wassergehaltsverteilung in der Bodenversuchsrinne (Abb. A.1)
- Hinweise auf günstige Parameterkombinationen für verschiedene Bodenverhältnisse (Tabelle A.1)

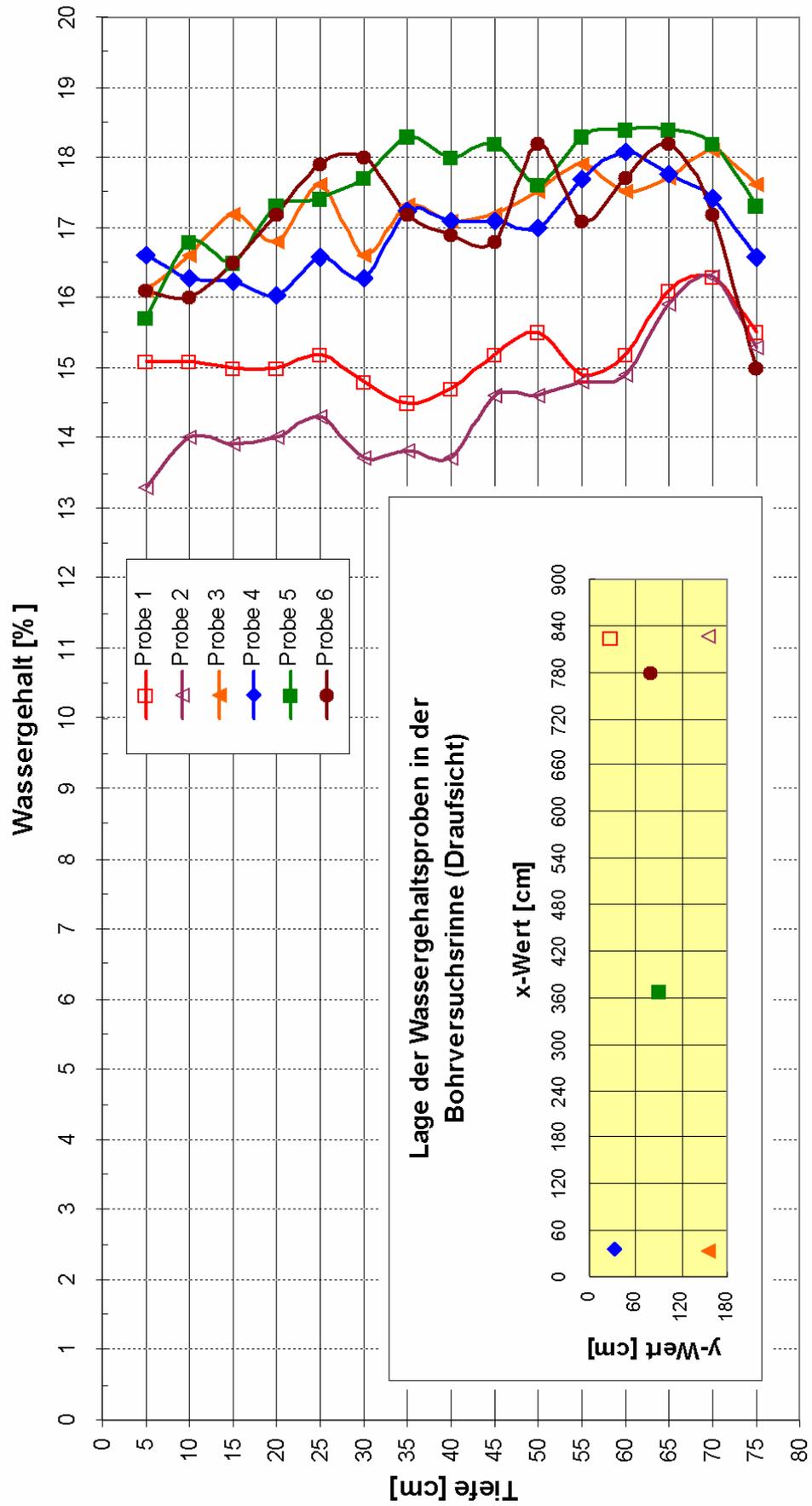


Abb. A.1: Wassergehaltsverteilung in der Bodenversuchsrinne

Parameterkombinationen für verschiedene Bodenverhältnisse

Die folgende Tabelle A.1 soll Hinweise geben, welche Parameterkombinationen beim BolSiM im untersuchten Boden für verschiedene Bodenkonsistenzen als günstig beurteilt werden können. Dabei liegt das Augenmerk auf der Erzielung möglichst kleiner Schneckendrehmomente bei guter Förderwirkung. Die Auswirkungen des Einsatzes einer elektrischen Potentialdifferenz zwischen den Werkzeugen und der damit verbundenen elektrokapillaren Effekte wird hier über die Einstellungen „rau“ und „glatt“ der Parameter Schnecken- und Mantelrohroberfläche berücksichtigt.

Die Zuordnung erfolgt ausschließlich als Ergebnis aus den durchgeführten Modellversuchen und kann damit für die Praxis allenfalls eine erste grobe Orientierung vorstellen. Für die Angaben zur relativen Schneckendrehzahl ist dabei zudem der Modellmaßstab von 1 : 7,5 zu beachten.

Tabelle A.1: Günstige Parameterkombinationen für die Förderung (aus Modellversuchen)

Bodenverhältnisse		Schnecke		Mantelrohr		Spülung	
Wasser- gehalt w	Wasser- zutritt	Drehzahl / Vortrieb n_S/v_V [U/cm]	Ober- fläche	Drehzahl n_M	Ober- fläche	Wasser	Luft
15 %		1,5 bis 3,0	glatt	$n_S/5 \leq n_M \leq n_S/2$	rau		
15 %	X	1,5 bis 3,0	rau	$n_S/5 \leq n_M \leq n_S/2$	rau		X
17 %		1,5 bis 3,0	glatt	$n_S/5 \leq n_M \leq n_S/2$	rau	X	
17 %	X	1,5 bis 3,0	rau	$n_S/5 \leq n_M \leq n_S/2$	rau		X
20 %		0,5* bis 3,0	glatt	nicht relevant	rau		
25 %		0,5* bis 3,0	glatt**	nicht relevant	rau		
25 %	X***	1,5 bis 3,0	glatt**	nicht relevant	rau		X
25 % ****		$v_V/n_S \approx H/2$	glatt	$n_M \approx n_S$	rau		

*) bei kleinen Verhältnissen n_S/v_V erhöht sich das Schneckendrehmoment deutlich

**) die Förderung kann ggf. durch raue Oberfläche auf Kosten des Drehmomentes verbessert werden

***) bei großem Wasserzutritt ist u.U. nur noch eine Blockförderung auf Verdrängungsbasis möglich

****) Sonderfall der sehr langsam drehenden Schnecke ($d_S \approx H/2$, bzw. aktive Blockförderung)

Symbole

A_{Sp}	: <i>Spanquerschnittsfläche</i> [cm ²]
α	: <i>Werkzeug-Freiwinkel</i> [°]
α'	: <i>Arbeits-Freiwinkel</i> [°]
B	: <i>Beschleunigungskennzahl</i> [-]
b_W	: <i>Wendelbreite</i> [cm]
β	: <i>Keilwinkel</i> [°]
D	: <i>Schneckendurchmesser</i> [mm]
D_W	: <i>Seelenrohraußendurchmesser</i> [mm]
d	: <i>Korndurchmesser</i> [mm]
d_S	: <i>theoretische Spanstärke</i> [cm]
d_{Sp}	: <i>tatsächliche Spandicke</i> [cm]
E_{fs}	: <i>schneckenbezogene Fördereffizienz</i> [-]
f_m	: <i>massenbezogene Förderrate</i> [kg/cm]
g	: <i>Erdbeschleunigung</i> [m/s ²]
η	: <i>Wirkungsgrad</i> [-]
H	: <i>Wendelsteigung</i> [cm]
γ	: <i>Werkzeug-Spanwinkel</i> [°]
γ'	: <i>Arbeits-Spanwinkel</i> [°]
I_C	: <i>Konsistenzzahl</i> [-]
I_P	: <i>Plastizitätszahl</i> [%]
φ	: <i>Vorschubwinkel</i> [°]
k_{AS}	: <i>Aktivfaktor</i> [-]
k_{ke}	: <i>Kontaktkoeffizient</i> [-]
k_P	: <i>Passivfaktor</i> [-]

Symbole

L_b	<i>Arbeitsweg im Boden</i> [cm]
l_M	<i>Mantelrohrlänge</i> [cm]; (im Versuchsstand immer 107 cm)
m_A	<i>Aufgabemenge</i> [kg/cm]
m_F	<i>ständige Füllmasse</i> (des gesamten Förderers) [kg]
n_S	<i>Schneckendrehzahl</i> [U/min]
n_M	<i>Mantelrohdrehzahl</i> [U/min]
n_{Sp}	<i>Spandrehgeschwindigkeit</i> [U/min]
M_S	<i>Schneckendrehmoment</i> [Nm]
μ_W	<i>Reibkoeffizient</i> [-]
σ	<i>Normalspannung</i> [N/m ²]
τ	<i>Wandschubspannung</i> [N/m ²]
T_{eb}	<i>Einwirkzeit</i> [s]
T_{kb}	<i>Bodenkontaktzeit</i> [s]
T_v	<i>Vorlaufzeit</i> [s]
T_f	<i>Förderbeginn</i> [cm]
T_{JS}	<i>frühest möglicher Förderbeginn</i> (nur aus Schneckendrehung) [cm]
T_{JSM}	<i>frühest möglicher Förderbeginn</i> (aus Schnecke und Mantelrohr) [cm]
v_F	<i>Fördergeschwindigkeit</i> [cm/s]
v_M	<i>innere Umfangsgeschwindigkeit des Mantelrohres</i> [m/s]
v_S	<i>äußere Umfangsgeschwindigkeit der Schnecke</i> [m/s]
v_{Sp}	<i>horizontale Spangeschwindigkeit am äußeren Schneckrand</i> [m/s]
v_V	<i>Vortriebsgeschwindigkeit</i> (der Werkzeuge) [cm/min]
v_W	<i>Wandreibungsgeschwindigkeit</i> [m/s]
w	<i>bodenmechanischer Wassergehalt</i> (gravimetrisch) [%]
w_{opt}	<i>optimaler Wassergehalt</i> (Proctor) [%]
ω	<i>Winkelgeschwindigkeit</i> [1/s]

Abbildungen

Abb. 2.1: Kellybohrgerät:	8
Abb. 2.2: Bohrgerät für das BolSiM mit zwei Kraftdrehköpfen am Mäkler.....	11
Abb. 2.3: Materialaustrag beim BolSiM	12
Abb. 3.1: Phaseneinteilung in Abhängigkeit vom Wassergehalt (BERETITSCH, '92)	19
Abb. 3.2: Werkzeug- und Arbeitswinkel am Bohrwerkzeug (nach SCHULER, 1979)....	25
Abb. 3.3 Veränderung der Reibungszahl durch Variation von Geschwindigkeit und elektrischer Spannung (WEBER, 1932)	26
Abb. 3.4: Kante-zu-Kante-Kontakt (links) und parallele Anordnung (rechts) zweier Tonplättchen (GUDEHUS, 1981)	28
Abb. 3.5: Wechselwirkung zwischen Kettenmolekül und Bodenpartikel (MAIDL).....	34
Abb. 3.6: Oberflächenfilm- und Mizellenbildung in einer tensidhaltigen Flüssigkeit (MAIDL, 1995)	37
Abb. 3.7: Adsorption der Tensidmoleküle an der Grenzfläche flüssig-fest bei a) zu geringer Tensidkonzentration; b) ausreichender Konzentration (MAIDL, 1995).....	38
Abb. 3.8 Adsorption einer polymerhaltigen Schaumlösung an der Grenzfläche flüssig-fest (MAIDL, 1995)	39
Abb. 4.1: Kräfteplan bei der Schüttgutschneckenförderung für ein Schüttgutkorn bei waagerechter Kreisbahn (PAJER, 1988)	42
Abb. 4.2: Kräfte- und Geschwindigkeitsplan bei der Schüttgutschneckenförderung für ein Schüttgutkorn bei vertikalem Transport (PAJER, 1988)	43
Abb. 4.3: Geböschte Fördergutverteilung auf der Schneckenwendel (PAJER, 1988)	45

Abbildungen

Abb. 4.4: Vier mögliche Füllungskonfigurationen in der Schneckenkammer (RONG, 2004)	46
Abb. 4.5: Unterteilung des Schüttgutes in der Schneckenkammer in zwei Zonen (nach GREINWALD, 1994).....	47
Abb. 4.6: Betrachtung der Gutfüllung a) als kompakten Block analog zur Einzelkörpertheorie und b) bestehend aus Sektorelementen (RONG).....	48
Abb. 4.7: Fördermodell zur „Verdrängungsförderung“ (MECHIAS, 1975).....	50
Abb. 4.8: Nuten im Mantelrohr eines Schneckenförderers (LANGECKER, 1977).....	52
Abb. 4.9: Anbackungsdicke als Funktion des Neigungswinkels (HOLLINDERBÄUMER, 1993).....	54
Abb. 4.10: Geometrische Verhältnisse im Schneckenkanal (RASCHKA, 1990).....	56
Abb. 4.11: Abwicklung des Schneckenkanals (RASCHKA, 1990)	56
Abb. 4.12: Am Volumenelement angreifende Kräfte (RASCHKA, 1990).....	58
Abb. 4.13 Schematische Darstellung der Mikrostruktur von dispers-plastischen Materialien beim Wandgleiten (SCHLEGEL, 1982)	60
Abb. 4.14: Kritische Schneckendrehzahlen für zwei Originalbohrschnecken des BolSiM in Abhängigkeit von verschiedenen Wandreibungsbeiwerten.....	62
Abb. 5.1: Die verwendete Scherrinne mit frei aufgehängtem großem Scherrahmen.....	65
Abb. 5.2: Scherrahmenaufhängung, Vorschneideeinrichtung und Kraftmessung	66
Abb. 5.3: Rinne für Schneidversuche im Boden unter Einfluss eines elektrischen Feldes	67
Abb. 5.4: Versuchstand zur Untersuchung des Erdstoff-Förderverhaltens beim BolSiM links oben: Mantelrohr mit Vertikalleisten (Isolationsleisten)	69
Abb. 5.5: Prinzipschaltbild der Messeinrichtung für den Versuchsstand (ZEMBROT, 2001)	70
Abb. 5.6: Einrichtung zur Messung des Schneckendrehmomentes.....	71

Abbildungen

Abb. 5.7: Einrichtung zur Messung der Anpresskraft über Scherkraftaufnehmer	72
Abb. 5.8: Adhäsionswirkungsbereiche in Abhängigkeit von Plastizität und Konsistenz (nach SCHLICK, 1989).....	74
Abb. 5.9: Kornverteilungskurven des verwendeten bindigen Versuchsbodens (TL).....	75
Abb. 5.10: Einordnung des Versuchsbodens nach DIN 18196	76
Abb. 5.11: Proctorkurve (ρ_d) und zugehörige Feuchtdichte für den Versuchsboden....	76
Abb. 5.12: Gleitreibungskoeffizient in Abhängigkeit von Wassergehalt und Bodenart (SCHUMACHER, 2004).....	77
Abb. 5.13: Boden in der Rinne mit zwei wiederverfüllten Bohrungen	79
Abb. 6.1: Tangentiale Adhäsionskraft für den Versuchsboden nach der Abschätz- Beziehung von SCHUMACHER (2004)	81
Abb. 6.2: Wandschubspannungen für verschiedene Schergeschwindigkeiten.....	81
Abb. 6.3: Wandschubspannungen nach Befeuchtung der Bodenoberfläche	82
Abb. 6.4: Scherspannungen Boden-Boden für verschiedene Schergeschwindigkeiten (Normalspannung $\sigma = 0,33 \text{ N/cm}^2$)	83
Abb. 6.5: Bodenkontaktzeiten und -koeffizienten für $T_v = 20 \text{ s}$ und $v = 25 \text{ mm/s}$	85
Abb. 6.6: Schneidkräfte und Stromstärken bei gleichem Wassergehalt und gleicher Schneidgeschwindigkeit für verschiedene elektr. Potentialdifferenzen	86
Abb. 7.1: Bohrschnecken 1 bis 4 mit Schraubspitzen (von links nach rechts).....	91
Abb. 7.2: Kritische Schneckendrehzahlen von Original- und Modellschnecke 2.....	93
Abb. 7.3: Erdstoffförderung und Schneckendrehmoment in Abhängigkeit von der Bohrtiefe im Originalboden (Kombination A1, $w = 17\%$).....	99
Abb. 7.4: Auffangbehälter nach Versuchsende (Originalboden)	101
Abb. 7.5: Erdstoffförderung und Schneckendrehmoment in Abhängigkeit von der Bohrtiefe im Originalboden (Kombination C1, $w = 17\%$)	102

Abbildungen

Abb. 7.6: Erdstoffförderung und Schneckendrehmoment in Abhängigkeit von der Bohrtiefe in aufbereitetem Boden (Komb. C2, w = 18% bzw. 17%).....	106
Abb. 7.7: Erdstoffkörper auf der Wendel nach dem Versuch (Kombination C2) links: Versuch 107 (w = 18%) rechts: Versuch 108 (w = 17%).....	107
Abb. 7.8: Erdstoffkörper nach dem Versuch (Versuch 109, Komb. M2, w = 18%)	109
Abb. 7.9: Erdstoffförderung und Schneckendrehmoment in Abhängigkeit von der Bohrtiefe in aufbereitetem Boden (Kombination M2, w = 18%).....	110
Abb. 7.10: Erdstoffförderung und Schneckendrehmoment in Abhängigkeit von der Bohrtiefe in aufbereitetem Boden (Komb. I2 und J2, w = 25%).....	112
Abb. 7.11: Erdstoffförderung und Schneckendrehmoment in Abhängigkeit von der Bohrtiefe bei Komb. F mit Schnecke 1 (w = 17%, 20 % und 25 %)...	116
Abb. 7.12: Erdstoffaustrag beim Bohren mit Wasserzugabe im Originalboden (Versuch 098: Kombination F2, w = 15 %)	118
Abb. 7.13: Versuchsabbruch wegen Überlastung des Versuchsstandes beim Bohren mit Wasserzugabe im Originalboden (Komb. F2, w = 15 %).....	119
Abb. 7.14: Erdstoffkörper nach Versuch mit Wasserzugabe (Versuch 112, Kombination M2, w = 18%).....	120
Abb. 7.15: Erdstoffkörper und leergeförderte Schnecke nach Versuch mit Luftspülung (Versuch 110, Kombination M2, w = 18%).....	121
Abb. 7.16: Einfluss eines elektrischen Potentialunterschiedes auf Erdstoffförderung und Schneckendrehmoment (Kombination M2).....	124
Abb. 7.17: Bohrschnecke nach dem Versuch mit elektrischer Gleichspannung: links, als Kathode (Regelfall), rechts als Anode („verpolt“).....	125
Abb. 8.1: Spandicke und -geschwindigkeit bei der Spanförderung (Spanbandförderung)	131
Abb. A.1: Wassergehaltsverteilung in der Bodenversuchsrinne.....	141

Literatur

- ARNOLD, W. (1993): *Flachbohrtechnik*. Deutscher Verlag der Grundstoffindustrie GmbH, Leipzig - Stuttgart.
- AZZAM, R. & OEY, W. (1999): *Einfluss des pH-Wertes im Boden auf das Zeta-Potential und dessen Zusammenhang mit dem elektroosmotischen Durchlässigkeitsbeiwert (k_e)*. In "Geotechnik" 1999/3.
- BACHUS, E. (1961): *Grundbaupraxis*. Springer-Verlag GmbH, Berlin.
- BERETITSCH, S. (1992): *Kräftepiel im System Schneidwerkzeug-Boden*. Forschungsbericht des Instituts für Technologie und Management im Baubetrieb der Universität Karlsruhe, Heft 41.
- BLOMEYER, N. A. (2008): *Erweiterung und Verifikation von Auslegungsverfahren für Hochleistungs-Schneckenförderer für Schüttgut*. Dissertation an der Technischen Universität München.
- BÖTTCHER, S. (1963): *Eine allgemeine Analyse der Aufwärtsförderung eines Einzelkörpers in Schneckenförderern beliebiger Neigung*. VDI-Zeitschrift Bd.105 Nr. 14, 16 u. 18. Verein deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- DIN15262 (1983): *Schneckenförderer für Schüttgut - Berechnungsgrundsätze*. Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN18122 (1976): *Teil 1, Baugrund – Untersuchung von Bodenproben, Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen)*. Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN18196 (1988): *Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für Bautechnische Zwecke*. Deutsches Institut für Normung. Beuth Verlag, Berlin.
- DUDEN (2000): *Die deutsche Rechtschreibung*. Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG, Mannheim.

Literatur

- FOTTNER, J. (2002): *Auslegung und wirtschaftlicher Einsatz von Hochleistungs-Schneckenförderern*. Dissertation an der technischen Universität München.
- GREINWALD, K. (1994): *Untersuchung der Förderung leicht fließender Schüttgüter im senkrechten Schneckenförderer unter Berücksichtigung der Zwischenlager*. Dissertation an der technischen Universität München.
- GUDEHUS, G. & KÜLZER, M. (2002): *Einfluss von Ionen und Glasblasen auf die Kollapsneigung feinstkörniger Böden*. Geotechnik 25, Nr. 1, 12-19.
- GUDEHUS, G. (1981): *Bodenmechanik*. Enke Verlag, Stuttgart.
- GUDEHUS, G. (2006): *Vibro-Hypoplastizität*. Kapitel in „Entwicklungen in der Bodenmechanik, Bodendynamik und Geotechnik“. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 3-16.
- HEIM, D. (1990): *Tone und Tonminerale – Grundlagen der Sedimentologie und Mineralogie*. Enke Verlag, Stuttgart.
- HOLLINDERBÄUMER, E. W. (1993): *Anbackungen feuchter Schüttgüter*. Dissertation an der Technische Hochschule Aachen, VDI-Verlag Düsseldorf.
- HOLLINDERBÄUMER, E.W. (1993a): *Anbackungen feuchter Schüttgüter, Haftkraftmechanismen und Lösungsmöglichkeiten für praktische Probleme*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 3 / Nr. 344, VDI Verlag Düsseldorf.
- KAUER, S. (2001): *Beeinflussung der Bearbeitbarkeit bindiger Böden durch elektrokinetische Effekte – Vorversuche zur Ermittlung der Scherkräfte in der Grenzfläche Werkzeug/Boden*. Vertieferarbeit am Institut für Maschinenwesen im Baubetrieb der Universität Karlsruhe, unveröffentlicht (vom Autor betreut).
- KORZEN, Z. (1981): *Ähnlichkeitsbetrachtungen der Bodenbearbeitungsvorgänge*. Veröffentlichung des Institutes für Maschinenwesen im Baubetrieb der Universität Karlsruhe, Reihe G / Heft 1.
- KÜHN, G. (1992): *Bohren im Lockergestein – Untersuchungsergebnisse*. Baumaschinen und Bautechnik Heft 1.

Literatur

- LANGECKER, G. R. (1977): *Untersuchungen zum Stoffverhalten von Kunststoffpulvern in der Einzugszone von Schneckenmaschinen mit genuteten Buchsen*. Dissertation an der Technische Hochschule Aachen.
- LIEBHERR (2002): *Doppelkopf-Bohrverfahren*. Verfahrens- und Gerätebeschreibungen der BVV Spezialtiefbautechnik Vertriebs GmbH, München.
- MAIDL, U. (1995): *Erweiterung der Einsatzbereiche der Erddruckschilde durch Bodenconditionierung mit Schaum*. Dissertation an der Ruhr-Universität Bochum, Technisch-wissenschaftliche Mitteilung Nr. 95-4.
- MECHIAS, B. (1975): *Untersuchungen zum Feststofftransport in Extraktionsanlagen zur Saccharoseextraktion und in einem Schneckenförderer*. Dissertation an der Universität Braunschweig.
- NICHOLS, M.L. (1925): *The sliding of metal over soil*. Agricultural Engineering, Vol. 6, No. 4.
- NICHOLS, M.L. (1931): *Dynamic Properties of Soil - Soil and Metal Friction*. Agricultural Engineering, Vol 12, No. 8, 321-324.
- PAJER, G. (1988): *Fördertechnik, Stetigförderer*. Herausgeber Kurth, F. VEB Verlag Technik, Berlin.
- RASCHKA, K. (1990): *Bestimmung der Fließeigenschaften feuchter Schüttgüter mit Anwendung bei der Schneckenextrusion*. Dissertation an der Universität Karlsruhe, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 3 / Nr. 227, VDI-Verlag Düsseldorf.
- RIETHMÜLLER, J. (2001): *Theoretische Untersuchungen zum Förderverhalten von Senkrechtschneckenförderern im Hinblick auf die Verbesserung des Doppelkopfbohrverfahrens (DKS)*. Diplomarbeit am Institut für Maschinenwesen im Baubetrieb der Universität Karlsruhe, unveröffentlicht (vom Autor betreut).
- RONG, O. (2004): *Auslegungsverfahren für Hochleistungsförderer*. Dissertation an der Technischen Universität München.
- SCHLEGEL, D. (1982): *Zur Förderung Wandgleitender Plastischer Materialien in Schneckenmaschinen*. Dissertation an der Technische Hochschule Aachen.
- SCHLICK, G. (1989): *Adhäsion im Boden-Werkzeug-System*. Forschungsbericht des Institutes für Maschinenwesen im Baubetrieb der Universität Karlsruhe, Heft 39.

- SCHMIDMAIER, L. & HARTTIG, W. (2004): *Vorrichtung zur Herstellung von Bohrpfählen bei Verwendung von einer Verrohrung mit innenliegender, durchgehender Schnecke*. Patentschrift der Bauer Spezialtiefbau GmbH, Schrobenhäusen, veröffentlicht im deutschen Patentblatt am 12.02.2004.
- SCHMIDT, D., RACHUL, V., HACKBART, G. (1988): *Nutzung elektrokinetischer Effekte bei der Verfahrensentwicklung im Bauwesen*. In „Tiefbau, Ingenieurbau und Straßenbau“ (TIS) 10/88.
- SCHORR, C.-P., (2001): *Vorrichtung und Verfahren zum Herstellen von Ortbetonpfählen bzw. Ortbetonkörpern im Boden oder einer unterirdischen Wand*. Patentschrift, veröffentlicht im deutschen Patentblatt am 05.04.2001.
- SCHULER, V. (1979): *Drehendes Bohren in Lockergestein – Gesetzmäßigkeiten und Nutzenanwendung*. Veröffentlichung des Institutes für Maschinenwesen im Baubetrieb der Universität Karlsruhe, Reihe F / Heft 23.
- SCHUMACHER L. (2003): *Untersuchungen zum Einfluss der Mantelreibung und des Spitzendruckes bei Erdverdrängungs- und Drehbohranlagen*. Dissertation an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg.
- SCHUMACHER L. (2004): *Leistungsanalyse an Großlochdrehbohrgeräten – Lockergesteinsbohrungen*. Vortrag auf dem 55. Berg- und Hüttenmännischen Tag an der TU Bergakademie Freiberg.
- SINHA, G. L.: (1959): *Untersuchung zum Fördervorgang beim senkrechten Schneckenförderer*: Dissertation an der Technischen Universität Hannover, 1959.
- STAHL, H. (1994): *Optimierung senkrechter Schneckenförderer mit Hilfe konischer Einlaufbereiche*. Deutsche Hebe- und Fördertechnik Heft 7/8.
- STÖTZER, E.; SCHÖPF, M. (2003): *Drehbohrtechnik – Eine Multifunktionstechnik im Spezialtiefbau*. Tiefbau, Heft 6.
- WEBER, F. (1932): *Untersuchung über den Einfluss des elektrischen Stroms auf den Zugkraftbedarf beim Pflügen. Strömungsverhalten im Boden-/Werkzeugsystem*. Dissertation an der Technischen Hochschule München.

Literatur

- WELSCH, A. (2003): *Ermittlung der Scherkräfte in der Grenzfläche Metall/Boden bei schnellem Scheren – Untersuchung der pH-Wert-Abhängigkeit durch Versuche im Torsionsschergerät*. Diplomarbeit am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb der Universität Karlsruhe, unveröffentlicht (vom Autor betreut).
- ZEMBROT, M. (2001): *Entwicklung und Konstruktion eines Universalbohr-Versuchsstandes*. Diplomarbeit am Institut für Maschinenwesen im Baubetrieb der Universität Karlsruhe, unveröffentlicht (vom Autor betreut).
- ZILLICH, E. (1972): *Fördertechnik für Studium und Beruf - Mechanisch arbeitende Stetigförderer (Band 2)*. Werner-Verlag, Düsseldorf.
- ZOU, Y. (1998): *Der Einfluss des gebundenen Wassers auf die Leitfähigkeit und die mechanischen Eigenschaften feinkörniger Böden*. Dissertationsschrift. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Heft 144.