



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

VIENNA
UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY

DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

„DER EINSATZ DES GREIFERBOHRVERFAHRENS UNTER GRUNDWASSERBEDINGUNGEN“

ausgeführt zum Zweck der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

o.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn.Dr.h.c.mult. Heinz Brandl

und

Univ.Ass.Dipl.-Ing. Dietmar Kohlböck

E221

Institut für Grundbau und Bodenmechanik

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Marek Szabó
Matr. Nr. 0126257
Hraničná 17
82105 Bratislava
Slowakei

Wien, im Juni 2007

.....
Marek Szabó

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die zum Gelingen meiner Diplomarbeit beigetragen haben.

Mein Dank gebührt o.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c.mult. Heinz Brandl, der mir das Erstellen dieser Arbeit ermöglicht hat und für seine ständige Bereitschaft, mir bei Schwierigkeiten weiterzuhelfen.

Besonderer Dank gilt auch Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dietmar Kohlböck, der sich stets die Zeit genommen hat, mich mit neuen Ideen zu unterstützen, und dessen innovatives Denken die Grundlage dieser interessanten und herausfordernden Aufgabenstellung darstellte. Seine intensive Betreuung und Mithilfe bei der Ausarbeitung dieser Diplomarbeit ermöglichte mir ein effizientes und angenehmes Arbeiten.

Großer Dank gebührt allen meinen Studienkollegen und Freunden, die mir während meiner Studienzeit zur Seite standen und mich immer mit wertvollen Ratschlägen unterstützen.

Der größte Dank gilt jedoch meinen Eltern Dipl.-Ing.arch Katarína Szabóová und Dipl.-Ing. Gabriel Szabó, die mir stets den nötigen Rückhalt in meiner Studienlaufbahn gegeben und mich in allen Lebenslagen unterstützt haben.

Kurzfassung

Das Greiferbohrverfahren stellt bei "schwierigen" wechselnden Untergrundverhältnissen ein leistungsfähiges Bohrverfahren für die Pfahlherstellung dar. Aufgrund der Werkzeugkombination von Meißel und Greifer lässt sich je nach Boden mit dem geeigneten Gerät arbeiten. Dabei stellt der Bohrgreifer ein wirkungsvolles Aushub- bzw. Bohrwerkzeug und der Meißel ein geeignetes Werkzeug zum Bearbeiten von Hindernissen – Felsbänken, Verkittungen oder anderen Inhomogenitäten – im Untergrund dar.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden zunächst die Prinzipien und die Anwendungsmöglichkeiten von Pfählen erläutert, bevor näher auf den Pfahlherstellungsprozess mittels des Greiferbohrverfahrens eingegangen wird. Anschließend werden die verschiedenen bei eingesetzten Greifertypen sowie Meißel gegenübergestellt, um daraus Rückschlüsse auf deren Leistung und wirtschaftlichen Einsatz zu ziehen. Dabei werden vor allem Aufbau, Arbeitsweise und Einsatzgrenzen genauer untersucht und erklärt.

Einen besonderen Fall stellt der Einsatz der Meißelwerkzeuge unter Grundwasserbedingungen dar. Durch den freien Fall des Meißels in der Verrohrung werden Strömungsverhältnisse hervorgerufen, die anhand numerischer Modelle nachgerechnet werden. Dabei werden die am Meißel wirkenden Strömungswiderstandskräfte für verschiedene Meißeltypen berechnet und interpretiert. Der Einfluss der Meißelgeometrie, des Eigengewichts sowie die Grenzzustände der Fallbewegung werden eingehend untersucht und gegenübergestellt.

Abstract

In the case of largely varying soil conditions, the installation of piles with a hammer grab and a chisel provides very efficient results. The possibility of changing these tools during the working process makes this method quite powerful because it can be adapted to specific soil characteristics. The hammer grab is used to take out soil and gravel inside the casing and the chisel is an effective tool to overcome very hard soil layers as shelves, cementation or other inconsistencies of the ground.

After an overview of the principles and the possible fields of pile application, the method of installing piles with a hammer grab and a chisel will be discussed. Next, the advantages and disadvantages of different types of hammer grabs as well as chisels will be put into contrast to draw a conclusion regarding their efficiency. A special focus will be given on their construction, operation and application.

Occasionally, special cases entail installation of piles with a chisel under water conditions. The free fall of the chisel within the casing induces flow behaviour, which is calculated in numerical flow models. The flow study shows flow resistance forces acting on various types of chisels and the results are interpreted. Finally, the influence of the chisel geometry and its weight as well as the ultimate state of its free fall behaviour were investigated and compared to each other.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	10
2. Geschichtlicher Überblick	11
3. Pfähle	13
3.1. Einleitung	13
3.2. Lastabtragungsverhalten des Einzelpfahles	14
3.3. Herstellung eines Bohrpfahles	16
4. Greiferbohrverfahren (Schlagbohrverfahren)	20
4.1. Greiferbohrverfahren mit hydraulischer Rohrdrehmaschine	20
4.2. Bohrrohre	22
4.2.1. Stahlrohre mit Schweißverbindung	23
4.2.2. Bohrrohre mit Schnellverbindungen (Nippelbohrrohre)	24
4.2.3. Bohrkrone	27
4.3. Bohrrohrzubehör	29
4.3.1. Bohrgehänge	29
4.3.2. Rohraufsatztrichter	29
4.4. Verrohrungsmaschinen	30
5. Bohrwerkzeuge	33
5.1. Allgemeine Begriffsbestimmung; Greifen, Greifer	33
5.2. Bohrgreifer	34
5.3. Löse- und Füllvorgang eines Greifers	35
5.3.1. Einflussfaktoren auf den Löse- und Füllvorgang eines Greifers	36
5.3.1.1. Reibungswiderstand	36
5.4. Arbeitsweise und Gliederung	38
5.5. Mechanische Bohrgreifer	40
5.5.1. Schließmechanismus	41
5.5.1.1. Flaschenzug	41
5.5.1.2. Scherensysteme	43
5.5.2. Einseilgreifer	46
5.5.2.1. Aufbau und Prinzip	46
5.5.2.2. Arbeitsweise	47

5.5.2.3.	Einsatzgrenzen	48
5.5.3.	Zweiseilgreifer	49
5.5.3.1.	Aufbau und Prinzip	49
5.5.3.2.	Arbeitsweise	50
5.5.3.3.	Einsatzgrenzen	51
5.5.4.	Besondere Greifertypen.....	51
5.5.4.1.	Kugelgreifer	52
5.6.	Hydraulische Bohrgreifer	54
5.6.1.	Aufbau	54
5.6.2.	Arbeitsweise und Einsatzgrenzen.....	56
5.6.3.	Hydraulisches Prinzip des Greifers	57
5.6.3.1.	Funktionsweise der Hydraulikanlage	58
5.6.3.2.	Hydraulikzylinder.....	59
5.7.	Gegenüberstellung: mechanische vs. hydraulische Bohrgreifer	61
5.8.	Empfehlungen für den Greifereinsatz	61
5.8.1.	Geologische Randbedingungen.....	62
5.8.2.	Grundwasser.....	62
5.8.3.	Fallhöhe	63
5.8.4.	Greiferschaufeln	63
5.8.5.	Greifergewicht.....	63
5.8.6.	Schließmomente	63
5.9.	Bohrmeißel	65
5.9.1.	Aufbau	65
5.9.2.	Gliederung.....	65
5.9.3.	Meiselschneide	66
5.9.4.	Meißelrotation beim Grundwassereinsatz	68
5.9.5.	Art des Lösens	68
5.9.5.1.	Rissbildung.....	69
5.10.	Schlussfolgerung / Leistungsfähigkeit der Meißelarbeiten	72
6.	Strömungsstudie	74
6.1.	Einleitung	74
6.2.	Theoretische Grundlagen	74
6.2.1.	Strömungsformen	74
6.2.1.1.	Laminare Strömung.....	74

6.2.1.2.	Turbulente Strömung.....	75
6.2.2.	Reynolds-Zahl	76
6.2.3.	Körper–Umströmung	76
6.3.	Kraftwirkungen	78
6.3.1.	Allgemeines.....	78
6.3.2.	Strömungswiderstandskraft.....	79
6.3.2.1.	Flächenwiderstand (Reibungswiderstand)	79
6.3.2.2.	Formwiderstand (Druckwiderstand)	79
6.3.2.3.	Gesamtwiderstand	80
6.3.3.	Statischer Auftrieb.....	81
6.3.4.	Gewichtskraft	81
7.	Numerische Berechnungsmethode.....	82
7.1.	Allgemeines.....	82
7.2.	PowerFLOW	82
7.3.	Theoretische Grundlagen	83
7.3.1.	Boltzmann-Gleichung	83
7.3.2.	Teilcheninteraktion.....	83
7.3.2.1.	Partikel – Partikel Interaktion	84
7.3.2.2.	Partikel – Surfel Interaktion	84
7.3.3.	Simulationsmethode	85
7.3.3.1.	Direkte Simulation	85
7.3.3.2.	Turbulente Simulation.....	85
7.4.	Programmbeschreibung.....	85
7.4.1.	PowerFLOW–Module.....	85
7.4.1.1.	Client-Grundmodule.....	86
7.4.1.1.1	PowerCASE	86
7.4.1.1.2	PowerVIZ.....	87
7.4.1.2.	Client-Zusatzmodule	88
7.4.1.2.1	PowerPREP	88
7.4.1.2.2	PowerEXP	88
7.4.1.3.	Server-Module.....	88
7.4.1.3.1	ExaDISC.....	88
7.4.1.3.2	ExaDECOMP	88
7.4.1.3.3	ExaSIM.....	88

7.5.	Modellaufbau	89
7.5.1.	Meißelgeometrie.....	89
7.5.2.	Geometrie der Simulationsvolumens („Bounding Box“)	90
7.5.3.	Simulationsparameter	91
7.5.3.1.	Globale Parameter	91
7.5.3.2.	Fluideigenschaften	91
7.5.3.2.1	Strömungsparameter.....	91
7.5.3.3.	Variable Resolution Regions.....	92
7.5.4.	Randbedingungen.....	93
7.5.4.1.	Internal Flow	93
7.5.4.2.	External Flow	93
7.5.5.	Anfangsbedingungen.....	94
7.5.6.	“Measurements Parameter“	94
7.5.6.1.	Standard Measurements by Region.....	94
7.5.6.2.	Composite Force Measurements by Region.....	95
7.6.	Parameterstudie - Hinweise zur Grundmodellentwicklung	95
7.6.1.	Netzauflösung entlang der charakteristischen Länge.....	96
7.6.2.	Oberflächennetz des Meißelkörpers.....	98
7.6.3.	Wandparameter	100
7.6.4.	Turbulence Length Scale.....	102
7.6.5.	Impulsiver vs. nichtimpulsiver Start	103
7.7.	Strömungsverhalten.....	105
7.7.1.	Allgemeines.....	105
7.7.2.	Innenströmung.....	105
7.7.2.1.	“Auswirkungen der Lenkbleche“	108
7.7.3.	Außenströmung	110
7.8.	Strömungswiderstand von Grundmodell.....	115
7.8.1.	Internal Flow (Innenströmung)	115
7.8.2.	External Flow (Außenströmung).....	117
7.8.3.	Gegenüberstellung Innen-/Außenströmung	118
7.9.	Untersuchung des Strömungswiderstandes verschiedener Meißeltypen	119
7.9.1.	Vorbemerkungen.....	119
7.9.2.	Flachmeißel ohne Lenkbleche.....	120
7.9.2.1.	Modellaufbau	120

7.9.2.2.	Berechnungsergebnisse	120
7.9.3.	Kreuzmeißel	122
7.9.3.1.	Modellaufbau	122
7.9.3.2.	Berechnungsergebnisse	122
7.9.4.	Ringmeißel	124
7.9.4.1.	Modellaufbau	124
7.9.4.2.	Berechnungsergebnisse	125
7.10.	Ergebnisdiskussion und Schlussfolgerung	127
8.	Zusammenfassung	133
	Literaturverzeichnis	134

1. EINLEITUNG

Pfähle sind schlanke Bauelemente im Untergrund zum Übertragen von Lastenwirkungen in tiefere, tragfähige Schichten. Die Notwendigkeit, Bauwerke auch auf wenig tragfähigem Untergrund zu bauen, hat die Entwicklung verschiedener Pfahlarten wesentlich beeinflusst. Die Vielfalt der heutigen Pfahltypen erfordert jedoch entsprechende an die Untergrundbedingungen angepasste Verfahren, um ein wirtschaftliches Herstellen von Pfählen zu ermöglichen.

Bei der Herstellung von Großbohrpfählen werden grundsätzlich mit dem Drehbohr- und Greiferbohrverfahren zwei Aushubmethoden eingesetzt. Beim Drehbohren wird das Bohrwerkzeug (z.B. Schnecke, Rollenmeißel) in den Boden gedreht, der Boden gelöst und ausgehoben. Insbesondere in homogenen Böden stellt das Trockendrehbohrverfahren eine effiziente Methode der Pfahlherstellung dar. Wenn jedoch Inhomogenitäten bzw. wechselnde Untergrundbedingungen anstehen, die zu Erschwernissen beim Drehbohren führen, so stellt das Greiferbohrverfahren mit seinen Bohrwerkzeugen (Greifer und Meißel) eine leistungsfähige Alternative dar. Dies ermöglicht eine optimale Anpassung der Werkzeuge an die vorgefundenen Bodenverhältnisse.

Im Zuge dieser Arbeit sollen die unterschiedlichen Greiferprinzipien, Einsatzgrenzen sowie die Leistungsfähigkeit näher erläutert und gegenübergestellt werden. Dabei werden hauptsächlich die Einflüsse auf die Effizienz der Meißelarbeit untersucht.

Leistung der Meißelarbeit reduziert sich besonders wenn Wasser im Bohrloch vorhanden. Die dabei am Meißel auftretenden Strömungswiderstände werden mit Hilfe von numerischen Simulationsberechnungen untersucht, um daraus Rückschlüsse auf die Optimierung des Meißeleinsatzes ziehen zu können.

2. GESCHICHTLICHER ÜBERBLICK

Als eines der ältesten Gründungselemente, wurden Pfähle schon ca. 3000 v.Chr. im gesamten Alpenraum und im alten China verwendet. In der späteren Zeit haben insbesondere die römischen Ingenieure die Technik der Pfahlgründungen auf ein höheres Niveau dank des fortschrittlichen Denkens vor allem im Brückenbau gebracht.

VITRUV beschrieb das Gründungsverfahren auf Pfahlrosten mit Worten: *„Wenn man aber keinen festen Boden findet, sondern der Ort locker und sumpfig ist, dann muss der Platz ausgegraben und ausgehöhlt und mit angebrannten Pfählen von Erlen-, Oliven- oder Eichenholz befestigt und der Rost möglichst dicht eingerammt werden; die Zwischenräume der Pfähle fülle man mit Kohle aus und führe dann den Grundbau aus möglichst starkem Mauerwerk auf.“*[42].

Bis zu Beginn des 20. Jahrhunderts hat man überwiegend Holzpfähle verwendet, die mittels Fallgewichten in den Boden eingerammt wurden. Die ersten Versuche einen Pfahl in den Untergrund einzuschlagen, waren technologisch sehr einfach. Diese mühsame Methode Pfähle händisch einzurammen, hat sich später zu einer Zugramme und schließlich zu einer mechanisch betätigten Ramme entwickelt. Erst mit der Entwicklung der Freifallbären wurde die bis dato anstrengende Arbeit wesentlich erleichtert und mechanisiert. [3].

Mit der wachsenden Anzahl der auf Pfählen gegründeten Bauwerke, hat auch das Interesse neue Materialien und Verfahren für den Pfahlbau anzuwenden zugenommen. Anfang des 20. Jahrhunderts wurden die ersten Bohrpfähle hergestellt. Die Technologie der Bohrpfahlherstellung entwickelte sich langsam aus dem Brunnenbau. Die Konstruktion der Wasserbrunnen, in welchen die Innenauskleidung aus Mauerwerk als tragendes Element wirkte, diente als Erstgedanke für eine neue Pfahlart. Zu dieser Zeit war das Schlagbohren mit Fallmeißel und Büchse das gebräuchlichste Verfahren. Als in der Mitte des letzten Jahrhunderts mechanische Winden und Greifer zur Anwendung kamen, ist es möglich geworden, Bohrlöcher auch in nicht standfesten Böden und sogar unter Grundwasserbedingungen mit geringerem Kostenaufwand herzustellen [47].

Spätestens in Mitte des 20. Jahrhunderts mit der Einführung des Benoto-Pfahlsystems sind die Bohrgreifer zu einem wichtigen Werkzeug für die Bohrpfahlherstellung geworden. Aus den

früheren Zeiten weltweit eingesetzt, zuerst händisch, später mittels maschinell betriebenen Seilwinden betätigte Greifer, wurden von Firmen wie Benoto und Bade weiterentwickelt.

Für die Serienproduktion von Pfählen auf Großbaustellen standen zu dieser Zeit eigentlich nur zwei Maschinen auf dem Markt zur Verfügung. Einerseits die französische BENOTO-EDF, später unter dem Namen SUPER-EDF (Abb. 2-1) bekannt, und andererseits die deutsche BADE-DAG 60. Beide dieser Systeme vereinten die Windwerke für den Greiferbetrieb, mit der Technik für das sinnvolle Entleeren des Greifer als auch das hydraulische Eintreiben der Bohrröhre in den Untergrund in einer Maschine. Gemäß praktischen Erfahrungswerten konnte die BENOTO-Maschine maximale Durchmesser von 100 cm bohren. Im Gegensatz dazu, lag der größte Durchmesser der BADE-Maschine bei 130 cm [26].

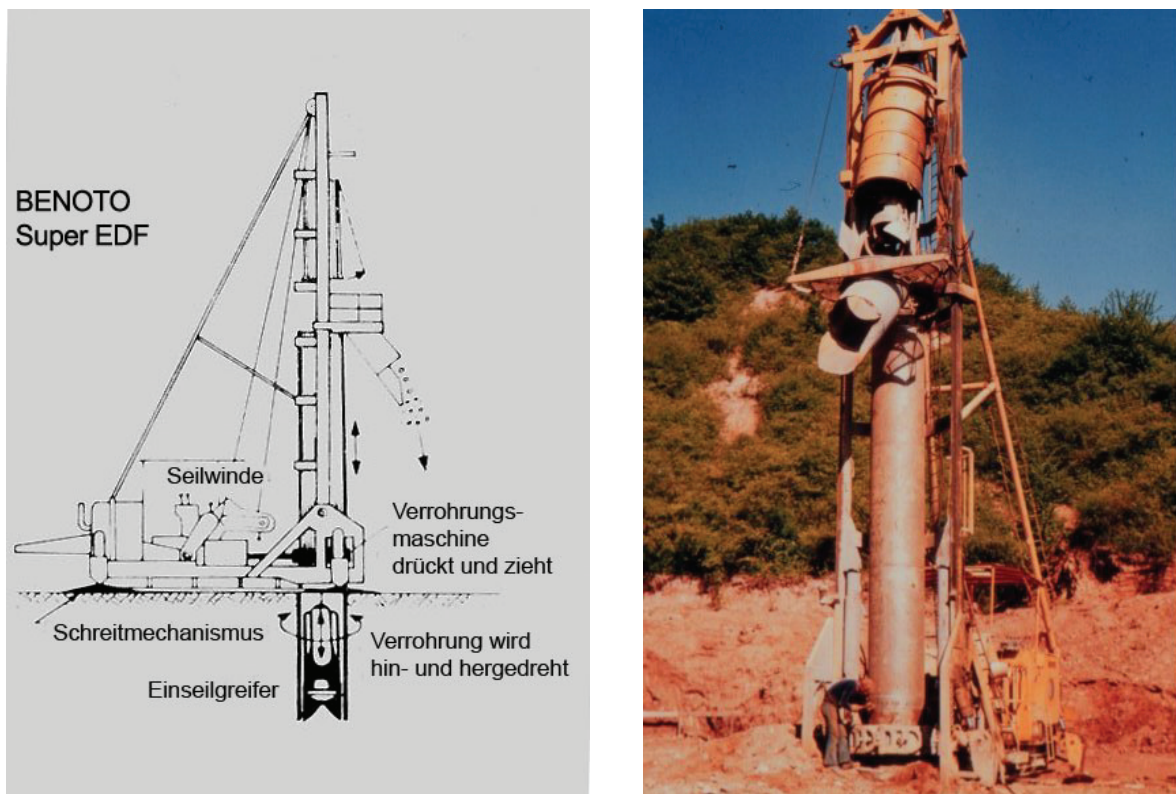


Abb. 2-1: Benoto Super EDF: Schema eines Arbeitsvorganges (links) und Bohrgerät (Rechts) [41]

Die heutzutage immer wachsenden Ansprüche an die Leistungsfähigkeit der Bohrwerkzeuge führen dazu, dass die Hersteller gezwungen sind durch innovative Entwicklungsarbeit den Markt mit neuen Geräten zu versorgen. Die heutige Greiferbohrtechnik ist dadurch gekennzeichnet, dass hydraulische Verrohrungsmaschinen für den Anbau an Seilbagger verwendet werden, mit denen Bohrgreifer betrieben werden. Die größten Pfahldurchmesser, die man mit diesen Geräten herstellen kann, liegen bei 3,0 m und die größten Bohrtiefen bei 100 – 120 m [27].

3. PFÄHLE

3.1. Einleitung

Pfähle sind schlanke säulenartige Bauelemente im Untergrund zum Übertragen von Lastenwirkungen. Die Vielfalt der heute gebräuchlichen Pfahltypen ermöglicht keine einheitliche Klassifizierung, wobei eine sehr häufige Gliederung nach der Art der Einbringung in den Boden erfolgt. Dabei unterscheidet man prinzipiell zwischen Bohrpfählen (ÖNORM EN 1536) und Verdrängungspfählen (ÖNORM EN 12699). In den meisten Fällen besitzen Pfähle einen konstanten Querschnitt über die Pfahllänge mit Durchmessern zwischen $\sim 0,3 - 3,0$ m und Längen in Sonderfällen sogar bis 100 m.

Die Herstellung von **Bohrpfählen** ist dadurch gekennzeichnet, dass für den späteren Pfahl zuerst ein Hohlraum im Untergrund abgeteuft bzw. gebohrt und anschließend mit Beton an Ort und Stelle verfüllt wird. Besitzt der Boden eine ausreichende Standfestigkeit, so können die Bohrungen unverrohrt erfolgen, bei gering standfestem Untergrund muss die Bohrlochwand entweder mit einer Verrohrung oder unverrohrt mittels einer Stützflüssigkeit gestützt werden. Der Aushub im Bohrloch findet mit kontinuierlich oder diskontinuierlich arbeitenden Bohrwerkzeugen als Trocken- oder Nassbohrung statt.

Beim Einbringen der **Verdrängungspfähle** in den Untergrund wird der Boden vollständig durch Rammen, Rütteln, Drücken oder Drehen und Drücken verdrängt. Dabei unterscheidet man zwischen zwei Ausführungsvarianten:

- Ortbetonpfahl
- Fertigpfahl
 - Holz
 - Beton (Stahl- oder Spannbeton)
 - Stahl (mit und ohne Mörtelverpressung)

Eine besondere Gruppe bilden Pfähle, deren Durchmesser bei den Bohrpfählen kleiner als 300 mm und bei den Verdrängungspfählen kleiner als 150 mm ist. Normgemäß wird dieser Pfahltyp mit dem Begriff **Mikropfähle** bezeichnet [5].

Pfahlgründungen kommen meistens zum Einsatz, wenn ein tragfähiger Baugrund erst in größerer Tiefe ansteht, und sind damit Flachfundierungen vorzuziehen, um die hohen

Bauwerkslasten setzungsarm abtragen zu können. Die Gründungen von Silos, Schornsteinen, Brückenwiderlagern, Staudämmen oder Hochhäusern und konventionellen Hochbauten sind übliche Einsatzgebiete für eine Vielzahl von Pfählen. Hierfür kommen Einzelpfähle sowie aus Pfahlgruppen bestehende Gründungen zum Einsatz. Neben den konventionellen Pfahlgründungen stellen die Kastenfundierungen [4] bei sehr unterschiedlichen oder tieferreichend weichen Untergrundverhältnissen eine setzungsarme Gründungsart. Das zwischen den Pfählen eingeschlossene Erdreich wird somit zum Mittragen herangezogen, wodurch eine erhöhte Tragfähigkeit erreicht wird. Ein weiterer Anwendungsbereich ergibt sich aufgrund der hohen Biegesteifigkeit der Großbohrpfähle, wodurch ein gutes Lastabtragungsverhalten von horizontal wirkender Belastung und/oder Biegemomenten gewährleistet ist. Demzufolge sind Bohrpfähle besonders gut für Baugrubensicherungen im unmittelbaren Druckausbreitungsbereich von Bauwerken geeignet. Wenn der Boden aufgrund seiner geringeren Scherfestigkeit zu Hangschubbewegungen neigt, sind Großbohrpfähle häufig auch als Hangverdübelungen [29] einzusetzen. Abb. 3-1 zeigt einige wichtige Anwendungsmöglichkeiten für Pfähle.

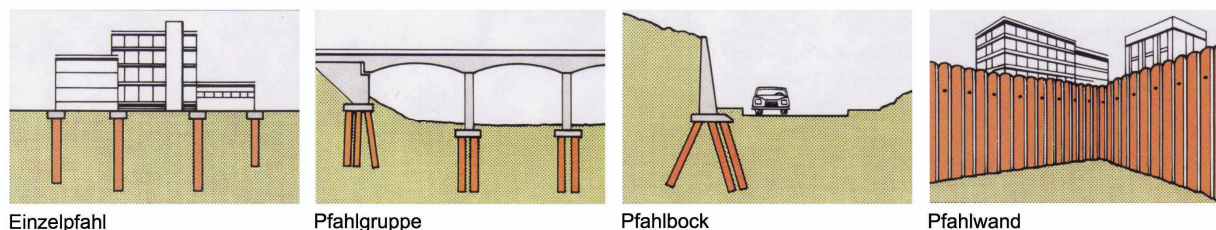


Abb. 3-1: Einsatzmöglichkeiten von Pfählen [44]

3.2. Lastabtragungsverhalten des Einzelpfahles

Pfähle werden dann als Gründungselemente eingesetzt, wenn sich unmittelbar unter der Fundamentsohle nicht ausreichend tragfähige Bodenschichten befinden, die bei Ausführung einer Flachfundierung unter Belastung zu unzulässigen Setzungen führen würden. Die primäre Aufgabe der Pfähle ist daher die vertikale Übertragung der Bauwerkslasten durch die nichttragfähigen Bodenschichten oder durch freies Wasser in den tiefer liegenden festen Untergrund [5 und 6].

Hinsichtlich der Tragwirkung eines Einzelpfahls (Abb. 3-2), kann zwischen 2 unterschiedlichen vertikalen Lastabtragungsarten unterschieden werden:

- **Mantelreibungspfahl**

Dieser Pfahltyp überträgt den größten Teil der Belastung entlang seiner Pfahlmantelfläche durch die Mantelreibung in den tragfähigen Untergrund. Eine verbesserte Wechselwirkung

lässt sich durch eine erhöhte Rauigkeit der Pfahloberfläche durch eine zusätzliche Mantelverpressung, raue Oberfläche (z.B. Wulstbildung) oder Verjüngung zur Pfahlunterkante erreichen.

- **Spitzendruckpfahl**

Die Krafteinwirkung auf den Pfahl wird in größeren Tiefen liegende feste Bodenschichten über den Spitzendruck am Pfahlfuß abgetragen. Maßnahmen, die zu einer Fußverbreiterung führen, haben einen positiven Effekt auf das Lastabtragungsverhalten an der Pfahlspitze. Da jedoch bei gleich bleibender Bodenpressung die Setzung mit dem Durchmesser linear ansteigt, ist daher bei gleicher zulässiger Setzung eine Erhöhung der Tragfähigkeit proportional zum Fußdurchmesser zu erwarten [39].

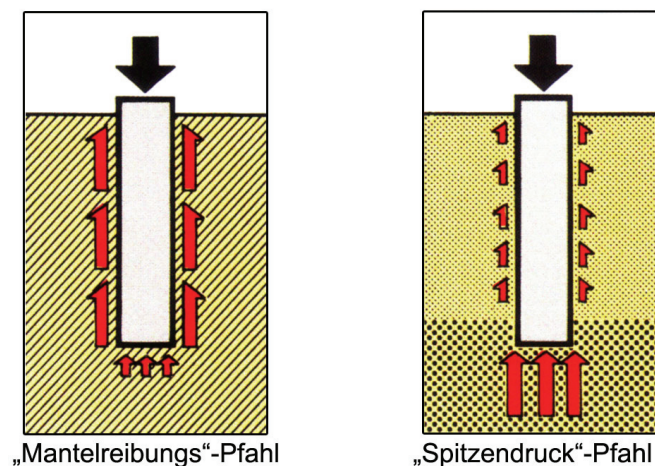


Abb. 3-2: Lastabtragungsverhalten eines Einzelpfahles [44]

Neben der vertikalen Lastabtragung können Pfähle auch horizontale Kräfte und/oder Biegemomente in den standfesten Untergrund über Biegung einleiten. Demzufolge wurde von De Beer der Begriff der aktiven und passiven Pfähle eingeführt [10]:

- **Aktiver Pfahl**

Dieser Pfahltyp leitet die aus der Bauwerksbelastung planmäßig resultierenden Horizontalkräfte und/oder Momente in den Baugrund ein.

- **Passiver Pfahl**

Die Einwirkungen auf diesen Pfahl ergeben sich vor allem zufolge der Bodenbewegungen weicher bindiger Böden, welche die Schubbeanspruchungen nicht mehr aufnehmen können [29]. Die Abb. 3-3 zeigt für einen möglichen Vorgang die genannte Bewegungsentstehung.

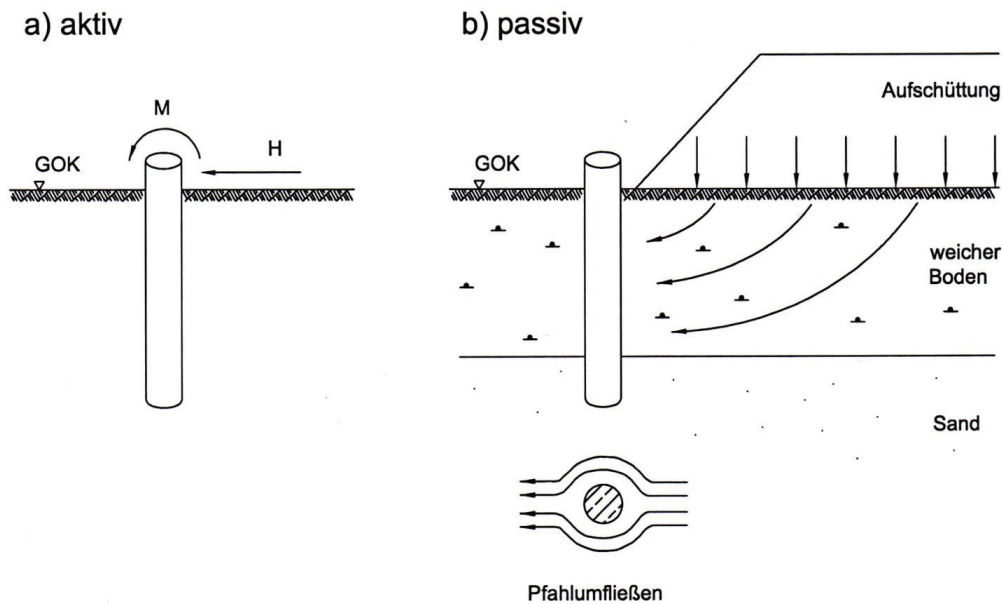


Abb. 3-3: Definition der aktiven und passiven Horizontalpfahlbelastung nach [10]

3.3. Herstellung eines Bohrpfahles

Das Grundprinzip des Bohrens besteht grundsätzlich aus drei gleichzeitig oder nacheinander folgenden Arbeitsabläufen. Damit ein senkrecht oder schräg von der Oberfläche aus in den Untergrund abgeteufter Hohlraum erzeugt werden kann, muss der Boden je nach Lagerungsdichte und Verfestigungsgrad mit verschiedenen Bohrwerkzeugen zuerst gelöst und anschließend aus dem Bohrloch gefördert werden. Parallel zu diesen Vorgängen des Lösens und Fördern ist das Bohrloch in den meisten Fällen gegen ein Versagen der Erdwand zu stützen.

Die Art und das Ausmaß der Sicherung einer Bohrlochwandung sind von dem Zweck, der Nutzung und den im Untergrund vorherrschenden geologischen Bedingungen bei der Niederbringung der Bohrung abhängig.

Bei den Bohrpfählen gibt es eine große Auswahl an Bohrverfahren, die sich während der jahrelangen Entwicklungsgeschichte in der Praxis bewährt und bei der Herstellung der Pfähle ihre Anwendung gefunden haben. Man unterscheidet sie hauptsächlich nach der Bodenart, Sicherung der Bohrlochwand, Fördermöglichkeiten des Bodens und der Art des Betonierens. Tabelle 3-1 gibt eine Übersicht über die gebräuchlichsten Bohrverfahren. Durch einen gezielten Einsatz der spezifischen Verfahren lässt sich eine Leistungsoptimierung beim Herstellvorgang erreichen.

Tabelle 3-1: Übersicht der Bohrverfahren [aus 39 und modifiziert]

Greiferbohrverfahren mit hydraulischer Rohrdrehmaschine (Schlagbohren)			
Hydraulikdrehbohrverfahren (Trockendrehbohren)			
kurze Schnecke / Bohreimer			durchgehende Schnecke (SOB)
verrohrt	unverrohrt		bodengestützt
	standfester Boden	flüssigkeitsgestützt	
Spülbohrverfahren			
Direktes Spülbohrverfahren	Indirektes Spülbohrverfahren	Saugbohrverfahren	Lufthebebohrverfahren
HW-Verfahren			
Jumbo-Verfahren			
Vibrations-Verfahren			

Im weiteren Verlauf sollen die Einsatzmöglichkeiten sowie die wesentlichen Aspekte der oben erwähnten Verfahren im Überblick erläutert werden. Da beim HW-, Jumbo- und Vibrations-Verfahren ebenfalls Greifer und Meißel zum Einsatz kommen, wird aus diesem Grund das Hauptaugenmerk auf die ersten drei Verfahren gelegt.

- **Greiferbohrverfahren**

Beim Greiferbohrverfahren, welches im Laufe der vorliegenden Arbeit noch näher beschrieben wird, handelt es sich um ein intermittierendes Verfahren. Zum Niederbringen der Bohrrohre werden hydraulische Verrohrungsmaschinen verwendet, wobei das Fördern bzw. Lösen mittels eines Greifers bzw. der Lösevorgang von Hindernissen vorwiegend mit einem Meißel stattfindet. Im Vergleich zu anderen Verfahren ist das Schlagbohren fast für alle Böden anwendbar, wobei es hauptsächlich für wechselnde Untergrundbedingungen eingesetzt wird. In Kombination mit einem Meißel bringt das Verfahren in Böden, die durch Inhomogenitäten gekennzeichnet sind, eine erhebliche Leistungssteigerung. Der größte Nachteil dieses Verfahren ist, dass auch dort wo eine Verrohrung nicht gefordert wird, eine solche zur Führung der Bohrwerkzeuge notwendig ist, was mit einem höheren Aufwand beim Herstellungsprozess verbunden ist.

- **Trockendrehbohrverfahren**

Beim Trockendrehbohrverfahren findet die Bodenförderung mittels Bohrschnecken oder mit Bohreimern statt. Durch die Drehbewegung der Bohrwerkzeuge wird der Boden gelöst und anschließend ausgehoben. Der Aushub kann entweder kontinuierlich oder diskontinuierlich erfolgen. Bei den diskontinuierlichen Verfahren (z.B. kurze Schnecke oder Bohreimer) ist der

Löse- und Aushubvorgang voneinander zeitlich getrennt. Für die kontinuierlichen Verfahren erfolgen beide Vorgänge gleichzeitig. Hier kommen z.B. Endlosschnecken zum Einsatz. Im Allgemeinen ist das Drehbohrverfahren für fest bis locker gelagerte, vorwiegend bindige Böden ohne einen erhöhten Wasserandrang gut geeignet. Insofern homogene Untergrundbedingungen vorliegen und keine Verrohrung notwendig ist, übertreffen die Drehbohrgeräte die Bohrleistung des Greiferbohrverfahrens. Im Fall wechselnder Bodenschichten und eventueller Hindernisse wie z.B. Gerölleinschlüsse, Verkittungen, Konglomerate oder mächtige Festgesteinbänke, kommt es zu einer starken Abnutzung der Werkzeuge, wodurch mit einer Leistungsminderung zu rechnen ist.

Das Drehbohren stellt ein mobiles, erschütterungsarmes Verfahren dar, welches auch für städtische Gebiete gut geeignet ist. Als nachteilig erweist sich jedoch die begrenzte Bohrtiefe sowie der begrenzte Pfahldurchmesser.

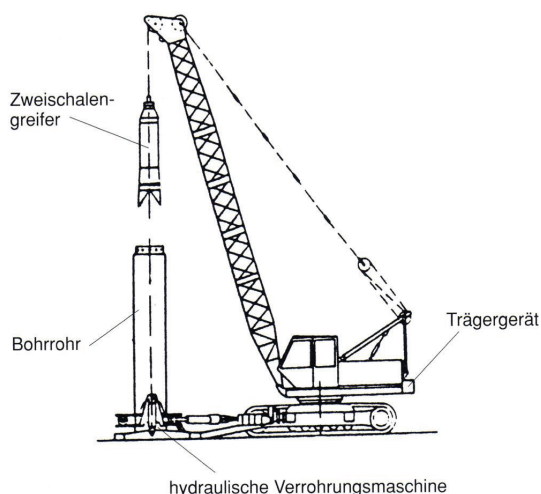


Abb. 3-4: Hydraulikbohrverfahren [39]

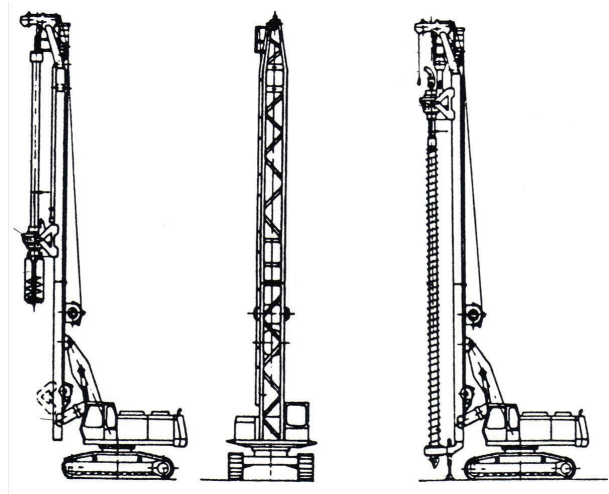


Abb. 3-5: Trockendrehbohrverfahren: kurze und lange Bohrschnecke [39]

• Spülbohrverfahren

Spülbohren stellt ein kontinuierlich arbeitendes Verfahren dar, wo der Boden vorwiegend mit einem drehenden Schneidewerkzeug zuerst gelöst wird, damit anschließend das Bohrklein mittels eines Spülstroms gefördert werden kann. Als Bohrwerkzeuge werden hauptsächlich Flügelmeißel, Rollenmeißel oder Fußerweiterungsschneider verwendet. Beim Spülmedium handelt es sich meistens um Wasser, wobei man zur Stabilisierung der Bohrlochwand oder Verbesserung der Bohrkleinaustragung: Bentonite, künstliche Polymere oder Beschwerungsmittel beimischt. Einige von den Spülbohrverfahren verwenden sogar als Spülmedium ein Flüssigkeit-Luft-Gemisch. Durch den Spülstrom verursachter Transportaustag basiert auf dem Reibungswiderstand der Spülung an der Bohrgutoberfläche.

Das Spülbohrverfahren wird alternativ zum Drehbohrverfahren eingesetzt, wenn größere Tiefen vorgesehen sind. Die Einsatzgrenzen liegen ungefähr beim leichten bis mittleren Fels, wobei das Grundwasser keine Behinderungen verursacht und in manchen Fällen für einen reibungslosen Vorgang sogar unerlässlich ist. Aufgrund des Spülmediums kann eine Verrohrung entfallen. Wegen dem extrem hohen Aufrichtungsaufwand sind diese Verfahren jedoch erst ab größeren Tiefen wirtschaftlich.

- **HW-, Jumbo- und Vibrations-Verfahren**

Beim HW-, Jumbo- sowie Vibrations-Verfahren erfolgt der Bodenaushub mittels eines Greifers, wobei der Hauptunterschied in der Niederbringung der Verrohrung besteht. Dabei wird diese mit Hilfe einer am Rohrkopf montierten Drehschwinge oder mit einem Fallbär bzw. am Rohrkopf oder -umfang angebrachten Gürtelvibrator in den Untergrund eingebracht.

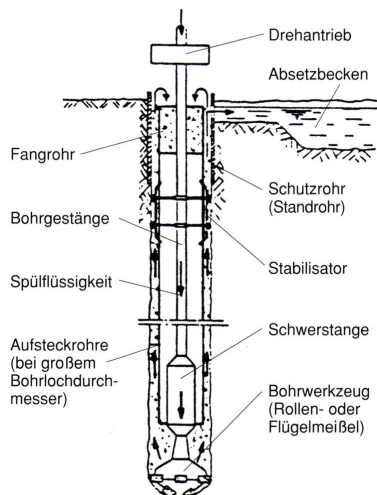


Abb. 3-6: Direkt-Spülverfahren [39]

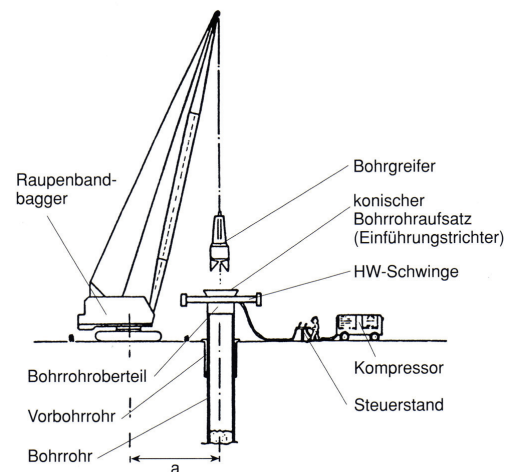


Abb. 3-7: HW-Verfahren [39]

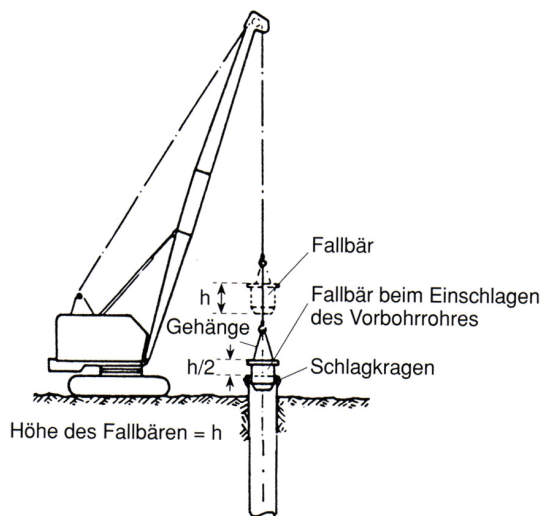


Abb. 3-8: Jumbo-Verfahren [39]

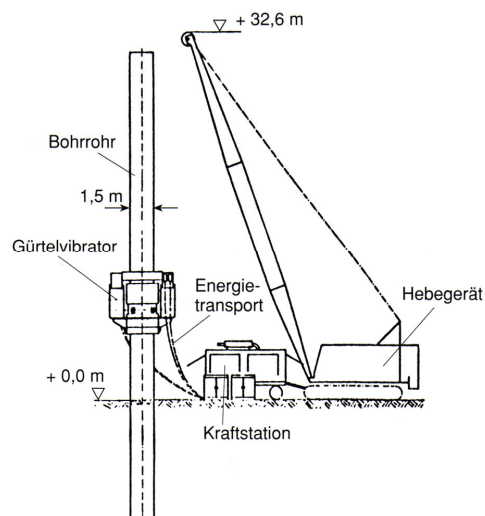


Abb. 3-9: Vibro-Verfahren [39]

4. GREIFERBOHRVERFAHREN (SCHLAGBOHRVERFAHREN)

4.1. Greiferbohrverfahren mit hydraulischer Rohrdrehmaschine

Beim Greiferbohrverfahren (siehe Abb. 4-1) wird das Bohrloch vor allem für Böden geringerer Standfestigkeit im Schutze eines Stahlrohres abgeteuft. Die Verrohrung wird mittels einer hydraulischen Verrohrungsmaschine in den Untergrund oszillierend hineingedrückt. Aufgrund der Drehbewegung vermindert sich die Mantelreibung zwischen der Verrohrung und dem Boden, wobei zusätzlich das Gewicht der Bohranlage als Reaktionskraft genutzt wird.

Das Lösen und die Förderung des innerhalb der Verrohrung eingeschlossenen Bodens erfolgt intermittierend mit Hilfe von Bohrgreifern. Dieses Verfahren ist für die meisten Untergrundverhältnisse gut anwendbar und sogar das Grundwasser stellt kein Hindernis dar. Wenn stark wechselnde Untergrundverhältnisse (Hart –Weich) vorkommen, so sind neben den Greifern zum Lösen auch Meißel zu verwenden. Insbesondere bei solchen Untergrundbedingungen lässt sich aufgrund der Kombinationswirkung beider Werkzeuge ein entscheidender Vorteil gegenüber anderen Bohrverfahren erzielen [6].

Greiferbohren

verrohrt

mit Seilbaggern und Verrohrungsmaschinen

Hauptanwendungsgebiete:

- Böden wie Sande und Kiese, die an die Verrohrungstechnik erhöhte Anforderungen stellen,
- wenn der Einsatz von Fallmeißeln zum Zertrümmern von Fels und Steinen wirtschaftlich sinnvoll ist.

Besonderheiten:

- Systembedingte Erschütterungen erfordern Mindestabstände zu bestehenden Bauwerken.
- Übliche Bohrdurchmesser ca. 620 – 2000 mm.
- Übliche Bohrtiefe bis 50 m.

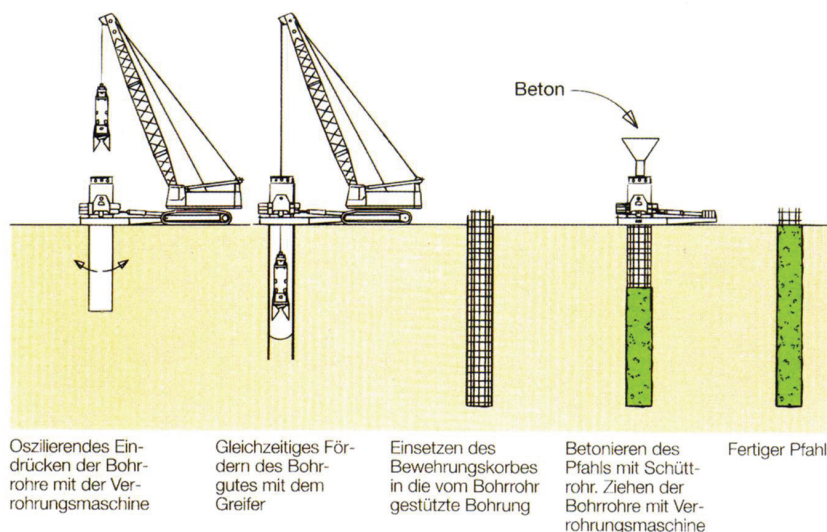


Abb. 4-1: Ablaufschema der Pfahlherstellung mittels verrohrtem Greiferbohrverfahrens [44]

Nach dem Erreichen der vorgegebenen Teufe, wird zuerst der Bewehrungskorb in das von der Verrohrung geschützte Bohrloch eingestellt. Der anschließende Betoniervorgang erfolgt im Kontraktorverfahren beim gleichzeitigen Ziehen des Bohrrohres mit der Verrohrungsmaschine.

Wenn Bohrungen in nichtbindigen, wasserführenden und zum hydraulischen Grundbruch neigenden Böden ausgeführt werden, ist nur in den seltensten Fällen ein standfestes Verhalten des zu durchörternden Bodens zu erwarten. Um dabei das Herausfallen von Einzelkorn bzw. Korngruppen aus der Wandung zu vermeiden und gleichzeitig auch gegen der aus Erddruck und möglichem Wasserdruck resultierenden Kraft entgegenzuwirken, hat sich insbesondere beim Greiferbohrverfahren die Verrohrungsarbeit mittels Bohrrohren als günstig erwiesen. Ihre Aufgabe ist vorwiegend die Sicherung der Bohrlochwand und gleichzeitig soll sie zu einer besseren Werkzeugführung dienen.

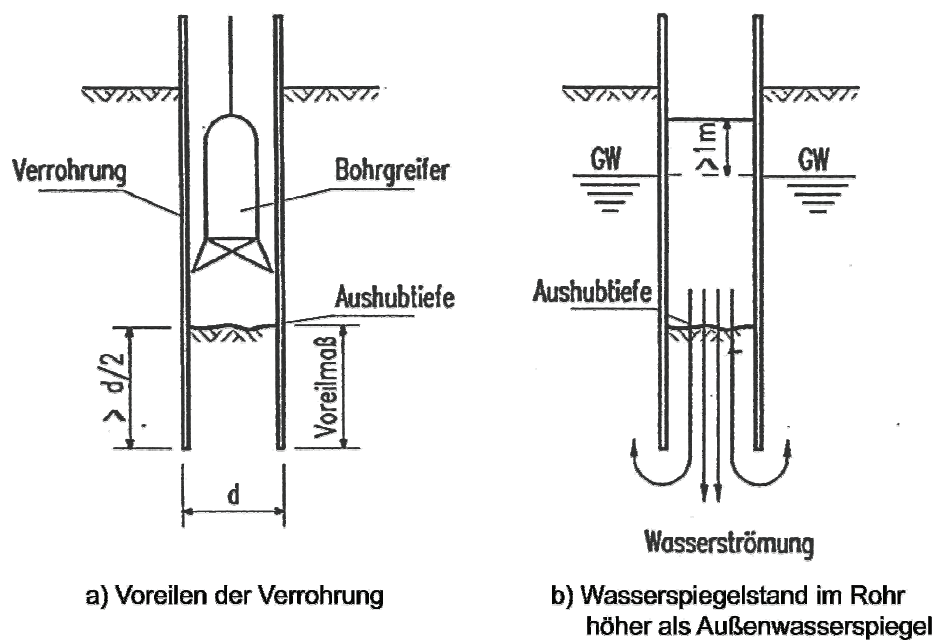


Abb. 4-2: Maßnahmen zur Verhinderung von Auflockerungen beim Aushub [38]

Falls bei den Bohrarbeiten Grundwasser vorkommt, sollte stets ein Voreilen der Verrohrung im Vordergrund stehen. Dabei sollte das Voreilmaß mindestens einem halben Rohrdurchmesser entsprechen (Abb. 4-2). Einerseits verringert man dadurch eine Gefahr des möglichen hydraulischen Grundbruches und andererseits kann infolge der Absperrung des Grundwassers eine höhere Leistung durch das Bohren im Trockenen erzielt werden. Die Schadensursachen infolge des hydraulischen Grundbruches in einem verrohrten Bohrloch, die

durch den beim Abheben der Werkzeuge erzeugten Unterdruck hervorgerufen werden, sind in [12] beschrieben.

Im weiteren Verlauf der gegenständlichen Arbeit sollen die einzelnen Phasen der Sicherung, Bohrlochherstellung sowie die für das Greiferbohrverfahren spezifischen Bohrwerkzeuge näher untersucht und beschrieben werden.

4.2. Bohrröhre

Bohrröhre für die Pfahlherstellung sind aus Stahl gefertigte Rohrelemente unterschiedlichen Durchmessers. Die üblichen Längen der einzelnen Rohrschüsse betragen zwischen 1 bis 8 m. Diese lassen sich dann direkt auf der Baustelle mittels einer Vielzahl an Verbindungsarten auf die erforderliche Länge zusammenbauen. Die üblichen Bohrtiefen liegen zurzeit bei 50 m, wobei man bereits auch Tiefen mit 100 m erreicht hat.

In Abhängigkeit von den angetroffenen Bodenverhältnissen stehen unterschiedlich stark dimensionierte Rohre zur Verfügung, die sich in Bauweise, Verbindungsart, Ausbildung der Schneidschuhe sowie Durchmesser voneinander unterscheiden.

Als Verrohrungssysteme kommen folgende Stahlrohrverbindungen zur Anwendung [8]:

- Schweißverbindung
- Steckverbindung
- Schraubverbindung
- Schnellverbindung

Bei der Pfahlherstellung werden überwiegend nur Stahlrohre mit Schnellverbindung und seltener mit Schweißverbindung verwendet. Stahlrohre, die mit Steck- oder Schraubverbindung zusammengefügt werden, sind überwiegend für Baugrundaufschlussbohrungen in Verwendung.

Um einen reibungslosen Einbau der Verrohrung zu gewährleisten, verwendet man verschiedene Zusatzausrüstungen. Zu solchen gehören die am ersten Rohrschuss montierten Schneidschuhe, die mit Schneidzähnen bestückt sind, wodurch man einen größeren Freischnitt erreicht. Hiermit handelt es sich um spezielle Konstruktionen die ein leichteres Einschneiden bzw. Nachschneiden in den Fels oder stark verfestigte Böden ermöglichen sollen.

Wenn sich die Rohre schon zu einem größeren Teil im Boden befinden, wird entlang der Rohrmantelfläche eine zusätzliche Reibung aktiviert. Aus diesem Grund ist besonders in bindigen Böden auf eine möglichst ständige Bewegung zu achten, da die Mantelreibungskräfte während der Bewegung etwa nur 40 – 60 % der Kräfte aus der Ruhe

heraus betragen. Weitere Möglichkeiten der Abminderung der hohen Reibungskräfte lassen sich durch Zugabe von Gleitmittelzusätzen bewirken, wobei ihre Anwendungsmöglichkeiten überprüft werden müssen. Ebenfalls eine Erhöhung der Rohrauflast wirkt sich positiv auf Niederbringung vom Rohr aus. Dabei sollte man jedoch auf die Oberflächenauflast auf dem Gelände im unmittelbaren Rohrbereich achten. Diese kann nämlich zur Erhöhung des Reibungswiderstandes führen [7 und 30].

Die Stahlrohre sind nach jedem Ausbau und bei jeder Benutzung zu säubern und auf eventuelle Verformungen zu überprüfen. Schmieren der Verbindungen ist mit Sorgfalt auszuführen, weil das Vermischen von Feinteilen mit dem Fett ein Hindernis beim Zusammenfügen der einzelnen Rohrschüsse darstellen kann. Verformungen der Verbindungen können ebenfalls zu Schwierigkeiten beim Verbinden der Rohre führen.

Eine weitere mögliche Schadensursache kann auch durch einen Aufprall der Meißelschneide gegen die Verrohrungswand im Bereich der Bohrlochsohle verursacht werden. Dies ist meistens die Folge einer Schiefstellung vom Meißel, die aus den Unebenheiten bzw. Neigung der Bohrlochsohle resultiert.

4.2.1. *Stahlrohre mit Schweißverbindung*

Verwendung finden diese vorwiegend dünnwandigen Stahlrohre (nahtlos oder längsgeschweißt) mit Durchmessern von 508 bis 2020 mm als verbleibende Verrohrung oder Standrohre. Die Wandstärken sind an den Durchmesser angepasst und betragen üblicherweise 6 bis 10 mm. In den Untergrund werden diese Rohre mittels rein statischer Auflast oder mit Vibratoren niedergebracht, insofern sind Verrohrungsmaschinen für diesen Rohrtyp eher ungeeignet. Der Einsatz von Vibratoren kommt primär für die dickwandigen Ausführungsvarianten, welche jedoch nur beschränkt für verrohrte Pfahlbohrungen verwendet werden können. Als Alternative für den Einbau mittels Vibratoren kann das HW-Verfahren dienen [7 und 8].

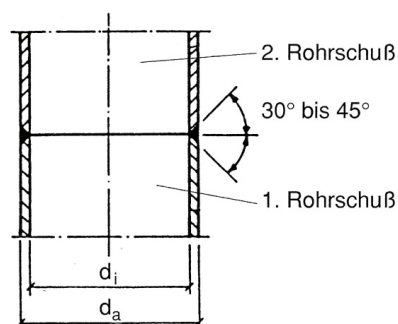


Abb. 4-3: Schweißrohrverbindung bei einwandigen Bohrrohren [39]

Diese Rohre werden nach Möglichkeit in voller Länge eingebracht und können nach Bedarf durch einfache Schweißstöße verlängert werden. Die Schweißverbindungen sind aber sehr zeitaufwendig und stellen oft mögliche Schwachstellen dar, welche beim Einsatz in den Verrohrungsmaschinen zu Sprödbrüchen führen würden.

4.2.2. Bohrrohre mit Schnellverbindungen (Nippelbohrrohre)

Dieser Verrohrungstyp mit Schnellverbindungen hat sich für die Pfahlgründungen besonders gut bewährt und wird daher bis auf wenige Ausnahmen hauptsächlich verwendet. In Abhängigkeit vom Durchmesser betragen die Längen der einzelnen Rohrschüsse im Regelfall zwischen 4,0 – 6,0 und für den Maximalfall 8,0 m. Die meisten Verrohrungen sind innen für einen reibungslosen Werkzeugdurchgang und außen zur Vermeidung erhöhter Reibungswiderstände glatt. Außerdem werden die Rohre zusätzlich mit Schneidschuhen versehen, um ein reibungsloses Niederbringen, sowie das anschließende Ziehen, sofern sie nach dem Betonieren nicht im Boden verbleiben, ermöglichen. Bei diesen Vorgängen sind sie großen Kräften ausgesetzt, die sich infolge der robusten Verbindungen leichter aufnehmen lassen. Außer den großen Zug- und Druckkräften müssen sie noch zusätzlich die aus den Verrohrungsmaschinen herrührenden Drehmomente abtragen können.

Prinzipiell unterscheidet man zwischen zwei wesentlichen Ausführungsvarianten der Nippelbohrrohre (siehe Abb. 4-4), deren Durchmesser zwischen 600 – 2500 (3300) mm liegen kann. Für beide unten angeführten Bohrrohrarten beträgt die Wandstärke von 40 – 60 mm.

- **Einwandiges Bohrrohr**

Dieses Bohrrohr wird durch seine einschalige Rohrwand gekennzeichnet. Demzufolge ergibt sich für die oben genannten Wandstärken schon bei kleineren Durchmessern ein großes Eigengewicht. Aus Gewichtsgründen finden die vollwandigen Bohrrohre überwiegend bei größeren Durchmessern ihre Anwendung, wobei man für die Fußrohre (der erste Rohrschuss) immer doppelwandige Bohrrohre verwenden sollte. Aufgrund der geringeren Torsionssteifigkeit im Vergleich zu der doppelwandigen Variante, lässt sich bei kleineren Durchmessern sowie beim Einsatz in starken Verrohrungsmaschinen eine Verformungsgefahr nicht vermeiden. Daher wird empfohlen bis zu einem Durchmesser von 1500 mm doppelwandige Bohrrohre einzusetzen [24].

- **Doppelwandiges Bohrrohr**

Der Wandaufbau dieser Bohrrohre besteht aus zwei unterschiedlich starken Schalen, wobei die äußere stärker ausgebildet ist. In dem dazwischen liegenden Raum befinden sich in bestimmten Abständen angeschweißte Stahlrippen, die zu einer verbesserten Torsionssteifigkeit sowie einer Gewichtseinsparung beitragen. Aus diesen genannten Gründen sind sie vor allem bei Bohrlöchern kleinerer Durchmesser den vollwandigen Bohrrohren vorzuziehen. Insbesondere bei starker Torsionsbeanspruchung infolge der oszillierenden Drehbewegung, zeigt die doppelwandige Ausführung ihre Vorteile. Aufgrund des geringeren Eigengewichtes ist bei kleineren Durchmessern mit einer besseren Handhabung zu rechnen.

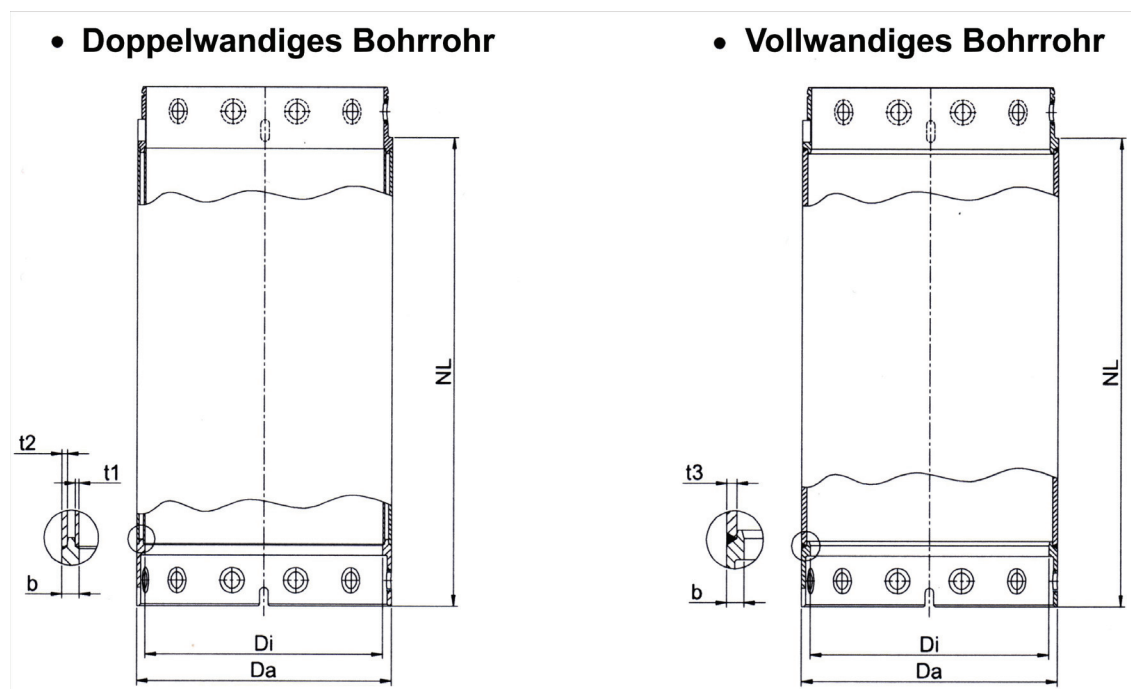


Abb. 4-4: Ausführungsvarianten von Nippelbohrrohren [23]

Das wichtigste Bauelement, welches beide Rohrtypen auszeichnet, sind die aus hochfestem Vergütungsstahl hergestellten Rohrverbindungen (Abb. 4-5), die in der Lage sein müssen, neben den hohen Axial- und Biegekräften auch Torsionsmomente betriebssicher ohne Verformungen über die konischen Flächen des Verschraubungssystems zu übertragen. Die am meisten beanspruchten, austauschbaren Gewinde und Konusringe sind ebenfalls vergütet, da sie einer hohen Abnutzung durch den ständigen Auf- und Abbau unterliegen. Um den Verschleiß möglichst auf ein Minimum zu reduzieren, ist eine weitgehend spielfreie Rohrverbindung erforderlich.

Die Aufteilung der Verbindungen am Umfang des kreisrunden Bohrrohres ist vom Durchmesser abhängig und in den meisten Fällen bestehen sie aus 8 bis 24 Schrauben. Gemäß Herstellerangaben beträgt die Teilungsgenauigkeit der präzise ausgeführten Bohrungen $\pm 0,01$ mm. Nur dank so einer niedrigen Toleranz ist es überhaupt möglich, dass die Rohre in jeder Anordnung stets zusammenpassen. Damit die Bohrungen der Gewindezapfen beim Aufsetzen der einzelnen Rohrverbindungen sofort fluchten, sind diese Verbindungen mit Führungsnocken versehen [8].

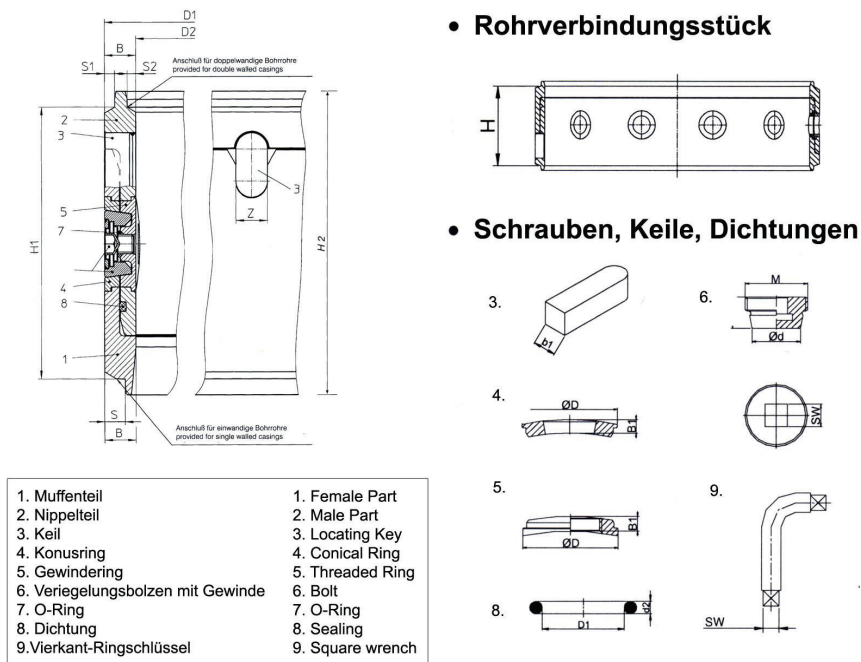


Abb. 4-5: Rohrverbindungselement mit Einzelkomponenten [23, 24 und modifiziert]

Um wasserführende Bodenschichten trocken zu durchbohren können, erhalten die Nippel eine Nut, in die ein Dichtungsring eingelegt wird, so dass man eine gute Dichtheit der Verbindung erzielt. Da jedoch durch den hohen Verschleiß die vom Hersteller angegebene Dichtheit der Verbindungsteile nicht über die gesamte Lebensdauer der Verbindung gewährleistet ist, behilft man sich mit zusätzlichen die Dichtheit erhöhenden Maßnahmen. Aufgrund von Praxiserfahrung wurden einfache und trotzdem wirksame Dichtungssysteme (siehe Abb. 4-6) entwickelt. Das hier erwähnte Dichtungssystem verwendet zum Abdichten der Rohrverbindung einen Filzstoff bzw. ein eingefettetes Dichtungsband. In beiden Fällen werden diese mehrlagig um den Verbindungsstoß gewickelt, wodurch eine Dichtheit erhöhende Wirkung entsteht. Da der Filz nicht wasserundurchlässig ist, dient er vorwiegend als Barriere gegen einen Feinstoffeintrag ins Rohrrinnere. Beim Dichtungsband wird die Dichtheit direkt aufgrund seiner undurchlässigen Wirkung erreicht. Nachdem Aufbringen der Dichtungsbänder auf das Rohr kann der nächste Rohrschuss auf den Verbindungsstoß aufgesetzt und zusammen montiert werden.



Abb. 4-6: Alternativdichtungen [19]: a) Dichtungstextil aus Filz
b) Dichtungsband
c) mehrlagiger Einbau der Dichtungstextilien

4.2.3. Bohrkronen

Beide Bohrröhrentypen können zur Erzielung höherer Schneideleistung mit einer Bohrkronen versehen werden, die am ersten Rohrschuss montiert ist. Das kontinuierlich oszillierende Drehen der Verrohrung ist erst dann wirtschaftlich, wenn der an das Rohr ausgeübte Anpressdruck, die Form und Anordnung der Schneidezähne sowie der dementsprechende Freischnitt sorgfältig gewählt sind.

Der aufgrund des gewählten Schneideschuhdurchmessers erzeugte Freischnitt, muss gerade so viel Platz schaffen, dass sich der vorher unter Spannung stehende Boden im Ringspalt zwischen Rohr und Boden genügend entspannen kann. Wird der Freischnitt jedoch zu klein gewählt, führt es zu einem erhöhten Reibungswiderstand entlang des Rohrmantels. Demzufolge können die erforderlichen Verrohrungskräfte um Vielfaches ansteigen oder es kommt sogar zu einer Verklemmung vom Rohr im Boden. Bei sehr großzügig gewähltem Freischnitt ist eine Auflockerung des umgebenden Bodens in unmittelbarer Nähe der

Verrohrungswand zu erwarten. Dies kann zu negativen Auswirkungen auf die Tragfähigkeit des späteren Pfahls führen. Eine Verklemmung vom Rohr kann auftreten, wenn der Bohrschmant in den Ringspalt hinter dem Bohrrrohr wandert.

Maximaler Freischnitt soll auf den Bohrrohrdurchmesser bezogen 20 mm betragen, besser jedoch 10 mm und stark quellenden Bodenschichten sollten nachgeschnitten werden [30].

Die Form der Schneidezähne hängt vor allem von der Lagerungsdichte und der Bodenart ab. Die einzelnen Rohrschneideschuhe können daher mit unterschiedlichen, zumeist auswechselbaren, hartmetallbesetzten Schneideringen bzw. Schneidezähnen ausgestattet werden, um zufrieden stellende Leistungsergebnisse zu gewährleisten. Besonders wichtig ist eine Verzahnung sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Ebene. Die Anzahl der Zähne wird dabei nach den Drehwinkeln festgelegt. Bei der Auslegung der einzelnen Zähne ist erforderlich, dass sie bei der oszillierenden Bewegung den vor bzw. hinter sich liegenden Zahn noch freischneiden [24 und 30].

In den folgenden Abbildungen (Abb. 4-7 und Abb. 4-8) sind die drei prinzipiellen Ausführungsvarianten der Schneideringe und -zähne dargestellt, die sich direkt am Rohrschuh montieren bzw. anschweißen lassen [20, 21 und 24]:

- **Schneidering mit Stollen**

Diese Anschweißstollen haben einen ausgeprägten Fräseffekt, wodurch sich ein optimaler Freischnitt zufolge der verschränkten Stollenanordnung erzielen lässt. Durch die nach außen verlaufenden Stollenrücken ergibt sich ebenfalls ein guter Rückschneideeffekt

Einsatzbereich: harte rollige und bindige Böden, Fels

- **Schneidering mit Zähnen**

Mit den Schneidezähnen kann ein sehr guter Schneideeffekt erreicht werden. Aufgrund ihrer schlanken Form erzeugen die kantigen Zähne bei der Drehbewegung einen guten innen und außen Freischnitt und sind daher universell einsetzbar.

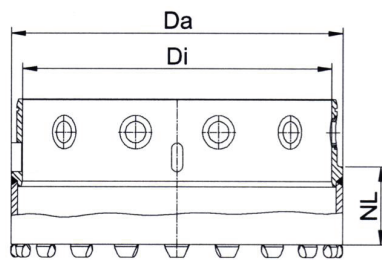
Einsatzbereich: locker und bindige Böden

- **Schneidering mit Rundschaftmeißeln**

Die Rundschaftmeißel haben einen ausgeprägten Schneideffekt. Durch ihre schräge Anordnung ist ein optimaler Freischnitt und gleichzeitig eine gleichmäßige Abnutzung der Meißel gewährleistet.

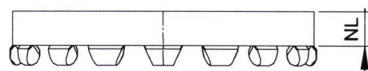
Einsatzbereich: mittelharte bis harte Böden, Fels

- **Rohrschuhe**



- **Schneideringe**

Typ AS mit Stollen



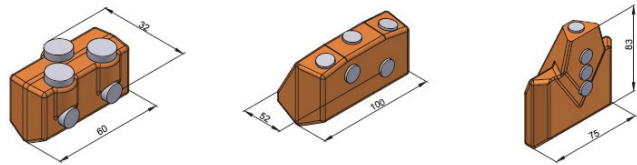
Typ AZ mit Schneidezähnen



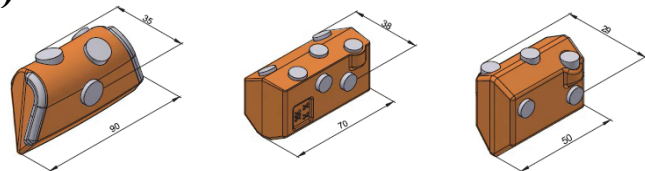
Typ RM mit Rundschaftmeißeln



a)



b)



c)

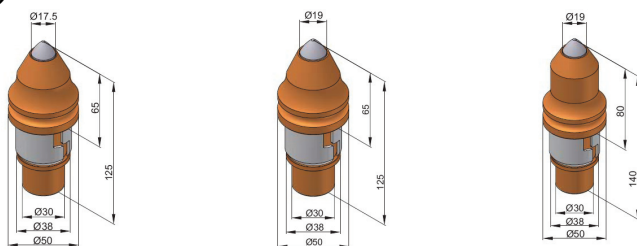


Abb. 4-7: Rohrschuhe mit auswechselbaren Schneideringen [23]

Abb. 4-8: Verschleißteile für Bohrröhre[21]: a) und b) Anschweißstollen; c) Rundschaftmeißel

4.3. Bohrröhrzubehör

4.3.1. Bohrgehänge

Das Bohrgehänge besteht aus einer verwindungssteifen, leichten Stahlblechkonstruktion, die zum schnellen Anschlagen und vertikalen Aufsetzen der Bohrröhre ohne Beschädigung der empfindlichen Gewinderinge dient. Der Einsatz findet für Traglasten bis zu 30 t entsprechend den jeweiligen Rohrdurchmessern statt. (siehe Abb. 4-9)

4.3.2. Rohraufsatztrichter

Der Rohraufsatztrichter schützt einerseits die empfindlichen und teuren Rohrverbindungen am Rohroberteil vor einer möglichen Beschädigung durch die Bohr- und Meißelwerkzeuge und soll andererseits das Einführen der Werkzeuge erleichtert. (siehe Abb. 4-10)

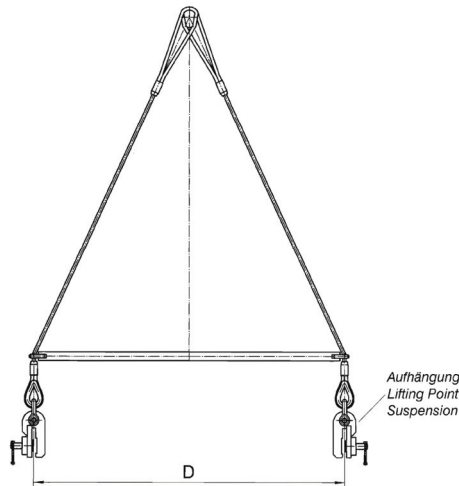


Abb. 4-9: Bohrgehänge [24]

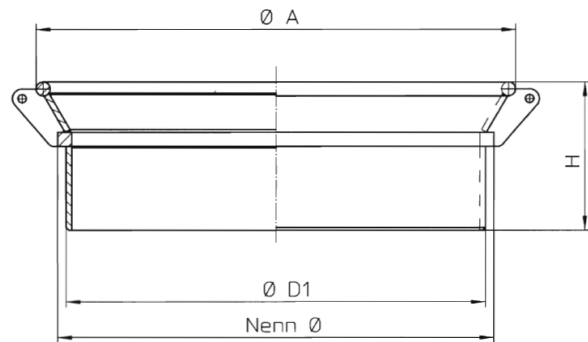


Abb. 4-10: Rohraufsatztrichter [24]

4.4. Verrohrungsmaschinen

Mit Hilfe von Verrohrungsmaschinen wird das Niederbringen der Verrohrung in den Untergrund ermöglicht. Grundsätzlich können diese nach der Bewegungsart beim Einbringen folgendermaßen gliedern werden:

- **Drehende Bewegung**
 - Hydraulische durchdrehende Verrohrungsmaschinen
 - HW-Schwinge (pneumatischer Antrieb)
- **Oszillierende Drehbewegung**
 - Hydraulische Verrohrungsmaschinen
- **Vibrationsbewegung**
 - Vibrationsbär
 - Gürtelvibrator

Im weiteren Verlauf wird das Hauptaugenmerk auf den Aufbau sowie Arbeitsweise der hydraulischen Verrohrungsmaschinen gelegt, da diese primär beim Greiferbohrverfahren eingesetzt werden.

Die hydraulischen Verrohrungsmaschinen sind überwiegend am Seilbagger bzw. Hydraulikbagger montierte Anbaugeräte, die das Abteufen der Rohre durch Drehen und/oder Drücken ermöglichen. Da die Verrohrungsmaschinen meistens über einen Grundrahmen am Bagger momentensteif angeflanscht sind, lässt sich somit eine gute Übertragung der Drehbewegung auf den Rohrstrang gewährleisten. Der Antrieb erfolgt vorwiegend über eine

Baggerhydraulik, wobei auch separate Hydraulikaggregate als eigene Antriebseinheit zum Einsatz kommen.

Von den **hydraulischen Verrohrungsmaschinen (VRM)** haben sich insbesondere die oszillierend arbeitenden Maschinen durchgesetzt, die für Rohrdurchmesser bis zu 3000 mm ausgelegt sind. Beim Einbau werden die Rohre mit einer fünfgliedrigen Spannschelle eingeklemmt und in beide Richtungen gleichmäßig hin- und hergedreht. Damit eine konstante Flächenpressung am Rohr erzeugt wird, müssen die einzelnen Glieder das Rohr wie eine

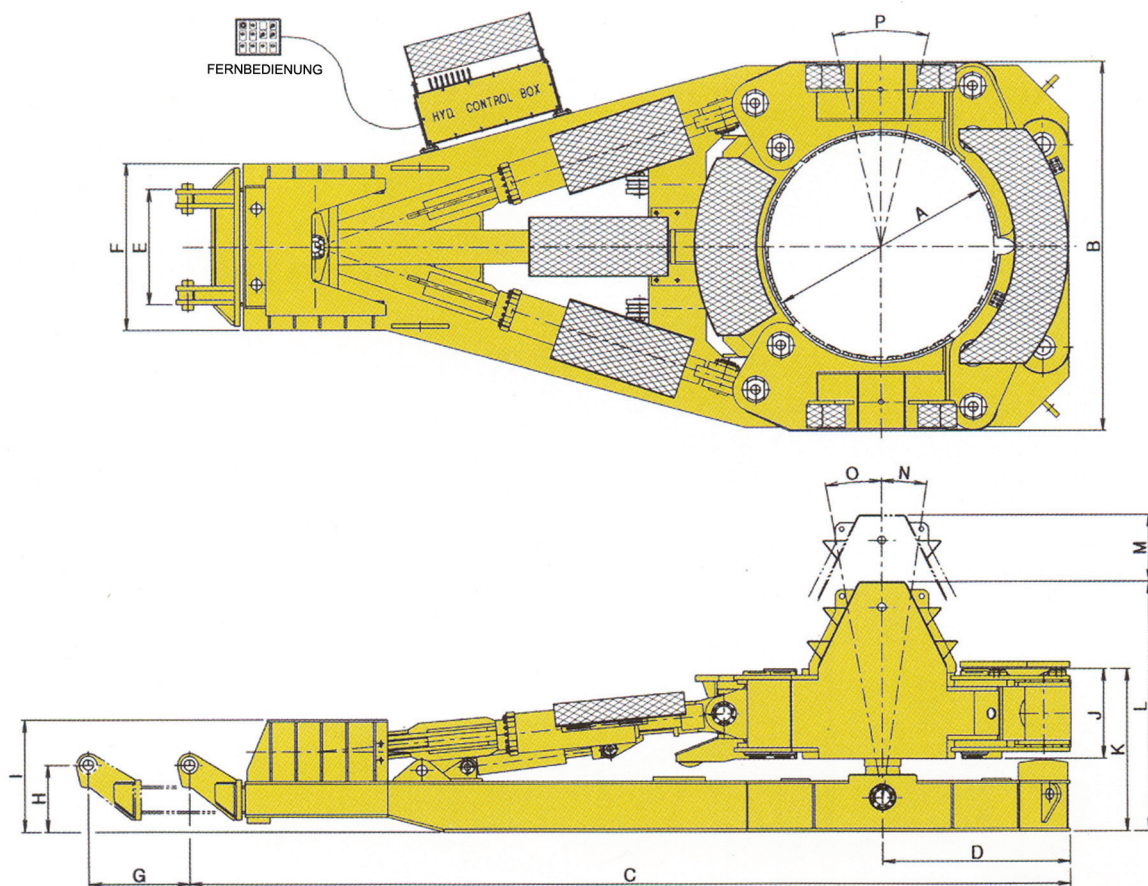


Abb. 4-11: Hydraulische Verrohrungsmaschine (VRM) [22]

Kette umfassen. Hierbei sorgen zwei Hydraulikzylinder für die Ab- und Aufwärtsbewegung und zwei weitere für die oszillierende Drehbewegung. Die erforderlichen Drehmomente und Druckkräfte entsprechen dabei dem Bodenwiderstand an der Schneidekrone und der zu überwindenden Mantelreibung am Bohrrohr. Aus der Drehbewegung resultieren hohe Reaktionskräfte, die sich über die Verbindung mit dem Bagger gut aufnehmen und in den Untergrund einleiten lassen. Gleichzeitig wird auch das hohe Dienstgewicht der Verrohrungsmaschinen als Widerlager für die Vorschubkräfte genutzt, deren Größe dadurch begrenzt ist.

Beim Einsinken heben die Hubzylinder den Maschinenrahmen leicht an, so dass man zur Überwindung des Bodenwiderstandes neben dem Gewicht des Rohres zusätzlich auch noch ein Teil des Maschinengewichtes aktiviert.

Beim Ziehvorgang muss dagegen der Rahmen satt auf dem Planum aufliegen, damit einerseits das Trägergerät die Kräfte gut abtragen kann und andererseits keine unnötigen Biegebeanspruchungen entstehen. In Abhängigkeit von der Verrohrungsmaschine stehen bei den Ausbauvorgängen Zugkräfte bis zu 200 t zur Verfügung. [8, 24 und 39]

Neben diesen oszillierenden Verrohrungsmaschinen werden zum wirtschaftlichen Abteufen von verrohrten Bohrungen mit einem großen Anteil an schweren Böden, die fräsend zu lösen sind, die **hydraulischen Rohrdrehmaschinen** verwendet. Aufgrund der durchdrehenden Bewegung des Rohres lässt sich im Vergleich zu einer oszillierenden Drehbewegung eine zusätzliche Reduzierung der Mantelreibung erreichen. Von Vorteil ist ebenfalls das große Dienstgewicht, wodurch eine höhere Lastaufnahme möglich ist. Trotz dieser Vorteile werden sie überwiegend nur für Sonderzwecke eingesetzt.



Abb. 4-12: Hydraulische Rohrdrehmaschine [25]

5. BOHRWERKZEUGE

Die Auswahl der geeigneten Bohrwerkzeuge und deren effizienter Einsatz haben einen wesentlichen Einfluss auf die Leistung der verwendeten Bohrverfahren. Beim Greiferbohren wird das Bohrwerkzeug – in der Regel ein Bohrgreifer in Kombination mit einem Fallmeißel – am Seil eines Bohrgerätes hängend, meistens im freien Fall auf die Bohrlochsohle hinunter gelassen. Beim Greifer ist der freie Fall jedoch nur bedingt möglich, da die hohen Aufschlagkräfte zu möglichen Schadenursachen am Bohrwerkzeug führen können. Durch diesen Aufprall des spitzen Werkzeuges auf die Bohrlochsohle wird der Boden gelöst und anschließend herausgefördert.

5.1. Allgemeine Begriffsbestimmung; Greifen, Greifer

Aufgrund der unterschiedlichsten Ausführungsvarianten und Einsatzgebiete von Greifern ist es äußerst schwierig eine einheitliche Definition aufzustellen. Nach [9] wird unter Greifen die Grundbewegung verstanden, die ausgeführt werden muss, um mit den Fingern oder einer Hand ausreichende Kontrolle über einen Gegenstand zu erhalten. [43] definiert das Bewegungselement Greifen mit dem Schließen der Finger, um einen Arbeitsgegenstand zu fassen. Der Begriff “Greifen“ bei der Beschreibung technischer Einrichtungen ist dem menschlichen Bewegungsablauf entnommen. Im technischen Sinne sollte die Bezeichnung “Greifen“ eine Verbindung zwischen einer oder mehreren Wirkflächen des Greifers und des Handhabungsobjektes beinhalten. Bei einer verfahrenstechnischen Betrachtung dieser Definition benötigen die Greifereinrichtungen nicht immer zwei Wirkorgane (Zange im industriellen Aspekt), weil sie auch andere physikalische Eigenschaften des Greifers, wie z.B. Greiferform, Materialart, Oberflächenbeschaffenheit, usw., ausnutzen [9].

Unter dem Begriff Greifer wird nach [45] das Teilsystem eines Handhabungsgerätes verstanden, das eine kraftschlüssige Verbindung zum Werkstück bzw. Material herstellt, um seine Position und Orientierung gegenüber dem Handhabungsgerät bestimmen zu können. Die Aufgabe eines Greifers ist es, einen Gegenstand in einer definierten Lage aufzunehmen, zu halten und zu lösen.

Im DUDEN wird die bautechnische Anwendung des Greifers in den Vordergrund gehoben. Der Greifer ist eine aus zwei schaufelartigen, in einem Gelenk beweglichen Schalen bestehende Vorrichtung an Kränen und Baggern, mit der Sand, Steine, Kohle o.ä. aufgenommen und an eine andere Stelle gebracht werden können.

5.2. Bohrgreifer

Die weitverbreiteten Lastaufnahmemittel der Hebezeuge für Schüttgüter sind die Schüttgutgreifer, die das Gut mit Hilfe der Triebwerke der Hebezeuge, vom Bedienenden gesteuert, einigermaßen kontrolliert aufnehmen, transportieren und durch Öffnen der Greiferschaufeln wieder abgeben können [36]. In ihrem Prinzip sowie Arbeitsweise und Gliederung ähneln sie den Bohrgreifern, welche jedoch nur für bestimmte technisch spezifische Aufgaben geeignet sind. Das Hauptunterscheidungsmerkmal der Bohrgreifer stellt ihre zylindrisch gestreckte Geometrie dar, die an die Arbeitsverhältnisse im Bohrloch angepasst wurde. Eigentlich sind sie keine echten Bohrwerkzeuge, es handelt sich hierbei um eine kombinierte Wirkung des schlagenden und greifenden Bohrens. Daher sind sie eher als Aushubgeräte einzustufen. Neben dem primären Verwendungszweck der Pfahlherstellung, finden sie ihre Anwendung auch bei großen Bohrlöchern im Brunnenbau und seltener für Aufschlussbohrungen. Der Haupteinsatzbereich deckt nahezu die gesamte Bandbreite von locker- bis festgelagerten nichtbindigen bzw. mitteldicht gelagerten bindigen Böden ab. Zu solchen gehören Kies, Sand, Lehm, Schluff sowie tonige Erdstoffe, die sich in ihrer Struktur, Lagerungsdichte, Korngrößenverteilung, Wassergehalt, Reibungswinkel und Adhäsionsverhalten unterscheiden. Die Kenntnisse über diese bodenphysikalischen Eigenschaften liefern wichtige Anhaltswerte über den Eindringwiderstand und das Füllverhalten eines Greifers.

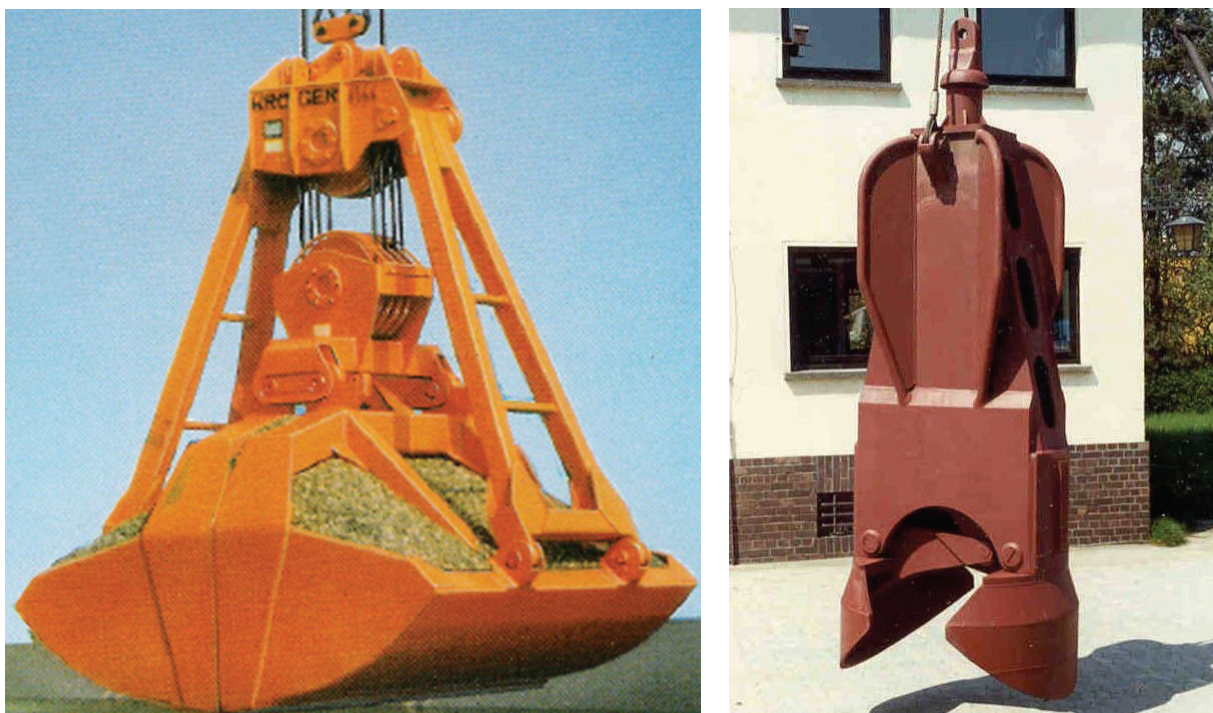


Abb. 5-1: Konventioneller Schüttgutgreifer [26] (links) und HW-Bohrgreifer (rechts) [15]

5.3. Löse- und Füllvorgang eines Greifers

In mehreren Forschungsarbeiten [1], [35] wurde bereits über die Abhängigkeit des Schneide- bzw. Lösevorganges von den physikalisch-mechanischen Eigenschaften des anstehenden Bodenmaterials berichtet. Die verschiedenen Versuche zeigen zwar gewisse Ähnlichkeiten zwischen dem Lösevorgang einer Schaufel eines Radladers und eines Bohrgreifers, trotzdem lassen sich die Kenntnisse aufgrund der unterschiedlichen Mechanik nicht vollständig übertragen. Während des Schließvorganges eines Greifers treten starke elastische Volumenverformungen auf, wobei sich der Boden einerseits entlang der Stahloberfläche der Greiferschaufeln bewegt und/oder andererseits über den bereits aufgenommenen Boden schiebt. Dabei findet eine gegenseitige Wechselwirkung zwischen der metallischen Werkzeugsoberfläche und dem Material statt. Erst nach dem Überwinden der sogenannten Wandreibung kann es zu einem Gleiteffekt kommen.

Aufgrund der hohen dynamischen und statischen Einwirkung des Greifers auf die Bohrlochsohle dringen die Spaten in den Untergrund ein. Durch die Verrohrung vom restlichen Halbraum abgesperrt, erfährt der Boden zur Folge des Eindringvorgangs eine örtliche Verdichtung. Unter der Einwirkung der von Schließmechanik erzeugten Schließkräfte, beginnt eine langsame innenorientierte Bewegung der drehbar gelagerten Schaufeln. Dadurch wird aus der Bohrlochsohle eine Schicht herausgeschnitten, deren Volumen vom Schaufelumriss, der anfänglichen Eindringtiefe der Schaufeln und der von Greiferschneide beschriebenen Bahnkurve abgegrenzt ist. Im Schließzustand, während die Schneide die Schließkurve durchläuft, vergrößert sich schrittweise das Bodenvolumen im Zentrum zwischen den Schaufeln. Mit dem fortschreitenden Schließweg entstehen zwei entgegengerichtete Materialströme, die sich gegenseitig beeinflussen. Je nach Schließzustand werden diese zusammengedrückt und gleichzeitig in vertikaler Richtung nach oben verschoben. Solche Verschiebung erzeugt eine zusätzliche Verdichtung der unteren Schichten des eingesperrten Bodenmaterials und zugleich eine nach unten gerichtete Bewegung. Dabei kann im oberen Materialbereich eine Hebung eintreten. Unter der Krafteinwirkung, die zu diesem Zeitpunkt vorherrscht, verschiebt sich der Boden entlang der möglichen Gleitflächen, wodurch es zu einer Entspannung im oberen Bereich kommt. Damit die Auflockerung auch auftritt, muss zuerst der innere Reibungswiderstand zwischen den Bodenpartikeln oder die Reibung zwischen Boden und Stahloberfläche der Schaufeln überwunden werden.

Die Schaufelbewegung erzeugt gleichzeitig auch eine Hebung des umgrenzenden Bodens, womit sich ein zusätzlicher Widerstand infolge Reibung entlang der äußeren Mantelfläche

aufbaut. Dieser beschriebene Füllvorgang bezieht sich hauptsächlich auf die feinkörnigen Bodenarten.

Böden, für die eher eine grobkörnige Struktur charakteristisch ist, zeigen im Vergleich zu feinkörnigen Böden ein verändertes Schließverhalten. Bezüglich der Kraftwirkung an den Schaufeln, beginnen sich Teile des grobkörnigen Materials in Richtung des geringsten Widerstandes zu verschieben. Diese Umlagerung führt zu einer teilweisen Verdichtung. Die stärker verdichteten unteren Schichten wirken dem Schließvorgang entgegen, in dieser Hinsicht sind die Schneiden gezwungen sich entlang leicht geneigter Schließkurven zu bewegen. Aufgrund der chaotischen Lage der groben Kornfraktionen ist eine höhere Verdichtung zwischen den beiden Schneiden liegenden Materials nicht möglich. Demzufolge geschieht eine teilweise Zertrümmerung oder Wegdrücken der Grobkörner, was eine Schaufelbewegung nach oben, in die Bereiche niedriger Spannung, bewirkt. Wenn größere Steine nicht zerdrücken lassen und zwischen den Schneiden verklemmt bleiben, besteht eine Gefahr des Herausrieselns des gegriffenen Materials.

5.3.1. Einflussfaktoren auf den Löse- und Füllvorgang eines Greifers

Der Füllungsgrad des Greifers wird in erster Linie durch die Dicke der aufgenommenen Schicht und deren Bodenkennwerte bestimmt. Die wesentlichen Einflussfaktoren sind dabei die Kornverteilung, der Wassergehalt und die Dichte des Bodens. Während des Füllvorganges bewegt sich die Greiferschneide entlang einer Schließkurve, die einen starken Einfluss auf die Grabeigenschaften und das Füllverhalten hat. Dieser Vorgang wird durch eine Verdichtung des Bodens und anschließende Zerstörung seiner Struktur begleitet. Wegen der Schaufelbewegung baut sich bis zu einem konstanten Endwert in Abhängigkeit vom Weg und Verschiebungsgeschwindigkeit eine Reibungsspannung auf, die je nach Boden und Zustand einen anfänglichen Spitzenwert erreichen kann. Zur Überwindung des erhöhten Reibungswiderstandes zwischen dem Boden und der Stahloberfläche sind dementsprechend hohe Schließkräfte erforderlich.

5.3.1.1. Reibungswiderstand

An den Berührungsflächen zwischen zwei festen Körpern können Druckkräfte übertragen werden. Ist die Relativbewegung dieser Körper engegengerichtet, so resultiert die vertikale Komponente der Druckkraft in der Kontaktebene wirkende Gleitreibungskraft, deren Vektororientierung gegen die Bewegung gerichtet ist. Die Größe der Reibungskraft wird von

dem Gleitreibungskoeffizienten beeinflusst, der wiederum von den berührenden Materialien und der Oberflächenbeschaffenheit primär abhängt. Dieses Reibungsverhalten lässt sich mit dem Coulomb'schen Gleitreibungsgesetz sehr einfach beschreiben.

Ähnliches Verhalten lässt sich infolge der Kraftimpulse aus der Schließmechanik hervorgerufener Drehbewegung der Schaufeln im Boden beobachten. Beim Schließvorgang wird der Boden einerseits zusammengedrückt und andererseits von der Schaufelschneide aus dem Halbraum herausgeschnitten. Aufgrund des Bodenwiderstands entgegen der Schaufelbewegung, wird auf die Kontaktfläche eine Druckspannung ausgeübt, die zufolge der "Wandreibung" zwischen Stahl – Boden in den eigentlichen Reibungswiderstand resultiert. Um die Schaufeln überhaupt schließen zu können, muss zuerst die Scherfestigkeit des Bodens überwunden werden.

In der Tatsache wird das Widerstandsverhalten des Bodens von mehreren Einflussfaktoren und deren Wechselwirkung zueinander bestimmt. Einige werden hiermit erwähnt:

- **Korngrößenverteilung**

Die Korngrößenverteilung ist ein wesentliches Merkmal. Sie gibt die Auskunft über die Eigenschaften, Zusammensetzung, Porenräume und Verhaltensweise eines Bodens.

- **Scherfestigkeit**

Wenn der Boden unter einer von außen einwirkenden Belastung steht, bewirken die inneren Kräfte des Erdstoffs, vor allem die Scherfestigkeit, die sich je nach Bodenart ändert, den größten Widerstand. Bei rein bindigen Böden korreliert die Scherfestigkeit mit der Plastizitätszahl. Der Reibungswinkel fällt nahezu exponential mit steigender Plastizität des Erdstoffes [1].

- **Lagerungsdichte**

Eine höhere Lagerungsdichte, bewirkt eine bessere Kornverzahnung und somit mehrere Kontaktflächen zwischen den einzelnen Bodenkörnern, in denen sich Haftmechanismen aufbauen. Wie es auch HANSON[17], LUCIUS[33] in ihren Forschungsarbeiten beschrieben haben, erhöht sich die Bruchfestigkeit mit der Dichte. Außerdem zeigen die Untersuchungen, dass mit zunehmendem Wassergehalt der Dichteinfluss stark abnimmt [1].

- **Wassergehalt**

Ebenfalls ein wesentlicher Faktor ist der Wassergehalt. Insbesondere in feinkörnigen Böden erhöht sich mit dem steigenden Wasseranteil auf die Stahloberfläche wirkende Adhäsionskomponente, die nahe der Ausrollgrenze ihr Maximum erreicht. Wenn der

Wassergehalt diese Grenze übersteigt, bildet sich in der Ebene zwischen Boden und Stahl ein Schmierfilm, der das Reibungsverhalten reduziert [1].

- **Stahloberfläche**

Ein weiterer Einflussfaktor ist die Beschaffenheit der Stahloberfläche. Unter anderem hängt das Gleitverhalten von der sogenannten „Wandreibung“ der Schaufeln. Die ansteigende Rauigkeit der Stahloberfläche vergrößert den Gleitwiderstand entlang der Schaufeloberfläche.

5.4. Arbeitsweise und Gliederung

Während des Arbeitszyklus ermöglicht der Bohrgreifer einerseits ein mechanisiertes Aufnehmen und andererseits durch Aufschlagen der Schaufeln das Leeren vom aufgenommenen Material.

Der gesamte Greiferzyklus lässt sich in vier Phasen vereinfacht erläutern (Abb. 5-2). In der Anfangsphase, bevor der Greifer in die Startposition gebracht wird, muss ihn der Baggerfahrer zuerst in die richtige Stellung über dem Bohrloch fahren. Erst wenn der Bohrgreifer in die Verrohrung eingefädelt wurde, werden die Greiferspaten geöffnet. Diese können sich sonst im geöffneten Zustand beim Einfädeln durch einen möglichen Zusammenstoß an der Verrohrung beschädigen. Im Augenblick des Loslassens bis zum Auftreffen auf die Bohrlochsohle befindet sich der Greifer in einem „freien“ Fall, der jedoch durch die maximale Fallhöhe begrenzt ist. Dies ist notwendig, damit der Greifer nicht beschädigt wird. Die unmittelbar darauf folgende Phase ist primär vom Eindringwiderstand der Schaufeln, vom Untergrund und Schließvorgang des Greifers abhängig. Unmittelbar nach dem Eindringvorgang wird der Greifer durch eine Schließbewegung der Schaufeln gefüllt. Im Gegensatz zu anderen Aushubwerkzeugen wird der Greifer nicht von oben befüllt, sondern infolge des „freien“ Falls resultierenden wuchtigen Aufpralls auf die Bohrlochsohle, dringen die Spaten meißelartig je nach Greifergewicht und Festigkeit der anstehenden Bodenschicht unterschiedlich tief hinein und durch deren Zusammenziehen, füllt sich der Greiferinhalt mit überwiegend gelöstem Boden [30]. Beim Schließen der Spaten muss der Greifer die Scherfestigkeit des anstehenden Bodens überwinden. Die erforderlichen Schließkräfte werden konstruktiv durch Hebel-, Flaschenzug- oder mit hydraulischer Übersetzung bewältigt. Die vom jeweiligen Greifertyp abhängige Kinematik erzeugt ein direkt an die Spaten übertragenes Schließmoment, welches für die nötige Schneidekraft aufbringt.

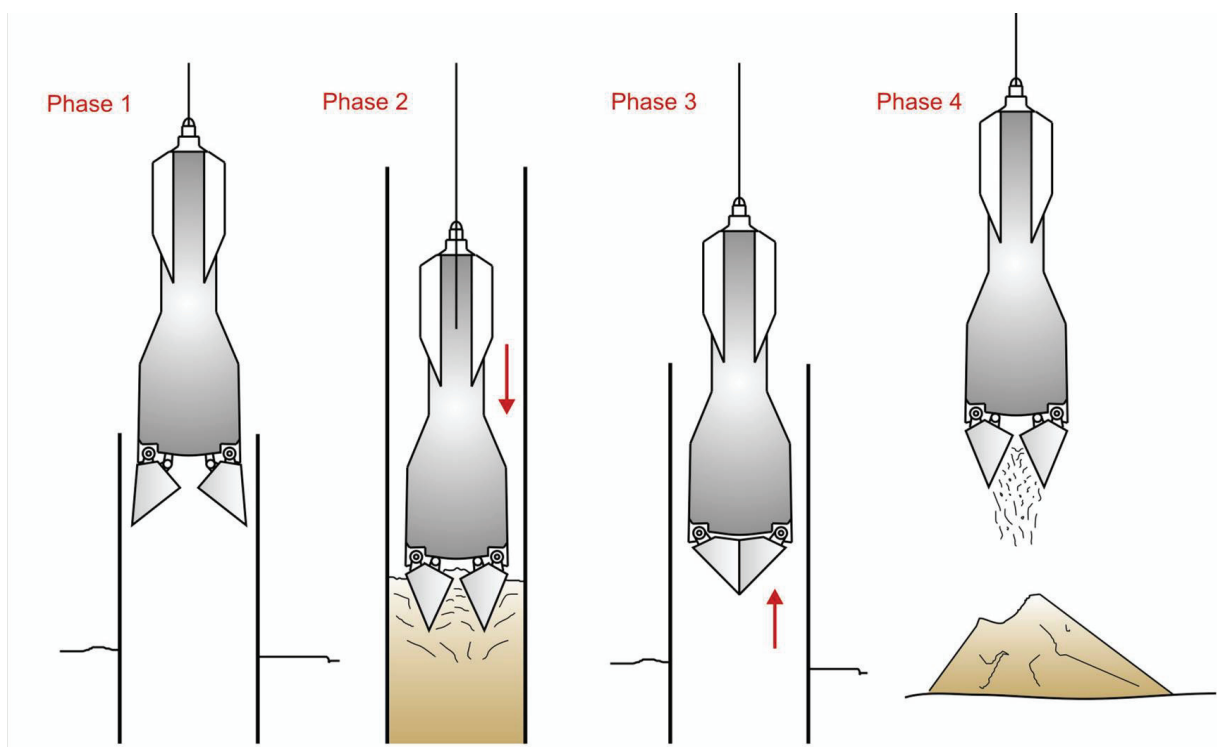


Abb. 5-2: Arbeitsphasen eines Bohrgreifers beim Bohrlochaushub

Nachdem der Schließvorgang abgeschlossen ist, erfolgt eine vertikale Beförderung des im Spateninnenraum eingeschlossenen Bohrgutes. Die Entleerung des Greifers erfolgt beim schwenkbaren Grundgerät (z.B. Bagger) neben dem Bohrloch oder auf die Mulde eines Lkws.

Die Dauer des Greiferspiels ändert sich laufend mit dem Bohrfortschritt durch die Verlängerung des Arbeitsweges. Daher ist es zweckmäßig die erforderliche Gesamtarbeitszeit für die Herstellung eines Pfahles zu betrachten. Das Hauptanliegen liegt stets bei vollständiger Ausnutzung des vorhandenen Füllvolumens durch die richtige Abstimmung des Greifers an die zu erwartenden Bodenverhältnisse und einer gleichmäßigen Füllung, damit eine gute Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens erreicht werden kann.

Die Eignung bzw. Anpassung eines Bohrgreifers an die vorhergesehene Aufgabe und damit zusammenhängende Leistungsfähigkeit ist von folgenden Kriterien abhängig:

- Bauhöhe, Greifergeometrie, Schaufelausführung und Schaufelinhalt
- Verhältnis max. Schließmoment zu Greifergewicht
- Art der Greiferkinematik bzw. Schließkraftübersetzung
- Anforderung an Art und Ausstattung des Hebezeuges

Überlegungen höhere Schließmomente und somit eine Optimierung der Grabwirkung zu erzielen, haben die Entwicklung der Bohrgreifer zu ständigen, konstruktiven und kinematischen Änderungen geführt. Grundsätzlich haben sich nur einige davon durchgesetzt. Die zurzeit für die Pfahlherstellung verwendeten Bohrgreifer kann man unter der Betrachtung des kinematischen Schließmechanismus folgendermaßen gliedern:

- **Mechanische Bohrgreifer:**

- Einseilgreifer
- Zweiseilgreifer

- **Hydraulische Bohrgreifer**

- Hydraulikgreifer

Außer dieser Gliederung kann man die Greifer zusätzlich auch nach ihrer Bau- oder Schaufelform differenzieren. Diese Unterscheidungsmerkmale sind im Laufe der Neuentwicklung aufgrund der Suche nach der optimalen Geometrie und der Anpassung an die vorgefundenen Bodenverhältnisse entstanden. Hierzu werden beispielsweise einige Gliederungsmöglichkeiten angeführt:

- **Nach der Greiferform:**

- Konventionelle Greifer (lange Bauart)
- Vorsatzgreifer
- Torpedogreifer
- Greifer niedriger Bauart

- **Nach der Schaufelform:**

- Kugelgreifer
- Stechgreifer
- Greifer mit Rundschaufeln und Parallelschaufeln

5.5. Mechanische Bohrgreifer

Mechanische Bohrgreifer sind am Seil geführte Greifer, deren Schließmechanismus der Schaufeln mechanisch mittels eines oder mehrerer Seile vom Trägergerät gesteuert wird. Sie stellen das am häufigsten eingesetzte Greiferprinzip dar.

Nach dem mechanischen Aufbau unterscheidet man zwischen zwei Arten, den Einseil- und Zweiseilgreifern.

5.5.1. Schließmechanismus

Der Schließmechanismus wird durch das Schließseil des Greifers ausgelöst und mit unterschiedlichen Mechanismen übertragen. Dies kann dabei auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen:

- **Flaschenzüge:** ein System bei dem das Seil über mehrere Rollen geführt wird. Üblich ist eine 4- bis 7-fache Rollenanzahl.
- **Scherensysteme:** ein System von gelenkigen Übersetzungshebeln.

In Abhängigkeit des Übersetzungsgrades der Schließmechanismen lassen sich die Schließkräfte entscheiden erhöhen.

5.5.1.1. Flaschenzug

Der Flaschenzug ist ein einfaches System aus festen und beweglichen Seilrollen, welches durch einen Seiltrieb die zu übertragenden Kräfte gegenüber der wirkenden Seilkraft um ein vielfaches vergrößert. Dazu werden mehrere Seilstränge parallel zueinander angeordnet. Der Seilstrang verläuft abwechselnd über eine festgehaltene und eine in ihrer Lage bewegliche Flasche, wobei das eine Seilende gemäß der Rollenanzahl an der Unter- oder Oberflasche befestigt ist. Die zwei wesentlichen Grundformen des einfachen Flaschenzuges sind zum einem die schmale, lange Ausführung, bei der die Rollen untereinander angeordnet sind und die breite, kurze Bauform mit parallelen Seilrollen.

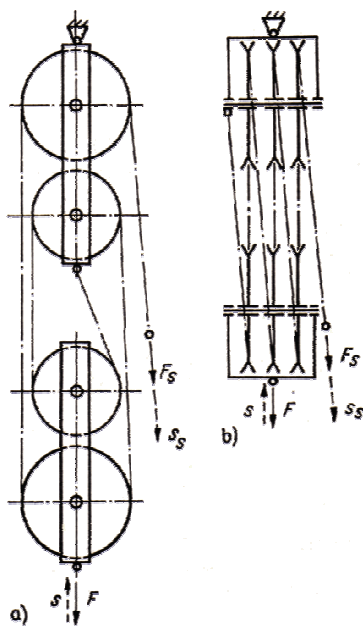


Abb. 5-3: Flaschenzug [48]: a) lange Bauweise
b) kurze Bauweise

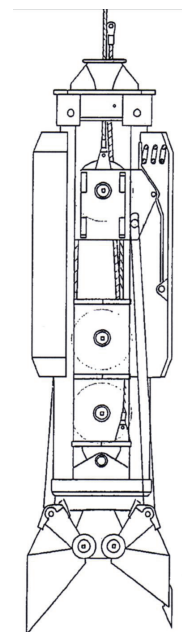


Abb. 5-4: Eingescherter Rollengreifer der Fa. Bauer [20]

Ohne Berücksichtigung der Reibungswiderstände infolge Seil und Rollenlager ist der Betrag der erforderlichen Seilzugkraft gegenüber der zu übertragenden Kraft proportional der Anzahl der tragenden Seile. Für eine Übersichtsberechnung der eingesparten Seilkraft bedient man sich einer einfachen Formel, wo die Rollenanzahl mit z und die Zahl der tragenden Seile dann mit $z + 1$ verstanden wird.

$$i_F = \frac{1}{z+1} \rightarrow i_F = \frac{F}{F_s} = \frac{s_s}{s} \quad (1)$$

F_s ... Seilkraft im gezogenen Seil [N]

s_s ... Weg des gezogenen Seils [m]

F ... Kraft an der losen Flasche [N]

s ... Weg der losen Flasche [m]

Die Kraftübersetzung i_F eines reibungslosen Flaschenzuges ist somit gleich der Wegübersetzung zwischen dem gezogenen Seilstrang und der Höhenänderung mit Hilfe der beweglichen Rolle angehobener Last. Anders ausgedrückt, wird an der Wirkungs- sowie Lastseite des Flaschenzuges bei vernachlässigten Reibungswiderständen gleich große Arbeit geleistet. Die physikalische Arbeit ist wegabhängig und ist als Krafteinwirkung auf einen Körper entlang seiner Bewegungsrichtung definiert. Prinzipiell, ist aufgrund der am Seil und gleichzeitig an den Rollenlagern auftretenden Reibungswiderstände sogar eine höhere Arbeit erforderlich, die das Anheben der Last bzw. Schließen der Schaufeln bewirkt. Zusätzlich muss auch noch das Gewicht der losen Flaschen angehoben werden [16 und 36].

Prinzipiell ermöglicht ein im Greifer eingebautes Rollensystem eine wesentliche Kraftersparnis am Schließseil, wodurch sich besonders in festen Böden Vorteile ergeben. Dies ist aber nur mit einem hohen Übersetzungsgrad möglich. In der Praxis haben sich 4- bis 5-fache und bei großen Rollengreifern sogar 7-fache Rollensysteme bewährt, welche eine Schließkraft erreichen, die dem 4- bis 7-fachen Greifergewicht entspricht.

Im Gegensatz zu der effektiven Krafteinsparung für den reibungslosen Zustand durch den hohen Übersetzungsgrad eines innenliegenden Flaschenzuges, wirkt sich die Lastwegdifferenz der wirkenden Seilkraft nachteilig aus. Letztendlich muss die Seilwinde mehr Seil aufwickeln, damit sich die Spaten schließen können.

Bei den Bohrgreifern ist dieser Effekt der Wegvergrößerung ein nicht allzu großer Nachteil, da beim Schließvorgang nicht die Schließgeschwindigkeit, sondern das an die Spaten übertragene Schließmoment maßgebend ist. Im Gegenteil dazu ist während des Entleervorganges ein schlagartiges Öffnen der Spaten wünschenswert, damit bindige, plastische Böden nicht an der Greiferkonstruktion haften bleiben. Bei den eingesicherten Greifern lässt sich ein Erhöhen der Öffnungsgeschwindigkeit nur infolge einer Gewichtvergrößerung des Greifergrundkörpers erzielen.

Einerseits begünstigt die Anzahl der Rollen die Schließkräfte der Rollengreifer, andererseits wird das beschleunigte Öffnen der Schaufeln dem Einsicherungsgrad proportional untersetzt. Aus diesem Grund sollte die Anpassung der eingesetzten Rollensysteme an die Untergrundbedingungen stets im Vordergrund stehen.

Nicht unerwähnt sollte auch der außerordentlich hohe Seilverschleiß bleiben, einerseits in den Seilrillen der Rollen bzw. durch den großen Umlenkungsgrad und andererseits durch das ununterbrochene Auf- und Abfahren des Seilstranges an den Rollen selbst. Anfällig sind ebenfalls die Rollenlager; heutzutage gibt es schon leichter auswechselbare, aus wartungsfreien „life-time“-Lagern ausgeführte Rollen, die sich günstig auf den Seilverschleiß auswirken.

5.5.1.2. Scherensysteme

Scherensysteme sind mechanische, mehrgliedrige, ebene, symmetrische kinematische Ketten, welche die Schließkräfte über ein gelenkig gelagertes System aus starren Hebeln übertragen. Die Kraftübersetzung von den Übersetzungshebeln an das halbrunde Schaufelpaar erfolgt direkt oder indirekt mittels Gewindezugstangen.

In Abb. 5-5 sind beide Grundausführungsarten ersichtlich, die bis auf die zusätzlichen Gewindezugstangen und modifizierte Übersetzungshebel ähnliche Konstruktionsmerkmale aufweisen. Die erweiterte Variante ermöglicht konstruktionsbedingt größere Schließkräfte, weshalb diese in der Praxis auch trotz höherer Empfindlichkeit der Gewindezugstangen häufiger eingesetzt wird.

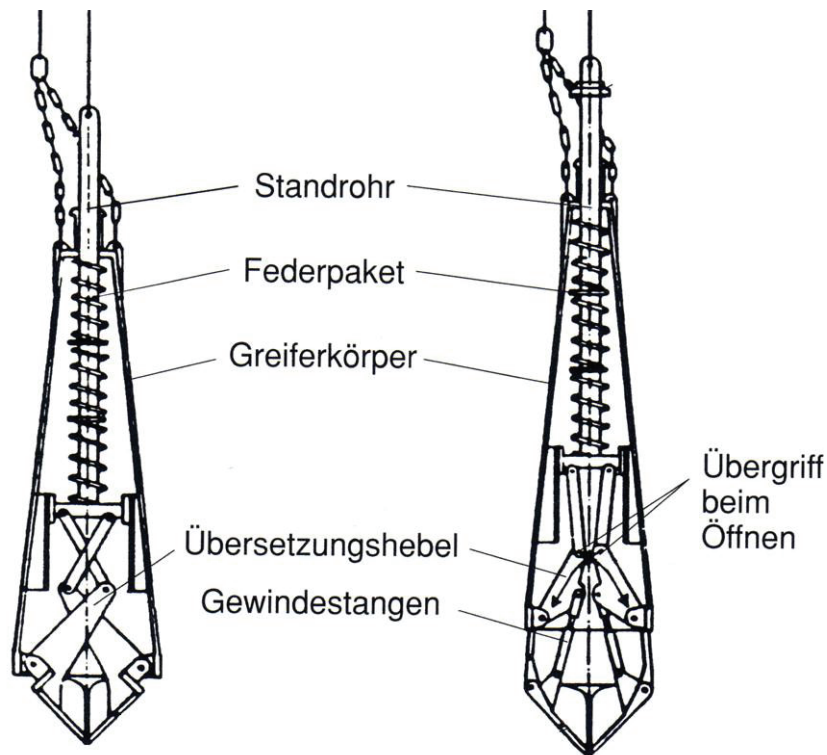


Abb. 5-5: Scherengreifer mit unterschiedlicher Anordnung der Hebelkinematik (ohne und mit Gewindestangen) [39]

Aus konstruktiver Sicht besteht das Scherensystem aus den Lastübertragungsgliedern und den Übersetzungshebeln, die meistens gekreuzt, in einer oder mehreren übereinander liegenden Ebenen angeordnet sind. Das an beiden Enden gelenkig gelagerte Zugstangenpaar, dient als Verbindungsglied zur Kraftübertragung zwischen dem vertikal beweglichen Querträger und den beiden Übersetzungshebeln. Diese sind jeweils über ein Drehgelenk mit dem Greiferkörper fest verbunden, womit ihre Bewegungsfreiheit bis auf die drehende Bewegung um den Hauptpol eingeschränkt ist. Die Übersetzungshebel können direkt an die Greiferspaten angeschweißt oder mittels gelenkig gelagerten Gewindestangen an den Vorsatzspaten über angeschweißte nahezu dreieckförmige Verbindungsbleche verbunden werden.

In seinem Bewegungsverhalten ist das aus Gelenken und starren Hebeln zusammengesetzte System als eine Kombination von Drehbewegung und linearer Bewegung zu verstehen. Damit eine Schließbewegung der Spaten um deren Drehgelenke stattfinden kann, muss auf das System eine äußere Kraft einwirken. Die Änderung der Relativlage erfolgt durch einen Kraftimpuls, der je nach Greiferart entweder durch das Anziehen von Schließseil oder durch die hydraulisch aufgebrachte Kraft ausgeübt wird. Demzufolge überträgt das Standrohr den Kraftimpuls direkt an den in Führungsschienen beweglichen Querträger. Da dieser gelenkig mit den Übersetzungshebeln verbunden ist, werden diese ebenfalls in eine Drehbewegung

versetzt. Die Übersetzungshebel leiten die Kraftimpulse an die Schaufeln weiter, wodurch diese eine große Kraftübersetzung erhalten.

Um die Spaten gegen die Scherfestigkeit des Bodens schließen zu können, ist eine entsprechende Zugkraft am Seil bzw. ein Schließmoment erforderlich, welches gleichzeitig auch vom Greifergewicht abhängt.

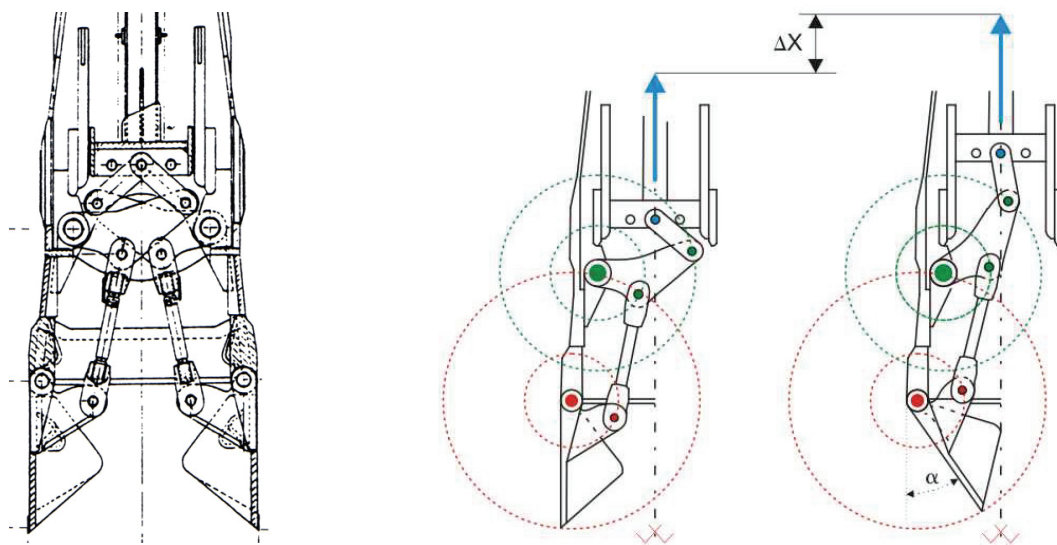


Abb. 5-6: Änderung der Hebelarme der Angriffskraft entlang der kreisförmigen Bahnkurven eines Scherengreifers mit Gewindezugstangen [aus 39 und modifiziert]

Manche Greifer arbeiten überhaupt nur auf dem Prinzip des hohen Eigengewichtes. Anstatt einer Hebelkinematik, die für eine höhere Übersetzung sorgt, befindet sich im Greiferinneren eine sogenannte "slide box" die über gelenkig gelagerte Gewindezugstangen mit den Spaten verbunden ist. Der Schließvorgang tritt durch das Anheben des verschiebbaren Kastens mittels Schließseils ein. Ohne Verwendung zusätzlicher Übersetzungshebel, steht für die Größe der direkt vom Seil erzeugten Schließkraft nur das Eigengewicht des Greifers zur Verfügung.

Der Vorteil einer Hebelkinematik liegt in ihrem hohen Übersetzungsgrad. Aufgrund der drehbaren Lagerung sowie der Form der Übersetzungshebel, haben diese einen wesentlichen Einfluss auf die kreisförmigen Bahnkurven, die von den Gelenken der einzelnen Systemglieder beschrieben werden. Von dem Querträger werden die Zugkräfte über die Verbindungsglieder an den äußeren Randpunkt des Übersetzungshebels übertragen. Demzufolge erhöht sich das Moment bezogen auf den Hebeldrehpunkt gegenüber dem primären Moment, das aus der Zugkraft im Querträger resultiert, proportional zu der Differenz der beiden Hebelarme. Letztendlich kann die erhöhte Zugkraft bzw. Schließkraft in

der Gewindezugstange, die das tatsächliche Schließmoment an den Spaten hervorruft, durch eine günstige Lagerung der Übersetzungshebel fast proportional zum Unterschied der beiden Verbindungspunkte vergrößert werden. Für die Größe des Schließmomentes ist der Hebelarm der Gewindezugstange zum Drehgelenk der Schaufeln maßgebend.

5.5.2. Einseilgreifer

5.5.2.1. Aufbau und Prinzip

Einseilgreifer sind mechanisch arbeitende Bohrgreifer bei denen nur ein Seil bzw. Seiltrieb die Spatenbewegung und gleichzeitig auch den Hub- sowie anschließenden Entleervorgang steuert. Sie haben den Vorteil, dass sie ohne zusätzliche Seilwinde einsetzbar sind. Aufgrund des fehlenden Entleer- bzw. Halteseiles bedürfen sie daher einer besonderen Konstruktion, welche zum Öffnen der Greiferspaten erforderlich ist. Mit Hilfe dieses Verriegelungs- bzw. Auslösemechanismus der Auslösekrone können bei solchen seilbetätigten Einseilgreifern die Schließ- und Entleerbewegungen nacheinander von demselben Seil übernommen werden. Die Krafteinleitung auf die Spaten erfolgt über das Schließseil des Greifers mittels eines eingescherten Rollensystems (Abb. 5-7) oder einer Hebelkinematik, die im Greiferinneren gelagert ist.

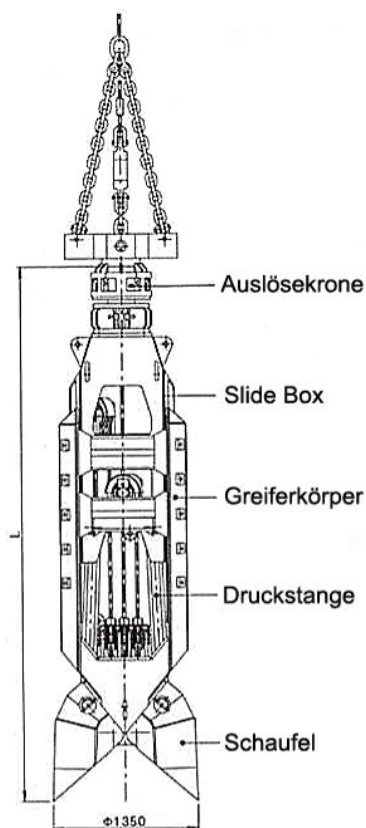


Abb. 5-7: Einseilgreifer [22]

5.5.2.2. Arbeitsweise

Beim Einseilbetrieb wird der Greifer am Anfang des Greiferspiels am Schließmechanismus aufgehängt, im geöffneten Zustand in das verrohrte Bohrloch eingefahren. Mit dem Lösen der Bremse und dem anschließenden Auftreffen des Greifers auf die Bohrlochsohle penetrieren die Spaten in den anstehenden Boden unter gleichzeitiger Entlastung des Schließseils. Aufgrund der Massenträgheit der Winde wird bis zum völligen Abbremsen mehr Seil abgewickelt als der tatsächliche Fallweg ist. Diese Entlastung des Schließseils verursacht ein “nach außen fallen“ der im Gehäusedeckel angebrachten Sperrklinken, die sonst ein selbstständiges Schließen der Spaten verhindern. Durch das Öffnen der Sperrklinken wird der Schließvorgang der Spaten beim Wiederanziehen des Seils ermöglicht. Wenn die Greiferspaten vollständig geschlossen sind bzw. die Schließkraft das Eigengewicht nicht übersteigt, hebt der Greifer von der Bohrlochsohle ab.

Zum Entleeren der Einseilgreifer ist eine spezielle Einrichtung erforderlich, welche an einem Seil oder der Kette eines Hilfstriebes mit dem Ausleger des Trägergerätes verbunden ist. Damit ist eine Anpassung auf die gewünschte Entleerungshöhe möglich. Der Greifer wird soweit angehoben, bis der Greiferkopf an den Haken der Auslöseglocke satt aufsitzt. Der Zweck der Auslöseglocke ist, den in die Entleerungsposition eingestellten Greifer mittels einer Verriegelungsmechanik festzuhalten, ohne dass das Schließseil dabei unter Last steht.

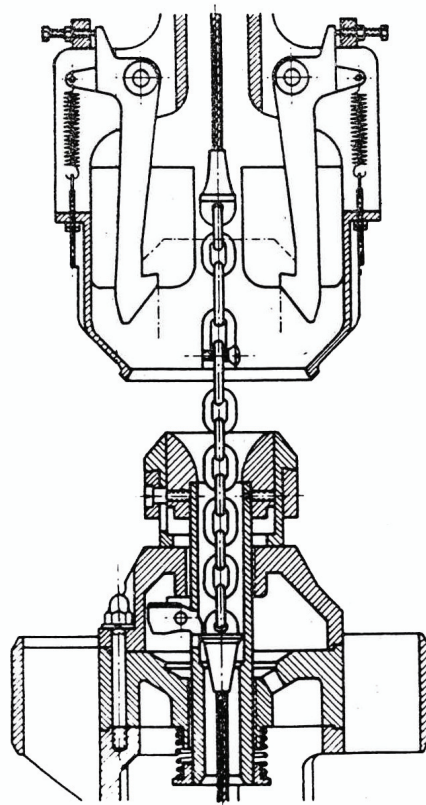


Abb. 5-8: Schnitt durch eine Auslösekrone der Fa. Bade

Während der Greifer in der Auslösekrone hängt, bewirkt ein Nachlassen des Schließseils ein Öffnen der Greiferspaten, wodurch der Entleervorgang eintritt. Bei den Rollengreifern erfolgt das schlagartige Entleeren nur aufgrund des Gewichtes vom Greifergrundkörper, welcher beim Entlasten vom Seil an der „slide box“ hinunter gleitet. Im Gegensatz dazu wird das Öffnen der Schaufeln bei Greifern mit einer Hebelkinematik (Scherengreifer) meistens mittels eines zusätzlichen Federpaketes verstärkt.

Für die richtige Funktion der Einseilgreifer ist also ein spezieller Verriegelungsmechanismus notwendig, der je nach Hersteller in seiner konstruktiven Ausführung sehr unterschiedlich ausgebildet sein kann. Die Abb. 5-8 zeigt ein solches Verriegelungssystem eines Einseilgreifers (Fa. Bade). Dieser sorgt dafür, dass der Greifer einerseits entleert werden kann und andererseits in geöffneter Stellung durch ein leichtes Anheben innerhalb der Glocke wieder freigegeben wird. Durch das Anheben des Greifers sind die Haken gezwungen leicht auseinander zufahren, wodurch der Greifer aus der Auslösekrone herausgefahren werden kann, um für den nächsten Greiferzyklus bereit zu stehen.

5.5.2.3. Einsatzgrenzen

Die Einseilgreifer stellen ein typisches Stechwerkzeug dar, weil nur ein einziger Aufschlag des geöffneten Greifers auf die Bohrlochsohle erfolgen kann, bevor der eigentliche Schließvorgang einsetzt. Somit ist ein mehrmaliges Setzen und Schließen nicht möglich, um damit eine Auflockerung mit schabender Wirkung zu erzielen. Nachteilig kann außerdem die Empfindlichkeit des Verriegelungsmechanismus wirken. Wenn aufgrund eines harten Aufschlages auf eine Wasseroberfläche im Bohrloch ein Entlasten des Schließseils aktiviert wird, führt dies ungewollt zu einem automatischen Schließen der Spaten ohne jeglichen Greifereffekt.

Die Bohrleistung dieses Greifertyps hängt stark von dem Greifergewicht, der Fallgeschwindigkeit und von der Festigkeit des Bodens ab. Die Fallhöhe muss unbedingt an die angetroffenen Bedingungen angepasst werden, weil eine falsche gewählte übergroße Fallhöhe zu Schäden an den Greiferspaten führen kann.

Die Einseilgreifer sind betriebssicher, aber konstruktiv komplizierter als die nachfolgend beschriebenen Zweiseilgreifer, dennoch ermöglichen sie dem Baggerfahrer eine einfachere Bedienung des Greifers. Der Grund dafür ist nur eine Winde, die gesteuert werden muss.

Weiters führt die Notwendigkeit einer Auslöseglocke zu einem langsameren Greiferspiel beim greifen, wodurch sie heutzutage im europäischen Raum nicht so häufig eingesetzt werden.

Ihre Anwendung finden Einseilgreifer überwiegend in locker bis mitteldicht gelagerten, nicht- bis schwachbindigen Böden.

5.5.3. Zweiseilgreifer

5.5.3.1. Aufbau und Prinzip

Wie bereits aus dem Begriff hervorgeht, sind für die Arbeit mit Zweiseilgreifern zwei vom Trägergerät ausgehende, parallel zueinander laufende Seiltriebe erforderlich. Dabei ist ein Seil für Hub- und anderes Seil Schließmechanismus zuständig. Im Zweiseilbetrieb, wird das Hubseil über ein Doppel- Seilgehänge oder ein Doppel-Kettengehänge am Greifergrundkörper angeschlossen, während das Schließseil an dem Schließmechanismus des Greifers gekoppelt ist [39].

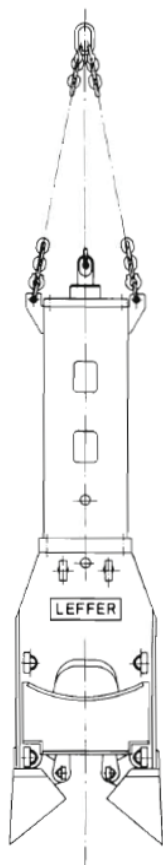


Abb. 5-9: Zweiseilgreifer [24]

Aufgrund der Arbeit mit zwei getrennt gesteuerten Seilen, die dem Baggerfahrer eine präzise Windenregelung abverlangt, sind die Zweiseilgreifer in jeder Höhenlage entleerbar. Das Zusammenspiel beider Seiltriebe verleiht diesem Greifertyp zwei außerordentliche Betriebszustände [8 und 36]:

- **Gleichsinnig mit gleicher Drehgeschwindigkeit:**

Laufen beide Windwerke in gleicher Drehrichtung, so hebt oder senkt sich der Bohrgreifer ohne Schließkräfte an die Spaten auszuüben.

- **Gegensinnig und/oder mit unterschiedlicher Drehgeschwindigkeit:**

Wird das Hubseil festgehalten und das Schließseil geschaltet, öffnet oder schließt sich der Greifer, je nach Bewegungsrichtung dieses Seiles. Bei gegensinnigen Bewegungsrichtungen der Seilwinden und/oder unterschiedlichen Seilgeschwindigkeiten, überlagert sich die Absolut- und Relativbewegung des Greifers.

5.5.3.2. Arbeitsweise

Bei der Vorbereitung auf den Bohrvorgang muss zuerst das Schließseil angezogen werden, damit sich die Greiferspaten schließen können und der Greifer somit problemlos an die gewünschte Stelle gebracht werden kann. An der Rohroberkante über dem Bohrloch, bewirkt ein Entlasten des Schließseils beim festgehaltenen Hubseil ein Öffnen der Greiferspaten. Während dieser Phase übernimmt nur das Hubseil das gesamte Eigengewicht des Greifers. Durch das anschließende Lösen der Windenbremse des Hubseiles beschleunigt der Greifer auf seinem Fallweg und prallt im geöffneten Zustand mit dem vollen Gewicht auf die Bohrlochsohle auf. Da die Beschädigungsgefahr beim Aufprall groß ist, muss immer eine begrenzte Fallhöhe in Betracht genommen werden.

Beim Schließvorgang dreht sich die Schließtrommel im Hubsinne, womit das Schließseil gegenüber dem losen Hubseil angezogen wird, wodurch man eine entgegengesetzte Bewegung der Schaufeln hervorruft. Das Schließen erfolgt über die eingebaute Mechanik gegen die Kraft des Federpaketes. Das vom Schließmechanismus an die Spaten übertragene Moment bewirkt das Aufnehmen des Bodens bis die Spatenschneiden je nach im Boden befindlichen Hindernissen zusammentreffen. Ist der Greifer geschlossen, werden beide Trommelwinden im Hubsinne gedreht. Der Übergang in die Hubbewegung ist eher eine Überlagerung beider Bewegungen und erfolgt unmittelbar nach dem Schließvorgang. Beim Heben hängt der gefüllte Greifer an beiden Seilen, wobei das Hubseil zu diesem Zeitpunkt noch spannungslos ist. Nachdem erreichen der richtigen Entleerposition, wird das Hubseil bzw. dessen Trommelwinde festgehalten, während das Schließseil nachgelassen wird und der Greifer kann

sich entleeren. Dem plötzlichen Aufschlagen der Greiferspaten liegt das Freigeben der Trommelwinde des Schließseiles zugrunde. Unter dem Einfluss des Greifergewichtes, aber vor allem durch das Entspannen des aufgrund des Schließvorganges vorgespannten Federpaketes, wird das Seil von der Winde schneller abgerollt.

5.5.3.3. Einsatzgrenzen

Zweiseilgreifer haben sich im Laufe der Zeit aufgrund ihrer sehr hohen Betriebssicherheit und durch den geringeren Zeitaufwand insbesondere beim Entleervorgang auf dem Markt etabliert. Heutzutage findet der Zweiseilbetrieb bei der Pfahlherstellung aufgrund seiner vielen Vorteile am häufigsten Verwendung. Der Hauptvorteil liegt im schnellen, leistungsfähigen Arbeiten, welches sich auch in schwierig lösbaren Böden bemerkbar macht. Bodeneigenschaften, die den Aushub wesentlich erschweren und an der Grenze des Greifbaren zwischen Greifer und Meißelbetrieb liegen, bewirken einen Leistungsabfall. Um das zu verhindern, ist dieser mittels zwei Seile gesteuerter Greifertyp für solche Bedingungen gut gerüstet. Die Möglichkeit, in jeder Höhenlage die Spaten zu öffnen und zu schließen, erlaubt nach dem Auftreffen auf die Bohrlochsohle ein Hochziehen des Greifers am Hubseil, ohne dass sich die Spaten schließen, um somit einen wiederholten Eindringvorgang zu simulieren. Die Kombination der mehrfachen Meißelwirkung und des mehrmaligen Nachfassens bewirkt ein immer tieferes Eindringen der Spaten in den bereits aufgelockerten Boden und wirkt sich positiv auf den Füllungsgrad aus.

Ihre Anwendung finden Zweiseilgreifer insbesondere in festgelagerten nichtbindigen bis mitteldicht gelagerten bindigen Böden.

5.5.4. Besondere Greifertypen

In den letzten Jahren ist zum Zweck einer verbesserten Arbeitseffizienz eine Reihe von verschiedenen Greifertypen entstanden. In Ihrem Prinzip und Steuerung unterscheiden sie sich kaum voneinander. In den meisten Fällen handelt es sich um Adaptierungen der Greifer- bzw. Schaufelgeometrie. Zu solchen gehören z.B. die Torpedogreifer, deren strömungsgünstige Form Vorteile für den Einsatz im Wasser bringen soll. Weiters gibt es die Vorsatzgreifer, die ein vergrößertes Füllvolumen infolge einer zusätzlichen Vorsatzkrone aufweisen. Eine besondere Form bieten die Kugelgreifer, welche ein wirkungsvolles Alternativwerkzeug zu den konventionellen Freifallgreifern darstellen.



Abb. 5-10: Torpedogreifer [15]



Abb. 5-11: Vorsatzgreifer [15]

5.5.4.1. Kugelgreifer

Die Bezeichnung Kugelgreifer ergibt sich aus der Form seiner Schaufeln. Diese ähneln einer viertel Kugelschale und sind an einer mittigen Drehachse gelenkig gelagert. Die besondere Schaufelgeometrie bedingt ein größeres Fassungsvermögen als das der herkömmlichen Stechgreifer, womit eine bessere Aushubleistung ermöglicht wird.

Der Einsatz erfolgt im Senkbetrieb am Seil eines Baggers geführt. Der Kugelgreifer (Abb. 5-12) besitzt in seiner langen, schlanken Bauart aus massiver Stahlplattenkonstruktion ein hohes wirksames Gewicht. Wegen des großen Eigengewichtes und der modifizierten Schaufelform, werden ein nahezu horizontaler Schließkurvenverlauf sowie außerordentlich hohe Grab- und Schließkräfte erreicht. Dies bringt den Vorteil, dass die Schaufeln immer dicht geschlossen werden und dadurch auch ein mögliches Herausrieseln der nichtbindigen rolligen Erdstoffe unterbunden wird. Vor allem die beim Heben des gefüllten Greifers in einer Wassersäule erzeugte Sogkraft kann ein Auslaufen des Schaufelinhaltes verursachen [27].

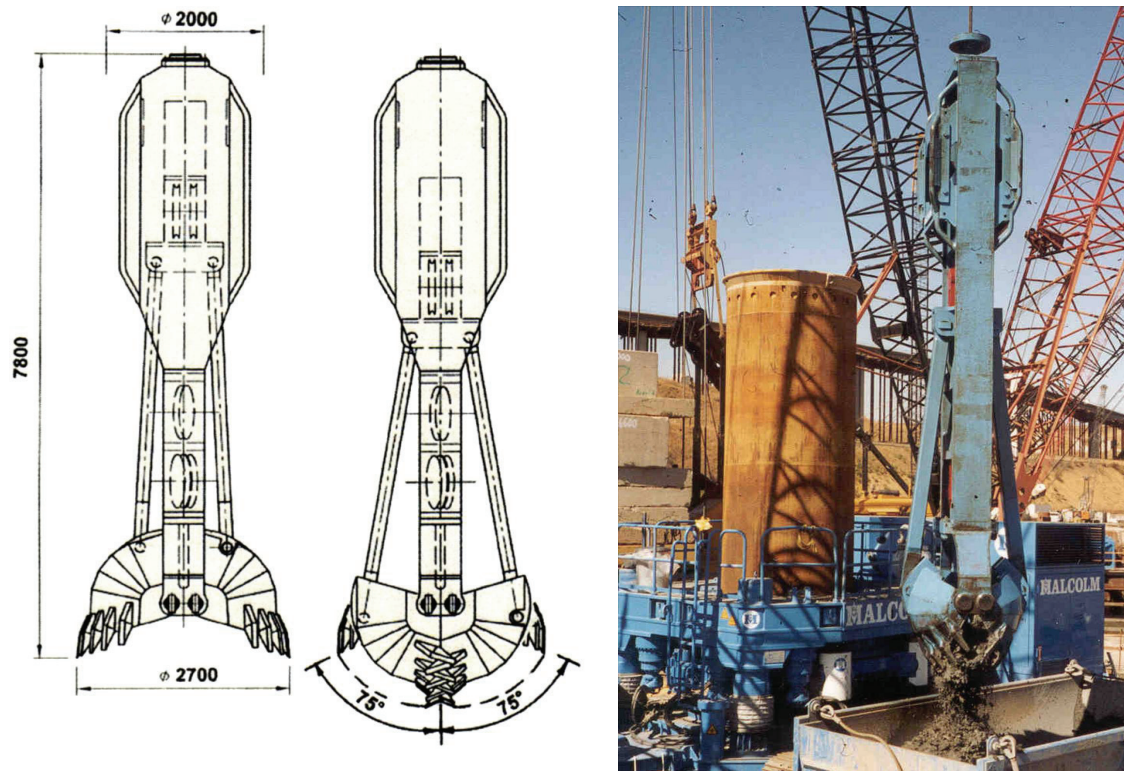


Abb. 5-12: Kugelgreifer [27 und 15]

Dieser Effekt tritt dann ein, wenn sich aufgrund der zu geringen Schließkräfte der konventionellen Stechgreifern, ein Stein zwischen den Spatenblättern verklemmt, der ein vollständiges Schließen verhindert. Da die Schaufeln leicht geöffnet bleiben, lässt sich beim Durchfahren der Wassersäule ein Wegerodieren des Materials durch das abfließende Wasser nicht vermeiden.

Hauptsächlich aus diesem Grund wurden die Kugelgreifer entwickelt, damit infolge der hohen Schließkräfte alle zwischen den Schneiden liegende Steine weggedrückt oder zerbrochen werden können und der aufgenommene Boden vor dem Ausspülen sicher ist. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass beim Hochziehen der gefüllten Kugelgreifer nur geringere Verunreinigung der vorhandenen Wassersäule durch schwebendes Bohrgut stattfindet.

Das primäre Augenmerk der Kugelgreifer richtet sich demzufolge an die Bohrarbeiten unter Wasser, wo sehr gute Leistungen erzielt werden. Bei Arbeiten in sehr dicht gelagerten Böden oder sogar im zerklüfteten, leichten Fels wird durch mehrmaliges Nachfassen an der Bohrlochsohle, der Untergrund derart aufgelockert, dass oft ein Umsetzen auf den Meißelbetrieb gar nicht notwendig ist. Dabei erzeugen die scharfen Schaufelzähne eine wirkungsvolle Reiß- und Grabwirkung, womit sich der Widerstand von scherfesten, bindigen und festgelagerten Böden eher überwinden lässt. In den meisten Böden ergibt sich

hinsichtlich der kugelförmigen Schaufelausbildung ein sehr hoher Füllungsgrad der Schaufeln.

Die Kugelgreifer sind den Schlitzwandgreifern aufgrund des kontrollierten, kraftschlüssigen Senkbetriebes ähnlich. Auf diese Weise lässt sich eine Belastung, so wie sie bei den konventionellen Bohrgreifern vorkommt, vom Trägergerät und der Verrohrung weitgehend reduzieren. Bei Bohrarbeiten erweisen sie sich als äußerst erschütterungs- und vibrationsarm, wodurch sie auch in städtischen Bereichen öfters zum Einsatz kommen. Da die Emissionen aus dem Bohrvorgang in städtischen Wohngebieten oft unerwünscht sind, ergibt sich somit eine gute Alternative zu den Drehbohrverfahren.

Derzeit werden Kugelgreifer primär als Rollen-Zweiseilgreifer eingesetzt, wobei vereinzelt auch hydraulisch gesteuerte Greifer ihre Anwendung finden. Diese besitzen jeweils einen Hydraulikzylinder pro Schaufel, der direkt an dieser angelenkt ist. [39]

5.6. Hydraulische Bohrgreifer

5.6.1. Aufbau

Hydraulikgreifer sind kompakte, robust gebaute an einem Seil geführte Bohrwerkzeuge, welche ursprünglich aus der Schlitzwandgreifertechnik entwickelt wurden. Das Hauptmerkmal ist das im Greiferinneren eingebaute hydraulische Schließsystem, das durch überwiegend vertikal angeordnete Hydraulikzylinder sehr große Schließkräfte aktiviert. Infolge des Aus- und Einfahrens der Zylinder wird eine Schließ- bzw. Öffnungsbewegung der Schaufeln herbeigeführt. Für die Energiezufuhr, d.h. deren Steuerung sind allerdings zwei parallel, auf beiden Seiten des Tragseils geführte Schlauchleitungen erforderlich. Diese werden am Mastunterteil des Trägergerätes angebracht und mit zwei Schlauchaufrolltrommeln auf- und abgewickelt. Die Hydraulikschläuche werden wahlweise mit einem hydraulisch oder mechanisch betriebenen Schlauchzugsystem betätigt. Der gesamte Schlauchaufrollvorgang sowie die Windensynchronisation sind ebenfalls an eine hydraulische Steuerung angewiesen, wobei die Hydraulikversorgung entweder im Baggersystem (Fa. Bauer, Abb. 5-13) bereits inkludiert ist oder bei älteren Baggertypen durch ein externes Aggregat, Steuermodul und Zusatzwinde ersetzt werden kann. Im Gegensatz dazu lassen sich mechanische Schlauchaufrollsysteme, die auf der Basis vorgespannter Federpakete funktionieren, an handelsüblichen Seilbaggern einfach montieren [20 und 8].

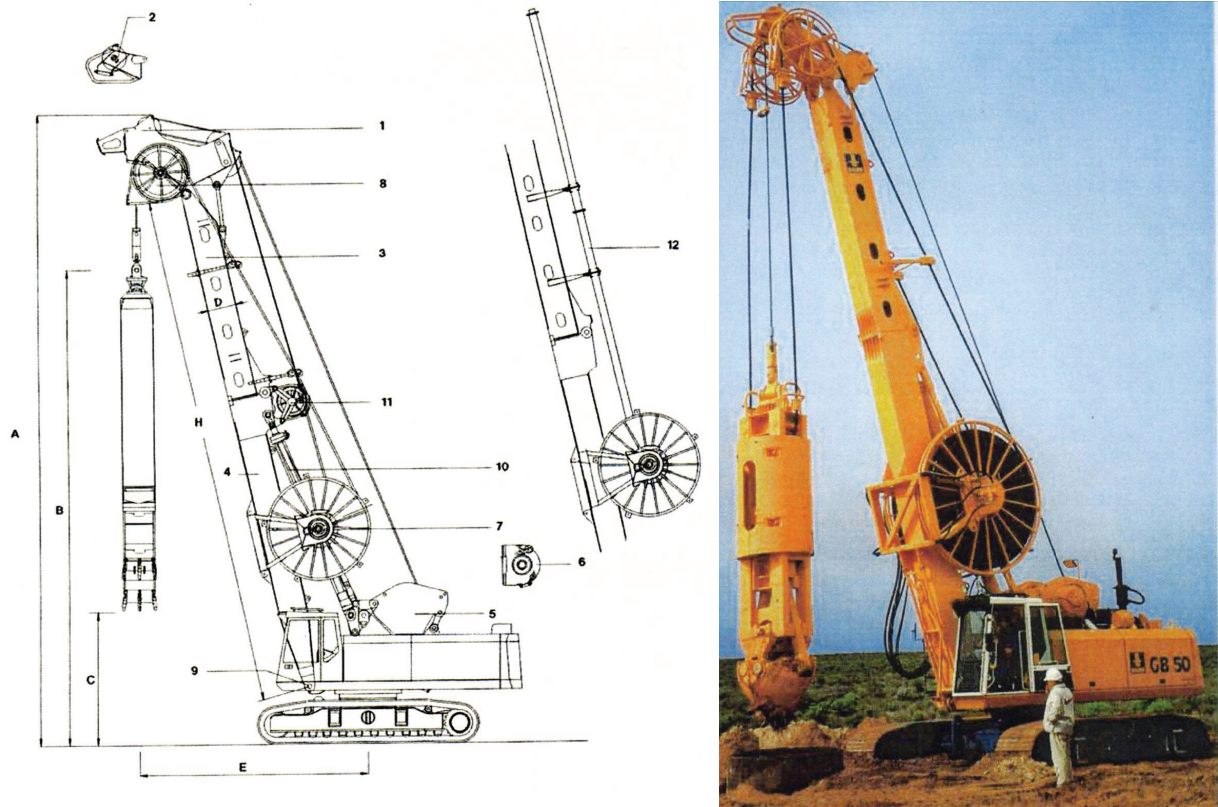


Abb. 5-13: Hydraulikbagger mit Hydraulikgreifer und Zusatzausrüstungen (Schlauchaufrollsystem) [20]

Für die Pfahlherstellung haben sich besonders zwei Hydraulikbohrgreifer gut bewährt, die sich prinzipiell durch die Anordnung und Anzahl der benötigten Hydraulikzylinder unterscheiden (Abb. 5-13). In ihrem Aufbau gleichen sie den konventionellen Seilgreifern, es ist lediglich der Schließmechanismus an Stelle eines Flaschenzuges bzw. einer Hebelkinematik durch einen einzigen zentrisch und vertikal eingebauten Hydraulikzylinder ausgetauscht worden. Das Ausfahren des Zentralzylinders verursacht eine vertikale Verschiebung der höhenbeweglichen Quertraverse an der die am Gehäuse mittig gelagerten Schaufeln mittels eines Druckstangenpaars angelenkt sind.

Die zweite Variante stellt ein System mit hydraulischen Zylindern ausgestatteten Druckstangen dar, die eine Bewegung der Schaufeln um ihr Drehlager ausführen. Aufgrund der mittigen Lagerung der Schaufeln sind die von den Scheiden beschriebene Schließkurven einer Kreisbahn ähnlich, woraus eine gute Füllung resultiert.

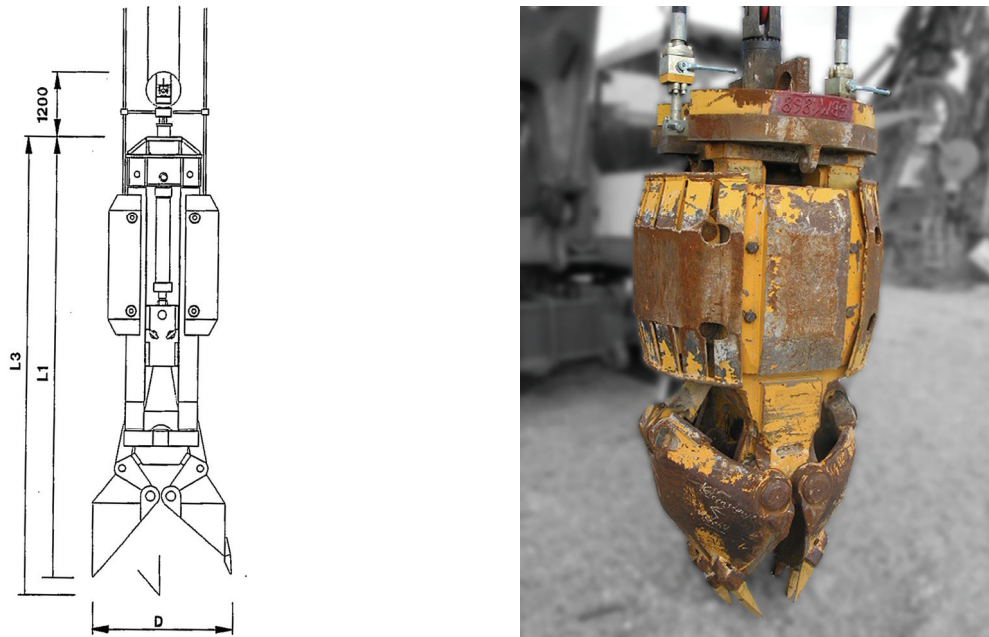


Abb. 5-14: Hydraulikgreifer mit einem Zentralzylinder [20] (links) und mit Hydraulikzylindern ausgestatteten Druckstangen (rechts)

5.6.2. Arbeitsweise und Einsatzgrenzen

Die Hydraulikgreifer müssen immer auf die Bohrlochsohle kontrolliert aufgesetzt werden, da sich sonst die empfindliche Hydraulik im Greiferinneren leicht beschädigen könnte. Damit allerdings ein effektives Eindringen der Schaufeln in den Untergrund erreicht wird, besitzen die hydraulischen Greifer meistens ein sehr hohes Eigengewicht, welches jedoch keinen direkten Einfluss auf den Schließvorgang hat. Aufgrund der Greiferhydraulik ist nämlich eine Trennung der Schließ- und Hubbewegung möglich, wodurch sich die Schaufeln in jeder Höhenlage beliebig oft schließen und öffnen lassen. Daher ist auch der Schließmomentenverlauf nicht mehr vom Greifergewicht abhängig, sondern muss lediglich an die Scherfestigkeit des Bodens angepasst werden. Demzufolge lassen sich über den gesamten Scherweg aufgrund des hydraulischen Antriebs konstant hohe Schließkräfte an den Schaufeln erzeugen. Somit ist eine sehr gute Grabwirkung auch bei dicht gelagerten tonigen Böden, aber auch beim zerklüfteten, leichten Fels gewährleistet.

Beim Entleeren lässt sich die Öffnungsdauer gegenüber dem Schließvorgang konstruktionsbedingt (siehe Kap. 5.6.3.2) ohne besonderen Aufwand entscheidend verkürzen. Es wirkt sich vor allem beim Entleeren adhäsiver Böden positiv aus.

Aufgrund der präzisen und einfachen hydraulischen Steuerung und der fast unbegrenzten Schließkräfte können die Einsatzgrenzen und Leistungsfähigkeit dieser Bohrwerkzeuge

weitaus über die der konventionellen Bohrgreifer erweitert werden. Somit stellen sie eine interessante Alternative für die gebräuchlichen mechanischen Greiferarten dar.

Die Betriebssicherheit der Hydraulikgreifer hängt ausschließlich von der Hydraulikanlage ab. Heutzutage ist nämlich die mögliche Umweltbelastung ein essenzieller Aspekt bei der Wahl der einzusetzenden Systeme und Verfahren. Die Beseitigung von Umweltschäden ist sehr kostenintensiv und daher sollte dem ökologischen Denken genügend Beachtung gewidmet werden. Aus diesem Grund ist das mögliche Schadstoffpotential bei einer Leckage durch Ausfließen der Hydraulikflüssigkeit zu erwähnen. Besonders bei beengten Arbeitsverhältnissen sollte auf eine mögliche Verletzungsgefahr der Hydraulikschläuche durch Abscheren, Knicken, Zerquetschen, usw. geachtet werden. Die Gefahr der Umweltverschmutzung lässt sich ebenfalls durch den Einsatz der überwiegend umweltfreundlichen Mineralöle reduzieren.

5.6.3. Hydraulisches Prinzip des Greifers

Hydraulikanlagen dienen zur Umwandlung mechanischer Leistung eines Verbrennungs- oder Elektromotors in hydraulische Leistung. Diese wird wiederum über ein komplexes, aus unterschiedlichen Hydraulikkomponenten bestehendes System weiter transportiert, geregelt, gesteuert und anschließend wieder in mechanische Energie umgesetzt. Die hydraulische Leistung hängt von dem Produkt zweier physikalischen Größen ab: Druck und Volumenstrom der Flüssigkeit. Aus der Theorie des Pascal'schen Gesetzes geht hervor, dass sich der Druck in einer eingeschlossenen Hydraulikflüssigkeit nach allen Richtungen gleich fortpflanzt, d.h. Energieübertragungen durch Flüssigkeiten ermöglichen eine große Kraftsteigerung. Für die Nutzenanwendung ist jedoch nicht alleine die Kraft der entscheidende Faktor, sondern viel mehr die geleistete mechanische Arbeit, weil das System nicht im Stande ist mehr Arbeit zu leisten als in das System hineinfließt [32].

Der Funktionsablauf eines Hydrauliksystems wird anhand von Abb. 5-15 vereinfacht geschildert. Wie der Abbildung zu entnehmen ist, besteht ein hydraulischer Antrieb eines Hydraulikgreifers aus Antriebsmotor, Ölpumpe, Ölbehälter, Hydraulikleitungen, einer Reihe von Ventilen, darunter auch das für die Steuerung des Hydraulikzylinders so wichtige Wegeventil (Steuerungsventil) und natürlich dem Energieträger selbst. In der Regel kommen hauptsächlich als Hydraulikflüssigkeit Mineralöle zum Einsatz, die eine Reihe von Funktionen zu erfüllen haben. Aus Gründen des immer stärkeren Umweltbewusstseins

versucht man gezielt umweltfreundliche Stoffe auf der Basis vom synthetischen Ölen sowie auch Bio-Öl (Rapsöl) einzusetzen.

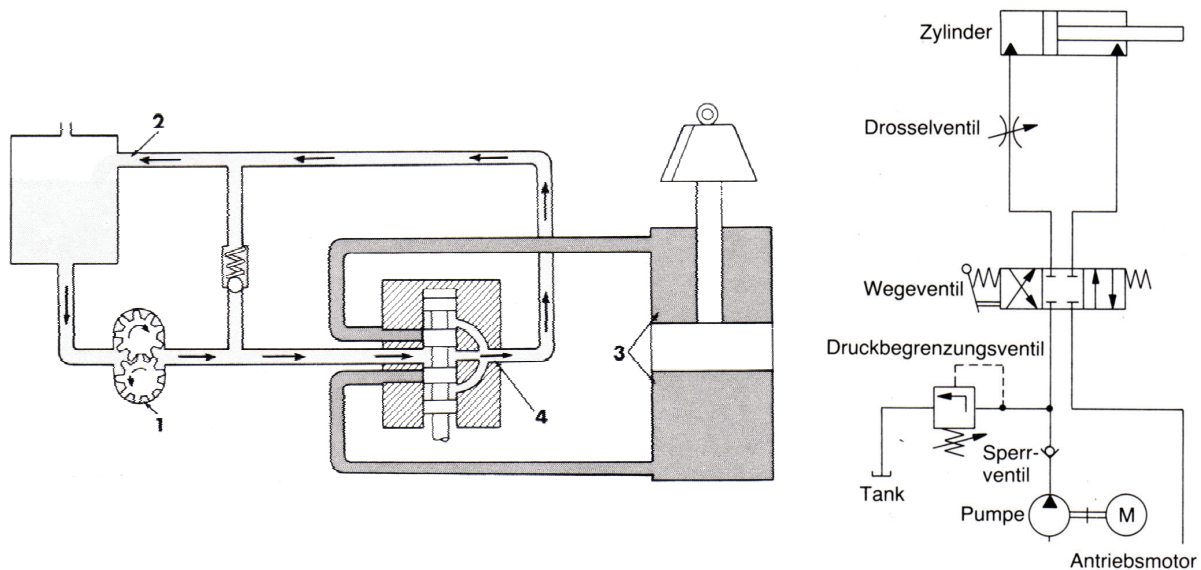


Abb. 5-15: Schema eines Hydrauliksystems mit Druckbegrenzungsventil und einem doppelwirkenden Hydraulikzylinder [32]

5.6.3.1. Funktionsweise der Hydraulikanlage

Eine wichtige Voraussetzung, um ein fortlaufendes Arbeiten zu gewährleisten, ist ein geschlossener Kreislauf für die Hydraulikflüssigkeit. Zur Erzeugung des Förderstroms ist eine Pumpe (z.B. Zahnrad-, Kolbenpumpe) erforderlich, die über den Dieselmotor des Baggers oder ein getrenntes Hydraulikaggregat angetrieben wird. Der Antriebsmotor erzeugt ein mechanisches Drehmoment, welches in der Hydraulikpumpe über den Betriebsdruck und das Hubvolumen in hydraulische Energie umgewandelt wird. Beim Einsatz von einfachen Kolbenpumpen sind im Saug- sowie Druckraum Ventile anzuordnen, die diese beiden Räume gegeneinander abdichten. Außerdem benötigen solche Hydraulikanlagen einen zusätzlichen Überlastungsschutz. Wenn der Arbeitsdruck zum Heben einer bestimmten Last den Betriebsdruck übersteigt, so öffnet sich das Druckgeberventil und das Öl kann in den Öltank unbehindert fließen. Im Normalfall strömt das Öl zum Steuerungsventil, welches für die Richtungsänderung der Ölströme zuständig ist.

Da es sich bei dem Arbeitskolben um einen doppeltwirkenden Kolbenzylinder handelt, ist zur Steuerung meistens ein Drei-Wegeventil erforderlich. Wie der Name besagt, kann das Steuerungsventil während des Betriebs drei unterschiedliche Stellungen einnehmen [32, 34 und 36]:

- **Position 0 (Neutralstellung)**

stellt einen Zustand dar, bei dem die Verbindung des Primärkreislaufes mit dem sekundären Kreislauf unterbrochen ist. In geschlossenen Hydrauliksystemen baut sich somit zwischen der Pumpe und dem Steuerungsventil der volle Arbeitsdruck auf. Die Regelung kann entweder über die Pumpe selbst oder mit Hilfe eines Druckgebertils erfolgen. Dies hat den Vorteil, wenn ein Verbraucher eingeschaltet wird, lässt sich der Zylinder sofort mit vollem Arbeitsdruck belasten.

- **Position 1**

wird infolge der nach oben gerichteten Bewegung des Schiebers im Steuerungsventil hervorgerufen. Somit wird der Ölstrom zu dem oberen Zylinderraum des doppeltwirkenden Kolbenzylinders umgeleitet. Angesichts der Inkompressibilität der Flüssigkeiten, drückt der Öldruck den Kolben nach unten, wobei aus dem unteren Zylinderraum genau das gleiche Volumen in den Rücklauf entweichen muss wie oben zuströmt. Das Öl fließt über die Rücklaufleitungen in den Vorratsbehälter, wo es sich abkühlt und von der Luft entmischt.

- **Position 2**

stellt sich ein, wenn der Steuerungsschieber nach unten gebracht wird. Somit öffnet sich der Weg für den Förderstrom in die untere Zylinderkammer und drückt den Kolbenzylinder nach oben. Dabei ist jetzt der Zylinderraum über dem Kolben mit der Rücklaufleitung verbunden.

5.6.3.2. Hydraulikzylinder

Der Hydraulikgreifer ist mit der Hydraulikanlage über am Bagger geführte Hydraulikschläuche verbunden, die aufgrund der starken Belastung aus dem Betrieb eine ausreichende Flexibilität und Dauerhaftigkeit ausweisen müssen. Die Schlauchleitungen leiten den Förderstrom direkt zu den Hydraulikzylindern, welche die mechanische Schaufelbewegung des Greifers verrichten. Die Arbeitszylinder bestehen aus doppeltwirkenden Scheibenkolben (Abb. 5-16) mit einseitiger Kolbenstange und können somit die Kraft in zwei geradlinige Richtungen abgeben. Zuzufolge der unterschiedlich großen wirksamen Kolbenflächen wird beim Schließen der Schaufeln bewusst die Kolbenstange herausgedrückt, um mit konstantem Druck die größte Kraft und bei konstantem Förderstrom die niedrigste Bewegungsgeschwindigkeit zu erzielen. Dagegen zum Öffnen, wird die um den Flächenanteil der Kolbenstange verminderte Fläche beaufschlagt, was beim gleichen Volumenstrom infolge der geringeren wirksamen Kolbenfläche zwar eine Kraftabnahme bewirkt, aber die zum Entleeren so wichtige Geschwindigkeit erhöht [32 und 36].

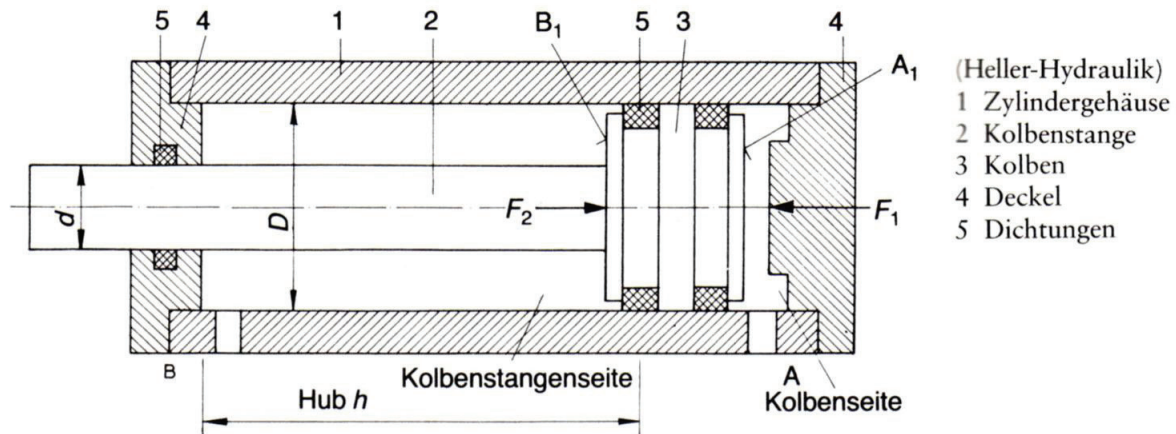


Abb. 5-16: Doppelwirkender Hydraulikzylinder (Differentialzylinder) [32]

Eine weitere Möglichkeit wie sich die Öffnungsgeschwindigkeiten erhöhen lässt, stellt in den Kreislauf eingefügtes drosselgesteuertes Rückschlagventil dar. Dieses soll während des Öffnens des Greifers das zurückströmende Öl direkt in den Zylinderraum umleiten, um somit einen höheren Förderstrom zu erzeugen, wodurch natürlich auch die Geschwindigkeit ansteigt [36].

Mit dieser Art von Zylindern lässt sich die Forderung einer hohen Schließkraft und gleichzeitig einer schnellen Entleerbewegung der Greiferschaufeln einfach erfüllen. Aus Gründen eines möglichen Unterwassereinsatzes, sind die Antriebsteile und die Greifergelenke wasserdicht gekapselt.

5.7. Gegenüberstellung: mechanische vs. hydraulische Bohrgreifer

Tabelle soll die Gegenüberstellung der drei wichtigsten Bohrgreiferarten und deren wesentliche Unterscheidungsmerkmale näher erläutern:

Tabelle 5-1: Gegenüberstellung der mechanischen und hydraulischen Bohrgreifer

	Mechanische Bohrgreifer		Hydraulische Bohrgreifer
	<i>Einseilgreifer</i>	<i>Zweiseilgreifer</i>	<i>Hydraulikgreifer</i>
Einsatzgrenzen	locker bis mitteldicht gelagerte nicht- bis schwachbindige Böden	mitteldicht gelagerte nichtbindige bis schwachbindige Böden	festgelagerte nichtbindige bis dicht gelagerte Böden und verwitterter, leichter Fels
Unterwassereinsatz	befriedigend	gut	gut
Steuerung	mittelschwer; Einseilsystem	schwer; Zweiseilsystem	einfach; Hydrauliksystem
Betriebssicherheit	gut	sehr gut	gut; von der Hydraulikanlage abhängig
Arbeitsablauf	Freifallbetrieb	Freifall-/ Senkbetrieb	Senkbetrieb
Schließkraftverlauf	Abfallen des Schließmomentes am Ende des Schließweges der Spatenblätter	Abfallen des Schließmomentes am Ende des Schließweges der Spatenblätter	Anpassen der Schließmomente beim Schließvorgang mittels Hydrauliksteuerung
Schließkräfte	limitiert; von der Art der Schließmechanik abhängig	limitiert; von der Art der Schließmechanik abhängig	extrem hoch; von der Art der Hydraulikanlage abhängig
Schließvorgang	sofortiges Schließen	mehrmaliges Nachfassen möglich	mehrmaliges Nachfassen möglich
Entleervorgang und -geschwindigkeit	gut; mittels Entleerglocke	sehr gut; mittels Seilführung	gut; mittels doppelwirkender Hydraulikzylinder
erforderliche Zusatzausrüstungen	Entleerglocke	zweite Trommelwinde für das Schließseil	Hydraulikanlage; Schlauchaufrolltrommel, Hydraulikschläuche
Umweltbelastung	Nicht bekannt	Nicht bekannt	Gefahr einer Leckage des Hydrauliksystems

5.8. Empfehlungen für den Greifereinsatz

Jede Pfahlherstellungsarbeit ist mit dem Aushub von Boden oder Fels direkt verbunden. Trotz der Vielfältigkeit der Einsatzgeräte und der großen Anzahl an unterschiedlichsten Aushubsverfahren, sind die Greiferbohrwerkzeuge im Laufe der Entwicklung für die meisten Bodeneigenschaften immer noch sehr zuverlässige Werkzeuge geblieben. Dennoch wird man oft direkt auf der Baustelle mit Arbeiterschwernissen konfrontiert, die zur Reduzierung der

Arbeitsleistung und Aushubgeschwindigkeit einen wesentlichen Anteil beitragen. Diese lassen sich jedoch durch die richtige Wahl der Werkzeugparameter und deren bestmögliche Anpassung an die aus der Untergrunderkundung gewonnenen Erkenntnisse leicht beheben, wenn folgende Gesichtspunkte beachtet werden [30]:

5.8.1. Geologische Randbedingungen

- Unter Berücksichtigung der Einsatzgrenzen von den einzelnen Greifertypen, lässt sich ein wirtschaftlicher Aushub erzielen.
- Insbesondere wenn Wechsellagerungen im Untergrund angetroffen werden, sind die Greifer mittels Fallmeißel zu ergänzen, um einen wirkungsvollen Aushub zu gewährleisten
- Folgender Anhaltswert für die Leistung bei Bohrungen im Fels ist als Größenordnung anzusehen. Als Bezugsgröße soll die einaxiale Druckfestigkeit von Fels dienen [18]:
Greifer/Meißelbohrungen
Festigkeitsbereich 10–150 N/mm²
Größenordnung
Netto-Bohrzeit 2,5–0,1 m³/h

5.8.2. Grundwasser

- Wenn es die Untergrundbedingungen erlauben, sollte man immer versuchen, das Grundwasser mit der Verrohrung abzusperren, um im Trockenen arbeiten zu können.
- Sofern sich der Greiferbetrieb unter Wasser nicht umgehen lässt, ist grundsätzlich eine möglichst strömungsgünstige, schlanke Greifergeometrie anzustreben.
- Für einen Einsatz im Grundwasser sollten die Greifer ein gutes Um- und Durchströmungsvermögen aufweisen, um den hohen Strömungswiderstand zu minimieren.
- Beim Freifallbetrieb empfiehlt sich, die Senkgeschwindigkeit bis zum Durchfahren der Wasseroberfläche zu drosseln und erst nach dem ersten Eintauchen die Bremse zu lösen.
- Wenn bei Grundwasserarbeiten die Leistung mit den konventionellen Stechgreifern rasch abfällt, sind sie durch Kugelgreifer zu ersetzen.

5.8.3. Fallhöhe

- Als Richtwert für die Fallhöhe für Greifer sollte ein Höhenbereich von 3 – 5 m dienen, um Verschleiß und Reparaturen zu minimieren [30].
- Kostengünstigere Bauteile (meistens Druckstangen und Bolzen im Greiferinneren) der Greifer als Überlastungsschutz, d.h. mit begrenzter Belastbarkeit ausführen.

5.8.4. Greiferschaufeln

- Stets ein möglichst großes an die angetroffenen Untergrundbedingungen angepasstes Fassungsvermögen anstreben. Dies lässt sich durch die Adaptierung der Greiferschaufeln bewirken.
- Kurze Schaufelform sollte vorwiegend in scherfesten, bindigen Böden eingesetzt werden.
- Lange, schlanke, spitze Schaufeln eignen sich für nichtbindige Lockerböden.
- Beim Antreffen von festgelagerten Geröllblöcken oder anderen Bohrhindernissen, wo der Greifer leicht abrutschen kann, sind die Schaufeln mit Reißzähnen auszustatten.
- Die Schaufelform eines Kugelgreifers begünstigt den Füllungsgrad

5.8.5. Greifergewicht

- Greifergewichte sind sorgfältig zu wählen. Bei geringeren Gewichten können die mechanischen Greifer vorzeitig von der Bohrlochsohle abheben. Im Gegensatz bewirkt ein Übergewicht eine Überfüllung des Spateninnenraumes und damit verbundene unnötige Belastung.

5.8.6. Schließmomente

- Die Größe und Verlauf der Schließmomente haben einen maßgebend Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Bohrgreifer. Einerseits müssen sie ein vollständiges Schließen der Greiferschaufeln sicherstellen, um ein Herausfallen des Bodenmaterials zu verhindern. Andererseits ist aufgrund des hohen Zusammendrückens vor allem bindiger Böden aufzupassen, dass diese nicht zu stark in die Konstruktionsecken des Greifers hineingedrückt werden, weil es sonst zu Schwierigkeiten beim Entleeren kommen kann [30].

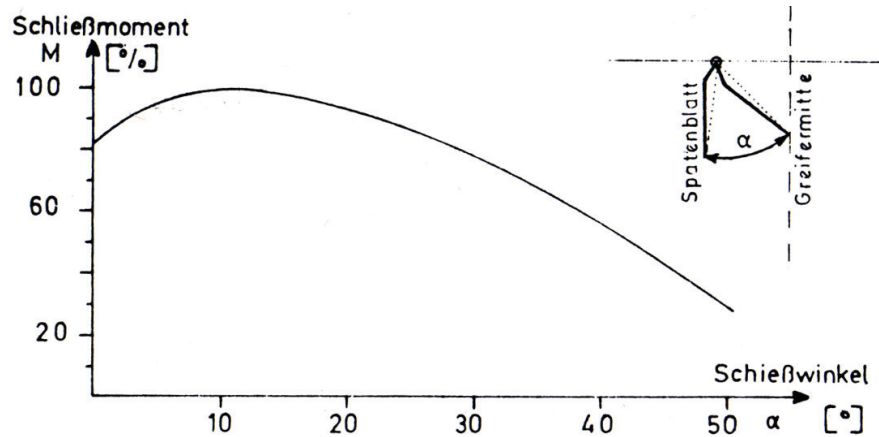


Abb. 5-17: Optimaler Verlauf der Schließkurve in Abhängigkeit vom Schließwinkel α [30]

Der Verlauf der Schließmomente in Abhängigkeit von dem Schließwinkel α ist in Abb. 5-17 dargestellt. Aus der Schließmomentenkurve geht hervor, dass mit fortschreitender Schließbewegung der Schaufeln zur Greiferachse ein starker Kraftabfall eintritt. Dieser Effekt ist bei den meisten konventionellen, mechanisch gesteuerten Greifertypen zu beobachten, deren Schaufeln mittels innenliegender Druckstangen betätigt werden. Beim Schließvorgang ändert sich nämlich die Lage des gelenkigen Lagerungspunktes zwischen der Druckstange und der Schaufel entlang einer kreisförmigen Bahnkurve um das Drehgelenk der Schaufel. Dies resultiert gleichzeitig auch in die Änderung des Hebelarmes der ausgeübten Kraft, die das Schließmoment hervorruft.

Der abfallende Ast der Schließmomente am Ende des Schließweges hat einen negativen Einfluss auf den Entleervorgang, weil es zu dessen Beginn nicht möglich ist, genügend hohe Öffnungsgeschwindigkeiten zu erzielen. Zum Zweck der minimierten Entleerzeiten, sind vorwiegend Greifer mit hohen Federkräften und –wegen konstruiert worden.

Unter diesen Vorraussetzungen kann vorwiegend in bindigen Böden ein optimaler Füllungsgrad erreicht werden, der sogar teilweise über 1 liegen kann [30]. In bindigen Böden kommt es oft vor, dass ein vollständiges Schließen der Schaufeln nicht möglich ist, weil der Boden aufgrund höherer Scherfestigkeit entlang der Schaufelschneide nicht abgesichert wird. Fallweise kann noch vor dem Schließen ein „Erdfropfen“ abreißen, der im Greifer eingeklemmt bleibt und somit zu einem erhöhten Füllungsgrad führt.

Die Optimierung der Schließmomente lässt sich durch konstruktive Modifikation der mechanischen Greifer einfach umsetzen:

- Änderung von Greifergewicht
- Wahl und Länge des Spatenhebels
- Wahl des Verhältnisses der Übersetzungshebel
- Anzahl der Einscherungen bezüglich der Kraftübertragung an die Greiferspaten

5.9. Bohrmeißel

5.9.1. Aufbau

Bohrmeißel sind robuste, meist aus Stahl gefertigte Werkzeuge, die im Freifallbetrieb zum Lösen von felsähnlichen Untergrundhindernissen dienen. Der Meißelkörper kann von einem bis zu einigen Metern lang sein und besteht aus einer schneidenartigen Spitzenausbildung, dem gewichtigen Mittelteil und einem Endstück, an dem über ein Gehänge das Tragseil befestigt ist. Um ein wirkungsvolles Arbeiten der sogenannten Freifallmeißel zu erzielen, benötigen sie ein möglichst hohes Eigengewicht. Damit während des Lösevorganges durch die hohe Belastung keine Risse am Meißelkörper entstehen, müssen durch die Schweißung im Stahl erzeugte Spannungen, mittels Spannungsarmglühen abgebaut werden.

Die einfachste Meißelart ist der Flachmeißel, der aus einem mehrere Zentimeter dicken Flachstahl besteht, an dessen unterem Ende eine Schneide ausgebildet ist. Die Form bzw. Geometrie dieser Werkzeuge ist sehr variabel und einfach zu adaptieren. Vor allem bei Unterwassereinsatz muss der Körper eine möglichst strömungsgünstige Form besitzen, damit die Fallenergie nicht bereits durch den Aufprall auf die Wasseroberfläche sowie den Strömungswiderstand und die Auftriebskraft verloren geht. Aus Schutzgründen der Verrohrung und gleichzeitig einer besseren Führung beim freien Fall werden die einzelnen Meißelformen mit einem Rohrmantel oder Führungsringen ausgestattet. Diese Ringe werden üblicherweise nicht über die gesamte Länge angeschweißt.

5.9.2. Gliederung

Die einzelnen Konstruktionsformen müssen die vorher erwähnten Kriterien erfüllen und an die zu erwartenden Untergrundbedingungen angepasst sein. Die folgenden Abbildungen sollen eine schematische Übersicht der gebräuchlichen Meißelgeometrien darstellen.

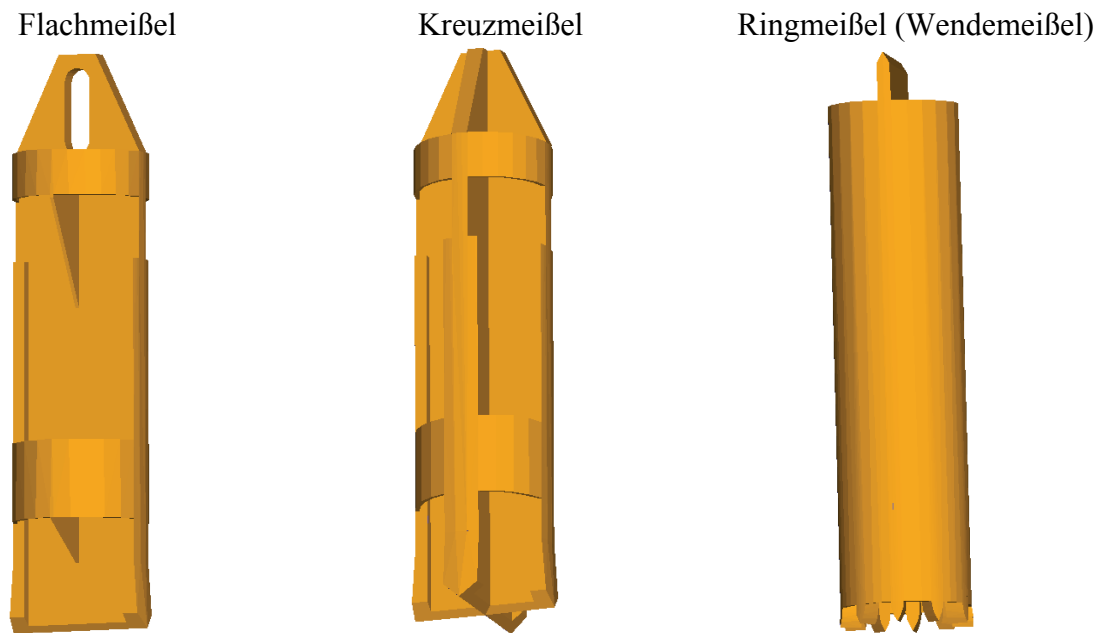


Abb. 5-18: Grundlegende Meißelausführungsarten

Wie den Abbildungen zu entnehmen ist, unterscheidet man zwischen folgenden Meißelausführungsformen:

- Flachmeißel
- Kreuzmeißel
- Sternmeißel
- Ringmeißel

Durch die Kombination der erwähnten Grundmeißeltypen erscheinen unterschiedlichste Ausführungsvarianten wie: Kreuz-Spitzenmeißel, Ring-Flachmeißel, Kreuzflachmeißel, usw., die aus der Erwartung einer erhöhten Leistung entstanden sind. Eine konstruktive Besonderheit stellen die Wendemeißel dar. Dabei ist jedes Ende mit einer unterschiedlich ausgebildeten Schneide versehen. Eine auf beiden Seiten hergestellte Aufhängung ermöglicht es, die Meißel je nach Bedarf mit dem einen oder anderen Ende einzusetzen.

5.9.3. Meißelschneide

Eine Meißelschneide stellt eine angespitzte Kante eines Bohrmeißels dar, die zum einfacheren Zertrümmern von Fels bzw. felsähnlichen Hindernissen im Untergrund dient. Um eine bessere Eindringleistung zu erzielen, sind für die jeweiligen Baugrundverhältnisse verschiedenste Arten von Schneiden in Anwendung. Sie unterscheiden sich durch die Anordnung der Schneidewinkel sowie die Anzahl der Stollen (siehe Abb. 5-19).

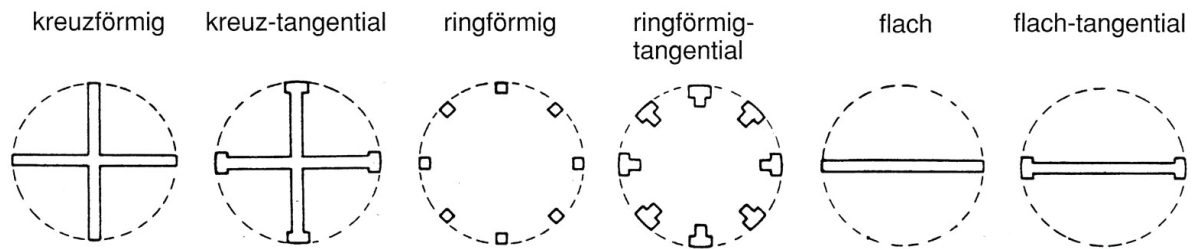


Abb. 5-19: Anordnung der Meißelschneiden [39]

Die grundlegende Ausführung der Schneiden kann spitz oder stumpf sein (Abb. 5-20). In Abhängigkeit von der Bodenart, in dem gearbeitet wird, betragen die Winkel zwischen 50° und 120° . Für das weichere Gestein sind die Schneiden unter einem Winkel von 50° bis 60° auszuführen. Der harte Fels mit erheblich höheren Druckfestigkeiten erfordert dagegen stumpfere Winkel bis zu 120° . Im Gegensatz zu weichem Gestein besteht im harten felsigen Untergrund die Gefahr einer Meißelverspannung, die sich teilweise auch durch zusätzliche Flankenverstärkung vermeiden lässt.

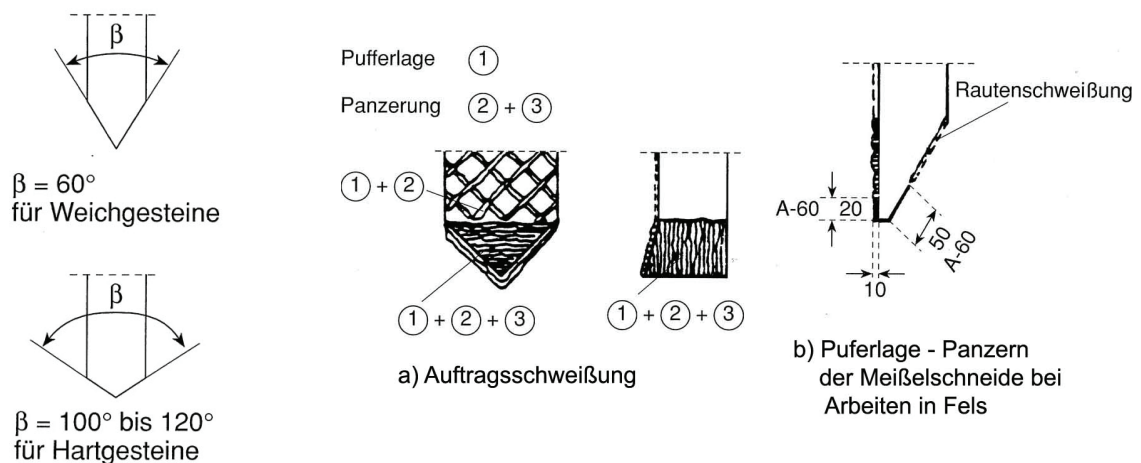


Abb. 5-20: Schneidewinkel Abb. 5-21: Schweißarbeiten an Meißelschneiden [39]

Beim Einsatz ist die Meißelschneide einer schlagartigen Beanspruchung ausgesetzt, woraus ein hoher Verschleiß resultiert. Besonders im harten Fels, wo man einen Freischnitt bewirken möchte, ist es von großer Bedeutung die Meißelschneide immer wieder nachzubearbeiten. Eine Verstärkung der Meißelspitze kann durch Ausbildung von Tangentialschneiden erzielt werden. Genauso wichtig ist eine Hartmetall-Auftragsschweißung, die einer Beschädigung des Grundkörpers vorbeugen soll. Für die Panzerung sind deshalb geeignete Elektroden zu verwenden.

5.9.4. Meißelrotation beim Grundwassereinsatz

Nach jedem Meißelschlag sollte aus Gründen einer gleichmäßigen Bearbeitung der Bohrlochsohle eine gezielte Drehung des Bohrwerkzeuges im Bohrloch erfolgen. Die Meißelrotation lässt sich folgendermaßen erzielen:

- **Umsetzwirbel**

Dieser besteht aus einem ölgefülltem Kolbengehäuse, in dessen Inneren Zahnkränze mit einseitig geneigten Zähnen und Spannfeder angeordnet sind. Bei einer abwechselnden Be- und Entlastung des Gehäuses kommen die Zahnkränze wechselseitig zum Einsatz, wodurch Umsetzen des Umsetzwirbels verursacht wird und eine Drehung des Meißels zur Folge hat. Jeder Hubvorgang verursacht eine Drehung der Verbindungskette zwischen Meißel und Umsetzwirbel um einen bestimmten Winkel, so dass die Bohrlochsohle “zerhakt” wird [39].

- **Lenkbleche**

Durch anschweißen von kurzen, geneigten Umlenkblechen am hinteren Teil des Meißels wird ebenfalls ein Effekt einer Drehbewegung erzielt. Dies ist natürlich nur dann möglich, wenn der Fallvorgang im Wasser stattfindet und der Fallweg ausreichend lang ist, damit eine solche Rotation überhaupt stattfinden kann. Die Länge der Lenkbleche ist je nach Bauart variabel, wobei sie auch als Versteifungselement für die Führungsringe dienen.

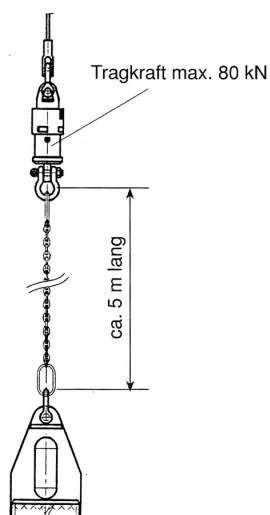


Abb. 5-22: Umsetzwirbel [39]



Abb. 5-23: Lenkbleche eines Flachmeißels [19]

5.9.5. Art des LöSENS

Die ausschließliche Gesteinszerstörung durch schlagende Einwirkung von kegel-, kugel- und keilförmigen Meißelkörpern ist das Hauptmerkmal für das Schlagbohren. Die Zerkleinerung des Gesteins wird überwiegend durch den dynamischen Eindringvorgang des Werkzeuges in

die Gesteinsoberfläche der Bohrlochsohle verursacht. Der vollständige Schlagbohrzyklus setzt sich aus mehreren, zeitlich aufeinander folgenden Abschnitten zusammen. Jeder dieser Zustände besitzt ein Energiepotenzial, wodurch sich die einzelnen Übergangsphasen mit Energieumwandlungsprozessen einfach beschreiben lassen. Für eine detaillierte Untersuchung der Abläufe wird der gesamte Meißelprozess in mehrere Einzelschritte aufgeteilt.

Bevor der Meißel fallen gelassen wird, muss er zuerst vom Bagger in die vorgegebene Position angehoben werden. In diesem Anfangszustand ist die nominelle Schlagenergie gleich der potentiellen Energie (Lageenergie) $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$.

In der zweiten Phase verlässt der Meißel seinen Ruhezustand und übergeht in eine beschleunigende Bewegung bis zum Moment des Aufpralls. Die tatsächliche Schlagenergie des Meißels ist durch die Auftreffgeschwindigkeit v bestimmt. Beim reibungslosen Fall ist die kinetische Energie beim Aufprall gleich der potentiellen Energie im Ausgangszustand. Die

kinetische Energie $E_k = \frac{m \cdot v^2}{2}$ wird während des dynamischen Kontaktes mit der

Bohrlochsohle in den Meißel übertragen und in Form von einer elastischen Welle weitertransportiert. Der Eindringvorgang und die dadurch verursachte Kraterbildung sind die wichtigsten Phasen des Schlagbohrprozesses.

Der grundlegende Mechanismus des Lösevorganges ist, dass das Schlagwerkzeug in die Oberfläche des Gesteins eindringt und die erzeugten Spannungen den Fels zersplittern lassen. Dabei lösen sich von der Oberfläche einzelne Felsfragmente, womit ein Abbau erreicht ist. Wenn der Meißel in seinen Anfangszustand angehoben wird, um den Fallvorgang wiederzuholen, ist der gesamte Zyklus abgeschlossen.

5.9.5.1. Rissbildung

Die Schädigung vom Material kann in der Kontaktzone durch die Mikrorissbildung im Gestein beschrieben werden. Diese wird durch einen plötzlichen Aufprall vom Lösewerkzeug auf die Bohrlochsohle hervorgerufen. Einen großen Einfluss auf die Ausbildung und die Tiefe von Primärrissen hat, ob der Stoß mit einer scharfen oder stumpfen Spitze erfolgt.

Wie aus den Überlegungen nach Lawn and Marshall [31] (1981) ersichtlich ist, bildet sich im Gestein ein Primärriss aus. Die Tiefe der Mikrorisszone ist stark von der Geometrie des Eindringkörpers, der Gesteinsart und der Oberflächenbeschaffenheit der Bohrlochsohle abhängig. Die infolge des raschen Aufpralls hervorgerufenen Druckspannungen, erzeugen in der Umgebung von der Stoßstelle plastisch verformte Zonen. Angrenzend und unmittelbar

zum Aufschlagspunkt entstehen an der Felloberfläche Zugbereiche, die eine innere Rissbildung herbeiführen. Die Intensität mit welcher der Stoß auf das Gestein erfolgt und die Art der Spitzenausführung sind maßgebend für die Ausbildung einer tiefreichenden Rissstruktur. Die Tiefenwirkung ist wesentlich größer für eine scharfe Schneide als bei einer stumpfen Spitzenausführung. Bei einer dynamischen Belastung ereignet sich der Eindringvorgang innerhalb von Mikrosekunden. Wie den Bildern (Abb. 5-24) zu entnehmen ist, veranschaulichen die parallel ausgerichteten, kreisförmigen Risse “half-penny cracks“ die Schädigung des betrachteten Elementes. Nachdem die Wirkung des Stoßes abgeklungen ist, tritt die Phase der Entlastung ein. Die jedoch nicht zur Gänze abgebauten Restspannungen verursachen das Schließen des Primärrisses was gleichzeitig Bildung von seitlichen Rissen auslöst. Die Entlastungsvorgänge verursachen eine Kraterbildung durch plötzlich weggedrücktes und weggeschleudertes Material. Unter Umständen einer sehr schweren Lasteinwirkung können diese seitlichen Risse bis zur Oberfläche durchschlagen, was die Ausbildung von sogenannten “Chips“ zur Folge haben kann [46].

Diese Erscheinungen der Kraterbildung wurden ebenfalls bei den Fallstudien von Knassmillner (2002) [28] beobachtet. An einem Schlagbohrgerät-Modell untersucht er bei unterschiedlichen Fallhöhen die Einwirkung der dynamischen Eindringvorgänge, eines einzelnen an einem Gestänge montierten Hartmetall-Stiftes, in die Felsproben aus grobkörnigem Granit.

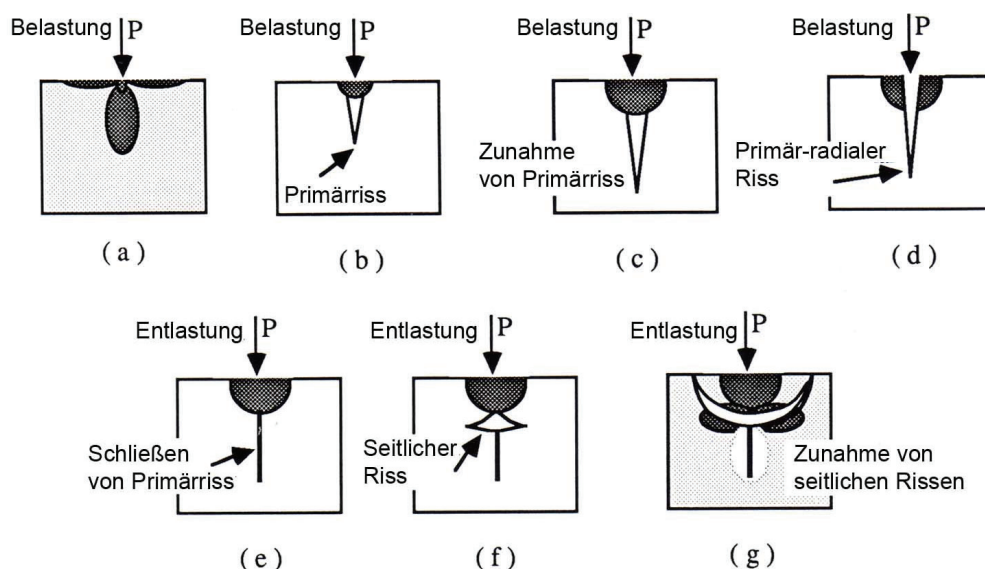


Abb. 5-24: Entstehung von Primär-, Radial und seitlichen Rissen infolge einer Be- und Entlastung bei einem Aufschlag einer spitzen Schneide. Die dunklen Bereiche stellen die durch Zugspannungen hervorgerufene Rissbildung dar und die grauen wiederum Bereiche mit Druckspannungen. [31]

Aufgrund der unterschiedlichen Schneidenausbildung und der höheren Kräfte beim Aufprall des Fallmeißels, sind die Ergebnisse nicht direkt übertragbar. Sie deuten aber darauf hin wie die Eindringvorgänge ablaufen könnten. Zugleich wird bestätigt, dass eine spitzenwinkelige, keilförmige Schneide einen tiefgehenden Primärriss begünstigt, wodurch eine größere Kraterwirkung erreicht ist. Als Folge dieser Überlegungen werden die Meißelschneiden möglichst spitzwinkelig hergestellt. Daneben ist als ein wesentlicher Einflussparameter auf den Schneidewinkel die Gesteinsfestigkeit zu betrachten. Zahlreiche Praxiserfahrungen haben jedoch gezeigt, dass zu spitze Meißelschneiden oft zu Verklemmungen im harten Fels führen können. Aus diesem Grund werden die Schneidewinkel ein wenig stumpfer als beim Antreffen auf ein weiches Gestein gewählt. Wie bereits erwähnt kann dieser Unterschied bis zu ca. 60° ausmachen.

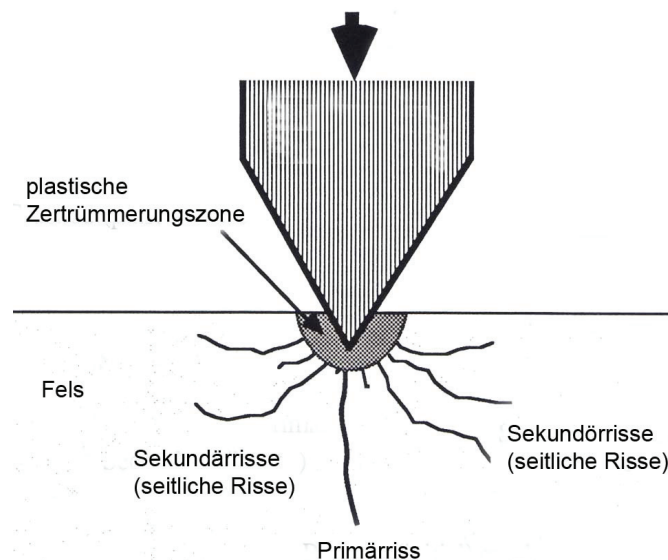


Abb. 5-25: Ausbildung von Primär- und Sekundärrissen [46]

Beim Aufprall des mehrere Tonnen schweren Meißels auf die Bohrlochsohle wird der Fels bis über die Bruchspannung belastet. Während dieses Zustandes versagt der Fels und wird in unterschiedlich große Fraktionen zerbrochen. Die wiederholten Meißelschläge auf die Bohrlochsohle begünstigen eine weitere Entstehung kleinerer Fraktionen. Das zerbrochene Material, umfasst somit oft eine große Bandbreite an Kornfraktionen. Es ist ein Zusammenspiel mehrerer Faktoren, die auf die Bohrgutfraktion des gelösten Felsens Einfluss haben. Die Art und Ausbildung des Lösegerätes, Gesteinszusammensetzung, Trennflächengefüge sowie die Druckfestigkeit vom Fels spielen dabei eine wichtige Rolle. Die spezifischen Vorgänge, die aufgrund einer dynamisch einwirkenden Belastung auf eine Gesteinsoberfläche hervorgerufen werden, bedürfen einer sehr komplexen, tief reichenden Betrachtung unter Berücksichtigung diverser Gesteins-, Material- und Arbeitsparameter. Die

Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet der Gesteinszertrümmerung unter dynamischer Last wurden vorwiegend nur für die im Tunnelbau angewandten Verfahren beschrieben.

5.10. Schlussfolgerung / Leistungsfähigkeit der Meißelarbeiten

Angesichts der Vielzahl in Wechselwirkung zueinander stehenden Parameter, die einen wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Meißelbohrens haben, besteht nicht die Möglichkeit die einzelnen Kombinationsvarianten genau zu analysieren. Die im Boden vorgefundenen Verhältnisse sind gegeben und können deshalb kaum verändert werden. Dennoch ist es wichtig die maßgebenden Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit der Meißelarbeiten näher zu untersuchen. Daher sollten in erster Linie deren Optimierung und vor allem die Abstimmung der Werkzeugparameter an die örtlichen Gegebenheiten im Vordergrund stehen.

Damit eine wirtschaftliche Arbeitsleistung erzielt werden kann, ist ein möglichst hohes Meißelgewicht erforderlich, wobei eine Abstimmung an die Untergrundverhältnisse sowie den Bagger wichtig ist. Die für die gängigen Pfahldurchmesser angewendeten Meißelgewichte betragen üblicherweise zwischen 1 bis 10 (16) t.

Findet der Bohrvorgang im Grundwasser statt, so ist eine geometrische Betrachtung des Meißels hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit von großer Bedeutung. Die durch den Strömungswiderstand aufgebauten Kräfte können jedoch mittels einer strömungsgünstigen Form zum Teil kompensiert werden.

Die Wahl des richtigen Schneidewinkels zwischen 60° - 120° hat je nach Gesteinsfestigkeit zu erfolgen. Im Festgestein werden die Schneidenwinkel stumpfer ausgeführt, damit man die Gefahr einer möglichen Verklemmung des Meißels im Gestein vermeidet. Aus diesem Grund werden ebenfalls die Flanken verstärkt.

Bedeutend für einen optimalen Bohrfortschritt ist auch der rechtzeitige Austausch der Werkzeuge. Es ist nämlich nicht sinnvoll, auf der bereits zertrümmerten mit Bohrklein überdeckten Bohrlochsohle herumzumeißeln, sofern die Meißelenergie in dieser aufgelockerten Schicht verzehrt wird [18]. Daher sollte das beim Meißeln entstandene Bohrklein immer rechtzeitig mit dem Greifer bzw. mittels einer Kiespumpe ausgehoben werden.

Bei Meißelarbeiten im Trockenen hat sich als praktikabel erwiesen, dem zertrümmerten Bohrklein zusätzlich geringere Mengen an Wasser zuzugeben, so dass einerseits ein Aufwirbeleffekt durch den Meißeleinschlag bewirkt wird und andererseits das Wasser zum Kühlen der Meißelschneide verhilft. Auf diese Weise lässt sich auch der Verschleiß der gepanzerten Schneide reduzieren. Das aufgewirbelte Material schwebt im Wasser, womit ein teilweises Freilegen der Bohrlochsohle ermöglicht wird, um weiterhin ein effizientes Arbeiten bis zum Werkzeugwechsel zu gewährleisten. Außerdem verklumpen nach gewisser Zeit die Feinteile des zertrümmerten Felsens und bilden somit ein kompakteres, plastisches Material, welches sich einfacher mit dem Greifer herausfördern lässt. Andererseits können auch Schlammbüchsen oder Kiespumpen bei der Förderung zum Einsatz kommen.

Aufgrund der hohen Aufschlagskräfte im Bereich der Bohrlochsohle besteht vor allem bei geneigten Felshorizonten die Gefahr, dass der Meißel beim Schlag abrutscht. Demzufolge kann das Ausweichen von der Falllinie eine starke Belastung der Verrohrung verursachen. Wiederholte Zusammenstöße der Meißelschneide mit dem Rohr führen zu Ermüdungserscheinungen bis ein Spröbruch auftritt.

Ein Beschädigen der Bohrlochwand durch wiederholte Meißelschläge führt oft zu Zeitverzögerungen, die mit dem Ausbau der Verrohrung verbunden sind. Weiters kann eine Leistungsminderung infolge zu langer Meißelarbeitszyklen zum unwirtschaftlichen Arbeiten führen.

Als ein Nachteil für den Einsatz des Schlagbohrverfahrens in städtischen Bereichen erweisen sich die Erschütterungen infolge des Meißelbetriebes. Bei Grenzwerte überschreitenden Erschütterungen, können zu deren Einschränkung in einem wirtschaftlichen Rahmen auf Kosten der Leistungsfähigkeit, durch Verringern der Fallhöhe, leichtere Fallmeißel Maßnahmen getroffen werden.

6. STRÖMUNGSSTUDIE

6.1. Einleitung

Die vorliegende Studie soll die Strömungsverhältnisse während des Fallvorganges eines Meißelkörpers in einem verrohrten mit Grundwasser gefüllten Bohrloch anhand von numerischen Simulationsberechnungen näher erläutern. Beim freien Fall durch die ruhende Wassersäule verdrängt der Meißel in jedem Bewegungsschritt ein äquivalentes Wasservolumen seines Körpers, welches gezwungen ist entgegen die Bewegungsrichtung des Meißelkörpers zu strömen. Die dabei durch die Wasserverdrängung und Fallgeschwindigkeit erzeugte Umströmung, resultiert je nach Meißelform in Widerstandskräfte, die bei der Meißelarbeit hinsichtlich der Leistungsfähigkeit eine wesentliche Rolle spielen. Außerdem soll diese Studie Erkenntnisse über das Umströmungsverhalten entlang einer Meißeloberfläche liefern.

6.2. Theoretische Grundlagen

6.2.1. Strömungsformen

Bei Innen- als auch bei Außenströmungen treten in Abhängigkeit von der Größe bestimmter Parameter unterschiedliche Stromlinienbilder auf. Das Strömungsverhalten des Fluids ist in erster Linie durch die Reynolds-Zahl charakterisiert, die direkt von der Strömungsgeschwindigkeit sowie der Fluidart abhängt.

Je nach Strömungscharakter ändert sich die Geschwindigkeitsverteilung senkrecht zur Strömungsrichtung. Grundsätzlich werden bei Wasserströmungen zwei grundlegende Strömungsformen beobachtet:

- laminare Strömung
- turbulente Strömung

Das unterschiedliche Strömungsverhalten lässt sich auch bei der Umströmung von Körpern verschiedener Geometrie gut erkennen.

6.2.1.1. Laminare Strömung

Bei einer laminaren Strömung bewegen sich die Fluidteilchen mit gleicher oder unterschiedlicher Geschwindigkeit in parallelen, nebeneinanderlaufenden Schichten, die sich

weder durchsetzen, noch miteinander vermischen. Dieser Strömungszustand kommt insbesondere bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten vor.

Für eine Rohrströmung gilt die Haftbedingung, dass direkt an der Rohrwand das Fluid keinen Geschwindigkeitsvektor besitzt. Infolge dieser Bedingung ändert sich der Strömungsverlauf über den gesamten Rohrquerschnitt, wobei die Geschwindigkeit zur Rohrmitte ansteigen muss. Dabei nimmt die räumliche, rotationssymmetrische Geschwindigkeitsverteilung eine Form eines Paraboloids an (Abb. 6-1), dessen Scheitel auf der Rohrachse liegt.

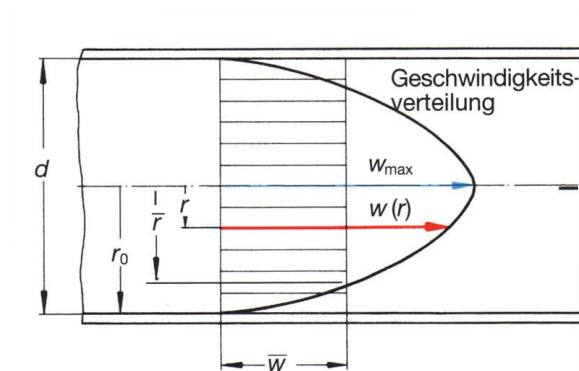


Abb. 6-1: Geschwindigkeitsverteilung bei laminarer Rohrströmung [2]

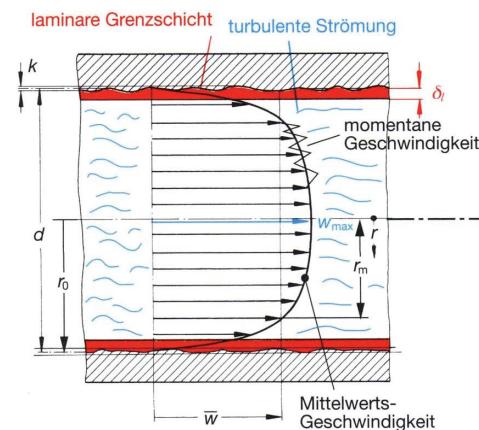


Abb. 6-2: Geschwindigkeitsverteilung bei turbulenter Rohrströmung [2]

6.2.1.2. Turbulente Strömung

Wird die Geschwindigkeit eines laminaren Strömungsfeldes über den kritischen Wert der Reynolds-Zahl ($Re_{krit} \approx 1000 - 2500$ für Innenströmung) gesteigert, ändert sich die ursprünglich laminare Strömung in eine unregelmäßige wirbelbehaftete Strömung, die durch eine intensive Durchmischung charakterisiert ist.

Bei einer turbulenten Rohrströmung treten neben der in Rohrachse gerichteten Längsströmung auch zusätzliche Bewegungen in Querrichtung auf. Bei der turbulenten Rohrströmung haftet die Flüssigkeit infolge der Viskosität an der Rohrwand, wo sich in unmittelbarer Nähe eine laminare Grenzschicht ausbildet. Hieraus ergibt sich auch der in Abb. 6-2 dargestellte Geschwindigkeitsverlauf, der zwar innerhalb der dünnen Grenzschicht parabelförmig ansteigt, aber im mittleren turbulenten Bereich wesentlich flacher ist als bei einer Laminarströmung.

6.2.2. Reynolds-Zahl

Anhand von zahlreichen experimentellen Untersuchungen wurde der Übergang zwischen der laminaren und turbulenten Strömungsform durch die dimensionslose Reynolds-Zahl definiert. Sie wird durch folgende Einflussgrößen bestimmt:

- charakteristische Strömungsgeschwindigkeit
- Fluideigenschaften, gekennzeichnet durch die Dichte ρ und dynamische Viskosität η
- geometrische Form des Strömungsfeldes
- Störungen bzw. Hindernisse in der Strömung

Der Umschlagspunkt von laminar zu turbulent ist ein Stabilitätsproblem, der auf die Instabilitäten der laminaren Strömung zurückzuführen ist. Diese können infolge der Art des Strömungsvorganges, Vorturbulenzen, Oberflächenrauigkeit, unregelmäßiger geometrischer Form o.ä. entstehen. Der Wert bei dem eine Änderung der Strömungsform stattfindet, nennt sich die kritische Reynolds-Zahl (Re_{krit}) und ist für eine Rohrströmung mit ~ 2350 festgelegt.

Für beide Arten, die Innen- und Außenströmung, errechnet sich die Reynolds-Zahl aus dem Produkt der Geschwindigkeit x charakteristische Länge und kinematischer Viskosität [2].

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\eta} = \frac{v \cdot L}{\nu} \quad (2)$$

v...Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

L...charakteristische Länge [m] (Durchmesser. für Innen- und Körperlänge für Außenströmungen)

ρ ...Dichte des Fluids [kg/m^3]

η ...dynamische Viskosität [kg/m.s]

ν ...kinematische Viskosität [m^2/s]

6.2.3. Körper–Umströmung

Für die Strömung realer Fluide stellt der umströmter Körper immer einen Strömungswiderstand dar. Demzufolge übt das Fluid auf den relativ zu ihm bewegten Körper immer eine Kraft aus, deren Größe sich aus dem Zusammenhang mehrerer Einflussgrößen ergibt.

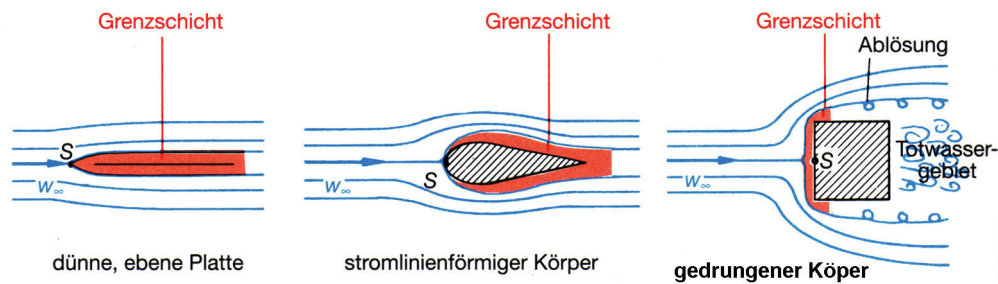


Abb. 6-3: Prinzipielles Umströmungsverhalten bei geometrisch unterschiedlichen Körpern mit Grenzschichtausbildung [2]

Die Relativgeschwindigkeit zwischen Körper und Fluid, die daraus resultierende Re-Zahl und vor allem die geometrische Form haben einen wesentlichen Einfluss auf das Strömungsbild, welches sich bei der Umströmung einstellt. Wird ein schlanker, plattenförmiger und durch seine Geometrie an den Strömungsverlauf angepasster Körper parallel zu seiner Längsachse angeströmt, so legen sich die Stromlinien an dessen Körperform an. Da keine Ablösungen der Strömung vorkommen, schließen sich die Stromlinien an der hinteren Körperkante wieder. Im Gegensatz dazu, löst sich die Strömung an gedrungenen oder kantigen Körpern ab, wodurch sich ein ausgedehntes Totwassergebiet hinter dem Körper ausbildet. Ob eine Verdrängung der Strömung von der Oberfläche stattfindet, hängt vor allem von den Strömungsverhältnissen ab. Somit kann bei einer schleichenden Umströmung von scharfkantigen Körpern ebenfalls ein Schließen der Strömung hinter dem Körper auftreten. Dies ist jedoch nur bei sehr niedrigen Re-Zahlen möglich. Vorwiegend bilden sich an den Abrisskanten turbulente Verhältnisse aus.

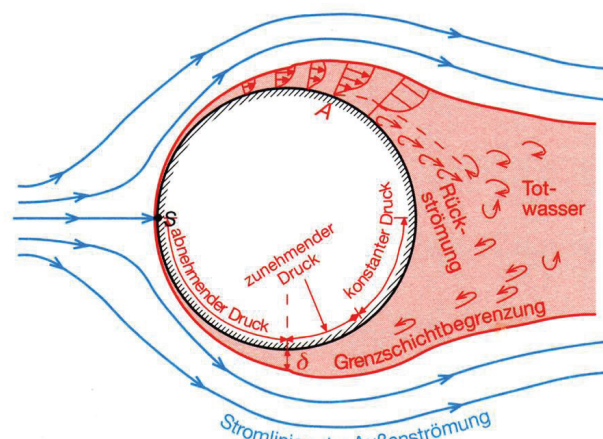


Abb. 6-4: Kugel- oder Zylinderumströmung mit prinzipiellen Stromlinien und Ausbildung eines Totwassers [2]

In Abb. 6-4 ist der Strömungsverlauf für turbulente Verhältnisse an einem kreisrunden Zylinder dargestellt. Die Strömung staut sich an dessen Stirnseite im Staupunkt S, wobei die Geschwindigkeit bis auf Null abnimmt. Ausgehend vom Staupunkt teilt sich die Mittelstromlinie auf und während sie den Körper umfließt, nimmt die Geschwindigkeit zu.

Aus der Bedingung der Haftreibung geht hervor, dass sich unmittelbar an der Körperoberfläche eine dünne, den Körper einhüllende Grenzschicht ausbildet. Die Geschwindigkeit innerhalb dieser Schicht steigt von Null direkt an der Oberfläche bis auf den Wert der Hauptströmung an. Die an der Stirnseite innerhalb der Grenzschicht noch laminare Strömung wird aufgrund des zunehmenden Querschnittes beschleunigt. Demzufolge verlaufen die Stromlinien konvergent, d.h. die Grenzschicht liegt an der Körperoberfläche an. Bleibt die Grenzschicht laminar, löst sie sich etwa im Bereich des niedrigsten Druckes, also an Stelle des größten Querschnittes ab, meist sogar kurz davor [40]. Es bildet sich ein größerer Totraum hinter dem Körper. Kommt es jedoch zum Umschlagen von laminar in turbulent, liegt die turbulente Grenzschicht aufgrund höherer kinetischen Energie am Körper länger an. Erst durch weitere Druckzunahme schiebt sich die rückläufige Strömung zwischen Körperoberfläche und Grenzschicht und eine Ablösung der Grenzschicht setzt ein. Ab dem Ablösungspunkt bildet sich ein mit Großwirbeln durchsetztes Totraumgebiet, welches jedoch kleiner ist als bei einer rein laminaren Grenzschicht. Die turbulente Grenzschicht erhöht zwar den Reibungswiderstand, dennoch ist der Gesamtwiderstand aufgrund des geringeren Druckunterschiedes zwischen Stirn- und Rückseite niedriger. Der Widerstand ist hauptsächlich von der Art des Fluids, Relativgeschwindigkeit, Oberflächenrauigkeit und der Körperform abhängig. Weitere Einzelheiten über die Grenzschichtausbildung findet man u.a. [40, 2 und 37].

6.3. Kraftwirkungen

6.3.1. Allgemeines

Jeder Körper, der von einem Fluid umströmt wird, erfährt eine strömungsbedingte Kraft. Diese wirkt in Strömungsrichtung und ergibt sich aus der Integration der differentiellen Druck- und Reibungskräfte über die Körperoberfläche.

Wenn die Strömung um den Körper aufgrund einer freien fallenden Bewegung in einem Fluid hervorgerufen wird, sind für die Betrachtung der am Körper angreifenden Kräfte außer dem Strömungswiderstand zusätzlich noch Auftriebs- und Gewichtskraft zu berücksichtigen.

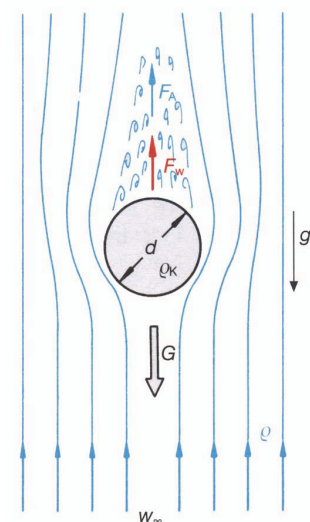


Abb. 6-5: Kraftwirkungen [2]

6.3.2. Strömungswiderstandskraft

6.3.2.1. Flächenwiderstand (Reibungswiderstand)

Der Flächen- oder Reibungswiderstand wird aufgrund der Relativbewegung zwischen Fluid und Widerstandskörper durch die Reibung an der Körperoberfläche verursacht. Der Reibungswiderstand errechnet sich aus dem Integral der Schubspannung über die beströmte Oberfläche:

$$F_{W,R} = \int_A \tau_0 \cdot dA \quad (3)$$

$F_{W,R}$...Reibungswiderstand [N]

τ ...Schubspannung [N/m²]

Für eine einfachere Handhabung wird für die Praxis an Stelle der Integration eine einfachere Formel angewendet:

$$F_{W,R} = c_R \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot A_0 \quad (4)$$

c_R ...Reibungsbeiwert

ρ ...Dichte [kg/m³]

v ...Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

A_0 ...Fläche [m²]

Die Widerstandskraft ist proportional zum Anström-Staudruck und der vom Fluid beströmten Körperoberfläche. Die Widerstandszahl c_R hängt von der Oberflächenbeschaffenheit und der Reynolds-Zahl ab. Eine direkte Messung des Flächenwiderstandes ist in der Regel nicht möglich. Bei den Versuchen ergibt er sich aus der Differenz des Gesamt- und Druckwiderstandes.

6.3.2.2. Formwiderstand (Druckwiderstand)

Der Druckwiderstand ist in erster Linie von der Körperform abhängig und ergibt sich aus der Integration der Drücke über die Körperoberfläche zu:

$$F_{W,D} = - \int_A p \cdot dA \quad (5)$$

p ...Druck [Pa]

Analog zum Flächenwiderstand gilt die Formel:

$$F_{W,D} = c_D \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot A_{ST} \quad (6)$$

$F_{W,D}$...Reibungswiderstand [N]

c_D ...Formwiderstandsbeiwert

A_{ST} ...Stirnfläche [m²]

Hierbei stellt die Fläche A_{ST} den größten Spantquerschnitt dar, d.h. die in Strömungsrichtung projizierte Stirnfläche. Die Druckwiderstandsziffer c_D kann für einfache Geometrien der Fachliteratur entnommen werden. Für komplizierte Formen ist man bei der Bestimmung des Druckwiderstandes allerdings meist auf eine experimentelle Untersuchung angewiesen.

6.3.2.3. Gesamtwiderstand

Der Strömungswiderstand oder auch Gesamtwiderstand eines umströmten Körpers setzt sich aus dem Flächenwiderstand (Reibungswiderstand) F_{WR} und aus dem Formwiderstand (Druckwiderstand) F_{WD} zusammen.

$$F_W = F_{W,R} + F_{W,D} \quad (7)$$

Bezieht man beide Widerstandskräfte auf die gleiche Bezugsfläche, in diesem Fall z.B. auf die Stirnfläche, so lässt sich eine allgemeine Widerstandsformel der Körperumströmung aufstellen:

$$F_{W,D} = c_W \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot A_{ST} \quad (8)$$

F_W ...Gesamtwiderstand [N]

Im Allgemeinen lässt sich sehr wenig über den Reibungswiderstand aussagen, weil dieser nicht direkt messbar ist. Für die meisten Körper, abgesehen von einer Plattenumströmung, hat die Reibungskraft jedoch nur einen geringeren Anteil am Gesamtwiderstand. Aus diesem Grund kann man die Strömungskraft annähernd proportional zum Druckwiderstand ansetzen. Dabei wird ein neuer Widerstandsbeiwert c_W als Proportionalitätsfaktor eingeführt, der die Reibungskraft mitberücksichtigt. Für eine Abschätzung des Strömungswiderstandes existieren für einige einfache Grundformen Angaben über deren Widerstandsbeiwerte (siehe Anhang), die vorwiegend experimentell durch Untersuchungen im Labor ermittelt wurden. Bei komplizierten und vor allem sehr unregelmäßigen Geometrieformen ist es jedoch schwierig die Widerstände anhand von experimentellen Versuchreihen zu erforschen. Heutzutage verwendet man für die Bestimmung der Widerstandsziffer vorwiegend numerische Methoden, die eine sehr gute Annäherung an die tatsächlichen Strömungsvorgänge ermöglichen.

6.3.3. Statischer Auftrieb

Die Kraft, die ein Fluid auf einen eingetauchten Körper ausübt, wird nach Archimedes als statischer Auftrieb bezeichnet und ist so groß wie die Gewichtskraft des vom Körper verdrängten Fluidvolumens. Die stets nach oben gerichtete Auftriebskraft ist nur von der Fluidichte und dem Körpervolumen abhängig und lässt sich nach folgender Formel bestimmen:

$$F_A = \rho_{\text{Fluid}} \cdot g \cdot V_K \quad (9)$$

g ...Erdbeschleunigung [m/s^2]

V_K ...Volumen [m^3]

Die Formel leitet sich unter der Betrachtung der Druckunterschiede an der Ober- und Unterseite des Körpers her.

6.3.4. Gewichtskraft

Unter der Gewichtskraft, auch Schwerkraft genannt, versteht man jene Kraft, die das irdische Schwerfeld auf einen Körper ausübt. Sie resultiert aus der Massenanziehung (Gravitation) zwischen Erde und Körper sowie aus der von der Erdrotation stammenden Zentrifugalkraft.

Die Gewichtskraft ist das Produkt aus Masse und Erdbeschleunigung ($g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$) und errechnet sich zu:

$$F_G = m \cdot g = \rho \cdot V \cdot g \quad (10)$$

m ...Masse [kg]

7. NUMERISCHE BERECHNUNGSMETHODE

7.1. Allgemeines

Da sich die am Meißel angreifenden Strömungskräfte analytisch berechnen lassen, wurden zur exakteren Bestimmung der Strömungsverhältnisse bzw. -widerstände numerische Berechnungsverfahren angewandt. Für die Durchführung der Strömungssimulationen wurde die Software PowerFLOW (Version 4.0a) von *EXA Corporation* gewählt, welche auf der Basis von „Digital Physics“ arbeitet. Erst diese Berechnungsmethode hat eine nähere experimentelle Untersuchung der Strömungsvorgänge ermöglicht.

7.2. PowerFLOW

PowerFLOW stellt für einen großen Anwendungsbereich der Strömungsmechanik eine rechnergestützte numerische Simulationsmethode dar, die für eine genaue und effiziente Berechnung der Fluidströmung hervorragend geeignet ist. Die Grundlegende Technologie auf der das Programm aufgebaut ist, nennt sich „Digital Physics“. Im Vergleich zu der konventionellen CFD-Methode (Computational Fluid Dynamics), die für die mathematische Beschreibung des Kontinuums die Navier-Stokes-Gleichungen verwendet, wird hier das Fluidverhalten auf einem fundamentalen, kinetischen Level mittels Lattice-Boltzmann-Gleichungen bestimmt. Auf diesem Prinzip lässt sich eine Simulation leichter aufbauen, weil sich das physikalische Fluidmodell vereinfacht definiert lässt. Da eine exakte Nachbildung der molekularen Fluiddynamik wegen der komplexen Vorgänge sehr aufwendig und zeitintensiv wäre, verwendet diese Methode eine vereinfachte mikroskopische (mesoskalige) Betrachtungsweise der Fluidströmung. Die essentiellen Charakteristiken der Mikro-Physik bleiben dabei erhalten. Somit lässt sich das komplette makroskopische Kontinuumsverhalten äquivalent zu den Navier-Stokes-Gleichungen zu beschreiben [14].

Aus der Lattice-Boltzmann-Methode folgt, dass der erforderliche Diskretisierungsschritt auf dem mikroskopischen Niveau stattfindet, wo sich der gesamte Berechnungsraum nur auf die diskretisierten Größen beschränkt.

7.3. Theoretische Grundlagen

7.3.1. Boltzmann-Gleichung

Die Boltzmann-Gleichung dient zur Beschreibung der Verteilungsdichte $f(\vec{x}, \vec{v}, t)$ der Partikel, die zu einem bestimmten Zeitpunkt t im Raum um die Ordinate \vec{x} eine Geschwindigkeit \vec{v} besitzen:

$$\frac{d}{dt} f(\vec{x}, \vec{v}, t) = \frac{\partial}{\partial t} f(\vec{x}, \vec{v}, t) + \vec{v} \nabla f(\vec{x}, \vec{v}, t) = C(f(\vec{x}, \vec{v}, t)) \quad (11)$$

$C(f)$ stellt dabei einen Kollisionsterm dar, der infolge der Zusammenstöße einzelner Teilchen entsteht.

Der Bezugsraum innerhalb dessen sich die Teilchen unbehindert bewegen können, ist durch ein kubisch strukturiertes Gitter (Lattice Grid) charakterisiert, welches aus sog. Voxels besteht, die eine einfache dreidimensionale geometrische Form besitzen. Die Voxels werden automatisch generiert und können mehrere untergeordnete Bereiche mit unterschiedlicher Auflösung beinhalten. An den Schnittflächen zwischen Voxel und festem Körper entstehen zweidimensionale Flächenelemente, die als Surfels bezeichnet werden. Aufgrund der Unterteilung des Bezugsvolumens in kleinere Teilvolumen, lässt sich das Fluidverhalten präziser definieren.

Während des Zeitintervalls Δt können sich die Teilchen in bestimmten Richtungen des Strukturgitters, vom Schwerpunkt einer Zelle (Kontrollvolumen) \vec{x} zu einer der Nachbarzellen $\vec{x} + \vec{v}_i \Delta t$ entsprechend deren Geschwindigkeitsvektoren \vec{v}_i bewegen [13]. Die Partikeldynamik kann also mit der Lattice-Boltzmann-Gleichung beschrieben werden:

$$n_i(\vec{x} + \vec{v}_i, t + \Delta t) = n_i(\vec{x}, t) + C_i(\vec{x}, t) \quad (12)$$

$$f(\vec{x}, \vec{v}, t) \rightarrow n_i(\vec{x}, t) \equiv f_i(\vec{x}, \vec{v}) \Delta V \quad (13)$$

Mit der Gleichung (13) wird die Verteilungsdichte $f(\vec{x}, \vec{v}, t)$ in diskretisierte Teilchengeschwindigkeiten umgeschrieben, die für das aus einfachen rechteckförmigen Kontrollvolumen strukturierte Gitter definiert sind.

7.3.2. Teilcheninteraktion

Die Strömung realer Fluide lässt sich auf dem mesoskaligen Niveau als Partikelinteraktion darstellen. Während der Simulation bewegen sich die Fluidteilchen zu jedem Zeitpunkt mit einer bestimmten Geschwindigkeit von einem Kontrollvolumen (Voxel) in das benachbarte,

wobei Wechselwirkungen zwischen Teilchen berücksichtigt werden. In jedem diskreten Zeitschritt der Strömung besitzt das Fluid zwei Phasenzustände: Bewegung und Kollision.

Die Bewegungsvorgänge der Partikel werden nicht einzeln, sondern über die bereits erwähnte Funktion der Verteilungsdichte beschrieben.

7.3.2.1. Partikel – Partikel Interaktion

Ziel dieses Kollisionsprozesses ist ein thermodynamisches Gleichgewicht des gesamten Systems. Damit der gewünschte Gleichgewichtszustand erreicht wird, muss er sich für jedes Voxel und in jeder Richtungen einstellen.

Abb. 7-1 zeigt das Interaktionsverhalten zwischen den Fluidteilchen. In der Anfangsphase können sich die Teilchen frei bewegen, bis es innerhalb eines Voxels zu einer Kollision kommt. Nach der Kollision können die Partikel ihre Geschwindigkeit und/oder Richtung ändern, während Masse, Impuls und Energie erhalten bleiben.

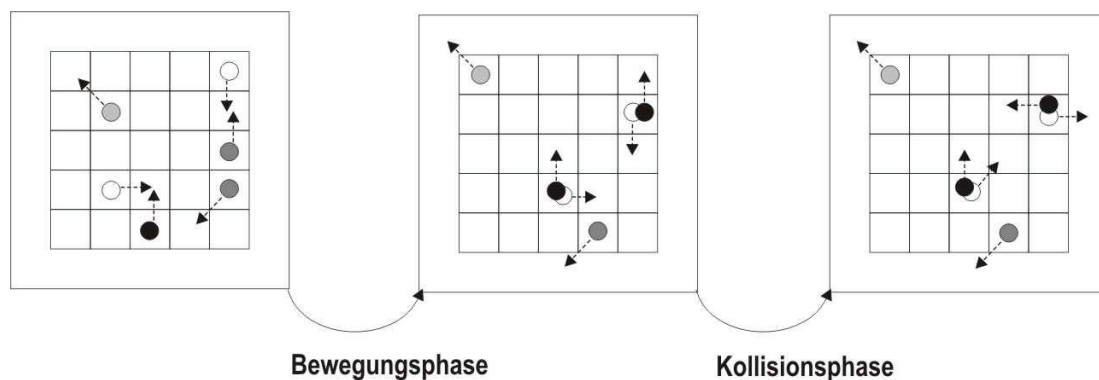


Abb. 7-1: Kollisionsverhalten der Partikel [14]

7.3.2.2. Partikel – Surfel Interaktion

Infolge der Diskretisierung wird die Körperoberfläche in Surfels zerlegt. Durch die Kollision des Fluids mit dem Körper, sammeln sich zu jedem Zeitschritt Fluidpartikel an den Oberflächenelementen. Dieser Prozess erzwingt die Erhaltung der Teilchenmasse, während Impuls und Energie sich entsprechend den definierten Randbedingungen am Surfel ändern. Die Impulsänderung folgt den Kräften, dem Druck sowie der Reibung an der Oberfläche. Anschließend werden die Partikel wieder von der Oberfläche in den umgebenden Raum (Voxels) reflektiert.

7.3.3. *Simulationsmethode*

Die Simulationsmethode umfasst prinzipiell zwei unterschiedliche Modelle: direkte Simulation, die insbesondere für niedrige Re-Zahlen ($Re < 10000$) geeignet ist und das Turbulenzmodell, welches primär bei hohen Re-Zahlen ($Re > 100000$) zum Einsatz kommt.

7.3.3.1. Direkte Simulation

Die Zielsetzung ist die Bestimmung aller Geschwindigkeitsgrößen für den gesamten Berechnungsraum. Damit eine hohe Auflösung für die Scherströmung an der Wand gewährleistet ist, verwendet dieses Modell für die Diskretisierung der Grenzschicht als auch des gesamten Berechnungsraumes eine sehr große Anzahl an Volumenelementen. Die hohe Auflösung des unmittelbaren Wandbereiches, wo die Geschwindigkeit bis auf Null abnimmt, ermöglicht die Haftreibungsbedingung zu erfüllen.

7.3.3.2. Turbulente Simulation

Bei einer turbulenten Strömung ist es nicht möglich alle Geschwindigkeitsgrößen exakt zu erfassen. Aus diesem Grund werden zum lösen der physikalischen Größen universelle Turbulenzmodelle verwendet. Diese Methode basiert auf dem Prinzip der VLS (Very Large Eddies) Turbulenzmodellierung mit einer speziellen Wandfunktion. Die Strömungsausbildung an der Wand folgt dem Profil der turbulenten Grenzschichtströmung. Näheres über die Ausbildung der turbulenten Grenzschicht ist in der einschlägigen Fachliteratur zu finden [37].

7.4. Programmbeschreibung

7.4.1. *PowerFLOW-Module*

Die PowerFLOW-Module können grundsätzlich als Client- und Server-Module klassifiziert werden. Die Client-Module stellen eine interaktive Applikation dar, die einerseits zur Formulierung des Strömungsproblems und andererseits für eine graphische Auswertung der numerisch berechneten Daten dient und problemlos von jedem Arbeitsplatzrechner zu steuern ist. Die einzelnen Server-Module besitzen kein graphisches Interface und laufen im Hintergrund am Server. Der Datenaustausch zwischen beiden Hauptmodulen erfolgt mittels des Client-Server-Systems, dessen Struktur in Abb. 7-2 veranschaulicht ist.

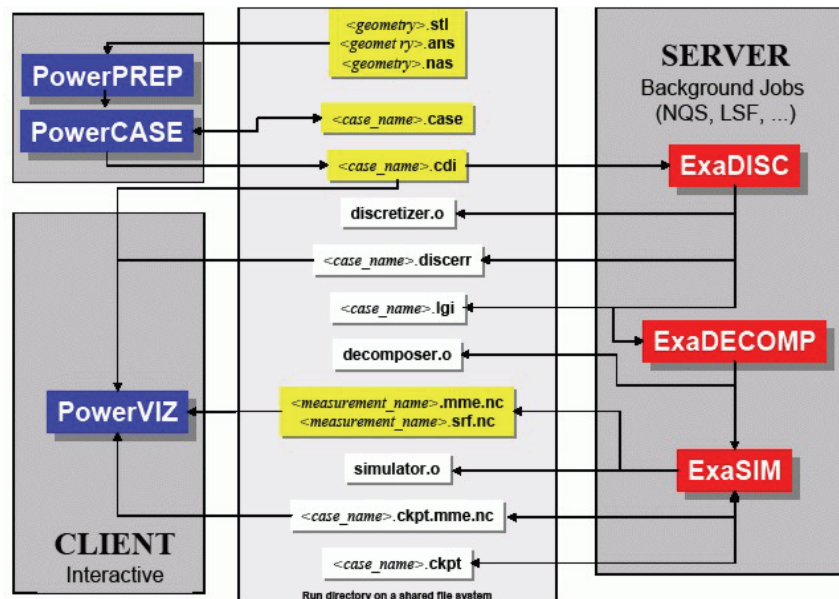


Abb. 7-2: Schematische Strukturübersicht von Client-Server-System [13]

7.4.1.1. Client-Grundmodule

Die zwei grundlegenden Module des Client-Systems sind der Präprozessor PowerCase, zum Erstellen von Simulationsdateien (`.case` und `.cdi` Files) und der Postprozessor PowerVIZ, welcher eine Visualisierung der Simulationsergebnisse ermöglicht.

7.4.1.1.1 PowerCASE

PowerCASE bietet ein benutzerfreundliches graphisches Interface, welches grundsätzlich für die Erstellung, Bearbeitung und Vorbereitung von Dateien (`.case` und `.cdi`) für den Simulationsprozess dient. Die kompilierte Datei (`.cdi`) dient als Basis für den gesamten Prozessablauf, aus ihr wird die Simulationsdatei erstellt und damit die eigentliche Simulation gestartet.

Für eine einfachere Bedienung ist das Programm mit Tabellenfenster strukturiert, die eine stufenweise Formulierung des Simulationsmodells ermöglichen. Die vordefinierte Geometrie lässt sich zwei- und auch dreidimensional darstellen. Im Vordergrund steht die Festlegung der Simulationsart: 2D oder 3D; Innen- oder Außenströmung; direktes oder turbulentes Simulationsmodell; isothermische oder thermische Simulation. Außerdem beinhaltet das Programm folgende Definitionsmöglichkeiten:

- importiert unterschiedlichste Geometrien in den Formaten: STL, Nastran BDF, Patran Neutral File oder ANSYS,
- importiert und erstellen Variable Resolution Regions (VR-Regions) – Bereiche mit unterschiedlich hoher Gitterauflösung,

- importiert oder erstellt Measurement Regions – Bereiche mit unterschiedlicher Auflösung, in denen die Simulationsergebnisse ausgewertet werden,
- legt die Simulations- und Strömungsparameter und Randbedingungen fest,
- legt die Initialbedingungen der Simulation fest,
- legt die Berechnungsparameter fest,
- legt die Checkpoints fest – während der Simulation nach einer definierten Anzahl von Zeitschritten erstellte Datei mit Zwischenergebnissen,
- erzeugt das .case-File, welches in PowerCASE wieder eingelesen und bearbeitet werden kann,
- kompiliert ein .cdi-File, welches für die Diskretisierung und Simulation verwendet wird.

Eine Alternativmöglichkeit für die Erstellung des Simulationsmodells stellt die in PowerCASE zur Verfügung stehende Python-Programmiersprache dar, wo man mittels einfacher mathematischer Ansätze die einzelnen Simulationsparameter sowie das gesamte Modell ebenfalls festlegen kann.

7.4.1.1.2 PowerVIZ

PowerVIZ ist ein Postprozessor, der für die Visualisierung der Geometrie und der Simulationsergebnisse innerhalb der Measurement Region zur Anwendung kommt. Das Programm erlaubt eine Vielzahl an Darstellungsmöglichkeiten des Strömungsproblems. Dabei kann die Körperoberfläche (Surfels) oder das Strömungsgitter (Voxels) betrachtet werden:

- dreidimensionale Betrachtung des gesamten Kontrollvolumens
- Darstellung der skalaren Fluidvariablen (z.B. Druck, Geschwindigkeitsgröße, Temperatur, usw.)
- Konturbilder der skalaren Fluidvariablen
- Isosurface-Darstellung für Gebiete mit dem Betrag nach gleich großer Verteilung
- Querschnittdiagramme für beliebige Richtungen
- Stromlinien und Vektorbilder der Fluidvariablen (z.B. Geschwindigkeit, Wirbel, usw.)
- graphische Darstellung der Fluid- und Oberflächenvariablen
- graphische Darstellung der zeitabhängigen Kraftentwicklung
- Integration

7.4.1.2. Client-Zusatzmodule

Die Zusatzmodule sind für den Aufbau des Simulationsmodells nicht unbedingt erforderlich, dennoch kann der Einsatz eine Optimierung der Berechnungsleistung bringen. PowerFLOW enthält mit PowerPREP und PowerEXP zwei Zusatzmodule.

7.4.1.2.1 PowerPREP

Dieses Zusatzprogramm dient hauptsächlich zur Neugenerierung und Qualitätsbeurteilung des vorhandenen, facettierten Oberflächennetzes eines Simulationskörpers. Da Singularitäten sowie Überlappungsbereiche der Netzstruktur die Simulationsberechnung behindern können, verfügt PowerPREP über die Möglichkeit solche Strukturinhomogenitäten zu bereinigen. Außerdem liefert das Modul eine übersichtliche Informationsangabe über die Körpergeometrie als auch das erstellte Netz, welches dann direkt in das PowerCASE in unterschiedlichen Formaten exportiert werden kann.

7.4.1.2.2 PowerEXP

Dient zum Abbilden der Measurementszellen an der Oberfläche zu einem Finite Elemente-Netz, die als Randbedingungen für den Solver dienen.

7.4.1.3. Server-Module

Um das Simulationsproblem zu lösen, benutzt das PowerFLOW einen dreistufigen Berechnungsvorgang, der mittels einer Subroutine gestartet wird. Die verwendeten Server-Module haben keine graphische Oberfläche und werden direkt am Server ausgeführt. Man unterscheidet drei folgende Module:

7.4.1.3.1 ExaDISC

Dieses Modul generiert das Raumgitter, in dem es die Geometrie des Bezugsvolumens automatisch in Volumenelemente (Voxels) und Oberflächenelemente (Surfels) zerlegt.

7.4.1.3.2 ExaDECOMP

In diesem Berechnungsschritt wird das Raumgitter in mehrere Recheneinheiten zerlegt, um ein paralleles Abarbeiten der Partitionen auf einem Multi-Prozessor-Server zu ermöglichen.

7.4.1.3.3 ExaSIM

Ist der eigentliche Simulator, der anschließend die Berechnungsergebnisse erzeugt.

Standardmäßig werden diese drei Module in der dargestellten Reihenfolge unmittelbar hintereinander ausgeführt. Für eine bessere Übersicht kann man jedoch die einzelnen Module auch getrennt starten.

7.5. Modellaufbau

7.5.1. Meißelgeometrie

Die Grundlage für den geometrischen Aufbau des Modell-Fallmeißels bildet ein konventioneller Flachmeißel mit Lenkblechen für Pfahldurchmesser 120 cm, mit einer Gesamtlänge von 424 cm und einer Gesamtmasse von 5,20 t. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Ansicht des Meißels und das dementsprechende Modell samt der Querschnitte.

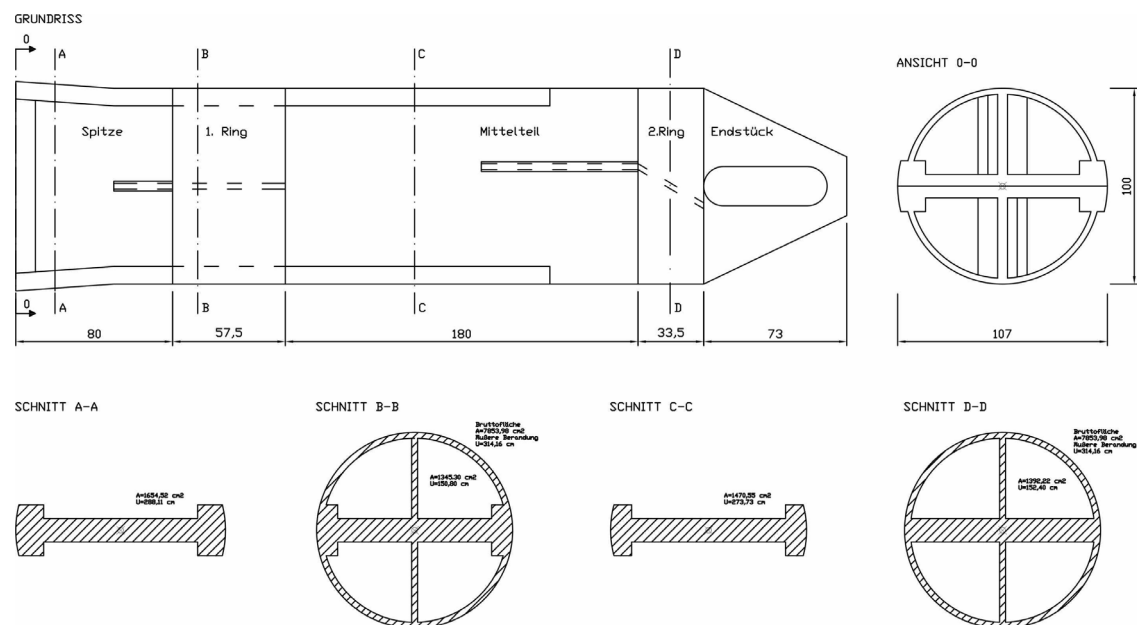


Abb. 7-3: Zeichnung eines Flachmeißels mit “Lenkblechen“ (Längs- und Querschnitte) [19]

Der in der Abb. 7-3 dargestellte Flachmeißel wurde auf der Baustelle durch Vermessung und Fotodokumentation aufgenommen und anschließend mittels AutoCAD digital modelliert. Wie dem Modellentwurf zu entnehmen ist, besteht der Flachmeißel aus einem 12 cm dicken Flachstahl, der sich in drei Hauptkörperteile gliedern lässt. Die Spitze des Meißels erfährt eine Querschnittsverbreiterung gegenüber dem Regelquerschnitt von 100 cm bis auf 107 cm und ist mit einer Meißelschneide abgeschlossen. Von der Spitze bis in den mittleren Teil verlaufen entlang des Meißelkörpers zwei seitliche Verstärkungen, die im dargestellten Querschnitt gut zu erkennen sind. Der Mittelteil wird durch zwei Ringe mit einem Außendurchmesser von 100 cm und einer Wandstärke von 3,5 cm charakterisiert. Diese müssen aus Gründen einer höheren Schadensanfälligkeit zusätzlich durch 3 cm dicke Steifen verstärkt werden. Die Steife

des ersten Ringes ist zentrisch zum Ringmittelpunkt positioniert und außerhalb des Ringes abgeschrägt ausgeführt. Die Steife des zweiten Ringes, ist außerhalb des Ringes von Längsachse seitlich versetzt und innerhalb des Ringes schräg montiert, damit eine Drehbewegung beim Grundwassereinsatz erzielt wird. Im Normalfall sind die schrägen Steifenkanten durch eine abgerundete Schweißwulst geschützt. Für die Modellierung wurden sie jedoch aufgrund der komplizierten Darstellung nicht berücksichtigt. Das Endstück des Meißels dient zur Anbindung der Lasche für das Hubseil, die im Simulationsmodell ebenfalls nicht dargestellt wurde.

Nachdem das Flachmeißelmodell in AutoCAD modelliert wurde, lässt es sich durch Exportieren der Geometrie in ein STL-Format umwandeln, welches dann von PowerCASE eingelesen werden kann. Zum Erstellen einfacherer Modellgeometrien lässt sich auch PowerCASE allein verwenden.

7.5.2. Geometrie der Simulationsvolumens („Bounding Box“)

Das Simulationsvolumen stellt einen Begrenzungsraum für die Simulationsberechnung dar und kann beliebig groß gewählt werden. Dabei muss aber die Form des Simulationsvolumens immer rechteckig sein. In der vorliegenden Arbeit sind je nach Strömungsart folgende Simulationsvolumen definiert:

- **Internal Flow (Innenströmung):**

Bei der Innenströmung wird der Meißel als ein Umströmungskörper in einer Verrohrung betrachtet, wobei das Rohr innerhalb des Simulationsvolumens liegen muss, damit die Bedingung des rechteckigen Begrenzungsraumes erfüllt ist. Das gesamte Rohr ist als Zylinder definiert und besitzt eine Länge von 12,0 m, wobei der Durchmesser mit 1,1 m dem Verrohrungsdurchmesser gleich ist. Das rechteckige Simulationsvolumen ist in allen Richtungen um 1,0 m vom festgelegten Zylinderkörper nach außen versetzt. Damit die Strömung in dem Rohr überhaupt stattfinden kann, sind zwei zusätzliche Volumenkörper notwendig, die am Rohreintritt und Rohraustritt definiert werden. Diese sind für die Festlegung der Randbedingungen wichtig und müssen innerhalb des Simulationsvolumens liegen, wobei deren Geometrie keinen Einfluss auf die Berechnung hat. Für das berechnete Grundmodell wurde der Abstand zwischen Meißel und Zylinderanfang bzw. Zylinderende mit 3,88 m angenommen.

- **External Flow (Außenströmung):**

Bei der Außenströmung besteht die Möglichkeit das Simulationsvolumen als „Windkanal“ zu modellieren. Dabei wird anliegend an jeder der sechs Flächen des rechteckigen Begrenzungsraumes ein zusätzliches, dünnes dreidimensionales Wandelement erstellt, für das eine passende Randbedingung aufgestellt wird. Für die durchgeführte Außenströmungsberechnung betragen die Abmessungen des Simulationsvolumens 14,2 m in der Länge (x-Richtung) und jeweils 6,4 m in der Breite (y-Richtung) und Höhe (z-Richtung). Die Wandelemente des Windkanals besitzen eine Wandstärke von 0,1 m, wobei sie immer dieselben Abmessungen wie die jeweilige angrenzende Begrenzungsfläche haben. Bei der Wahl der Abmessungen wurde angenommen, dass die Randflächen keinen bedeutenden Einfluss auf die Strömung um den Meißel haben. Somit ergibt sich der Abstand zum Meißel in y- und z-Richtung zu 2,565 m und in x-Richtung zu 4,88 m.

7.5.3. *Simulationsparameter*

7.5.3.1. Globale Parameter

Mit den Globalen Parametern werden alle für die Simulationsberechnung erforderliche Größen festgelegt. Primär sind es charakteristische physikalische Fluid- und Strömungskennwerte, die zu Bestimmung der Strömungsparameter dienen.

7.5.3.2. Fluideigenschaften

Das gesamte Modell ist prinzipiell aus Wasser und dem festen Meißelkörper aufgebaut. Da die Materialeigenschaften des Umströmungskörpers keinen direkten Einfluss auf die Entwicklung der Strömungsvorgänge aufweisen, sind sie für die Berechnung nicht zu berücksichtigen. Lediglich die physikalischen Eigenschaften des Wassers werden im Zusammenhang mit den Strömungskenngrößen festgesetzt.

Beim Grundmodell sind folgende Wassereigenschaften definiert:

- Dichte: 1000 kg/m^3
- Temperatur: 10°C
- Kinematische Viskosität: $1,3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

7.5.3.2.1 Strömungsparameter

Die charakteristischen Strömungsparameter dienen in erster Linie für die Simulationssteuerung. Sie bilden einen Medianwert für eine bestimmte dynamische Schwankungsbreite der Geschwindigkeiten, Drücke, usw., innerhalb der die Strömung simuliert wird. Für das Grundmodell sind folgende Parameter festgesetzt:

- **Charakteristischer Druck:** statischer Druck mit 101325 Pa
- **Charakteristische Geschwindigkeit:** 0,1 m/s bis 10 m/s (*wird variiert*)
- **Charakteristische Länge:** Rohrdurchmesser mit 1,1 m (*Innenströmung*)
Meißellänge mit 4,24 m (*Außenströmung*)
- **Charakteristische Fläche:** Rohrquerschnitt (*Innenströmung*)
Meißelstirnfläche 0,426215 m² (*Außenströmung*)
- **Auflösung entlang char. Länge:** 50 Elemente (*Innenströmung*)
212 Elemente (*Außenströmung*)

7.5.3.3. Variable Resolution Regions

Mit den VR-Regions wurden innerhalb des Simulationsvolumens Bereiche mit unterschiedlicher Auflösung definiert, um eine genauere Betrachtung bestimmter Bereiche zu ermöglichen. Somit war nicht notwendigerweise das gesamte Modell in gleich große Volumenelemente zu zerlegen, wodurch einerseits eine Ersparnis der Rechenzeit und andererseits eine erhöhte Berechnungsgenauigkeit erzielt werden konnte. Für die durchgeführten Berechnungen sind folgende Bereichsunterteilungen gewählt worden:

- **Internal Flow:**

Aufgrund des geometrischen Aufbaus des Modells hat sich hier eine zweifache Bereichsunterteilung als günstig erwiesen. Somit stellt der Begrenzungsraum des Simulationsvolumens außerhalb vom Zylinder den VR-Bereich 1 und der Zylinderraum, in dem sich auch der Meißel befindet, der Bereich mit feinerer VR2 dar. Der Übergang zwischen zwei unterschiedlichen Auflösungsbereichen ist linear und im Programm vordefiniert.

- **External Flow:**

Da bei der Außenströmung das Simulationsvolumen des Windkanals wesentlich größer als bei der Innenströmung ist, war eine mehrfache Unterteilung des Simulationsraumes erforderlich. Für diese Berechnung wurden insgesamt drei ineinander liegende VR-Bereiche unterschiedlicher Auflösung gewählt, die alle den Meißelkörper enthalten.

7.5.4. Randbedingungen

7.5.4.1. Internal Flow

Bei Innenströmungssimulation sind folgende Randbedingungen definiert:

- **Rohrwand bzw. Oberfläche Festkörper:** Entlang der Rohrwand bzw. der Oberfläche eines festen Körpers muss die Strömungsgeschwindigkeit Null betragen. Die Randbedingung, bei der die Strömungsgeschwindigkeit diese Null-Bedingung in allen Richtungen (x , y , z) erfüllt, ist an der Rohrwand sowie an der Meißeloberfläche zu setzen. Eine detaillierte Untersuchung der Meißelwiderstandskräfte in Abhängigkeit von verschiedenen Wandeinflüssen und Wandrauigkeiten wird näher in Parameterstudie erläutert.
- **Boundary portions:** Mit dieser Randbedingung können aus Facetten eines beliebigen Volumenbereiches partikuläre Flächen erzeugt werden. Diese lassen sich durch die Verschneidung eines Grundvolumenbereiches mit einem Randvolumenbereich erstellen. Für das Grundmodell wurde die Boundary portions bei der Innenströmung für die Festlegung von Ein- und Auslauf am Modell-Rohr (Zylinder) benutzt. Somit war es möglich, die Strömung innerhalb des Rohres zu simulieren.
- **Strömungsgeschwindigkeit am Einlauf:** Diese Randbedingung wird am Einlauf des zylindrischen Modell-Rohres für die gesamte Querschnittsfläche festgelegt. Im Grundmodell ist die Strömungsgeschwindigkeit äquivalent der charakteristischen Geschwindigkeit, die als „Globaler Parameter“ definiert ist. Für die Untersuchung verschiedener Einflüsse der Strömungsgeschwindigkeit auf den Strömungs- sowie Kraftverlauf wurde die Geschwindigkeit in x -Richtung innerhalb eines Bereiches von 0,1 m/s bis 10 m/s variiert.
- **Rohrauslauf:** Um ein unbehindertes Ausfließen des Fluids aus dem Zylinder zu gewährleisten, wird am Auslaufquerschnitt eine Randbedingung mit dem statischen Druck aufgestellt.

7.5.4.2. External Flow

Bei der Außenströmungssimulation wurde das Umströmungsverhalten eines Meißelkörpers in einem vordefinierten „Windkanal“ (Wasserkanal) simuliert, wobei folgende Randbedingungen festgelegt sind:

- **Oberfläche Festkörper:** wie bei der Innenströmung.

- **Einlauf „Windkanal“:** Am Einlaufquerschnitt gilt dieselbe Randbedingung wie bei der Innenströmung, wobei für die Außenströmung die Strömungsgeschwindigkeit für das gesamte Wandelement am Windkanaleingang definiert ist.
- **Begrenzungsflächen „Windkanal“:** Für die vier Wandelemente der Begrenzungsflächen des definierten Simulationsvolumens ist eine reibungslose Wand vorgegeben, damit die Durchströmung ohne Wandreibungseinflüsse stattfinden kann. Demzufolge stellt sich an den Wänden vom „Windkanal“ keine Grenzschicht ein.
- **Auslauf „Windkanal“:** Das Wandelement ist analog zum Auslaufquerschnitt bei der Innenströmung definiert.

7.5.5. Anfangsbedingungen

- **Strömungsgeschwindigkeit Fluidvolumen:** Für beide Strömungsarten besitzt das gesamte Simulationsvolumen, welches als Fluid definiert ist, für jedes Teilvolumenelement des Raumgitters die gleiche Strömungsgeschwindigkeit. Diese entspricht der charakteristischen Geschwindigkeit des Fluids.

7.5.6. “Measurements Parameter“

Mit den “Measurements Parameter“ werden bestimmte geometrische Interessenbereiche des Simulationsvolumens festgelegt, innerhalb der die Simulationsergebnisse ausgewertet werden. Die Datenspeicherung wird durch Mittelwertbildung über ein definiertes diskretes Zeitintervall festgelegt, welches im Programm in “Frames“ eingelesen wird. Die Zeitintervalle, für welche die Messdaten abgespeichert werden, lassen sich mittels vier Parameter kontrollieren: Startzeit, Endzeit, Periode zwischen den einzelnen Intervallen und Intervall der Mittelwertbildung.

7.5.6.1. Standard Measurements by Region

Mit dieser Funktion lässt sich das Strömungsverhalten innerhalb eines festgelegten Messbereiches messen. Für das Grundmodell sind folgende Messparameter definiert:

- **Internal Flow:** Der maßgebende Messbereich, für den das Strömungsverhalten ausgewertet wird, ist hier mit dem Zylindervolumen festgelegt.

Festgelegte Zeitintervallparameter:

- Startzeit: 0 Zeitschritte

- Endzeit: 30000 Zeitschritte
 - Periode: 100 Zeitschritte
 - Intervall der Mittelwertbildung: 10 Zeitschritte
-
- **External Flow:** Der maßgebende Messbereich, für den das Strömungsverhalten ausgewertet wird, ist hier mit dem VR1-Bereich definiert.

Festgelegte Zeitintervallparameter:

- Startzeit: 0 Zeitschritte
- Endzeit: 50000 Zeitschritte
- Periode: 1000 Zeitschritte
- Intervall der Mittelwertbildung: 100 Zeitschritte

7.5.6.2. Composite Force Measurements by Region

Mit dieser Funktion kann man den Verlauf der an der Oberfläche eines festen Körpers wirkenden Kräfte in Abhängigkeit von der Zeit berechnen. Die Gesamtkraft wird ebenfalls aus einem Mittelwert eines definierten Zeitintervalls gebildet. Für beide Strömungsarten gelten gleiche Zeitintervallparameter wie bei den „Standard Measurements by Region“. Für das Grundmodell sind folgende Messbereiche definiert:

- **Internal Flow:** Der Messbereich, welcher für die Bestimmung der Kräfte am Meißel dient, ist direkt für die im Programm als Festkörper definierte Meißelgeometrie festgesetzt.
- **External Flow:** Der Auswertungsbereich für die am Meißel wirkenden Kräfte wurde mit dem VR2-Bereich festgelegt.

7.6. Parameterstudie - Hinweise zur Grundmodellentwicklung

Bevor die eigentlichen Simulationsberechnungen durchgeführt werden konnten, fanden umfangreiche Vergleichsrechnungen statt. Anhand dieser Untersuchungen unter der Variation der Randbedingungen, Netzfeinheit, usw., wurde ein realitätsnahes Modell aufgestellt, welches für die Durchführung der Parameterstudien geeignet war. Als Grundmodell wurde schließlich ein Flachmeißel mit Lenkblechen (siehe Kap. 7.5.1) verwendet. Als Kriterium für die Auswertung einzelner Testmodelle wurden vorwiegend die an dem Flachmeißel angreifenden Widerstandskräfte herangezogen. Dabei stand nicht nur die Gegenüberstellung

einzelner Parametervariation im Vordergrund, sondern auch eine Optimierung der erforderlichen Berechnungsdauer.

Das Hauptaugenmerk wurde primär auf die Innenströmungsberechnung gelegt, da dieses Modell der Realität am besten entsprach, d.h. Simulation der Strömung auf den Meißel in der Verrohrung. Die durchgeführte Außenströmungsstudie als Simulation der Strömung auf den Meißel ohne Verrohrung sollte nur als Vergleich dienen.

Im Laufe der Modellentwicklungsphase sind die Einflüsse folgender Parameter auf den zeitabhängigen Kraftverlauf auf den Meißelkörper untersucht worden:

- Netzauflösung entlang der charakteristischen Länge
- Oberflächennetz des Meißelkörpers
- Wandparameter
- Turbulence Length Scale
- Impulsiver vs. nichtimpulsiver Start

7.6.1. Netzauflösung entlang der charakteristischen Länge

Mit diesem Parameter wird die Auflösung des Raumgitters entlang der charakteristischen Länge festgelegt, die hier mit dem Innendurchmesser des Modell-Rohres (\varnothing 110 cm) vorgegeben ist. Anhand der berechneten Widerstandskraftverläufe an der Meißeloberfläche soll der Einfluss unterschiedlicher Gitterauflösung auf die Berechnungsergebnisse sowie die damit zusammenhängende erforderliche Berechnungsdauer näher untersucht werden.

In Abb. 7-4 sind die Ergebnisse dieser Parametervariation für eine Strömungsgeschwindigkeit mit $v = 1$ m/s dargestellt. Wie den Kraftverläufen zu entnehmen ist, besteht zwischen den Widerstandskräften für die niedrigste (20) und höchste (100) Auflösung eine relativ große Differenz von etwa 1000 N. Der Großteil der berechneten Kräfte jedoch innerhalb eines engeren Bereiches liegt. Infolge des Einflusses der ansteigenden Gitterauflösung kommt es zu einer Verzögerung der Kraftentwicklung, wodurch für Simulationsmodelle mit feineren Netzen eine erhöhte Anzahl von Zeitschritten erforderlich war. Bei diesen Berechnungsmodellen sind die anfänglichen Kraftschwankungen und auch die stets vorhandenen Turbulenzschwankungen deutlicher ausgeprägt als bei niedrigeren Auflösungswerten. Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass eine zu niedrig gewählte Auflösung zu physikalisch falschen Ergebnissen führen kann, wobei schon eine leichte Netzverfeinerung eine wesentliche Erhöhung der Berechnungsgenauigkeit bewirkt. Aufgrund

der kleiner werdenden Differenzen der Kraftverläufe zueinander kann eine asymptotische Annäherung an der Widerstandskraft auf einen Endwert angenommen werden.

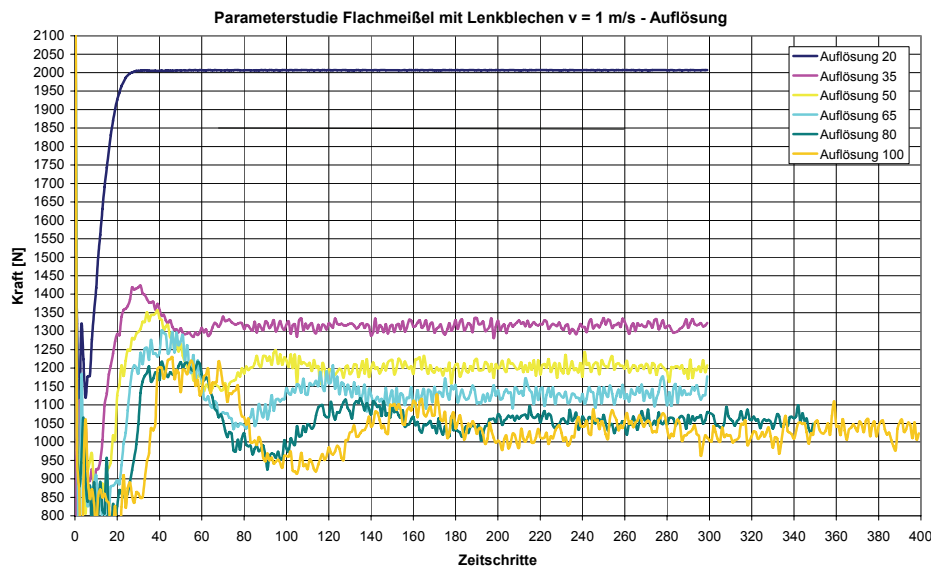


Abb. 7-4: Einfluss des Auflösung entlang der charakteristischen Länge (Rohrdurchmesser) auf den Verlauf und Größe der Widerstandskräfte an einem Flachmeißel mit Lenkblechen für $v = 1 \text{ m/s}$

Die folgende Abb. 7-5 bestätigt, dass die Differenz der beruhigten Widerstandskräfte mit ansteigender Auflösung langsam bis auf Null abnimmt. Dabei stellt die beruhigte Kraft den Mittelwert der Widerstandskraft für den eingependelten Zustand dar. Der anfängliche starke Kraftabfall ist auf die unzureichende Anzahl an Gitterelementen entlang der charakteristischen Länge zurückzuführen. Die nachfolgenden Berechnungen weisen vielfach geringere Kraftdifferenzen zueinander auf. Mit dem ansteigenden Wert der Auflösung erhöht sich zwar die Genauigkeit des berechneten Strömungswiderstandes, allerdings steigt die erforderliche Berechnungsdauer sehr stark an.

Anhand dieser Erkenntnisse, wurde für das Grundmodell der Auflösungswert mit 50 festgelegt. Mit diesem Wert ist eine sehr gute Annäherung an den Kraftverlauf der höheren Testmodelle mit höherer Auflösung gegeben. Qualitativ unterscheiden sich die Ergebnisse nur geringfügig voneinander, wobei der wesentliche Unterschied in der dafür erforderlichen Rechenzeit besteht. Für die gewählte Strömungsgeschwindigkeit $v = 1 \text{ m/s}$ beträgt die Kraftdifferenz zum Testmodell (Auflösung = 100) in etwa $\Delta F_W = 170 \text{ N}$, was im Vergleich zum Meißelgewicht (ca. 5,2 t) vernachlässigbar gering ist. Mit ansteigender Strömungsgeschwindigkeit erhöht sich zwar dieser Kraftunterschied ungefähr quadratisch mit dem Wert der Geschwindigkeit, trotzdem ist die ungefähr 14,0 %-ige Abweichung von der

berechneten Gesamtkraft innerhalb eines noch tolerierbaren Bereiches. Im Gegensatz dazu erhöht sich der erforderliche Berechnungsaufwand für das erwähnte Testmodell (Auflösung 100) um ungefähr 600 % gegenüber dem Basismodell (Auflösung 50). Auf eine höhere Auflösung wird daher aufgrund der Berechnungszeit bei gleichzeitig nur geringfügiger Änderung der Ergebnisse verzichtet.

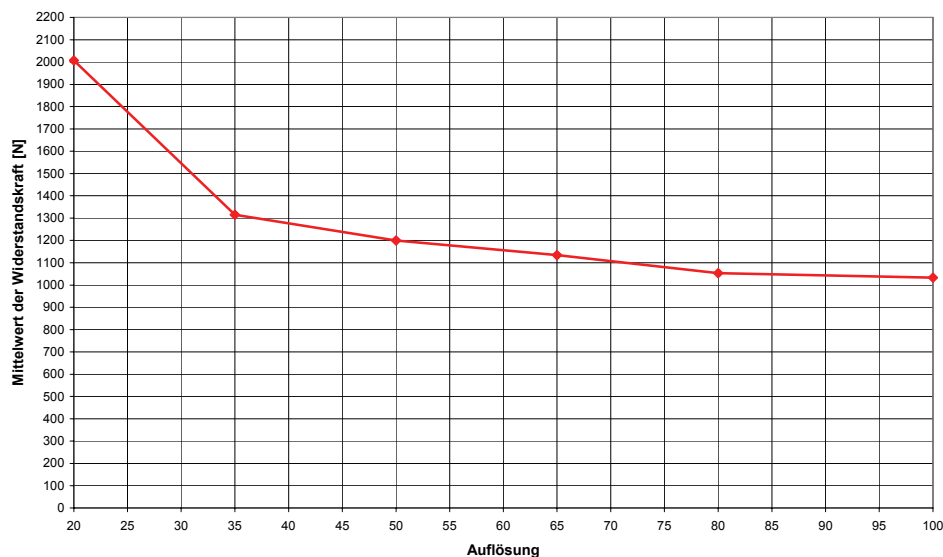


Abb. 7-5: Abhängigkeit des Mittelwertes der Widerstandskraft von der Auflösung entlang der charakteristischen. Länge

7.6.2. *Oberflächennetz des Meißelkörpers*

Die Oberfläche eines festen Volumenkörpers wird durch ein Netz repräsentiert, welches aus einzelnen dreieckförmigen Flächenelementen besteht. Für die Untersuchung der Auswirkung unterschiedlicher Netzfeinheiten der Meißeloberfläche sind vier Testmodelle erstellt worden, die in Abb. 7-6 dargestellt sind. Beim ersten Oberflächenmodell wurde auf eine zusätzliche Netzbearbeitung verzichtet und die automatisch von AutoCAD generierte Oberflächenstruktur mit 728 Elementen verwendet. Diese diente als Basis für die Generierung der Oberflächennetze der restlichen Testmodelle mit 1306, 2150 und 3562 Elementen. Hierfür wurde das Programm PowerPREP (vgl. Kap.7.4.1.2.1) verwendet. Bei der Modellierung wurde darauf geachtet, dass die Netzstruktur gleichmäßig und möglichst ohne Elemente mit extremen Geometrieverhältnissen aufgebaut ist.

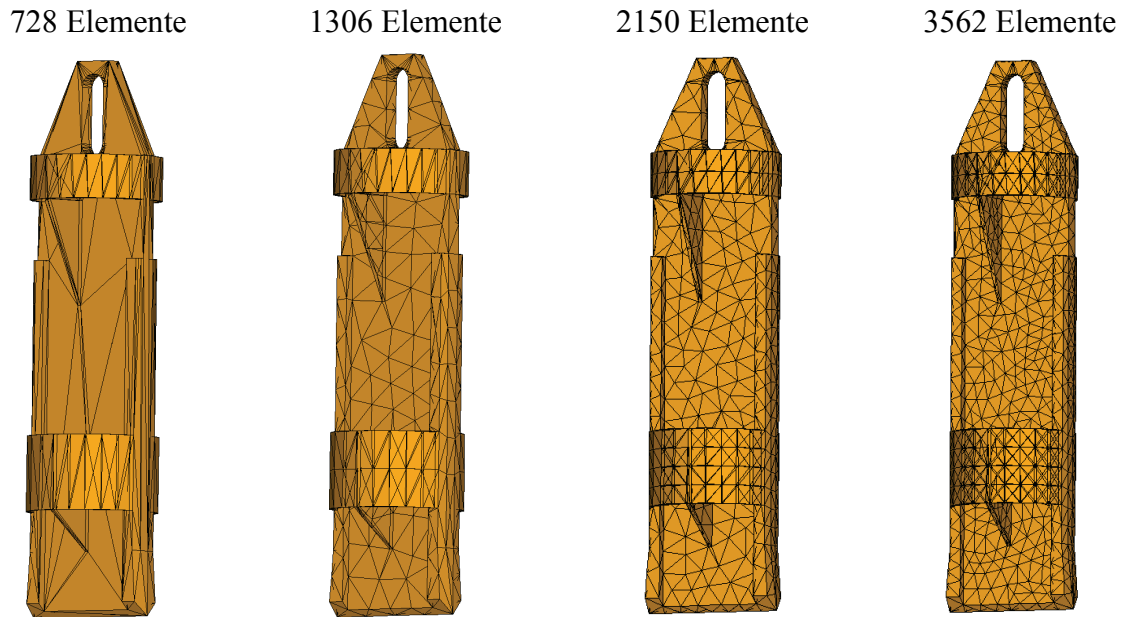
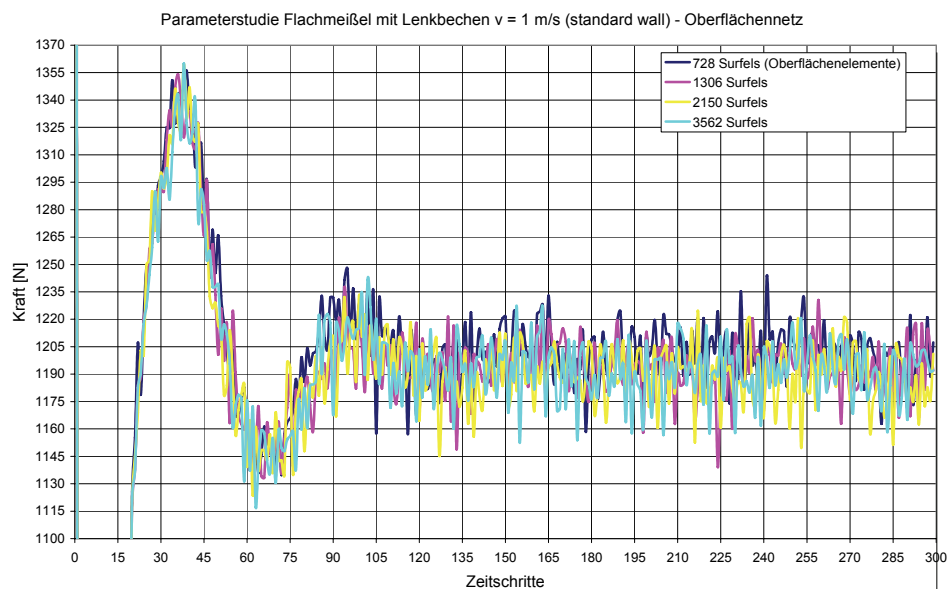


Abb. 7-6: Unterschiedliche Netzfeinheiten der Grundmodelloberfläche

Abb. 7-7 kann entnommen werden, dass die Verfeinerung des Oberflächennetzes keinen wesentlichen Einfluss auf die Größe und den Verlauf der Widerstandskraft des Meißels aufweist. Es ist zwar ein minimaler Kraftabfall von ungefähr 1 % bei allen Testmodellen mit adaptiertem Netz gegenüber dem Basismodell zu beobachten, dieser ist jedoch nicht von großer Bedeutung und wird daher weiter nicht berücksichtigt.

Abb. 7-7: Einfluss des Oberflächennetzes auf den Verlauf und Größe der Widerstandskräfte an einem Flachmeißel mit Lenkblechen für $v = 1 \text{ m/s}$

7.6.3. *Wandparameter*

Die Randbedingung an den Wänden kann für beliebig ausgewählte Begrenzungsflächen des Simulationsvolumenbereiches sowie an jeder Festkörperoberfläche festgelegt werden. Wände sind fluidundurchlässigen Flächen, entlang derer sich ein besonderes Strömungsverhalten einstellt.

Um die Einflüsse der Randbedingungen an der Verrohrung auf die Rechenergebnisse zu untersuchen, sind folgende Wandparameter definiert worden:

- **Frictionless wall (Reibungslose Wand):** Stellt eine idealisierte Wand dar, entlang der sich keine Grenzschicht entwickelt, weil keine Haftreibung vorhanden ist. Demzufolge ist der Wert der strömungsbedingten Reibungskräfte an einer solchen Wand gleich Null.
- **Standard wall (Standardwand):** Simuliert eine passive Wand, entlang der sich infolge der vorhandenen Haftreibung Reibungskräfte und damit eine Grenzschicht aufbauen kann. Die Geschwindigkeit unmittelbar an der Wand ist gleich Null.
- **Sliding wall (Bewegliche Wand):** Diese Wandart besitzt prinzipiell die gleichen Eigenschaften wie eine Standardwand, wobei sie sich mit einer konstanten Geschwindigkeit parallel zu sich selbst bewegen kann.

Grundsätzlich wurde für die Meißeloberfläche in allen der sieben Testmodelle die Standardwand verwendet. Verändert wurden primär nur die Wandparameter an der Verrohrungswand. Da die Meißeloberfläche sowie die Verrohrungsinnenwand nicht als vollkommen glatt angesehen werden können, sondern leichte Unebenheiten auf Mikroebene aufweisen, wurde auch die Auswirkung verschiedener Oberflächenrauigkeiten untersucht. Die Rauigkeiten wurden zwischen 0 bis 1 mm variiert.

Abb. 7-8 ist zu entnehmen, dass die drei grundlegenden Modelle (standard, sliding und frictionless wall) ohne zusätzliche Angabe der Oberflächenrauigkeit eine merkbare Abweichung in der Größe der Widerstandskraft aufzeigen. Diese Kraftdifferenz ist auf den erhöhten Reibungswiderstand zurückzuführen, der am maßgebenden Querschnitt vom Fluidvolumen überwunden werden muss. Infolge der gewählten Wandparameter ändert sich auch die Verhaltensweise der Flüssigkeit in unmittelbarer Nähe der Verrohrungswand, was zu unterschiedlicher bzw. überhaupt keiner Grenzschichtausbildung führt. Demzufolge kommt es zu einer Einengung im Durchströmungsquerschnitt, die wiederum einen erkennbaren Einfluss

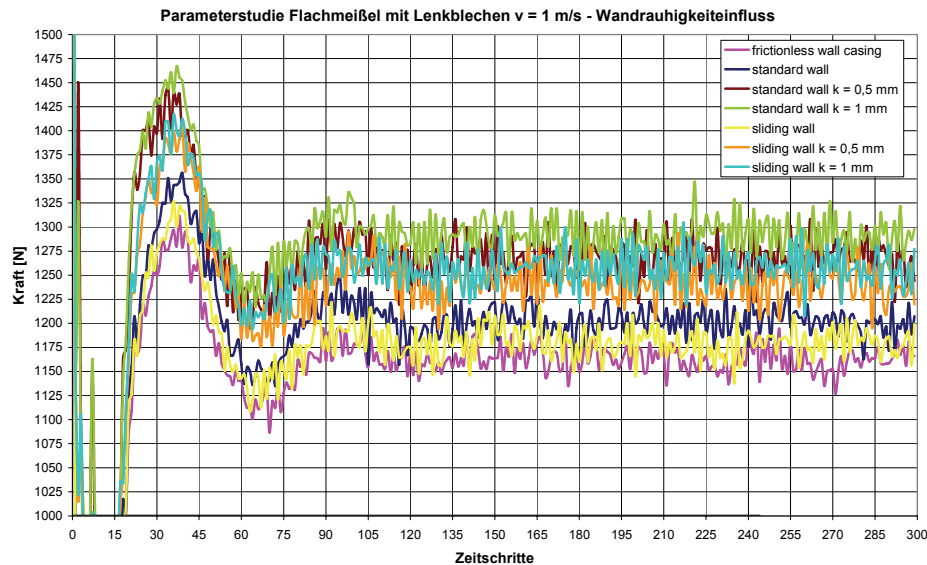


Abb. 7-8: Einfluss der Wandparameter und Oberflächenrauigkeit auf den Verlauf und Größe der Widerstandskräfte an einem Flachmeißel mit Lenkblechen für $v = 1 \text{ m/s}$

auf die Strömungsgeschwindigkeit hat. Aus diesen Überlegungen geht hervor, dass sich für eine reibungslose Wand die niedrigste Widerstandskraft ergeben muss, weil keine Querschnitteinengung stattfindet. Im Gegensatz dazu wird für eine Standardwand die größte Kraft erreicht, die sich infolge der zu überwindenden Haftreibung sowie der erhöhten Strömungsgeschwindigkeit ergibt. Als dritter Wandparameter wurde die bewegliche Wand-Randbedingung der Verrohrungswand zugewiesen. Mittels dieser Bedingung wird eine konstante Wandbewegung in Strömungsrichtung vorgegeben, wodurch der Einfluss des Reibungswiderstandes gegenüber einer gewöhnlichen Standardwand reduziert wird. Infolgedessen ist auch eine Abweichung von dem Kraftverlauf einer Standardwand ersichtlich.

Außer den Kraftverläufen für die drei grundsätzlichen Wandparameter (standard, sliding und frictionless wall), ist in Abb. 7-8 die Auswertung für unterschiedliche Oberflächenrauigkeiten dargestellt. Die Rauigkeitswerte wurden für die bewegliche Wand und die Standardwand variiert. In beiden Fällen lässt sich ein sehr ähnliches Verhalten beobachten. Aufgrund des erhöhten Rauigkeitswertes mit $k = 0,5 \text{ mm}$, kommt es zu einem deutlichen Zuwachs der Widerstandskraft, wobei das Verhältnis zwischen den beiden Wandparametern nahezu erhalten bleibt. Der Kraftanstieg beträgt dabei ungefähr 5 % der Ausgangskraft. Bei einer weiteren Erhöhung der Rauigkeit auf $k = 1,0 \text{ mm}$ verringert sich die Wirkung der rauen Oberfläche auf die Strömung, was im Diagramm durch den geringeren Anstieg des Widerstandes ersichtlich ist. Da eine derart raue Meißeloberfläche nur selten vorkommt, sind diese Ergebnisse nur als Vergleichswerte zu verstehen.

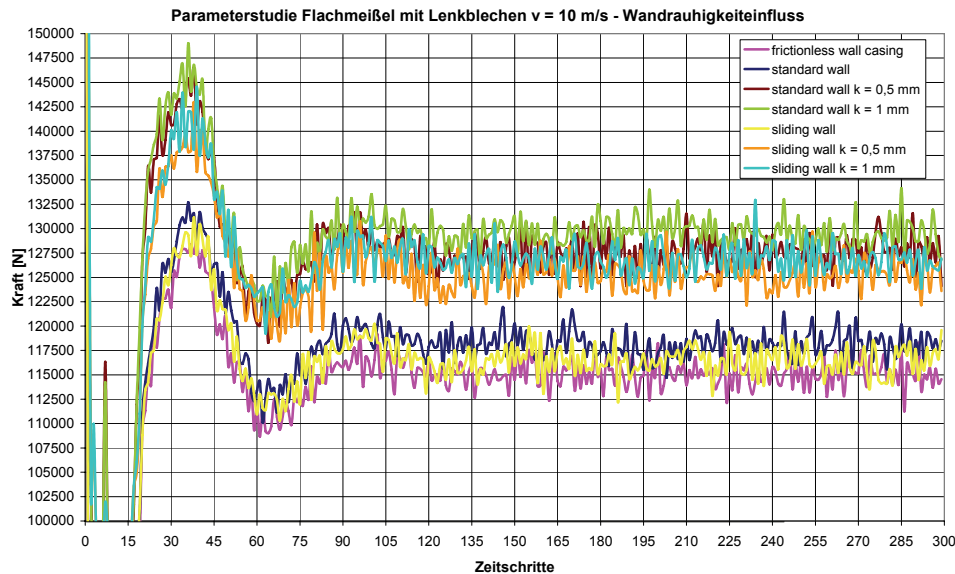


Abb. 7-9: Einfluss der Wandparameter und Oberflächenrauigkeit auf den Verlauf und Größe der Widerstandskräfte an einem Flachmeißel mit Lenkblechen für $v = 10$ m/s

Die Abb. 7-9 zeigt die Auswertung für dieselben Wandparameter, wobei hier die Strömungsgeschwindigkeit mit $v = 10$ m/s festgelegt wurde. Prinzipiell sind keine „qualitativ“ deutlichen Abweichungen gegenüber den Kraftverläufen bei einer Geschwindigkeit von $v = 1$ m/s zu erkennen. Der Unterschied besteht jedoch im Einfluss der Rauigkeit zwischen $k = 0$ und $k = 0,5$ mm auf die Größe der Widerstandskraft. Für eine weitere Steigerung des k -Wertes auf 1,0 mm ist der Einfluss wesentlich niedriger.

7.6.4. Turbulence Length Scale

Dieser Parameter legt die mittlere Größe der Wirbel für eine turbulente Strömung fest und dient zur Abschätzung der turbulenten Fluktuationen in der Strömung. Der vom Programm verwendete Standardwert (0,1x char. Länge) ist von der Größe der charakteristischen Länge abhängig. Für die Verrohrung ist sie mit dem Durchmesser von 1,10 m definiert. Somit ergibt sich die mittlere Größe eines Wirbels von 10 % des Rohrdurchmessers. Da die Strömungsverhältnisse bei der Meißelumströmung stark turbulent sind, konnte durch die Änderung der vorgegebenen Standardeinstellung der Einfluss der Wirbelströmung auf die Widerstandskraft betrachtet werden. Dabei hat man versucht eine möglichst große Abweichung von dem vordefinierten Wert der mittleren Wirbelgröße zu wählen. Demzufolge wurde ein Wert 1 Lattice Length gewählt, d.h. die Größe der Wirbel ist gleich der Kantenlänge des Gitternetzes für die niedrigste Auflösung. Womit die mittlere Größe des Wirbels ungefähr 2 cm beträgt.

Wie der Abb. 7-10 zu entnehmen ist, bewirkt die Änderung der Turbulenzlängenskala keine wesentlichen Änderungen im Kraftverlauf. Unter einer genauen Betrachtung der dargestellten Ergebnisse, lässt sich jedoch eine leichte Verringerung der Unstetigkeiten im Modell mit der neu gewählten Turbulenzlängenskala erkennen. Diese teilweise Beruhigung der Schwankungen ist vor allem auf die kleineren Wirbel zurückzuführen. Da die Ergebnisauswertung keine eindeutigen Abweichungen im Verlauf der Widerstandskraft zeigt, wird daher für das Grundmodell die vordefinierte Turbulenzlängenskala verwendet.

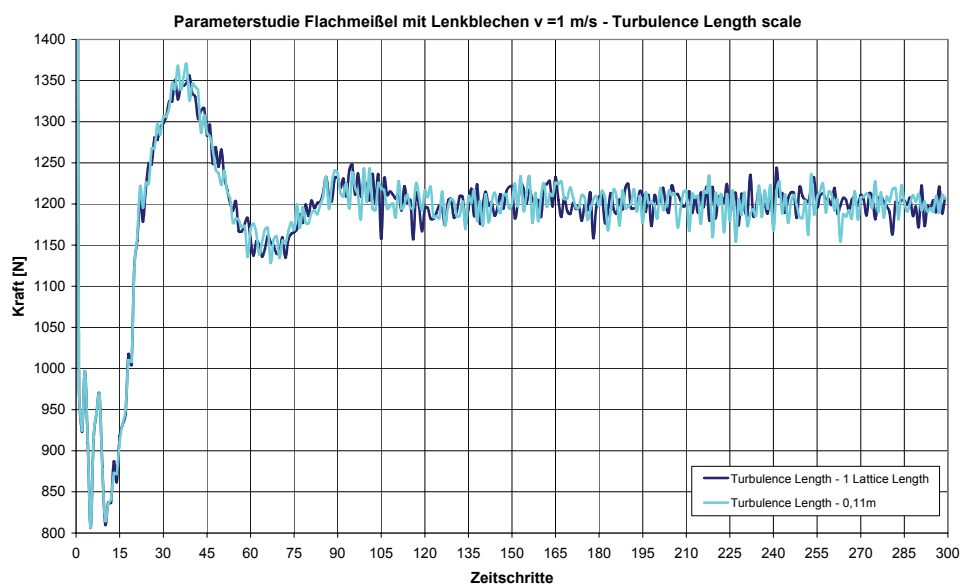


Abb. 7-10: Einfluss der “Turbulence Length Scale“ auf den Verlauf und Größe der Widerstandskräfte an einem Flachmeißel mit Lenkblechen für $v = 1 \text{ m/s}$

7.6.5. *Impulsiver vs. nichtimpulsiver Start*

Ein impulsiver Start entspricht einem Anfangszustand zum Zeitpunkt $t = 0$, für den die Strömung innerhalb des gesamten Simulationsraumes eine definitive Strömungsgeschwindigkeit besitzt. In den meisten Fällen ist diese gleich der Fluidgeschwindigkeit am Einlaufquerschnitt. Im Gegensatz dazu wird beim nichtimpulsiven Start im Moment des Simulationsbeginns die Strömungsgeschwindigkeit im gesamten Simulationsraum mit Null angesetzt und am Eintrittsquerschnitt des Simulationsvolumens die Strömungsgeschwindigkeit vorgegeben. Die Simulation benötigt somit eine gewisse Zeit bis sich die entsprechende Strömungsgeschwindigkeit im Simulationsvolumen ausbilden kann. Gemäß [14] wird für Außenströmungssimulationen überall, wo mit konstanten Geschwindigkeiten zu rechnen ist, der impulsive Initialströmungszustand empfohlen. Dagegen empfiehlt sich für Innenströmungen aufgrund der oft schwierig definierbaren Anfangsbedingungen den nichtimpulsiven Start vorzuziehen. In Abb. XXX sind beide

Anfangszustände für den Zeitpunkt $t = 0$ anhand der dargestellten Strömungsgeschwindigkeit über die gesamte Rohrlänge gut zu erkennen.

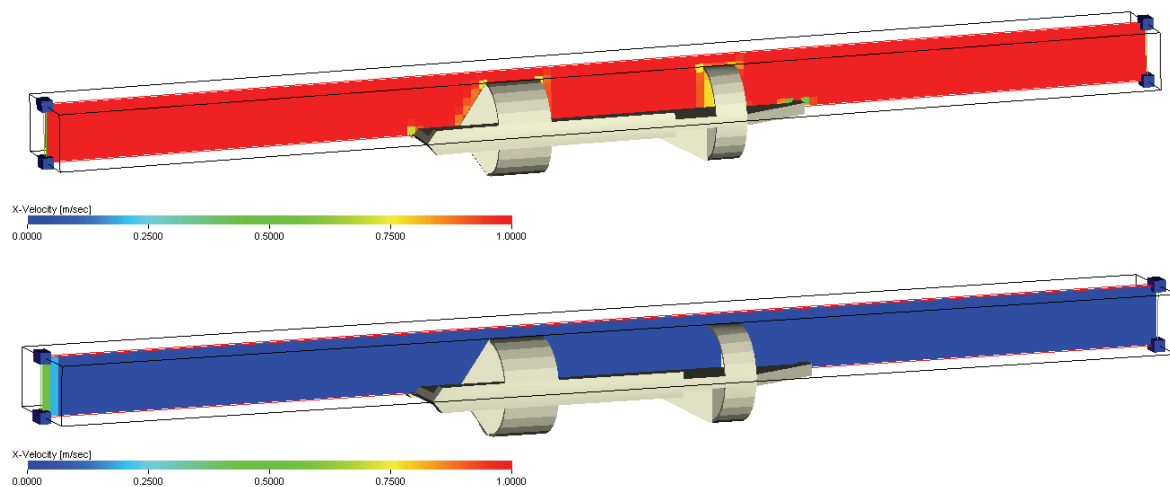


Abb. 7-11: Strömungsgeschwindigkeit in der Verrohrung zum Zeitpunkt $t = 0$ für impulsiven (Bild oben) und nichtimpulsiver Start (unten)

In Abb. 7-11 ist die Kraftauswertung einer Innenströmung für beide Initialzustände dargestellt. Zu Beginn der Simulation ist eine deutliche Verzögerung im Verlauf der Berechnung mit der nichtimpulsiven Anfangsbedingung zu erkennen. Aus der Kraftentwicklung wird ersichtlich, dass die Strömung eine längere Anlaufzeit benötigt, damit sich ein Strömungszustand einstellen kann. Während dieser Anlaufphase wird die zum Anfangszeitpunkt noch ruhende Flüssigkeit aufgrund der Anfangsbedingung am Rohreinlauf in Bewegung versetzt. Dies lässt sich in Diagramm (siehe Abb. 7-12) durch die ausgeprägten Kraftschwankungen und die anschließende Beruhigungsphase beobachten. Innerhalb der ersten Zeitschritte erreicht der Volumenstrom den Bereich der Meißelspitze, wodurch ein starker Anstieg der Kraft verursacht wird. Demzufolge ergibt sich das Maximum der Widerstandskraft nach ungefähr 24 Zeitschritten. Umgerechnet für die gewählte Strömungsgeschwindigkeit von $v = 1$ m/s entspricht das genau dem Abstand vom Meißel bis zum Einlaufquerschnitt. Da jedoch vor dieser Kraftzunahme bereits kleinere Kraftschwankungen vorkommen, wird angenommen, dass die Flüssigkeit schon binnen der ersten Zeitschritte unmittelbar nach dem Simulationsstart eine bestimmte Geschwindigkeit besitzt. Aufgrund der Tatsache, dass bereits eine Strömungsentwicklung vorzeitig stattfindet wird von einer Auswertung des Maximalwertes der Widerstandskraft abgesehen. Anhand erster Überlegungen würde dieses Maximum der Stoßkraft entsprechen, die aus dem Aufprall des Meißels auf die Wasseroberfläche resultiert. Um eine genauere Aussage über die Stoßkraft treffen zu können, sind weitere Untersuchungen notwendig

Aus der graphischen Darstellung der Kraftverläufe für diese zwei grundlegenden Anfangsbedingungen geht hervor, dass es zu keinen wesentlichen Unterschieden für den Endwert der Widerstandskraft kommt. Da der nichtimpulsive Start jedoch mehrere Zeitschritte gegenüber dem impulsiven Anfangszustand erfordert, wurde für die weiteren Simulationsrechnungen der impulsive Start verwendet.

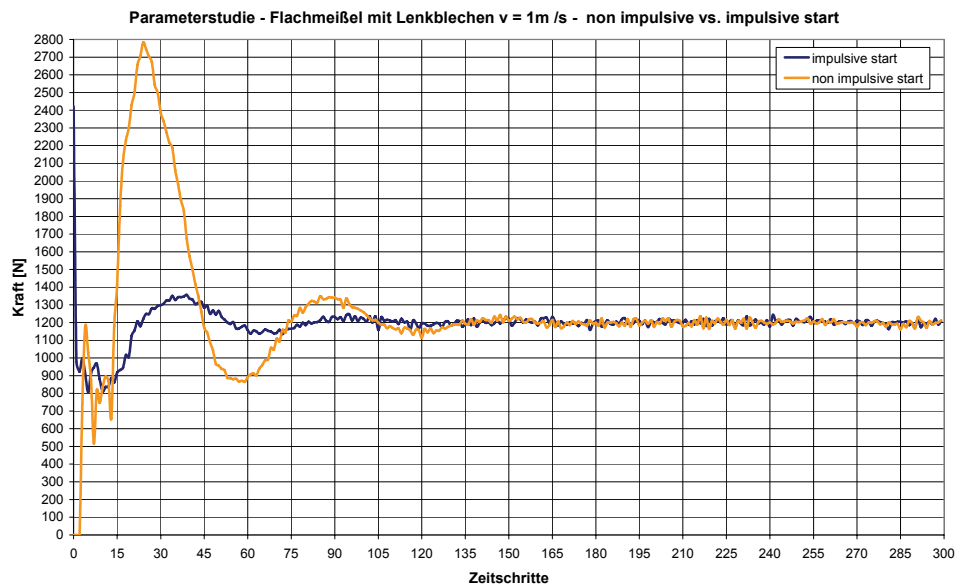


Abb. 7-12: Einfluss der Anfangsbedingung auf den Verlauf und Größe der Widerstandskräfte an einem Flachmeißel mit Lenkblechen für $v = 1 \text{ m/s}$

7.7. Strömungsverhalten

7.7.1. Allgemeines

Die Strömungsvorgänge, die ein Meißel durch den freien Falls in der stehenden Wassersäule hervorruft, sollen anhand des bereits beschriebenen Grundmodells (siehe Kap7.5) näher erläutert werden. Für die Strömungsuntersuchungen wird der Meißel von der Flüssigkeit direkt von einer Innen- sowie Außenströmung angeströmt. Die Geschwindigkeit für das verwendete Grundmodell wurde dabei mit $v = 1 \text{ m/s}$ festgelegt.

7.7.2. Innenströmung

In Abb. 7-13 ist das Strömungsverhalten für eine Innenströmung anhand von Stromlinien gezeigt. Die einzelnen Querschnittsdiagramme sollen für eine bessere Darstellung der Meißelumströmung sorgen. Wie im ersten Querschnittsdiagramm ersichtlich ist, bleibt die Strömungsgeschwindigkeit im Rohreinlaufbereich vor dem Meißel ungefähr konstant. Im unmittelbaren Rohrwandbereich ist jedoch eine leichte Abnahme merkbar. Dies bestätigt den

theoretischen Ansatz, dass die Strömung an der Rohrwand aufgrund der Haftreibung bis auf Null absinken muss. Nähert man sich dem Meißel, wird sein Einfluss auf das Strömungsverhalten deutlicher. Direkt vor der Meißelschneide bildet sich ein Staubereich, innerhalb dessen die Geschwindigkeit langsam auf Null abnimmt. Im Staupunkt kommt sie dann endgültig zur Ruhe, wie in Abb. 7-13 zu erkennen ist. Von hier aus teilt sich die Strömung und wird anschließend entlang der Meißeloberfläche beschleunigt. Dieser Effekt ist einerseits dem starken Druckabfall sowie der Veränderung des Durchflussquerschnittes zuzuschreiben. Eine weitere Geschwindigkeitszunahme erfährt die Strömung im Bereich des ersten Ringes, wo sie aufgrund der zusätzlichen Querschnittseinengung gezwungen ist, schneller zu fließen. Das gleiche Verhalten zeigt sich im Ringspalt zwischen Meißel und Modellrohr. Da sich aufgrund der beschleunigten Strömung die Stromlinien an der Rückseite vom ersten Ring sowie der Steife nicht schnell genug schließen können, bildet sich unmittelbar hinter den Abreißkanten ein verwirbeltes Totwassergebiet. Außerdem teilt sich die Strömung zufolge der vorderen Ringsteifen in vier Stromröhren, welche durch eine erhöhte Strömungsgeschwindigkeit gekennzeichnet sind. Dieser Vorgang der Stromrohrbildung wird anhand der Querschnittsdarstellung im mittleren Meißelbereich bestätigt. Im Bereich des zweiten Ringes bewirken die exzentrisch versetzten Ringsteifen sowie die anschließenden, zur Strömungsrichtung geneigt angeordneten Lenkbleche eine proportionale Änderung der Durchströmungsquerschnitte. Demzufolge bilden sich stark verwirbelte, turbulente Bereiche, die durch die Unstetigkeiten im Verlauf der Stromlinien gekennzeichnet sind. Auf dem letzten Bild ist die Rotationsströmung mittels eines Querschnittsdiagramms verdeutlicht. Hinter dem Meißelkörper wird die Strömung stark von den beiden Lenkblechen geprägt, wodurch sich entlang der Rohrwand abwechselnd beschleunigte sowie auch rückströmende Gebiete ergeben. Die Rückströmung ist hauptsächlich auf die Wirbelbildung zurückzuführen. In einem größeren Abstand von Meißel kommt es zu einer langsamen Beruhigung der Strömung, die jedoch ihr turbulentes Profil beibehält.

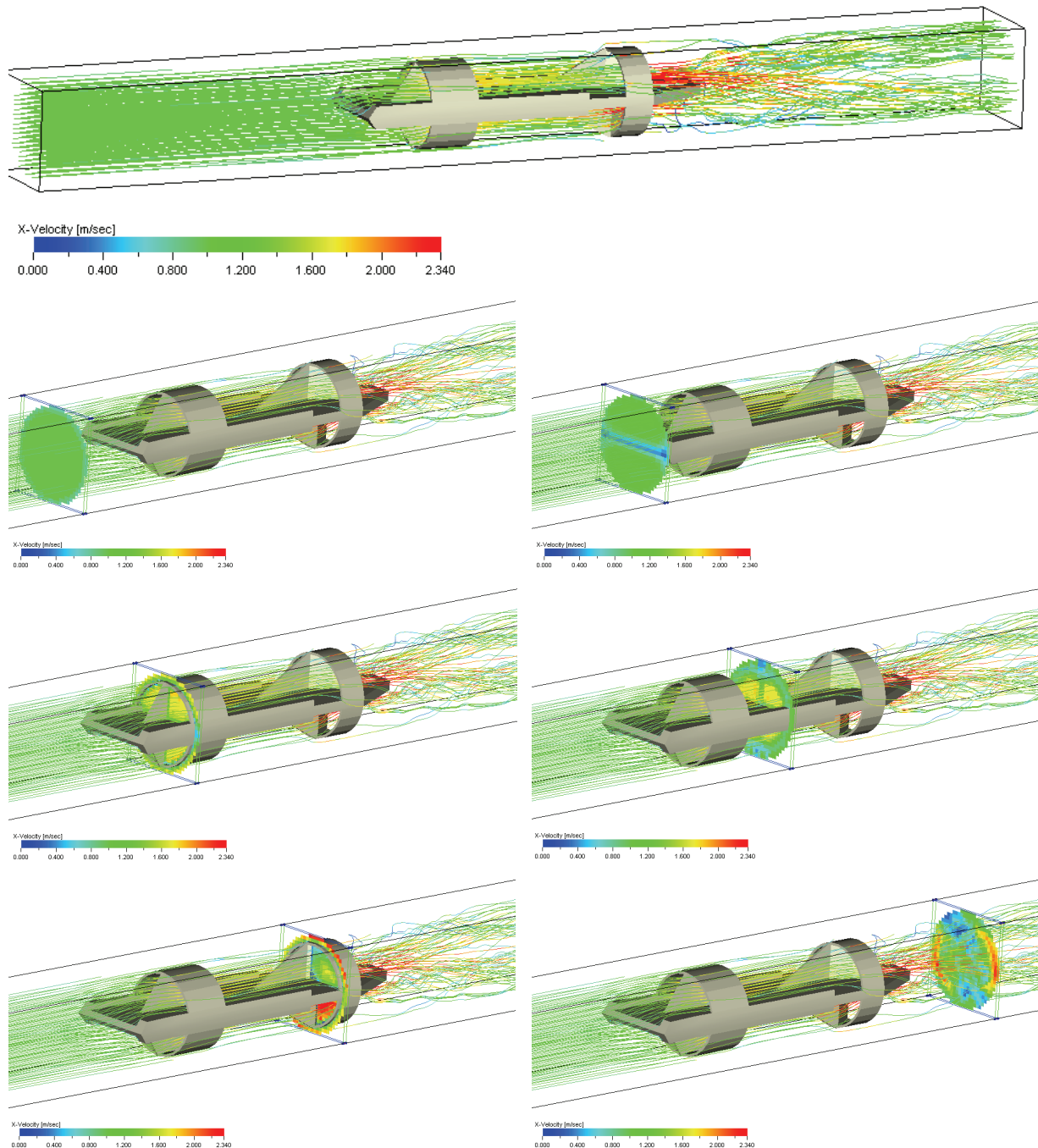


Abb. 7-13: Stromlinienbilder einer Innenströmung am Grundmodell

In Abb. 7-14 ist die Verteilung des statischen Druckes entlang der Meißeloberfläche dargestellt. Es ist ersichtlich, dass der größte Druck im Bereich der Meißelschneide auftritt. Wie bereits erwähnt, sinkt die Strömungsgeschwindigkeit im Staupunkt auf Null ab und steigt wieder im weiteren Verlauf der Strömung auf den Wert der Außenströmung an. Demzufolge muss der Druck an der Meißelschneide, wo die Geschwindigkeit ihr Minimum erreicht, auf den Maximalwert ansteigen. Anhand dieser berechneten Ergebnisse wird eine gute Übereinstimmung mit dem theoretischen Ansatz erreicht. Die Abhängigkeit zwischen Druck

und Strömungsgeschwindigkeit wird ebenfalls durch das Druckminimum an der Stelle der Lenkbleche, wo die Flüssigkeit am schnellsten fließt, bestätigt.

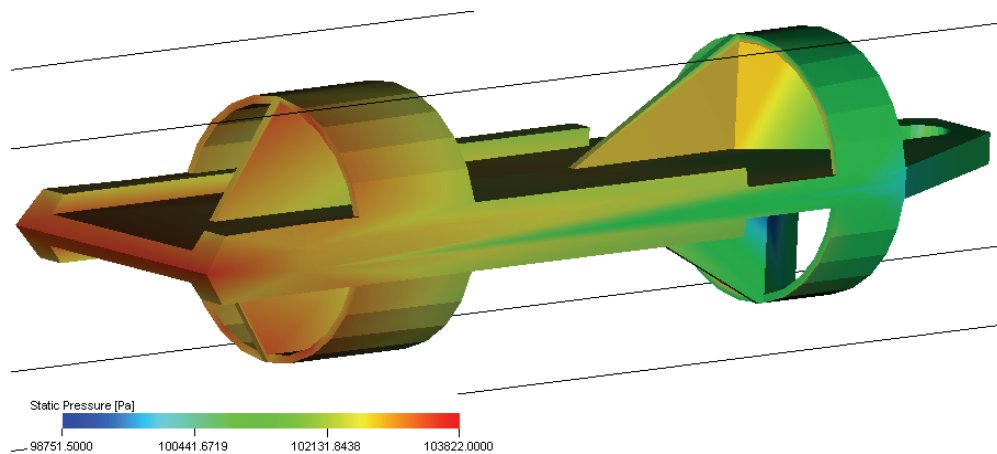


Abb. 7-14: Verteilung des statischen Druckes entlang der Meißeloberfläche

7.7.2.1. “Auswirkungen der Lenkbleche“

Abb. 7-15 zeigt anhand eines Stromliniendiagramms den Einfluss der Meißellenkbleche auf die Geschwindigkeitsverteilung der Strömung. Wie bereits beschrieben, kommt es weder an der Meißelspitze noch im Bereich des ersten Ringes zu deutlichen Änderungen des Strömungsverhaltens. Erst im Bereich des zweiten Ringes wird die Strömung von der Meißelkonstruktion wesentlich beeinflusst.

Im Bild wird der dargestellte Strömungsfluss von der vorgesetzten Aussteifung des zweiten Ringes in zwei Hauptstromrohre geteilt. Oberhalb des Aussteifungsbleches erhöht sich die Geschwindigkeit kontinuierlich bis zum Ringanfang, wo sie ihr Maximum erreicht. Aufgrund der hohen Geschwindigkeit sowie der starken Winkelveränderung können die Stromlinien der Lenkblechkontur nicht mehr folgen, wodurch sie sich frühzeitig ablösen. In unmittelbarer Nähe des Lenkbleches bildet sich eine langsamere Strömung, die von dem Fluidstrahl mitgeschleppt wird.

Am Ende des Aussteifungsbleches können die Stromlinien aufgrund der hohen Geschwindigkeit sowie der starken Winkelveränderung der Lenkblechkontur nicht folgen, wodurch sie sich frühzeitig ablösen. Die anschließende Querschnittaufweitung zufolge des geneigten Lenkbleches bewirkt zuerst nur eine geringfügige Strömungsänderung. Wie dem Stromlinienbild (in der Längsrichtung) zu entnehmen ist, bleibt die Strömungsgeschwindigkeit über die gesamte Ringbreite großteils konstant. Dieses Verhalten ist auf die verstärkte Wirbelbildung entlang der Innenwand zu Ringende und dadurch

verursachte Behinderung der Strömung zurückzuführen. Demzufolge verringert sich wiederum die Durchflussfläche, womit sich die unveränderte Geschwindigkeit innerhalb vom Ring erklären lässt. Desweiteren reduziert sich die Geschwindigkeit infolge des vergrößerten Durchflussquerschnittes sowie der starken Turbulenzen hinter dem Meißel.

Im Gegensatz dazu, kommt es unterhalb der Ringsteife zu einem anfänglichen Geschwindigkeitsverlust, wobei sich an der Übergangsstelle zum Lenkblech zwischenzeitlich ein Wirbelgebiet ausbilden kann. Zuzufolge der Querschnittverengung erhöht sich ungefähr ab der Lenkblechkante die Strömungsgeschwindigkeit der unteren Stromröhre. Diese wird unter der Wirkung des von oben strömenden Flüssigkeitsstrahls zur angrenzenden Rohrwand hin abgelenkt und bleibt an ihr anliegen, d.h. strömt ihr entlang.

Mit diesen hier beschriebenen Vorgängen lässt sich auch der Eigenrotation des Meißels beim freien Fall durch die Wassersäule gut erklären. Dabei wird an der Unterseite von den Lenkblechen aus der Anströmung und zum Teil durch den hydraulischen Auftrieb die dafür notwendige Kraft erzeugt.

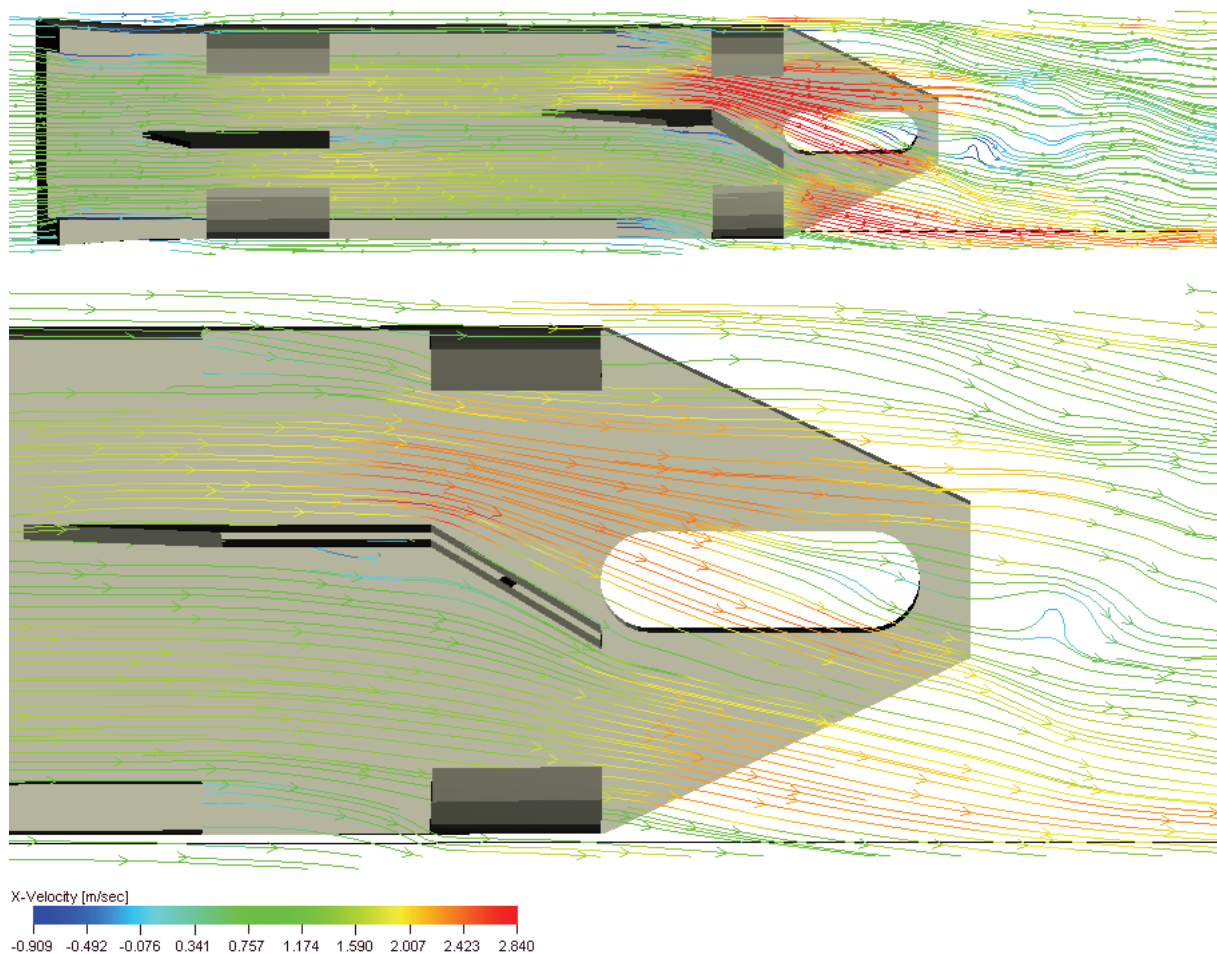


Abb. 7-15: Stromlinienbilder im Bereich der Lenkbleche

7.7.3. Außenströmung

Anhand einer Außenströmungssimulation sollen die Strömungsvorgänge infolge der Meißelgeometrie ohne Einfluss der Verrohrung untersucht werden. Da hier kein Rohr modelliert wird, welches eine Strömungsbeschleunigung zufolge einer Querschnittsverringerung begünstigt, kann sich die Flüssigkeit in allen Richtungen des „unendlichen“ Strömungsraumes unbehindert ausdehnen. Demzufolge kann der tatsächliche Einfluss des Meißels nur aufgrund der geometrischen Form ermittelt werden. Um eine Gegenüberstellung der Ergebnisse zu ermöglichen, werden die gleichen Querschnittstellen, wie bei der Innenströmung, behandelt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit, ist die Strömungsauswertung nur für die obere Symmetriehälfte dargestellt.

Wie erwartet, ist bei der Außenströmung mit geringeren Geschwindigkeitszunahmen der Strömung zu rechnen. Dies wird in Abb. 7-16 mittels Stromlinienbilder bestätigt. Beiden Ansichten können die Einflussbereiche auf die Strömungsverteilung um den Meißel entnommen werden. In der Längsansicht ist deutlich zu erkennen, dass eine Krümmung der Stromlinien schon in etwa 1,5 m Entfernung vor dem Meißel stattfindet. Mit fortschreitender Strömung werden die Stromlinien von dem Umströmkörper nach außen verdrängt. Da der Flüssigkeitsstrom stets die Möglichkeit hat nach allen Seiten auszuweichen, kann sich eine so hohe Geschwindigkeit wie bei der Innenströmung nicht aufbauen. Eine erhöhte Verdrängung findet besonders im Bereich des zweiten Ringes statt. Die Ursache dafür sind die Lenkbleche, an denen es zu einem Aufstauen des Flüssigkeitsstroms kommt. Dieser Effekt ist sehr gut in der Frontansicht durch die asymmetrische Verteilung der Stromlinien über dem Ring zu erkennen. Unmittelbar hinter dem Meißel bildet sich wieder ein stark turbulentes Wirbelgebiet, wo die Geschwindigkeit aufgrund der erhöhten Energieverluste abfällt.

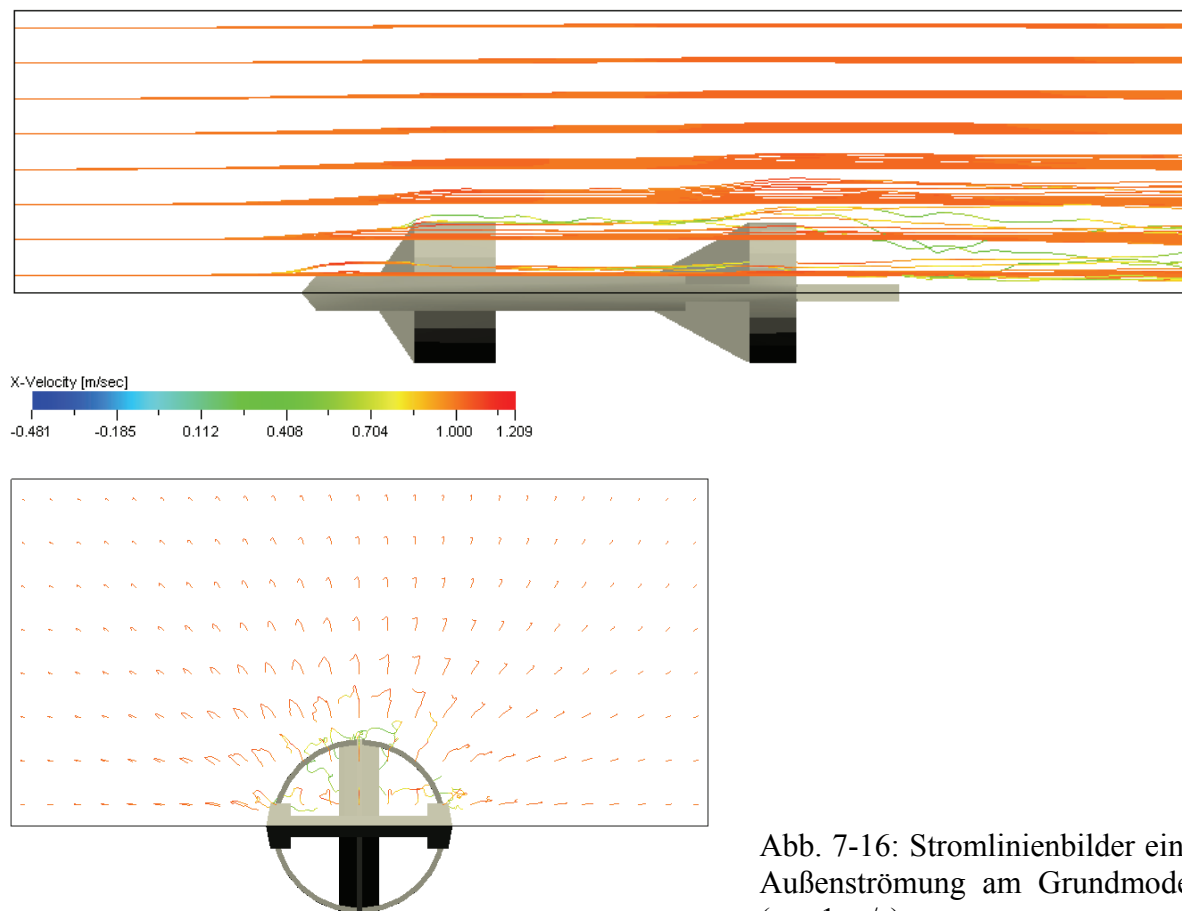


Abb. 7-16: Stromlinienbilder einer Außenströmung am Grundmodell ($v = 1 \text{ m/s}$)

Abb. 7-17 zeigt anhand von Querschnittsdiagrammen das Strömungsverhaltens entlang der Meißeloberfläche. In der ersten Schnittdarstellung kann man in einer größeren Entfernung vor dem Meißel einen leichten Abfall der Geschwindigkeit gut erkennen. Durch das weitere Nähern zum Meißel verlangsamt sich die Strömung, bis sie unmittelbar vor der Schneide zum Stillstand kommt. Der anschließende Geschwindigkeitszuwachs ab der Meißelspitze resultiert innerhalb vom ersten Ring in eine schnellere Strömung. Dennoch wird die gleiche Strömungsgeschwindigkeit, wie in der Hauptströmung, nicht erreicht. Ein solches Verhalten ist einerseits auf die Haftreibung entlang der Ringmantelfläche und andererseits auf Verdrängungswirkung der Flüssigkeit in den umgebenden Raum zurückzuführen. Durch die Verdrängung verursacht, bildet sich um den ersten Ring eine beschleunigte Schicht, die im mittleren Meißelbereich aufgrund verstärkter Verwirbelung wieder abnimmt. Anhand der Geschwindigkeitsverteilung lässt sich im Mittelteil die Ausbildung der Stromröhren sehr gut erkennen. Das Strömungsverhalten innerhalb des zweiten Ringes entspricht den in Abb. 7-16 bereits beschriebenen Strömungsvorgängen. Anschließend bildet sich um den zweiten Ring

bildet wiederum eine beschleunigte Zone, die stromabwärts wegen der starken Turbulenzen hinter dem Meißel verzögert wird.

Mit Hilfe der in Abb. 7-18 dargestellten Stromlinienbilder soll die Verdrängungswirkung sowie auch die aufgrund der Lenkbleche verursachte Rotationsbewegung näher erläutert werden. Die ersten zwei Bilder zeigen die Entstehung einer Verdrängungszone über dem ersten Meißelring. Am Ringanfang wird ein Teil der Strömung durch den Meißel in den umgebenden Strömungsraum abgelenkt. Dies lässt sich anhand der Pfeilmarkierungen an den einzelnen Stromlinien erkennen. In weiterer Folge löst sich die Strömung von der Außenfläche des ersten Ringes ab, wodurch sich ein deutliches Wirbelgebiet ausbildet. Im Bereich der exzentrisch zur Längsachse versetzten Aussteifung des zweiten Ringes, erfahren beide Stromröhren unterschiedliche Geschwindigkeiten. An der Unterseite wird die Strömung teilweise vom Lenkblech aufgestaut, woraus sich in diesem Bereich die langsamere Strömungsgeschwindigkeit ergibt. Durch die stark rotierenden Wirbel und den zusätzlichen Geschwindigkeitsunterschied der beiden Stromröhren zufolge des leichten Aufstauens durch das Umlenkblech (siehe Abb. 7-15), wird die langsamere Strömung von der Außenströmung sowie dem schnelleren Fluidstrahl „mitgerissen“. Demzufolge bildet sich über die gesamte Querschnittfläche des Strömungsraumes eine drehende Strombewegung aus, die hinter dem Meißel deutlich an Intensität zunimmt. Mit zunehmender Entfernung vom Meißel kommt es zur langsamen Beruhigung des Strömungsverlaufes.

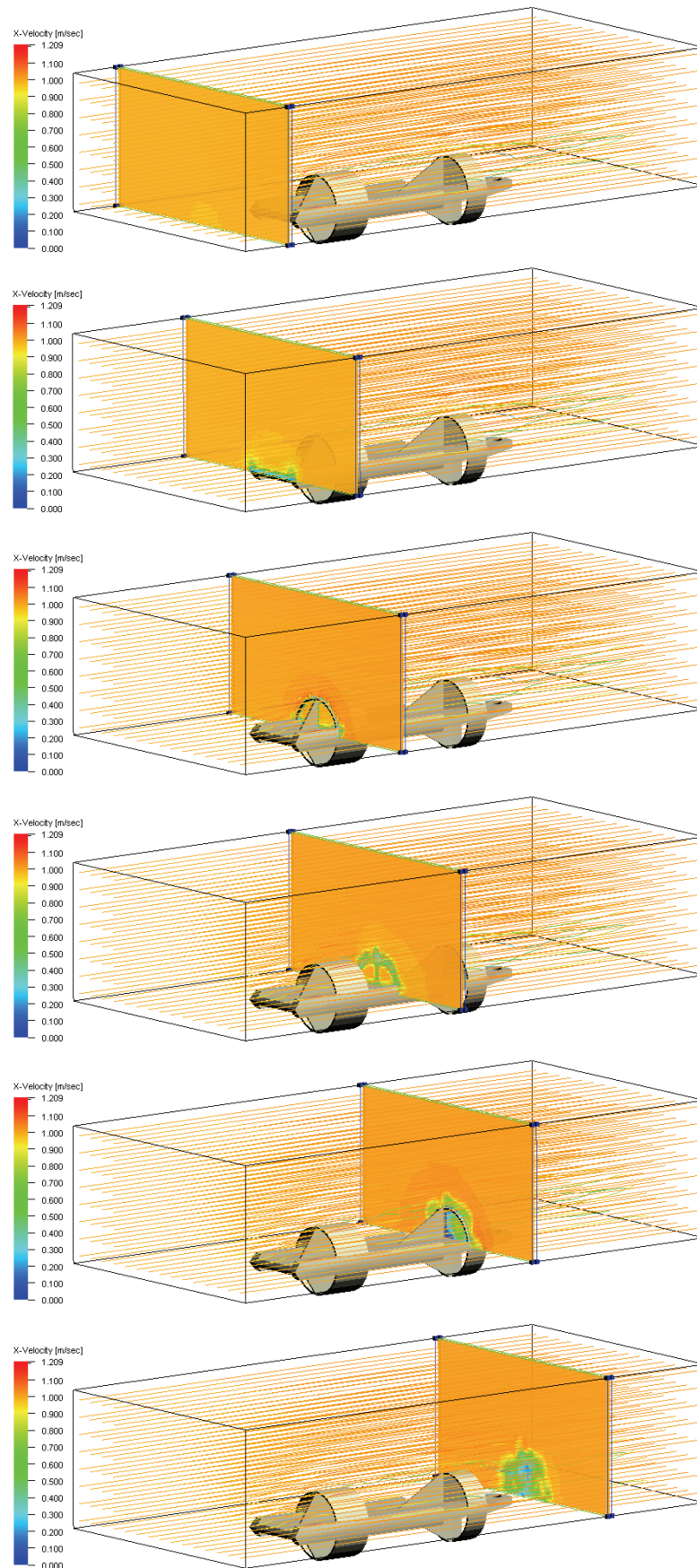


Abb. 7-17: Darstellung der Strömungsverhältnisse für eine Außenströmung

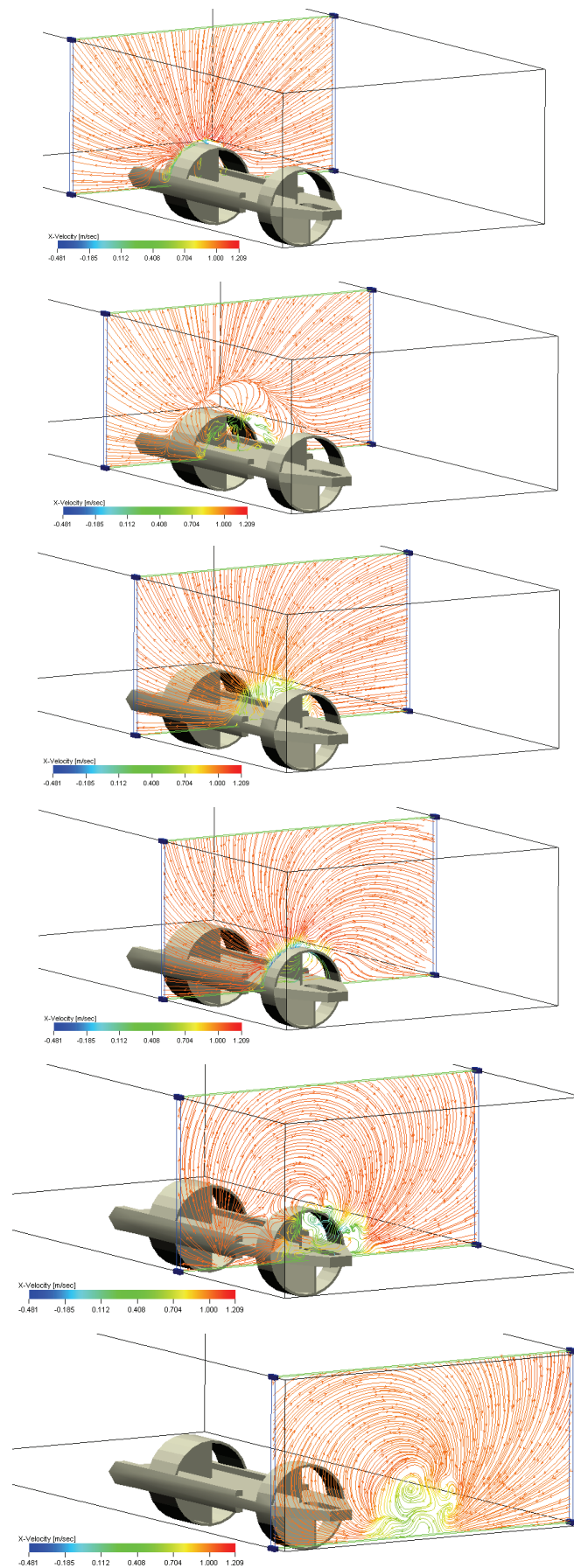


Abb. 7-18: Rotationsbewegung der Strömung

7.8. Strömungswiderstand von Grundmodell

7.8.1. *Internal Flow (Innenströmung)*

In Abb. 7-19 ist der Widerstandskraftverlauf für einen Flachmeißel mit Lenkblechen bei einer Anströmgeschwindigkeit von $v = 1\text{ m/s}$ dargestellt. Für das hier berechnete Grundmodell wurde die Wandrandbedingung als standard wall (Standardwand) festgelegt. Aus dem Diagramm ist eine anfängliche Schwankung zu erkennen, die deutlich von dem Wert der beruhigten Widerstandskraft abweicht. Dieser, innerhalb der ersten Zeitschritte auftretende Einschwingvorgang, ist auf die noch nicht vollständig entwickelte Strömung um den Meißel zurückzuführen. Aufgrund der Bedingung, dass das gesamte Fluid schon zum Zeitpunkt $t = 0$ die vorgegebene Größe der charakteristischen Geschwindigkeit besitzt, stellt sich gleich zu Beginn die größte Kraft ein. Nach den anfänglichen Schwankungen pendelt sich die Widerstandskraft mit der weiteren Entwicklung der Strömung auf einen weitgehend konstanten Wert ein. Während der Strömungsanfangsphase muss zuerst der Reibungswiderstand zwischen den einzelnen Fluidpartikeln sowie die Haftreibung an den Wänden überwunden werden, damit sich überhaupt ein durch die Randbedingung vorgegebener Strömungszustand ausbilden kann. Da die Strömung durch einen hohen Turbulenzgrad gekennzeichnet ist, macht sich der Einfluss der Wirbelbildung entlang der Meißeloberfläche auch auf die Widerstandskraft durch die zeitabhängige Schwankung der Geschwindigkeit merkbar. Die Fluktuationen der Strömungsgeschwindigkeit sind im Diagramm durch die Unstetigkeiten der Kraftlinie dargestellt. Diese gelten als Abweichungen von dem zeitlich konstanten Wert der Widerstandskraft, die sich somit als Mittelwert für den eingependelten Strömungszustand berechnen lässt.

Aus Abb. 7-20; Abb. 7-21 wird der Einfluss unterschiedlicher Strömungsgeschwindigkeiten auf die daraus resultierenden Widerstandskräfte ersichtlich. Für diese Untersuchung wurden für das Grundmodell die Strömungsgeschwindigkeiten von $0,1\text{ m/s}$ und 1 m/s bis zu 10 m/s (in Einerschritten) variiert. Für die Wandrandbedingung der Verrohrung sind hier “standard wall“, “sliding wall“ und “sliding wall $k = 0,5\text{ mm}$ “ definiert, wobei für die Meißeloberfläche nur “standard wall“-Bedingung benutzt wird. Wie den Diagrammen zu entnehmen ist, hat die Geschwindigkeitsgröße einen direkten Einfluss auf die anfängliche Schwankungsamplitude sowie die gemessene Widerstandskraft selber. Diese wird zum Teil auch von den Wirbeln beeinflusst, die infolge der Steigerung des Volumenstroms an Intensität zunehmen. Der Zeitpunkt, ab dem keine wesentlichen Kraftfluktuationen mehr auftreten, bleibt für alle Geschwindigkeiten unverändert.

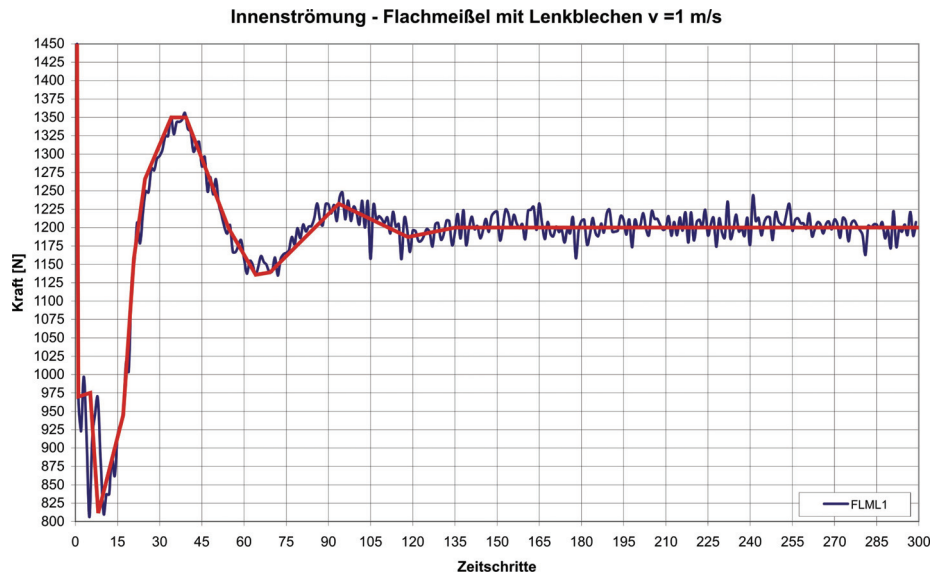
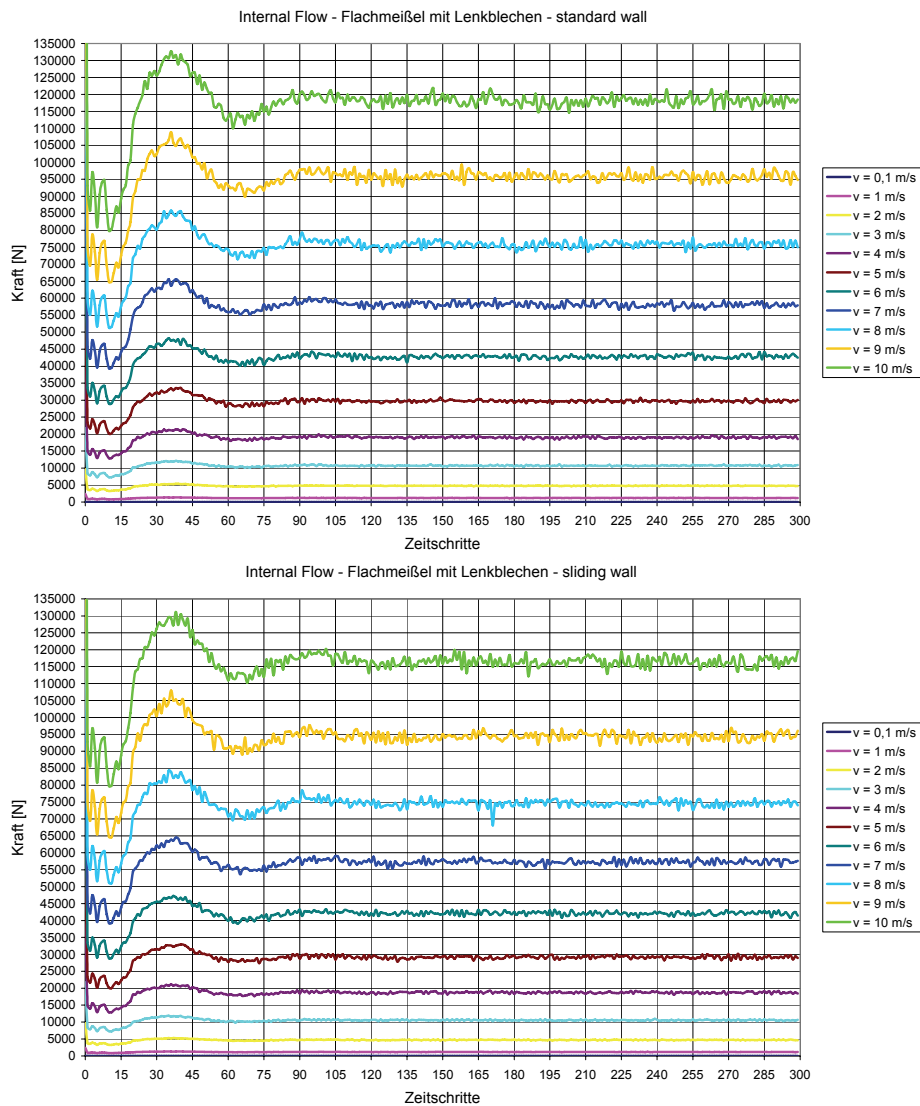
Abb. 7-19: Widerstandskraftverlauf am Grundmodell für Innenströmung bei $v = 1$ m/s

Abb. 7-20: Ergebnisse für die Widerstandskräfte an einem Flachmeißel mit Lenkbleche in Abhängigkeit von den Randbedingungen an der Verrohrungswand

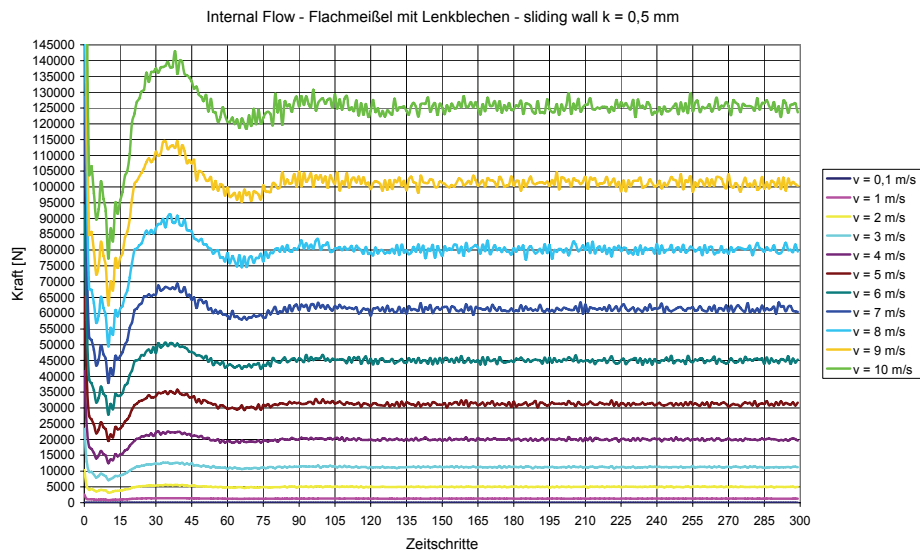


Abb. 7-21: Ergebnisse für die Widerstandskräfte an einem Flachmeißel mit Lenkbleche in Abhängigkeit von den Randbedingungen an der Verrohrungswand

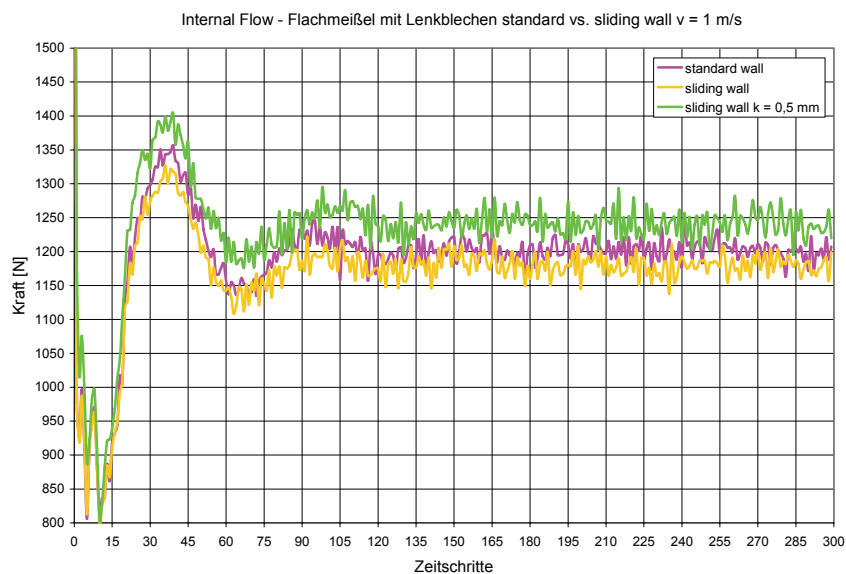


Abb. 7-22: Gegenüberstellung der Ergebnisse für die Widerstandskräfte an einem Flachmeißel ohne Lenkbleche für $v = 1 \text{ m/s}$

7.8.2. External Flow (Außenströmung)

Wie dem Auswertungsdiagramm (Abb. 7-23) zu entnehmen ist, unterscheidet sich der Widerstandskraftverlauf für eine Außenströmung qualitativ nur geringfügig von der Kraftlinie einer Innenströmung (Internal Flow). Der wesentliche Unterschied besteht jedoch in der Größe der Widerstandskraft, die sich zufolge der niedrigeren Strömungsgeschwindigkeiten im unmittelbaren Strömungsbereich um den Meißel einstellt. Diese Tatsache wurde bereits bei der Betrachtung der einzelnen Strömungsvorgänge

festgestellt (siehe Kap. Strömungsverhalten). Demzufolge stellt sich für eine Strömungsgeschwindigkeit $v = 1 \text{ m/s}$ eine deutlich kleinere Widerstandskraft ein als bei der Innenströmung.

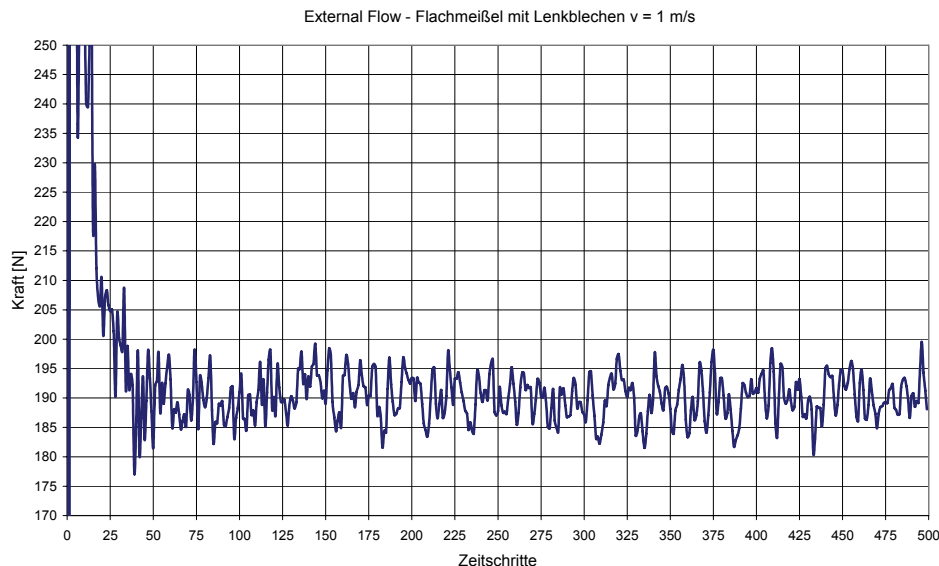


Abb. 7-23: Widerstandskraftverlauf am Grundmodell für Außenströmung bei $v = 1 \text{ m/s}$

Da solche Bedingungen, wie sie für eine Außenströmung erforderlich sind, bei der Pfahlherstellung nicht auftreten können, wird auf eine nähere Untersuchung dieser Widerstandskräfte nicht eingegangen. Sie dienen ausschließlich zu Vergleichszwecken mit den Innenströmungsberechnungen.

7.8.3. Gegenüberstellung Innen-/Außenströmung

Die Abhängigkeit der Widerstandskraft von der gewählten Strömungsgeschwindigkeit ist in Abb. 7-24 dargestellt. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit dem theoretischen Ansatz für die Berechnung der Widerstandskraft (Kap 6.3.2):

Deren Größe wird primär von dem Widerstandsbeiwert c_w und der Relativgeschwindigkeit $v_{rel.}$ zum Umströmungskörper beeinflusst. Wenn man annimmt, dass sich der c_w -Wert für derart große Re-Zahlen, nur geringfügig ändert und diese Änderungen vernachlässigt werden, ergibt sich demzufolge nur eine Abhängigkeit der Kraft von der Geschwindigkeit. Da diese quadratisch mit dem Wert der Geschwindigkeit ansteigt, lässt sie sich durch ein Polynom der zweiten Ordnung mathematisch beschreiben. Der Unterschied zwischen dem Widerstandskraftverlauf für Innen- und Außenströmung ist im Diagramm ersichtlich. Diese Differenz ergibt sich durch den geringen Einfluss des Meißels auf das Strömungsverhalten bzw. auf die Geschwindigkeitszunahme bei einer Außenströmung. Somit kann gesagt werden,

dass die Form der quadratischen Parabel von den Randbedingungen sowie dem Meißel selbst abhängig ist.

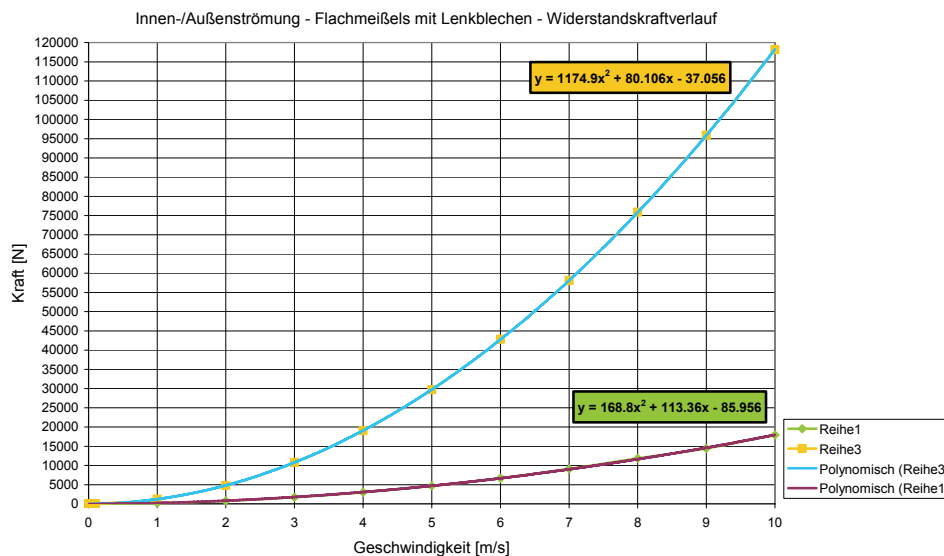


Abb. 7-24: Gegenüberstellung der Kraftverläufe für Innen- und Außenströmung

7.9. Untersuchung des Strömungswiderstandes verschiedener Meißeltypen

7.9.1. Vorbemerkungen

In diesem Abschnitt werden die Strömungswiderstände für unterschiedliche Meißeltypen gegenübergestellt. Dabei wird unter der Variation der Strömungsgeschwindigkeit die Auswirkung auf die Größe der Widerstandskraft beurteilt. Zum Zweck einer qualitativ höheren Beurteilung der Ergebnisse hat man für die Berechnungen folgende Wandrandbedingungen (genau Definition siehe Kap. 7.6.3) festgelegt:

- Standard wall
- Sliding wall
- Sliding wall $k = 0,5$ mm (gleiche Rauigkeit für Meißel und Verrohrung)

Die „sliding wall“-Bedingung wurde aus Gründen einer besseren Annäherung an den tatsächlichen Fallvorgang ausgewählt. Für die Simulationen lässt sich der Meißel nur als ruhender, von der Flüssigkeit angeströmter Körper definieren. Dabei werden Meißel als auch Verrohrung als ruhende Körper dargestellt. Dies entspricht jedoch nicht der Realität, weil der Meißel beim Fallvorgang eine Relativgeschwindigkeit gegenüber der unbeweglichen Verrohrung besitzt. Mit der „sliding wall“-Bedingung konnten diese Vorgänge genauer simuliert werden.

7.9.2. Flachmeißel ohne Lenkbleche

7.9.2.1. Modellaufbau

Als geometrische Grundlage diente der bereits im Grundmodellaufbau beschriebene Flachmeißel, der bis auf geringfügige Modifikationen im Bereich der Lenkbleche unverändert geblieben ist. Dabei wurden die geneigten Umlenkbleche durch eine Verlängerung der Aussteifung bis an das Ende des zweiten Ringes ersetzt. Zusätzlich hat man die ursprünglich exzentrische Ringsteife in die Meißellängsachse versetzt. Der für die Berechnung verwendete Flachmeißel (ohne Lenkbleche) kann der Abb. Abb. 7-25 entnommen werden.

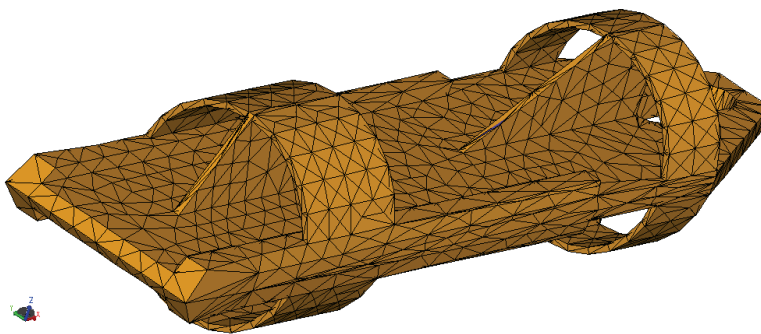


Abb. 7-25: Diskretisiertes Flachmeißelmodell ohne Lenkbleche

7.9.2.2. Berechnungsergebnisse

Wie den Diagrammen (Abb. 7-26) zu entnehmen ist, bewirkt das Weglassen der Lenkbleche eine erhebliche Änderung im Strömungsverhalten, wodurch der Strömungswiderstand gegenüber dem Grundmodell entscheidend reduziert wird. Alle drei Diagramme zeigen ein sehr ähnliches Verhalten der Kraftentwicklung ohne größere Wirbelbildung bzw. Kraftschwankungen. Im Vergleich zur “standard wall” Randbedingung kommt es an der Verrohrung bei der “sliding wall“-Bedingung zu einer zusätzlichen Abminderung der Kraft. Im Gegensatz dazu bewirkt eine höhere Rauigkeit der Meißel- sowie Modell-Rohr-Oberfläche einen Anstieg der Widerstandskraft. Aus dem Diagramm für “sliding wall“ $k = 0,5 \text{ mm}$ ist ersichtlich, dass schon geringfügige Unebenheiten der Stahloberfläche zur erhöhten Wirbelbildung bzw. leichten Schwankungen im Kraftverlauf führen können.

Für einen besseren Vergleich der Auswirkung bzw. Kraftdifferenzen für die gewählten Wandparameter soll die Abb. 7-27 dienen.

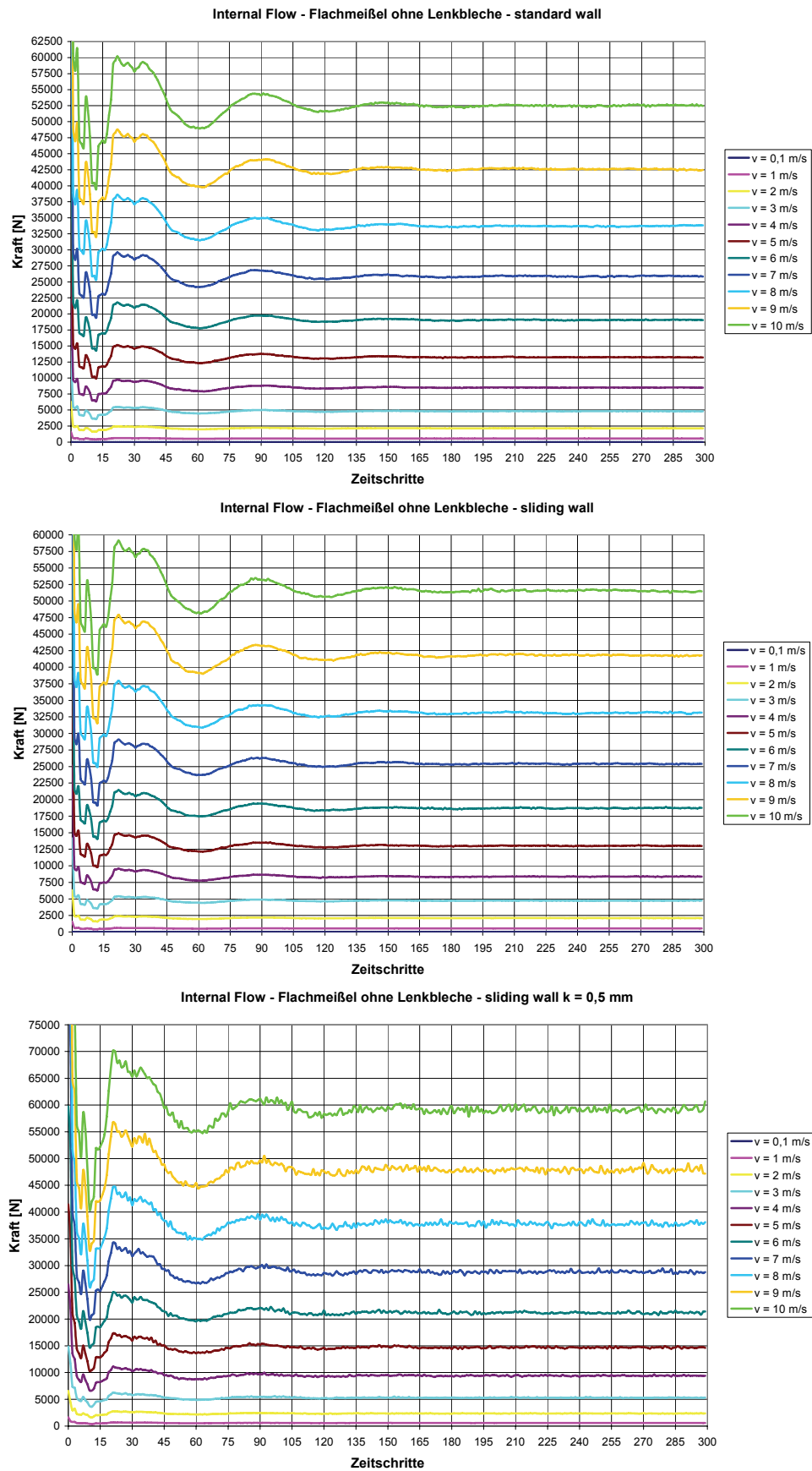


Abb. 7-26: Ergebnisse für die Widerstandskräfte an einem Flachmeißel ohne Lenkbleche in Abhängigkeit von den Randbedingungen an der Verrohrungswand

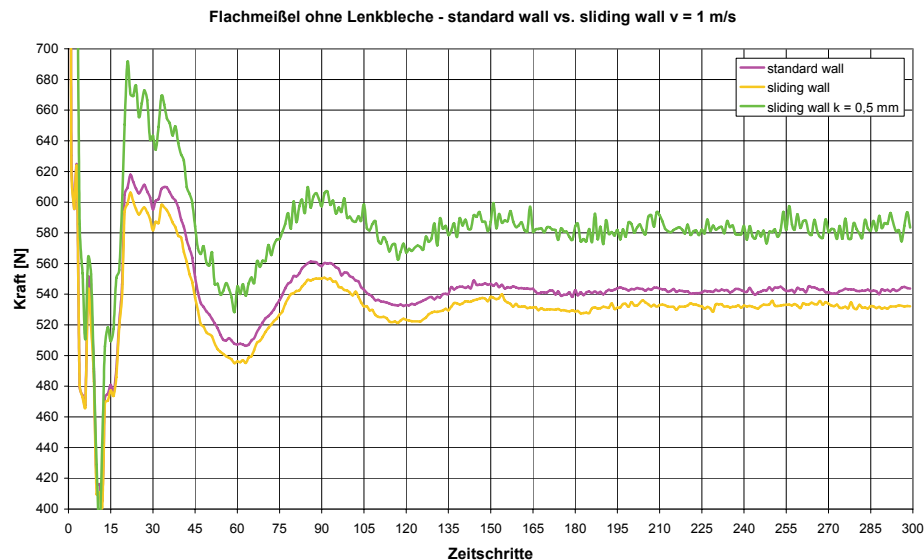


Abb. 7-27: Gegenüberstellung der Ergebnisse für die Widerstandskräfte an einem Flachmeißel ohne Lenkbleche für $v = 1 \text{ m/s}$

7.9.3. Kreuzmeißel

7.9.3.1. Modellaufbau

Der Aufbau des Kreuzmeißels ist in Abb. 7-28 dargestellt. Dieser wurde ebenfalls auf der Basis des Grundmodell-Flachmeißels modelliert. Der Kreuzmeißel besteht aus zwei zueinander orthogonal liegenden Grundkörpern (Flachstäben), die durch Drehen des Flachmeißelkörpers um die Längsachse um 90° erhalten wurden. Anschließend wurden noch die Lenkbleche entfernt.

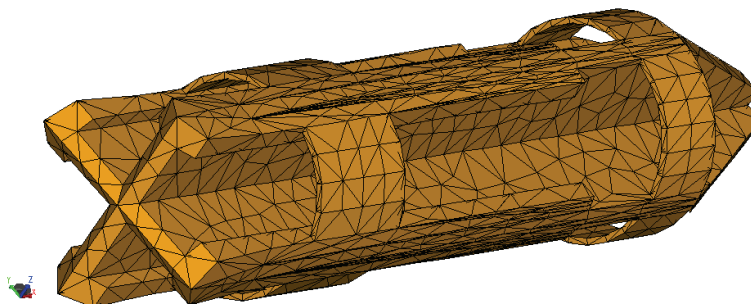


Abb. 7-28: Diskretisiertes Kreuzmeißelmodell

7.9.3.2. Berechnungsergebnisse

In den nachfolgenden Diagrammen (Abb. 7-29 und Abb. 7-30) ist die Auswertung der Widerstandskräfte für einen Kreuzmeißel dargestellt. Prinzipiell weisen die einzelnen Kraftverläufe qualitativ keine deutlichen Unterschiede auf. Im Vergleich zum Grundmodell sind die Unstetigkeiten im Kraftverlauf etwas kleiner. Dies lässt sich aufgrund der geometrischen Form des Kreuzmeißels erklären, wodurch die Strömung entlang der

Oberfläche unbehindert fließen kann. Demzufolge kommt es auch zu einer Reduzierung des Strömungswiderstandes im Vergleich zum Grundmodell. Aus den Kraftverläufen ist ersichtlich, dass der Widerstand erst durch Erhöhen der Oberflächenrauigkeit ansteigt. Da die angeströmte Oberfläche des Kreuzmeißels im Vergleich zum Grundmodell wesentlich größer ist, zeigt die Erhöhung der Rauigkeit deutlichere Auswirkungen auf die Größe der Widerstandskraft. Es lässt sich weiters ein Turbulenzanstieg beobachten, der in den ersten beiden Diagrammen nur bedingt vorhanden ist.

Für eine qualitative Beurteilung der hier beschriebenen Unterschiede, die sich zufolge der verschiedenen Randbedingungen einstellen, wird in Abb. 7-31 dargestellt.

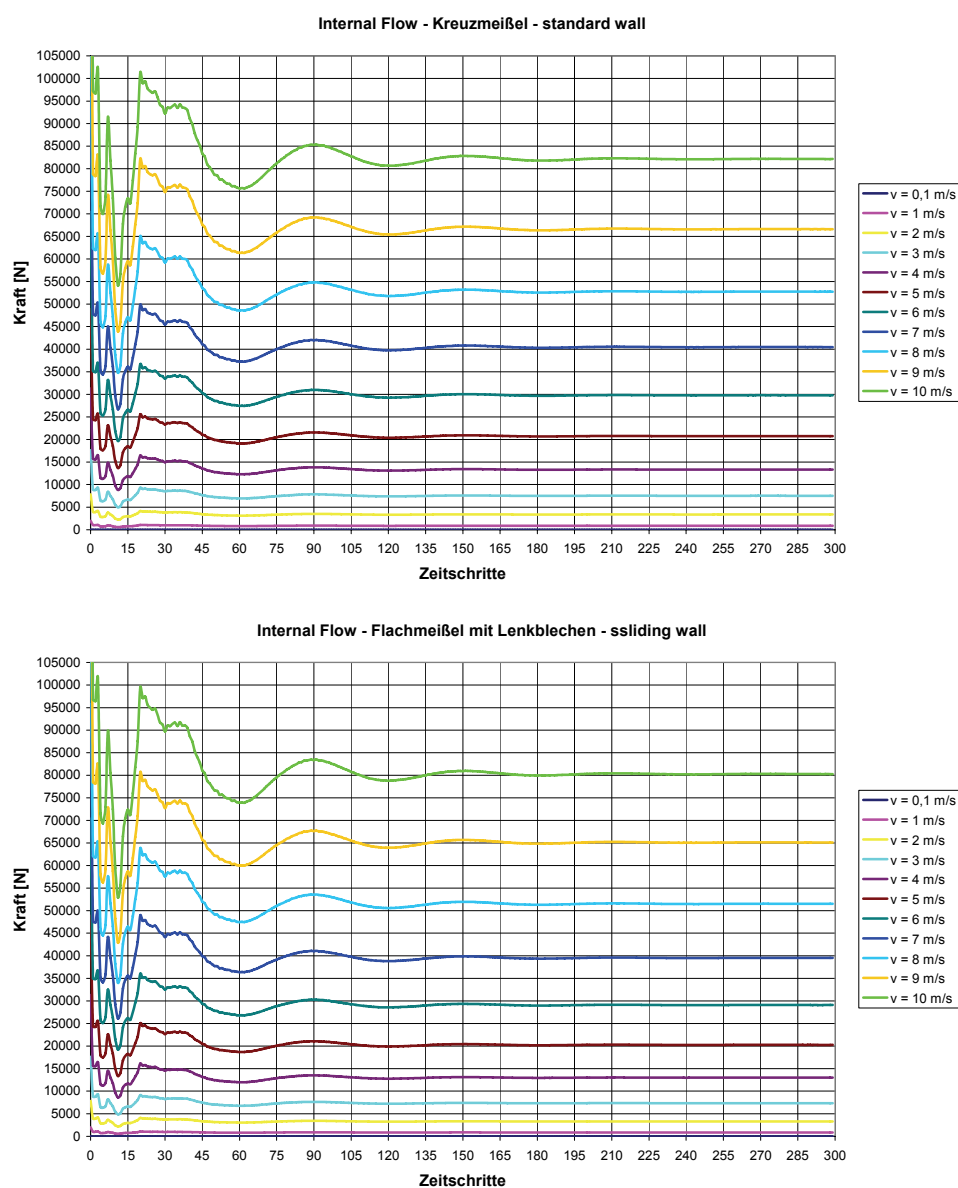


Abb. 7-29: Ergebnisse für die Widerstandskräfte an einem Kreuzmeißel in Abhängigkeit von den Randbedingungen an der Verrohrungswand

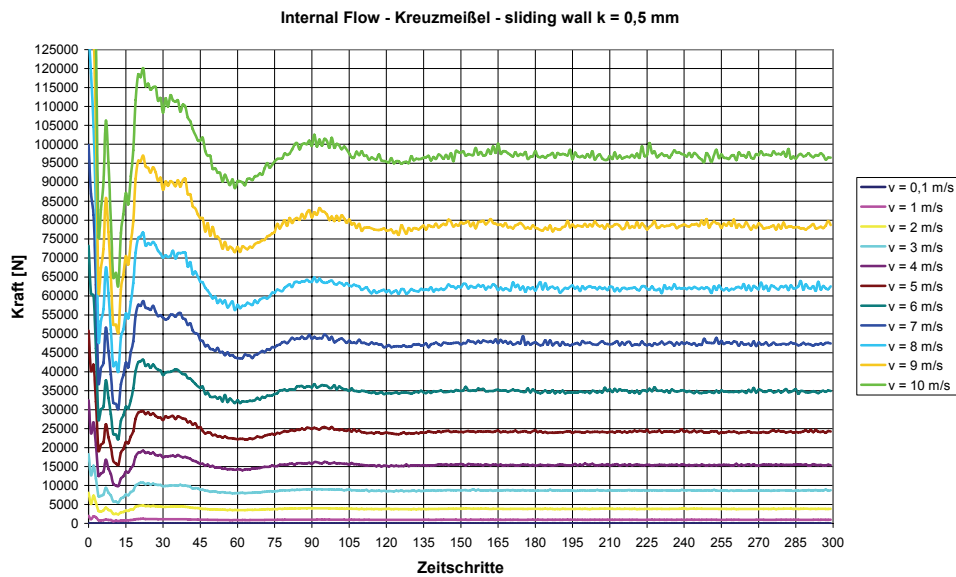


Abb. 7-30: Ergebnisse für die Widerstandskräfte an einem Kreuzmeißel in Abhängigkeit von den Randbedingungen an der Verrohrungswand

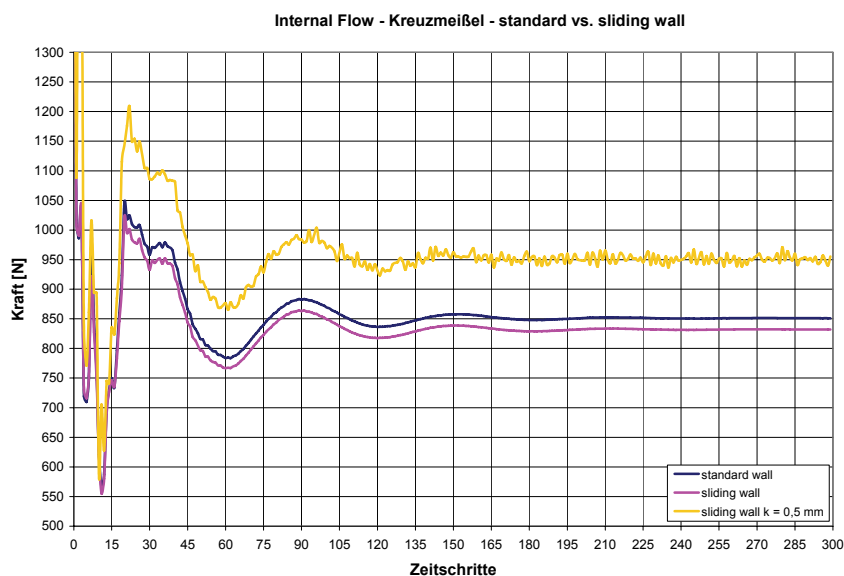


Abb. 7-31: Gegenüberstellung der Ergebnisse für die Widerstandskräfte an einem Kreuzmeißel für $v = 1 \text{ m/s}$

7.9.4. Ringmeißel

7.9.4.1. Modellaufbau

In seiner Bauart unterscheidet sich der Ringmeißel deutlich von den bereits erwähnten Meißeltypen. Wie in Abb. 7-32 ersichtlich ist, besteht der Grundkörperteil aus einem Rohr, welches auf jeder Seite eine unterschiedliche Schneide besitzt. Bei dem dargestellten Ringmeißel handelt es sich um einen sogenannten Wendemeißel mit einem Außendurchmesser von $\varnothing = 100,5 \text{ cm}$ und einer Wandstärke von 3,5 cm. Am linken

Rohrende im Bild sind 10 Meißelzähne angeschweißt. Auf der gegenüberliegenden Seite vom Rohr befindet sich ein Flachstahl mit einer Flachmeißelschneide und steht 40 cm von der Ringkante hervor.

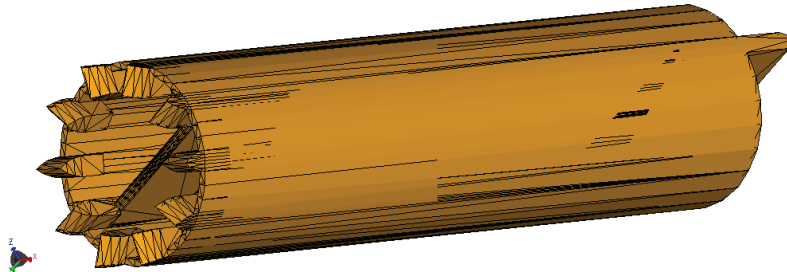


Abb. 7-32: Diskretisiertes Ringmeißelmodell (Wendemeißel)

7.9.4.2. Berechnungsergebnisse

Die dargestellten Kraftverläufe (Abb. 7-33) für den beschriebenen Ringmeißel zeigen bis auf das Modell mit erhöhter Oberflächenrauigkeit große Ähnlichkeiten mit den Kraftlinien der bereits erwähnten Meißeltypen. Wie dem Verlauf der ersten zwei Diagramme zu entnehmen ist, kommt es demnach zu einer erheblichen Abminderung der anfänglichen Schwankungsamplitude. Da dem Strömungsfluss keine wesentlichen Hindernisse gesetzt sind, ist der Strömungswiderstand im Vergleich zum Grundmodell sowie zu allen anderen hier behandelten Meißeltypen wesentlich geringer. Dies wird auch anhand der ersten zwei Diagramme bestätigt. Im Gegensatz dazu bewirkt eine erhöhte Oberflächenrauigkeit eine deutliche Verschlechterung des Strömungsverhaltens. Die Strömung wird durch stark ausgeprägte Wirbel begleitet, die sich im Diagramm aufgrund der großen Schwankungen erkennen lassen. Dennoch bleiben die Widerstandskräfte unter dem Wert des Grundmodells. Die Wirbelbildung lässt sich durch die deutlich größere strömungsparallele Mantelfläche des Ringmeißels im Vergleich zu anderen Meißelmodellen interpretieren. Es wird angenommen, dass der Verwirbelungseffekt in dem Ringspalt zwischen Meißel und Verrohrung aufgrund der höheren Rauigkeit wesentlich begünstigt wird. Die Wirbel haben aufgrund der geringen Durchströmungsfläche, die eine Beschleunigung der Strömung bewirkt, keine Möglichkeit sich in den Strömungsraum auszudehnen. Der Strömungswiderstand zeigt dadurch stark ansteigende Tendenz. Um eine genauere Aussage über dieses Verhalten zu treffen, sind Parameterstudien notwendig, die jedoch nicht weiter verfolgt wurden.

Deutlicher ist der Vergleich der Kraftverläufe für die einzelnen Randbedingungen in der Abb. 7-34 zu sehen.

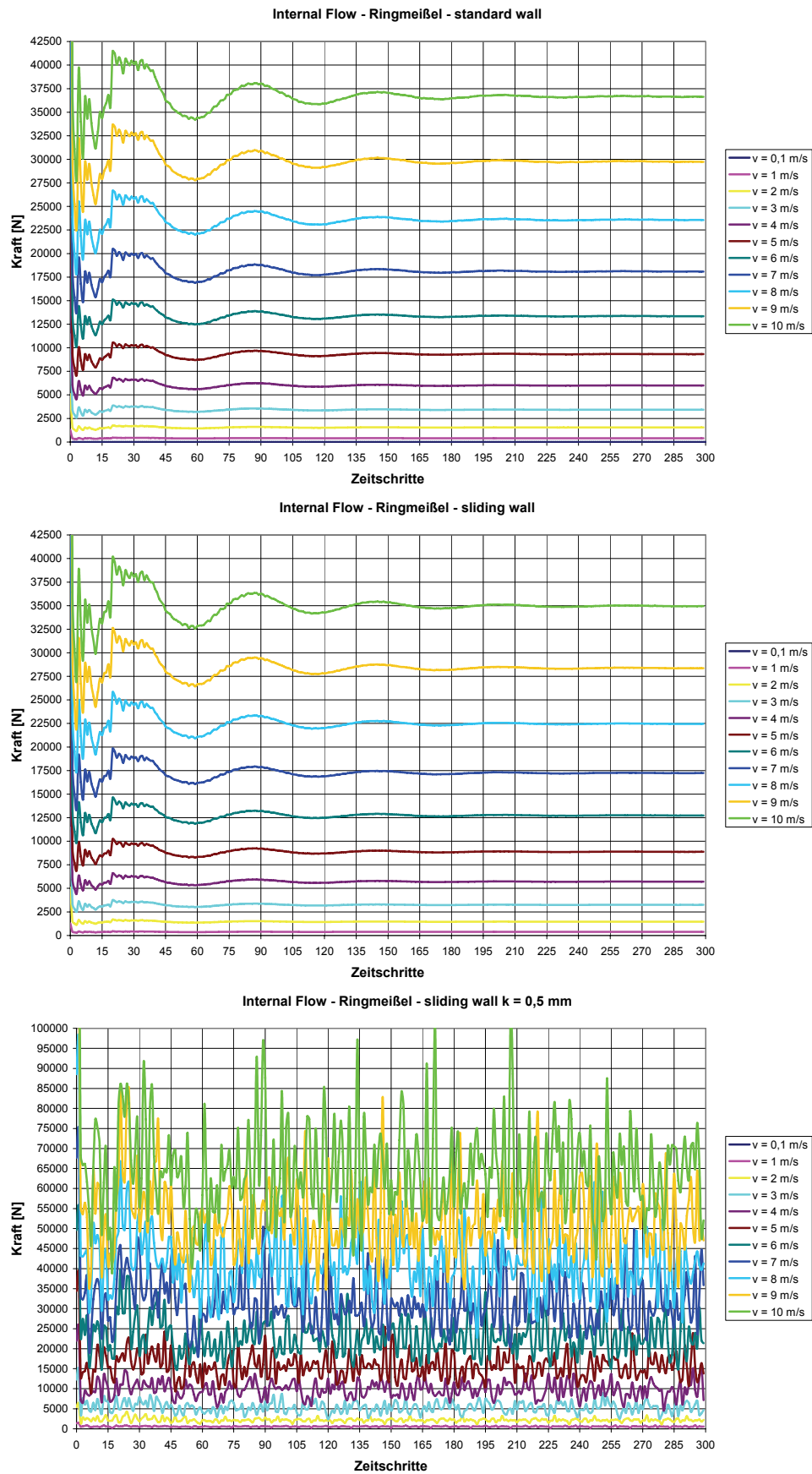


Abb. 7-33: Ergebnisse für die Widerstandskräfte an einem Ringmeißel in Abhängigkeit von den Randbedingungen an der Verrohrungswand

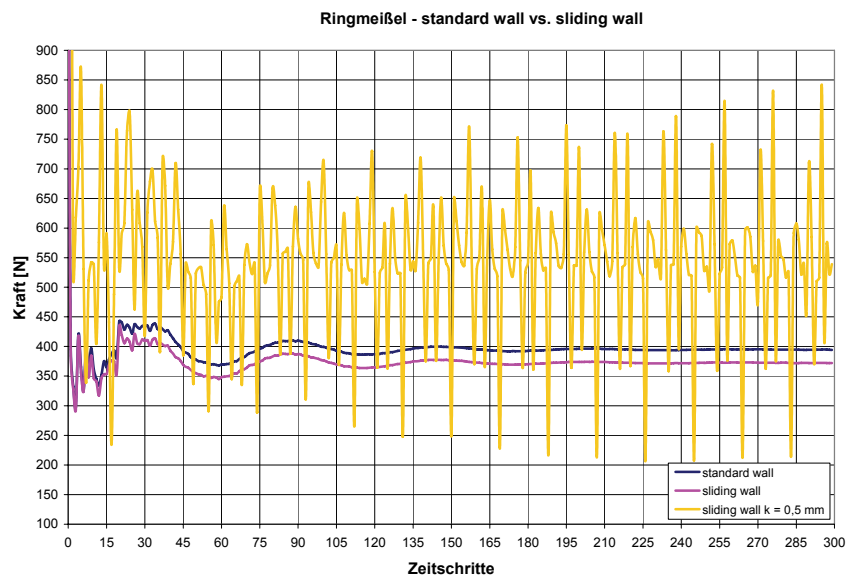


Abb. 7-34: Gegenüberstellung der Ergebnisse für die Widerstandskräfte an einem Ringmeißel für $v = 1 \text{ m/s}$

7.10. Ergebnisdiskussion und Schlussfolgerung

Wie die Ergebnisse erkennen lassen, weisen die berechneten Strömungswiderstände für alle untersuchten Meißeltypen eine quadratische Abhängigkeit der Widerstandskraft von der Strömungsgeschwindigkeit auf. Abb. 7-35 zeigt für einen Geschwindigkeitsbereich von 0,1 bis 10 m/s den Einfluss der unterschiedlichen Meißelgeometrie auf die Widerstandskraft.

Für das Grundmodell ergeben sich wie erwartet die größten Widerstände, die primär auf die Lenkbleche zurückzuführen sind. Diese bewirken ein Aufstauen des Wassers und anschließend ein stark ausgeprägtes Wirbelgebiet, wodurch der Strömungswiderstand entsprechend ansteigt. Im Gegensatz dazu, tritt beim Flachmeißel ohne Lenkbleche eine deutliche Kraftminderung gegenüber dem Grundmodell auf, die sogar mehr als 50 % ausmacht. Somit wird ersichtlich, dass die Lenkbleche einen erheblichen Anteil am Gesamtwiderstand ausmachen. Die geringste Differenz zu den Widerstandswerten des Grundmodells weist nur der Kreuzmeißel mit der erhöhten Oberflächenrauigkeit ($k = 0,5 \text{ mm}$) auf. Diese Annäherung wird vor allem aufgrund größerer strömungsparalleler Oberfläche, durch die ein Zuwachs des Reibungswiderstandes bei einer höheren Rauigkeit verursacht wird. Die niedrigsten Widerstände ergeben sich für den Ringmeißel, wobei diese sehr stark von der Oberflächenrauigkeit abhängig sind. Die rohrförmige Geometrie begünstigt das Strömungsverhalten, wodurch die geringere Steigung der Kraftlinie zu begründen ist. Ein dazu unterschiedliches Verhalten ist beim Ringmeißel mit rauer Oberfläche erkennbar. Bereits

eine geringfügige Erhöhung der Rauigkeit ($k = 0,5 \text{ mm}$) der Ringmeißeloberfläche als auch der Verrohrung bewirkt einen fast zweifachen Anstieg der Widerstandskraft des Ausgangswertes.

Zur besseren Übersicht der Unterschiede der gewählten Meißeltypen dient das Diagramm (Abb. 7-36). Hier ist für jeden Meißel für eine Strömungsgeschwindigkeit von $v = 1 \text{ m/s}$ die zeitabhängige Kraftentwicklung dargestellt. Wie aus dem Diagramm hervorgeht, treten verstärkte Turbulenzen lediglich beim Grundmodell auf, während bei den restlichen Meißelmodellen nur bedingt vorkommen. Außerdem lässt sich eine schnellere Abschwächung der anfänglichen Schwankungen bei den anderen Modellen erkennen. Generell weisen die Kraftlinien jedoch eine große Ähnlichkeit im Verlauf auf.

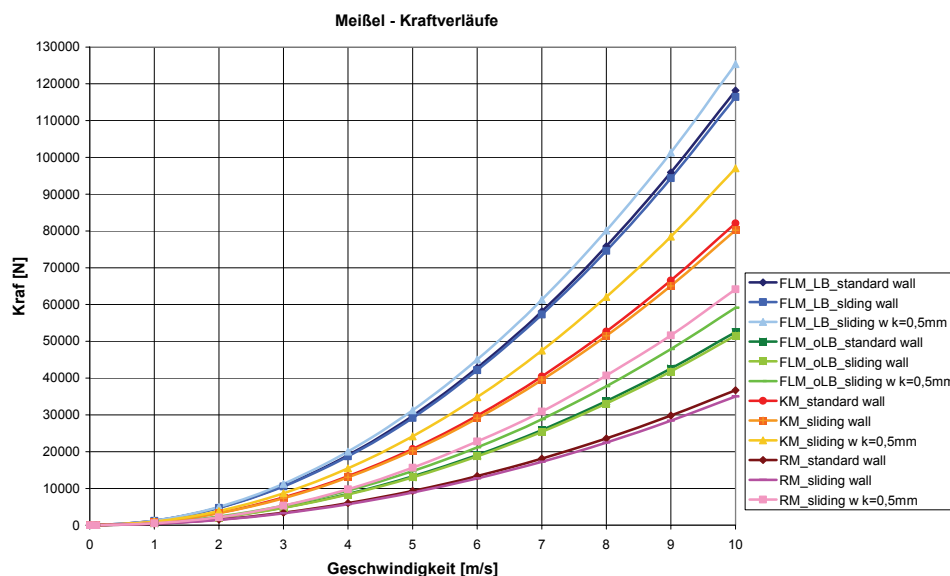


Abb. 7-35: Gegenüberstellung die Widerstandkräfte für unterschiedliche Meißeltypen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit (Strömungs- bzw. Fallgeschwindigkeit)

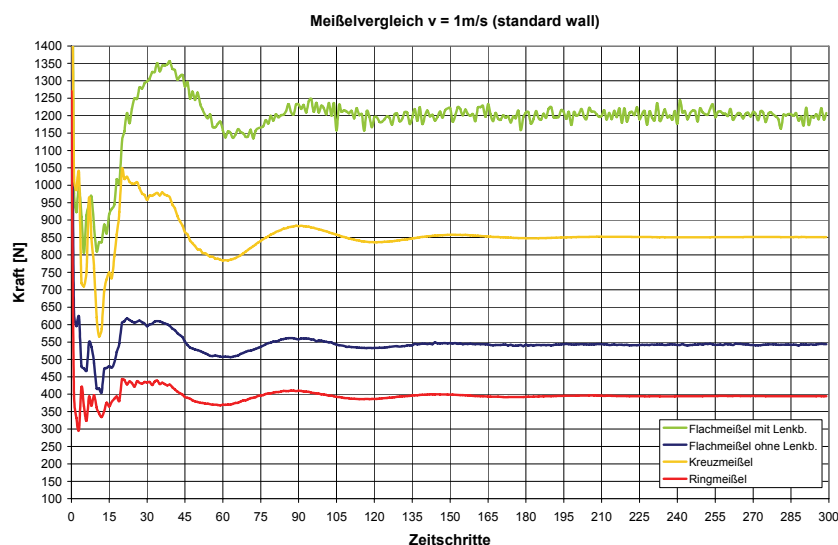


Abb. 7-36: Gegenüberstellung der Ergebnisse für die Widerstandskräfte an unterschiedlichen Meißeltypen für $v = 1 \text{ m/s}$

Wie die Berechnungsergebnisse zeigen, bewirkt die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit eine wesentliche Steigerung der Widerstandskraft. Wenn der Strömungswiderstand die Größe der Gewichtskraft erreicht, kann der Meißel während seiner freifallenden Bewegung nicht mehr beschleunigen. Ab diesem Zeitpunkt fällt er mit konstanter Geschwindigkeit.

Diese Untersuchungen behandeln die maximal mögliche Grenzgeschwindigkeit beim freien Fall unter Grundwasserbedingungen. Damit sich diese überhaupt einstellen kann, ist jedoch ein ausreichender Fallweg innerhalb vom Wasser notwendig. Da die Wirkung des Auftreffens auf die Bohrlochsohle von der Fallgeschwindigkeit abhängt, sollte immer der Grenzzustand angestrebt werden.

Betrachtet man alle am Meißel während des Fallvorganges in der Wassersäule, angreifenden Kräfte, so ist neben dem Strömungswiderstand zusätzlich noch die Auftriebskraft anzusetzen. Die Auftriebskraft entspricht dem Volumen des vom Meißel verdrängten Wassers ($\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$) und ergibt für den aus Stahl ($\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$) gefertigten Meißel eine Minderung des Eigengewichtes um ca. 12,7 %.

In den nachfolgenden Diagrammen soll die Grenzgeschwindigkeit für die modellierten Meißeltypen bestimmt werden. Wie den Diagrammen zu entnehmen ist, hängt die Grenzgeschwindigkeit des freifallenden Meißels einerseits von der geometrischen Form und andererseits von dem Eigengewicht unter Auftrieb ab. Aus diesem Grund sollten immer möglichst strömungsgünstige Formen angestrebt werden, um damit die auftretenden Strömungswiderstände niedrig zu halten. Gelingt es auf diese Weise die Widerstandskräfte zu reduzieren, ist mit höheren Grenzgeschwindigkeiten zu rechnen. Diese stellen die maximal mögliche Geschwindigkeit des Meißels beim Auftreffen auf die Bohrlochsohle dar und sind das Maß für die Energie, die in Zertrümmerung des Felsens folgt.

Dieser Effekt ist besonders gut ersichtlich am Vergleich des Flachmeißels mit und ohne Lenkbleche. Bei gleichem Eigengewicht ergibt sich ein Geschwindigkeitsunterschied von ungefähr 55 %. Da für die Schlagbohrarbeiten vorwiegend Flachmeißel eingesetzt werden, ist insbesondere beim Vorhandensein eines Wassers im Bohrloch eine Adaptierung der Lenkbleche bzw. eine Suche nach Alternativlösungen zu überlegen. Grundsätzlich bewirken diese eine teilweise Rotation des Meißels (näheres dazu Kap. 5.9.4) beim freien Fall durch die Wassersäule, womit eine erwünschte, gleichmäßige Bearbeitung der Bohrlochsohle erzielt wird. Aus den Berechnungsergebnissen ist ersichtlich, dass die Lenkbleche andererseits einen negativen Einfluss auf die Größe der Widerstände haben. Daher stellt sich die Frage, ob sich durch eine Verringerung bzw. Adaptierung derer Form ein verbessertes

Umströmungsverhalten nicht erreichen ließe, wobei die Auswirkung auf die Meißelrotation erhalten bleiben würde. Dies soll als eine Anregung für weitere Untersuchungen der Auswirkung der Lenkbleche gesehen werden. Weiters ist zu erwähnen, dass der Umsetzwirbel eine Alternativmöglichkeit zu den Lenkblechen darstellt. Dieser zeigt eine ähnliche Wirkung auf die Meißelrotation ohne dabei den Strömungswiderstand zu erhöhen.

Um eine hohe Grenzgeschwindigkeit zu erzielen, empfiehlt sich daher ein möglichst hohes Eigengewicht des Meißels mit einer strömungsgünstigen Form. Allerdings wirkt sich das hohe Eigengewicht auch auf die Arbeitsverhältnisse (Arbeitsspiel, Umgang mit schwerem Gerät, usw.) aus. Daher müssen die Meißel auch an die Arbeitsgeräte, Untergrundverhältnisse, usw. angepasst sein. Dieser Effekt ist beispielsweise aus dem Diagramm beim Kreuzmeißel erkennbar. Hier bewirkt das höhere Gewicht einen deutlichen Anstieg der Grenzgeschwindigkeit.

Der Ringmeißel weist ein verhältnismäßig geringes Gewicht bei gleichzeitig strömungsgünstiger Form auf. Aufgrund der Rohrform lassen sich die Strömungswiderstände niedrig halten. Andererseits kann große strömungsparallele Oberfläche bei höheren Rauigkeiten einen wesentlichen Anstieg der Reibungswiderstände hervorrufen.

Generell stimmen die hier betrachteten Grenzzustände der ausgewählten Meißeltypen qualitativ gut mit den tatsächlich auftretenden überein. Es ist jedoch zu erwähnen, dass für eine genauere Angabe der Grenzgeschwindigkeit noch zusätzliche Widerstandskräfte an der Trommelwinde, Umlenkrollen, aufgrund der Massenträgheit vom Seil sowie Winde und beim Aufprall auf die Wasseroberfläche zu berücksichtigen wären.

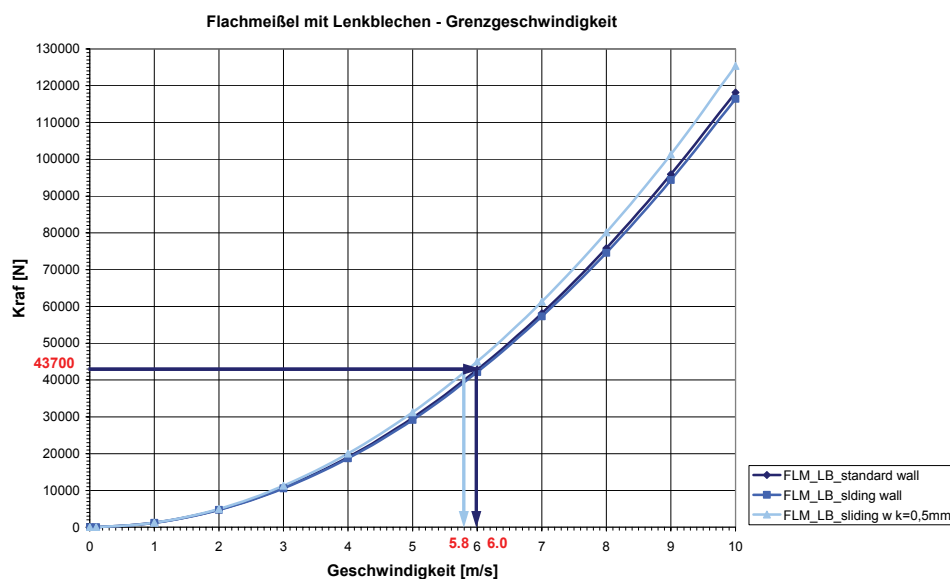


Abb. 7-37: Grenzgeschwindigkeitsbereich für den Flachmeißel mit Lenkblechen

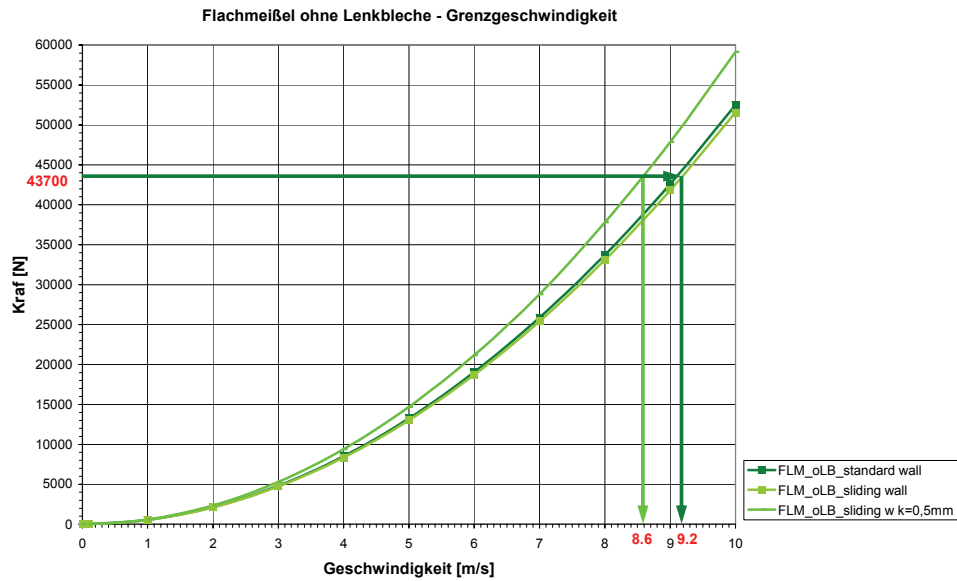


Abb. 7-38: Grenzgeschwindigkeitsbereich für den Flachmeißel ohne Lenkbleche

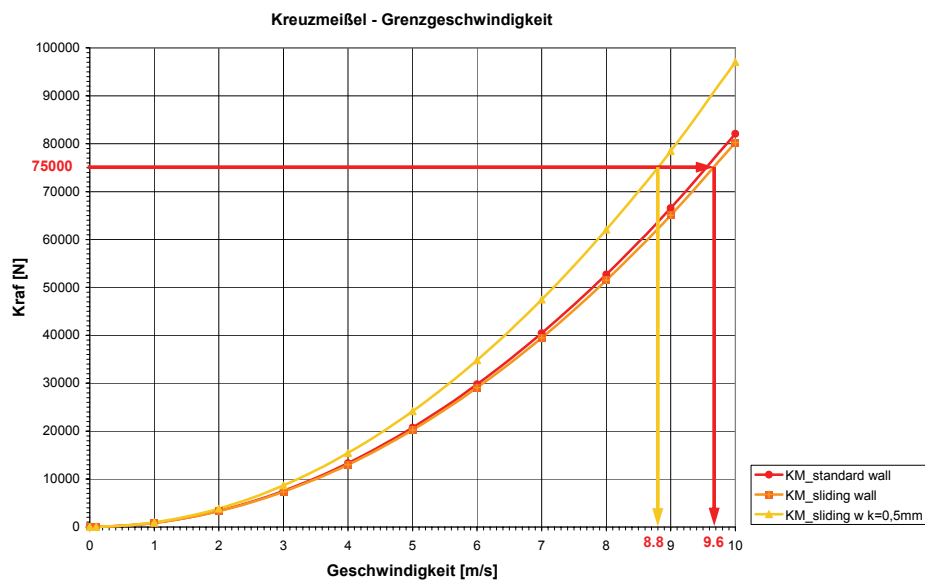


Abb. 7-39: Grenzgeschwindigkeitsbereich für den Kreuzmeißel

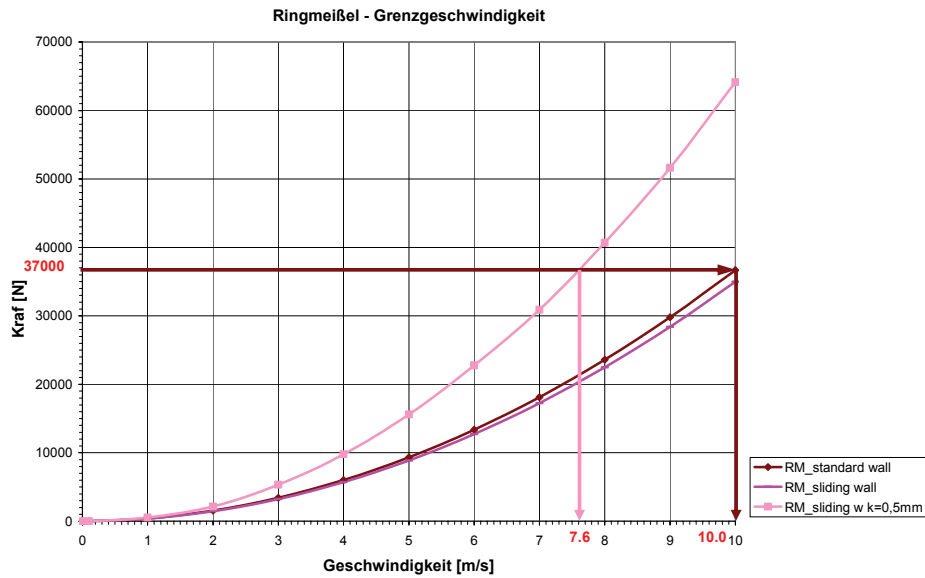


Abb. 7-40: Grenzgeschwindigkeitsbereich für den Kreuzmeißel

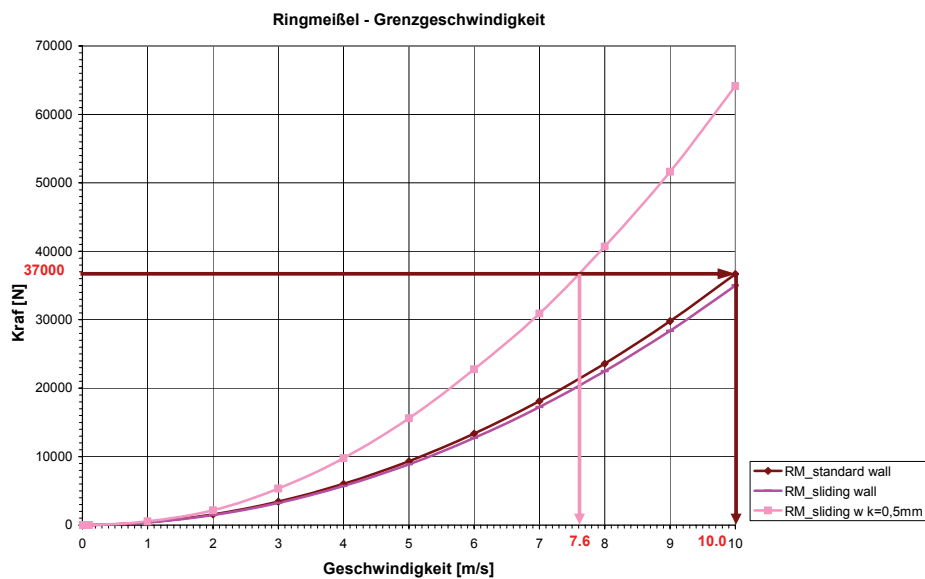


Abb. 7-41: Grenzgeschwindigkeitsbereich für den Ringmeißel

8. ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Arbeit behandelt die beim Greiferbohrverfahren eingesetzten Bohrwerkzeuge mit besonderer Betrachtung der Effizienz des Meißeleinsatzes unter Grundwasserbedingungen in verrohrten Bohrungen. Bei der Pfahlherstellung kommen für die Aushubarbeiten unterschiedliche Greifersysteme zum Einsatz, die in den letzten Jahrzehnten stark weiterentwickelt wurden. Im Zuge von Optimierungen ist eine Vielzahl an verschiedenen Bohrgreifertypen entstanden, wobei sich einige besonders gut bewährt haben.

Bohrgreifer sind strömungsgünstige, schlanke, zylindrische, an den Bohrvorgang im Bohrloch angepasste Bohrwerkzeuge. Aufgrund der kombinierten Wirkung des schlagenden und greifenden Bohrens können sie für den Pfahlherstellungsprozess wirkungsvoll eingesetzt werden. Generell unterscheidet man die Greifer nach dem Schließmechaniksystem in mechanische Einseil- bzw. Zweiseilgreifer und die hydraulischen Bohrgreifer. Diese Gliederung hat sich besonders bewährt, weil daraus das Funktionsprinzip des Schließmechanismus abgeleitet werden kann. Wesentliche Unterscheidungsmerkmale sind weiters die Art der Führung, die Größe der Schließkräfte bzw. die Entleergeschwindigkeit. Zur Gegenüberstellung wurden die grundlegenden Arbeitsprinzipien sowie der Greiferaufbau detailliert beschrieben, woraus sich die einzelnen Vor- und Nachteile gut erkennen lassen. Besonderes Augenmerk wurde auf die Effizienz der Bohrwerkzeuge gelegt.

Greifer werden oft in Kombination mit verschiedenen Meißelwerkzeugen eingesetzt, wenn die Bodenverhältnisse (wechselnde Lagerung, Inhomogenitäten usw.) dies erfordern. Eine Optimierung der Kombinationswirkung ist dann anzustellen.

Einen besonderen Fall stellt der Einsatz der Meißelwerkzeuge unter Grundwasserbedingungen dar. Für eine nähere Untersuchung wurden numerische Simulationen mit verschiedenen Meißeltypen durchgeführt. Die aufgrund der Strömungsverhältnisse wirkenden Widerstandskräfte am Meißel konnten dabei aufgezeichnet und ausgewertet werden. Über eine Kräftebilanz am Meißel lässt sich dann eine rechnerische “Grenzgeschwindigkeit“ im freien Fall berechnen. Die Strömungsuntersuchungen wurden dabei mit verschiedenen Modellen und unterschiedlichen Parametern durchgeführt. Anhand der Berechnungsergebnisse konnten die Erfahrungswerte bestätigt und weitere Optimierungen für den Meißeleinsatz abgeleitet werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] BERETISCH, S.: Kräftespiel im System Schneidewerkzeug-Boden. Dissertation, Universität Karlsruhe. Dissertation, 1992
- [2] BOHL, W., ELMENDORF, W.: Technische Strömungslehre.13., überarbeitete und erweiterte Auflage. Vogel Industrie. Würzburg, 2005
- [3] BORRMANN, M.: Historische Pfahlgründungen. Institut für Baugeschichte der Universität Karlsruhe. Karlsruhe, 1992
- [4] BRANDL, H., HOFMANN, R.: "Das Trag- und Setzungsverhalten von Pfahlkästen". Vortrag: 12. Donau-Europäische Konferenz für Geotechnisches Ingenieurwesen. Passau, 2002
- [5] BRANDL, H., JODL, H.G., KOHLBÖCK, D.: Ökoeffiziente Entscheidungskriterien im Tiefbau – Modul 3. unveröffentlichte Forschungsarbeit. Technische Universität Wien, 2005
- [6] BRANDL, H.: Studienblätter zur Vorlesung Grundbau und Bodenmechanik. Institut für Grundbau und Bodenmechanik an der Technischen Universität Wien, 2006
- [7] BUJA, H.O.: Handbuch der Baugrunderkundung – Geräte und Verfahren. Werner Verlag. Düsseldorf, 1999
- [8] BUJA, H.O.: Handbuch des Spezialtiefbaues – Geräte und Verfahren. 1.Auflage. Werner Verlag. Düsseldorf, 1998
- [9] CARDAUN, U.: Systematische Auswahl von Greifkonzepten für die Werkstückhandhabung. Dissertation, Universität Hannover. Dissertation, 1981
- [10] DE BEER, E.: The effects of horizontal loads on piles due to surcharge or seismic effects. In: Paper Speciality Session No. 10, IX. ICSMFE. Tokyo, 1977
- [11] DUDEN: Deutsches Universalwörterbuch. 5., überarbeitete Auflage. Dudenverlag: Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich, 2003
- [12] ERNST, U.: Schadensursachen bei der Herstellung von Bohrpfählen im Grundwasser. Braunschweig, Dissertation, Fachbereich für Bauingenieur- und Vermessungswesen an der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina Braunschweig. Dissertation, 2000
- [13] Exa Corporation: PowerFlow 3.4, Basic Training Course, 2001

-
- [14] Exa Corporation: PowerFlow 4.0: PowerFlow User's Guide, 2006
 - [15] HARTFUSS, W.: Fotogalerie. Hartfuss, Stahlbau. Saarbrücken.
 - [16] HÄNCHEN, R.: Winden und Krane – Aufbau, Berechnung und Konstruktion. Verlag von Julius Springer. Berlin, 1392
 - [17] HANSON, T.L.: Dynamic shearing resistance of cohesive soils. MS-Thesis. Iowa State University of Science and Technology. MS-Thesis, 1975
 - [18] HOHLFELDER, M., VOGT, N., HARTFUSS, W.: Bohrpfähle im Festgestein. TBG-Fachtagung Spezialtiefbau. Gelsenkirchen, 2003
 - [19] Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Wien: Fotogalerie. Wien, 2007
 - [20] Katalog der Firma Bauer, Schrobhausen.
 - [21] Katalog der Firma Betek - Bergbau- und Hartmetalltechnik Karl-Heinz Simon GmbH & Co. KG, Aichhalden.
 - [22] Katalog der Firma Bumatec, Korea.
 - [23] Katalog der Firma Emde Industrie-Technik GmbH, Nassau.
 - [24] Katalog der Firma Leffer, Saarbrücken.
 - [25] Katalog der Firma Liebherr – Hydro-Seilbagger, Korneuburg.
 - [26] Kröger Greifertechnik: Fotogalerie, www.kroeger-greifertechnik.de. Sonsbeck, 2007
 - [27] KLUCKERT, K.-D.: Rückblick auf 40 Jahre Bohrpfehltechnik – Gibt es noch Impulse für die Zukunft?. TBG Ausgabe. Köln. 06/1999
 - [28] KNASMILLER, R.: Dynamische Materialzerstörung in der Kontaktzone von Hartmetallstift und Gestein. Wien, Dissertation am Institut für Mechanik an der Technischen Universität Wien. Disssertation, 2002
 - [29] KOHLBÖCK, D.: Bemessung von Stahlbetonbrunnen als Hangverdübelung. Wien, Diplomarbeit am Institut für Grundbau und Bodenmechanik an der Technischen Universität Wien. Diplomarbeit, 2003
 - [30] KÜHN, G., SCHULER, V.: Stichwort: Erdbohren für Bauführer und Bohrmeister. Band 22. Bauverlag GmbH. Wiesbaden und Berlin, 1977

-
- [31] LAWN, B.R, MARSHALL, D.B.: The indentation fracture and growth degradation in ceramics, Fracture Mechanics of Ceramics, Plenum Press. New York, 1978
- [32] LIFT,H., HANSEL, M.: Hydrauliksysteme in der Bau- und Kommunaltechnik. 1.Auflage. Vogel Verlag. Würzburg, 1991
- [33] LUCIUS, L.: Bestimmung des Einflusses der Verformungsgeschwindigkeit auf die Bruchspannung im Boden. Deutsche Agrartechnik. Heft 11. Nov. 1971
- [34] MATTHIES, H.J.: Einführung in die Ölhydraulik.4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Teubner Verlag. Stuttgart, 2003
- [35] PILARCIK, P.: Analýza životnosti do porušenia konštrukcie hĺbkového drapáku pri práci s nosnou tyčou : Kand. diz. práca. Vysoká škola dopravy a spojov, Žilina,1988
- [36] SCHEFFLE, M., FREYER, K., MATTHIAS, K.: Fördermaschinen – Hebezeuge, Aufzüge, Flurförderzeuge. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH. Braunschweig/Wiesbaden, 1998
- [37] SCHLICHTING, H.: Grenzschicht-Theorie. 9., völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage Springer Verlag. Berlin, 1997
- [38] SCHNELL, W.: Verfahrenstechnik der Pfahlgründung. Teubner Verlag. Stuttgart, 1996
- [39] SEITZ, J.M.: Bohrpfähle. Verlag Ernst & Sohn. Berlin, 2000
- [40] SIGLOCH, H.: Technische Fluidmechanik. 5. Auflage. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg, 2004
- [41] sg1-c813.uibk.ac.at. 2007
- [42] STRAUB, H.: Die Geschichte der Bauingenieurkunst – Ein Überblick von der Antike bis in die Neuzeit. 4. überarbeitete und erweiterte Auflage. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser 1992
- [43] Verband für Arbeitsstudien Refa e.V. (Hrsg.): Methoden des Arbeitsstudiums, Teil 2 Datenermittlung, Carl Hanser Verlag, München 1971/1975.
- [44] VÖBU [Vereinigung Österreichischer Bohr- und Spezialtiefbauunternehmungen].: Bohrhandbuch. 2. Ausg. Wien, 2004
- [45] WARNECKE, H.-J., SCHRAFT, R.D.: Handbuch Handhabungs-, Montage- und Industrieroboter. Landsberg/Lech: Verlag moderne Industrie, 1992

-
- [46] WHITTAKER, B.N., SINGH, R.N., SUN, G.: Rock fracture mechanics – Principles, Design and Applications. Elsevier, Amsterdam, London, New York, Tokyo, 1992
- [47] www.geoforum.com: Pile Info. 2007
- [48] ZEBISCH, H.-J.: Fördertechnik - Hebezeuge: Krane, Bauteile und Anlagen. - 2. Auflage. Vogel. Würzburg, 1975