

Die approbierte Originalversion dieser Dissertation ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).



DISSERTATION

Analytische, numerische und experimentelle Untersuchungen von Meißelarbeiten bei der Pfahlherstellung mit dem Schlagbohrverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Grundwasserbedingungen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaften

unter der Leitung von
O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c.mult. Heinz Brandl
Institut für Grundbau und Bodenmechanik (E221)

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Dipl.-Ing. Dietmar Kohlböck
Matr. Nr. 9625947
A-3422 Altenberg, Hauptstraße 25

Wien, August 2008



DOCTORAL THESIS

Analytical, numerical and experimental investigation of chisel usage in pile construction by percussive drilling in variable groundwater conditions

in partial fulfillment of the requirements for the degree of
Doctor of Technical Sciences

under the supervision of
O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c.mult. Heinz Brandl
Institute for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (E221)

submitted to the Department of Civil Engineering
Vienna University of Technology

by

Dipl.-Ing. Dietmar Kohlböck
Mat. No. 9625947
A-3422 Altenberg, Hauptstraße 25

Vienna, August 2008

meinem Sohn Clemens
gewidmet

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Zuge eines Forschungsvorhabens während meiner Tätigkeit als Universitätsassistent am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Wien. Mein besonderer Dank gilt Herrn o.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c.mult. Heinz Brandl, Vorstand des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik an der Technischen Universität Wien, der mir das Erstellen dieser Arbeit ermöglichte und sich stets Zeit für wertvolle Unterstützung genommen hat.

Herrn o.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hans Georg Jodl, Vorstand des Institutes für interdisziplinäres Bauprozessmanagement, danke ich für die Zweitbegutachtung dieser Arbeit. Weiters bedanke ich mich bei dem, mit dieser Thematik betrauten, Diplomanden und nunmehrigen Kollegen Dipl.-Ing. Marek Szabo für seinen Beitrag zu diesem Forschungsvorhaben und seine Unterstützung bei den Großversuchen auf Baustellen. Ebenso gebührt mein Dank meinem Kollegen Hr. cand.ing. Walter Bednar für die tatkräftige Mithilfe bei den Baustellenmessungen. Meinen Kollegen und ehemaligen Kollegen Hr. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Blovsky, Hr. Dipl.-Ing. Richard Kaller und Hr. Dipl.-Ing. Dr.techn. Fritz Kopf danke ich für viele Diskussionen am Institut.

Bei der Literaturrecherche und vielen sonstigen Tätigkeiten waren mir dankenswerterweise Fr. Gerda Pfleger, Fr. Anna Zahradnik und Hr. Andreas Pohl vom Institut für Grundbau und Bodenmechanik eine große Hilfe. Für die Unterstützung bei den Laborversuchen danke ich den Mitarbeitern des Erdbaulaboratoriums der Technischen Universität Wien, den Herren Alfred Nitz, Michael Dürmoser, Patrick Hackensellner und Gerhard Steinbauer, sowie den Herren ao.Univ.Prof. Mag.rer.nat. Dr.nat.techn. Andreas Rohatsch und Dipl.-Ing. Victor Hugo Navas Basantes vom Institut für Ingenieurgeologie der Technischen Universität Wien.

Außerdem richtet sich mein Dank an Hr. Dipl.-Ing. Dr.techn. Boris Huber für die gemeinsame Betreuung einer interdisziplinären Seminararbeit zu diesem Thema sowie an Hr. Amtsdirektor Ing. Karl Fuchs vom Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie der Technischen Universität Wien für die unkomplizierte Unterstützung bei den Modellversuchen. Mein Dank gebührt weiters Hr. Dipl.-Ing. Helmut Hausmann vom Institut für Geodäsie und Geophysik der Technischen Universität Wien für wertvolle Anregungen im Zuge der Auswertung von Meßdaten. Hr. Ing. Josef Beiglböck danke ich für die perfekte Betreuung des Strömungsdynamik Applikationsservers beim Zentralen Informatikdienst der Technischen Universität Wien.

Zu großem Dank bin ich Hr. Ing. Günther Kainrath von der Grund- Pfahl- und Sonderbau GmbH für die Anregung zu diesem Forschungsthema sowie für die fortwährende, großartige Unterstützung verpflichtet. Mein besonderer Dank gebührt Hr. Dipl.-Ing. Klaus Breit, Geschäftsführer der Grund- Pfahl- und Sonderbau GmbH, der die finanzielle Grundlage zu diesem Forschungsvorhaben schuf. Den Herren Franz Gruber und Daniel Trauner der gleichnamigen Firma möchte ich für die qualifizierte Unterstützung bei der Vorbereitung für die Versuche auf den Baustellen danken.

Für die umfangreichen Diskussionen zu diesem Thema und im gesamten Gebiet der Geotechnik möchte ich meinem Bruder Dipl.-Ing. Bernhard Kohlböck herzlich danken. Großer Dank gebührt meinen Eltern Josef und Helga Kohlböck, die mir diese Ausbildung ermöglichten und mich auch in den letzten Jahren unterstützt haben, wo sie nur konnten. Auch ihnen möchte ich an dieser Stelle sehr herzlich danken.

Der größte Dank gebührt jedoch meinem Sohn Clemens und meiner Lebensgefährtin Julia, die viel Verständnis für die wenige gemeinsame Zeit aufbringen mußten, mich stets unterstützt haben und an meiner Seite standen.

Kurzfassung

Das Schlagbohrverfahren mit verschiedenen Bohrwerkzeugen stellt eine seit langem gängige Möglichkeit zur Herstellung von Pfählen dar. In der vorliegenden Dissertation wird der Einsatz von Meißelwerkzeugen beim Lösen von Festgestein bzw. sonstigen Bohrhindernissen untersucht. Dabei wird der erschwerende Einfluß des Grundwassers beim Bohren besonders berücksichtigt.

Meißelwerkzeuge werden im Freifallbetrieb zum Lösen des Untergrundes an der Bohrlochsohle in schlagender Weise eingesetzt. Die grundsätzlichen Überlegungen beruhen bisher darauf, daß die Werkzeuge ihre potentielle Energie von der Ausgangslage bis zum Auftreffen an der Bohrlochsohle in kinetische Energie umwandeln. Weitere im System wirkende Widerstände, wie Trägheiten und Reibungsvorgänge, wurden dabei außer Acht gelassen. Beim Einsatz unter Wasser ergeben sich außerdem erhebliche Strömungswiderstände, für welche in der Literatur bis dato keine Angaben bekannt waren. Die Bewegungsvorgänge bei Meißelarbeiten waren daher nicht oder nicht ausreichend erfaßt, und die geometrische Ausführung bzw. der Einsatz der Werkzeuge vorwiegend empirisch bestimmt.

In der vorliegenden Arbeit werden anhand einer Betrachtung der beim Freifallbetrieb maßgeblichen Komponenten analytische Modelle zur Beschreibung der Fallbewegung erstellt. Dies erfolgt für den Einsatz im trockenen und wassergefüllten Bohrloch. Für die Rotationsbewegung des Meißels bei den Fallvorgängen unter Wasser, welche für ein vollständiges, systematisches Aufmeißeln des Untergrundes sorgt, wird ebenfalls ein analytisches Modell ausgearbeitet.

Die Strömungseigenschaften von verschiedenen Meißeltypen und -ausführungen werden umfangreich mit Hilfe von numerischen Strömungssimulationen untersucht. Dabei werden die Strömungswiderstände und Momenteneinwirkungen auf die verschiedenen Werkzeugvarianten im Bezug auf die Fall- und Rotationsbewegung ermittelt und gegenübergestellt. Die Ergebnisse der Berechnungen lassen Optimierungspotentiale in der Meißelausführung erkennen und dienen als Eingangsparameter für die analytischen Modelle.

Zur Überprüfung und Erweiterung der numerisch ermittelten Strömungseigenschaften wurden maßstäbliche Modellversuche durchgeführt. Alle im Maßstab 1:7.4 untersuchten Meißelvarianten wurden in identischer Weise auch mit numerischen Strömungssimulationen gerechnet. Somit können direkte Vergleiche zwischen den theoretisch und experimentell ermittelten Ergebnissen erfolgen und die analytischen Bewegungsgleichungen bestätigt werden. Dies betrifft sowohl die Fall- als auch die Rotationsbewegung der Werkzeuge.

Bei Meßeinsätzen auf Baustellen konnten Fallvorgänge in trockenen, teilweise und vollständig wassergefüllten Bohrlöchern mit verschiedenen Methoden aufgenommen werden. Darüber hinaus wurden die auftretenden Kräfte bei den Meißelarbeiten in direkter und indirekter Weise gemessen, um Erkenntnisse über das Ausmaß und den Verlauf der Schlagkräfte zu gewinnen. Anhand der Ergebnisse aus den Baustellenmessungen wurden die bisher angeführten Untersuchungen im praktischen Einsatz überprüft.

Für die Erfassung der Schlagkräfte und Bewegungsvorgänge waren umfangreiche Meßmethoden erforderlich, die speziell für die gegenständlichen Untersuchungen angefertigt wurden. Dazu zählen ein photogrammetrisches Meßverfahren mit rechnergestützter Auswertung sowie ein Meßsystem zur Aufzeichnung der maßgeblichen Beschleunigungen bei den Meißelarbeiten. Diese Meßmethoden konnten sowohl bei den klein- als auch bei den großmaßstäblichen Versuchen erfolgreich eingesetzt werden.

Anhand der analytisch, numerisch und experimentell ermittelten Ergebnisse lassen sich Vergleiche zwischen den verschiedenen Meißelvarianten vornehmen und Empfehlungen für die geometrische Ausführung und praktische Anwendung der Werkzeuge unter verschiedenen Randbedingungen angeben.

Abstract

The installation of pile foundations by hammer grab and chisel is a longstanding method of construction. The use of such chisel devices to break rock or other subsurface obstacles is investigated in this doctoral research. Particular consideration is given to the influence of groundwater conditions.

Chisels are employed in a free-fall operation in order to break hard layers at the bottom of a borehole, by means of percussive impact. Preliminary approaches were based on principles of energy conservation, with potential energy of the chisel at its initial position transferred to kinetic energy as a consequence of the free-fall motion. In analysis, frictional and inertial forces within the system were neglected. Free-fall through water yields additional forces on the chisel, which were unknown. Accordingly, the motion of the chisel could not be accurately described, causing its design and operation to be based on empirical considerations.

In this dissertation, analytical models for the motion of the chisel in a borehole are developed for application to free-fall through air and also through water. Additionally, a model is developed to account for rotation of the chisel during free-fall, which ensures a complete and systematic account of the rock-breaking process at the bottom of the borehole.

Flow simulations of various chisel types are presented based on the principles of computational fluid dynamics. Forces and moments arising from flow resistance around a chisel are calculated and compared. The results can be used for purposes of optimisation in design, and also as input parameters for analytical models.

Model tests (scale 1:7.4) were performed to evaluate results obtained from the flow simulations and the analytical models. The test data enable a verification of the equations for translational and rotational motion. Several large scale tests were carried out at different construction sites to establish the motion of a chisel in dry, partly and completely water-filled boreholes. Additionally, indirect and direct measurements were taken of the chisel impact, in order to characterise the development and magnitude of impact forces. The large scale tests represent the final component of the experimental investigation.

A sophisticated data acquisition system was developed to measure chisel motion and impact force. The system comprises a timed photogrammetric image acquisition, with computational evaluation of acceleration. It was used for both small and large scale tests, and proved very successful.

Results of the analytical, numerical and experimental investigations allow for a detailed comparison between various types of chisel. Recommendations are provided for application of the chisel devices, under conditions representative of those encountered in engineering practice.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Problemstellung	2
3	Das Schlagbohrverfahren im Überblick	6
3.1	Allgemeines	6
3.2	Leistungs- und Einsatzgrenzen	6
3.3	Bohrwerkzeuge und Geräte	8
3.3.1	Bohrgreifer	8
3.3.2	Bohrmeißel	12
3.3.3	Verrohrung und Verrohrungsmaschine	15
3.3.4	Trägergerät	15
4	Methodenwahl und -beschreibung	17
4.1	Vorgangsweise	17
4.2	Photogrammetrisches Meßverfahren	21
4.2.1	Aufbau und Funktionsweise	21
4.2.2	Meßkamera	25
4.2.3	Rechnergestützte Auswertung	30
4.3	Meßsystem zur Erfassung der Beschleunigungen	36
4.3.1	Funktionsweise und Systemaufbau	36
4.3.2	Meßkette	37
4.3.2.1	Meßwerterfassung am Meißel	38
4.3.2.2	Meßwerterfassung an der Verrohrung	40
5	Analytische Lösung der Fallbewegung	42
5.1	Fallvorgang im trockenen Bohrloch	42
5.2	Fallvorgang im wassergefüllten Bohrloch	47
5.2.1	Abschätzung der Strömungsverhältnisse	47
5.2.2	Kräfteansatz am Meißel	50
5.2.3	Analytische Lösung der Fallbewegung	53

5.2.4	Analytische Lösung der Fallbewegung für Modellversuche	59
5.2.5	Rotationsbewegung des Meißels beim Fallvorgang	60
5.3	Überlegungen zum Reibungsanteil beim Fallvorgang	64
6	Numerische Strömungssimulationen	67
6.1	Einleitung	67
6.2	Simulationsprogramm	67
6.3	Modellaufbau	68
6.3.1	Vorbereitung der Meißelmodelle	68
6.3.2	Aufbau der Simulationsmodelle	69
6.3.3	Anfangs- und Randbedingungen	72
6.3.4	Materialeigenschaften und Modellparameter	72
6.4	Berechnungsvorgang und Berechnungsdauer	73
6.5	Exemplarische Auswertung am Flachmeißelmodell	73
6.5.1	Allgemeines	73
6.5.2	Geometrie des Flachmeißels (Basismodell)	74
6.5.3	Auswertung	74
6.6	Parameterstudien am Simulationsmodell	78
6.6.1	Allgemeines	78
6.6.2	Kreuzmeißel	78
6.6.2.1	Geometrie	78
6.6.2.2	Variation der Gitterauflösung	80
6.6.2.3	Variation der Oberflächenrauigkeit	81
6.7	Untersuchung des Strömungswiderstandes	83
6.7.1	Allgemeines	83
6.7.2	Flachmeißel	83
6.7.2.1	Variation der Lenkblechneigung	83
6.7.2.2	Rotationsverhalten beim Hubvorgang	89
6.7.3	Flachmeißel im Modellmaßstab	92
6.7.3.1	Variation der Lenkblechneigung	92
6.7.3.2	Adaption der Lenkblechprofile	96
6.7.4	Ringmeißel	99
6.7.4.1	Geometrie	99
6.7.4.2	Simulationsberechnung	99
6.8	Untersuchung des Widerstandes bei der Rotation	101
6.8.1	Allgemeines	101
6.8.2	Flachmeißel	102

6.8.3	Flachmeißel im Modellmaßstab	102
6.9	Gegenüberstellung der Ergebnisse	104
7	Modellversuche	107
7.1	Aufbau und Versuchsablauf	107
7.2	Untersuchung der Fallbewegung	112
7.2.1	Versuche mit dem leichten Flachmeißelmodell	112
7.2.2	Versuche mit dem schweren Flachmeißelmodell	114
7.3	Untersuchung des Rotationsverhaltens	116
7.4	Freier Fall auf die Wasseroberfläche	118
7.5	Vergleich der Ergebnisse mit der analytischen Lösung	122
7.5.1	Gegenüberstellung der Fallbewegung	122
7.5.2	Gegenüberstellung der Rotationsbewegung	125
7.5.3	Schlußfolgerung	126
8	Baustellenmessungen	129
8.1	Einleitung	129
8.2	Baustellenmessung LT34	129
8.2.1	Allgemeines	129
8.2.2	Fallzeitmessung	130
8.3	Baustellenmessung Horn	132
8.3.1	Allgemeines	132
8.3.2	Fallzeitmessung	132
8.3.3	Photogrammetrische Bewegungsmessung	133
8.3.4	Vergleich der Messungen und Interpretation	137
8.4	Baustellenmessung S35V	139
8.4.1	Allgemeines	139
8.4.2	Photogrammetrische Bewegungsmessung	139
8.4.3	Beschleunigungsmessung	142
8.5	Baustellenmessung A5	148
8.5.1	Allgemeines	148
8.5.2	Photogrammetrische Bewegungsmessung	149
9	Ergebnisauswertung und Hinweise für den praktischen Einsatz	154
9.1	Allgemeines	154
9.2	Fallvorgang im trockenen Bohrloch	154
9.3	Fallvorgang im wassergefüllten Bohrloch	157
9.4	Fallvorgang im teilweise wassergefüllten Bohrloch	161

9.5 Rotationsbewegung beim Fallvorgang unter Wasser 165

9.6 Hinweise für den praktischen Einsatz 169

10 Zusammenfassung und Ausblick 172

10.1 Zusammenfassung 172

10.2 Ausblick 174

1 Einleitung

Die Nutzung von Pfählen als Fundierungselement gehört wohl zu den ältesten Gründungstechniken überhaupt. Nach jüngsten Daten können Holzpfahlgründungen bereits in der Jungsteinzeit und Bronzezeit zwischen ca. 4300 v. Chr. und 800 v. Chr. im Alpenraum belegt werden [47]. In der Römerzeit wurde die Gründungstechnik mit Pfählen entscheidend verbessert und läßt erste statische Konzepte, sowie verbesserte Herstellungsmethoden mit mechanischen Rammen erkennen. Etwa Anfang des 20. Jahrhunderts begann schließlich die Herstellung von Bohrpfählen, wobei die ersten leistungsfähigen Geräte (Greiferbohrgeräte) in den 60er Jahren verwendet wurden [6].

Heutzutage können Bohrpfähle mit verschiedensten Methoden und einer Vielzahl an verfügbaren Werkzeugen hergestellt werden (Schlagbohren, Drehbohren, Rotationsbohren, etc.). Dabei sind die verwendeten Geräte hochentwickelt und verfügen über enorme Leistungen. Nichtsdestotrotz können die Verfahren beim Bohren im Festgestein an ihre praktischen und/oder wirtschaftlichen Grenzen stoßen. Die Verfahren sollten daher stets in Abstimmung mit den Baugrundverhältnissen und ihren Einsatzschwerpunkten verwendet werden. Unter schwierigen Bohrbedingungen (wechselnde Untergrundverhältnisse, Fels, Grundwasser, etc.) müssen die Verfahren (rasch) an die jeweilige Situation angepaßt werden können, um Verzögerungen und Kosten gering zu halten.

Das Schlagbohrverfahren zeichnet sich durch einen weiten Einsatzbereich und geringere Investitionskosten gegenüber den anderen Verfahren aus. Dabei ist eine Vielzahl an Bohrwerkzeugen vorhanden, die schnell gewechselt werden können. Für den Einsatz des Verfahrens im Festgestein und unter erschwerendem Grundwassereinfluß sind jedoch nur wenige, nicht ausführliche Unterlagen in der Literatur bekannt. So ist der Bohrfortschritt in der Anwendung hauptsächlich durch die Erfahrung der Bohrmannschaft geprägt. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Verfahren unter erschwerten Baugrundbedingungen (Fels, Grundwasser) daher mit theoretischen und experimentellen Methoden umfangreich untersucht.

2 Problemstellung

Das Abteufen eines Pfahles kann durch natürliche und künstliche Hindernisse erheblich beeinträchtigt werden. Dazu zählen beispielsweise Inhomogenitäten wie Findlinge, bestehendes Mauerwerk oder Holzpfähle, aber auch natürliche Zwischenschichten aus bindigem Material oder Felsbänder. Für vertikal und vor allem horizontal beanspruchte Pfähle kann außerdem eine tiefere Einbindung in den Fels aus statischen Gründen erforderlich sein. Bei der Pfahlherstellung mit dem Greiferbohrverfahren (Schlagbohrverfahren) erfolgt das Lösen und Fördern des anstehenden "Bodens" mit verschiedenen Bohrwerkzeugen, die nach den vorhandenen Verhältnissen (Festigkeit, Lösbarkeit, etc.) ausgewählt werden müssen. In der Geotechnik ist die Unterscheidung des "Bodens" in Lockergestein (Boden) und Festgestein (Fels) üblich, der nach der Lösbarkeit in "Bodenklassen" eingeteilt wird ([4] u. [30]). Lockergestein wird meistens mit dem Seilgreifer in diskontinuierlicher Weise gelöst und gefördert. Das Lösen von Festgestein muß hingegen mit dem Freifallmeißel in schlagender Weise erfolgen.

Für das Arbeiten mit Meißelwerkzeugen sind in der Literatur nur wenige Angaben verfügbar, die Empfehlungen für den Einsatz oder Aufschlüsse über die Schlagkräfte zulassen. Grundsätzlich beruhen die Überlegungen bis dato darin, daß der Meißel seine potentielle Energie von der Ausgangshöhe bis zum Auftreffen an der Bohrlochsohle in kinetische Energie (=Schlagenenergie) umsetzt. Darauf basierend werden beispielsweise Empfehlungen für die Fallhöhe beim Lösen von Weich- und Hartgestein im trockenen Bohrlochzustand angegeben (z.B. Weichgestein $H_{max}=3.0$ m, Hartgestein $H_{max}=4.0$ m). Für Meißelarbeiten unter Wasser wird die doppelte Fallhöhe empfohlen [43].

Die Überlegungen lassen dabei außer Acht, daß beim Arbeiten mit dem "Freifallmeißel" tatsächlich kein freier Fall auftritt, sondern die Fallbewegung bereits durch die "geräte-seitigen" Widerstände (Seiltrieb¹, Trägheit und Reibung der Seilwinde, etc.) behindert wird. Darüber hinaus kann Energie durch Reibung zwischen dem Meißel und der Verrohrung abgebaut werden. Die Masse des Meißels ist ebenfalls, als linearer Term, in der

¹Unter Seiltrieb ist gemäß [29] eine "Vorrichtung zur Übertragung einer Drehbewegung von einer Welle auf eine andre mittels Seile" zu verstehen. In der gegenständlichen Betrachtung ist der Seiltrieb ein essentieller Bestandteil des Hubwerkes eines Fördermittels.

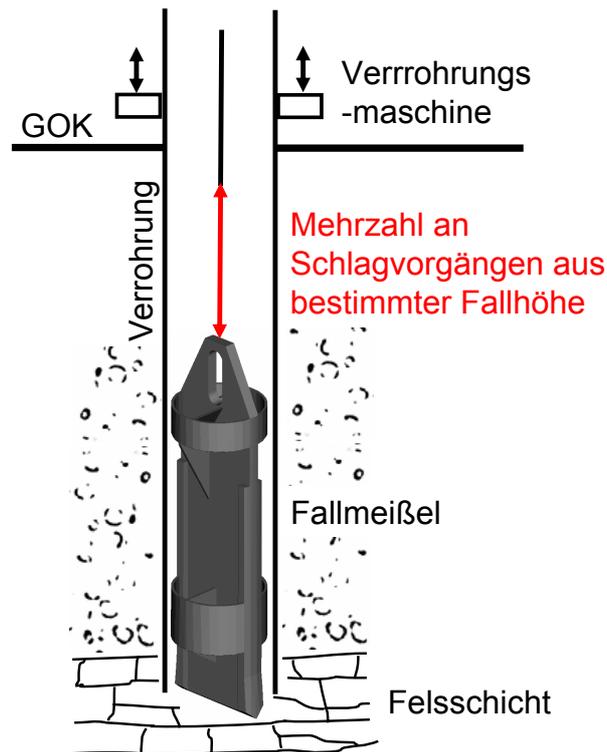


Abb. 2.1: Durchhörtern einer Felsschicht mit dem Freifallmeißel

kinetischen Energie beim Aufprall enthalten und sollte daher in die Empfehlungen für die Fallhöhe einfließen. Für die Meißelarbeit unter Wasser erscheint hingegen die Geometrie des Meißels von besonderer Bedeutung, da diese den Strömungswiderstand des Werkzeuges maßgeblich beeinflusst. Die optimale Meißelleistung hängt jedoch nicht nur von der kinetischen Energie des Werkzeuges beim Lösen des Festgesteins ab, sondern muß in Interaktion mit dem anstehenden Untergrund betrachtet werden. Hierfür ist beispielsweise die Schneidenausbildung des Meißels entsprechend dem zu lösenden Untergrund anzupassen. Mit zunehmender Schlaganzahl wird der anstehende Untergrund zertrümmert und in gewissen Abständen mit dem Bohrgreifer gefördert. Aus diesem Blickwinkel stellen sich einige grundlegende Fragen, die im Zuge dieser Arbeit näher untersucht werden:

- Widerstände beim Fallvorgang im trockenen Bohrloch
- Fallbewegung von Meißelwerkzeugen im trockenen Bohrloch und Gegenüberstellung mit dem freien Fallmodell
- Strömungswiderstände beim Fallvorgang unter Wasser
- Fallbewegung von Meißelwerkzeugen unter Wasser
- Drehbewegung von geeigneten Meißelwerkzeugen unter Wasser
- Ausführung der Meißel für den Einsatz unter Wasser

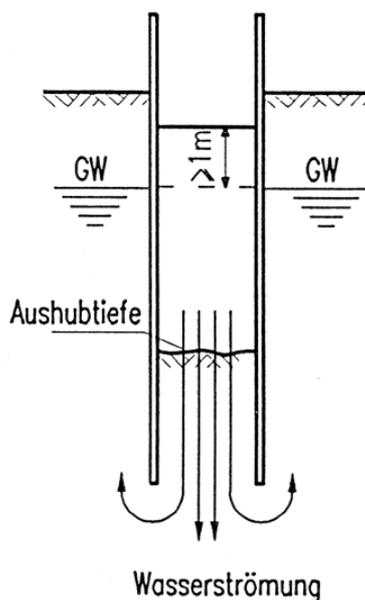


Abb. 2.2: Vermeidung des hydraulischen Grundbruchs durch höheren Wasserspiegel innerhalb der Verrohrung (aus [42])

- Empfohlene Fallhöhe für die Meißelarbeit im trockenen Bohrloch und unter Wasser
- Abschätzung der Schlagenergie beim Meißeln
- Zeitpunkt des optimalen Werkzeugwechsels

Dabei soll vor allem der Fallvorgang des Meißels unter Wasser genau untersucht werden, da hier erfahrungsgemäß die Bohrleistung erheblich beeinträchtigt wird. Das Wasser kann an der Bohrlochsohle und an durchlässigen Rohrverbindungen eintreten. Durch die Bohrtiefe ist oftmals mit hohen Wasserdrücken und Zuflußraten in das Innere der Verrohrung zu rechnen, wodurch ein intermittierendes Abpumpen des Wassers wenig sinnvoll erscheint. In Abhängigkeit von den Baugrundverhältnissen kann ein hoher Wasserstand innerhalb der Verrohrung jedoch sogar erwünscht sein. Bei einem hohen äußeren Wasserspiegel besteht die Gefahr des hydraulischen Grundbruchs an der Bohrlochsohle, welcher mit Materialeintritt und einer Auflockerung des umliegenden Untergrundes verbunden ist. In diesem Fall muß der Wasserstand innerhalb der Verrohrung stets höher gehalten werden, als im umgebenden Bereich (Bohren unter Wasserauflast, siehe Abb. 2.2).

Die Auftriebskraft und der Strömungswiderstand setzen der Werkzeugbewegung einen Widerstand entgegen, wodurch die Fall- und Hubvorgänge deutlich verzögert werden. Das Grundwasser wirkt sich damit nicht nur auf die Anzahl der Greifer- bzw. Meißelspiele pro Zeiteinheit nachteilig aus, sondern auch auf die Fallgeschwindigkeit der Werkzeuge beim Auftreffen auf das Gestein. Die Geschwindigkeit ist für das Eindring- bzw. Lösevermögen von hohem Einfluß (kinetische Energie ist proportional v^2) und somit besonders beim

Einsatz von Meißelwerkzeugen entscheidend. Es gilt daher, möglichst strömungsgünstige Bohrwerkzeuge zu verwenden und die Fallhöhe beim Meißeln unter Wasser geeignet zu wählen, sodaß ein Optimum zwischen der Schlagenergie und der erforderlichen Zeit für den Hub- und Fallvorgang gefunden wird.

Ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist die strömungstechnische Untersuchung verschiedener Meißelvarianten mit geeigneten Methoden, um diese hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile vergleichen und weitere Optimierungen finden zu können (zu verwendender Meißeltyp, Ausführung, etc.). Weiters soll eine allgemeine Beschreibung der Fallbewegung von Meißelwerkzeugen unter Wasser angegeben werden, nachdem für diese bis dato keine Modelle in der Literatur bekannt sind. Dadurch können Empfehlungen für die Werkzeugwahl (z.B. Flach- oder Kreuzmeißel) und den Werkzeugeinsatz (z.B. Fallhöhe) unter verschiedenen Randbedingungen angegeben werden.

Eine weitere Anforderung beim Lösen von Festgestein unter Grundwassereinfluß stellt das gleichmäßige Aufmeißeln der gesamten Bohrlochsohle dar. Dazu werden den Werkzeugen z.B. Lenkbleche für die Erzeugung einer Drehbewegung angeschweißt. Die zusätzliche Anströmfläche verursacht jedoch einen erhöhten Widerstand beim Fallvorgang des Meißels, wodurch sich die Geschwindigkeit beim Aufprall an der Bohrlochsohle verringert. Grundsätzlich ist lediglich eine geringfügige Verdrehung der Meißelschneide erforderlich, da das Aufmeißeln der Sohle immer mit mehreren Schlägen erfolgt und sich die Drehbewegungen summieren.

Analog zur Beschreibung der Fallbewegung ist daher eine Untersuchung der Drehbewegung von entsprechend ausgestatteten Meißeln erforderlich, um die Verdrehung abschätzen und die Geometrie der Meißel weiter verbessern zu können. Da die Geometrie sowohl die Dreh-, als auch die Fallbewegung beeinflusst, muß ein Kompromiß für die Form des Meißels gefunden werden, die im Hinblick auf den künftigen Einsatz ein Optimum für beide Bewegungen erzielt.

3 Das Schlagbohrverfahren im Überblick

3.1 Allgemeines

Pfähle sind schlanke Bauelemente im Untergrund zur Ableitung von vertikalen und/oder horizontalen Lasten. Dabei kann eine Vielzahl an Pfahlarten nach verschiedenen Methoden eingeteilt werden (z.B. Herstellungsmethode, Geometrie, Material, statische Wirkung, etc.). Bei der Herstellung von Bohrpfählen wird der, zur Aufnahme des Pfahlmaterials, erforderliche Hohlraum mit geeigneten Methoden ausgebohrt bzw. ausgehoben. Beim Schlagbohrverfahren (Greiferbohrverfahren) erfolgt dies vorwiegend mit Bohrgreifern und Fallmeißeln im Schutze einer Verrohrung. Letztere dient als Bohrlochstützung bzw. -sicherung und zur Führung der eingesetzten Werkzeuge. Die Verrohrung wird im Zuge des Pfahlaushubes mit Hilfe einer hydraulischen Verrohrungsmaschine oder Rohrdrehmaschine gemäß dem Bohrfortschritt abgeteuft. Das Lösen und Fördern des anstehenden Untergrundes erfolgt meist mit dem Bohrgreifer. Trifft man im Zuge der Pfahlherstellung auf härtere Zonen (Fels, Beton, Verkittungen, etc.), so muß das Lösen des Materials zunächst mit Fallmeißeln erfolgen. Sobald der Aushub die erforderliche Bohrtiefe erreicht hat, wird die Bewehrung eingestellt und im Anschluß nach dem Kontraktorverfahren betoniert. Während des Betoniervorganges wird gleichzeitig das Bohrrohr wieder gezogen (Arbeitsablauf siehe Abb. 3.1).

3.2 Leistungs- und Einsatzgrenzen

Das Schlagbohrverfahren wird hauptsächlich in nichtbindigen bis schwachbindigen Böden eingesetzt, die leicht lösbar und gut zu greifen sind ([43] u. [51]). Grundsätzlich ist das Verfahren aber in fast allen Untergrundverhältnissen einsetzbar. Durch die Vielzahl an vorhandenen Bohrwerkzeugen und den einfachen Werkzeugwechsel können diese rasch

an unterschiedliche Baugrundverhältnisse angepaßt und z.B. Felsschichten durchörtert werden.

Obwohl der Trend grundsätzlich zu immer stärkeren und leistungsfähigeren Drehbohrgeräten vorhanden ist, kann das Schlagbohrverfahren dem Drehbohrverfahren in einigen Fällen leistungs-, aber vor allem kostenmäßig überlegen sein. Dies betrifft unter anderem folgende Randbedingungen:

- Harte Schichten überlagern weiche Schichten [18]
- Anstehender Fels hoher Festigkeit, der für das Drehbohren mit extremem Verschleiß verbunden ist und mit anderen Verfahren (Flachbohrkopf mit Rollenmeißel, Imlochhämmer) nicht wirtschaftlich zu bohren ist [40] (siehe auch Tab. 3.1)
- Größere Pfahldurchmesser und Bohrtiefen, die besonders an die Verrohrungstechnik erhöhte Anforderungen¹ stellen [51]

Für Pfahlbohrungen im Fels sind in [18] Anhaltswerte für die Leistungs- und Einsatzgrenzen der verschiedenen Verfahren angegeben (siehe Tab. 3.1). Als Bezugsgröße wurde die einaxiale Druckfestigkeit des Gesteins herangezogen. Die angegebenen Werte stellen zwar nur Größenordnungen dar, es läßt sich aber ablesen, daß das Drehbohrverfahren über eine höhere Leistung als das Schlagbohrverfahren verfügen kann (gemäß den Untersuchungen in [15] bei einer einaxialen Druckfestigkeit unter ca. 50 N/mm²). Dagegen verfügt das Schlagbohrverfahren über das breiteste Einsatzgebiet und erfordert darüber hinaus geringere Investitionskosten als die anderen Verfahren. Außerdem steigen die Verschleißkosten beim Schlagbohren mit zunehmender Festigkeit des zu lösenden Untergrundes deutlich weniger an als beispielsweise beim Drehbohren. Es kann damit auch bei niedrigerer Leistung kostenmäßig überlegen sein (vgl. Untersuchungen in [15]). Ein weiterer, oft nicht erwähnter, Vorteil liegt in der besseren Logistik des Seilbaggers als Trägergerät. Dies kann z.B. beim Einbau der Bewehrung von Vorteil sein (vgl. [33]). Mit dem Schlagbohrverfahren hergestellte Bohrpfähle besitzen üblicherweise einen Durchmesser von ca. 0.6 bis 2.0 m

Verfahren	Schlagbohren	Drehbohren	Rotationsbohren
Typisches Bohrwerkzeug	Greifer u. Meißel	Progressivschnecke	Flachbohrkopf
Festigkeitsber. [N/mm ²]	10 - 150	25 - 100	75 - 200
Größenordnung für die Netto Bohrzeit [m ³ /h]	2.5 - 0.1	5 - 0.1	2 - 0.2

Tab. 3.1: Anhaltswerte für Leistungsdaten und Einsatzgrenzen verschiedener Bohrverfahren (aus [18])

¹Drehbohrgeräte können ohne gesonderte hydraulische Verrohrungseinrichtung die Verrohrung nur bis zu einer begrenzten Tiefe ein- bzw. ausbauen [40]

und werden bis zu einer Tiefe von ca. 50 m abgeteuft ([43] u. [51]). In Sonderfällen sind auch größere Ausführungen möglich.

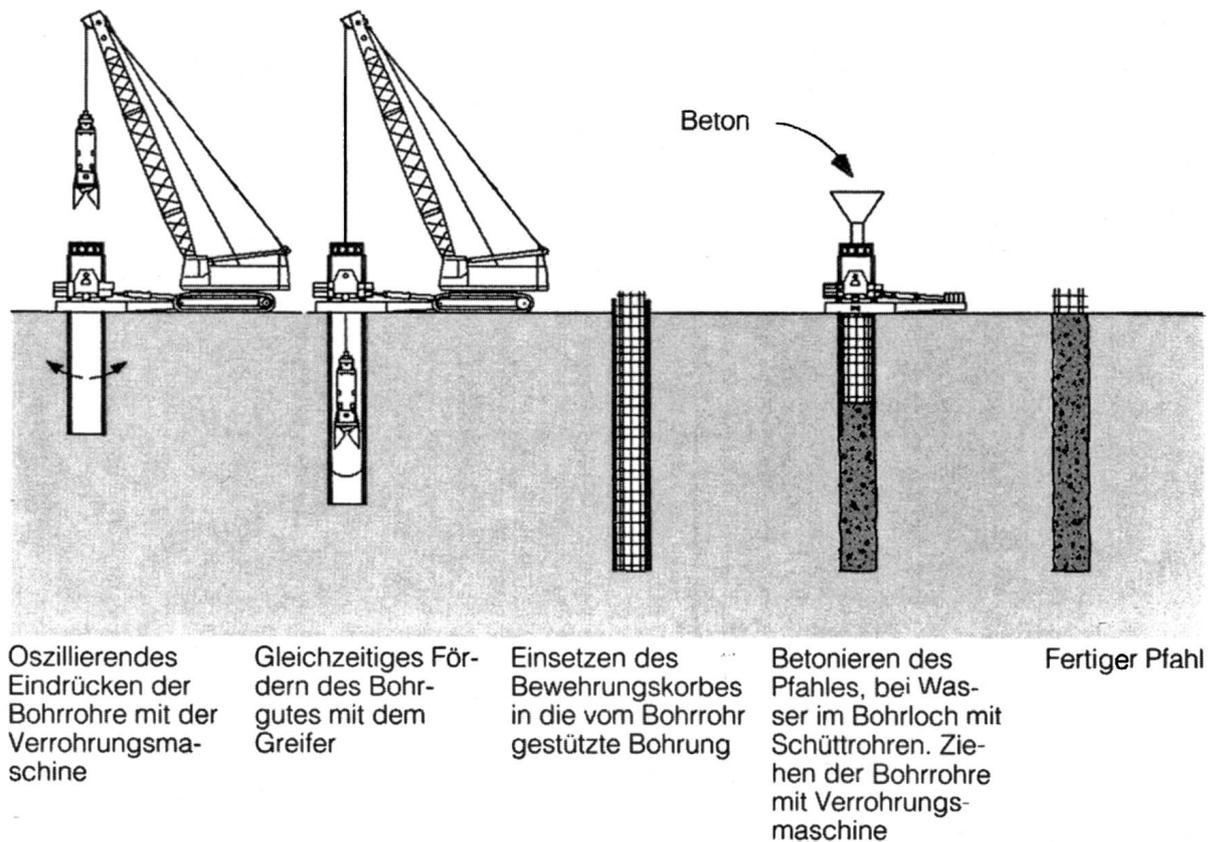


Abb. 3.1: Pfahlherstellung mit dem Greiferbohrverfahren (aus [51])

3.3 Bohrwerkzeuge und Geräte

3.3.1 Bohrgreifer

Der Bohrgreifer dient als Aushubgerät des Untergrundes an der Bohrlochsohle bei der Pfahlherstellung. Er besteht aus dem Greiferkörper mit an der Unterseite angeordneten Spaten, die über einen Schließmechanismus bewegt werden können. Ein grundsätzlicher Verfahrensablauf eines Greiferspiels ist, in vier Phasen vereinfacht, in Abb. 3.2 dargestellt. Der Greifer hängt am Hubseil des Baggers und wird zunächst mit geschlossenen Spaten in die Verrohrung eingefädelt. Danach werden die Spaten geöffnet und der Greifer wird in der Verrohrung abgesenkt. Die Absenkung kann je nach Greifertyp im Freifallbetrieb, aus bestimmter Fallhöhe, oder im Kranbetrieb, mit begrenzter Absenkgeschwindigkeit,

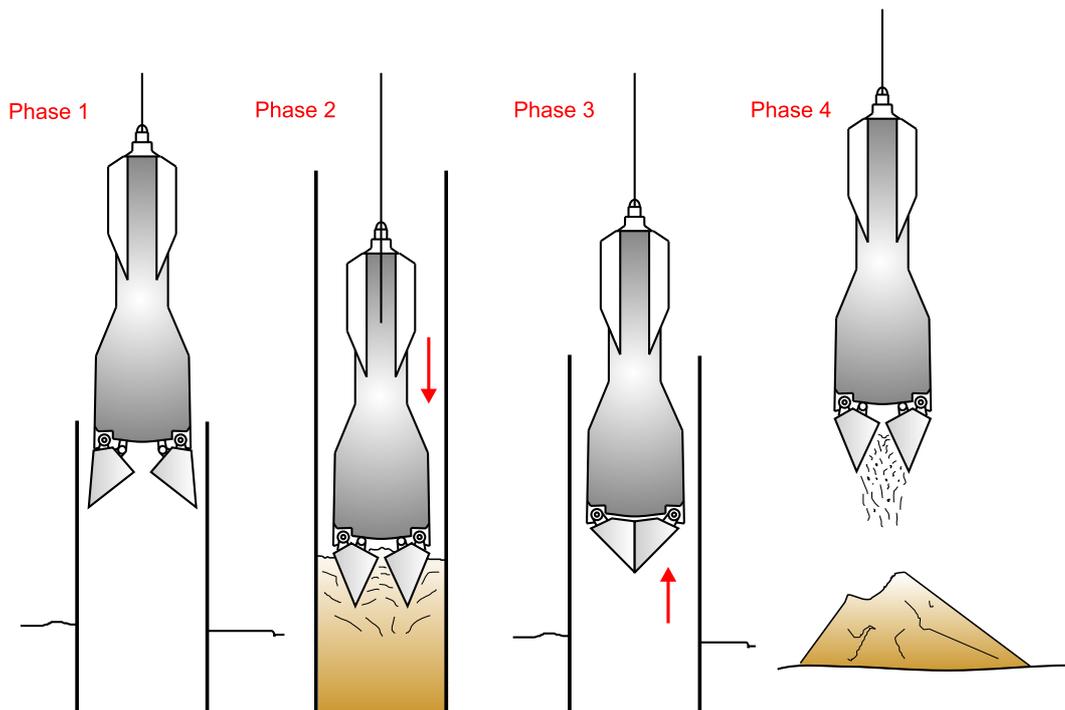


Abb. 3.2: Arbeitsweise mit dem Bohrgreifer [46]

erfolgen. Das Eindringen der Greiferspaten an der Bohrlochsohle ist vom Eindringwiderstand des Greifers, des anstehenden Untergrundes, sowie von der Energie beim Auftreffen an der Sohle bzw. im Kranbetrieb von der Masse des Greifers abhängig. Beim darauf folgenden Schließen der Spaten muß die Scherfestigkeit des zu fördernden Materials überwunden werden. Die Höhe der Schließkraft ist vom Greifertyp abhängig und kann durch verschiedenste Systeme stark variieren (z.B. hydraulisch oder mechanisch; Flaschenzug- oder Scherensysteme). Anschließend wird der Bohrgreifer mit dem gelösten Bohrgut gehoben und neben dem Bohrloch bzw. über einer Mulde entleert. Für ein vollständiges Entleeren ist ein schlagartiges Öffnen maßgebend, welches wiederum vom Schließ- bzw. Öffnungsmechanismus des Greifers abhängt. Während also beim Schließen der Greiferspaten an der Bohrlochsohle eine hohe Schließkraft bzw. ein hohes Schließmoment angestrebt wird, ist beim Entleeren meist ein möglichst schneller Öffnungsvorgang erforderlich, um klebriges, bindiges Bohrgut von den Greiferspaten zu lösen. Folglich lassen sich die meisten Entwicklungen bei Bohrgreifern auch nach dem Schließmechanismus unterscheiden (siehe auch Abb. 3.3):

- Mechanische Seilbohrgreifer
 - Einseilgreifer (1 Seiltrieb)
 - Zweiseilgreifer (2 Seiltriebe)
- Hydraulische Seilbohrgreifer (1 Seiltrieb und Hydraulikleitungen)

Eine Gegenüberstellung der oben aufgelisteten Bohrgreifertypen mit ihren Einsatzgrenzen, sowie Vor- und Nachteilen ist in Tab. 3.2 angegeben. Weitere Einteilungen können z.B. nach der Arbeitsweise, der Greiferform oder der Ausbildung der Schaufeln getroffen werden:

- Nach der Arbeitsweise:
 - Freifallgreifer (Freifall-Stechwerkzeug)
 - Greifer mit Einsatz im Kranbetrieb (kraftschlüssiges Absenken)
- Nach der Greiferform:
 - Konventionelle Greifer
 - Vorsatzgreifer (Vorsatzkrone u. -spaten zur Erhöhung der Schließkräfte u. des Schaufelinhaltes)
 - Torpedogreifer (strömungsgünstige Bauart für den Einsatz unter Wasser)
 - Volumengreifer (hohe Robustheit und großes Fassungsvermögen)
 - Kurzbohrgreifer (Greifer niedriger Bauart bei beschränkter Arbeitshöhe)
- Nach der Schaufelform:
 - Greifer mit Rundschaufeln oder Parallelspaten
 - Stechgreifer
 - Kugelgreifer

Einige Bohrgreifer sind exemplarisch in Abb. 3.4 dargestellt. Die Vielzahl an vorhanden Typen macht deutlich, daß nicht nur umfangreiche Weiterentwicklungen stattgefunden haben, sondern die verschiedenen Ausführungen auch für unterschiedliche Einsatzzwecke konstruiert wurden. So bieten beispielsweise Kugelgreifer mit mehrfacher Seileinscherung, wie in Abb. 3.4b dargestellt, sehr große Schließkräfte und eine gute Bohrleistung in Böden mit hoher Scherfestigkeit oder beim Bohren unter Wasserauflast [43]. Kugelgreifer dürfen jedoch nur im Kranbetrieb eingesetzt werden. Volumengreifer werden im Freifallbetrieb verwendet und erreichen dadurch eine höhere Eindringung an der Bohrlochsohle. Die Fallhöhe muß dabei an den Greifertyp und die Untergrundverhältnisse angepaßt werden, um Beschädigungen am Werkzeug zu vermeiden. Volumengreifer zeichnen sich durch ein großes Fassungsvermögen der Schaufeln aus und sind besonders für nichtbindige bzw. schwachbindige Böden geeignet. Eine umfangreiche Übersicht über die Ausführung und die Vor- und Nachteile verschiedener Bohrgreifertypen ist in [46] zu finden.

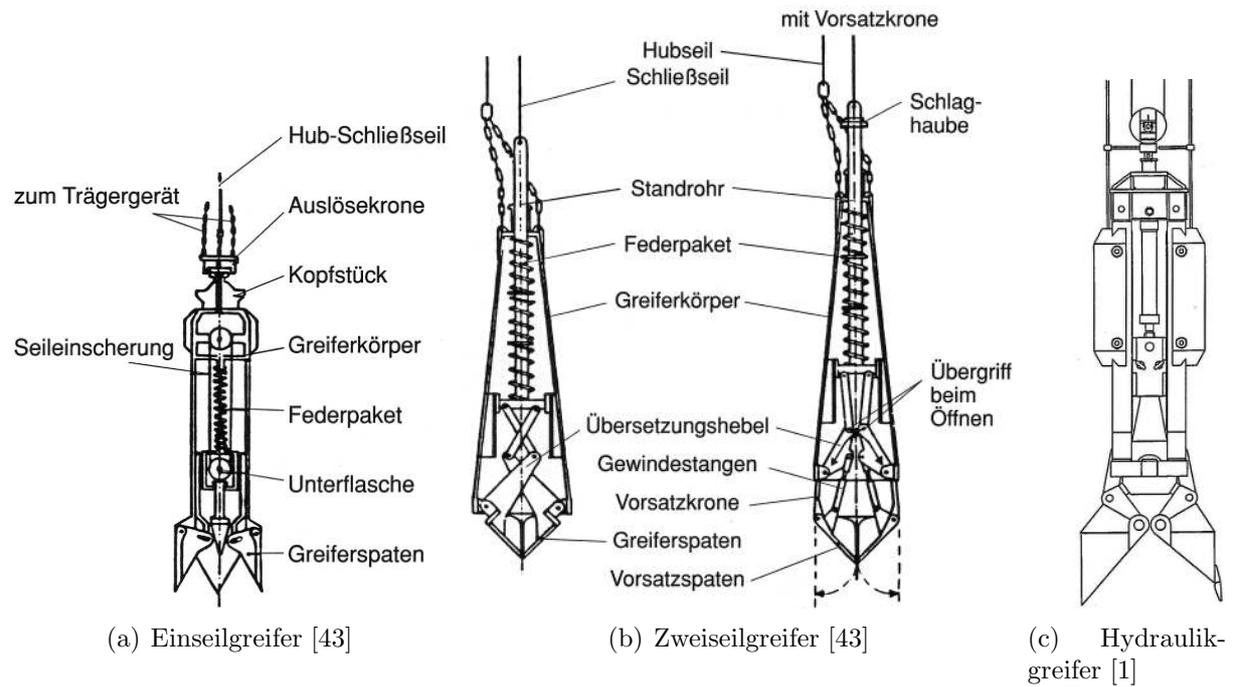


Abb. 3.3: Verschiedene Schließmechanismen bei Bohrgreifern

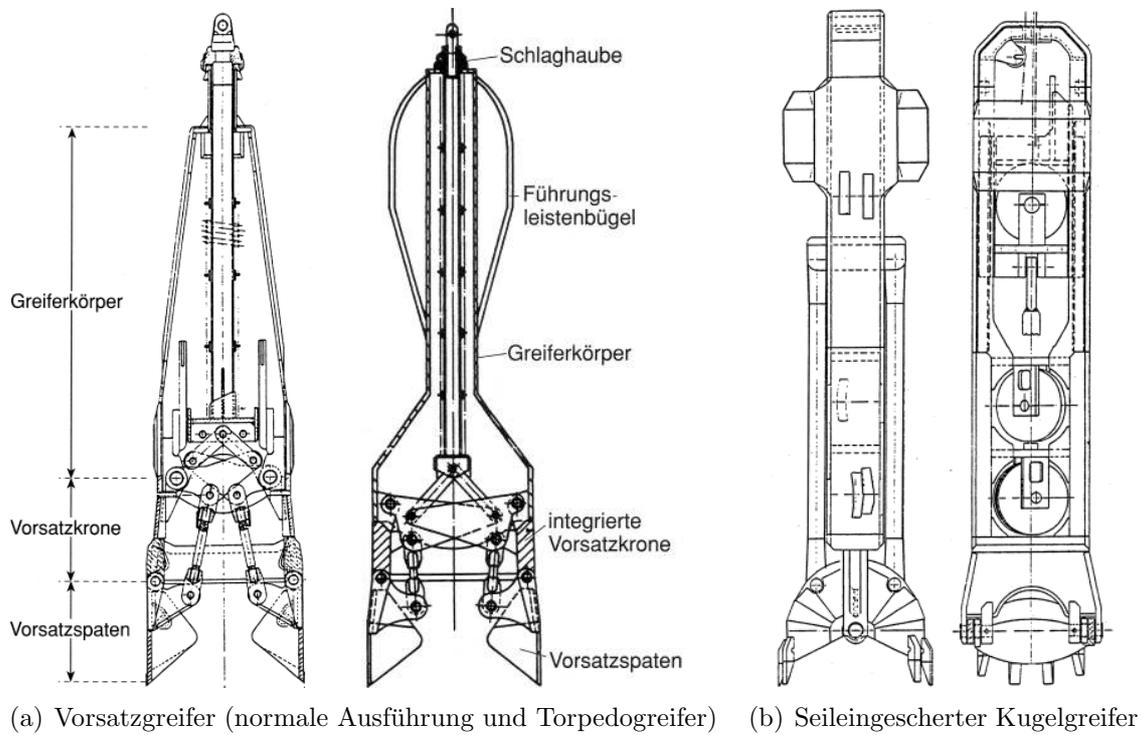


Abb. 3.4: Exemplarische Darstellung einiger Zweiseilgreifertypen (aus [43])

	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 mittelbindige 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-/ Kranbetrieb	Kranbetrieb
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 doppeltwirkender Hydraulikzylinder
Erforderliche Zusatzausrüstungen	Entleerglocke	zweite Trommelwinde für das Schließseil	Hydraulikanlage; Schlauchaufrolltrommel, Hydraulikschläuche
Umweltbelastung	Nicht bekannt	Nicht bekannt	Gefahr einer Leckage des Hydrauliksystems

Tab. 3.2: Gegenüberstellung der mechanischen und hydraulischen Bohrgreifer (aus [46], modifiziert)

3.3.2 Bohrmeißel

Meißel gehörten bereits in der vorchristlichen Zeit zu den wichtigsten Werkzeugen bei Bohrungen. Noch in der Mitte des 20. Jahrhunderts wurde die Mehrzahl an Bohrfahlgründungen überwiegend mit Meißelwerkzeugen hergestellt. Durch die geringen Windenkräfte war die Masse der Meißel und damit die Leistungsfähigkeit jedoch begrenzt [6].

Bohrmeißel besitzen eine in Abb. 3.5 angegebene Form, wobei vor allem der Flach-, Kreuz- oder Ringmeißel eingesetzt werden. Zur Führung beim Fallvorgang und für den Schutz der Verrohrung werden die Meißel meistens mit Führungsringen im unteren und oberen Teil ausgeführt. Für den Einsatz unter Wasser muß die Meißelgeometrie strömungsgünstig ausgebildet sein, damit die Fallgeschwindigkeit und folglich die Energie beim Auftreffen an der Bohrlochsohle möglichst hoch bleibt. Die Anordnung der Schneiden ergibt sich aus der Meißelform und kann gemäß Abb. 3.6 an den Rändern um Tangentialschneiden

ergänzt werden. Die Ausbildung der Schneidenform hängt hauptsächlich vom zu bearbeitenden Material ab, wobei der Schneidenwinkel umso stumpfer gewählt werden muß, je härter der anstehende Untergrund ist. Übliche Schneidenwinkel sind 60° für weiches Gestein und 100 bis 120° für Hartgestein [43]. Der vordere Teil des Meißels kann wegen der hohen Beanspruchung aus besonders verschleißfestem Stahl hergestellt werden. Die Schneiden erhalten eine Hartmetall-Auftragsschweißung (Panzerung), die in Abhängigkeit des Verschleißes rechtzeitig erneuert werden muß. Die Arbeiten sind mit geeigneten Schweißdrähten auszuführen, die für ein rißfreies Schweißgut sorgen.

Manche Meißeltypen besitzen unterschiedliche Schneidenausführungen an beiden Enden und können daher, durch einfaches Wenden, einen größeren Einsatzbereich abdecken. Beispielsweise können Ring- und Flachmeißel leicht in einem "Wendemeißel" kombiniert werden. Ein Beispiel dieses Meißeltyps ist in der gegenständlichen Arbeit näher untersucht worden und in Abb. 6.28 auf S. 99 dargestellt.

Für ein möglichst vollständiges Aufarbeiten der Bohrlochsohle sollte die Schneide bei jedem Schlag in geringfügig verdrehter Position auf den Untergrund auftreffen. Dazu können

- Zwangsumsetzwirbel (Bohrung trocken oder unter Wasser) oder
- Lenkbleche am Meißel (nur beim Bohren unter Wasser)

eingesetzt werden. Zwangsumsetzwirbel werden zwischen dem Bohrmeißel und dem Hubseil des Baggers gehängt und bewirken eine Verdrehung bei jedem Hubvorgang (siehe Abb. 3.7b). Die Konstruktion besteht aus einem geteilten Kolbengehäuse mit vorgespannten, einseitig geneigten Zahnkränzen. Bei jeder Be- und Entlastung erfolgt ein Umsetzen der Gehäuseteile, wodurch zuerst eine Torsion des Baggerseiles erzeugt wird. Nach ca. 10 bis 20 Schlagvorgängen ist das Seil so weit vorgespannt, daß sich der Meißel zu drehen beginnt [43]. Die Nachteile des Zwangsumsetzwirbels bestehen in der aufwendigeren Handhabung bei der Pfahlbohrung, sowie der relativ leichten Beschädigung bei den Schlagvorgängen. Ein weiterer Nachteil ist, daß die Drehwirkung erst mit zunehmender Verdrillung des Seiles einsetzt.

Bei Meißelarbeiten unter Wasser werden bevorzugt Lenkbleche am Meißel angeordnet, die eine Verdrehung beim Fallvorgang bewirken (siehe Abb. 3.7a). Diese werden üblicherweise im hinteren Ring des Meißels eingeschweißt. Der Vorteil von Lenkblechen liegt in der sofort einsetzenden Drehwirkung beim ersten Fallvorgang. Außerdem ist der Bauablauf bei den Meißelarbeiten nicht beeinträchtigt. Lenkbleche entfalten ihre Wirkung jedoch nur beim Einsatz unter Wasser und verursachen außerdem einen erhöhten Strömungswiderstand des Meißels. Dieser wirkt sich negativ auf die Fallgeschwindigkeit und damit auf die Schlagenergie aus (siehe auch Kap. 2).

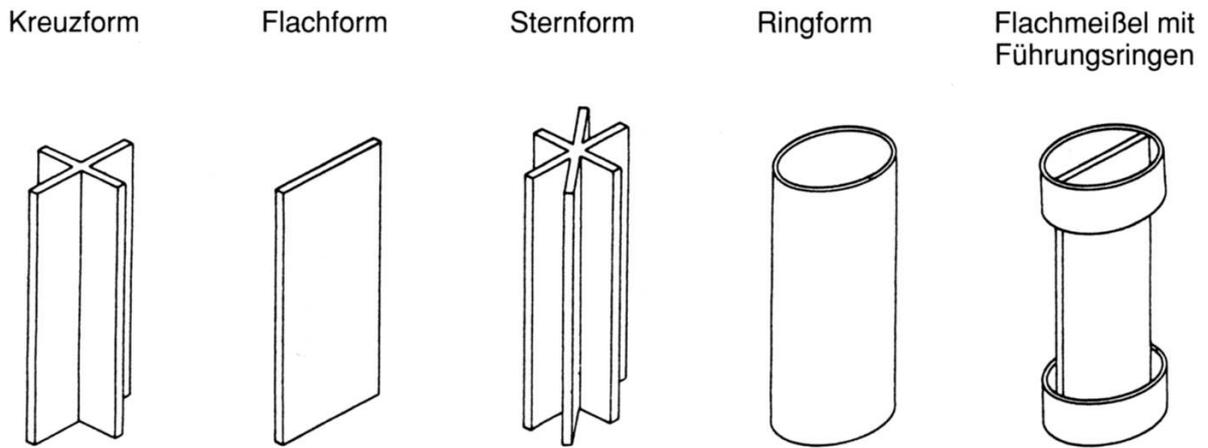


Abb. 3.5: Aufbau von Meißelkörpern [43]

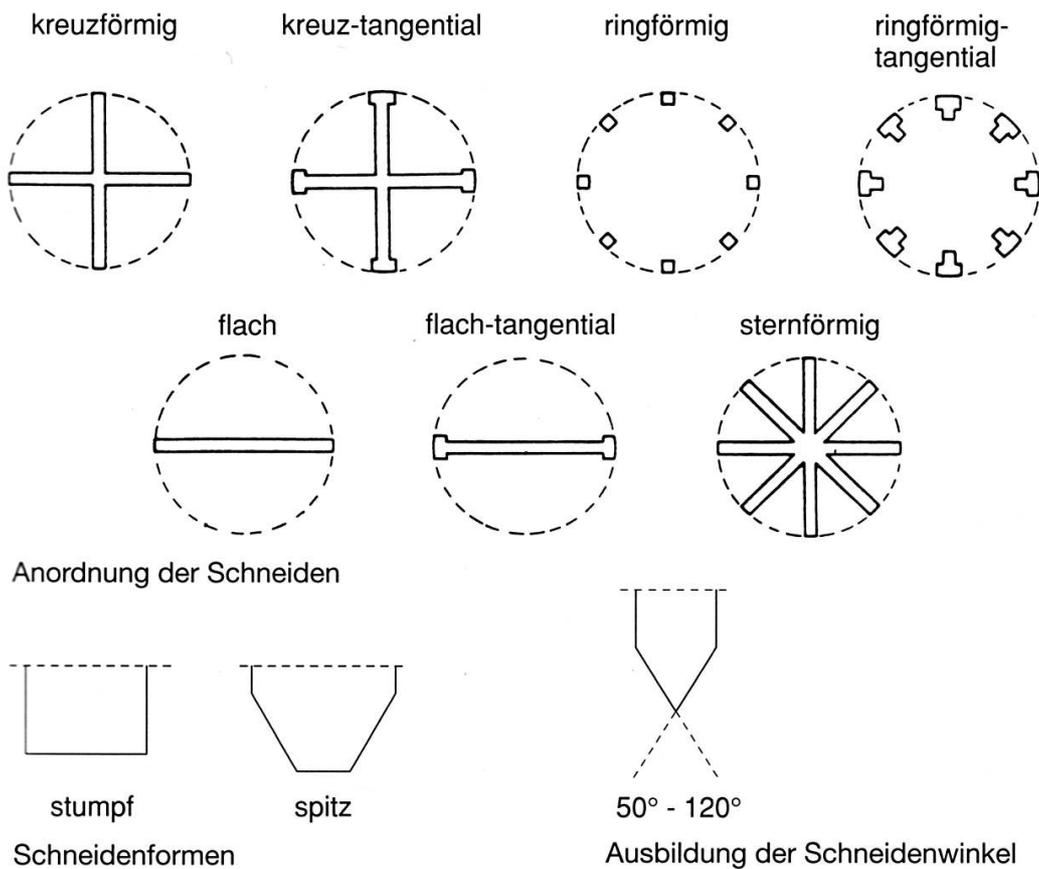
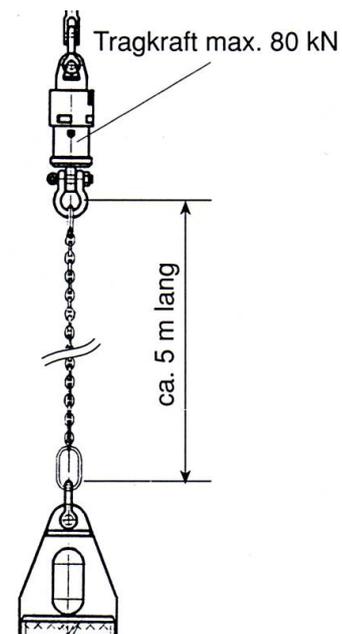


Abb. 3.6: Anordnung und Ausbildung der Schneiden [43]



(a) Lenkbleche angeordnet im hinteren Ring des Meißels



(b) Zwangsumsetzwirbel [43]

Abb. 3.7: Methoden zur Erzielung einer Drehbewegung bei den Meißelarbeiten

3.3.3 Verrohrung und Verrohrungsmaschine

Die Verrohrung dient zur Stützung des Bohrloches und wird gemäß dem Bohrfortschritt üblicherweise mit Hilfe einer Verrohrungsmaschine in den Untergrund abgeteuft. Dies erfolgt in oszillierender Weise durch Drehen und Drücken, um die Mantelreibung zwischen Bohrrohr und Untergrund zu vermindern. Bohrröhre werden beim Pfahlbohren, wegen der leichteren Handhabung und der großen Verwindungssteifigkeit, meist in doppelwandiger Ausführung, in Rohrschüssen von vier bis sechs Metern (max. ca. 12 m) eingesetzt. Die Rohrverbindung zwischen den Schüssen erfolgt durch einen Nippel- und Muffenteil, die durch konusförmige Elemente verschraubt werden. Das untere Ende der Verrohrung ist mit einem Schneidschuh mit Hartmetallstiften (Bohrkrone) ausgerüstet, der an die jeweiligen Untergrundverhältnisse angepaßt werden muß ([6] u. [43]).

3.3.4 Trägergerät

Als Trägergeräte kommen beim Schlagbohrverfahren vorwiegend Raupenseilbagger zum Einsatz. Diese Geräte besitzen den Vorteil, daß sie über leistungsfähige Seilwinden verfügen, die schwerste Bohrwerkzeuge heben können, und für den Anbau von Zusatzeinrichtungen geeignet sind (Verrohrungsmaschine). Sie sind in der Regel mit zwei hydraulischen Winden ausgerüstet, die beim Greifer- und Meißeleinsatz über eine Freifalleinrichtung

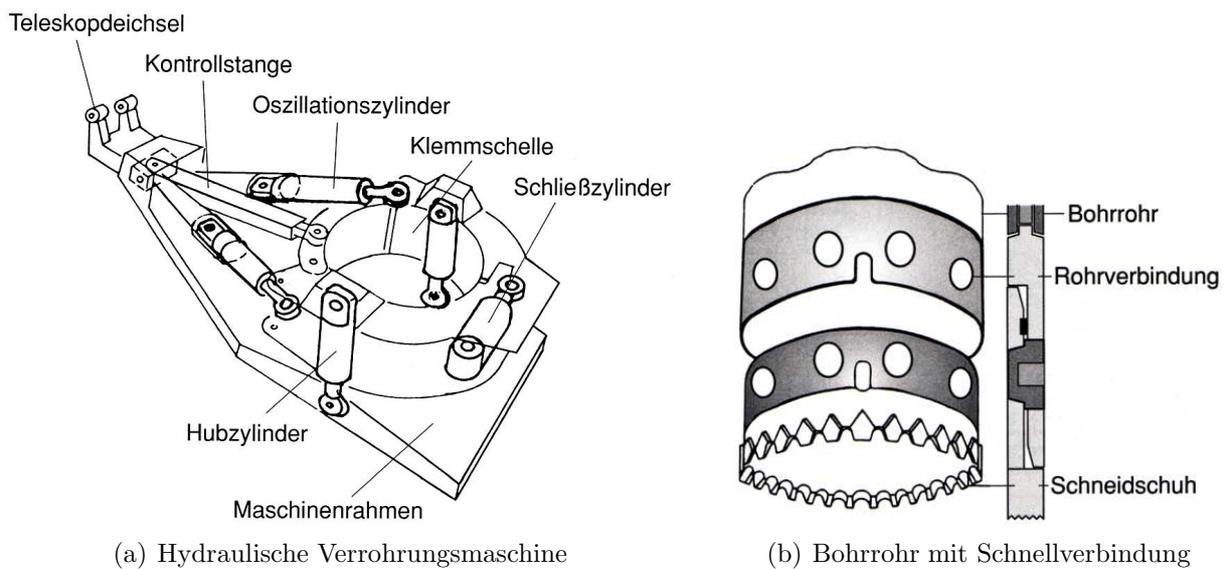


Abb. 3.8: Verrohrung und Verrohrungsmaschine bei der Bohrpfahlherstellung [43]

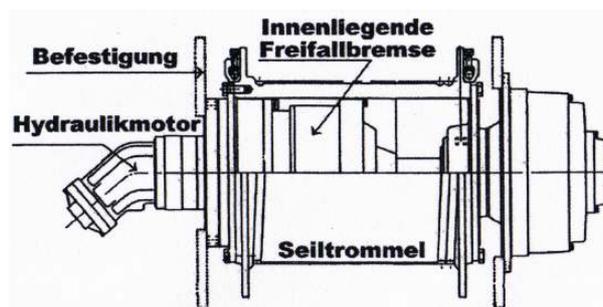


Abb. 3.9: Schematische Darstellung einer Freifallwinde mit hydraulischem Antrieb [6]

verfügen. Das schnelle Absenken der Last wird hier durch ein hydraulisches Öffnen der federkraftgeschlossenen Freifallbremse gesteuert. Die Senkgeschwindigkeit kann durch das Zusammenwirken des konstanten Förderstromes der Versorgungspumpe, Mengenregler und Meßpumpe geregelt werden und ist stufenlos einstellbar. Durch teilweises Öffnen der Bremse kann somit eine kontrollierte Senkgeschwindigkeit bzw. durch Schließen ein schnelles Abbremsen großer Lasten erzielt werden. Durch eine Erweiterung der Freifallsteuerung kann die Meßpumpe für den hydraulischen Förderstrom außer Kraft gesetzt werden. Die Seilgeschwindigkeit steigt dann ohne Kontrolle an (unkontrollierter Freifall bzw. Notfreifall, [7] u. [53]).

4 Methodenwahl und -beschreibung

4.1 Vorgangsweise

Für die grundlegende Untersuchung der Fallbewegung des Meißels muß zunächst geklärt werden, welche Kräfte am System wirksam sind. Dazu wird der Aufbau Bagger - Meißel - verrohrtes Bohrloch betrachtet und ein vereinfachter Systemansatz getroffen. Auf dieser Grundlage sollen analytische Modelle mit allgemeinen Variablen erstellt werden, welche später für jeden beliebigen Aufbau (Baggerausrüstung, Meißeltyp, etc.) verwendet werden können (siehe Kap. 5, Analytische Lösung der Fallbewegung). Die Beschreibung der Fallbewegung soll dabei für drei verschiedene Szenarien erstellt werden (siehe Abb. 4.1):

- Fallvorgang im trockenen Bohrloch (Szenario 1)
- Fallvorgang unter Wasser (mit Strömungswiderstand, Szenario 2)
- Fallvorgang für Modellversuche (ohne geräteseitige Widerstände, mit Strömungswiderstand, Szenario 3)

Die für die analytischen Modelle nötigen Eingangsparameter sind dann beispielsweise das Meißel- und Seilgewicht sowie die Widerstände an der Seilwinde und für den Fallvorgang unter Wasser außerdem der Strömungswiderstand. Sämtliche Reibungsvorgänge bleiben vorerst unberücksichtigt. Während einige der Parameter relativ einfach zu erfassen sind, ist vor allem der Strömungswiderstand des Meißels äußerst schwierig zu bestimmen. Hierfür bieten sich nur Groß- und Modellversuche, sowie numerische Strömungssimulationen an. Versuche sind jedoch meist mit erheblichem Aufwand verbunden und oftmals wird nur ein qualitativer Vergleich zwischen den Meißelvarianten für die Optimierung benötigt. Für diesen Zweck ist die Ermittlung der Strömungswiderstandsbeiwerte durch numerische Methoden geeignet, welche für die verschiedenen Varianten direkt gegenübergestellt werden (siehe Kap. 6, Numerische Strömungssimulationen).

In gleicher Weise werden in Kap. 5 auch Modelle für die Drehbewegung von entsprechend ausgerüsteten Meißeltypen (z.B. Flachmeißel mit Lenkblechen) beim Fallvorgang unter Wasser erstellt. Dazu wird das, zufolge der Umströmung auf den Meißel einwirkende,

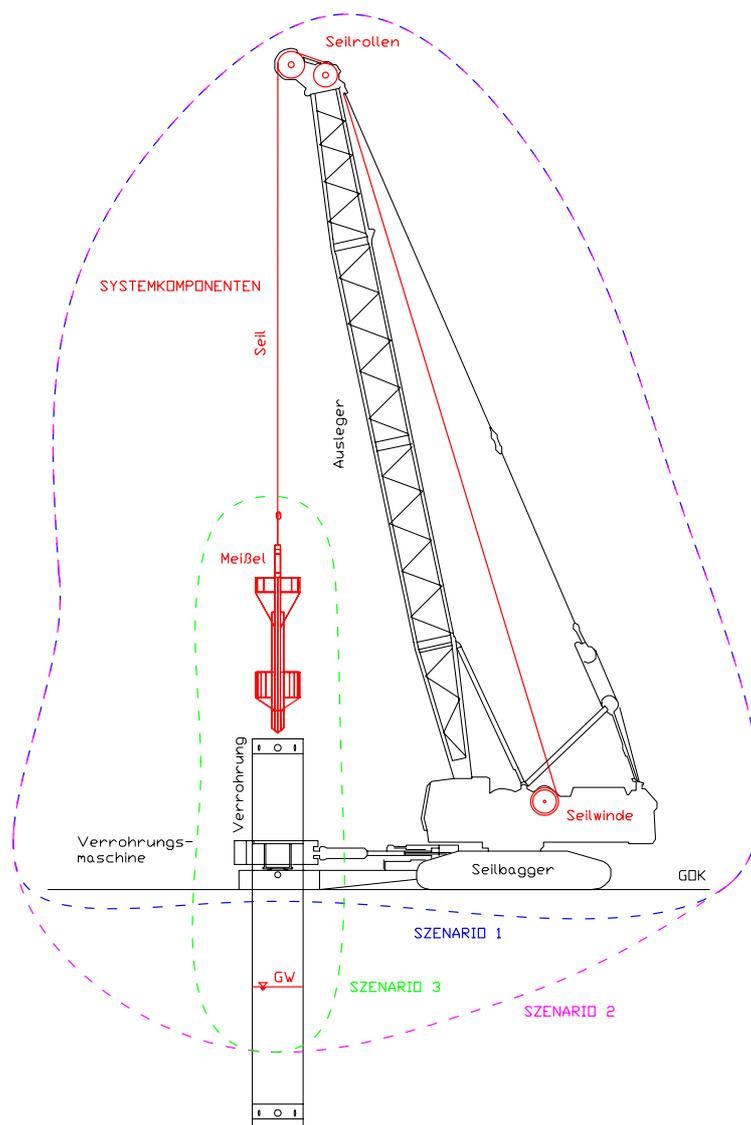


Abb. 4.1: Systemkomponenten für die Erstellung verschiedener analytischer Fallmodelle (Szenarien)

Drehmoment benötigt, welches gemeinsam mit dem Strömungswiderstand in der numerischen Simulation berechnet werden kann. Für die Beschreibung der Fall- und Drehbewegung ist daher in jedem Fall die genaue Kenntnis der Geometrie des Meißels notwendig, um ein dreidimensionales Meißelmodell für die numerische Berechnung erstellen und die entsprechenden Volumina und Trägheiten berechnen zu können.

Die ermittelten Modelle beruhen zunächst auf theoretischen Überlegungen und numerischen Berechnungen und müssen noch durch Versuche und Baustellenmessungen verifiziert bzw. adaptiert werden. Dazu wurden umfangreiche Modellversuche im Maßstab 1:7.4 durchgeführt und die Ergebnisse mit den analytischen Modellen verglichen. Die Versuche ermöglichen dabei vor allem den direkten Vergleich der Strömungswiderstände (numerisch

und im Modellversuch ermittelte Widerstände), weil durch den vereinfachten Kräfteansatz die Widerstände auf der Baggerseite entfallen (Szenario 3 in Abb. 4.1). Somit kann sowohl für die Fall- als auch für die Drehbewegung des Meißels ein sehr genauer Vergleich zwischen Theorie und Experiment vollzogen werden. Darüber hinaus konnten im Modellmaßstab weitere Optimierungen des Meißels getestet und Fallversuche auf die freie Wasseroberfläche durchgeführt werden (siehe Kap. 7, Modellversuche).

Es konnte außerdem eine Reihe von Großversuchen auf verschiedenen Baustellen durchgeführt werden, die in Kap. 8, Baustellenmessungen, beschrieben und ausgewertet sind. Dabei wurden unter anderem die Fallvorgänge bei den Meißelarbeiten mit den folgenden Methoden registriert und ebenso wie bei den Modellversuchen dem jeweiligen analytischen Modell gegenübergestellt:

- Zeitmessungen einzelner Fallsequenzen für verschiedene Fallhöhen durch mehrere Beobachter
- Bildgestütztes Meßverfahren zur Aufnahme der Fallbewegung mit geringer Bildfrequenz und manueller Auswertung
- Bildgestütztes Meßverfahren zur Aufnahme der Fallbewegung mit hoher Bildfrequenz und manueller/automatischer Auswertung
- Beschleunigungsmessungen am Meißel

Die Zeitmessungen für verschiedene Fallhöhen wurden visuell (Startzeitpunkt) und akustisch bzw. durch die spürbare Erschütterung beim Aufschlag (Endzeitpunkt) von mehreren Beobachtern durchgeführt und dienten bei den ersten Versuchen zur Abschätzung des Fallmodells (siehe Kap. 8, Baustellenmessungen). Auf Basis dieser Daten wurde danach ein bildgestütztes Meßverfahren zur Aufnahme der Fallbewegung aufgebaut ("Photogrammetrisches Meßverfahren"), welches im Zuge der Messungen ständig verbessert und anfangs manuell, später automatisch, ausgewertet wurde. Dieses Verfahren hat sich bestens bewährt und konnte in ähnlicher Weise auch für die Modellversuche übernommen werden. Die Funktionsweise und Auswertung ist in einem eigenen Abschnitt 4.2 eingehend beschrieben.

Bisher wurden Methoden zur Untersuchung und Optimierung der Fallbewegung bzw. -geschwindigkeit und der Drehbewegung des Meißels beschrieben. Diese fokussieren dabei stets auf die Bewegung des Meißels bis zum Auftreffen auf die Bohrlochsohle. Die optimale Meißelleistung ist jedoch nicht nur durch die Optimierung des einzelnen Schlages zu erreichen, sondern muß in Interaktion mit dem anstehenden Boden bzw. Fels und dem Lösefortschritt betrachtet werden (vgl. Kap. 2, Problemstellung). Dazu wurde ein zusätzliches Meßsystem zur Registrierung der Beschleunigungen direkt am Meißel und an der

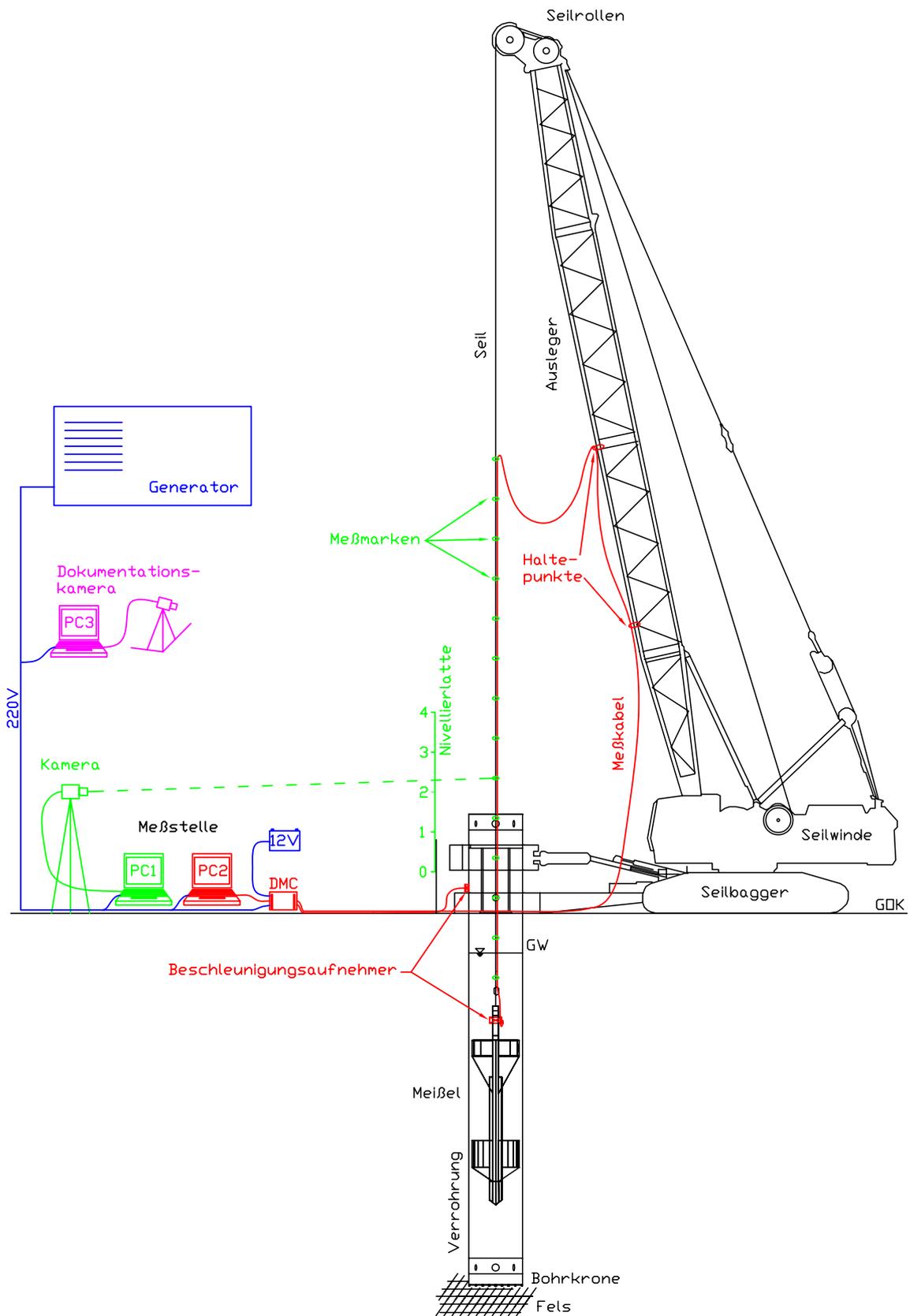


Abb. 4.2: Darstellung der einzelnen Komponenten des Meßkonzeptes bei der Baustellenmessung

überstehenden Verrohrung angebracht. Die Beschleunigungen am Meißel können direkt als Maß für die induzierte Schlagkraft verwendet werden. Die Meßwerte an der Verrohrung sollen hingegen indirekt, als qualitatives Maß, für die Entwicklung der Schlagkraft dienen. Durch die Meßwertaufzeichnung während der Schlagvorgänge soll somit der optimale Werkzeugeinsatz und -wechsel (von Meißel auf Bohrgreifer) bestimmt werden.

Die Meßdaten des Aufnehmers am Meißel können in Kombination mit dem Zeitkanal außerdem zur Überprüfung der Fallzeiten verwendet werden. Darüber hinaus stellen sie ein Maß zur indirekten Boden/Felserkundung dar.

Um den Bohrfortschritt lückenlos aufzeichnen zu können, wurde eine eigene "Dokumentationskamera" (handelsübliche Webcam) installiert, die den gesamten Arbeitsablauf während der Messung aufzeichnet. Diese mußte lediglich an einer geeigneten Übersichtsposition installiert und zu Beginn gestartet werden. Dies hat den Vorteil, daß man sich während der Meßtätigkeit gänzlich der Fallbewegungs- und Beschleunigungsmessung widmen kann und die Protokolltätigkeit großteils entfällt. Außerdem ermöglicht das Dokumentationsvideo eine nachträgliche Prüfung des Arbeits- und Meßablaufes, falls in den Meßergebnissen Unklarheiten bestehen (z.B. tatsächliche Anzahl der Meißel- und Greiferspiele). In Abb. 4.2 ist eine komplette Übersicht des Meßkonzeptes für die Baustellenmessungen angegeben. Der Aufbau und die Funktionsweise der einzelnen Komponenten des Meßsystems ist detailliert in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

4.2 Photogrammetrisches Meßverfahren

4.2.1 Aufbau und Funktionsweise

Wie bereits einführend beschrieben, konnte zur Registrierung der Fallbewegung des Meißels ein bildgestütztes Meßsystem ("Photogrammetrie") verwendet werden. Unter Photogrammetrie ist die Aufnahme und Auswertung von Meßbildern zur Form- und Lagebestimmung beliebiger Objekte zu verstehen. Durch die fotografisch festgehaltenen Bilder handelt es sich um ein berührungsloses Meßverfahren. Unter "digitaler Photogrammetrie" ist weiters die Erfassung von Bildern mit elektronischen Mitteln (digitale Bilder) und anschließender rechnergestützter Auswertung zu verstehen [26]. Dieses Verfahren kam im gegenständlichen Projekt zur Anwendung, um die Fallbewegung des Meißels aufzuzeichnen.

Eine direkte Messung am Meißel scheidet aufgrund des Falles in der (wassergefüllten) Verrohrung aus. Eine Messung der Seilgeschwindigkeit an der Winde berücksichtigt hin-

gegen nicht die Bewegungen des Auslegers und läßt außerdem den Aufprall des Meißels nur verzögert erkennen. Daher wird die Fallbewegung des Hubseiles aufgezeichnet, welches aufgrund der geräteseitigen Trägheiten beim Seilabtrieb gespannt bleibt und daher relativ genau die Bewegung des Meißels bis zum Auftreffen auf der Bohrlochsohle wiedergibt (Die Seildehnung wird aufgrund der geringen Seilkraft beim Fallvorgang vernachlässigt). Dazu muß allerdings die Bewegung des Seiles deutlich sichtbar sein, weshalb die Anbringung geeigneter Meßmarkierungen entlang des Hubseiles erforderlich ist (z.B. in 1.0 m-Abständen). Diese wurden bei der ersten Messung mit Signalspray und später mit Signalbändern hergestellt. Bei der gleichzeitigen Messung der Beschleunigungen am Meißel kann das Meßkabel mit Seilklemmen in 1.0 m-Abständen festgeklemmt werden, welche als Meßmarkierungen dienen (siehe Abb. 4.3).



(a) Herstellen der Seilmarkierungen, Nivellierlatte im Vordergrund

(b) Signalband

(c) Seilklemme mit Meßkabel

Abb. 4.3: Seilmarkierungen für das bildgestützte Meßverfahren

Die Aufnahmekamera wird in Abhängigkeit von den örtlichen Baustellenverhältnissen in geeigneter Entfernung vom Pfahl (meist ca. 10 m) platziert und auf einen Bereich knapp oberhalb der Verrohrung fokussiert (siehe Abb. 4.4 und 4.6). Diese Entfernung ist meistens aufgrund der örtlichen Baustellengegebenheiten notwendig und soll außerdem einen möglichst erschütterungsarmen, gesicherten Standort der Kamera gewährleisten. Für die Dauer eines Meßablaufes darf die Position der Kamera nicht mehr verändert werden. Es empfiehlt sich, den Bildbereich auf einen Ausschnitt knapp überhalb der Verrohrung einzustellen, sodaß die Verrohrung gerade noch am unteren Rand zu sehen ist. Während des Fallvorganges bewegen sich die Seilmarkierungen somit vertikal durch den festgelegten Bildbereich und der Bewegungsablauf läßt sich mit einer schnellen Abfolge von Einzelbil-



Abb. 4.4: Blick von der Meßkamera auf die Pfahlbohrung

dern festhalten. Mit einer Einstellung der Bildhöhe auf ca. 1.2 - 1.5 m ist immer mindestens eine Meßmarkierung für eine lückenlose Auswertung sichtbar. Die Bildhöhe muß jedoch auch so klein wie möglich gehalten werden, sodaß eine maximale, vertikale Bildauflösung zur Verfügung steht. Dies gewährleistet später eine präzise Auswertung des Bewegungsablaufes. Die Bewegung ist damit allerdings nur in den Bildkoordinaten der Einzelbildfolge bekannt. Um den tatsächlichen Bewegungsablauf der Meßmarken ermitteln zu können, wird in knapper Entfernung vor der Verrohrung eine Nivellierlatte lotrecht positioniert. Diese dient als Referenz für die Meßmarkierungen und muß daher in der Abfolge von Einzelbildern sichtbar sein. Die Seilmarkierung im Einzelbild kann damit auf die Nivellierlatte bezogen und anhand des Strahlensatzes die absolute Höhenlage ermittelt werden (siehe Abb. 4.5, 4.6 und Gl. 4.1).

$$H_{0m} : h_{0m} = l_{sk} : l_{mk} \quad (4.1)$$

$$H_{0m} = \underbrace{h_{0m}}_{\text{Ablesung}} \cdot \underbrace{\frac{l_{sk}}{l_{mk}}}_{\text{Position}} \quad (4.2)$$

Über die absolute Höhenposition der Markierung in zwei aufeinanderfolgenden Bildern kann damit die Verschiebung δz in m/Bild berechnet werden. Ist darüber hinaus die Bildfrequenz f_r ("framerate" in Bilder/s) bei der Aufnahme bekannt, kann die Geschwindigkeit der Meßmarke zum Aufnahmezeitpunkt t berechnet werden (siehe Gl. 4.4). Für eine Bildfolge vom Startzeitpunkt des Fallvorganges bis zum Auftreffen des Meißels an der Bohrlochsohle läßt sich damit ein kompletter Geschwindigkeitsverlauf für einen Fall-

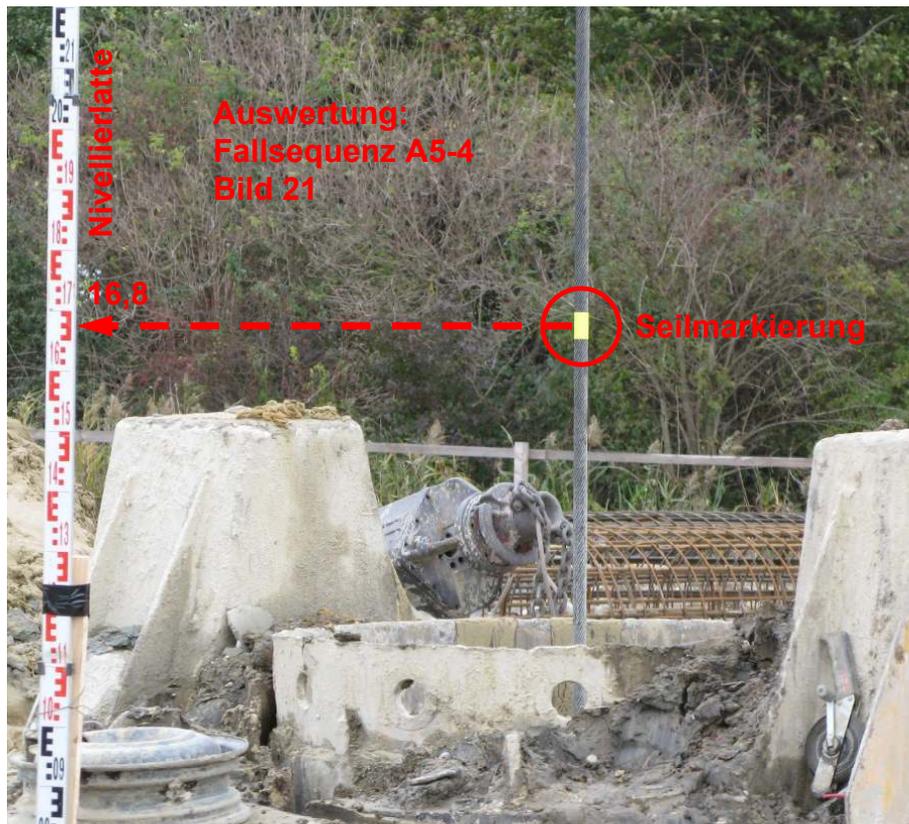


Abb. 4.5: Referenz der Seilmarkierung auf die Nivellierlatte (exemplarisch)

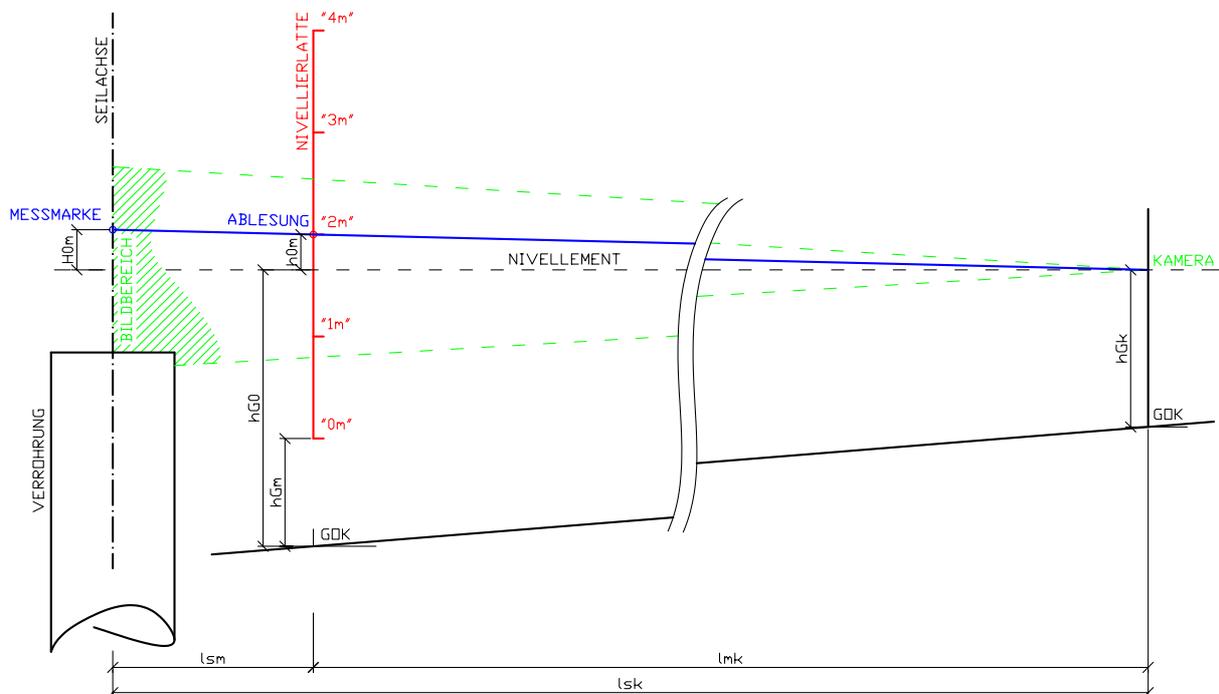


Abb. 4.6: Aufstellungsskizze für das photogrammetrische Meßverfahren

vorgang erstellen.

$$\delta z = H_{0m}^n - H_{0m}^{n+1} \quad (4.3)$$

$$v(t) = \delta z \cdot fr \quad (4.4)$$

Die eben beschriebene Auswertung der Fallsequenz kann dabei durch eine

- manuelle Auswertung der Einzelbilder (Abb. 4.5) oder durch eine
- rechnergestützte automatische Auswertung

erfolgen. Für die manuelle Auswertung ist es dabei nicht erforderlich, jedes Bild der Abfolge auszuwerten. So lassen sich bereits sehr gute Ergebnisse erzielen, wenn jede einzelne Seilmarkierung während der Fallsequenz nur einmal auf die Nivellierlatte referenziert wird. Über eine Fallhöhe von 15 m würde man dann fünfzehn Meßpunkte für die Geschwindigkeitskurve erhalten, womit sich deren Verlauf bereits ausreichend gut beschreiben läßt.

Die manuelle Auswertung erfordert jedoch viel Zeit, weil die Seilmarkierungen immer wieder auf die Nivellierlatte referenziert werden müssen und das Ergebnis samt Bildnummer in einer Tabelle eingetragen werden muß (siehe Abb. 4.5). Eine Auswertung mehrerer Fallsequenzen ist folglich schnell mit erheblichem Aufwand verbunden. Eine Möglichkeit das manuelle Auswerteverfahren etwas zu beschleunigen, ist das Hinzufügen eines geeigneten Rasters zu allen Bildern einer Abfolge. Dieser Raster muß der Strichteilung der Nivellierlatte entsprechen (siehe Abb. 4.7) und läßt sich nach einmaliger Festlegung der Gitterabstände sehr rasch über alle Einzelbilder legen. Somit kann die Position der Seilmarkierungen in einem geeigneten Einzelbild schneller abgelesen werden. Das Auswerteverfahren kann bei entsprechender Vorbereitung jedoch mit einer automatischen, rechnergestützten Auswertung erfolgen und damit der Auswerteprozess erheblich verkürzt werden. Dies ist in Abschnitt 4.2.3 detailliert beschrieben.

4.2.2 Meßkamera

Für die photogrammetrische Messung bewegter Objekte eignen sich Kameras, die eine Mindestabfolge von Einzelbildern in einem gewissen Zeitraum aufzeichnen können. Dies kann teilweise bereits mit herkömmlichen Videokameras oder mit speziellen Industriekameras erfolgen. Für ein korrektes Meßergebnis müssen dabei jedoch folgende Punkte beachtet werden (in Anlehnung an [27]):

- Exakte, konstant gehaltene Bildfrequenz während der Meßdauer
- Abstimmung der Bildfrequenz an die Bewegungsgeschwindigkeit



Abb. 4.7: Hinzufügen eines Rasters zu den Einzelbildern für die manuelle Auswertung

- Speicherung bzw. Verarbeitung der anfallenden Datenmenge

Ein exakter "Zeitstempel" ist Voraussetzung für ein korrektes Meßergebnis. Aus diesem Grund ist es erforderlich, daß nur Kameras verwendet werden, die eine konstante Bildfrequenz bei der Aufnahme einhalten. Dies ist gegebenenfalls vor dem Meßeinsatz zu überprüfen. Die Bildfrequenz muß ausreichend hoch gewählt werden, sodaß der Bewegungsablauf genau aufgezeichnet werden kann. Bei einer geschätzten, maximalen Seilgeschwindigkeit von $v_{max} = 10 \text{ m/s}$ und einer gewählten Bildhöhe von $h_B = 1.5 \text{ m}$ benötigt die Meßmarkierung eine Zeit von 0.15 s, um die Bildhöhe zu durchfahren. Will man diese Markierung etwa zehnmal in einer Einzelbildabfolge erfassen, so müßte die Bildfrequenz der Kamera auf etwa 67 Bilder pro Sekunde eingestellt werden:

$$fr = \frac{1}{\frac{h_B}{v_{max}}} \cdot 10 = \frac{1}{\frac{1.5}{10}} \cdot 10 \approx 67 \text{ Bilder/s} \quad (4.5)$$

Die hohe Bildfrequenz ist aber nicht nur erforderlich, um die Bewegung ausreichend genau aufzuzeichnen, sondern auch um die Bewegungsunschärfe der Meßmarken gering zu halten (Belichtungszeit und Bildfrequenz sind indirekt proportional zueinander). Bei einigen Kameras kann dies auch mit einer unabhängigen Einstellung der Belichtungszeit erfolgen.



(a) Kammartige Effekte

(b) Verschiebung der Seilmarkierung

Abb. 4.8: Eintretende Effekte durch die Kombination zweier Halbbilder beim Zeilensprungverfahren

Die Baustellenmessungen in Kap. 8 wurden als Test zunächst mit einer handelsüblichen **DV-Kamera** durchgeführt, welche Bildmaterial in einer Auflösung von 720x576 Pixel mit einer Frequenz von 50 Halbbildern pro Sekunde aufzeichnet (sog. Zeilensprungverfahren). Beim Zeilensprungverfahren werden abwechselnd immer nur die geraden und ungeraden Zeilen übertragen (Halbbilder) und dadurch eine Reduktion des Flimmerns und der zeitlichen Auflösung erzielt. Für die digitale Bildverarbeitung müssen die beiden Halbbilder wieder zu einem Vollbild zusammengesetzt werden, wodurch eine Rate von 25 Bildern pro Sekunde erhalten wird (außer mit speziellen Deinterlacing Methoden, die beispielsweise die fehlenden Zeilen interpolieren). Diese Vorgangsweise kann zu verschiedenen Effekten führen, weil die Halbbilder einen unterschiedlichen Zeitindex besitzen. Besonders auffallend sind kammartige Effekte, welche auftreten, wenn Bewegungen zwischen den Halbbildern stattfinden ([41] u. [49]). In Abb. 4.8a ist dies zum Beispiel durch eine horizontale Bewegung des Seiles entstanden. Schnelle horizontale Bewegungen des Seiles ergeben sich jedoch meist erst nach dem Aufprall des Meißels beim Nachlauf des Seiles und beeinflussen daher die Auswertung der Fallbewegung nur in geringem Maße.

Ein weiterer Effekt ist die "Verdoppelung" der Seilmarkierung im Einzelbild, nachdem diese sich zwischen zwei Halbbildern bereits weiterbewegt hat. Dadurch wird die Seilmarke

mit einem normalen Seilabschnitt überlagert und die Sichtbarkeit der Meßmarken beeinträchtigt. Für die Auswertung der Position der Seilmarke muß dann der obere und untere Rand der Markierung auf die Nivellierlatte übertragen und der Mittelwert beider Ableisungen berechnet werden (siehe Abb. 4.8b). Obwohl das Zeilensprungverfahren für diese Art der Bewegungsmessung wenig geeignet erscheint, konnten bei der Auswertung doch bereits gute Meßergebnisse erzielt werden (siehe Ergebnisse in Kap. 8). Mit Hilfe spezieller Schnittprogramme ließe sich das Videomaterial durch spezielle Deinterlacing Methoden noch verbessern und die oben beschriebenen Effekte verringern. Für eine rechnergestützte Auswertung, wie sie im nachfolgenden beschrieben wird, scheidet diese Aufzeichnung jedoch aufgrund der Qualitätseinbuße durch das Zeilensprungverfahren und vor allem durch die zu geringe Bildfrequenz aus.

Für die weiteren Messungen wurde daher eine **Industriekamera** mit CMOS Sensor und USB-Schnittstelle für den Anschluß an einen Aufnahmecomputer eingesetzt. Diese Kamera kann Farbbilder in einer Bildgröße von 752x480 Pixel mit einer Frequenz von bis zu 87 Bildern/s bei voller Auflösung aufzeichnen. Während die Auflösung in etwa jener der herkömmlichen DV-Kamera entspricht, kann mit dieser Kamera eine wesentlich höhere Bildrate aufgenommen werden, die deutlich über der in Gl. 4.5 abgeschätzten Bildrate von 67 Bildern/s liegt. Dabei erfolgt die Bildaufnahme nach dem Global-Shutter Prinzip, welches sich besonders für die verzerrungsfreie Wiedergabe von bewegten Objekten eignet. Bei diesem Verfahren erfolgt das Rücksetzen und die anschließende Belichtung aller Sensorzeilen gleichzeitig, das Auslesen der Zeilen erfolgt danach separat. Die Funktionsweise ist in Abb. 4.9 anhand eines bewegten Objektes dargestellt [23].

Die Kamera besitzt ein besonders robustes Metallgehäuse, welches die Schutzarten IP65/67¹ erfüllt und damit besonders für den Baustelleneinsatz geeignet ist. In Kombination mit einem manuellen Zoomobjektiv kann der Bildausschnitt auch bei unterschiedlichen Entfernungen von der Verrohrung passend eingestellt werden. Dabei verfügt das Aufnahmebild über eine definierte Breite und Höhe, die durch den Kamerasensor vorgegeben sind (752x480 Pixel). Für die Auswertung des Fallvorganges ist unter Umständen jedoch nur ein Teilbereich der Bilder erforderlich (Seilmarkierung und Nivellierlatte müssen sichtbar sein). Die Kamera bietet hierfür eine spezielle Funktion (Area of Interest "AOI") an, mit der nur ein relevanter Teilbereich des Sensors definiert und ausgelesen wird [23]. Dadurch kann sich die Menge an zu übertragenden Daten erheblich reduzieren und die Bildfrequenz weiter erhöht werden (siehe Abb. 4.10).

Insbesondere ist dies zur Verringerung der Datenübertragung zum Computer nützlich, da dieser während der Messung die gesamte Aufnahmesequenz ohne Datenverlust über die

¹IP: International Protection; Gibt die Art des Berührungsschutzes und Wasserschutzes an [25]

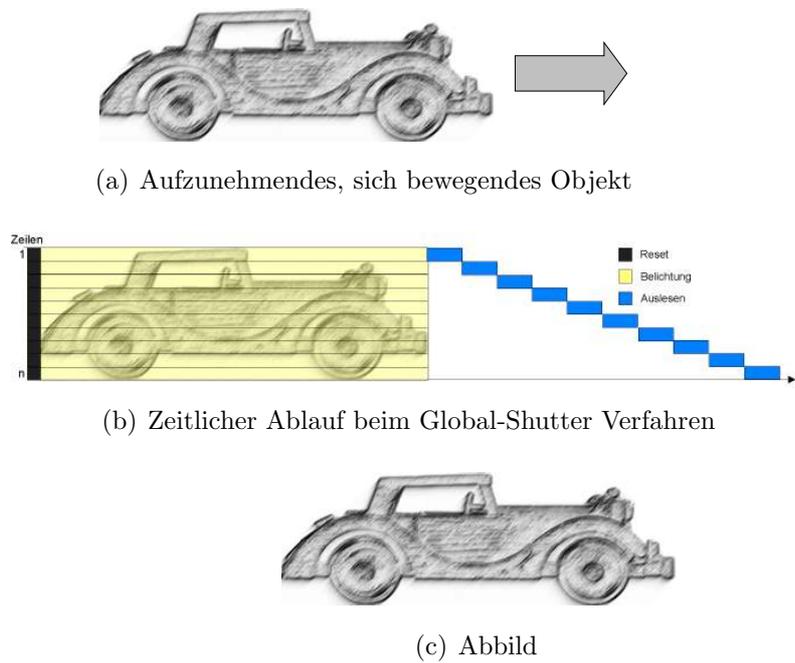


Abb. 4.9: Funktionsweise des Global-Shutter Verfahrens [23]

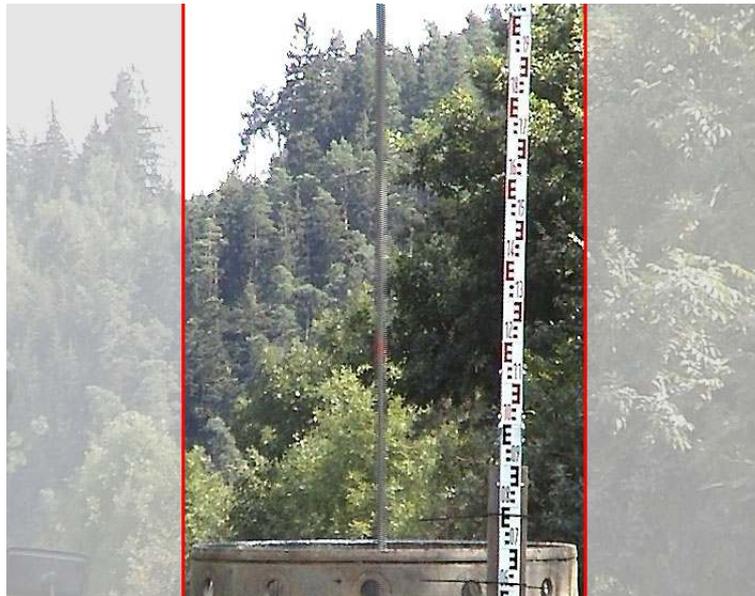


Abb. 4.10: Einschränkung des Bildbereiches auf den relevanten Teil (AOI-Funktion)

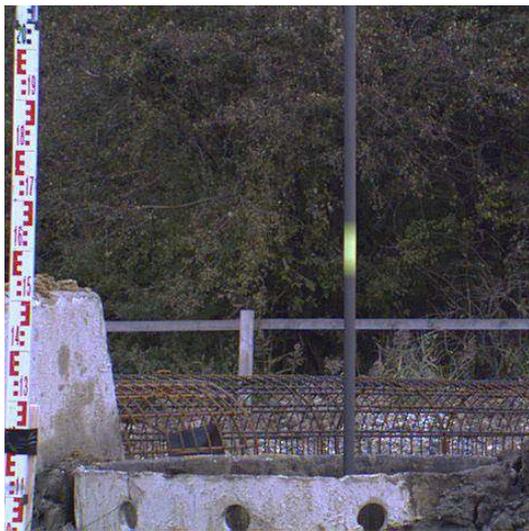
USB-Schnittstelle aufnehmen muß. Die Aufnahme ist dann am Computer als Videodatei oder in Einzelbildern speicherbar. Im Meßeinsatz hat sich die Speicherung von mehreren Fallsequenzen in einer Videodatei (AVI-Format) bewährt, die in der späteren Auswertung wieder in Einzelbilder konvertiert wird.

4.2.3 Rechnergestützte Auswertung

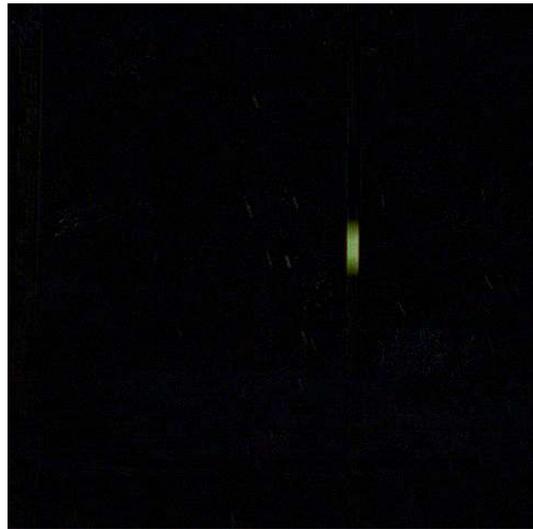
Für die rechnergestützte Auswertung wurde das Softwareprogramm Matlab des Unternehmens The MathWorks, Inc. verwendet, weil dieses neben der Funktionalität zur Lösung mathematischer Probleme auch umfangreiche Statistik und Bildverarbeitungsfunktionen zur Verfügung stellt. Somit konnte beinahe die komplette photogrammetrische Auswertung mit einem einzigen Softwareprogramm durchgeführt werden.

In einer Abfolge von Einzelbildern ist die Bewegung der Seilmarkierung deutlich erkennbar. Der restliche Bildinhalt bzw. -hintergrund bleibt zwischen zwei Einzelbildern relativ unverändert, da ansonsten keine schnellen Bewegungen stattfinden und außerdem die Aufnahmefrequenz entsprechend hoch gewählt ist. Aufgrund der beinahe vollständigen Übereinstimmung des restlichen Bildes kann eine pixelweise Subtraktion von zwei kurz aufeinanderfolgenden Bildern vorgenommen werden, um die "statischen" Bildinhalte zu entfernen. Dieses Differenzbild ist zunächst fast vollständig schwarz und muß daher in ein Komplementärbild verwandelt werden, in dem die Seilmarkierung deutlich zu erkennen ist. In der weiteren Bearbeitung wird ein Binärbild (schwarz/weiß) erstellt, wobei ein geeigneter Helligkeitsgrenzwert für die Umwandlung zu definieren ist. Im Binärbild werden sodann noch Einzelpixel nach statistischen Kriterien entfernt und Löcher in zusammenhängenden Bildbereichen geschlossen. Diese Vorbereitungs- und Umwandlungsphase ist für alle Einzelbilder notwendig, um die Bilder von störenden Inhalten zu säubern und die Binärdateien einer Seilmarkenerkennung zuführen zu können (siehe Abb. 4.11).

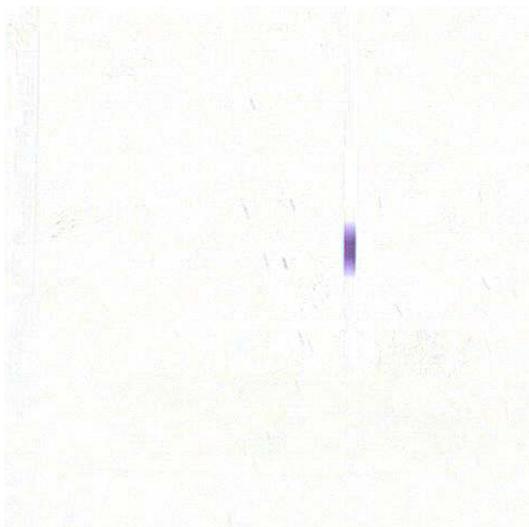
Im nächsten Schritt kann die Erkennung der Bildobjekte durchgeführt werden. Das Auffinden von geometrischen Objekten hängt dabei vom eingesetzten Konnektivitätskriterium ab und beeinflusst das Ergebnis maßgeblich. In der digitalen Bildverarbeitung sind sogenannte 4er- und 8er-Nachbarschaften gebräuchlich, die für die Konnektivität von Objekten herangezogen werden (siehe Abb. 4.13). Dabei hat das Pixel P in der 4er-Nachbarschaft zwei vertikale und zwei horizontale Nachbarn, welche sich jeweils eine Pixelkante mit P teilen. In der 8er-Nachbarschaft hat das Pixel darüber hinaus vier diagonale Nachbarn. Alle Pixel um P, welche die Konnektivität nach einem der beiden Kriterien erfüllen (4N oder 8N), werden somit demselben geometrischen Objekt wie P zugeordnet [26].



(a) Originalbild



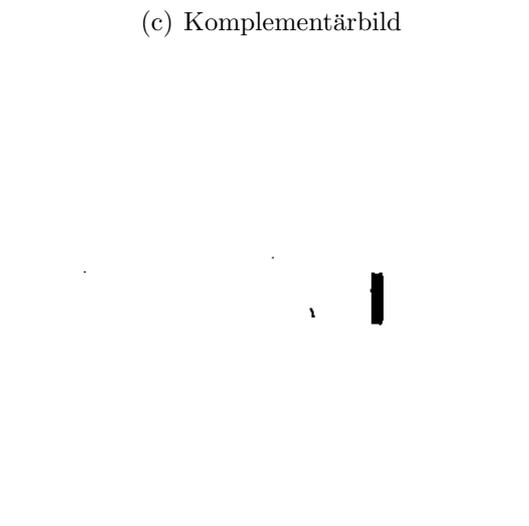
(b) Differenzbild



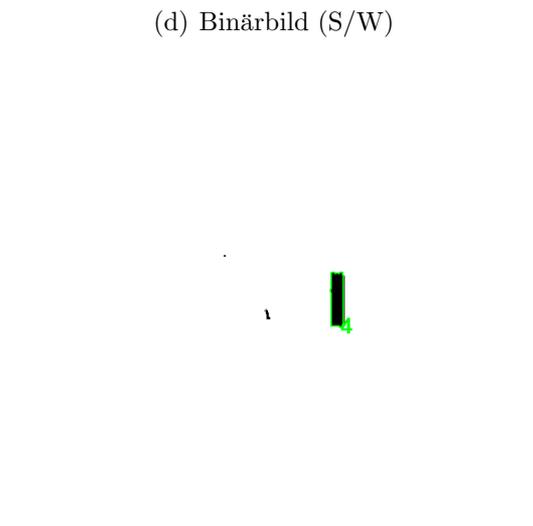
(c) Komplementärbild



(d) Binärbild (S/W)



(e) Verbessertes Binärbild



(f) Seilmarkenerkennung

Abb. 4.11: Bildabfolge bei der rechnergestützten, automatischen Auswertung

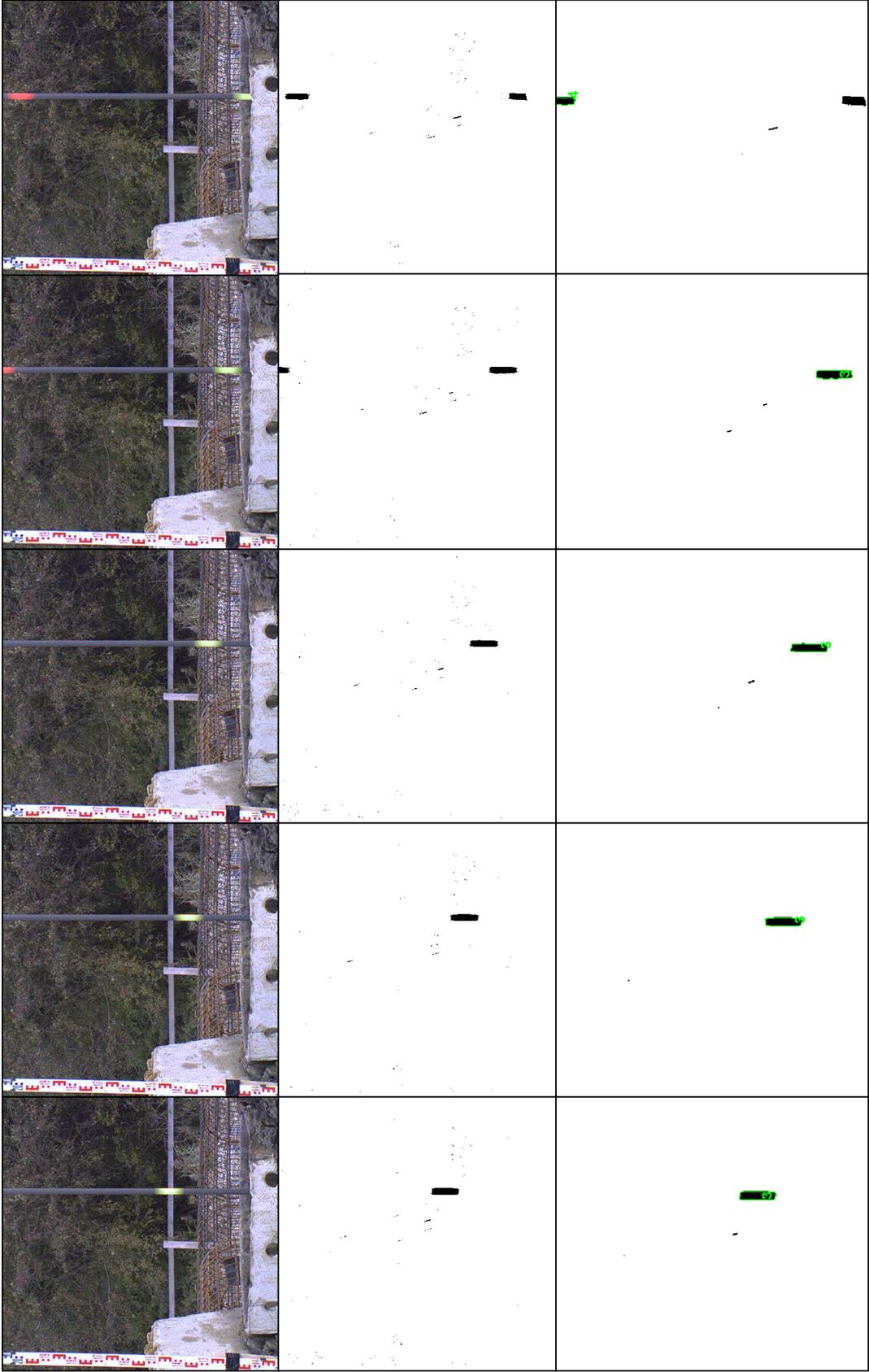


Abb. 4.12: Beispiel der automatischen Auswertung einer Fallsequenz mit Seilmarkenerkennung
1.Reihe: Originalbilder, 2.Reihe: Binärbilder, 3.Reihe: Seilmarkenerkennung in den verbesserten Binärbildern

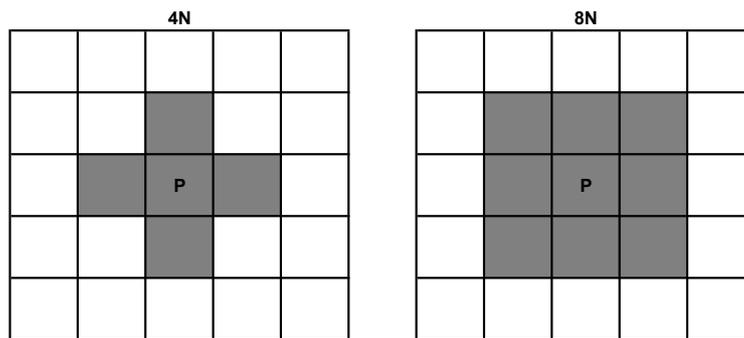


Abb. 4.13: 4er- und 8er-Nachbarschaft um Pixel P

Um eine durchgängige Erkennung der gesamten Seilmarkierung als ein Objekt garantieren zu können, wurde für die gegenständliche Auswertung immer die 8er-Konnektivität gewählt. Nach diesem Kriterium lassen sich dann für jedes Einzelbild alle Objekte im Bildbereich registrieren. Meist werden mehrere Objekte gefunden und es ist daher notwendig die Seilmarke mit weiteren, geometrischen Kriterien herauszufiltern. Dies erfolgt anhand der Objekteigenschaften, die durch folgende Parameter bestimmt werden können (vgl. auch [28]):

- Bildposition (Schwerpunkt des Objektes)
- Abmessungen der Haupt- und Nebenachsen
- Flächeninhalt
- Neigung zwischen Hauptachse und x-Achse (nur für die Auswertung der Modellversuche verwendet)
- Flächenverhältnis (Anteil des Objektflächeninhaltes am Flächeninhalt eines umfassenden Rechteckes (Bounding Box), siehe Abb. 4.14)

Diese Parameter müssen zumindest einmal an die Bildserien der jeweiligen Baustellenmessung angepaßt werden. Vor allem die Bildposition in horizontaler Richtung, sowie die Abmessung und der Flächeninhalt der Markierung hängen vom Bildausschnitt der Kamera und der Größe der Seilmarkierung ab. Das Verhältnis des Flächeninhaltes des Objektes zum umfassenden Rechteck ist eine dimensionslose Variable, die als Qualitätskriterium anzusehen ist. Damit können qualitativ schlechte Markierungen aussortiert werden (siehe Abb. 4.14). In der automatischen Auswertung wird letztlich nur jenes Objekt weiterverarbeitet, welches die anhand der obigen Parameter definierten Kriterien am besten erfüllt. Weil die Kriterien exakt an die Eigenschaften der Seilmarken angepaßt sind, erreicht man eine sehr hohe Trefferquote in der Seilmarkenerkennung. Pro Einzelbild wird somit maximal ein geometrisches Objekt erhalten, dessen Eigenschaften in einer Ergebnisdatei

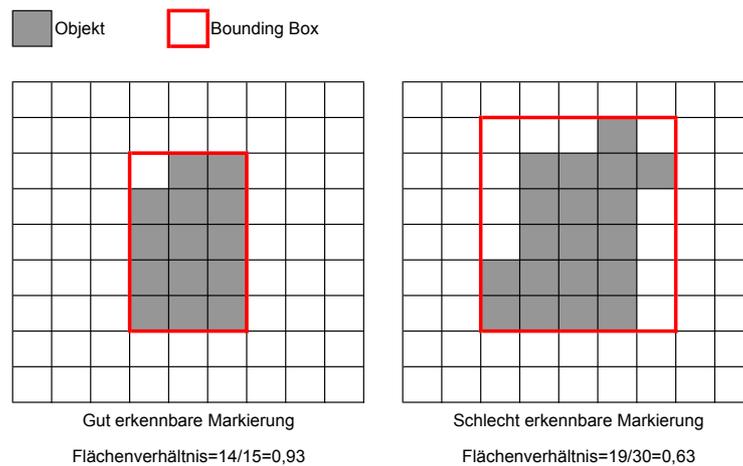


Abb. 4.14: Qualitätskriterium für gut und schlecht erkennbare Markierungen

frame	time	PosX (Px)	PosY (Px)	area	extent	level	displ	vel
108	0.34198	312.41	229.81	317	0.81074	15.873	0.20116	1.5882
110	0.36732	312.41	247.34	356	0.80543	15.489	0.44417	1.7534
111	0.37998	312.45	256.76	375	0.81699	15.283	0.23858	1.8836
121	0.50664	312.16	367.69	439	0.80699	12.857	2.8105	2.2189
125	0.55731	290.91	420.29	328	0.82	11.706	1.3325	2.6301
138	0.72197	303.89	83.991	334	0.80288	19.063	1.7883	3.5298

Tab. 4.1: Ausschnitt einer automatisch erstellten Ergebnisdatei

gespeichert werden. Für eine ausgewertete Fallsequenz erhält man dann beispielsweise ein Ergebnis wie in Tab. 4.1 angegeben.

In der Ergebnisdatei bedeuten:

- frame = Einzelbildnummer der ausgewerteten Bildserie
- time = Zeit ab Einzelbildnummer 1
- PosX / PosY = Koordinaten des Objektschwerpunktes in Pixel von der oberen, linken Ecke des Bildes
- area = Objektfläche
- extent = Anteil des Flächeninhaltes am Flächeninhalt eines umfassenden Rechteckes
- level = Höhenlage des Objektschwerpunktes auf die Nivellierlatte bezogen
- displ = absolute Distanz zwischen den Schwerpunkten von zwei aufeinander registrierten Markierungen (berechnet sich aus level und Aufstellung)
- vel = Geschwindigkeit der Markierung (durch displ und time berechnet)

In Tab. 4.1 läßt sich erkennen, daß in einigen Einzelbildern der Fallsequenz keine Markierung gefunden wurde (z.B. zwischen frame 111 und 121). Dies ist jedoch für die Gesamtauswertung unerheblich, wenn genügend Meßpunkte für die Beschreibung der Kurve gewonnen werden und diese ausreichend gut verteilt sind. Da in allen gegenständlichen, automatisch ausgewerteten Messungen die Bildfrequenz ausreichend groß ist, würde es beispielsweise völlig ausreichen, nur jedes zehnte Bild auszuwerten. Die Kriterien für die Objekteigenschaften können somit restriktiver gewählt werden, sodaß nur die qualitativ besten Markierungen in den Einzelbildern erhalten werden. Wird trotzdem eine fehlerhafte Markierung erkannt, so ist diese zumeist sofort in der Auswertung als Ausreißer erkennbar. In Abb. 4.15a ist der Geschwindigkeitsverlauf einer Fallsequenz exemplarisch dargestellt. In 296 Bildern der Fallbewegung konnten 113 Seilmarkierungen erkannt werden, wobei nur ca. sechs Punkte als Fehlmessungen zu betrachten sind. In mindestens jedem drittem Bild wird also durchschnittlich eine Meßmarkierung gefunden ($\approx 38\%$), wovon nur ca. 5% als fehlerhaft einzustufen sind und daher leicht ausgeschlossen werden können. Diese Vorgangsweise ist daher ausgezeichnet geeignet, um die vorhandenen Bilddaten automatisch auszuwerten. Sie liefert nicht nur eine Vielzahl an Auswertepunkten, welche mit einer manuellen Auswertung aus Zeitgründen gar nicht möglich wären, sondern stellt auch eine praktikable und präzise Methode dar. So können die Kriterien für unterschiedliche Fallsequenzen relativ rasch geändert und Ergebnisse ausgegeben werden. Dies wurde beispielsweise auch in Kap. 7 (Modellversuche) genutzt, indem das Auswerteverfahren an die dortigen Bedingungen angepasst wurde.

Nach der Auswertung kann eine Regressionsanalyse für die Meßpunkte mit einem passenden Fallgeschwindigkeitsmodell durchgeführt werden. Einzelne Ausreißer sind dabei auszuschließen und die Gleichung der Regressionskurve ist in Abstimmung mit den analytischen Modellen in Kap. 5 zu wählen. Anhand der Methode der geringsten Fehlerquadrate können die Koeffizienten der Kurve geschätzt und deren 95% Konfidenzintervalle berechnet werden. Die Güte des Regressionsmodells kann durch die Summe der Fehlerquadrate (SSE) und das Bestimmtheitsmaß R^2 bewertet werden. In einem Intervall von $0 \leq R^2 \leq 1$ beschreibt R^2 den Anteil der durch das Modell erklärten Varianz der Zielgröße (hier: Geschwindigkeit). Grundsätzlich gilt daher: Je kleiner die Summe der Fehlerquadrate und je größer das Bestimmtheitsmaß, desto besser kann die Zielgröße durch das Modell beschrieben werden (Güte des Regressionsmodells, siehe Gl. 4.6). Da das Bestimmtheitsmaß allerdings von der Stichprobengröße abhängig ist, muß für einen Vergleich zwischen Regressionsanalysen mit einer unterschiedlichen Anzahl von Punkten der korrigierte R^2 Wert (adjusted R^2) herangezogen werden [35].

$$SSE \rightarrow 0 \qquad R^2 \rightarrow 1 \qquad (4.6)$$

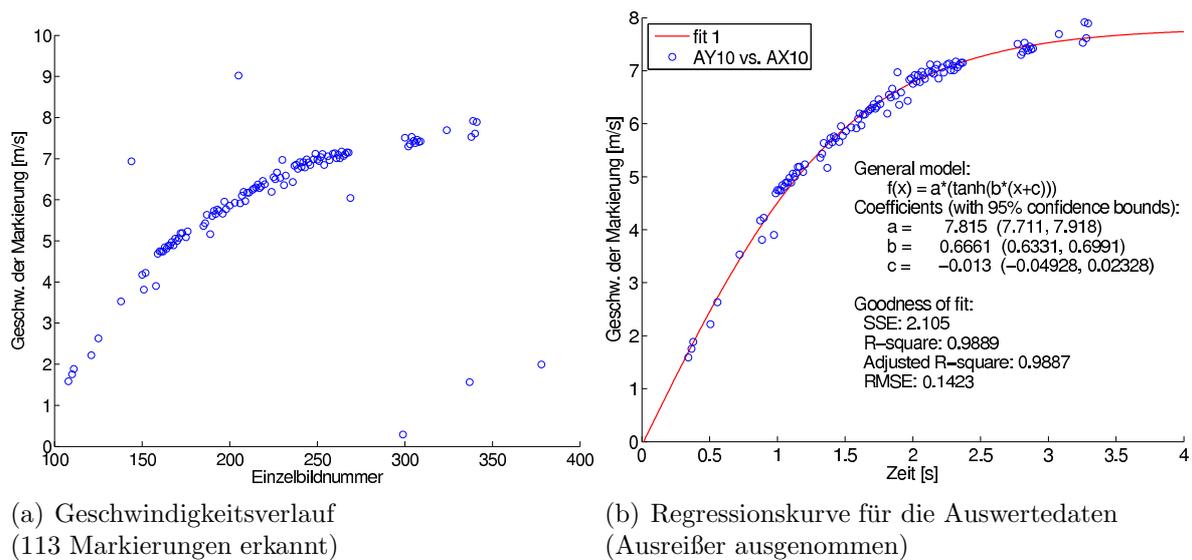


Abb. 4.15: Ergebnisse der Auswertung einer Fallsequenz und Regressionsanalyse

Mit dieser Vorgangsweise können sowohl für die automatisch als auch für die manuell ausgewerteten Fallsequenzen Regressionskurven erstellt und mit statistischen Methoden getestet werden. Über die oben beschriebene Güte der Modelle lassen sich sodann die zugrunde gelegten Annahmen aus den analytischen Gleichungen mit den experimentell bestimmten Ergebnissen überprüfen (siehe Abb. 4.15b).

4.3 Meßsystem zur Erfassung der Beschleunigungen

4.3.1 Funktionsweise und Systemaufbau

Für die Erfassung der Kräfte bei den Schlagvorgängen wurde ein eigenes Meßsystem benötigt. Die unmittelbare Messung der Schlagkräfte ist jedoch nur am Meißel selbst möglich und der Aufbau dadurch mit hohen Anforderungen verbunden. Es mußte ein, speziell für dieses Problem entwickelter, Beschleunigungsaufnehmer verwendet werden, der am Meißelende positioniert wurde (siehe Abschnitt 4.3.2.1). Dies sollte die Messung der Kräfte beim Aufprall des Meißels an der Bohrlochsohle über mehrere Schlagvorgänge ermöglichen. Durch den Verlauf der Stoßkräfte kann dann bei ungefähr gleich bleibender kinetischer Energie des Meißels auf den Festigkeitszustand des anstehenden Untergrundes geschlossen werden. Genauer betrachtet sollte sich der Anteil an bereits gelöstem Fels an der Sohle auf die Schlagkraftentwicklung auswirken (dämpfendes Bohrklein an der Sohle) und dadurch ein optimaler Werkzeugwechsel bestimmen lassen.

Die Messung der Kräfte am Meißel ist jedoch mit erheblichem Aufwand verbunden (Schutz

des Aufnehmers, Kabelführung, etc.), weshalb nach einer zweiten Meßmethode gesucht wurde, die eine mit der ersten Messung zusammenhängende Aussage ermöglichen würde. Dies sollte durch einen zweiten Beschleunigungsaufnehmer an der Außenseite der überstehenden Verrohrung erfolgen, welcher die Stoßkräfte beim Aufprall indirekt aufnimmt. Dazu muß die Verrohrung vor den Schlagvorgängen möglichst weit in den Boden getrieben werden, um einen guten Kontakt mit dem anstehenden Fels herzustellen. Beim Auftreffen des Meißels am Fels wird der Schlag über das Gestein so auch wieder in die Verrohrung eingeleitet. Die Stoßwelle läuft dann von der Rohrschneide bis zum Verrohrungsende an der Geländeoberkante. Während des Messens ist es erforderlich, daß die Klemmschellen der Verrohrungsmaschine geöffnet sind und die Stoßwelle nicht in andere Geräteteile abgeleitet wird. Aufgrund der klar definierten Rohrsteifigkeit und der gleichbleibenden Einspannung im Boden sind die Randbedingungen während einer Meßserie konstant. Das am Sensor gemessene Signal wird daher grundsätzlich von der Stoßkraft des Meißels abhängen. Durch die gleichzeitige Messung am Meißel und an der Verrohrung kann untersucht werden, ob sich ein Zusammenhang zwischen beiden Meßergebnissen herstellen läßt und damit eine alleinige Messung an der Verrohrung in Zukunft möglich ist.

4.3.2 Meßkette

Die Meßkette für die Beschleunigungsmessung ist anhand von Abb. 4.16 dargestellt und gliedert sich grundsätzlich in 3 Teile:

- Meßwernerfassung am Meißel und an der Verrohrung
- Meßwertverarbeitung im Meßverstärker
- Meßwertanzeige und -speicherung am Meßcomputer

Beide Aufnehmer sind kabelgebunden und an ein digitales Meßverstärkersystem angeschlossen. Dabei handelt es sich um einen Trägerfrequenzmeßverstärker der Marke HBM (DMCplus, Trägerfrequenz 4.8 kHz, [21]). Der Meßverstärker ist über die GPIB Schnittstelle (IEEE 488) mit einem eigenen Meßcomputer verbunden, der die Beschleunigungsdaten anzeigt und aufzeichnet. Wichtige Voraussetzung für eine einwandfreie Messung ist die weitgehende Abschirmung vor Störeinflüssen. Dazu wurde eine galvanische Trennung der Aufnehmer vom Meßobjekt vorgenommen und auf eine hochfrequenzsichere Abschirmung der Meßkette geachtet. Darüber hinaus wurden der Meßverstärker und -computer über eine baustellenunabhängige Stromversorgung gespeist. In Summe wurden bei den Baustellenmessungen meist sieben Kanäle (vier Aufnehmer am Meißel, drei Aufnehmer an der Verrohrung) aufgezeichnet, wobei die Abtastrate der Meßsignale 9.6 kHz betrug. Um

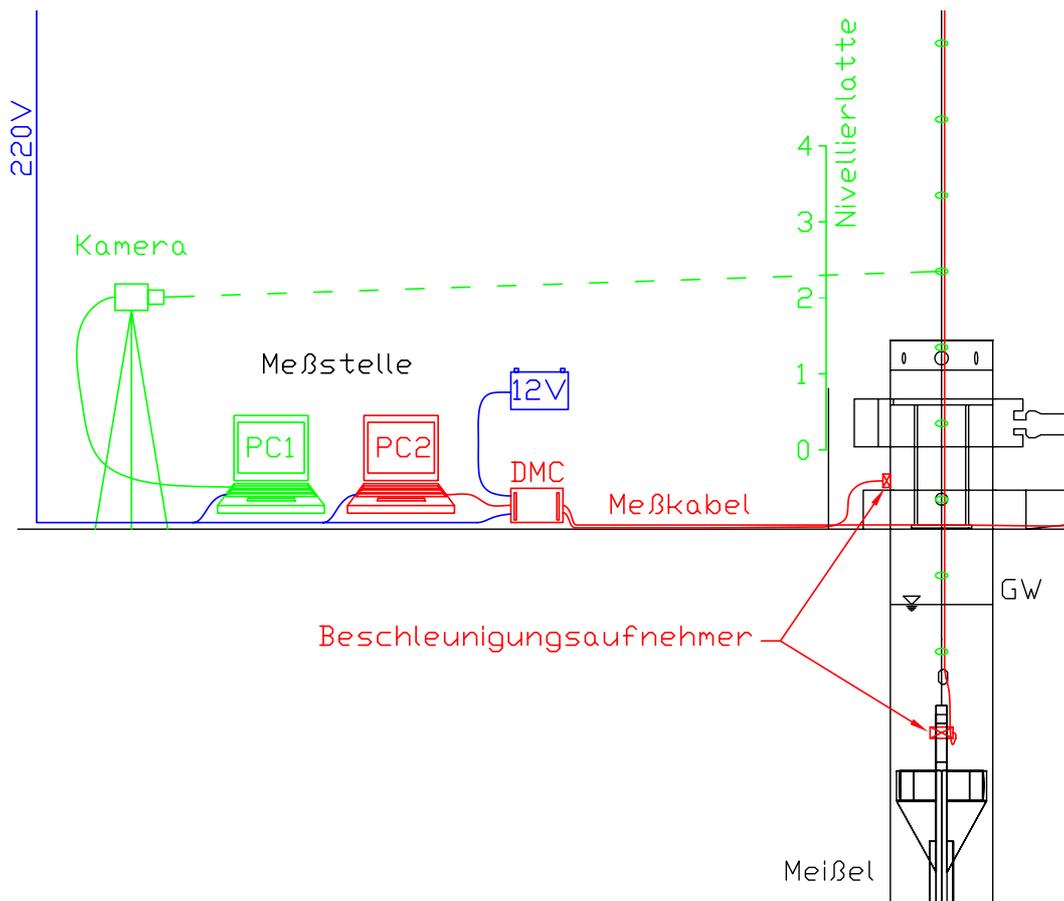


Abb. 4.16: Schematische Darstellung der Meßkette für die Beschleunigungsmessung (rot eingezeichnet)

die Meßdaten ohne Datenverlust speichern zu können, wurde jeder Fallvorgang einzeln aufgezeichnet und während des Meißelhubes zum Computer übertragen.

4.3.2.1 Meßwerterfassung am Meißel

Die Messung der Schlagkräfte am Meißel erfolgte durch einen speziell angefertigten Aufnehmer, dessen Herstellung mit einigen Erschwernissen verbunden war:

- Schutz des Aufnehmers vor Beschädigungen vor, während und nach der Messung
- Wasserdichte Ausführung des Aufnehmers und Kabelanschlusses (Messung unter Wasser)
- Führung des Meßkabels am Hubseil des Baggers
- Schutz des Meßkabels vor Beschädigungen vor, während und nach der Messung
- Zeitsynchrone Messung mit anderer Meßwerterfassung

Aufnehmer	Bezeichnung	Nennbeschleunigung	Arbeitsfrequenz
1	B12/200	+/- 200 m/s ²	0... 100 Hz
2	B12/200	+/- 200 m/s ²	0... 100 Hz
3	B12/500	+/- 1000 m/s ²	0... 250 Hz
4	B12/2000	+/- 2500 m/s ²	0... 1000 Hz

Tab. 4.2: Übersicht der verwendeten Beschleunigungsaufnehmer am Meißel [20]

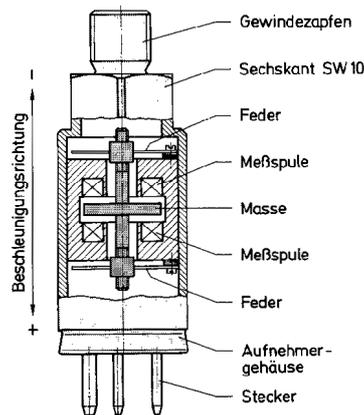


Abb. 4.17: Aufbau des induktiven Beschleunigungsaufnehmers B12 [22]

Aufgrund des Grundwassers, der hohen Schlagkräfte, des "abgeschirmten" Falles in der Verrohrung und der zeitsynchronen Messung mit anderen Komponenten wurde ein kabelgebundener Prototyp bevorzugt. Dieser Aufnehmertyp besitzt den Vorteil, daß zwar nur die Sensoren am Prüfling (Meißel) positioniert sind, diese jedoch mit einem geeigneten Meßkabel an das restliche Meßsystem angeschlossen werden müssen. Die Kabelführung und -verbindung war damit eine der größten Herausforderungen für die Realisierung dieses Systems.

Der Aufnehmer am Meißel selbst setzt sich aus vier induktiven Beschleunigungsaufnehmern (Typ B12, HBM) zusammen, welche für die Messung von konstanten Beschleunigungen, sowie Schwing- und Schockbeschleunigungen vorgesehen sind. Dabei wurden drei unterschiedliche Aufnehmerempfindlichkeiten gewählt, deren Kenndaten in Tab. 4.2 angeführt sind. Die Aufnehmer sind lotrecht in einem speziell dafür angefertigten, wasserfesten Gehäuse montiert, welches selbst für die Befestigung an verschiedenen Meißeltypen geeignet ist. Das Gehäuse bietet ausreichenden Schutz der Aufnehmer und Kabelanschlüsse vor Beschädigungen (siehe Abb. 4.18). Das Meßkabel ist fast vollständig in einem doppelt gepanzerten Schutzschlauch geführt, um Beschädigungen beim Fallvorgang zu vermeiden. An der Aufnehmerseite ist eine widerstandsfähige Zugentlastung vorgesehen, um ein Herausziehen des Meßkabels zu verhindern. Der Schutzschlauch selbst ist an ein ca. 12 m langes Seilzwischenstück mit Seilklemmen in 1.0 m Abständen befestigt, damit eine



(a) Montage des Aufnehmers

(b) Blick auf den montierten Aufnehmer

Abb. 4.18: Positionierung des Aufnehmers am Meißel

schnelle Montage des Aufnehmers auf der Baustelle möglich ist. Dieses wird beim Meßeinsatz zwischen Hubseil und Meißel gehängt und dient mit den Seilklemmen gleichzeitig als Markierung für das photogrammetrische Meßverfahren (siehe Abb 4.19).

4.3.2.2 Meßwerterfassung an der Verrohrung

Das Meßsystem an der Verrohrung besteht aus drei induktiven Beschleunigungsaufnehmern (B12/200, siehe Tab. 4.2), die in zueinander orthogonal stehenden Richtungen angeordnet sind (siehe Abb. 4.20b). Zur Befestigung an der Verrohrung dient ein Magnethalter, um eine schnelle Befestigung und Entfernung des Aufnehmers zu ermöglichen. Dies war ein Teil der Anforderungen an das Meßsystem, weil die Verrohrung auch während des gesamten Meßeinsatzes immer wieder nachgetrieben werden mußte. Obwohl von magnetischen Störeinflüssen bei diesem Aufnehmertyp grundsätzlich abgeraten wird, ist der Einfluß doch stark von der spezifischen Meßsituation abhängig und sollte daher im Detail geprüft werden [22]. In Vergleichsmessungen konnte keine Beeinflussung der Beschleunigungswerte durch das Magnetfeld festgestellt werden (nach Nullsetzen aller Aufnehmer, bei dynamischer Prüfung). Damit konnte das Meßsystem an der Verrohrung in der hier dargestellten Weise für Baustellenmessungen verwendet werden.

Beide Aufnehmer (am Meißel und an der Verrohrung) sind an das gleiche Meßverstärkersystem angeschlossen. Dadurch kann eine zeitsynchrone Messung, Visualisierung und Aufzeichnung aller Beschleunigungsdaten erfolgen.



(a) Unteres Ende des Seilzwischenstückes (b) Oberes Ende des Seilzwischenstückes (c) Eingehängtes Seilzwischenstück mit Meßkabel

Abb. 4.19: Seilzwischenstück mit Seilklemmen zur Kabelführung und für die photogrammetrische Fallbewegungsmessung



(a) Blick auf den Aufnehmer an der Verrohrung (b) Detailansicht des Aufnehmers

Abb. 4.20: Positionierung des Aufnehmers an der Verrohrung

5 Analytische Lösung der Fallbewegung

5.1 Fallvorgang im trockenen Bohrloch

Zur Bestimmung der Bewegungsgleichung des Meißels für den Fallvorgang im trockenen Bohrloch (Szenario 1, siehe Abb. 4.1) wird das System gemäß Abb. 5.1 abstrahiert und zum Zeitpunkt "t" betrachtet. Dabei hat sich der Meißel bereits von der Ausgangslage "0" um die Verschiebung "z" vertikal bewegt. Die Gewichtskräfte des Meißels und Seiles auf der Bohrlochseite (inkl. Seilkausche, -klemmen, Schäkel, etc.) wirken als Antriebskräfte für die Fallbewegung. Als Widerstandskräfte werden die Trägheitskräfte des Meißels und Seiles sowie der Seiltrommel gemäß dem Prinzip von d'Alembert¹ angesetzt. Die Gewichtskraft des Seiles auf der Geräteseite wirkt aufgrund der entgegengesetzten Bewegungsrichtung ebenfalls negativ. Alle Komponenten des Systems werden vollständig freigeschnitten und die Gewichts- bzw. Trägheitskräfte als Vektoren durch deren Schwerpunkt eingezeichnet. Das Seilgewicht wird aus Gründen der Übersicht am jeweiligen Seilabschnitt aufintegriert und als Einzelkraft angesetzt. Im dynamischen Gleichgewicht muß die Summe aller virtuellen Arbeiten bei infinitesimaler Verschiebung δz bzw. Verdrehung $\delta\varphi$ verschwinden:

$$\delta W = \sum_i F_i \cdot \delta z + \sum_j M_j \cdot \delta\varphi = 0 \quad (5.1)$$

Der Kräfteansatz berücksichtigt damit nur die konservativen Kräfte im System und basiert auf folgenden Vereinfachungen:

- Ideales Seil (nicht dehnbar, keine inneren Reibungskräfte).
- Trägheitskräfte an den Seilrollen werden aufgrund des geringen Gewichtes vernachlässigt.
- Seilreibungskräfte an Seilrollen und Seilwinde vernachlässigt.

¹Das d'Alembert'sche Prinzip besagt, daß die Bewegung eines Körpers so erfolgt, daß die Summe der virtuellen Arbeiten der aus Zwängen resultierenden Kräfte und Momente in jedem Augenblick Null ist [50].

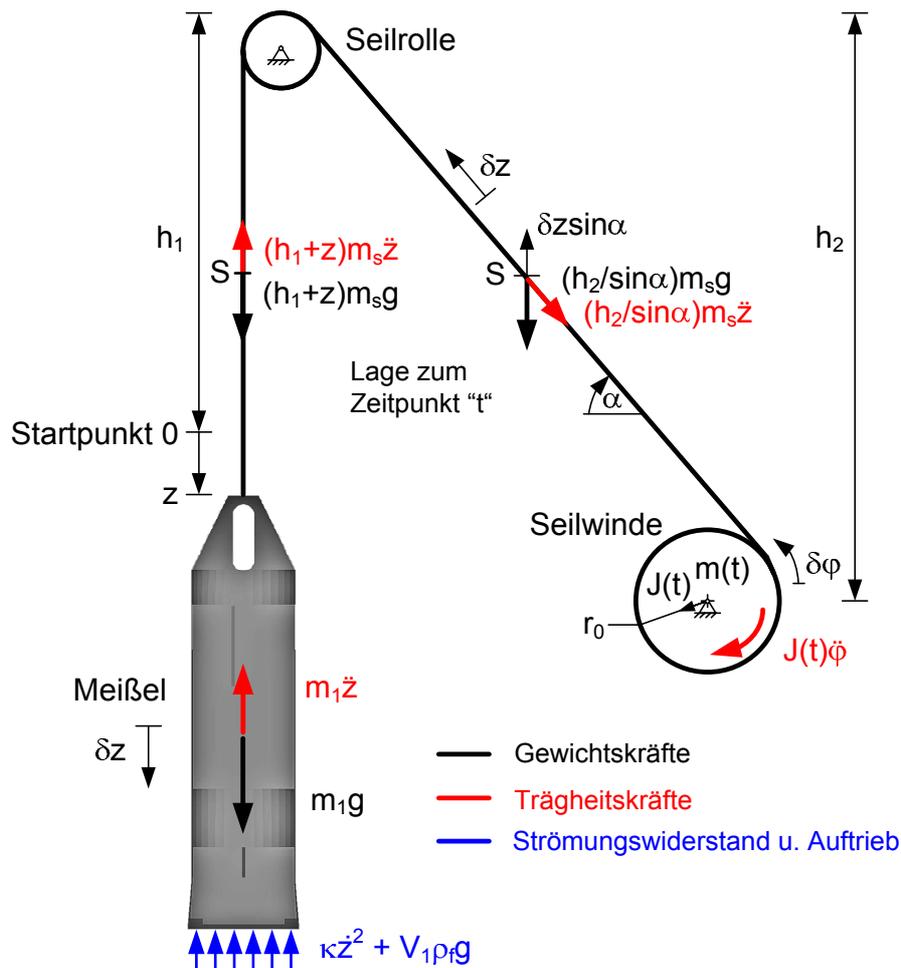


Abb. 5.1: Kräfteansatz am Fallmodell

- Reibungskräfte in den Lagern der Seilrollen und Seilwinde vernachlässigt (siehe auch Abschnitt 5.3).
- Keine Berücksichtigung von Bremsvorgängen an der Seilwinde.

Das rotatorische Trägheitsmoment der Seilwinde verändert sich durch den Seilabtrieb mit der Zeit t . Zum Zeitpunkt $t=0$ besitzt die Seilwinde inklusive Seilpaket ein rotatorisches Trägheitsmoment von J_0 . Zur Zeit "t" wurde das Gewicht der Seilwinde durch den Seilabtrieb um $z \cdot m_s$ reduziert und besitzt somit ein verringertes Trägheitsmoment $J(t)$.

$$J(t) = J_0 - z \cdot m_s \cdot r_0^2 \quad (5.2)$$

$m_s \dots$ Seilmasse in kg/lfm

$z \dots$ Verschiebung zum Zeitpunkt "t"

Ebenso wird die Länge des Seiles auf der Bohrlochseite aufgrund der Seilabwicklung immer

größer (zum Zeitpunkt "t" bereits um die Verschiebung "z"). Durch Einsetzen der Kräfte und Momente aus Abb. 5.1 in Gl. 5.1 ergibt sich sich somit folgende Gleichung:

$$\begin{aligned} \delta W = & + \left[m_1 g + (h_1 + z) m_s g - \frac{h_2}{\sin \alpha} m_s g \sin \alpha \right] \cdot \delta z \\ & - \left[m_1 \ddot{z} + (h_1 + z) m_s \ddot{z} + \frac{h_2}{\sin \alpha} m_s \ddot{z} \right] \cdot \delta z \\ & - [J_0 - z m_s r_0^2] \ddot{\varphi} \cdot \delta \varphi = 0 \end{aligned} \quad (5.3)$$

Mit dem Einsetzen der Zwangsbedingung $\delta \varphi = \frac{\delta z}{r_0}$ läßt sich zusammenfassen:

$$\begin{aligned} & \left[m_1 g + (h_1 + z) m_s g - h_2 m_s g - m_1 \ddot{z} - (h_1 + z) m_s \ddot{z} - \frac{h_2}{\sin \alpha} m_s \ddot{z} - \frac{J_0}{r_0^2} \ddot{z} + z m_s \ddot{z} \right] \delta z = 0 \\ \Leftrightarrow & - \left[m_1 + h_1 m_s + \frac{h_2}{\sin \alpha} m_s + \frac{J_0}{r_0^2} \right] \ddot{z} + [m_s g] z + (m_1 + h_1 m_s - h_2 m_s) g = 0 \end{aligned} \quad (5.4)$$

Zum Zeitpunkt t=0 (Ausgangslage beim Fallvorgang) befindet sich das obere Meißelende meist in Höhe der Rohroberkante (oder geringfügig höher) und damit ungefähr in der Höhe der Achse der Seiltrommel. Damit kann $h \approx h_1 \approx h_2$ gesetzt werden, wodurch sich obige Gleichung weiter vereinfacht:

$$\underbrace{- \left[m_1 + \left(h + \frac{h}{\sin \alpha} \right) m_s + \frac{J_0}{r_0^2} \right] \ddot{z}}_{\text{Trägheitskräfte}} + \underbrace{[m_s g] z}_{\text{Gewichtskraft Seilabtrieb}} + \underbrace{m_1 g}_{\text{Gewichtskraft Meißel}} = 0 \quad (5.5)$$

Dies stellt eine lineare, inhomogene Differentialgleichung (DGL) zweiter Ordnung mit konstanten Koeffizienten dar, wobei sich die Lösung aus der zugehörigen homogenen Differentialgleichung und einem partikulären Lösungsansatz ergibt [3]. Wir substituieren daher zunächst die Koeffizienten zu

$$\begin{aligned} DGL : \quad & -A_1 \cdot \ddot{z} + A_2 \cdot z + A_3 = 0 \quad (5.6) \\ & A_1 = m_1 + \left(h + \frac{h}{\sin \alpha} \right) m_s + \frac{J_0}{r_0^2} \\ & A_2 = m_s g \\ & A_3 = m_1 g \end{aligned}$$

und lösen die homogene Differentialgleichung. Der Ansatz $z_h = e^{\lambda t}$ führt durch Einsetzen zu einer Lösung für λ und damit zu der homogenen Lösung z_h mit den noch zu bestimmenden Koeffizienten c_1 und c_2 .

$$\text{Homogene DGL : } -A_1 \cdot \ddot{z} + A_2 \cdot z = 0 \quad (5.7)$$

$$-A_1 \lambda^2 e^{\lambda t} + A_2 e^{\lambda t} = 0$$

$$\Rightarrow \lambda = \pm \sqrt{\frac{A_2}{A_1}}$$

$$z_h = c_1 \cdot e^{\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} t} + c_2 \cdot e^{-\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} t} \quad (5.8)$$

Für die Partikulärlösung bestimmen wir aufgrund $A_3 = \text{Const.}$ den Ansatz $z_p = c_3$ und setzen diesen in Gl. 5.6 ein. Dadurch erhält man den Koeffizienten c_3 und kann die partikuläre Lösung der Differentialgleichung anschreiben. Die allgemeine Lösung der Differentialgleichung ergibt sich dann durch die Summe der homogenen und der partikulären Lösung.

$$\begin{aligned} -A_1 \cdot 0 + A_2 \cdot c_3 + A_3 &= 0 \\ \Rightarrow z_p = c_3 &= -\frac{A_3}{A_2} \end{aligned} \quad (5.9)$$

$$z = z_h + z_p = c_1 \cdot e^{\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} t} + c_2 \cdot e^{-\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} t} - \frac{A_3}{A_2} \quad (5.10)$$

Durch Einsetzen der Anfangsbedingungen lassen sich nun die noch verbleibenden Koeffizienten c_1 und c_2 ermitteln (siehe Gl. 5.11).

$$AB \ z(t=0) = 0 : \quad c_1 + c_2 - \frac{A_3}{A_2} = 0 \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned} AB \ \dot{z}(t=0) = 0 : \quad c_1 \frac{A_2}{A_1} - c_2 \frac{A_2}{A_1} &= 0 \\ \Rightarrow c_1 = c_2 &= \frac{A_3}{2A_2} \end{aligned}$$

Damit läßt sich die Lösung der Differentialgleichung 5.6 durch Gl. 5.12 anschreiben. Aufgrund der angegebenen Beziehung in Gl. 5.13 läßt sich die Lösung weiter vereinfachen und die Bewegungsgleichung des Meißels durch eine Hyperbelfunktion angeben. Durch ein- bzw. zweifaches Differenzieren erhält man weiters die Geschwindigkeit und Beschleunigung des Meißels für das Fallmodell im trockenen Bohrloch.

$$z = \frac{A_3}{2A_2} \cdot e^{\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} t} + \frac{A_3}{2A_2} \cdot e^{-\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} t} - \frac{A_3}{A_2} \quad (5.12)$$

$$\frac{1}{2}(e^\xi + e^{-\xi}) = \cosh(\xi) \quad (5.13)$$

$$z = \frac{A_3}{A_2} \left[\cosh \left(\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} t \right) - 1 \right] \quad (5.14)$$

$$\dot{z} = \frac{A_3}{\sqrt{A_1 A_2}} \sinh \left(\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} t \right) \quad \ddot{z} = \frac{A_3}{A_1} \cosh \left(\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} t \right)$$

Nach Rücksubstitution der Koeffizienten A_i läßt sich die Bewegungsgleichung 5.14 auch wieder mit den Anfangsparametern angeben.

$$z(t) = \frac{m_1}{m_s} \left[\cosh \left(\sqrt{\frac{m_s g}{m_1 + \left(h + \frac{h}{\sin \alpha} \right) m_s + \frac{J_0}{r_0^2}}} t \right) - 1 \right] \quad (5.15)$$

Zur Veranschaulichung ist die analytische Lösung für den Fall der Baustellenmessung Horn (siehe Kap. 8) in Abb. 5.2 dargestellt. Dabei wurde die Fallbewegung mit folgenden Modellen gegenübergestellt:

- Freier Fall: Gänzlich freie Fallbewegung des Meißels (ohne Berücksichtigung des Luftwiderstandes)
- Fallvorgang mit F Seilabtrieb vernachlässigt: Fallbewegung des Meißels gemäß Gl. 5.5 ohne Term "Gewichtskraft Seilabtrieb" (Quadratisches Fallmodell)
- Fallvorgang mit F Seilabtrieb berücksichtigt: Fallbewegung des Meißels gemäß Gl. 5.5 bzw. Lösung gemäß Gl. 5.15 (Hyperbolisches Fallmodell)

In Abb. 5.2 ist erkennbar, daß die Fallbeschleunigung des Meißels mit der Zeit stetig ansteigt (hyperbolische Funktion). Dies ergibt sich gemäß der zugrunde liegenden Differentialgleichung 5.5 durch das zunehmende Seilgewicht aufgrund des Seilabtriebes (Term "Gewichtskraft Seilabtrieb"). Geht man davon aus, daß die Reibungskräfte hier noch unberücksichtigt sind, so läßt sich das Fallmodell in sehr guter Näherung mit konstanter Fallbeschleunigung beschreiben. Dies erreicht man idealerweise durch Weglassen des oben beschriebenen Termes "Gewichtskraft Seilabtrieb" und erhält damit eine einfache Differentialgleichung zweiter Ordnung, dessen Lösung durch zweifaches Integrieren ermittelt werden kann (Lösung: quadratische Parabel):

$$z(t) = \frac{m_1 g}{2 \left(m_1 + \left(h + \frac{h}{\sin \alpha} \right) m_s + \frac{J_0}{r_0^2} \right)} \cdot t^2 \quad (5.16)$$

Im rechten Teil der Abb. 5.2 sind die Fallkurven auf die entsprechenden Kurven des freien Falls bezogen. Daraus läßt sich die Abminderung der Fallbewegung durch den Seilabtrieb ablesen ($\approx 20\%$). Durch diese Darstellung wird auch der geringe Unterschied zwischen den

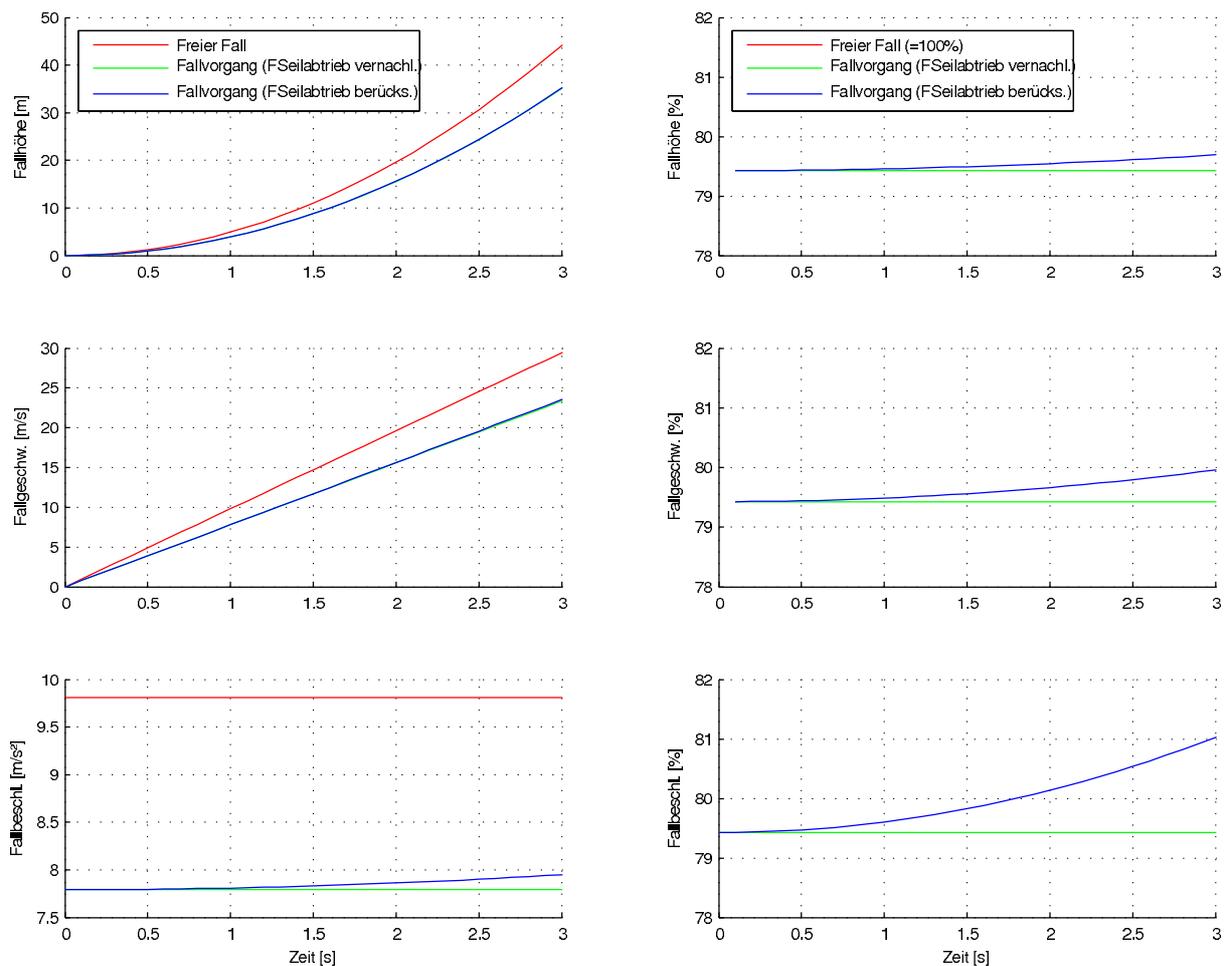


Abb. 5.2: Darstellung der ermittelten Fallmodelle anhand der Parameter der Baustellenmessung Horn

beiden aufgestellten Fallmodellen für die hier relevanten Zeiträume bzw. Fallhöhen von ≤ 50 m erkennbar.

5.2 Fallvorgang im wassergefüllten Bohrloch

5.2.1 Abschätzung der Strömungsverhältnisse

Für den Ansatz der Strömungswiderstände müssen zunächst die Strömungsverhältnisse bei den Fallvorgängen in der wassergefüllten Verrohrung anhand einer vereinfachten Berechnung abgeschätzt werden. Dies erfolgt durch die Betrachtung der Relativströmung in der Durchflußfläche zwischen Meißel und Rohr mit der Ermittlung der dimensionslosen Reynolds-Zahl. Die Reynolds-Zahl bildet das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften ab und läßt erkennen, ob eine Strömung laminar oder turbulent fließt. Der

Übergang ist durch die kritische Reynolds-Zahl definiert und kann für Stoffströme in geschlossenen Rohrleitungen mit $Re_{krit} \approx 2320$ angegeben werden. Die Reynolds-Zahl wird in nicht kreisförmigen Querschnitten nach Gl. 5.17 berechnet und hängt vom hydraulischen Durchmesser, der Strömungsgeschwindigkeit und der kinematischen Zähigkeit des Wassers ab [36].

$$Re = \frac{d_h \cdot v_{rel}}{\nu} \quad (5.17)$$

$d_h \dots$ hydraulischer Durchmesser [m]

$v_{rel} \dots$ Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

$\nu \dots$ kinematische Zähigkeit [m²/s]

Der hydraulische Durchmesser wird gemäß [36] über den hydraulischen Radius d_h nach folgender Formel berechnet:

$$r_h = \frac{A}{U} \quad (5.18)$$

$$d_h = 4 \cdot r_h = \frac{4 \cdot A}{U} \quad (5.19)$$

$r_h \dots$ hydraulischer Radius [m]

$A \dots$ Durchflußfläche [m²]

$U \dots$ Benetzter Rand [m]

Die Durchflußfläche ist diejenige Fläche zwischen Verrohrung und Werkzeug, durch welche das Wasser während des Fallvorganges des Meißels strömen kann. Aufgrund der Kontinuitätsbedingung muß das durch den Meißel durchschnittlich verdrängte Wasservolumen pro Zeiteinheit q_m , in entgegengesetzter Richtung, zur Rohroberkante strömen. Die Relativgeschwindigkeit zwischen Meißel und Flüssigkeit v_{rel} ergibt sich dann aus der Summe der beiden Geschwindigkeiten (siehe Gl. 5.22).

$$q_m = A_m \cdot v_m \quad (5.20)$$

$$v_f = \frac{q_m}{A} = \frac{A_m}{A} \cdot v_m \quad (5.21)$$

$$v_{rel} = v_m + v_f = \left(1 + \frac{A_m}{A}\right) \cdot v_m \quad (5.22)$$

$v_m \dots$ Fallgeschwindigkeit des Meißels [m/s]

$v_f \dots$ Geschwindigkeit des verdrängten Wassers [m/s]

$q_m \dots$ Verdrängtes Wasservolumen / Zeit [m³/s]

$A_m \dots$ Mittlere Querschnittsfläche des Meißels [m²]

Geometrie	Länge	Berandungs-	Berandungs-	Querschnitts-	Volumen	Masse
Flachmeißel	[m]	länge [m]	fläche [m ²]	fläche [m ²]	[m ³]	[to]
Vorderer Teil	0.80	2.81	2.25	0.16	0.13	0.98
1. Ring	0.58	9.17	5.27	0.25	0.14	1.11
Mittelteil	1.80	2.74	4.93	0.15	0.26	2.06
2. Ring	0.34	9.24	3.09	0.23	0.08	0.60
Endstück	0.73	1.54	1.12	0.08	0.06	0.44
Summe	4.24		16.67		0.67	5.19
Mittelw.		3.93		0.16		
Verrohrung	4.24	3.46	14.65	0.95	4.03	-

Tab. 5.1: Geometrische Daten des Flachmeißel Basismodells in Abb. 6.6

Dabei wird mit einer über die Meißellänge gemittelten, Querschnittsfläche A_m gerechnet, aus der sich mit dem Rohrquerschnitt die Durchflußfläche A ergibt. Für die hier betrachteten Fallmeißel kann die Durchflußfläche relativ einheitlich mit ca. 83% des Rohrquerschnittes angegeben werden (vgl. Angaben zur Geometrie in Kap. 6). Der Rohrdurchmesser ist mit $d_i=1.1$ m für alle späteren Untersuchungen gleich und somit kann die Relativgeschwindigkeit mit

$$v_{rel} \approx 1.2 \cdot v_m \quad (5.23)$$

angegeben werden. Die Berandung der Durchflußfläche ergibt sich aus den benetzten Rändern am Meißel und an der Verrohrung und wird ebenfalls für einen durchschnittlichen Querschnitt berechnet (siehe Tab. 5.1). Damit können die gesamte benetzte Berandung und der hydraulische Durchmesser berechnet werden:

$$U = 7.4 \text{ m} \quad (5.24)$$

$$d_h = \frac{4 \cdot 0.79}{7.4} \approx 0.43 \text{ m} \quad (5.25)$$

Für einen geschätzten Fallgeschwindigkeitsbereich des Meißels mit $v_m \approx 0 - 8$ m/s kann somit die Reynolds-Zahl aus den bisherigen Daten errechnet werden:

$$v_m = 1 \text{ m/s} : Re = \frac{0.43 \cdot 1.2 \cdot 1}{1.3 \cdot 10^{-6}} \approx 4.0 \cdot 10^5 \gg Re_{krit} = 2320 \quad (5.26)$$

$$v_m = 8 \text{ m/s} : Re = \frac{0.43 \cdot 1.2 \cdot 8}{1.3 \cdot 10^{-6}} \approx 3.2 \cdot 10^6 \gg Re_{krit} = 2320 \quad (5.27)$$

Für den Fallvorgang der Werkzeuge unter Wasser ergeben sich folglich deutlich turbulente Strömungsverhältnisse in der Verrohrung. Dadurch können die analytischen Ansätze für die Strömungswiderstandskräfte und die Parameter für die numerischen Strömungssimulationen entsprechend gewählt werden (turbulentes Modell).

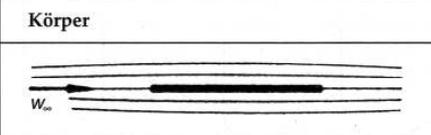
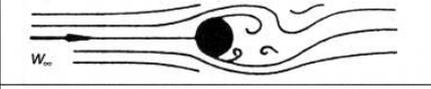
Körper	Druckwiderstand	Reibungswiderstand
	0%	100%
	≈ 10%	≈ 90%
	≈ 90%	≈ 10%
	100%	0%

Abb. 5.3: Widerstandsanteile umströmter Körper [2]

Deutlich turbulente Strömungsverhältnisse wurden auch in [10] bei einer Untersuchung der Kolbenwirkung von Bohrwerkzeugen gefunden und stimmen mit den gegenständlichen Berechnungen überein.

5.2.2 Kräfteansatz am Meißel

Zur Beschreibung der freien Fallbewegung eines Körpers in einer Flüssigkeit sind neben der Schwerkraft noch die Auftriebskraft und der Strömungswiderstand am Körper anzusetzen. Für die Fallbewegung des Meißels im Grundwasser sind damit neben den bereits bekannten Kräften in Gl. 5.5 noch der Auftrieb F_a sowie der Strömungswiderstand F_w zu berücksichtigen (siehe Abb. 5.1). Die Auftriebskraft bestimmt sich dabei aus dem Volumen der verdrängten Flüssigkeit und deren Dichte zu $F_a = \rho_f \cdot g \cdot V_1$. Die auf den Meißel wirkende **Strömungswiderstandskraft** F_w setzt sich aus dem Druckwiderstand (Formwiderstand) F_{wD} und dem Reibungswiderstand (Flächenwiderstand) F_{wR} zusammen und hängt i.A. stark von der Form des umströmten Körpers, der Oberflächenrauigkeit und der Reynoldszahl ab (siehe Abb. 5.3). Gemäß der abgeschätzten Reynoldszahlen von $Re \gg 2320$ kann die Gesamtwiderstandskraft näherungsweise proportional zum Quadrat der Anströmgeschwindigkeit mit Gl. 5.28 angegeben werden [2]. Da sich die Gesamtkraft hier vorwiegend aus dem Druckwiderstand ergibt, wird als maßgebende Querschnittsfläche die, in Anströmrichtung projizierte, Fläche des Meißels A_{St} gewählt (Stirnfläche; vgl. Ergebnisse in Kap. 6).

$$F_w = F_{wD} + F_{wR} = \frac{1}{2} \rho A_{St} c_w \cdot v_\infty^2 \tag{5.28}$$

$$\kappa = \frac{1}{2} \rho A_{St} c_w \tag{5.29}$$

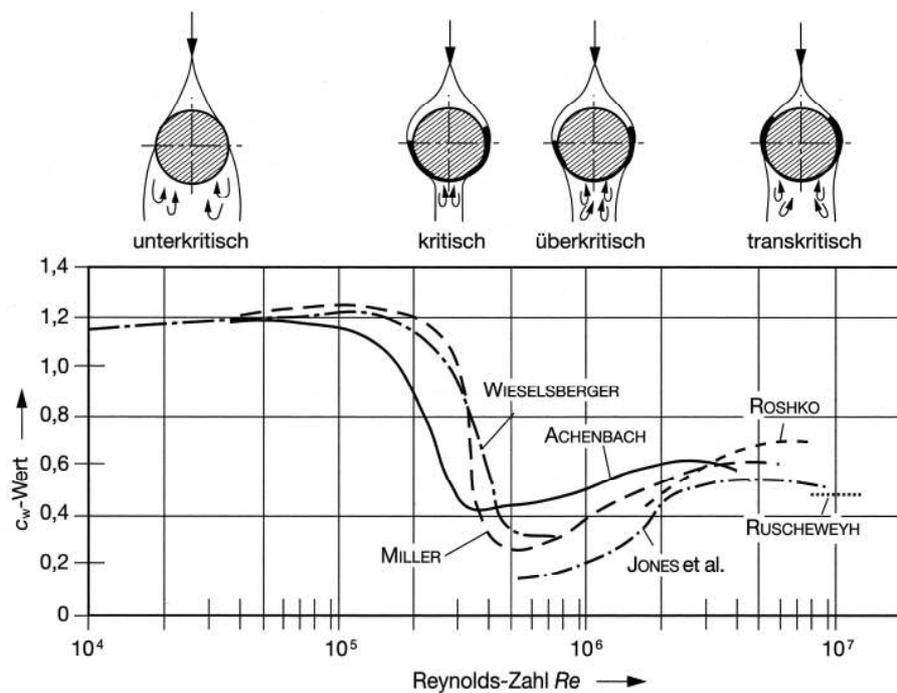


Abb. 5.4: Verlauf des Strömungswiderstandsbeiwertes für den umströmten, glatten Kreiszylinder in Abhängigkeit von der Reynoldszahl (untersch. Versuche) [2]

F_w ... Gesamtwiderstandskraft [N]

κ ... Gesamtwiderstandskoeffizient [kg/m]

c_w ... Widerstandskoeffizient [1]

ρ ... Dichte der Flüssigkeit [kg/m³]

v_∞ ... Anströmgeschwindigkeit [m/s]

A_{St} ... Stirnfläche (Schattenfläche) [m²]

Maßgebend für den Strömungswiderstand ist die Bestimmung des Widerstandskoeffizienten c_w , welche auf experimentellem oder theoretischem Weg erfolgen kann. Dabei ergibt sich allerdings die Schwierigkeit, daß der Beiwert nicht nur von der Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit des Körpers, sondern auch von der Reynoldszahl abhängig ist und damit keine Konstante darstellt. Dies ist exemplarisch für den glatten, querangeströmten Kreiszylinder in Abb. 5.4 dargestellt. Für den Widerstandsbeiwert c_w läßt sich hierbei keine einfache mathematische Funktion angeben, zumal sich auch die Zusammensetzung aus Druck- und Reibungswiderstand stark mit der Reynoldszahl ändert [2]. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Widerstandskoeffizienten daher für den stationär fallenden Meißel anhand numerischer Methoden im zu erwartenden Geschwindigkeitsbereich bestimmt. Außerdem werden experimentelle Modell- und großmaßstäbliche Versuche zur Überprüfung durchgeführt. Aus Gründen der Übersicht wird oft direkt der "Gesamtwiderstandskoeffizient

ent" κ verwendet und nur für Vergleichszwecke der Widerstandskoeffizient c_w angegeben.

Ähnlich wie bei der Widerstandskraft, kann sich bei unsymmetrischen Meißeltypen (z.B. Flachmeißel mit Lenkblechen) eine **Momenteneinwirkung** zufolge der Umströmung ausbilden. Für dieses Drehmoment soll ebenfalls ein geeignetes, theoretisches Modell gefunden werden. Durch die Anstellung der Lenkbleche kann im Schwerpunkt jedes Bleches eine "Lenkblechkraft" F_{LB} gemäß Gl. 5.30 analog zur Auftriebskraft in der Aerodynamik angesetzt werden (siehe Abb. 5.5). Diese Formel besitzt den gleichen Aufbau wie Gl. 5.28, wobei anstatt der Stirnfläche die Fläche des Lenkbleches eingesetzt wird, da diese als sinnvolles Maß für die erzeugte Rotationsbewegung herangezogen werden kann. Aufgrund der erzielten Drehbewegung werden die Widerstandskoeffizienten sinngemäß durch die "(Gesamt)rotationskoeffizienten" μ und c_r ersetzt. Damit ergibt sich aus der Summe beider Lenkblechkräfte multipliziert mit dem Hebelsarm ein Drehmoment M_w am Meißel (siehe Abb. 5.5).

$$F_{LB} = \frac{1}{2} \rho A_{LB} c_r \cdot v_\infty^2 \tag{5.30}$$

$$M_w = 2 \cdot F_{LB} \cdot h \tag{5.31}$$

$$M_w = \underbrace{\rho h A_{LB} c_r}_{\mu} \cdot v_\infty^2 \tag{5.32}$$

M_w ... Momenteneinwirkung [Nm]

μ ... Gesamtrrotationskoeffizient [kg]

c_r ... Rotationskoeffizient [1]

A_{LB} ... Fläche des Lenkbleches; h ... Hebelsarm

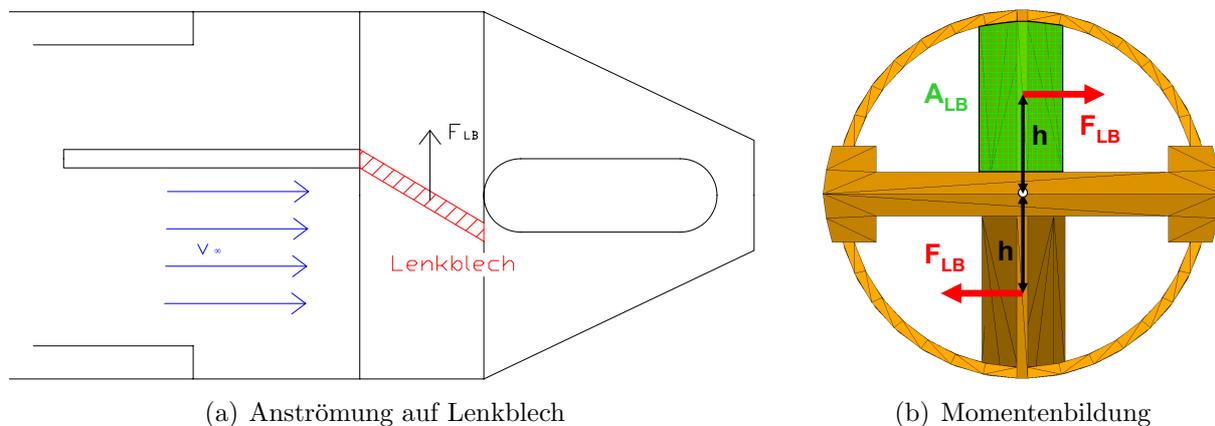


Abb. 5.5: Momenteneinwirkung am Flachmeißel durch die Lenkbleche

5.2.3 Analytische Lösung der Fallbewegung

Für den Fallvorgang des Meißels unter Wasser müssen im dynamischen Gleichgewicht in Gl. 5.3 zusätzlich Auftriebs- und Strömungswiderstandskräfte angesetzt werden (Szenario 2, siehe Abb. 4.1). Nach den Ausführungen des letzten Abschnittes kann der Strömungswiderstand gemäß der Newton'schen Reibung quadratisch zur Fallgeschwindigkeit mit $\kappa \dot{z}^2$ für den stationär fallenden Meißel angenommen werden ($c_w = \text{konst!}$). Somit erhält man eine nichtlineare, inhomogene Differentialgleichung zweiter Ordnung mit konstanten Koeffizienten.

$$\begin{aligned}
 DGL : \quad & -A_1 \cdot \ddot{z} + A_2 \cdot \dot{z} + A_3 - A_4 \cdot \dot{z}^2 = 0 & (5.33) \\
 & A_1 = m_1 + \left(h + \frac{h}{\sin \alpha}\right) m_s + \frac{J_0}{r_0^2} \\
 & A_2 = m_s g \\
 & A_3 = (m_1 - V_1 \rho_f) g \\
 & A_4 = \kappa
 \end{aligned}$$

Durch Substitution mit $u(z) = \dot{z}(t)$ läßt sich die Ordnung der obigen Differentialgleichung reduzieren und mit $(\frac{u^2}{2})' = u \cdot u'$ und $w(z) = u^2$ weiter zu Gl. 5.34 anschreiben.

$$\begin{aligned}
 & -A_1 \cdot uu' + A_2 \cdot z + A_3 - A_4 \cdot u^2 = 0 \\
 DGL : \quad & \cdot w' + \frac{2A_4}{A_1} \cdot w = \frac{2A_2}{A_1} \cdot z + \frac{2A_3}{A_1} & (5.34)
 \end{aligned}$$

Obige Differentialgleichung läßt sich analog zum vorhergehenden Abschnitt analytisch lösen, wobei sich die allgemeine Lösung wieder aus der homogenen Lösung w_h und einem partikulären Anteil w_p zusammensetzt.

$$w(z) = \underbrace{c_1 \cdot e^{-\frac{2A_4}{A_1} \cdot z}}_{w_h} + \underbrace{c_2 \cdot z + c_3}_{w_p} \quad (5.35)$$

Mit der Anfangsbedingung $\dot{z}(0) = 0$ gilt ebenso $u(0) = w(0) = 0$, womit sich die Lösung $w(z)$ der Differentialgleichung zu Gl. 5.36 ergibt. Durch Rücksubstitution mit $u(z) = \sqrt{w(z)}$ erhält man schließlich die Fallgeschwindigkeit des Meißels in Abhängigkeit des zurückgelegten Fallweges. Letztere Funktion ist von besonderer Bedeutung, da somit die Endgeschwindigkeit des Meißels direkt aus einer vorgegebenen Fallhöhe ermittelt werden kann. Auf das Rücksubstituieren der Koeffizienten A_i wurde an dieser Stelle bewußt verzichtet, um die Übersichtlichkeit der Lösung zu erhalten.

$$w(z) = \left(\frac{A_1 A_2}{2A_4^2} - \frac{A_3}{A_4} \right) e^{-2\frac{A_4}{A_1}z} + \frac{A_2}{A_4}z + \left(\frac{A_3}{A_4} - \frac{A_1 A_2}{2A_4^2} \right) \tag{5.36}$$

$$u(z) = \sqrt{\left(\frac{A_1 A_2}{2A_4^2} - \frac{A_3}{A_4} \right) e^{-2\frac{A_4}{A_1}z} + \frac{A_2}{A_4}z + \left(\frac{A_3}{A_4} - \frac{A_1 A_2}{2A_4^2} \right)} \tag{5.37}$$

Durch weitere Rücksubstitution ließe sich auch eine Funktion $t(z)$ bzw. $z(t)$ für den Fallvorgang bestimmen. Für die gegenständliche Anwendung ist jedoch Gl. 5.37 von größerer Bedeutung.

$$\begin{aligned} &\text{Rücksubst. von } u(z) = \frac{dz}{dt} \\ \rightarrow t(z) &= \int_{x=0}^{x=z} \frac{1}{\sqrt{w(x)}} dx \rightarrow z(t) \end{aligned} \tag{5.38}$$

Aufgrund des relativ komplexen Ergebnisses soll eine einfachere Lösung für den Fallvorgang unter Wasser gefunden werden. Dies erscheint insofern schon notwendig, weil man später möglichst einfache Gleichungen für die Regressionskurven bei der Versuchsauswertung benötigt. Nach den Ausführungen des letzten Abschnittes läßt sich bekanntlich der Term $A_2 \cdot z$ (zus. Gewichtskraft durch Seilabtrieb) in der Differentialgleichung 5.33 in sehr guter Näherung vernachlässigen. Dadurch vereinfacht sich die Lösung der Gleichung erheblich und man erhält durch Substitution mit $y(t) = \dot{z}$ eine nichtlineare, inhomogene Differentialgleichung erster Ordnung, die durch Trennung der Variablen analytisch lösbar ist (Gl. 5.39). Die Lösung dieser vereinfachten Gleichung soll an dieser Stelle bestimmt und der exakten Lösung gegenübergestellt werden.

$$\begin{aligned} \text{DGL : } -A_1 \cdot \dot{y} + A_3 - A_4 \cdot y^2 &= 0 & (5.39) \\ A_1 \cdot \frac{dy}{dt} &= A_3 - A_4 \cdot y^2 \\ \left(\frac{A_1}{A_3 - A_4 y^2} \right) \cdot dy &= dt \\ \sqrt{\frac{A_4}{A_3}} \cdot \frac{1}{1 - \left(\sqrt{\frac{A_4}{A_3}} \cdot y \right)^2} dy &= \sqrt{\frac{A_4}{A_3}} \cdot \frac{A_3}{A_1} dt \end{aligned}$$

Aufgrund der Beziehung

$$\int \frac{1}{1 - f(x)^2} f'(x) dx = \text{artanh}(f(x)) + C \text{ für } |x| \leq 1 \tag{5.40}$$

läßt sich obige Gleichung auf beiden Seiten integrieren und eine Lösung für y in Gl. 5.41

angeben.

$$\begin{aligned} \operatorname{artanh}\left(\sqrt{\frac{A_4}{A_3}}y\right) &= \frac{\sqrt{A_3A_4}}{A_1}t + c_1 \\ y &= \sqrt{\frac{A_3}{A_4}}\operatorname{tanh}\left(\frac{\sqrt{A_3A_4}}{A_1}\cdot t + c_1\right) \end{aligned} \quad (5.41)$$

Durch Rücksubstitution mit $y = \dot{z}$ und Lösen der Anfangsbedingungen $z(0) = \dot{z}(0) = 0$ lassen sich die verbleibenden Koeffizienten bestimmen und die Funktionen für Fallweg, -geschwindigkeit und -beschleunigung des Meißels angeben.

$$\begin{aligned} \int \operatorname{tanh}(x) &= \ln(\operatorname{cosh}(x)) + C \quad \text{und} \quad \operatorname{tanh}(x)' = 1 - \operatorname{tanh}^2(x) \\ z &= \frac{A_1}{A_4} \cdot \ln\left[\operatorname{cosh}\left(\frac{\sqrt{A_3A_4}}{A_1}\cdot t\right)\right] \\ \dot{z} &= \sqrt{\frac{A_3}{A_4}} \cdot \operatorname{tanh}\left(\frac{\sqrt{A_3A_4}}{A_1}\cdot t\right) \\ \ddot{z} &= \frac{A_3}{A_1} \cdot \left[1 - \operatorname{tanh}^2\left(\frac{\sqrt{A_3A_4}}{A_1}\cdot t\right)\right] \end{aligned} \quad (5.42)$$

Mit dem Ersetzen der Koeffizienten A_i können obige Gleichungen wiederum durch die Anfangsparameter dargestellt werden. Dabei ist vor allem die zweite Gleichung für \dot{z} interessant, da in dieser direkt die Endgeschwindigkeit des Meißels abgelesen werden kann.

$$\dot{z} = \sqrt{\frac{(m_1 - V_1\rho_f)g}{\kappa}} \cdot \operatorname{tanh}\left(\frac{\sqrt{(m_1 - V_1\rho_f)g\kappa}}{m_1 + \left(h + \frac{h}{\sin\alpha}\right)m_s + \frac{J_0}{r_0^2}} \cdot t\right) \quad (5.43)$$

$$\underbrace{\lim_{x \rightarrow \infty}(\operatorname{tanh}(x))}_{= 1} \quad \dot{z}(t \rightarrow \infty) = v_\infty = \sqrt{\frac{(m_1 - V_1\rho_f)g}{\kappa}} \quad (5.44)$$

Da der hyperbolische Anteil für $t \rightarrow \infty$ gegen 1 konvergiert, hängt die Endgeschwindigkeit (im vereinfachten Modell) nur mehr von der gesamten fallenden Masse m_1 unter Auftrieb, der Erdbeschleunigung g und dem Strömungswiderstandskoeffizienten κ ab (siehe Gl. 5.44). Da diese Parameter vollständig aus der Meißelgeometrie und Materialdichte ableitbar sind, läßt sich somit die maximal erreichbare Geschwindigkeit für jeden Meißel im Vorfeld bestimmen (κ wird numerisch bestimmt).

Für die praktische Anwendung interessiert nun wieder die erreichbare Fallgeschwindigkeit

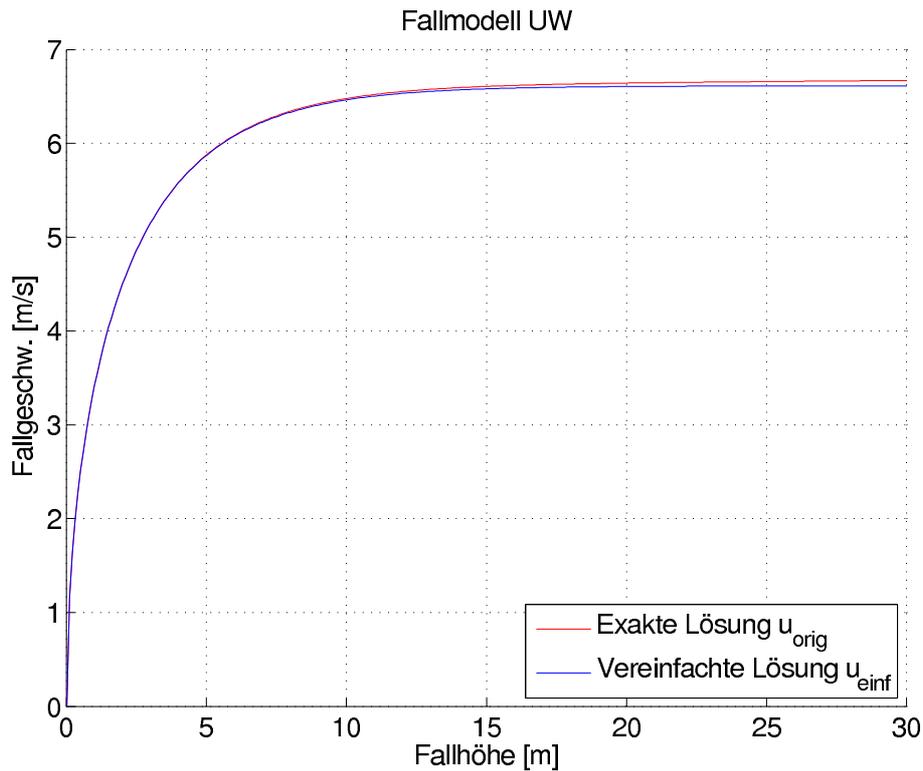


Abb. 5.6: Fallmodell UW - Lösungsvergleich der exakten und vereinfachten DGL anhand des Flachmeißels (Lenkblechneigung 30° , Baustellenparameter Horn)

in Abhängigkeit des zurückgelegten Fallweges. Genau diese Funktion $u_{orig}(z)$ wurde bereits durch die Lösung der originalen Differentialgleichung 5.33 im einführenden Teil dieses Abschnittes erhalten. Für den vereinfachten Fallvorgang entfällt in Gl. 5.34 das lineare Störglied und man erhält die Lösung $u_{einf}(z)$.

$$u_{orig}(z) = \sqrt{\left(\frac{A_1 A_2}{2A_4^2} - \frac{A_3}{A_4}\right) e^{-2\frac{A_4}{A_1}z} + \frac{A_2}{A_4}z + \left(\frac{A_3}{A_4} - \frac{A_1 A_2}{2A_4^2}\right)} \quad (5.45)$$

$$u_{einf}(z) = \sqrt{\frac{A_3}{A_4} \left(1 - e^{-2\frac{A_4}{A_1}z}\right)} \quad (5.46)$$

Vergleicht man nun diese beiden Funktionen in Abb. 5.6, so läßt sich eine Differenz der Fallgeschwindigkeiten von weniger als 1% bis zu einer Fallhöhe von 30 m feststellen. Außerdem stellt sich im Unterschied zur vereinfachten Lösung bei der Originallösung keine Konvergenz der Fallgeschwindigkeit für $z \rightarrow \infty$ ein (durch die zusätzliche Gewichtskraft des Seilbetriebes). Durch den vernachlässigbar geringen Fehler kann daher das vereinfachte Modell für die weiteren Überlegungen und Auswertungen verwendet werden (Bezeichnung im folgenden "Fallmodell UW").

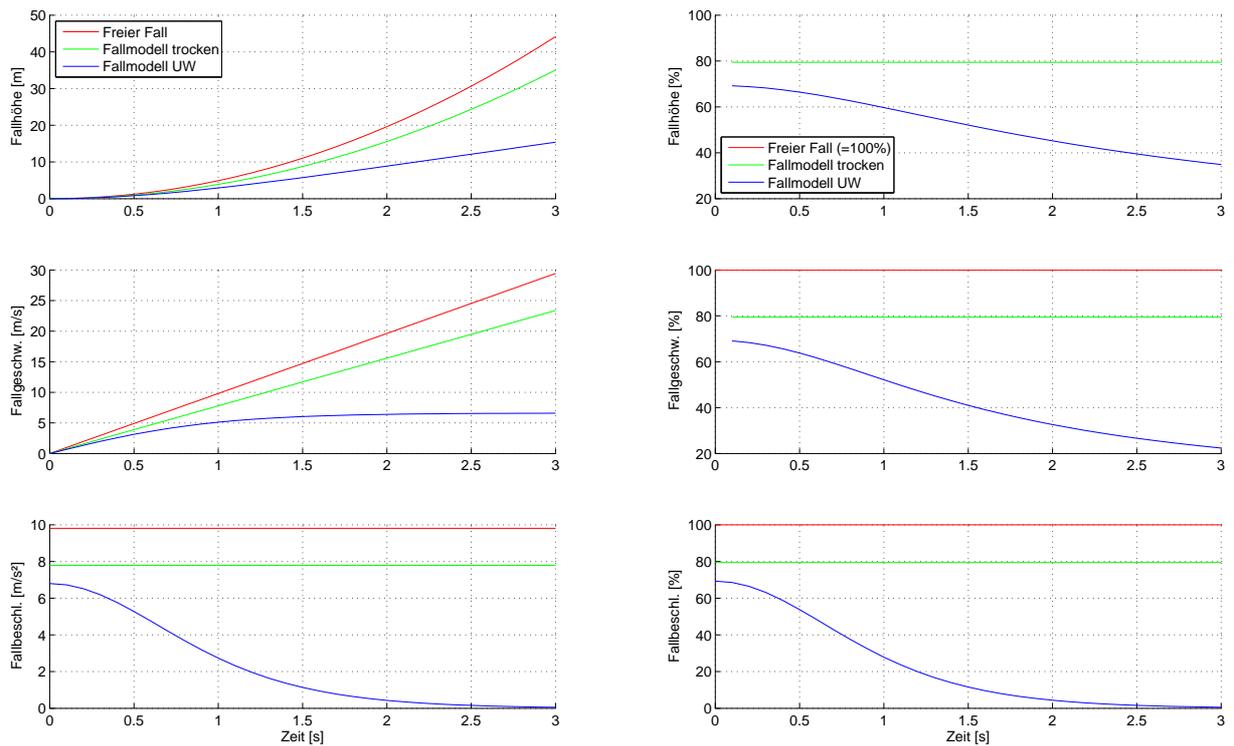


Abb. 5.7: Fallmodelle freier Fall/trocken/UW im Vergleich anhand des Flachmeißels (Lenkblechneigung 30°, Baustellenparameter Horn)

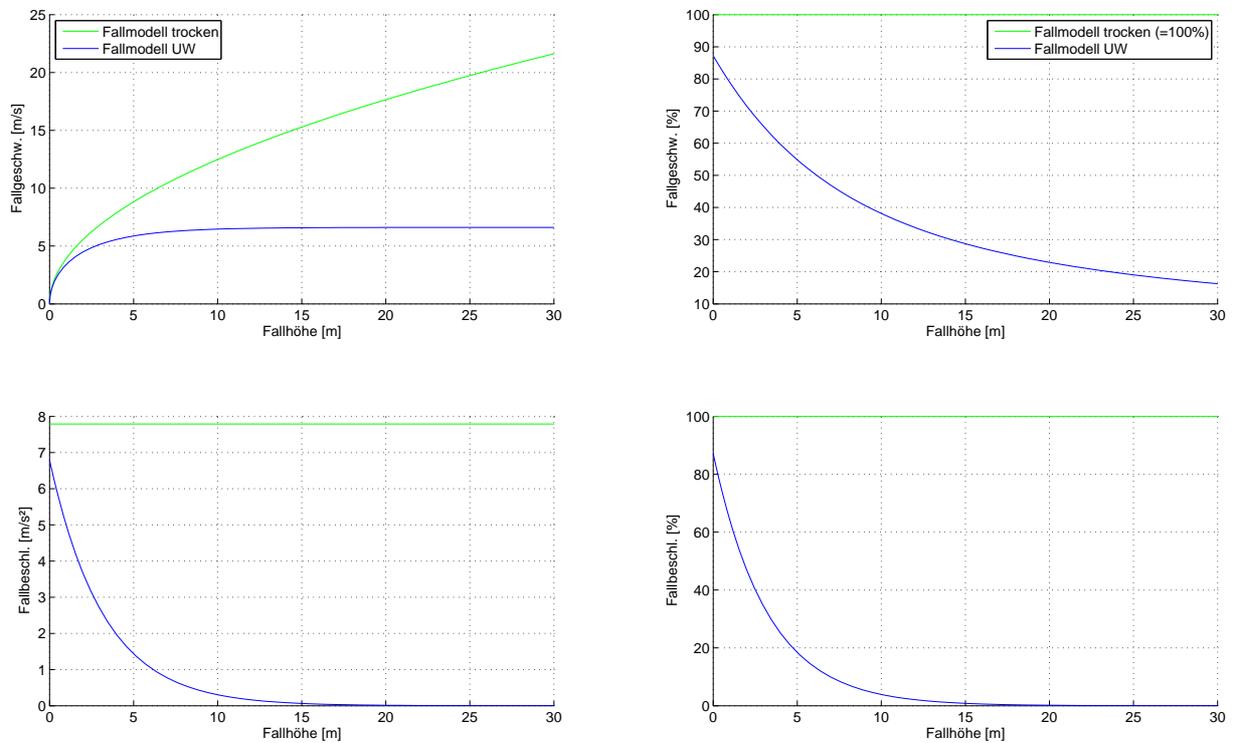


Abb. 5.8: Fallgeschwindigkeit und -beschleunigung des Flachmeißels (Lenkblechneigung 30°) in Abhängigkeit des zurückgelegten Fallweges (Baustellenparameter Horn)

Zur Veranschaulichung sind die Bewegungskurven, wie im letzten Abschnitt, exemplarisch für die Parameter der Baustellenmessung Horn mit dem Flachmeißel in Abb. 5.7 dargestellt. Dabei ist die Konvergenz des Fallmodells UW auch durch die gegen Null gehende Beschleunigung erkennbar. In der rechten Hälfte der Abbildung sind die Kurven wiederum für jeden Zeitschritt auf den freien Fall bezogen. Dadurch kann beispielsweise die Abminderung der Fallgeschwindigkeit für einen beliebigen Zeitpunkt "t" in Bezug auf den freien Fall abgelesen werden.

Für den praktischen Einsatz interessiert der Vergleich der Fallbewegung des Meißels im trockenen Bohrloch und unter Wasser in Abhängigkeit der Fallhöhe, welcher exemplarisch in Abb. 5.8 dargestellt ist. Im linken Teil der Abbildung sind die Fallgeschwindigkeit und -beschleunigung in Absolutwerten, im rechten Teil relativ, bezogen auf den Fallvorgang im trockenen Bohrloch aufgetragen. Bei Betrachtung der Kurven kann festgestellt werden, daß der Meißel beim Fallvorgang unter Wasser bereits

- nach 5 m Fallhöhe ca. 90%! seiner Endgeschwindigkeit erreicht hat, daß
- nach 10 m Fallhöhe die Fallgeschwindigkeit unter Wasser nur mehr ca. 52% jener Geschwindigkeit im trockenen Bohrloch beträgt und daß der Meißel
- nach ca. 15 m Fallhöhe seine maximale Endgeschwindigkeit erreicht hat.

Alle soeben getroffenen Aussagen gelten allerdings nur für den untersuchten Flachmeißel (Lenkblechneigung 30°) in Kombination mit den Baustellenparametern bei der Messung in Horn. Der wesentliche Parameter für diese starke Abminderung gegenüber dem Fallmodell im trockenen Bohrloch ist der Strömungswiderstand des Meißels, welcher vor allem durch die Geometrie vorgegeben ist (Stirnfläche, Lenkblechneigung, etc.). Folglich sind bei konstanter Fallmasse mit verschiedenen Geometrien auch sehr unterschiedliche Strömungswiderstände erzielbar (siehe Kap. 6, Numerische Strömungssimulationen). Für ebenfalls gleich bleibende Randbedingungen (Trägheitsmoment Seilwinde, Auslegerlänge Seilbagger, etc.) sind die Auswirkungen unterschiedlicher Strömungswiderstände am besten durch Nomogramme darstellbar (siehe Abb. 5.9 für eine Fallmasse $m_1=5200$ kg, Geräteparameter wie zuletzt gewählt). Durch die Verwendung solcher Nomogramme läßt sich sehr schnell die (erforderliche) Effizienz bzw. Leistung eines Meißels für den Einsatz unter Wasser abschätzen.

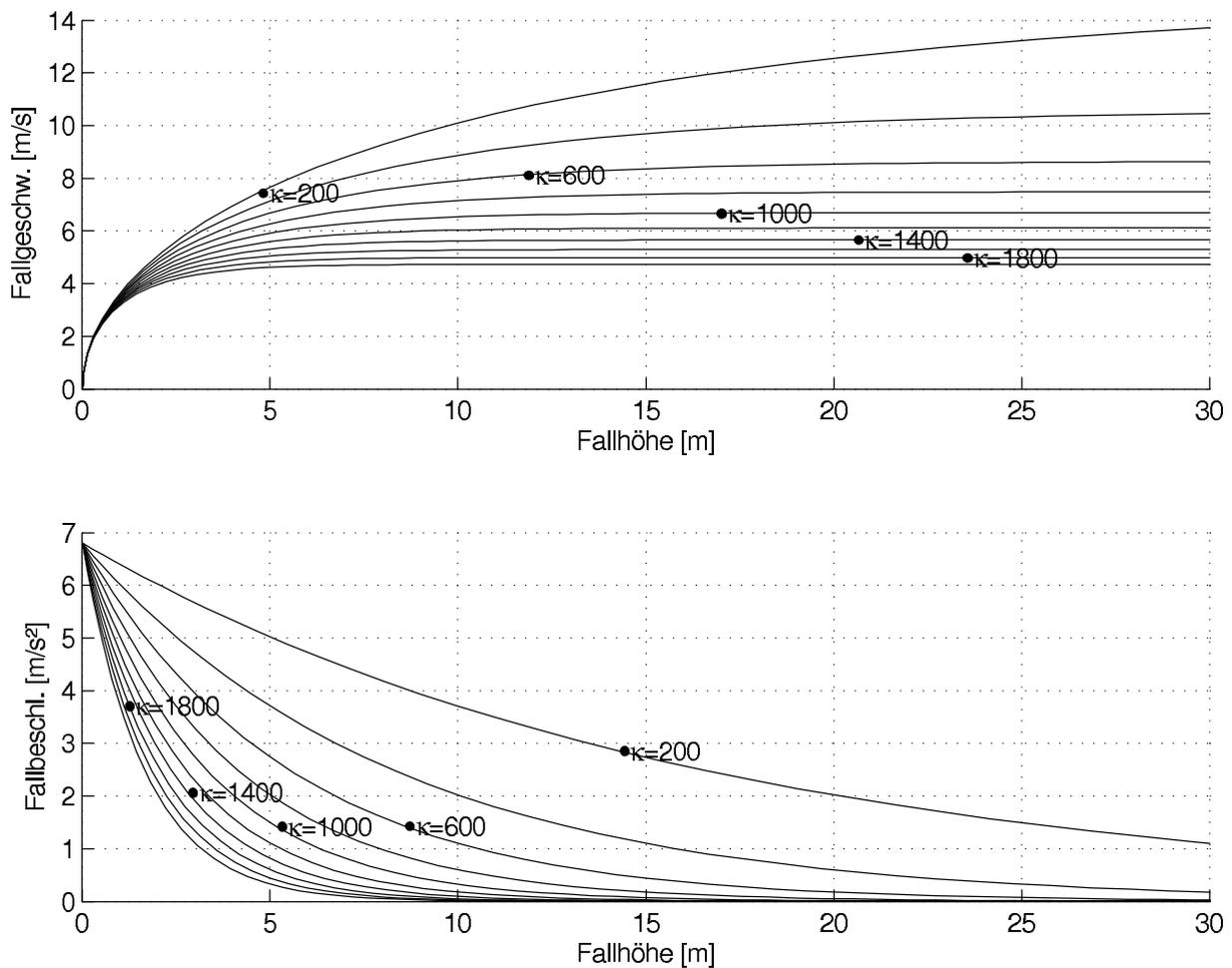


Abb. 5.9: Fallgeschwindigkeit und -beschleunigung einer Fallmasse von 5.2 to in Abhängigkeit des zurückgelegten Fallweges bei unterschiedlichen Strömungswiderständen

5.2.4 Analytische Lösung der Fallbewegung für Modellversuche

Für den Fallvorgang bei den Modellversuchen in Kap. 7 entfallen die Trägheitskräfte der Seilwinde, des Seiles und die geräteseitigen Reibungskräfte (Szenario 3, siehe Abb. 4.1). Dadurch vereinfacht sich die zu lösende Differentialgleichung zu Gl. 5.47 mit den angegebenen Koeffizienten.

$$DGL : \quad -A_1 \cdot \ddot{z} + A_3 - A_4 \cdot \dot{z}^2 = 0 \quad (5.47)$$

$$A_1 = m_1$$

$$A_3 = (m_1 - V_1 \rho_f) g$$

$$A_4 = \kappa$$

Die Lösung dieser Gleichung ist bereits aus dem letzten Abschnitt bekannt, weshalb man das Ergebnis sofort durch Einsetzen der neuen Koeffizienten gemäß den Gl. 5.48ff. erhält.

$$z = \frac{m_1}{\kappa} \cdot \ln \left[\cosh \left(\frac{\sqrt{(m_1 - V_1 \rho_f) g \kappa}}{m_1} \cdot t \right) \right] \quad (5.48)$$

$$\dot{z} = \sqrt{\frac{(m_1 - V_1 \rho_f) g}{\kappa}} \cdot \tanh \left(\frac{\sqrt{(m_1 - V_1 \rho_f) g \kappa}}{m_1} \cdot t \right) \quad (5.49)$$

$$\ddot{z} = \frac{(m_1 - V_1 \rho_f) g}{m_1} \cdot \left[1 - \tanh^2 \left(\frac{\sqrt{(m_1 - V_1 \rho_f) g \kappa}}{m_1} \cdot t \right) \right] \quad (5.50)$$

Die Fallgeschwindigkeit kann, wie zuvor, auch in Abhängigkeit des Fallweges dargestellt werden und ergibt sich durch Rücksubstitution der Koeffizienten A_i zu:

$$u(z) = \sqrt{\frac{(m_1 - V_1 \rho_f) g}{\kappa}} \left(1 - e^{-2 \frac{\kappa}{m_1} z} \right) \quad (5.51)$$

5.2.5 Rotationsbewegung des Meißels beim Fallvorgang

Nach den Berechnungen in Kap. 6 (Numerische Strömungssimulationen) verhält sich das zufolge der Strömung auf den Flachmeißel mit Lenkblechen einwirkende Moment proportional zum Quadrat der Fallgeschwindigkeit (Gl. 5.52). Analog zum Strömungswiderstandskoeffizienten κ läßt sich daher ein "Rotationskoeffizient" μ aus den Simulationsergebnissen ermitteln. Die Fallgeschwindigkeit des Meißels unter Wasser kann gemäß den Ausführungen der letzten Abschnitte mit sehr guter Näherung gemäß Gl. 5.53 angesetzt werden. Die Koeffizienten a und b lassen sich dabei entweder über die Ansätze des analytischen Fallmodells (mit z.B. numerischer Ermittlung der Strömungsparameter) oder anhand von Versuchen bestimmen. Damit wird das auf den Meißel einwirkende Drehmoment mit einer hyperbolischen Funktion der Zeit dargestellt (Gl. 5.55).

$$M_w = \mu \cdot v_m^2 \quad (5.52)$$

$$v_m(t) = a \cdot \tanh(b \cdot t) \quad (5.53)$$

$$\text{mit } a = \sqrt{\frac{A_3}{A_4}} \text{ und } b = \frac{\sqrt{A_3 A_4}}{A_1} \quad (5.54)$$

$$M_w = \mu a^2 \cdot \tanh^2(b \cdot t) \quad (5.55)$$

M_w ... Rotationsmoment zufolge der Strömung

μ ... Rotationskoeffizient [kg]

$v_m(t)$... Fallgeschwindigkeitsansatz des Meißels unter Wasser

a, b, A_i ... Koeffizienten der Fallgeschwindigkeitskurve

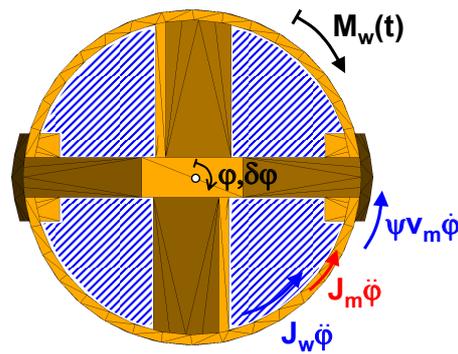


Abb. 5.10: Kräfteansatz am Meißel zur Bestimmung der Drehbewegung

Vernachlässigt man die für die Verdrehung des Meißels notwendige Energie zur Verdrillung des Seiles, dann lassen sich die Rotationskräfte am Meißel gemäß Abb. 5.10 ansetzen. Dabei muß das zufolge der Umströmung auf den Meißel einwirkende Moment die Trägheit des Meißels und die vom Meißel "eingeschlossene" Wassermenge überwinden. Als träges Wasservolumen wird näherungsweise ein Zylinder herangezogen, der den Meißel exakt umschließt und von dem das Meißelvolumen im Inneren abgezogen wird. Gemäß diesem Modell muß bei einer Rotation des Meißels also auch die "eingeschlossene" Wassermenge in Rotation versetzt werden.

Ein weiteres Widerstandsmoment M^{RS} muß durch die Viskosität der Flüssigkeit zwischen dem rotierenden Meißel und der ruhenden Verrohrung überwunden werden. Im analytischen Modell wird dieser Widerstand näherungsweise im Ringspalt zwischen dem den Meißel umschließenden Zylinder und der Verrohrung angesetzt. Dabei ergibt sich die Schwierigkeit, daß dieser Widerstand nicht nur von der Rotationsgeschwindigkeit, sondern auch von der Fallgeschwindigkeit des Meißels abhängen wird (aufgrund der zunehmenden Turbulenzbildung). In Gl. 5.56 wird der Widerstand daher als Funktion der den Meißel umschließenden Mantelfläche, des Hebelsarmes zum Rotationszentrum, der Dichte der Flüssigkeit und der Rotations- und Meißelgeschwindigkeit angesetzt. Damit ergibt sich, analog zu den Gleichungen in 5.2.2 (Kräfteansatz am Meißel), ein zum Quadrat der Geschwindigkeit proportionaler Term, der sich nun allerdings aus zwei verschiedenen Geschwindigkeiten zusammensetzt (siehe Gl. 5.56).

Die Gültigkeit dieses Ansatzes konnte durch numerische Berechnungen in Abschnitt 6.8 auf S. 101 klar bestätigt werden. Anhand dieser Simulationen lassen sich auch die notwendigen Koeffizienten der Gleichung ermitteln, wobei aus Gründen der Übersicht wieder ein "Gesamtmomentenkoeffizient" ψ definiert wird. In Summe ergibt sich damit ein Wi-

derstandsmoment M^{RS} , welches der Drehrichtung entgegengesetzt ist.

$$M^{RS} = \frac{1}{2} \rho A_M r_M c_m \cdot v_m \cdot v_r \quad (5.56)$$

$$\text{mit } v_r = r_M \cdot \dot{\varphi} \quad \text{und} \quad \psi = \frac{1}{2} \rho A_M r_M^2 c_m$$

$$M^{RS} = \psi \cdot v_m \cdot \dot{\varphi} \quad (5.57)$$

M^{RS} ... Widerstandsmoment im Ringspalt [Nm]

ψ ... Gesamtmomentenkoeffizient [kgm]

c_m ... Momentenkoeffizient [1]

v_m ... Fallgeschwindigkeit des Meißels [m/s]

v_r ... Tangentialgeschw. des Meißels im Ringspalt zufolge der Rotation [m/s]

r_M ... Radius des Zylinders

A_M ... Mantelfläche des umschließenden Zylinders

Im dynamischen Gleichgewicht muß die Summe aller virtuellen Arbeiten bei infinitesimaler Verdrehung $\delta\varphi$ wieder verschwinden:

$$\delta W = M_w(t) \cdot \delta\varphi - \psi v_m(t) \dot{\varphi} \cdot \delta\varphi - (J_m + J_w) \ddot{\varphi} \cdot \delta\varphi = 0 \quad (5.58)$$

Durch Einsetzen der zeitabhängigen Momenteneinwirkung M_w läßt sich obige Gleichung umformen und man erhält eine Differentialgleichung zweiten Grades mit den veränderlichen Koeffizienten c_1 und c_2 (siehe Gl. 5.59ff.). Diese läßt sich numerisch, für einen bestimmten Anwendungsfall, lösen und die Rotationsbewegung angeben. Bei der Lösung interessiert vor allem wieder die Angabe der Rotation in Abhängigkeit der zurückgelegten Fallweges, weil nur dieser während des Baustelleneinsatzes bekannt und veränderbar ist. In Abb. 5.11 u. 5.12 ist die Rotationsbewegung des Flachmeißel-Basismodells mit unterschiedlicher Lenkblechanstellung in Abhängigkeit der Fallzeit und der Fallhöhe für die Baustellenparameter Horn angegeben (Plan des Flachmeißels, siehe Abb. 6.6 auf S. 75).

$$DGL: \quad \ddot{\varphi} + \frac{\psi a}{J_m + J_w} \tanh(b \cdot t) \cdot \dot{\varphi} = \frac{\mu a^2}{J_m + J_w} \tanh^2(b \cdot t) \quad (5.59)$$

$$\ddot{\varphi} + c_1(t) \cdot \dot{\varphi} = c_2(t) \quad (5.60)$$

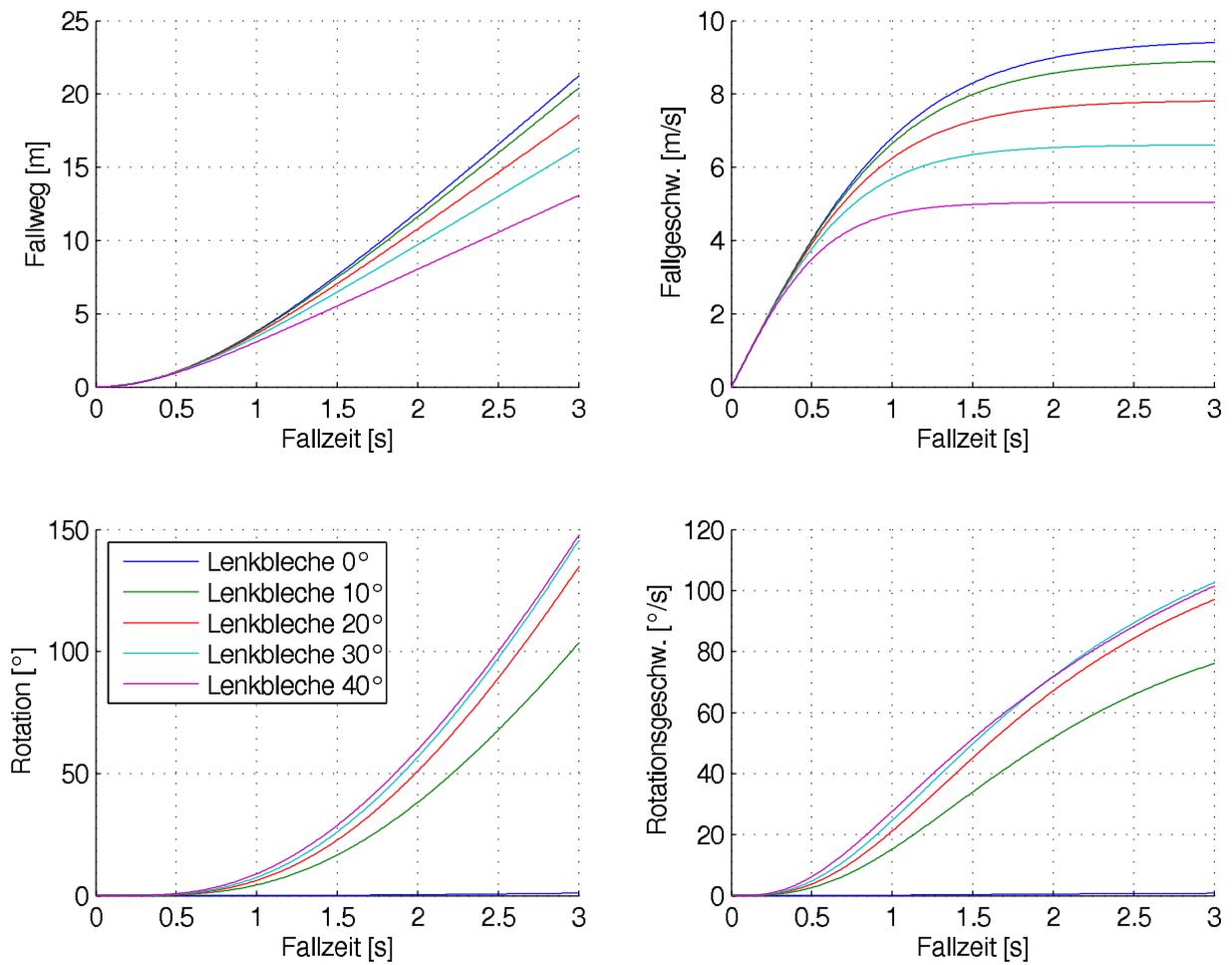


Abb. 5.11: Rotationsbewegung für das Flachmeißel-Basismodell in Abb. 6.6 in Abhängigkeit von der Fallzeit (mit unterschiedlicher Lenkblechanstellung)

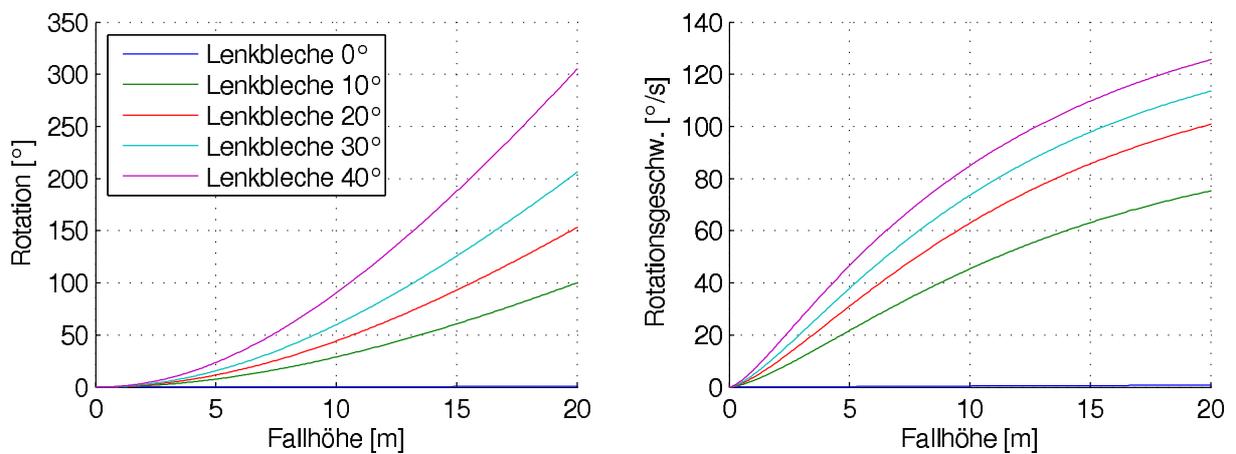


Abb. 5.12: Rotationsbewegung für das Flachmeißel-Basismodell in Abb. 6.6 in Abhängigkeit von der Fallhöhe (mit unterschiedlicher Lenkblechanstellung)

5.3 Überlegungen zum Reibungsanteil beim Fallvorgang

In den letzten beiden Abschnitten wurden die Fallvorgänge ohne Berücksichtigung der Reibungsverluste betrachtet. Es werden aber vor allem an folgenden Elementen Reibungswiderstände auftreten:

- Gleitreibung zwischen Meißel und Verrohrung
- Seilreibung zwischen Seil und Seilrollen am Ausleger bzw. an der Seiltrommel
- Reibung in den Lagern der Seilrollen und der Seilwinde
- Reibung in der Kupplung bzw. Bremse der Winde

Die Reibungswiderstände sind grundsätzlich schwer zu erfassen, da sie für jede betrachtete Gerätekonfiguration und somit auch für die durchgeführten Messungen variieren können. Beispielsweise wird die (eventuell) auftretende Reibung zwischen Meißel und Verrohrung unter anderem vom Spalt zwischen Meißel und Verrohrung, der Führung des Meißels und darüber hinaus von dem Geschick des Baggerfahrers abhängen. An dieser Stelle sollen daher vor allem Überlegungen durchgeführt werden, mit welcher Proportionalität die Reibungskräfte in die aus den letzten beiden Abschnitten hergeleiteten Gleichungen eingehen (z.B. als konstanter Term oder proportional zur Fallgeschwindigkeit). Dies hat den Vorteil, daß für die Regressionskurven in der Versuchsauswertung (Baustellenmessungen) ein möglichst realitätsnaher Ansatz getroffen werden kann.

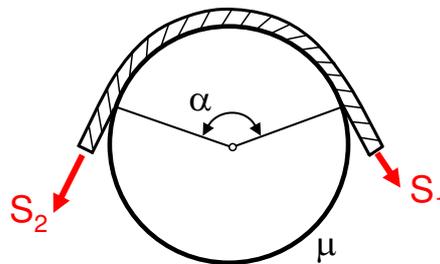


Abb. 5.13: Seilreibung an der Seilrolle nach Euler Eytelwein

Die Seilreibung zwischen Seil und Seilrolle bzw. -trommel ist von der Seilkraft, dem Umschlingungswinkel und dem (Haft)Reibungskoeffizienten abhängig. Die Grundlage hierfür bildet die "Euler-Eytelwein" Formel (aus [17]):

$$S_2 = S_1 \cdot e^{\mu\alpha} \text{ mit } S_2 \geq S_1 \quad (5.61)$$

S_i ... Seilkräfte

α ... Umschlingungswinkel

μ ... Reibungskoeffizient

Die einzusetzende Seilkraft ist während des Abtriebes gegenüber dem statischen Zustand stark vermindert. Durch die Umlenkung über die Seilrollen am Auslegerende wird sie bis zur Seiltrommel weiter reduziert. Für den Fall im trockenen Bohrloch kann die Seilkraft näherungsweise konstant angesetzt werden und beträgt für die schon im vorletzten Abschnitt betrachteten Baustellenparameter $F_s = m_1(g - \ddot{z}) \approx 9,5 \text{ kN}$. Setzt man einen konstanten Haftreibungskoeffizienten μ in Gl. 5.61 ein, dann ergibt sich eine, während des Fallvorganges konstante, Seilreibungskraft $F_R = S_2 - S_1$ für jede Umlenkung.

Das Reibungsmoment in den Lagern setzt sich unter anderem aus folgenden Anteilen zusammen:

- Belastung
- Drehzahl
- Schmierstoffeigenschaften und -zustand
- Dichtungsreibung

Aufgrund der Vielzahl dieser Einflußgrößen kann das Reibungsmoment nur näherungsweise (für einen konstanten Betriebszustand) berechnet werden. Es setzt sich grundsätzlich aus einem drehzahl- und lastabhängigen Term zusammen ([34] u. [37]). Für den ersten Term schätzen wir zunächst die Drehzahl bei einer maximalen Fallgeschwindigkeit von $v_{max} \approx 20 \text{ m/s}$ ab. Bei dieser Seilgeschwindigkeit ergeben sich maximale Drehzahlen von $\approx 11 \text{ Umdr/s}$ an der Seiltrommel und $\approx 16 \text{ Umdr/s}$ an den Seilrollen. Nach [19] ist die Lagerreibungskraft bei niedrigen Drehzahlen beinahe unabhängig von der Geschwindigkeit. Daher läßt sich, unter Beachtung dieser maximalen Geschwindigkeit, die Lagerreibung in allgemeiner Weise proportional zur Belastung ansetzen:

$$M_R = \mu \cdot F_r \frac{d_M}{2} \quad (5.62)$$

$M_R \dots$ Reibungsmoment

$\mu \dots$ Reibungskoeffizient

$F_r \dots$ radiale Belastung

$d_M \dots$ Lagerdurchmesser

Bei gleich bleibender Seilkraft ergibt sich für das Lager eine konstante Belastung und damit ein konstantes Reibungsmoment. In Summe ergibt sich damit für die Seilreibung und die Lagerreibung ebenfalls eine konstante Kraft während des Fallvorganges. Für die Berücksichtigung konstanter Reibungswiderstände im Kräfteansatz erweitert sich dann lediglich der Term A_3 in der Differentialgleichung 5.9 um die Reibungskraft. Die allgemeine

Lösung der (vereinfachten) Fallgleichung läßt sich folglich wie zuvor mit Gl. 5.63 angeben. Für den Fallvorgang unter Wasser gelten aufgrund der noch geringeren Seilkräfte ähnliche Überlegungen, sodaß hier die allgemeine Lösung mit Gl. 5.64 angegeben werden kann.

$$\text{Fallmodell trocken: } z(t) = \frac{1}{2} \cdot c_1 \cdot t^2 \quad (5.63)$$

$$\dot{z}(t) = c_1 \cdot t$$

$$\text{Fallmodell UW: } z(t) = c_1 \cdot \ln[\cosh(c_2 \cdot t)] \quad (5.64)$$

$$\dot{z}(t) = c_3 \cdot \tanh(c_2 \cdot t)$$

6 Numerische Strömungssimulationen

6.1 Einleitung

Die strömungstechnische Untersuchung verschiedener Meißeltypen ist ein wichtiger Beitrag für die Beschreibung der Fallbewegung unter Wasser. Nur durch die Kenntnis der Strömungseigenschaften können Empfehlungen für den Einsatz, sowie weitere Optimierungen der Werkzeuge getroffen werden. Hierfür bieten sich numerische Strömungssimulationen in idealer Weise an, weil damit im Vergleich zu anderen Ermittlungsmethoden (Großversuche, Modellversuche) wesentlich mehr Ergebnisse mit geringerem (Zeit)aufwand erzielbar sind. Für die Ermittlung von absoluten Strömungsparametern (z.B. Strömungswiderstandsbeiwerte, die in analytischen Modellen weiterverwendet werden) empfiehlt es sich jedoch, zumindest einen Teil der Ergebnisse mit anderen Methoden zu überprüfen (siehe Kap. 7, Modellversuche). Für den unmittelbaren Vergleich von Meißelvarianten ist es hingegen ausreichend, die Ergebnisse direkt gegenüberzustellen (z.B. Auswirkung der Variation der Lenkblechanstellung).

An dieser Stelle sollen daher verschiedene Meißeltypen und Meißeleigenschaften mit numerischen Methoden untersucht werden. Die Ergebnisse können dann gegenübergestellt und Optimierungen für die Werkzeuge gefunden werden. Außerdem lassen sich die ermittelten Parameter in den analytischen Fallmodellen weiterverwenden.

Als Simulationsprogramm wurde das Softwareprogramm PowerFLOW der Exa Corporation verwendet, welche sich sehr gut zur Berechnung von Strömungswiderstandskoeffizienten eignet.

6.2 Simulationsprogramm

PowerFlow stellt ein Verfahren der numerischen Strömungsdynamik dar, mit dem sich strömungstechnische Probleme approximativ lösen lassen. Es ist für einen weiten Anwendungsbereich in der Fluidodynamik zur Lösung von stationären und instationären Problemen geeignet. Die zugrundeliegende Technologie des Programmes nennt sich "Digital

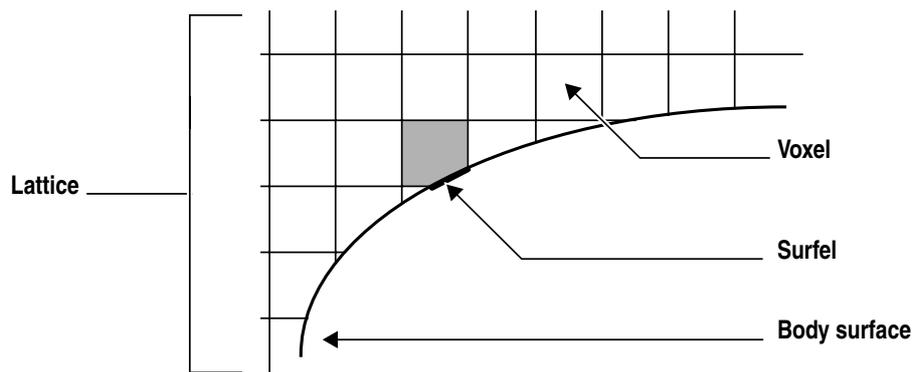


Abb. 6.1: Berechnungsgitter in PowerFLOW [13]

Physics” und basiert auf einer erweiterten Lattice-Boltzmann Methode. Es werden Teilchendistributionen in einem diskreten Gitter beobachtet, die sich in diskreten Richtungen und Geschwindigkeiten zu diskreten Zeitpunkten bewegen. Das Simulationsvolumen muß dabei in ein gleichmäßiges Berechnungsgitter aus kubischen Elementen (Voxels) zerlegt werden, in denen sich die Teilchen befinden. Für die Interaktion mit Körpern im Fluid wird an den Schnittflächen der Voxels mit den Oberflächen ein Netz aus Flächenelementen erzeugt (Surfels, siehe Abb. 6.1). Bei der Berechnung kommt es durch die Teilchenbewegungen zu Kollisionen der Partikel, die nach festgelegten Regeln aufgelöst werden und zu diskreten Zustandsveränderungen der Partikel führen. Ebenso werden die Kollisionen von Teilchen und Surfels entsprechend den festgelegten Randbedingungen aufgelöst. Dies garantiert die Anwendung einer diskreten kinetischen Theorie auf die Partikeldynamik und führt zur vollständigen Einhaltung der Gleichungen eines fluiden Kontinuums hinsichtlich der makroskopischen Strömungseigenschaften. Die Strömungsinformationen können dabei explizit ohne Lösung nichtlinearer partieller Differentialgleichungen und Akkumulation von Rundungsfehlern erhalten werden und führen damit zu einer hohen Stabilität des Berechnungsprozesses ([11] u. [13]).

6.3 Modellaufbau

6.3.1 Vorbereitung der Meißelmodelle

Die geometrischen Grundlagen der hier gerechneten Modelle wurden von realen Werkzeugen übernommen (sog. Basismodelle). Einzelne Varianten entstanden daher immer aus den Basismodellen und wurden zum Zweck der Meißeloptimierung untersucht. Die Abmessungen der Meißeltypen mußten daher in ein CAD-Programm übertragen und als dreidimensionale Modelle für die Berechnungen vorbereitet werden. Diese konnten dann

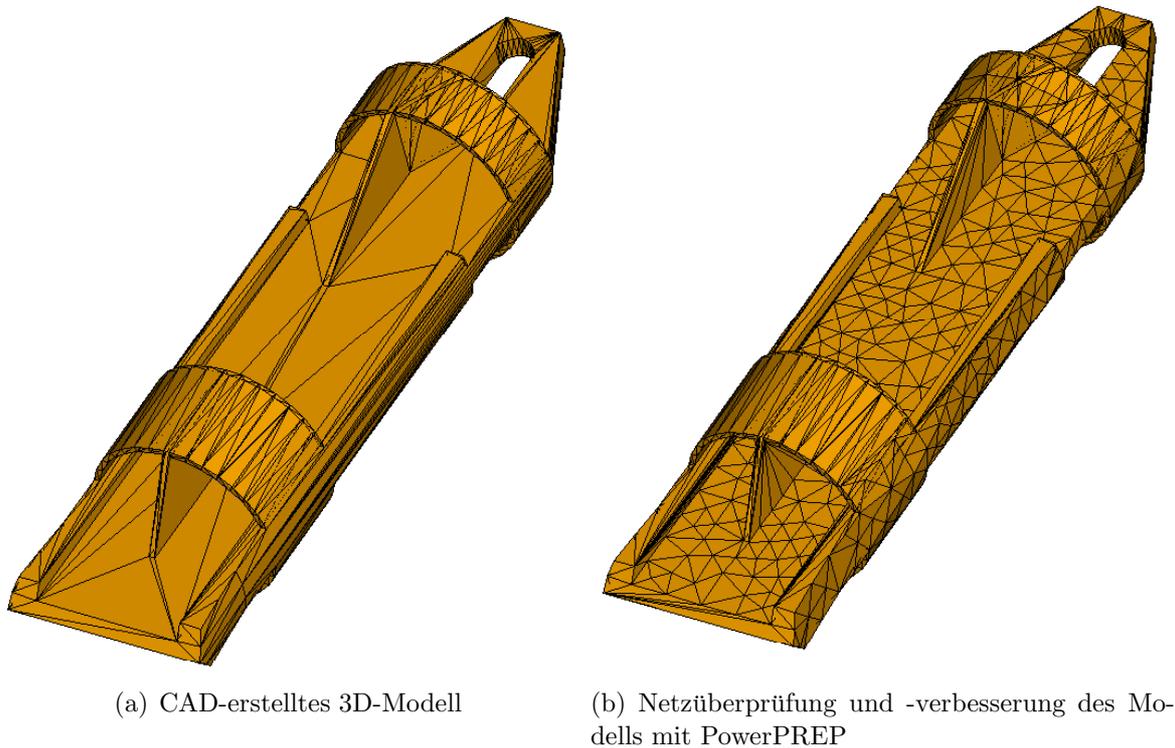


Abb. 6.2: Flachmeißelmodell für die Simulationsberechnungen in PowerFLOW

über die Stereolithografie¹ Schnittstelle in das Programm "PowerPREP" zur Überprüfung und Optimierung importiert werden (siehe Abb. 6.2). Bei diesem Schritt war besonders auf Fehlstellen (z.B. Überschneidungen von Facets) und Geschlossenheit der Körperoberfläche zu achten. Die Optimierung der Modelle für die numerische Berechnung konnte durch die Anzahl der Oberflächenelemente und deren Seitenverhältnisse vorgenommen werden. Darüber hinaus ließen sich wertvolle Informationen der Modelle für die spätere Auswertung auslesen, wie beispielsweise die Anzahl der Knoten und Elemente, Informationen über die Geometrie, usw.

6.3.2 Aufbau der Simulationsmodelle

Der generelle Aufbau eines Simulationsmodells ist in Abb. 6.3 und 6.4 dargestellt. Der Meißel befindet sich dabei in der Mitte eines Zylinders und ist in allen translatorischen und rotatorischen Richtungen fixiert. Der Zylinder besitzt einen Durchmesser von 1.1 m und stellt die Verrohrung dar. Die beiden Quader an den Enden des Zylinders dienen zur Definierung der Randbedingungen am Eintritts- und Austrittsquerschnitt des Rohres. Der das komplette Modell umfassende Quader beschreibt die Abgrenzung des Simulationsvo-

¹Darstellung der Oberfläche eines Körpers mit Dreieckselementen ("Facets")

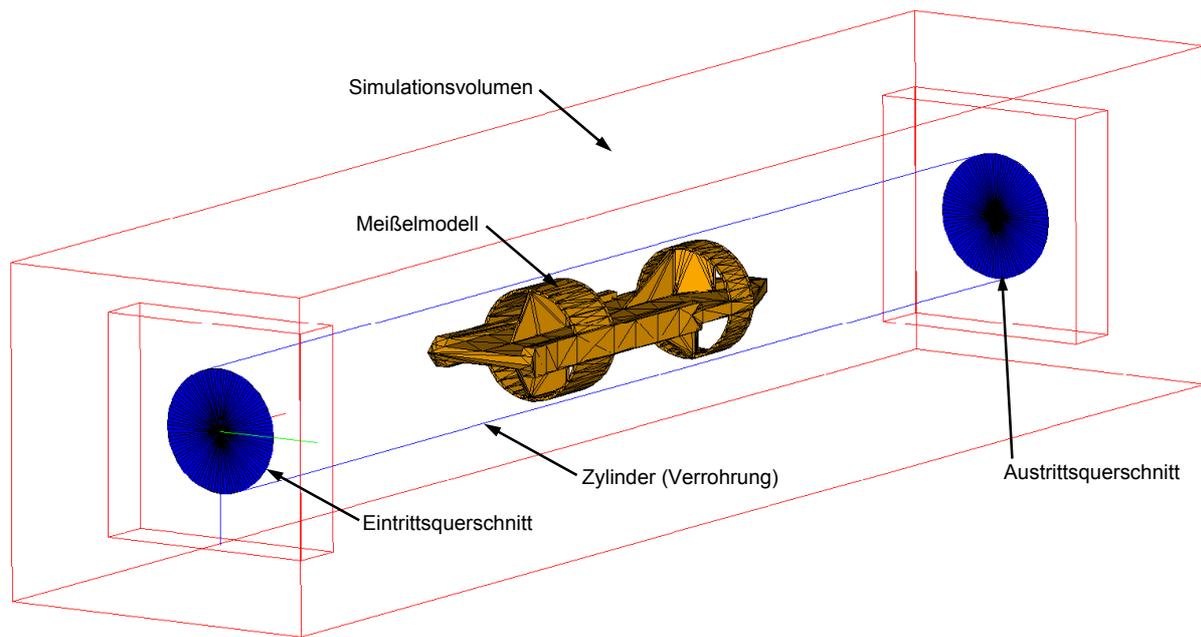


Abb. 6.3: Schrägansicht des Simulationsmodells in Powerflow

lumens, in welchem die für die Berechnung erforderliche Diskretisierung (Gittererstellung) durchgeführt wird. Am Eintrittsquerschnitt und an der Verrohrung wird eine vorgegebene Geschwindigkeit definiert, mit welcher der Meißel angeströmt wird. Dieser stellt ein Hindernis für die Rohrströmung dar, auf welches sich eine Widerstandskraft ausbildet. Das Modell läßt sich am besten anhand eines "Beobachters am Meißel" nachvollziehen. Für diesen ist der Meißel während der Fallbewegung sowohl translatorisch als auch rotatorisch in Ruhe und wird vom Fluid umströmt. Sowohl das Fluid als auch die Verrohrung bewegen sich für den Beobachter am Meißel mit der Fallgeschwindigkeit des Meißels. Genau dies wird durch den Modellaufbau simuliert: Während im realen Fallvorgang der Meißel sich in der zunächst ruhenden Flüssigkeitssäule bewegt, ist der Meißel im Simulationsmodell translatorisch und rotatorisch fixiert. Die Geschwindigkeit, mit welcher sich der Meißel bewegt, wird hier durch die Geschwindigkeit des Fluids am Eintrittsquerschnitt v_{in} simuliert. Die, den Meißel umschließende, Verrohrung ist durch eine Zylinderwand dargestellt, dessen Rand sich dann ebenfalls mit der Geschwindigkeit $v_w = v_{in}$ bewegen muß. Im Modell wird dies durch eine "sliding wall boundary condition" erzeugt, die eine zur Zylinderoberfläche parallele Bewegung ermöglicht.

Die Länge der Verrohrung entspricht ungefähr der dreifachen Länge des Meißels, wobei der Meißel in der Mitte positioniert ist. Das erste Drittel des Zylinders ist erforderlich, damit sich die über den gesamten Eintrittsquerschnitt vorgegebene Geschwindigkeit zu einer Rohrströmung ausbilden kann. Wenn die Flüssigkeitsteilchen den Meißel erreichen, verringert sich der Durchflußquerschnitt und die Strömungsgeschwindigkeit erhöht sich

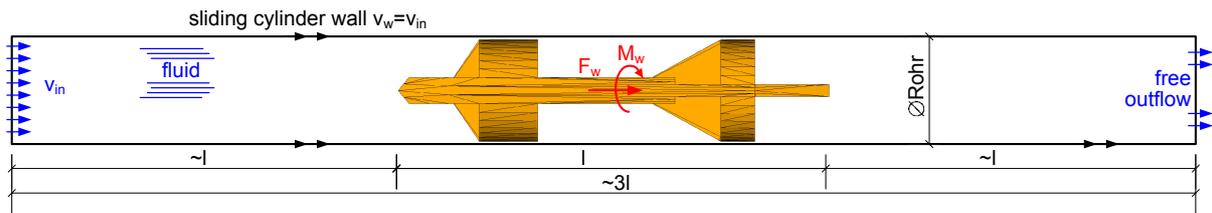


Abb. 6.4: Geometrie des Simulationsmodells "1" in Powerflow mit Randbedingungen

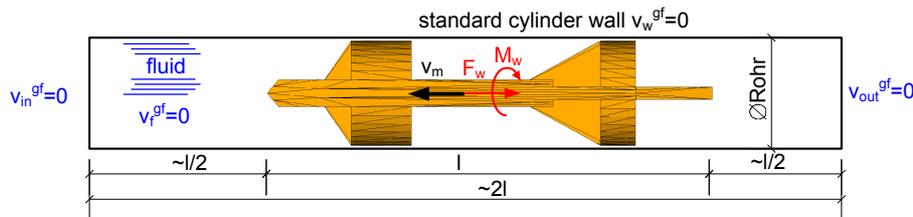


Abb. 6.5: Geometrie des Simulationsmodells "2" in Powerflow mit Randbedingungen

aufgrund der Kontinuitätsbedingung. Durch die Ablenkung der Fluidteilchen und die Überströmung der Meißeloberfläche erfährt der Meißel eine Widerstandskraft F_w . Wenn der Meißel mit entsprechenden Lenkblechen ausgestattet ist, bildet sich durch das Ablenken der Strömung außerdem ein Drehmoment M_w auf den Meißel aus (siehe auch Abschnitt 5.2.2). Das letzte Drittel des Zylinders dient zur Beobachtung der Turbulenzen bzw. Wirbelbildung und Beruhigung der Strömung, bevor diese am Ende des Zylinders mit freiem Ausfluß austritt.

Im Zuge der Berechnungen wurde ein weiterer Modellaufbau verwendet, der eine eingeschränkte Bewegung von Körpern im Simulationsmodell zuläßt und mit unterschiedlichen Bezugssystemen arbeitet. Dabei muß die Bewegung (oder Unverschieblichkeit) jedes Elementes der Simulation (Körper, Fluid, etc.) auf ein Bezugssystem referenziert werden. Als Systeme dienen einerseits der sogenannte "ground-fixed frame", welcher das "globale" Koordinatensystem darstellt, andererseits der "body-fixed frame", welcher im Zentrum des Meißels definiert wird (nach [14]). Für den body-fixed frame kann eine Geschwindigkeit vorgegeben werden, die der Fallgeschwindigkeit des Meißels v_m entspricht. Da nun die Bewegung für den Meißel im Simulationsmodell vorgegeben wird, muß das Fluid und die Zylinderwand in Ruhe sein und daher mit Geschwindigkeit Null relativ zum ground-fixed frame definiert werden. An den Ein- und Austrittsquerschnitten wird ebenfalls die Geschwindigkeit $v=0$ relativ zum ground-fixed frame definiert (siehe Abb. 6.5). Der Vorteil dieses Aufbaues besteht darin, daß die Verrohrung nun kürzer modelliert werden kann und sich die Berechnungszeit dadurch verkürzt. In den numerischen Untersuchungen wurden beide Modelle verwendet und auch Vergleichsberechnungen durchgeführt.

Modellversion	1	2
Fluidgeschwindigkeit (t=0)	v_{in}	0
Meißelgeschwindigkeit	0	v_m
Eintrittsquerschnitt	v_{in}	0
Austrittsquerschnitt	P_{char}	0
Verrohrung	v_{in}	0

Tab. 6.1: Anfangs- und Randbedingungen der beiden Simulationsmodelle

6.3.3 Anfangs- und Randbedingungen

In den Simulationsberechnungen gemäß Abb. 6.4 wird für das Fluid eine "impulsive start" Anfangsbedingung gewählt. Damit besitzt die Flüssigkeit im Zylinder zum Zeitpunkt $t=0$ bereits die charakteristische Geschwindigkeit $v_f = v_{char} = v_{in}$. Anhand dieser Vorgangsweise werden in der Berechnung relativ rasch stationäre Verhältnisse erzielt. Im zweiten Modellaufbau gemäß Abb. 6.5 wird eine Anfangsgeschwindigkeit v_m für den Meißel vorgegeben, wohingegen die Geschwindigkeit der Flüssigkeit zum Zeitpunkt $t=0$ gleich Null gewählt wird. Die weiteren Randbedingungen der beiden Modelle sind bereits eingehend im Modellaufbau erläutert worden. Alle Anfangs- und Randbedingungen sind zusammenfassend in Tab. 6.1 aufgelistet. Da der Strömungswiderstand von der Relativgeschwindigkeit zwischen Meißel und Flüssigkeit abhängt, müssen die Simulationen für verschiedene Fallgeschwindigkeiten bzw. Anströmgeschwindigkeiten erfolgen. Jedes Meißelmodell muß daher mehrmals mit den zu erwartenden Fallgeschwindigkeiten durchgerechnet werden (z.B.: $v_{in} = 1, 2, 4, 7$ und 10m/s).

6.3.4 Materialeigenschaften und Modellparameter

Die Flüssigkeit in der Verrohrung wird als Wasser mit den folgenden Eigenschaften modelliert:

- Temperatur: 10°
- Dichte: 1000 kg/m^3
- Kinematische Viskosität: $1.3\text{e-}6\text{ m}^2/\text{s}$

Das Rohr und der Meißel sind als feste Körper definiert, deren Oberflächen eine entsprechende Rauigkeit aufweisen:

- Rauigkeit Meißel und Rohr: $k = 0.1\text{mm}$

Außerdem sind noch folgende Parameter im Modell festgelegt:

- Charakteristischer Druck: 101 325 Pa
- Charakteristische Geschwindigkeit: variabel (z.B. v_{in} bzw. $v_m=1.0 - 10.0$ m/s)
- Charakteristische Länge: Rohrrinnendurchmesser bzw. hydraulischer Durchmesser
- Gitterauflösung entlang char. Länge: variabel (meist 80 Voxels/Rohrrinnendurchmesser)
- Zeitschritte: variabel (meist 40 000)

6.4 Berechnungsvorgang und Berechnungsdauer

Das Modell wird zunächst diskretisiert und die Simulation in mehrere Berechnungsteile aufgesplittet. Damit läßt sich die Rechenlast auf mehrere Berechnungsknoten bzw. Prozessoren aufteilen und die Rechenzeit deutlich reduzieren. Die gegenständlichen Simulationen wurden auf einem IBM Clustersystem mit Power5+ Prozessoren gerechnet. Dieses besteht aus mehreren Berechnungsknoten mit jeweils zwei CPUs und sechzehn GB Hauptspeicher. Für das, im nächsten Abschnitt beschriebene, Simulationsmodell mit ca. 4.5 Mio Voxels und 40.000 Zeitschritten hat sich dabei die Berechnung auf einem Knoten mit zwei CPUs als zeiteffizienteste Methode erwiesen. In Tabelle 6.2 sind die Berechnungszeiten der Parameterstudien des Flachmeißels mit unterschiedlichen Lenkblechneigungen exemplarisch aufgelistet. Für je eine Berechnung (z.B. FM-LB30 $v=4$ m/s) wird eine Zeitdauer von etwa 92 Stunden benötigt. Längere Berechnungszeiten in Tab. 6.2 sind dabei auf zusätzlich laufende Prozesse am Cluster zurückzuführen und wurden nicht durch die Simulationsberechnungen verursacht.

6.5 Exemplarische Auswertung am Flachmeißelmodell

6.5.1 Allgemeines

Wie bereits im Modellaufbau beschrieben, muß ein einzelnes Meißelmodell mit unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten durchgerechnet werden, um den Strömungswiderstand bei unterschiedlichen Fallgeschwindigkeiten zu ermitteln. Für das im folgenden beschriebene Flachmeißelmodell sind die Anströmgeschwindigkeiten mit $v_{in} = 1, 2, 4, 7$ und 10 m/s gewählt worden (fünf Berechnungen). Diese sollen den Geschwindigkeitsbereich des Meißels während des Fallvorganges unter Wasser möglichst gut bis zur Endgeschwindigkeit abdecken.

Modell	FM-LB00	FM-LB10	FM-LB20	FM-LB30	FM-LB40
Knoten	1	1	1	1	1
CPUs	2	2	2	2	2
Voxels	4 552 680	4 558 416	4 560 072	4 560 056	4 558 872
Surfels	443 312	442 095	442 772	442 758	444 934
Zeitschritte	40 000	40 000	40 000	40 000	40 000
Rechenzeit					
v=1m/s	328 748	330 017	334 224	604 092	330 403
v=2m/s	328 727	460 879	336 139	539 180	331 335
v=4m/s	329 225	553 194	336 292	329 579	423 739
v=7m/s	329 091	553 762	336 608	329 808	554 645
v=10m/s	328 983	330 155	335 141	329 854	331 082
Zeitmedian [s]	328 983	460 879	336 139	329 854	331 335
[h]	91.38	128.02	93.37	91.63	92.04
[d]	3.81	5.33	3.89	3.82	3.83

Tab. 6.2: Berechnungsparameter und -dauer am Beispiel des Flachmeißels mit unterschiedlicher Lenkblechneigung

6.5.2 Geometrie des Flachmeißels (Basismodell)

Die ersten Baustellenmessungen und folglich auch numerischen Untersuchungen wurden mit dem in Abb. 6.6 dargestellten Flachmeißel durchgeführt (siehe auch Kap. 8, Baustellenmessungen). Dieser hat eine Länge von ca. 4.2 m und einen Durchmesser von 100 cm. Im vorderen Teil erweitert sich die Schneide auf insgesamt 107 cm. Der Meißel besitzt zwei Führungsringe, wobei im hinteren Ring zwei gegensätzlich orientierte Lenkbleche mit einer Neigung von 30° angeschweißt sind. Diese sollen eine Rotation des Meißels beim Fallvorgang unter Wasser bewirken. Im vorderen Teil sind an den Seiten des Hauptbleches Stege angebracht, die für eine zusätzliche Masse sorgen. Damit besitzt der Meißel eine Gesamtmasse von etwa 5.2 Tonnen. Der Meißel ist aus Stahl gefertigt, wobei die Schneide mit besonders verschleißfestem Material (Hardox Verschleißblech) ausgeführt ist.

6.5.3 Auswertung

Während der Berechnung können die auf den Meißel einwirkenden Kräfte aufgezeichnet werden. Dabei wird die vektorielle Kraft pro Oberflächenelement (Surfel) für die angegebenen Zeitschritte gespeichert (hier: alle zehn Zeitschritte erfolgt eine Aufzeichnung). In Abhängigkeit des Zeitschrittes kann somit die Gesamtkraft auf den Meißel in Anströmrichtung aufsummiert werden. In gleicher Weise läßt sich auch das Moment auf den Meißel

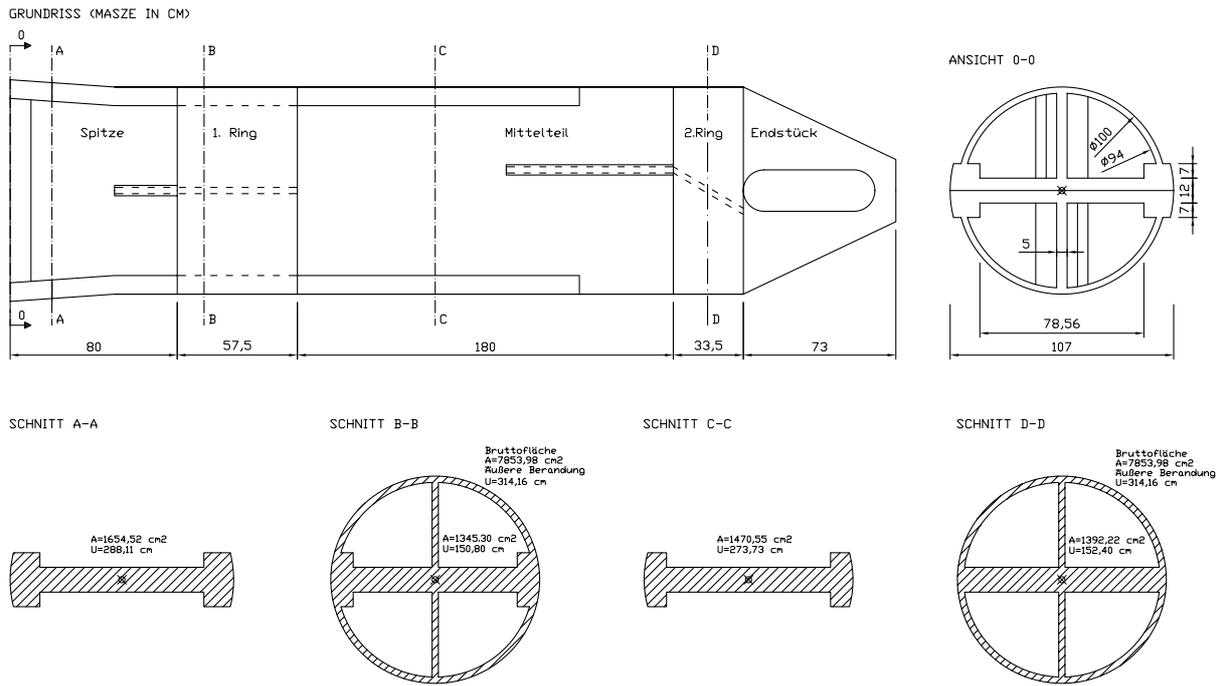


Abb. 6.6: Abmessungen des Flachmeißel-Basismodells

um einen beliebigen Referenzpunkt bzw. um seine Längsachse bestimmen [14]:

$$\vec{F} = \sum_{\text{surfels } i} \vec{F}_i \tag{6.1}$$

$$\vec{M} = \sum_{\text{surfels } i} (\vec{c}_i - \vec{r}_{ref}) \times \vec{F}_i \tag{6.2}$$

\vec{c}_i ... Vektor zum Schwerpunkt des Surfels i

\vec{r}_{ref} ... Vektor zum Referenzpunkt

\vec{F}_i ... Kraft auf Surfel i

In Abb. 6.7 ist der Kraft- und Momentenverlauf auf den Flachmeißel in Abhängigkeit des Zeitschrittes für verschiedene Anströmgeschwindigkeiten dargestellt. Die Schwankungen am Beginn des Kraftverlaufes sind auf das gewählte "impulsive start"¹ Modell der Simulation 1 zurückzuführen und bedeuten, daß sich die (Um)Strömung erst ausbilden muß. Nach etwa 20 000 - 25 000 Zeitschritten wird im Modell ein stationärer Zustand erreicht und die Kraftkomponenten besitzen annähernd konstante Werte.

Im Momentenverlauf sind die Auswirkungen der Turbulenzen aufgrund des niedrigeren Wertebereiches deutlicher erkennbar (größere Standardabweichungen). Daher wurden für

¹Diese Anfangsbedingung legt fest, daß die Fluidgeschwindigkeit im Simulationsvolumen zum Zeitpunkt Null bereits eine definierte Anfangsgeschwindigkeit besitzt.

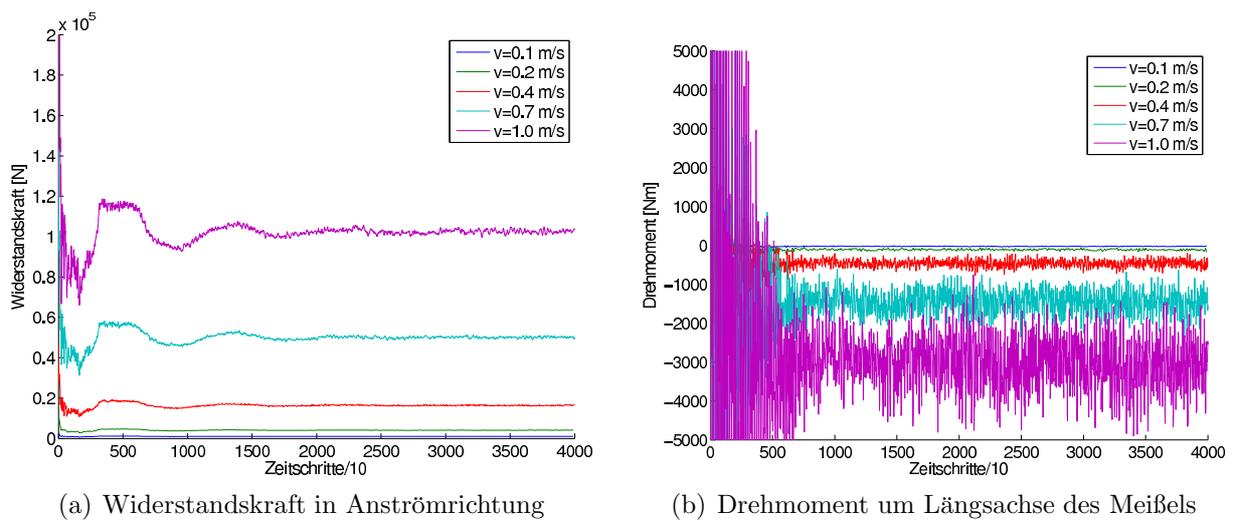


Abb. 6.7: Kraft- und Momentenverlauf auf den Flachmeißel in Abhängigkeit von den Zeitschritten für verschiedene Anströmgeschwindigkeiten

die weitere Auswertung jeweils die Mittelwerte oder der Median der letzten 500 Werte (=5000 Zeitschritte) berechnet. Die Ergebnisse lassen in einer graphischen Darstellung einen deutlich quadratischen Zusammenhang mit der Anströmgeschwindigkeit erkennen und decken sich damit ausgezeichnet mit den Annahmen im Kräfteansatz in Abschnitt 5.2.2 auf S. 50 (siehe Abb. 6.8). Anhand der Methode der kleinsten Fehlerquadrate kann dadurch eine quadratische Regressionskurve gemäß Gl. 6.3 eingepaßt und der Koeffizient κ der Kurve bestimmt werden (vgl. mit Vorgangsweise auf S. 35). Für die Auswertung der Momenteneinwirkung auf den Meißel erhält man gemäß Gl. 6.4 den Rotationskoeffizienten μ . Mit dieser Vorgangsweise können die Gesamtströmungskoeffizienten (κ und μ) und in weiterer Folge der Widerstands- und Rotationskoeffizient (c_w und c_r) des Meißels bestimmt werden (Berechnung siehe Gl. 5.28 u. 5.30).

$$F_w = \kappa \cdot v_\infty^2 \tag{6.3}$$

$$M_w = \mu \cdot v_\infty^2 \tag{6.4}$$

In Abb. 6.9 ist die Druckverteilung am Flachmeißel im stationären Zustand bei einer Anströmgeschwindigkeit von $v=7$ m/s dargestellt. Hohe Druckkräfte können an der Meißelschneide und an den Lenkblechen erkannt werden. In Abb. 6.10 ist außerdem der kumulierte Widerstandskraftverlauf für dieselbe Simulation dargestellt. Hierbei kann festgestellt werden, daß sich der Gesamtwiderstand aus wesentlichen Strömungswiderständen an der Meißelschneide, an beiden Führungsrings und besonders deutlich auch aus dem Strömungswiderstand an den Lenkblechen zusammensetzt.

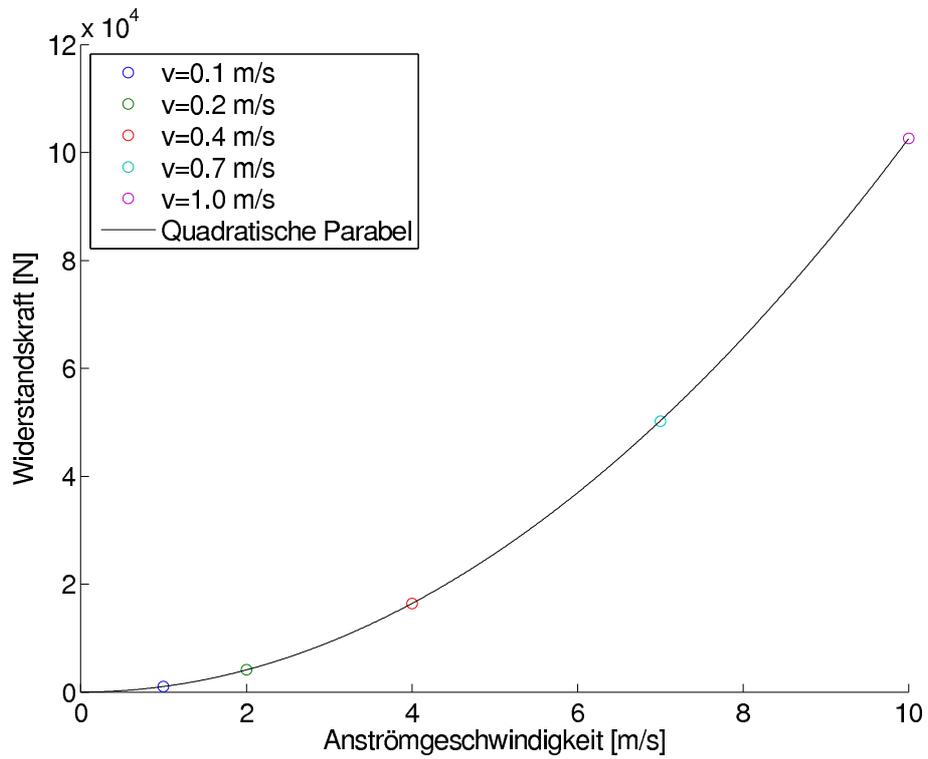


Abb. 6.8: Quadratische Regressionskurve für die numerisch ermittelten Widerstandskräfte des Meißels bei verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten

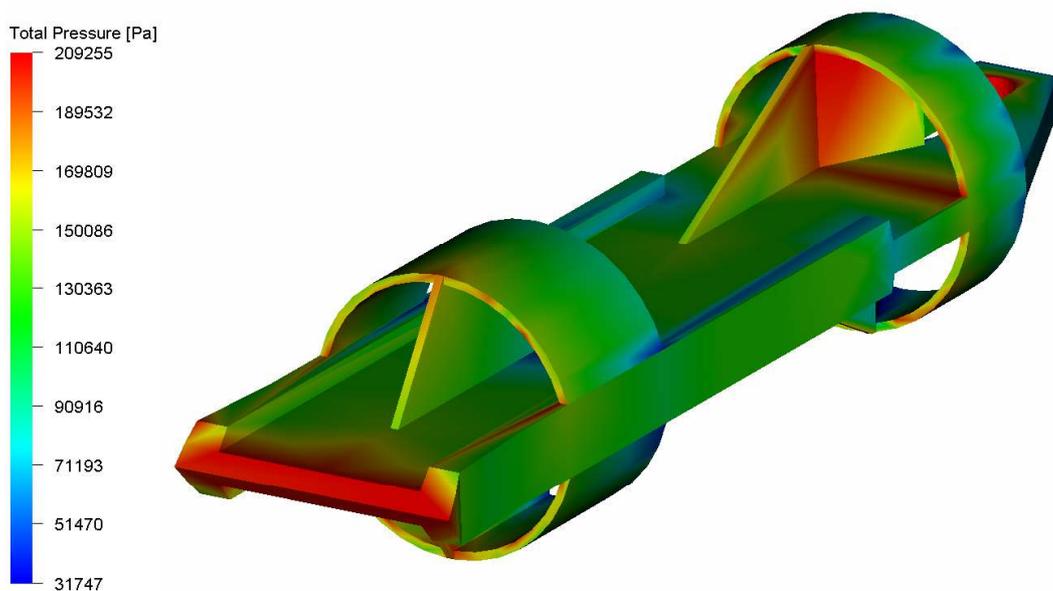


Abb. 6.9: Druckverteilung am Flachmeißel im stationären Zustand bei einer Anströmgeschwindigkeit von $v=7$ m/s

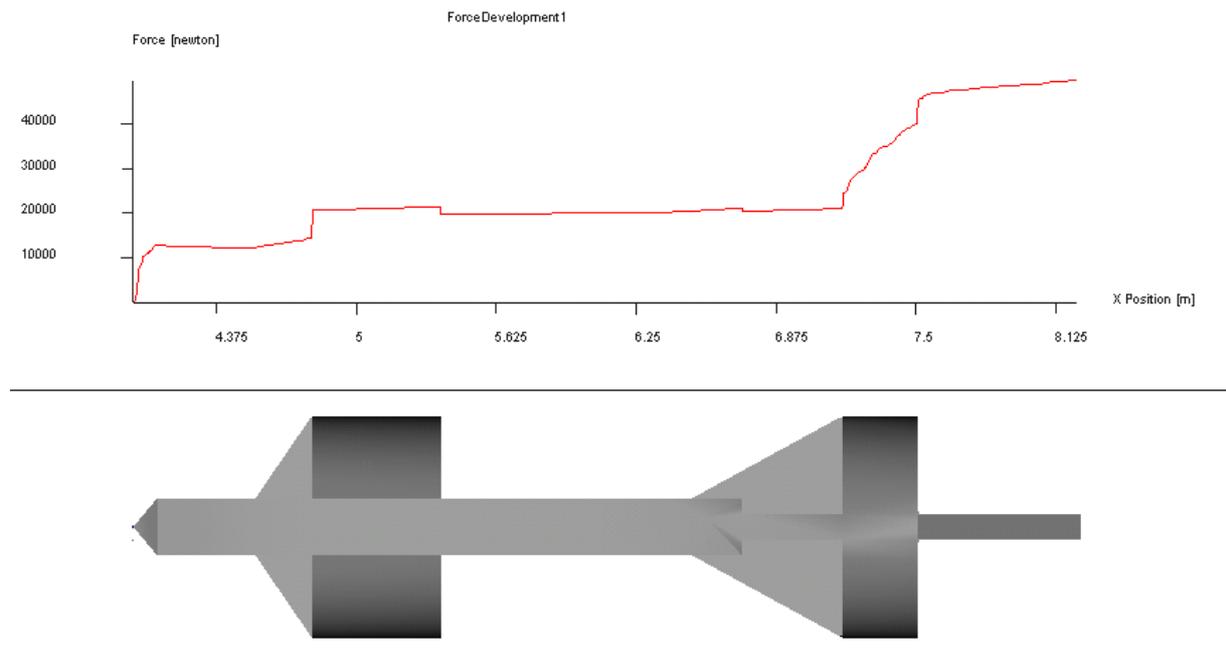


Abb. 6.10: Verlauf der kumulierten Widerstandskraft entlang des Flachmeißels bei einer Anströmgeschwindigkeit von $v=7$ m/s

6.6 Parameterstudien am Simulationsmodell

6.6.1 Allgemeines

Durch Parameterstudien wird zunächst das Programmverhalten und der Einfluß verschiedener Parameter an einem ausgewählten Simulationsmodell untersucht. Dazu werden beispielsweise die Gitterauflösung oder der Einfluß der Oberflächenrauigkeit untersucht. Umfangreiche Parameterstudien zu diesem Thema sind auch in [46] zu finden.

6.6.2 Kreuzmeißel

6.6.2.1 Geometrie

Anhand des in Abb. 6.11 dargestellten Kreuzmeißels wurden umfangreiche Parameterstudien durchgeführt, von denen im folgenden zwei Studien exemplarisch beschrieben sind. Dieser Meißel wurde bei der in Abschnitt 8.5 beschriebenen Baustellenmessung verwendet. Dabei konnte eine Reihe von Fallvorgängen unter Wasser aufgenommen und ausgewertet werden. Es erwies sich daher als günstig, die gleiche Geometrie für weitere numerische Berechnungen zu verwenden, um einen Vergleich zwischen den numerischen Ergebnissen

und den Meßergebnissen zu schaffen. Der Meißel hat eine Gesamtlänge von ca. 3.4 m und einen Durchmesser von 100 cm, wobei sich die Kreuzschneide auf insgesamt 104 cm erweitert. Ebenfalls wie der zuvor beschriebene Flachmeißel besitzt er zwei Führungsringe, deren Blechstärke 3 cm und 4 cm beträgt. Im Gegensatz zum Flachmeißel sind im hinteren Ring keine Lenkbleche für eine Rotation während des Fallvorganges angebracht. Die Hauptblechstärke beträgt im Bereich der Schneide und des vorderen Ringes 10 cm und ist im hinteren Bereich auf 6 cm reduziert. Der Meißel weist eine zweifache Symmetrie auf, die in der Simulation für eine schnellere Berechnung genutzt werden kann.

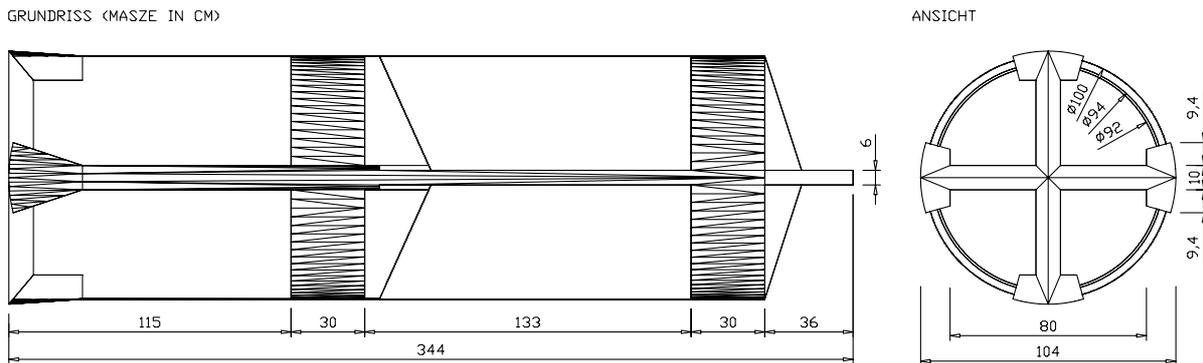
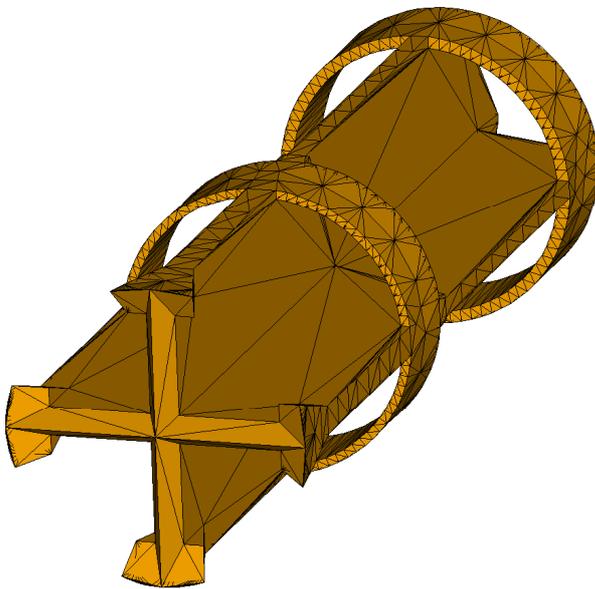


Abb. 6.11: Abmessungen des Kreuzmeißels



Eckdaten Kreuzmeißel

Oberfläche	[m ²]	16.78
Volumen	[m ³]	0.547
Trägheitsmoment	[kgm ²]	445.47
Trägheitsradius	[m]	0.32
Stirnfläche	[m ²]	0.347
Stirnfl./Rohrquersch.	[%]	36.5%
Mittl. Querschnittsfl.	[m ²]	0.159
Mittl. Durchströmfl.	[%]	83.3%
Masse	[to]	4.30

Abb. 6.12: Ansicht und Eckdaten des Kreuzmeißels

6.6.2.2 Variation der Gitterauflösung

Die Untersuchung der Gitterauflösung ist ein wichtiger Punkt jeder Parameterstudie, da sich die Auflösung besonders auf die Rechenzeit auswirkt (hier: Anzahl der Voxel steigt mit der dritten Potenz der Gitterauflösung). Sind umfangreiche Berechnungen mit dem gleichen Modellaufbau erforderlich, so kann durch diese Untersuchung ein Kompromiss zwischen Rechenzeit und Genauigkeit gefunden werden und viel (Rechen)Zeit eingespart werden.

In [14] wird für Innenströmungen eine Auflösung von mindestens 25 Voxels entlang der charakteristischen Länge empfohlen. Als charakteristische Länge ist der hydraulische Durchmesser zu verwenden (hier ca. 0.43 m, vgl. Abschnitt 5.2.1: Abschätzung der Strömungsverhältnisse). In Bereichen mit komplexer Geometrie oder relevanten Detailbereichen sollte die Auflösung noch erhöht werden. Im gegenständlichen Fall wurde die Auflösung vor allem in Abhängigkeit von der Geometrie des Meißels in den Detailbereichen gewählt. Dabei wurden Auflösungswerte von ca. 22, 32 und 43 Voxels entlang der charakteristischen Länge festgelegt. Dies entspricht einem Gitterabstand von 1.0, 1.4 und 2.0 cm.

Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Abb. 6.13 und Tab. 6.3 zusammengefasst. Es konnte eine deutliche Abhängigkeit der Widerstandskoeffizienten von der Gitterauflösung erkannt werden. So erhält man die geringsten Strömungswiderstände bei dem Simulationsmodell mit der höchsten Auflösung (43). Dagegen beträgt die Rechenzeit für dieses Modell bereits 53.1 h (bei doppelter Symmetrie !), wobei jedes Modell wieder für verschiedene Geschwindigkeiten durchgerechnet werden muß. Für den Vergleich wurden die Widerstandskoeffizienten c_w auf den Wert des Koeffizienten c_{w110} bezogen. Das Modell mit der geringsten Auflösung weist eine Abweichung von 18% auf, welche auf jeden Fall unzulässig erscheint. Mit einer höheren Auflösung von 32 Voxels entlang des hydraulischen Durchmessers beträgt die Abweichung jedoch nur mehr 4%. Dies kann im Hinblick auf die mehr als halbierte Rechenzeit als vernünftiger Ansatz für die weiteren Simulationen verwendet werden.

Gitterauflösung		22	32	43
Gitterabstand	[cm]	2.0	1.4	1.0
Widerstandskoeffizient κ	[kg/m]	694.37	614.49	589.31
Widerstandskoeffizient c_w	[1]	4.01	3.55	3.40
Verhältnis c_{wi}/c_{w110}	[%]	118	104	100
Rechenzeit	[h]	9.5	23.9	53.1

Tab. 6.3: Ergebnisse der Berechnungen für den Kreuzmeißel bei unterschiedlicher Gitterauflösung

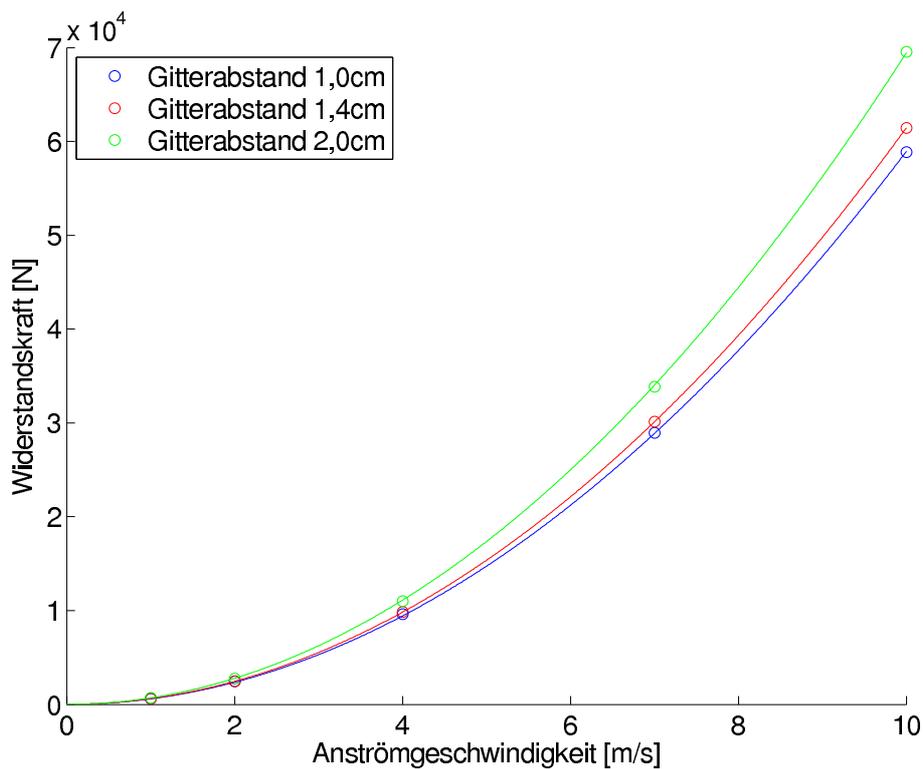


Abb. 6.13: Kraftverlauf auf den Kreuzmeißel in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit für verschiedene Gitterauflösungen

6.6.2.3 Variation der Oberflächenrauigkeit

Am Beispiel des Kreuzmeißels soll außerdem untersucht werden, wie sich die Rauigkeit des Stahlrohres und des Meißels auf die Ergebnisse auswirkt. Gemäß [48] kann die Oberflächenrauigkeit von mäßig verrosteten Stahlrohren mit $k=0.1 - 0.2$ mm angegeben werden. Es wurden daher Berechnungen für den Kreuzmeißel mit absoluten Rauigkeitswerten von $k=0.0, 0.05, 0.1, 0.2$ und 0.5 mm unter Beibehaltung aller anderen Modellparameter nach 6.3.4 durchgeführt. Die Berechnungen wurden für den Vergleich speziell im Bereich der Anströmgeschwindigkeiten von $7 - 9$ m/s verdichtet, da hier die Maximalgeschwindigkeit des Kreuzmeißels bei einem Fallvorgang unter Wasser zu erwarten ist. Diese Daten sind insbesondere für den späteren Vergleich mit der Baustellenmessung notwendig.

Vergleicht man die Ergebnisse in Abb. 6.14a bzw. Tab. 6.4, so ist deutlich erkennbar, daß in dem betrachteten Bereich der Einfluß der Rauigkeit auf die Widerstandskraft sehr gering bleibt. Die prozentuelle Änderung des Widerstandskoeffizienten c_w beträgt zwischen $k=0$ mm und $k=0.5$ mm letztlich nur 13%. Daraus kann abgeleitet werden, daß sich der Strömungswiderstand des Meißels vor allem durch den Druckwiderstand und nicht durch den Reibungswiderstand ergibt (vgl. Abschnitt 5.2.2).

Zusätzlich zur Rauigkeitsanalyse wurde die Momenteneinwirkung auf den Kreuzmeißel

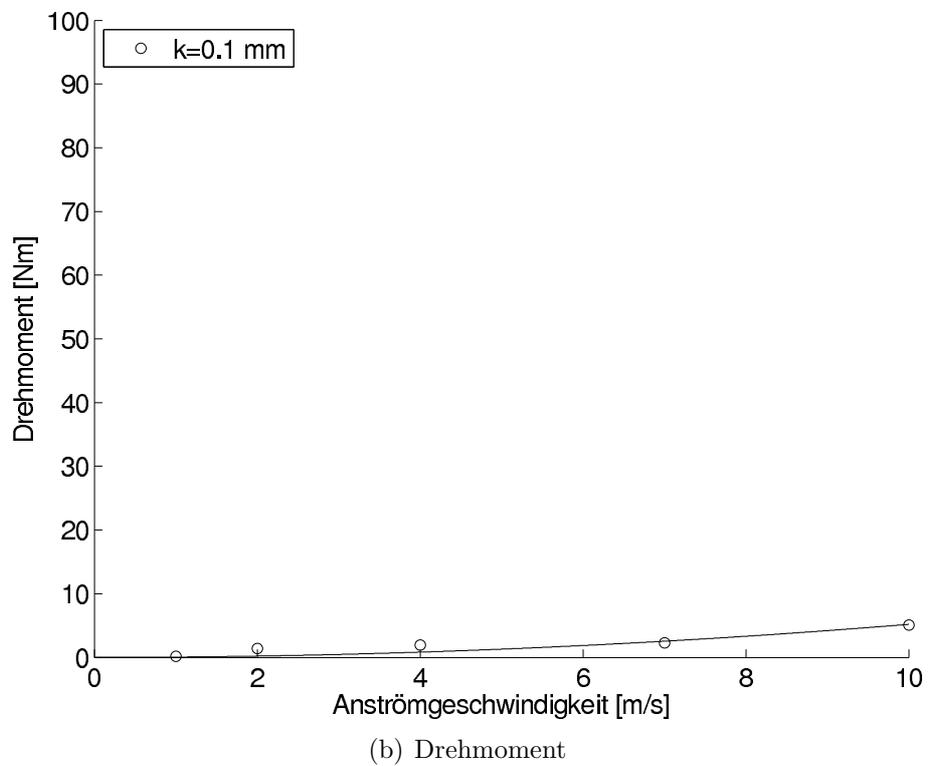
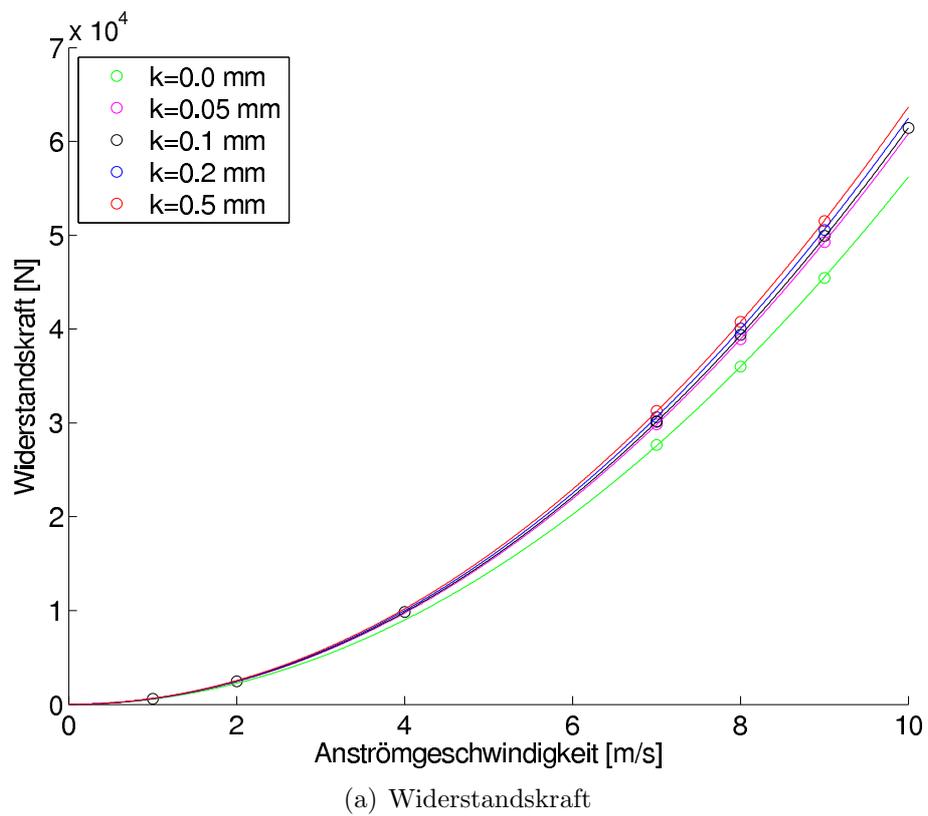


Abb. 6.14: Kraft- und Momentenverlauf auf den Kreuzmeißel in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit für verschiedene Oberflächenrauigkeiten

überprüft und in Abb. 6.14b für $k=0.1$ mm dargestellt. Diese liegt aufgrund der zweifachen Symmetrie des Meißels erwartungsgemäß nahe Null.

Rauhigkeit	[mm]	k=0.0	k=0.05	k=0.1	k=0.2	k=0.5
Widerstandskoeffizient κ	[kg/m]	562.19	608.25	614.49	624.79	636.63
Widerstandskoeffizient c_w	[1]	3.24	3.51	3.55	3.60	3.67
Verhältnis c_{wi}/c_{w0}	[%]	100	108	109	111	113

Tab. 6.4: Berechnete Widerstandskoeffizienten für den Kreuzmeißel bei unterschiedlicher Rohr- und Meißelrauhigkeit

6.7 Untersuchung des Strömungswiderstandes

6.7.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt wird das Strömungsverhalten von unterschiedlichen Meißelgeometrien untersucht und gegenübergestellt. Dies betrifft vor allem die Optimierung einzelner Meißeltypen, die beispielsweise beim Flachmeißel durch die Variation der Lenkblechneigung untersucht wird. Durch diese Studien soll eine Geometrie bzw. Einstellung gefunden werden, die für einen möglichst effizienten Einsatz der Werkzeuge sorgt. Darüber hinaus werden durch die Berechnung von verschiedenen Meißelarten (z.B. Flachmeißel, Kreuzmeißel, Ringmeißel) deren strömungstechnische Vor- und Nachteile deutlich.

6.7.2 Flachmeißel

6.7.2.1 Variation der Lenkblechneigung

Als Basismodell diente das bereits in Abb. 6.6 dargestellte Flachmeißelmodell mit einer Lenkblechneigung von 30° . Für die Berechnungsmodelle wurde die Lenkblechneigung in 10° Schritten von $0 - 40^\circ$ variiert. Dabei wurden die Lenkbleche auf beiden Seiten stets so positioniert, daß die Drehachse durch die Mitte der Lenkbleche die Längsachse des Meißels schneidet (jeweils mittige Positionierung). Die dreiecksförmigen Anströmbliche mußten gemäß der Verdrehung der Lenkbleche passend verschoben werden. Damit wurden fünf Flachmeißelmodelle für die Berechnung erhalten, die im folgenden mit LB00, LB10, LB20, LB30 und LB40 abgekürzt werden (siehe Abb. 6.15).

In Tab. 6.5 sind die geometrischen Details der Varianten angegeben. Die Oberfläche, das Volumen und das Trägheitsmoment des Meißels ändern sich bei Variation der Lenkblechneigung nur in vernachlässigbarem Ausmaß. Die aus dem Volumen berechnete Masse der

Basismodell

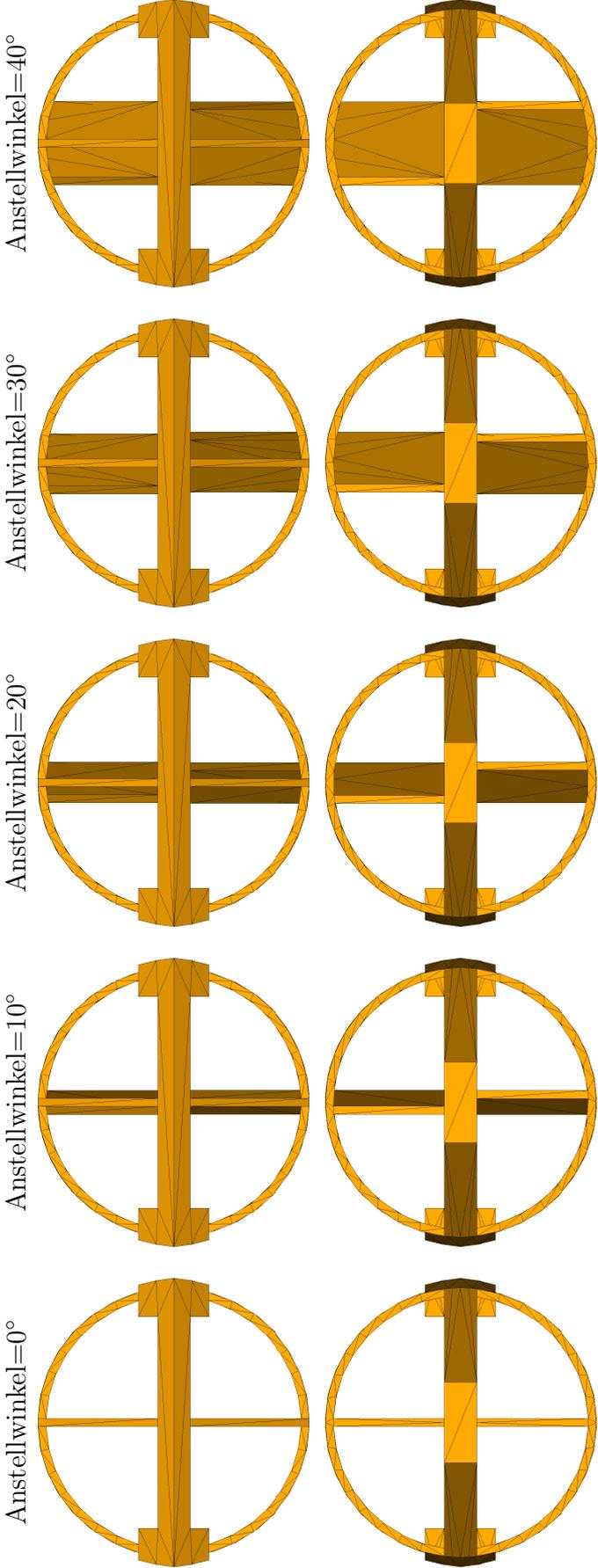
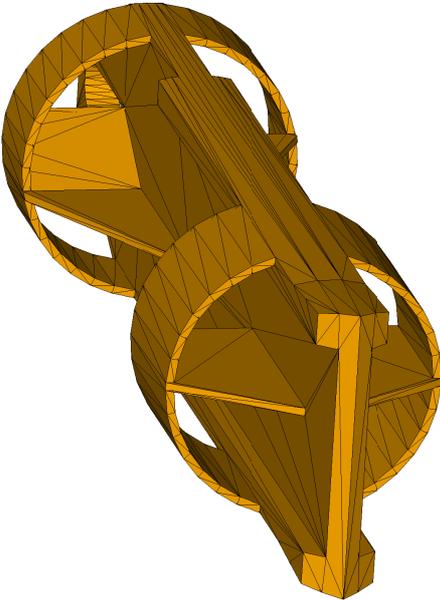


Abb. 6.15: Flachmeißelmodelle mit unterschiedlichem Anstellwinkel der Lenkbleche (Ansicht jeweils von vorne und hinten)

Modelle weicht geringfügig von der tatsächlichen Masse des Meißels ab (5.2 to). Diese Abweichung ist allerdings für die gegenständliche Optimierung der Lenkblechanstellwinkel nicht von Bedeutung. Weiters läßt sich die in Anströmrichtung projizierte Fläche des Meißels ablesen ("Stirnfläche"). Diese ist für den Strömungswiderstand des Meißels von besonders großem Einfluß und nimmt vom Anstellwinkel 0° bis 40° deutlich um den Faktor 1.85 zu. Der Anteil der Stirnfläche am gesamten Rohrquerschnitt ($D=1.1$ m) beträgt dann bereits mehr als 50%. Über die "mittlere Querschnittsfläche" des Meißels läßt sich außerdem eine durchschnittliche Durchströmfläche über die gesamte Länge des Meißels ablesen. Dieser Querschnitt ist für die Umströmung des Meißel im Mittel vorhanden und beträgt etwa 84% der Rohrquerschnittsfläche.

Für jeweils ein Meißelmodell wurden fünf Simulationen bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten gerechnet (1 - 2 - 4 - 7 - 10 m/s), womit sich eine Summe von 25 numerischen Berechnungen ergab (siehe Abb. 6.16).

Die Ergebnisse der Kraft- und Momenteneinwirkung zufolge der Umströmung auf den Meißel sind in Abb. 6.17 punktförmig eingetragen. Dabei läßt sich bei jedem Meißelmodell sowohl für die Widerstandskraft als auch für das Drehmoment ein deutlich quadratischer Zusammenhang mit der Anströmgeschwindigkeit feststellen. Anhand der fünf Punkte pro Modell konnte eine quadratische Regressionskurve erstellt werden, die ebenfalls in den Diagrammen eingetragen ist und deren Parameter in Tab. 6.6 angegeben sind.

Erwartungsgemäß werden mit zunehmender Lenkblechneigung höhere Widerstandswerte und Momente erhalten. Mit noch höheren Lenkblechneigungen von ca. 45° und mehr sollte die Drehmomentkurve jedoch wieder abfallen. Der Zusammenhang dieser Berechnungen läßt sich sehr gut in Abb. 6.18 erfassen, in welcher der Rotationskoeffizient μ über dem Widerstandskoeffizienten κ in einem Polardiagramm dargestellt ist. Diese Diagrammform wird üblicherweise in der Flugzeugtechnik verwendet, um den Auftrieb von z.B. Tragflächenprofilen im Zusammenhang mit dem Strömungswiderstand darzustellen ("Lilienthal'sches Polardiagramm" [9] u. [39]). An dieser Stelle wird der Auftriebskoeffizient durch den "Rotationskoeffizienten" μ ersetzt. Weiters wird anstatt des bekannten Widerstandskoeffizienten c_w direkt der Gesamtwiderstandskoeffizient κ verwendet, nachdem sich die, bei Projektion in Strömungsrichtung erhaltene, Fläche des Meißels ("Stirnfläche") mit der Lenkblechneigung ändert. Im Diagramm ist ablesbar, daß bei einer Lenkblechneigung von 0° der geringste Widerstandskoeffizient mit $\kappa \approx 500$ kg/m, jedoch auch keine Rotation erhalten wird. Mit zunehmender Verdrehung der Lenkbleche steigt die Kurve zunächst stark an und verflacht sich ab ca. 15° Verdrehung im weiteren Verlauf. Bei einem Anstellwinkel von 45° und mehr ist sogar mit einem Abfallen der Kurve zu rechnen (analog zum Strömungsabriß bei Tragflächen).

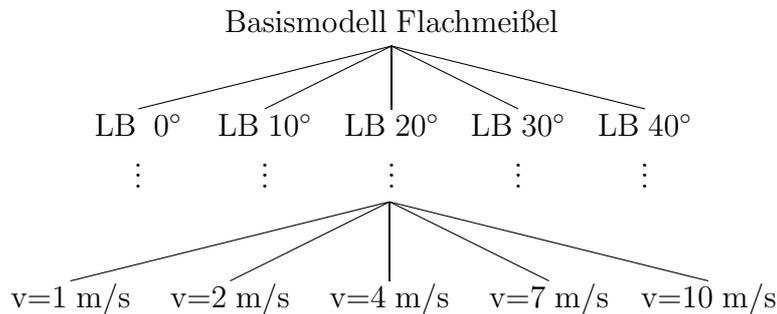


Abb. 6.16: Übersicht der Berechnungen für die Variation der Lenkblechneigung

Flachmeißel		LB 00	LB 10	LB 20	LB 30	LB 40
Anstellwinkel LB	[°]	0°	10°	20°	30°	40°
Fläche LB	[m ²]	0.137	0.139	0.145	0.157	0.175
Oberfläche	[m ²]	17.81	17.81	17.84	17.88	17.97
Volumen	[m ³]	0,643	0,633	0,634	0,631	0,643
Trägheitsmoment	[kgm ²]	573.38	573.46	573.71	574.28	575.13
Trägheitsradius	[m]	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34
Stirnfläche	[m ²]	0.264	0.337	0.365	0.421	0.490
Skalierfaktor Stirnfläche	[1]	1.00	1.28	1.38	1.59	1.85
Stirnfläche/Rohrquersch.	[%]	27.8%	35.5%	38.4%	44.3%	51.6%
Mittlere Querschnittsfläche	[m ²]	0.152	0.149	0.150	0.149	0.152
Mittlere Durchströmfläche	[%]	84.0%	84.3%	84.3%	84.3%	84.0%
Masse	[to]	5.05	4.97	4.98	4.95	5.05

Tab. 6.5: Geometrie der Flachmeißel mit unterschiedlicher Lenkblechneigung

Auswertung Flachmeißel		LB 00	LB 10	LB 20	LB 30	LB 40
Widerstandskoeffizient κ	[kg/m]	497.73	559.68	732.32	1025.61	1761.88
Widerstandskoeffizient c_w	[1]	3.77	3.32	4.01	4.87	7.19
Rotationskoeffizient μ	[kg]	0.15	15.63	23.33	30.49	43.45
Rotationskoeffizient c_r	[1]	0.00	0.42	0.61	0.73	0.94

Tab. 6.6: Berechnete Widerstands- und Rotationskoeffizienten für den Flachmeißel mit unterschiedlicher Lenkblechneigung

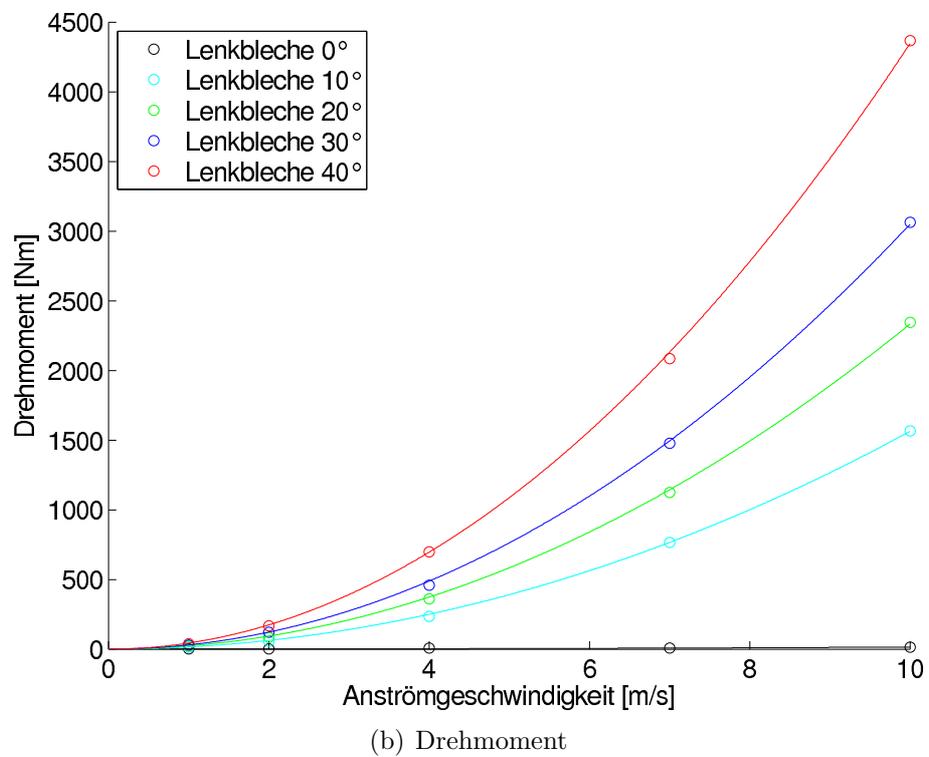
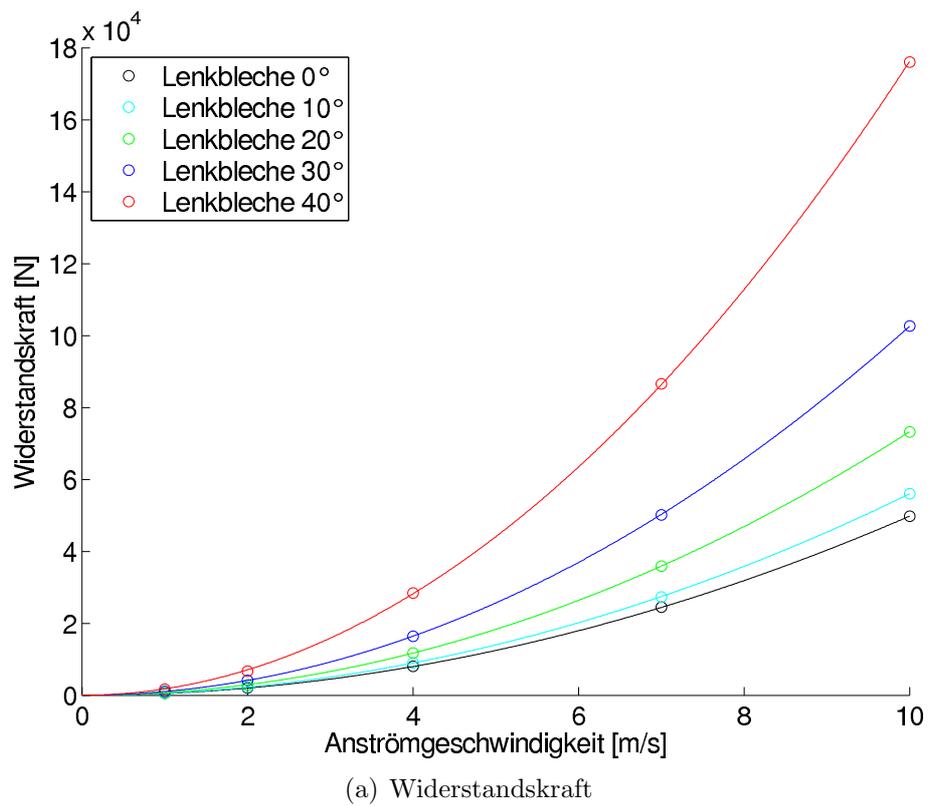


Abb. 6.17: Kraft- und Momentenverlauf auf den Flachmeißel in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit bei unterschiedlicher Lenkblechneigung

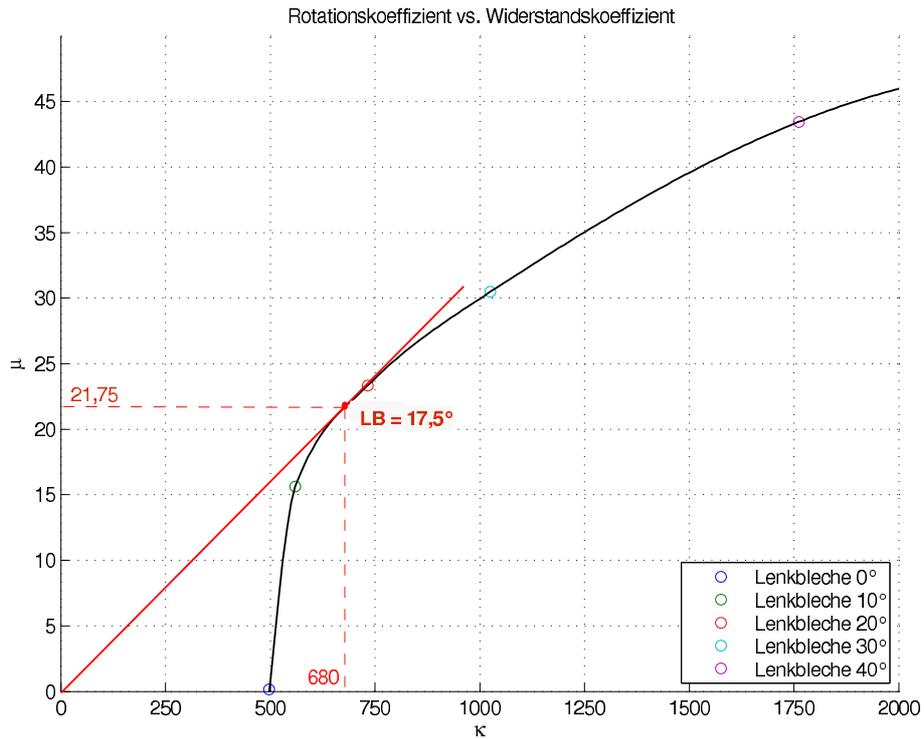


Abb. 6.18: Polardiagramm für den Flachmeißel mit unterschiedlicher Lenkblechneigung

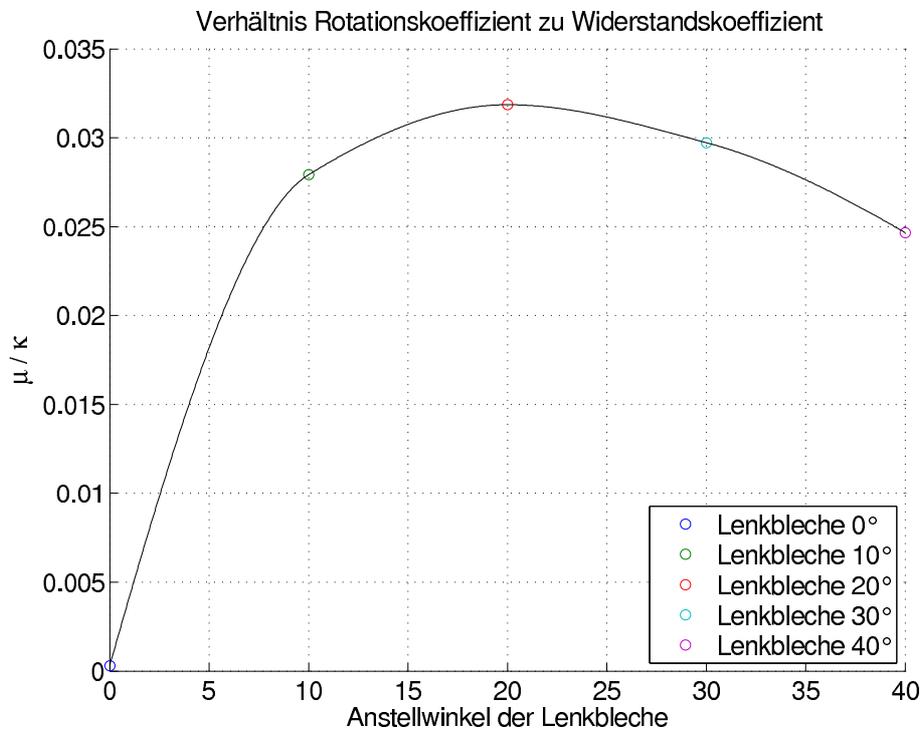


Abb. 6.19: Verhältnis von Rotations- zu Widerstandskoeffizient für den Flachmeißel in Abhängigkeit von der Lenkblechneigung

Im folgenden soll analog zur Aerodynamik ein möglichst optimaler Anstellwinkel aus dem Diagramm ermittelt werden. Dazu legt man eine Tangente vom Koordinaten-Nullpunkt an die Kurve und ermittelt die Koeffizienten an dem Berührungspunkt. Letzterer ist in der Aerodynamik für "bestes Gleiten" eines Profils bekannt und stellt einen Kompromiß aus möglichst hohem Auftrieb bei gleichzeitig möglichst niedrigem Widerstand dar. Überträgt man dies auf die gegenständliche Untersuchung, so würde man am Berührungspunkt der Tangente einen Wert für möglichst große Rotation bei gleichzeitig möglichst niedrigem Strömungswiderstand erhalten. Der Anstellwinkel der Lenkbleche läßt sich linear interpolieren und kann am Berührungspunkt näherungsweise mit 17.5° angegeben werden. In Abb. 6.19 ist zum Vergleich das Verhältnis der beiden Koeffizienten μ und κ über die Lenkblechneigung aufgetragen. Bis zu einem Anstellwinkel von 20° ist ein Ansteigen der Kurve zu beobachten, bevor diese wieder deutlich abfällt. Der Hochpunkt der Kurve ist zwar nicht genau bestimmbar, es läßt sich aber näherungsweise festhalten, daß bei 20° ein Optimum gefunden wird. Dies bestätigt somit die erste Auswertung im Polardiagramm. Diese Auswertemethode erscheint damit sehr gut geeignet, wenn durch die Veränderung einer geometrischen Größe am Meißel (z.B. Anstellwinkel) ein Optimum zwischen zwei korrespondierenden Strömungsbeiwerten gefunden werden muß.

Abschließend muß jedoch angemerkt werden, daß es unter Umständen für den betrachteten Meißel gar nicht erforderlich ist, die größtmögliche Rotation zu erzeugen. In Abhängigkeit von der Fallhöhe und des Wasserstandes in der Verrohrung können durchaus bereits kleinere Anstellwinkel die erforderliche Rotationsbewegung erzeugen. Dies läßt sich mit den hier berechneten Koeffizienten am besten durch Fall- und Rotationskurven für den jeweiligen Anwendungsfall bestimmen (siehe Kap. 5, Analytische Lösung der Fallbewegung).

6.7.2.2 Rotationsverhalten beim Hubvorgang

Im letzten Abschnitt wurde die Neigung der Lenkbleche hinsichtlich der Rotations- und Widerstandseigenschaften des Meißels untersucht. Das Rotationsverhalten wird benötigt, um ein systematisches, gleichmäßiges Aufmeißeln der Bohrlochsohle zu gewährleisten. Ein noch zu klärender Punkt bleibt jedoch, wie sich die Lenkblechneigung beim darauffolgenden Hubvorgang auswirkt. Dazu wurde der bereits beschriebene Flachmeißel mit einer Lenkblechneigung von 10° und 30° exemplarisch in einer Rückwärts-Anströmung untersucht. Für das Simulationsmodell mußte der Meißel entsprechend um 180° gedreht und ebenfalls mit unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten durchgerechnet werden (siehe Abb. 6.20).

Trägt man wiederum die Widerstands- und Momentenkurve auf den Meißel in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit auf, so erhält man eine für den Hub- und Fall-

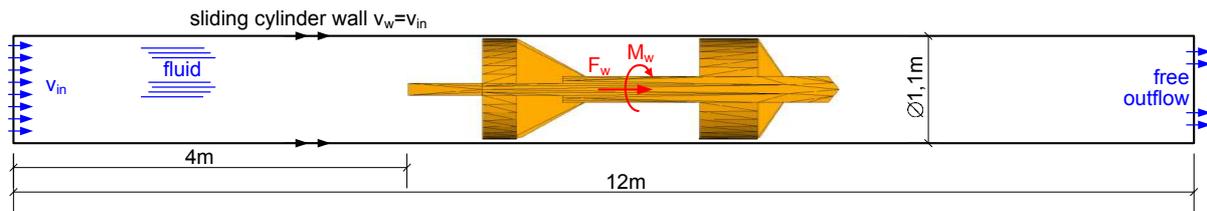


Abb. 6.20: Simulationsmodell für den Hubvorgang

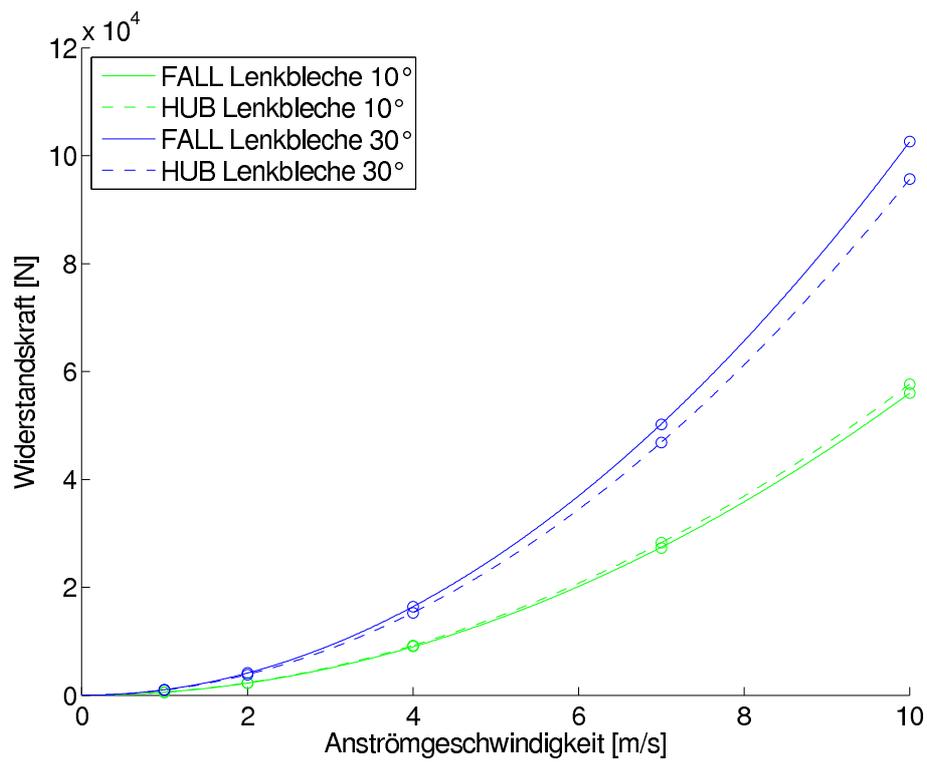
vorgang beinahe gleiche Strömungswiderstandskurve. Für den Hubvorgang beim Modell LB30° liegt diese sogar geringfügig unter jener des Fallvorganges. Dies dürfte auf die unterschiedliche Stirnflächenentwicklung mit der Anströmrichtung zurückzuführen sein. Beim Modell LB10° unterscheidet sich der Verlauf der Stirnflächen entlang beider Strömungsrichtungen weniger stark und es werden fast deckungsgleiche Strömungswiderstandskurven erhalten.

Das Drehmoment auf den Meißel beim Hubvorgang fällt deutlich geringer als beim Fallvorgang aus. Während sich beim Fall ein Rotationskoeffizient von $\mu = 15.6$ bzw. $\mu = 30.5$ ergibt, liegt dieser für den Hubvorgang nur bei $\mu = 2.3$ und $\mu = 6.6$. Damit ergibt sich ein Unterschied zwischen Fall- und Hubvorgang um den Faktor $\approx 5 - 7$ (siehe Tab. 6.7)!

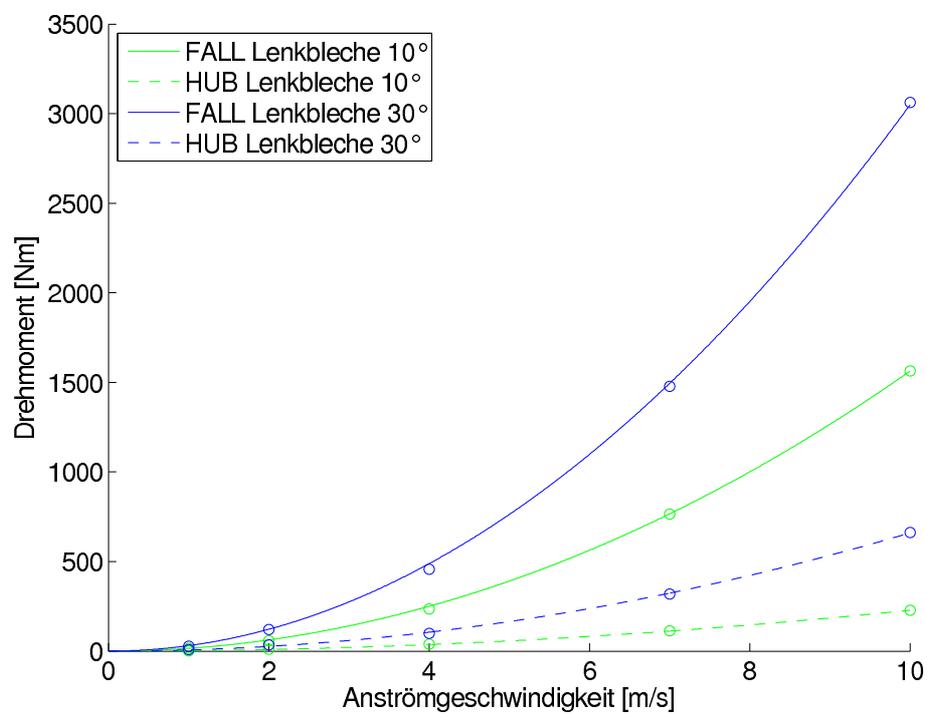
Auswertung Flachmeißel		LB10		LB30	
		FALL	HUB	FALL	HUB
Bewegungsrichtung					
Widerstandskoeffizient κ	[kg/m]	559.68	576.30	1025.61	956.20
Widerstandskoeffizient c_w	[1]	3.32	3.42	4.87	4.54
Rotationskoeffizient μ	[kg]	15.63	2.28	30.49	6.60
Rotationskoeffizient c_r	[1]	0.42	0.06	0.73	0.16
Verhältnis μ_{fall}/μ_{hub}	[1]	6.85		4.62	

Tab. 6.7: Berechnete Widerstands- und Rotationskoeffizienten für den Flachmeißel mit Lenkblechneigung 10/30° beim Fall- und Hubvorgang

Für die praktische Anwendung ist diese Eigenschaft sehr günstig, weil sich bei ansonst gleichem Rotationskoeffizient der Meißel beim Hub theoretisch wieder in die Ausgangslage zurückdrehen würde. Dieselbe Ausgangslage würde beim nächsten Schlag wieder zur gleichen Verdrehung des Meißels führen und die Schneide damit in gleicher Lage wie zuvor auf den Fels auftreffen. Genau dieses Verhalten soll die Neigung der Lenkbleche jedoch verhindern und für ein vollständiges Aufmeißeln der Bohrlochsohle sorgen. Aus den hier gewonnenen Erkenntnissen kann gefolgert werden, daß sich der Meißel beim Hub nur mit einem Bruchteil der Drehbewegung beim Fall zurückdreht. Dadurch ist bei mehreren, aufeinanderfolgenden Meißelschlägen mit einer zunehmenden Rotation des Werkzeuges zu rechnen.



(a) Widerstandskraft



(b) Drehmoment

Abb. 6.21: Vergleich der Widerstandskraft und des Momentenverlaufes für den Fall- und Hubvorgang am Flachmeißel LB 10° und LB 30°

6.7.3 Flachmeißel im Modellmaßstab

6.7.3.1 Variation der Lenkblechneigung

Eine idente Simulationsberechnung wie in Abschnitt 6.7.2.1 wurde anhand des Flachmeißels im Modellmaßstab durchgeführt. Der Modellaufbau erfolgt in gleicher Weise wie zuvor, wobei die geometrischen Abmessungen nun um den Faktor 7.4 verkleinert sind. Ein Plan des Flachmeißelmodells ist in Abb. 7.3 angegeben und das für die Simulationen vorbereitete Meißelmodell in Abb. 6.22 dargestellt. Die bei Veränderung der Lenkblechneigung ermittelten Geometriedaten der Modelle sind zusammenfassend in Tab. 6.8 aufgelistet. Wie zuvor wurden 25 numerische Berechnungen durchgeführt, deren Ergebnisse in Abb. 6.23 und Tab. 6.9 ausgewertet sind.

Der Widerstandsbeiwert des Flachmeißelmodells weist mit $c_w \approx 3.9 - 7.3$ sehr ähnliche Werte auf, wie der zuvor untersuchte, reale Flachmeißel ($c_w \approx 3.3 - 7.2$). Außerdem wird ein qualitativ ähnlicher Verlauf des Koeffizienten mit zunehmender Lenkblechanstellung in beiden Größenordnungen festgestellt. So nimmt der c_w Wert in beiden Berechnungen vom Modell LB0° auf LB10° zunächst ab. Dies läßt sich dadurch begründen, daß der Strömungswiderstand κ zunächst geringer ansteigt (ca. 25%), als die Vergrößerung der Stirnfläche durch die Lenkblechverdrehung um 10° (ca. 28%). Mit zunehmender Anstellung der Lenkbleche dreht sich dieser Zusammenhang jedoch wieder um und der Beiwert c_w nimmt bei beiden Untersuchungen deutlich zu.

Der Rotationskoeffizient beträgt beim Flachmeißelmodell mit $c_r = 0.0 - 0.4$ weniger als beim "realen" Meißel mit $c_r = 0.0 - 0.9$. Die Lenkblechausführungen beider Versionen sind

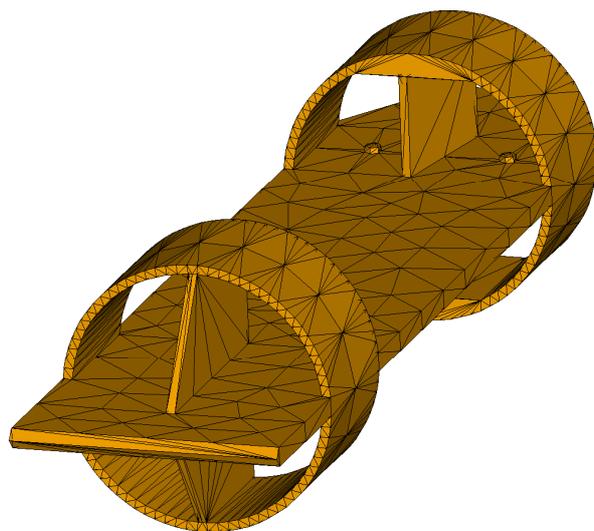


Abb. 6.22: Flachmeißel im Modellmaßstab mit Lenkblechen (Anstellwinkel 10°)

Flachmeißelmodell mit		LB 00	LB 10	LB 20	LB 30	LB 40
Anstellwinkel LB	[°]	0°	10°	20°	30°	40°
Fläche LB	[cm ²]	33.0	33.0	33.0	33.0	33.0
Oberfläche	[cm ²]	2926.5	2926.6	2926.6	2926.6	2926.6
Volumen	[cm ³]	1010.2	1010.2	1010.2	1010.2	1010.2
Trägheitsmoment	[kgcm ²]	26.19	26.19	26.20	26.22	26.24
Trägheitsradius	[cm]	4.60	4.60	4.60	4.60	4.60
Stirnfläche	[cm ²]	41.0	52.4	63.3	73.4	82.4
Skalierfaktor Stirnfläche	[1]	1.00	1.28	1.54	1.79	2.01
Stirnfläche/Rohrquersch.	[%]	23.7%	30.2%	36.5%	42.4%	47.6%
Mittlere Querschnittsfläche	[cm ²]	18.7	18.7	18.7	18.7	18.7
Mittlere Durchströmfläche	[%]	89.2%	89.2%	89.2%	89.2%	89.2%
Masse	[kg]	1.253	1.253	1.253	1.253	1.253

Tab. 6.8: Geometrie der Flachmeißelmodelle mit unterschiedlicher Lenkblechneigung

zwar nicht zu 100% identisch, jedoch handelt es sich bei dem Rotationskoeffizienten c_r um einen um die Lenkblechfläche normierten Wert (siehe Abschnitt 5.2.2). Dieser sollte bei gleichartiger Meißelgeometrie auch dem Betrag nach ähnliche Ergebnisse liefern. Die Strömungswiderstandsbeiwerte c_w weisen hingegen relativ gleiche normierte Werte für beide Größenordnungen auf, weshalb die Vermutung nahe liegt, daß die Ursache in den Details der geringfügig unterschiedlichen geometrischen Ausführung zu finden ist. Die Geometrie unterscheidet sich im wesentlichen durch die Meißelschneide (keine verbreiterte Schneide, keine Tangentialschneiden), durch die fehlenden Stege zur Beschwerung an den Seiten des Hauptbleches, sowie durch die fehlenden Anströmbleche für die Lenkbleche. Letztere dürften der Hauptgrund für die unterschiedlichen Ergebnisse sein. Bekräftigt wird dies durch die Tatsache, daß der Unterschied bei einer Lenkblechanstellung von 10° noch relativ gering ausfällt und erst bei höheren Anstellwinkeln deutliche Unterschiede erkennbar sind. Die Anströmbleche entfalten ihre Wirkung somit erst bei größeren Lenkblechverdrehungen.

Ein weiteres Detail läßt sich in der Momentenkurve des Flachmeißelmodells LB40° erkennen. Wurde die maximale Momentenwirkung noch mit der Meißelvariante LB30° erhalten, so liegt der Wert beim Modell LB40° bereits deutlich darunter und sogar unter jenem Ergebnis für das Modell LB20°. Der Effekt zu steil angestellter Lenkbleche (ohne Anströmbleche!) wird also hier deutlich sichtbar. Trägt man die Beiwerte κ und μ in einem Polardiagramm für jedes Lenkblechmodell auf, so läßt sich analog wieder ein optimaler Anstellwinkel finden (siehe Abb. 6.24a). Unter Einbeziehung von Abb. 6.24b kann der optimale Lenkblechwinkel für den Flachmeißel im Modellmaßstab klar mit 10° angegeben werden.

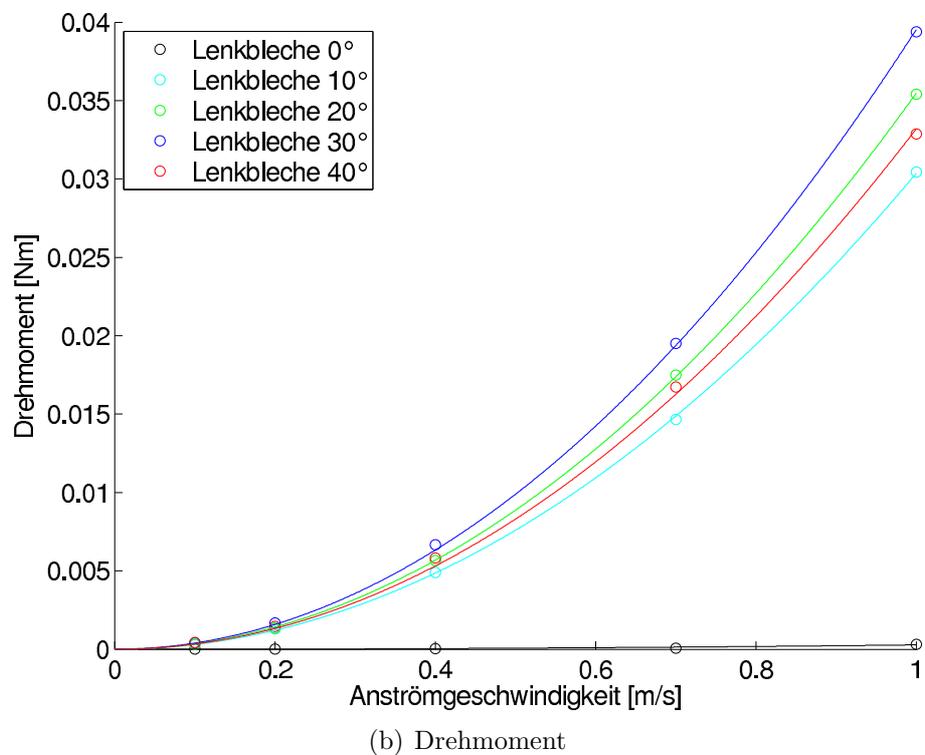
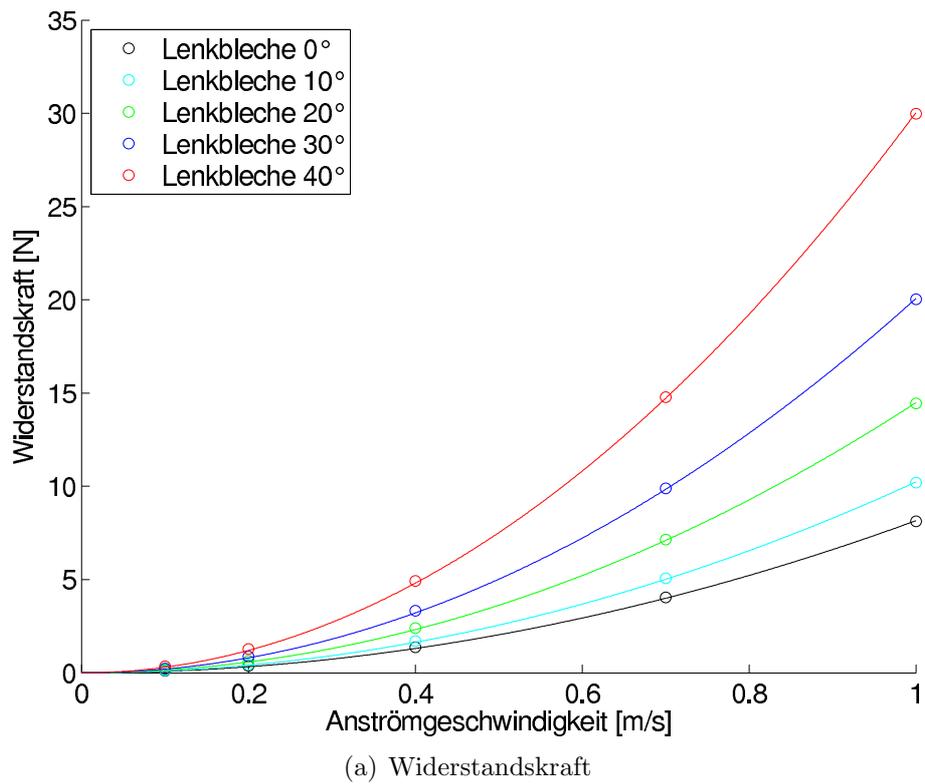
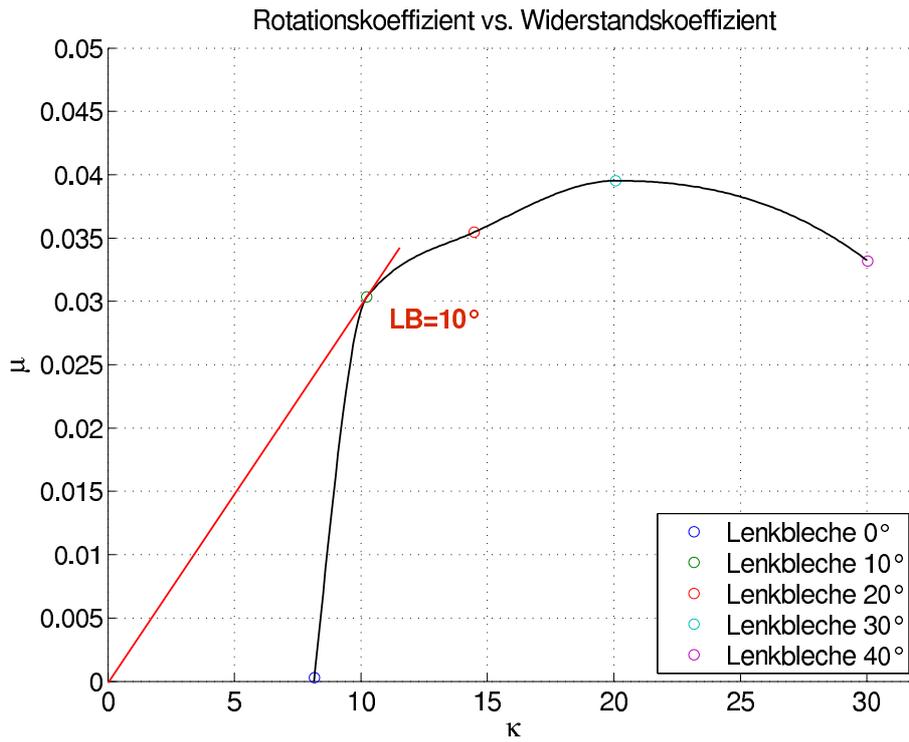
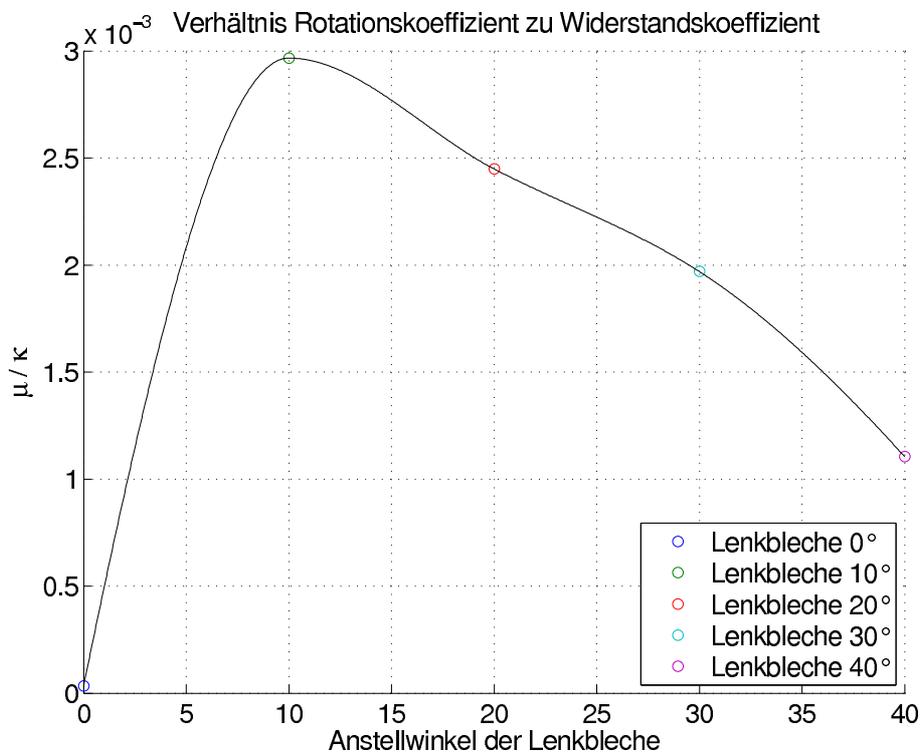


Abb. 6.23: Kraft- und Momentenverlauf auf das Flachmeißelmodell in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit bei verschiedener Lenkblechneigung



(a) Polardiagramm



(b) Verhältnis von Rotations- zu Widerstandskoeffizient

Abb. 6.24: Auswertung für das Flachmeißelmodell mit unterschiedlicher Lenkblechneigung

Auswertung FM-Modell		LB 00	LB 10	LB 20	LB 30	LB 40
Widerstandskoeffizient κ	[kg/m]	8.16	10.23	14.48	20.07	30.04
Widerstandskoeffizient c_w	[1]	3.99	3.91	4.58	5.48	7.31
Rotationskoeffizient μ	[kg]	0.0003	0.0304	0.0355	0.0395	0.0332
Rotationskoeffizient c_r	[1]	0.00	0.31	0.36	0.40	0.34

Tab. 6.9: Berechnete Widerstands- und Rotationskoeffizienten für das Flachmeißelmodell mit unterschiedlicher Lenkblechneigung

6.7.3.2 Adaption der Lenkblechprofile

Die Drehwirkung des Meißels ist bisher nur durch die Anstellung der Lenkbleche untersucht worden. Im Zuge der Modellversuche in Kap. 7 wurde auch ein strömungstechnisch günstiges Profil ("Lenkblechprofil PR") untersucht, welches der Form einer Tragfläche nachempfunden wurde (siehe Abb. 6.25). Dieses Profil sollte trotz Anordnung in Längsrichtung (Anstellwinkel 0°) eine Rotation erzeugen und dabei den Strömungswiderstand des Meißels möglichst niedrig halten. Das Meißelmodell mit dem tragflächenähnlichen Profil ist in Abb. 6.26 angegeben. Dabei wurde, analog zur Aerodynamik, eine Anstellung des Lenkblechprofils mit 0° und 10° zur Anströmrichtung (Modelle "PR00" und "PR10") untersucht und den entsprechenden Flachmeißelmodellen mit rechteckigem Lenkblechquerschnitt (Modelle "LB00" und "LB10") gegenübergestellt.

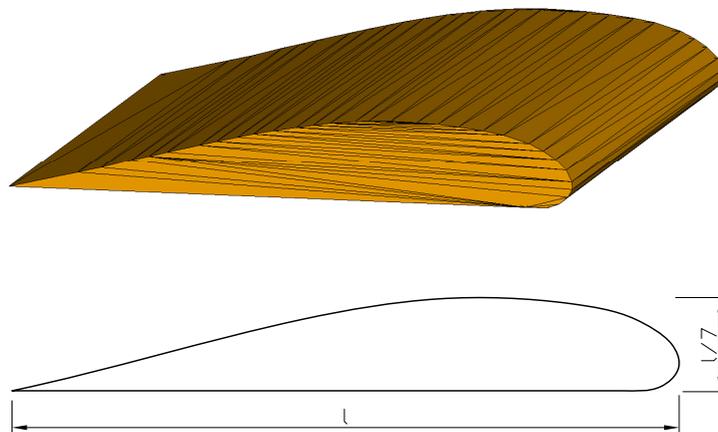


Abb. 6.25: Detailansicht des tragflächenähnlichen Lenkblechprofils

Anhand der Ergebnisse in Abb. 6.27 wird deutlich, daß der Strömungswiderstand der Modelle mit tragflächenähnlichen Lenkblechprofilen etwas geringer ausfällt, als die äquivalenten Modelle mit rechteckigen Lenkblechen. Dies ist allein auf die strömungsgünstige Form des Profils zurückzuführen, nachdem die Stirnflächen der Modelle PR00 und PR10 aufgrund des Querschnittes der Profile sogar etwas größer ausfallen als bei den Modellen LB00 und LB10 (siehe Tab. 6.10). Bei der Anstellung des Profils in Strömungsrichtung

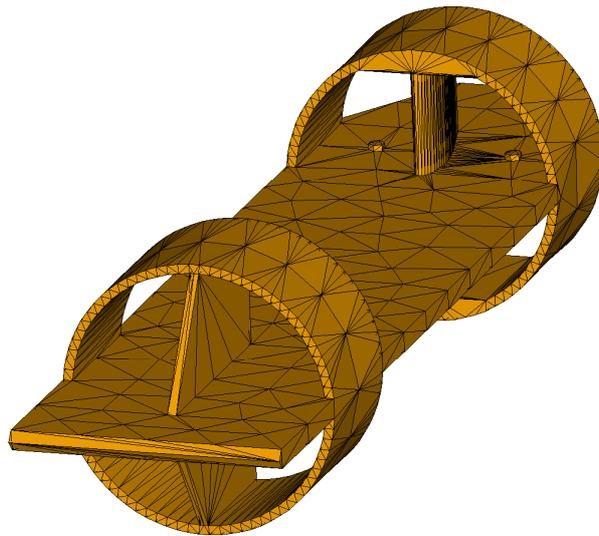


Abb. 6.26: Flachmeißelmodell mit strömungstechnisch verbessertem Lenkblechprofil (Anstellwinkel 0°)

(PR00) kann bereits eine geringe Momentenwirkung im Unterschied zur Version LB00 erzielt werden. Im Detail muß allerdings überprüft werden, ob dieses Drehmoment für die praktische Anwendung ausreichend ist. Eine steilere Anstellung des Profils (Version PR10) erscheint nicht sinnvoll, da dies nur eine geringfügige, weitere Erhöhung der Rotation verursacht. Der Rotationskoeffizient der Variante LB10 beträgt hingegen mit $c_r = 0.31$ bereits das Doppelte der Version PR10.

Auswertung Lenkblechvarianten		LB 00	PR00	LB 10	PR10
Stirnfläche	[cm ²]	41.0	45.8	52.4	54.7
Fläche Lenkblech	[cm ²]	33	33	33	33
Widerstandskoeffizient κ	[kg/m]	8.16	7.82	10.23	9.64
Widerstandskoeffizient c_w	[1]	3.99	3.42	3.91	3.53
Rotationskoeffizient μ	[kg]	0.0003	0.0058	0.0304	0.0160
Rotationskoeffizient c_r	[1]	0.00	0.06	0.31	0.16

Tab. 6.10: Berechnete Widerstands- und Rotationskoeffizienten für das Flachmeißelmodell mit unterschiedlichen Lenkblechausführungen

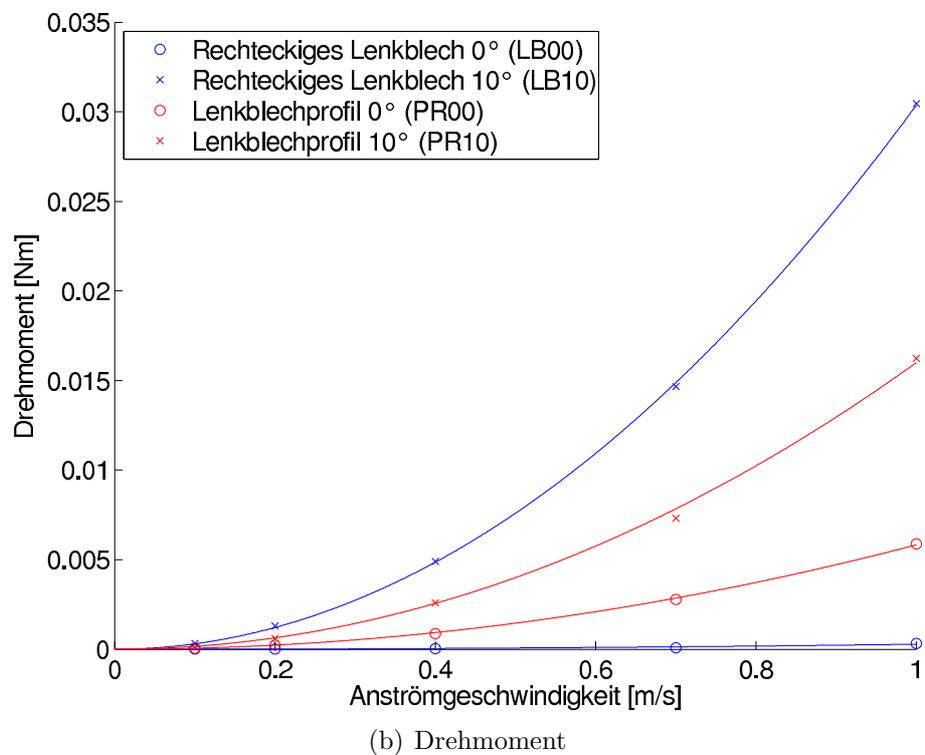
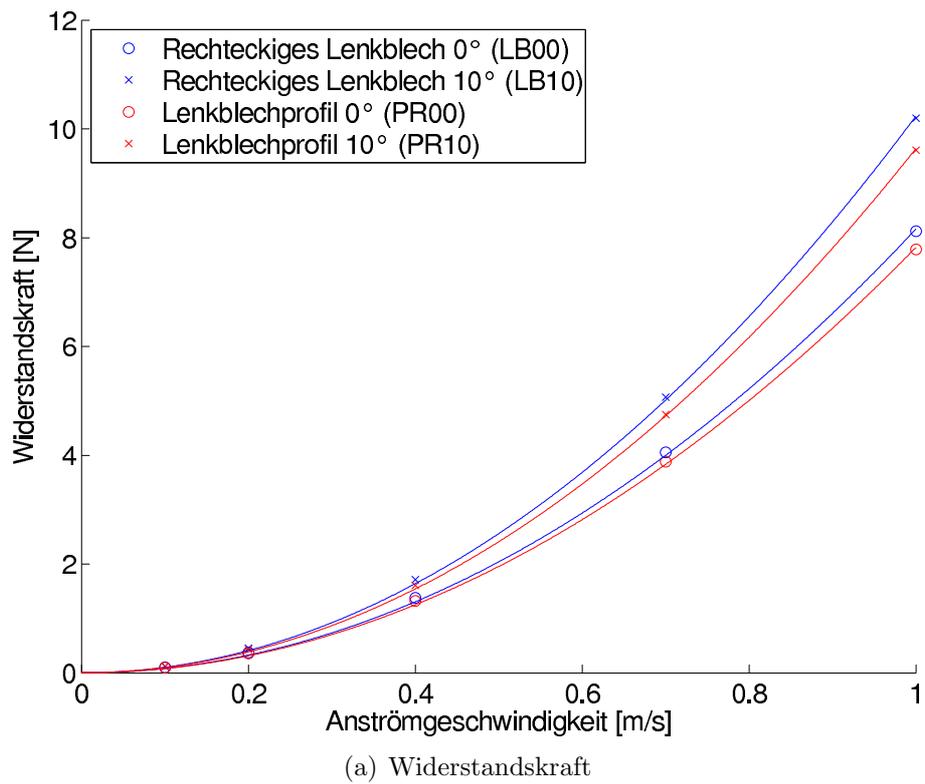


Abb. 6.27: Kraft- und Momentenverlauf für die Flachmeißelmodelle mit unterschiedlichen Lenkblechausführungen in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit

6.7.4 Ringmeißel

6.7.4.1 Geometrie

Als Vergleich zu den untersuchten Flach- und Kreuzmeißelmodellen wurde auch eine numerische Simulation mit einem Ringmeißel durchgeführt. Bei dem in Abb. 6.28 dargestellten Meißel handelt es sich genau genommen um einen Wendemeißel, der durch einfaches Umhängen als Flach- und als Ringmeißel verwendet werden kann. Bei der Verwendung als Ringmeißel löst dieser den Boden an der Randung der Bohrlochsohle mit zehn Zähnen, die in gleichmäßigen Winkelabständen angeordnet sind. Der Meißelkörper besteht aus einem Zylindermantel, der an der Innenseite mit durchlaufenden Stegen im Schatten der Zähne beschwert ist. Bei einer Länge von 4.4 m und einem Durchmesser von ca. 1 m erreicht der Meißel eine Gesamtmasse von ca. 5.6 to.

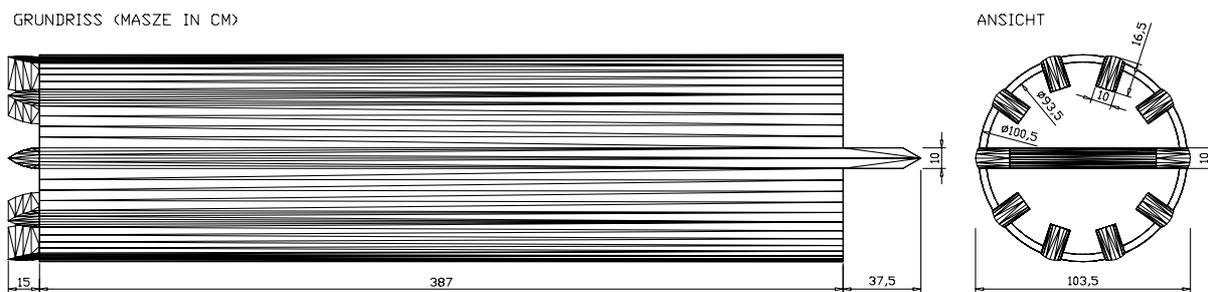
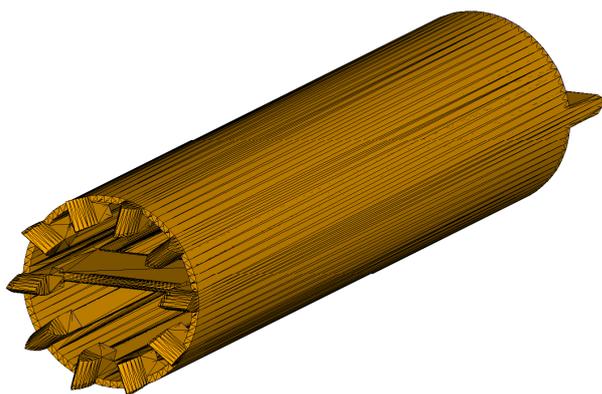


Abb. 6.28: Abmessungen des Ringmeißels



Eckdaten Ringmeißel

Oberfläche	[m ²]	30.64
Volumen	[m ³]	0.712
Trägheitsmoment	[kgm ²]	1128.75
Trägheitsradius	[m]	0.45
Stirnfläche	[m ²]	0.302
Stirnfl./Rohrquersch.	[%]	31.8%
Mittl. Querschnittsfl.	[m ²]	0.162
Mittl. Durchströml.	[%]	83.0%
Masse	[to]	5.59

Abb. 6.29: Ansicht und Eckdaten des Ringmeißels

6.7.4.2 Simulationsberechnung

Die Parameter für die numerische Berechnung wurden, wie bei den anderen Untersuchungen, gemäß Abschnitt 6.3.4 gewählt und verschiedene Anströmgeschwindigkeiten simu-

liert. Der erhaltene Verlauf der Widerstandskraft ist in Abb. 6.30 abzulesen und steigt proportional zum Quadrat der Anströmgeschwindigkeit an. Anhand des Regressionsmodells kann der Widerstandskoeffizient κ und in weiterer Folge auch der dimensionslose Widerstandskoeffizient c_w bestimmt werden (siehe Tab. 6.11). Letzterer liegt mit $c_w=3.19$ im unteren Bereich aller bisher ermittelten Beiwerte. Aufgrund der beinahe doppelt so großen Oberfläche des Ringmeißels, im Vergleich zu den bisher untersuchten Meißeltypen, ist das Ergebnis jedoch deutlich stärker von der Oberflächenbeschaffenheit abhängig. Somit wird der Strömungswiderstand des Ringmeißels bei größerer Rauigkeit stärker ansteigen, als bei anderen Meißeln. Simulationsberechnungen für verschiedene Oberflächenrauigkeiten mit einem ähnlichen Ringmeißelmodell sind in [46] zu finden.

Ringmeißel

Widerstandskoeffizient κ	[kg/m]	481.90
Widerstandskoeffizient c_w	[1]	3.19

Tab. 6.11: Ergebnisse der Berechnungen für den Ringmeißel

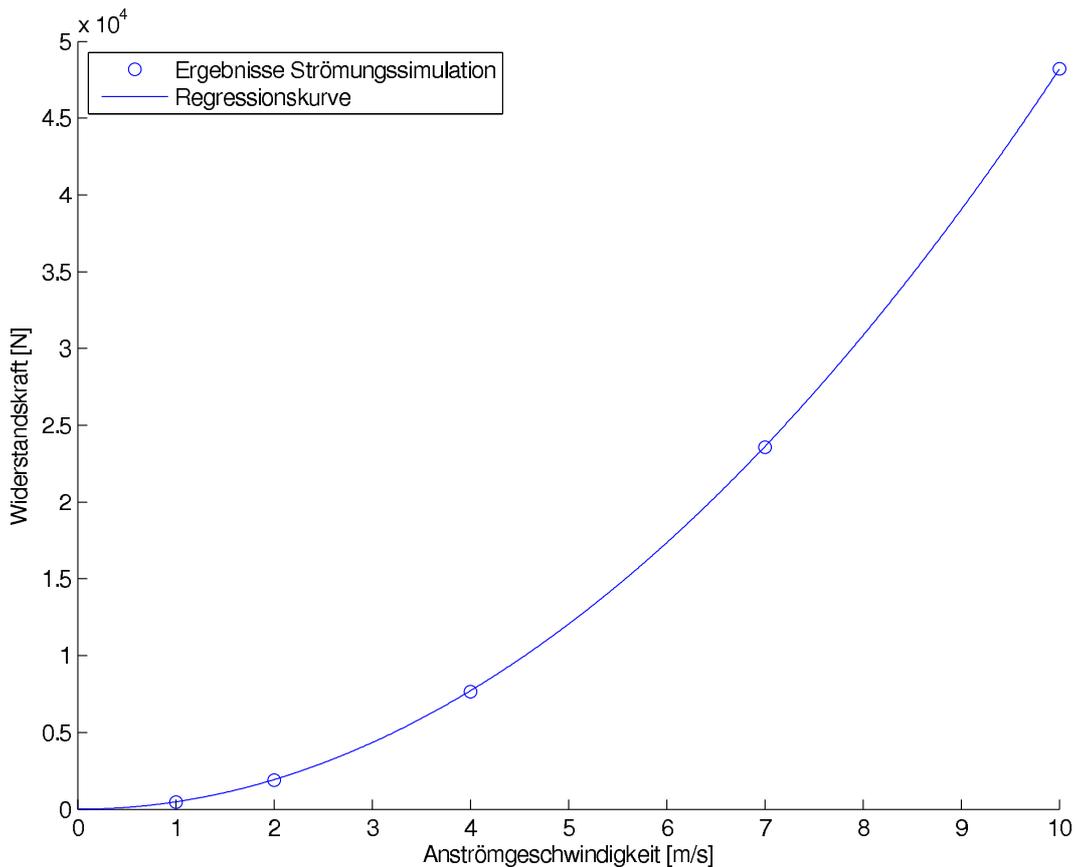


Abb. 6.30: Kraftverlauf auf den Ringmeißel in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit

6.8 Untersuchung des Widerstandes bei der Rotation

6.8.1 Allgemeines

Für die Untersuchung des widerstehenden Momentes durch die Flüssigkeit bei der Rotation des Meißels um die Längsachse wurde ein Modellaufbau gemäß Abb. 6.31 verwendet. Dieser wurde in Anlehnung an den Modellaufbau 2 auf Seite 71 erstellt und um eine konstante Rotationsgeschwindigkeit des Meißels um die Längsachse erweitert.

Der Meißel kann dadurch mit einer unterschiedlichen Kombination aus Translations- und Rotationsgeschwindigkeit simuliert und das sich jeweils ergebende, stationäre Widerstandsmoment um die Längsachse berechnet werden. Diese Vorgangsweise ist erforderlich, weil sich der durch die Flüssigkeit ergebende Widerstand gegen die Rotationsbewegung nicht nur mit zunehmender Rotations- sondern auch Strömungsgeschwindigkeit in Längsrichtung erhöhen wird. Der Zusammenhang soll anhand dieser Simulation untersucht werden und Eingangswerte für die analytische Beschreibung der Drehbewegung in Kap. 5.2.5 liefern (M^{RS} , Widerstandsmoment im Ringspalt).

Durch die Vielzahl an Kombinationen und bisher untersuchten Meißelvarianten wurden die Berechnungen immer nur mit einer repräsentativen Meißelvariante durchgeführt (z.B. Flachmeißelversion $LB0^\circ$ für die Serie mit unterschiedlicher Lenkblechneigung). Aufgrund der geringen Abmessungen der Lenkbleche im Verhältnis zum gesamten Meißel und der Beibehaltung aller sonstigen Parameter, erscheint diese Vereinfachung jedoch zulässig. In Abb. 6.32 sind die erforderlichen Berechnungen für den Flachmeißel dargestellt (20 Simulationen). Die Fall- und Rotationsgeschwindigkeiten wurden zunächst geschätzt und in weiterer Folge durch die praktischen Untersuchungen erweitert. Für Berechnungen deutlich anderer Meißeltypen (z.B. anderer Größenmaßstab beim Modellmeißel) müssen diese passend verändert werden.

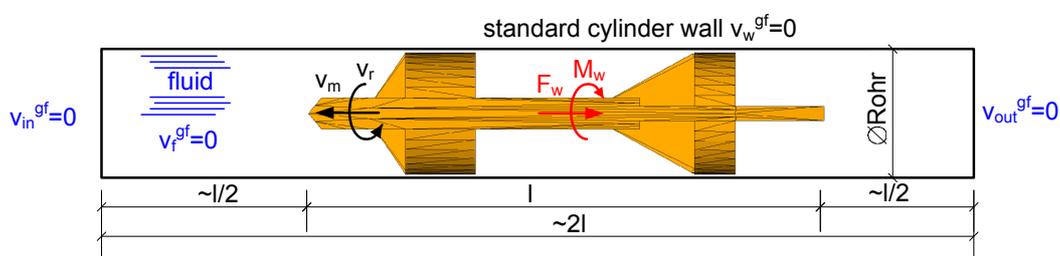


Abb. 6.31: Aufbau des Simulationsmodells für die Untersuchung des Widerstandsmomentes bei der Rotation

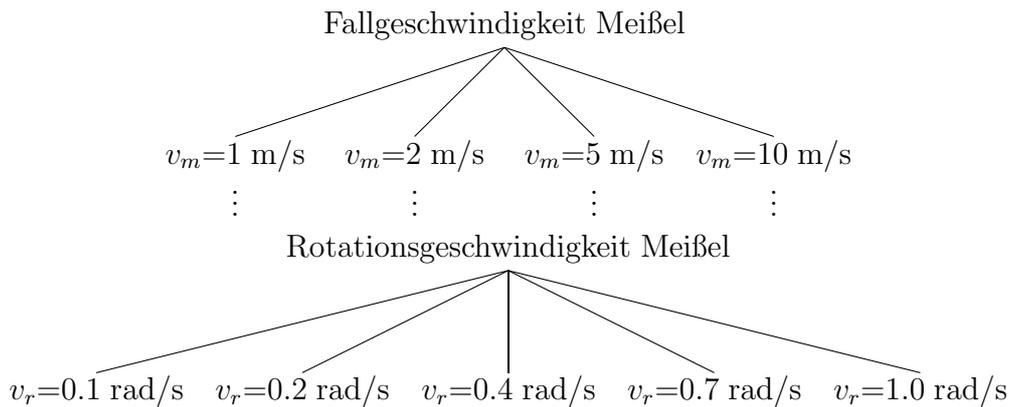


Abb. 6.32: Übersicht der Berechnungen für das Widerstandsmoment bei der Rotation (exemplarisch für den Flachmeißel LB0°)

Auswertung M^{RS}		$v_m = 0.1$	$v_m = 0.2$	$v_m = 0.5$	$v_m = 1.0$
Momentenkoeffizient ψ	[kgm]	82.74	79.56	79.34	83.23
Momentenkoeffizient c_m	[1]	0.050	0.048	0.048	0.050

Tab. 6.12: Berechnete Momentenkoeffizienten für den Flachmeißel (LB0°)

6.8.2 Flachmeißel

In Abb. 6.33 sind die Ergebnisse der Berechnungen für den Flachmeißel mit einer Lenkblechneigung LB0° dargestellt. Anhand der Ergebnisse kann ein deutlich linearer Zusammenhang zwischen Widerstandsmoment und Fall- bzw. Rotationsgeschwindigkeit festgestellt werden. Mit Gl. 5.56 können die entsprechenden (Gesamt)Momentenkoeffizienten ψ und c_m für die jeweilige Fallgeschwindigkeit des Meißels berechnet werden (siehe Tab. 6.12). Dabei werden beinahe gleiche Koeffizienten c_m für unterschiedliche Fallgeschwindigkeiten erhalten. Dies bestätigt damit deutlich den analytischen Ansatz für das Widerstandsmoment im Ringspalt M^{RS} in Abschnitt 5.2.5 (siehe S. 60).

6.8.3 Flachmeißel im Modellmaßstab

Die für den Flachmeißel angegebenen Berechnungen wurden mit entsprechend geringeren Fallgeschwindigkeiten auch mit dem Flachmeißelmodell ausgeführt (Modellversuche, Variante LB0°, $v_m = 0-1.0$ m/s, 25 Simulationen). Wie zuvor kann ein deutlich linearer Zusammenhang zwischen Widerstandsmoment und Fall- bzw. Rotationsgeschwindigkeit festgestellt werden (siehe Abb. 6.34). Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tab. 6.13 angeführt und zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den zuvor erhaltenen Werten am realen Flachmeißel. Damit können die Momentenkoeffizienten für beide Modelle mit $c_m \approx 0.05$ angegeben werden.

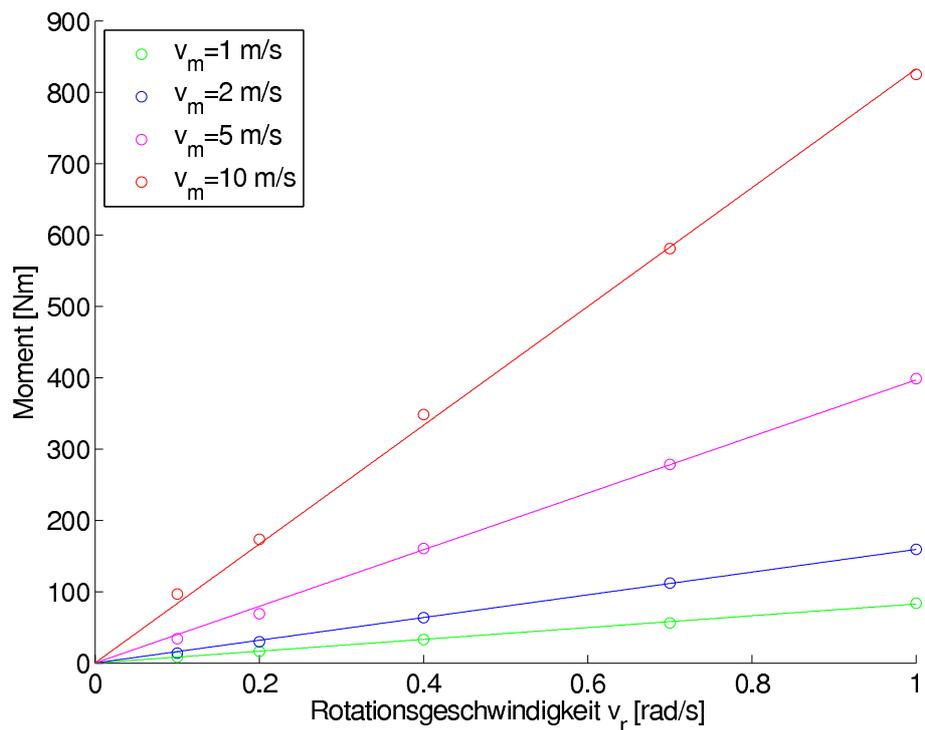


Abb. 6.33: Widerstandsmomente M^{RS} für den Flachmeißel LB0° in Abhängigkeit von der Fall- und Rotationsgeschwindigkeit

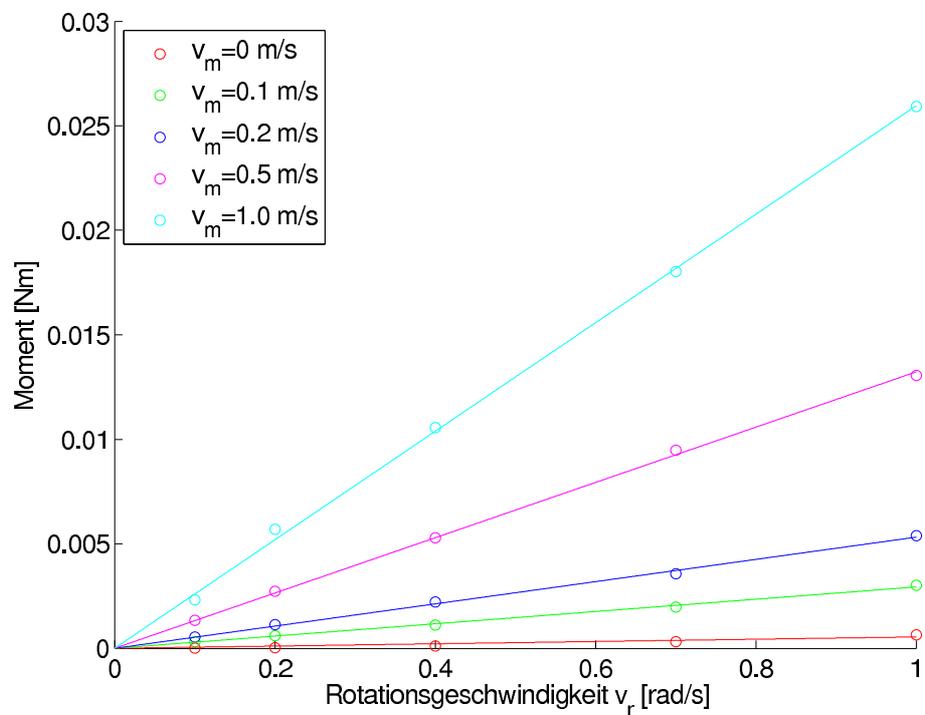


Abb. 6.34: Widerstandsmomente M^{RS} für das Flachmeißelmodell LB0° in Abhängigkeit von der Fall- und Rotationsgeschwindigkeit

Auswertung M^{RS}		$v_m = 0$	$v_m = 0.1$	$v_m = 0.2$	$v_m = 0.5$	$v_m = 1.0$
Momentenkoeffizient ψ	[kgm]	0.001	0.029	0.027	0.027	0.026
Momentenkoeffizient c_m	[1]	0.001	0.059	0.053	0.053	0.052

Tab. 6.13: Berechnete Momentenkoeffizienten für das Flachmeißelmodell (LB0°)

6.9 Gegenüberstellung der Ergebnisse

In Tab. 6.14 sind die Ergebnisse der bisher beschriebenen Berechnungen zusammengefasst. Anhand der normierten Koeffizienten c_w und c_r können die Meißelvarianten hinsichtlich ihrer Strömungseigenschaften gegenübergestellt werden. Dabei eignet sich die graphische Darstellung der Ergebnisse in Abhängigkeit der Lenkblechanstellung (siehe Abb. 6.35). Der Flachmeißel LB10° und der Ringmeißel erreichen die geringsten Strömungswiderstandskoeffizienten c_w . Das bedeutet, daß diese Meißelausführungen im Bezug auf die Stirnfläche das beste Strömungsverhalten aufweisen. Grundsätzlich liegen die Werte für Ring-, Flach- und Kreuzmeißel mit $c_w=3.19$, 3.32 und 3.55 jedoch verhältnismäßig nahe beieinander (Flachmeißel LB10°).

Der Flachmeißel wurde im Hinblick auf die strömungstechnische Optimierung mit unterschiedlichen Lenkblechanstellungen zur Erzeugung einer Rotationsbewegung untersucht. Dabei konnte eine deutliche Veränderung des Strömungswiderstandes festgestellt werden. Bei einer Lenkblechneigung von 0 bis 40° vergrößert sich der Koeffizient c_w um ungefähr das Zweifache. Dies ist mit einer wesentlichen Verschlechterung der Strömungseigenschaften gleichzusetzen. In einer absoluten Betrachtung nimmt der Gesamtströmungswiderstandskoeffizient κ sogar um das 3.5-fache zu. Der Koeffizient κ geht in die Endgeschwindigkeit proportional mit der Wurzel und daher in die kinetische Energie des Meißels linear ein. Daraus ergibt sich beinahe eine Halbierung der Endgeschwindigkeit und eine Abminderung der Meißelenergie um ca. 70%! Dieses Ergebnis wird sowohl qualitativ als auch quantitativ anhand der Ergebnisse der Flachmeißel im Modellmaßstab bestätigt (Kurvenverlauf in Abb. 6.35a).

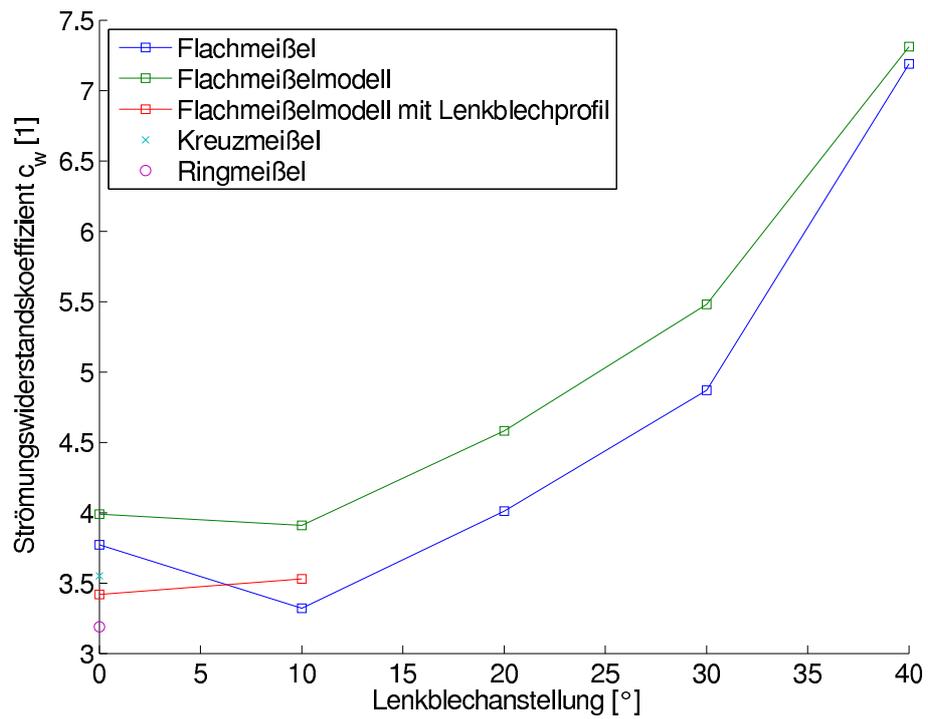
Die Rotationskoeffizienten für die entsprechend mit Lenkblechen ausgestatteten Meißeltypen sind ebenfalls dargestellt. Bereits bei einer Verdrehung der Lenkbleche um 10° wird beim Flachmeißel ein Rotationskoeffizient c_r von 0.42 erhalten. Dieser steigt mit zunehmender Verdrehung auf ca. den doppelten Wert an. Der Meißel im Modellmaßstab weist bei 10° Anstellung noch einen annähernd ähnlichen Rotationskoeffizienten auf ($c_r^{real}=0.42$; $c_r^{modell}=0.31$). Mit zunehmender Verdrehung weichen die Kurven jedoch deutlich voneinander ab (siehe Abb. 6.35b). Die Kurve für das maßstäbliche Meißelmodell steigt bis 30° nur mehr unwesentlich an und fällt bei einer Anstellung von 40° sogar wieder unter den Wert des Meißelmodells LB20°. Der Unterschied im Kurvenverlauf ist größtenteils den

	Lenkblechversion	Widerstandskoeffizient		Rotationskoeffizient	
		κ [kg/m]	c_w [1]	μ [kg]	c_r [1]
Flachmeißel	LB 0°	498	3.77	-	-
	LB 10°	560	3.32	15.63	0.42
	LB 20°	732	4.01	23.33	0.61
	LB 30°	1026	4.87	30.49	0.73
	LB 40°	1762	7.19	43.45	0.94
Flachmeißel Modell	LB 0°	8.2	3.99	-	-
	LB 10°	10.2	3.91	3.04E-02	0.31
	LB 20°	14.5	4.58	3.55E-02	0.36
	LB 30°	20.1	5.48	3.95E-02	0.40
	LB 40°	30.0	7.31	3.32E-02	0.34
	PR 0°	7.8	3.42	5.82E-03	0.06
	PR 10°	9.6	3.53	1.60E-02	0.16
Kreuzmeißel	-	614	3.55	-	-
Ringmeißel	-	482	3.19	-	-

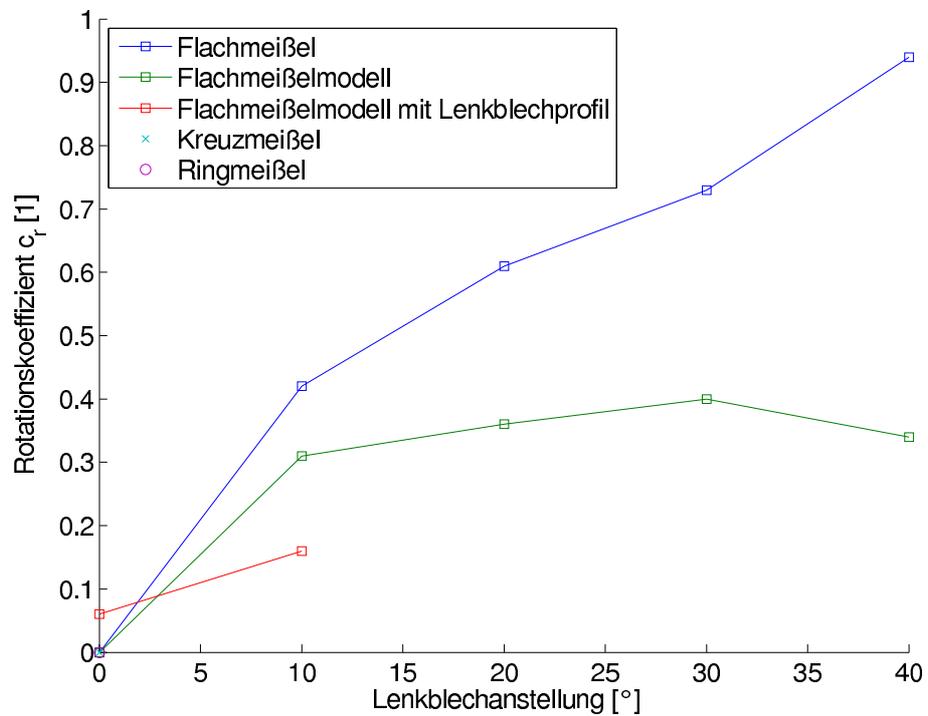
Tab. 6.14: Zusammenfassung der numerisch ermittelten Widerstands- und Rotationskoeffizienten

Anströmblechen zuzurechnen, die beim maßstäblichen Modell gänzlich fehlen und eine Verbesserung des Drehmomentes bewirken. Bei einer Anstellung der Lenkbleche von 10° ist die Wirkung der Anströmbleche allerdings noch relativ gering und erst bei zunehmender Lenkblechverdrehung von größerem Einfluß (siehe auch Erklärungen in Abschnitt 6.7.3).

Das tragflächenförmige Lenkblechprofil bei der maßstäblichen Meißelvariante erzeugt ebenfalls eine Rotation. Der erhaltene Rotationskoeffizient ist jedoch relativ gering und nimmt auch durch Lenkblechverdrehung nur wenig zu. Bei einem Anstellwinkel von 10° wird mit den rechteckigen Lenkblechen bereits ein doppelt so großer Rotationskoeffizient erzielt (bei ähnlichem Strömungswiderstand), weshalb die Variante PR10° jedenfalls nicht sinnvoll erscheint. Die Lenkblechvariante PR00° fällt dagegen mit einem geringen Strömungswiderstandskoeffizienten bei gleichzeitiger Erzielung einer geringen Rotation positiv auf. Im Detail muß für alle Lenkblechvarianten und -anstellungen aber noch geprüft werden, welche Verdrehungen der Meißel aus vorgegebener Fallhöhe tatsächlich erzielbar sind und welcher Rotationskoeffizient folglich im praktischen Einsatz erforderlich ist (siehe Kap. 9, Ergebnisauswertung und Hinweise für den praktischen Einsatz).



(a) Strömungswiderstandskoeffizient



(b) Rotationskoeffizient

Abb. 6.35: Graphische Darstellung der numerisch ermittelten Ergebnisse für die unterschiedlichen Meißelvarianten

7 Modellversuche

7.1 Aufbau und Versuchsablauf

Einige Untersuchungen konnten mit den bisherigen Methoden und bei den später beschriebenen Baustellenmessungen nicht vollständig durchgeführt werden. Dies betrifft vor allem die Drehbewegung des Meißels beim Fallvorgang unter Wasser und den Aufprall und Eintauchvorgang des Meißels an der freien Wasseroberfläche mit einer vorgegebenen Fallgeschwindigkeit. Die Untersuchungen wurden daher durch eine Reihe von im Labor durchgeführten, maßstäblichen Versuchen ergänzt. Anhand der Modellversuche konnten die analytischen Modelle getestet und verbessert, die numerischen Ergebnisse quantitativ überprüft und außerdem spezielle Tests durchgeführt werden. Die Modellversuche zeichnen sich durch folgende Vorteile aus:

- Präzise Aufnahme der Fallbewegung ohne Widerstände auf der Geräteseite (Szenario 3, siehe Abb. 4.1)
- Erfassung und Optimierung des Rotationsverhaltens von Flachmeißeln unter Wasser
- Untersuchung des Aufpralls auf die freie Wasseroberfläche und des anschließenden Eintauchvorganges
- Hohe Verlässlichkeit der Meßergebnisse durch eine große Anzahl an Versuchen und Meßpunkten mit anschließender statistischer Auswertung

In Abb. 7.1 ist der Aufbau für die durchgeführten Modellversuche im Maßstab 1:7.4 dargestellt. Dabei stellt der Plexiglaszylinder die Verrohrung für den Meißel dar, in dem der Fallvorgang stattfindet. Dieser besitzt einen Durchmesser von 14.8 cm, eine Gesamthöhe von 200 cm und wird exakt lotrecht aufgestellt. An der Unterseite des Zylinders befindet sich ein Schwamm, der den Aufprall des Meißels dämpft. Über das, ebenfalls an der Grundfläche befindliche, Abflußrohr kann der Zylinder befüllt und entleert werden. Für den Großteil der gegenständlichen Versuche ist der Zylinder komplett mit Leitungswasser gefüllt. Der Meißel kann an der Oberseite des Zylinders eingebracht und über eine Zugvorrichtung (Nylonschnur in der Mitte des Meißelendes befestigt) wieder gehoben werden.

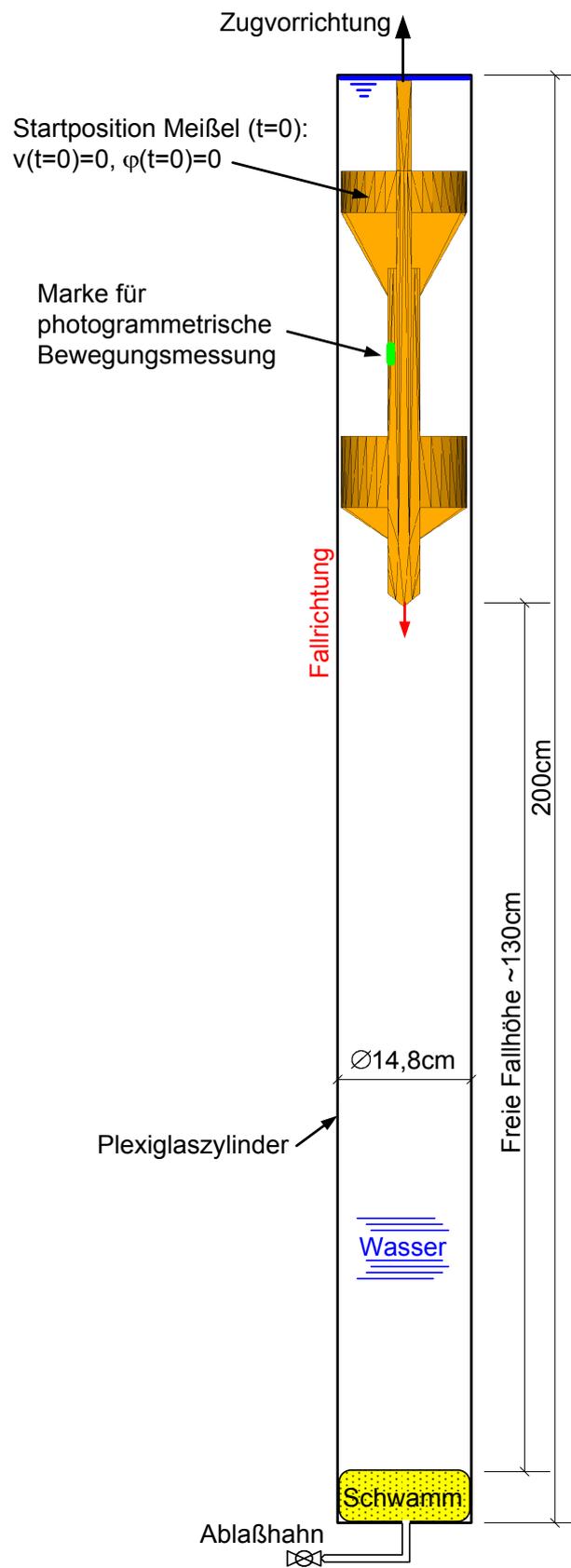


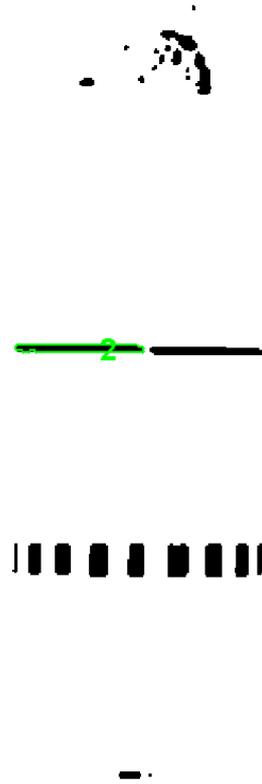
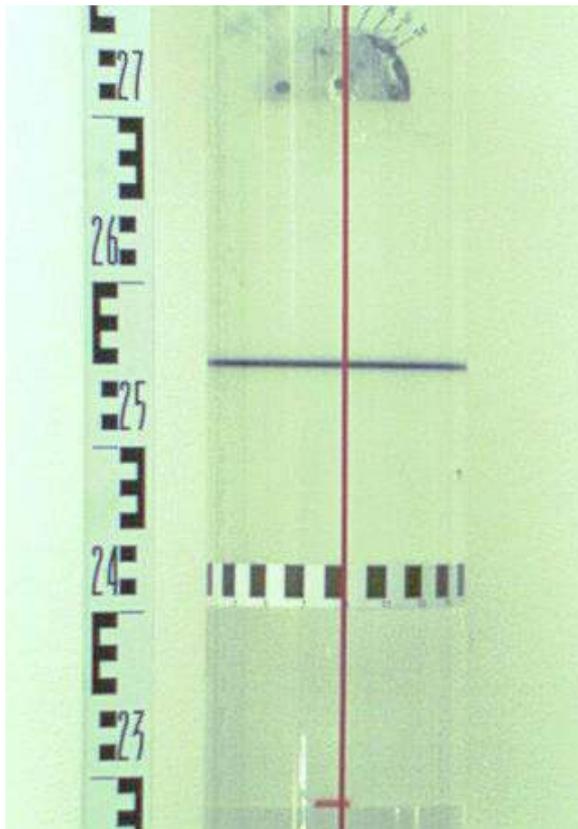
Abb. 7.1: Aufbau der Modellversuche

An der Oberkante des Zylinders ist ein Aluminiumprofil mit einer Rolle befestigt, welches die stets gleiche Startposition des Meißels bei den Versuchen gewährleistet. Der Meißel befindet sich damit zum Zeitpunkt $t=0$ stets auf der gleichen Ausgangshöhe und -richtung und die Meißelachse koaxial zur Zylinderachse. Die Rolle dient zur Umlenkung und Zentrierung, sodaß die Nylonschnur beim Hub des Meißels nicht am Profil beschädigt wird. Von der Ausgangslage bis zur Endposition ergibt sich ein Fallweg von ca. 1.3 m.

Zur Registrierung der Fallbewegung wird ein photogrammetrisches Meßverfahren mit rechnergestützter Auswertung eingesetzt, welches bereits eingehend in Kap. 4 beschrieben wurde. Im Unterschied dazu sitzt die Meßmarke nun direkt am Meißel (in Meißelmitte) und kann aufgrund der "transparenten Verrohrung" mit der Kamera aufgenommen werden. Parallel zur Zylinderachse muß wieder eine Nivellierlatte positioniert werden, damit die Meßmarkenbewegung auf Absolutwerte umgerechnet werden kann (siehe Abb. 7.2a und 7.4). Aufgrund der gleichen Distanz des Meißels und der Nivellierlatte zur Kamera, muß eine Umrechnung mit dem Strahlensatz jedoch nicht mehr erfolgen. Nach Erfassung der Meßmarken in den Einzelbildern erfolgt die rechnergestützte Auswertung in bereits bekannter Weise. Zusätzlich kann nun auch die Drehbewegung des Meißels anhand einer 360° Skala abgelesen werden, die an den unteren Führungsring des Meißels geklebt ist. Mit Bezug auf eine unbewegliche Referenzlinie (rote Linie in Zylindermitte, siehe Abb. 7.2a) kann somit die absolute Drehbewegung des Meißels über eine gewählte Fallhöhe abgelesen werden.

Das Meißelmodell wurde in Anlehnung an das Flachmeißel-Basismodell in Abb. 6.6 im Maßstab 1:7.4 mit wenigen Veränderungen nachgebaut (siehe Abb. 7.3). Der größte Unterschied zum echten Modell besteht darin, daß der Meißel zunächst aus Plexiglas gefertigt wurde, um die Belastung des Plexiglaszylinders beim Aufprall gering zu halten. Der Meißel besitzt damit bei einer Länge von 54 cm eine Gesamtmasse von ca. 1.25 kg. Später wurde der Mittelteil des Modells durch ein Stahlblech ersetzt, um auch höhere Fallgeschwindigkeiten untersuchen zu können. Damit konnte die Masse des Modells ohne Geometrieveränderung beinahe um das Dreifache, auf ca. 3.4 kg, erhöht werden (siehe Abb. 7.4).

Die Lenkbleche im hinteren Führungsring des Meißels wurden verstellbar ausgeführt (von 0° - 50°), um die Auswirkung auf die Drehbewegung beobachten zu können. Zusätzlich wurde ein strömungstechnisch günstiges Lenkblechprofil in Anlehnung an ein Tragflächenprofil hergestellt, um eine Rotationsbewegung ohne große Erhöhung des Strömungswiderstandes zu erzeugen (siehe Abb. 7.5). In Tab. 7.1 findet sich eine Zusammenfassung der Eigenschaften der getesteten Modelle.



(a) Einzelbild einer Fallsequenz

(b) Erkannte Meßmarke für die Auswertung

Abb. 7.2: Aufnahme und Auswertung der Fallbewegung bei den Modellversuchen

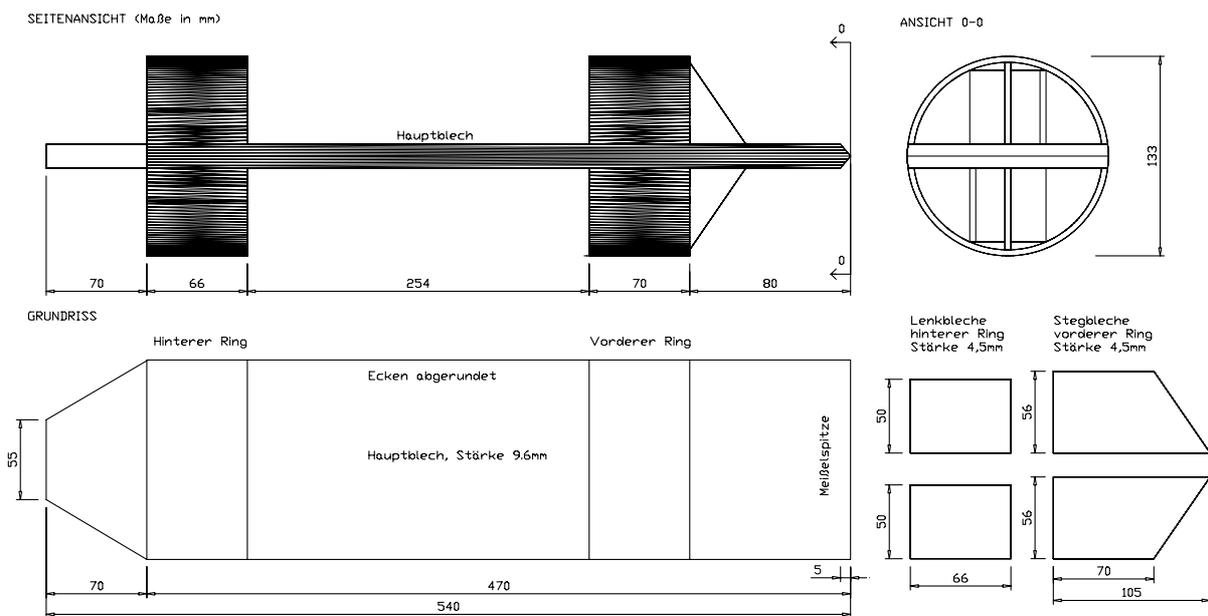
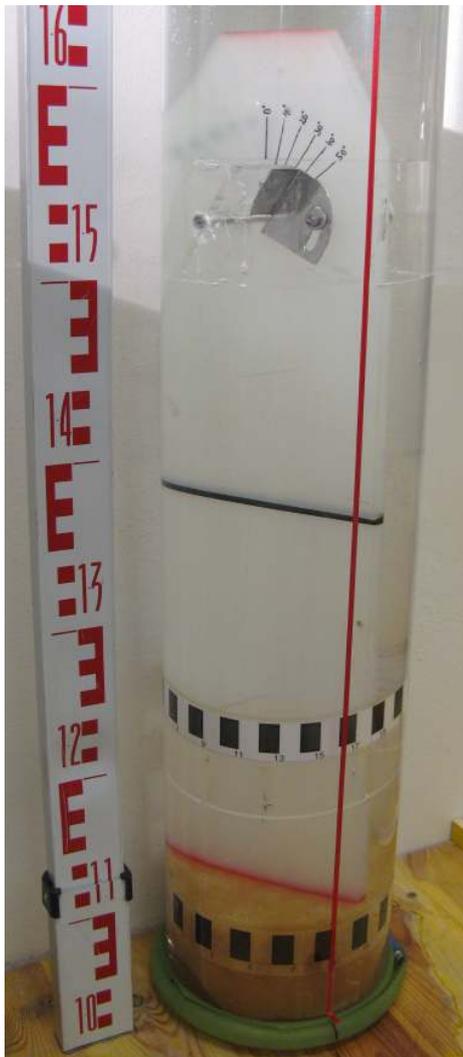


Abb. 7.3: Plan des Modellflachmeißels im Maßstab 1:7.4



(a) Leichte Ausführung (Plexiglas)

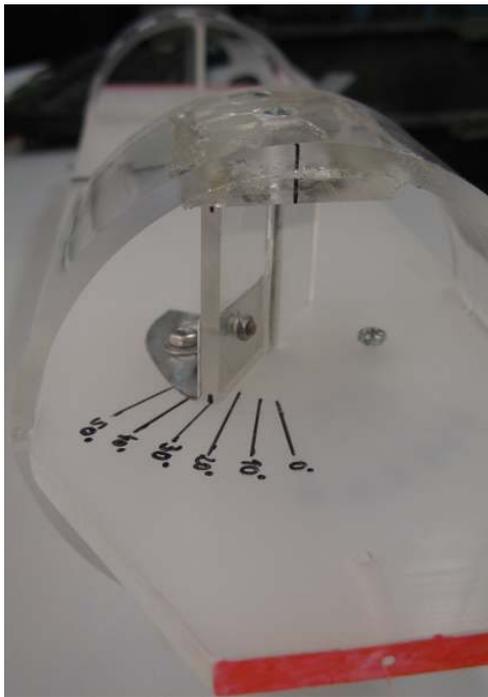


(b) Schwere Ausführung (mit Stahlplatte)

Abb. 7.4: Flachmeißelmodelle in der Endposition im Plexiglaszylinder

Flachmeißelmodell		Leichter Meißel		Schwerer Meißel	
		□	▷	□	▷
Lenkblechquerschnitt					
Querschnittsfläche Lenkblech	[cm ²]	3.0	4.1	3.0	4.1
Fläche Lenkblech	[cm ²]	32.0	31.4	32.0	31.4
Masse	[g]		1253		3362
Volumen	[cm ³]		1024.0		1041.0
Trägheitsmoment	[kgcm ²]		26.16		58.80

Tab. 7.1: Eigenschaften der verschiedenen Meißeltypen im Modellmaßstab



(a) Verstellbare rechteckige Lenkbleche

(b) Detailansicht der tragflächenähnlichen Lenkblechprofile

Abb. 7.5: Verschiedene Lenkbleche für den Modellmeißel

7.2 Untersuchung der Fallbewegung

Die Fallbewegung wurde mit jedem Meißelmodell durch achtzehn Fallversuche gemessen. Aufgrund der Auflösung der Meßkamera mußte der gesamte Fallweg von 1.3 m in drei Abschnitte mit jeweils ca. 40 cm Höhe unterteilt werden. Der Bildbereich der Kamera wurde nacheinander auf die drei Abschnitte eingestellt, womit sich für jeden Abschnitt sechs registrierte Fallversuche ergaben.

Diese Vorgangsweise war notwendig, um eine ausreichende Auflösung der Bildhöhe für die nachfolgende rechnergestützte Auswertung zu erhalten (vgl. Erklärungen in Kap. 4). Durch die Erfassung des gesamten Fallvorgangs des Meißels konnte der Verlauf der Geschwindigkeitskurve lückenlos beschrieben werden. Insgesamt wurden zehn Meißelvarianten getestet und damit eine Gesamtanzahl von 180 Fallversuchen durchgeführt. In Abb. 7.6 ist eine Übersicht über die Versuche angegeben.

7.2.1 Versuche mit dem leichten Flachmeißelmodell

In Abb. 7.7 sind die erhaltenen Geschwindigkeitskurven des leichten Flachmeißelmodells bei unterschiedlicher Lenkblechneigung dargestellt. Der erste Meßabschnitt deckt die Beschleunigungsphase für fast alle Varianten vollständig ab, während in den beiden anderen

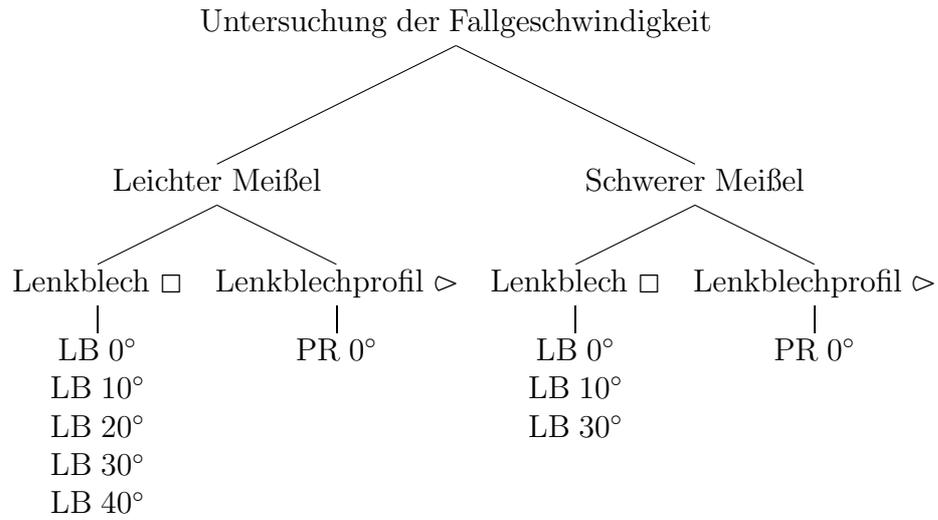


Abb. 7.6: Übersicht der Modellversuche für die Untersuchung der Fallgeschwindigkeit

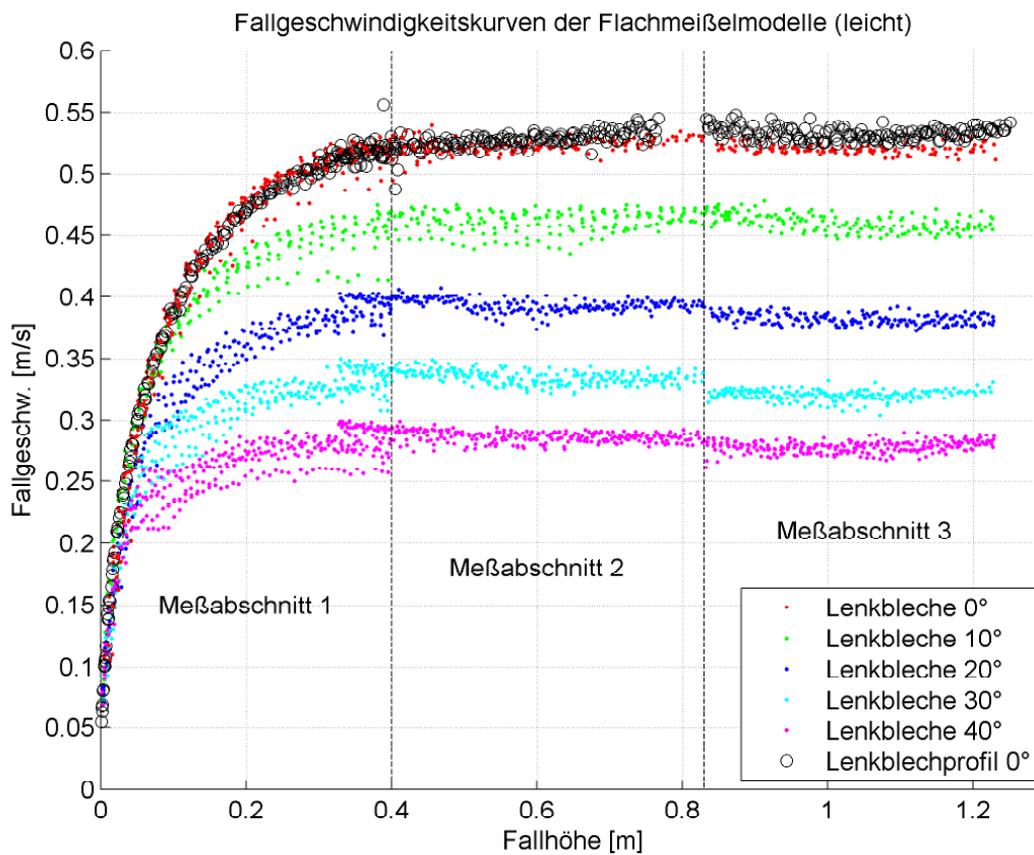


Abb. 7.7: Experimentell ermittelte Fallgeschwindigkeitskurven anhand des leichten Flachmeißelmodells mit unterschiedlichen Lenkblechausführungen

Meßbereichen bereits eine konstante Geschwindigkeit erreicht ist. Dabei zeigt der Kurvenverlauf eine sehr gute Übereinstimmung an den Übergängen der einzelnen Abschnitte. Geringe Verschiebungen ergeben sich lediglich durch die manuelle Eingabe der Abschnittsgrenzen in der Auswertung. Bei näherer Betrachtung ist eine geringfügig fallende Tendenz der Meßwerte im zweiten und dritten Abschnitt bei stärker geneigten Lenkblechen erkennbar. Dies ist auf die zunehmende Verdrehungen des Meißels zufolge der Lenkblechstellung und damit auf eine Verzerrung der Meßmarken zurückzuführen. Bestätigt wird dies durch die Tatsache, daß dieser Effekt bei einer Lenkblechneigung von 0° praktisch nicht auftritt.

Die Endgeschwindigkeit der Meißelvarianten ist auffallend deutlich von der Lenkblechstellung abhängig. So unterscheiden sich die Endgeschwindigkeiten der Meißelmodelle mit 0° und 40° angestellten Lenkblechen um beinahe den Faktor 2 (siehe Tab. 7.2)! Der Geschwindigkeitsverlauf der Meißelvariante mit dem strömungsgünstigen Lenkblechprofil $PR0^\circ$ deckt sich hingegen vollständig mit der Variante $LB0^\circ$, obwohl dieses Lenkblechprofil eine größere Stirnfläche besitzt. Dies deckt sich damit exakt mit den numerischen Untersuchungen dieses Meißelmodells in Kap. 6.

7.2.2 Versuche mit dem schweren Flachmeißelmodell

Die Fallversuche mit dem schweren Meißeltyp wurden gemäß Diagramm 7.6 in vier Lenkblechvarianten untersucht.

Die Ergebnisse stimmen qualitativ sehr gut mit jenen überein, die anhand des leichten Meißels ermittelt wurden. So konnte beispielsweise für die Lenkblechvarianten $LB0^\circ$ und $PR0^\circ$ wieder ein quasi identer Geschwindigkeitsverlauf festgestellt werden. Mit zunehmender Lenkblechanstellung verringert sich ebenfalls die Endgeschwindigkeit des Meißels. Der Unterschied zwischen den Geschwindigkeitskurven des leichten und schweren Meißels besteht damit in der wesentlich höheren Endgeschwindigkeit und einer längeren Beschleunigungsphase. Beim leichten Meißeltyp wurde diese bereits nach ca. 40-50 cm abgeschlossen und die Endgeschwindigkeit erreicht. Der schwere Meißel benötigt dafür hingegen etwa den doppelten Fallweg. Die Endgeschwindigkeiten konnten durch die Erhöhung der Masse um das ≈ 2.7 -fache etwa um den Faktor 3.4 gesteigert werden. Die Geschwindigkeitsabminderung durch die Lenkblechanstellung ist bei beiden Meißelmodellen (leicht und schwer) relativ gesehen gleich. So liegt beispielsweise die Endgeschwindigkeit der Version $LB30^\circ$ bei ca. 63% der Version $LB0^\circ$ in beiden Modellen. Eine Gesamtübersicht der Endgeschwindigkeiten dieser Untersuchung ist in Tab. 7.2 angegeben.

Die Auswertequalität der Messung liegt hier etwas unter jener für den leichten Fallmeißel (Anzahl der Meßpunkte und fehlerhafte Punkte, siehe Abb. 7.8). Dies ist vorwiegend

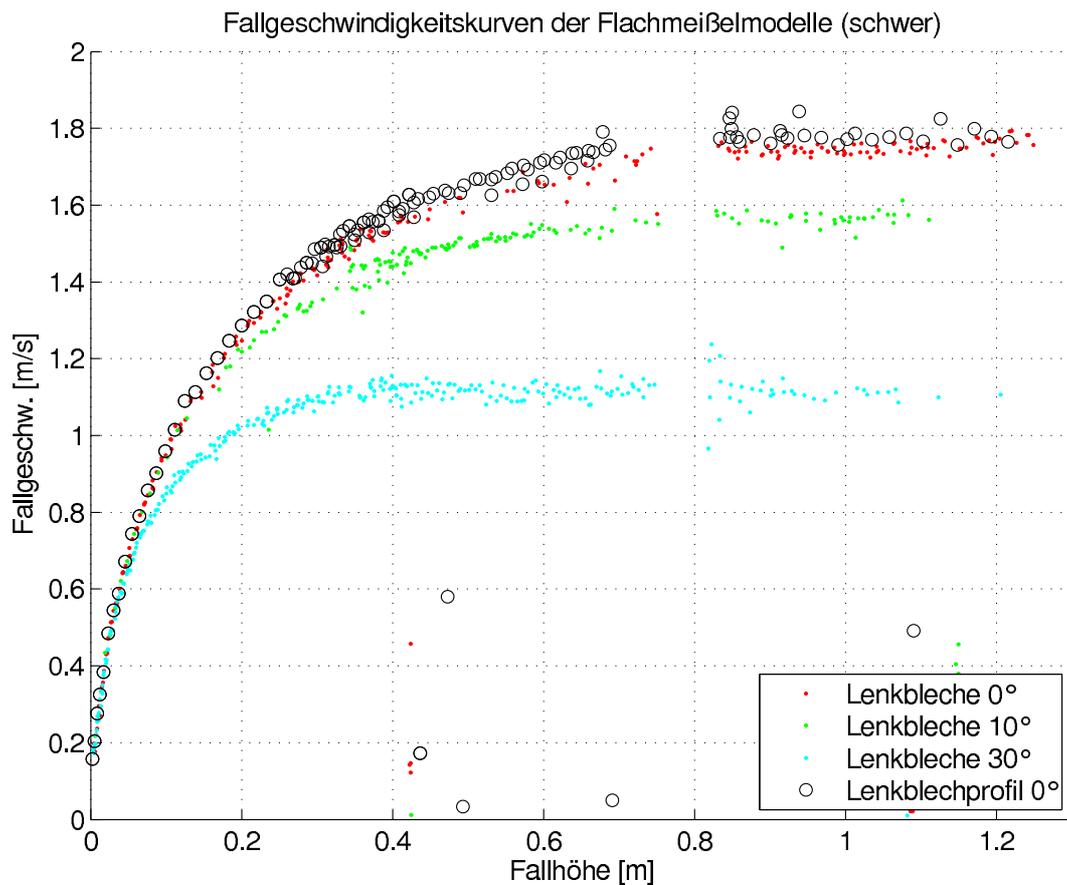


Abb. 7.8: Experimentell ermittelte Fallgeschwindigkeitskurven anhand des schweren Flachmeißelmodells mit unterschiedlichen Lenkblechausführungen

auf die erhöhte Turbulenz und den Kontrast der Meßmarke am Stahlblech, jedoch nicht auf die Meßmethode selbst zurückzuführen. Durch entsprechende Farbgestaltung ließe sich die Auswertqualität in einer erneuten Messung sicherlich noch verbessern. Für die gegenständliche Auswertung und den Vergleich mit dem leichten Meißelmodell ist das Ergebnis jedoch absolut ausreichend.

Endgeschwindigkeit		LB00	LB10	LB20	LB30	LB40	PR00
Modell leicht v_{end}^l	[m/s]	0.52	0.46	0.39	0.33	0.28	0.53
Verhältnis $LB_i/LB00$	[%]	100	89	75	63	54	102
Modell schwer v_{end}^s	[m/s]	1.75	1.57	-	1.11	-	1.78
Verhältnis $LB_i/LB00$	[%]	100	90	-	64	-	102
Verhältnis v_{end}^s/v_{end}^l	[1]	3.35	3.39	-	3.38	-	3.36

Tab. 7.2: Endgeschwindigkeiten der verschiedenen Flachmeißel im Modellversuch

7.3 Untersuchung des Rotationsverhaltens

Das Rotationsverhalten wurde für die in Abb. 7.9 angegebenen Meißelvarianten untersucht. Dabei wurde die Gesamtrotation des Modells bei einer Fallhöhe von 1.3 m im vollständig wassergefüllten Zylinder notiert. Um fehlerhafte Ablesungen weitgehend ausschließen zu können, wurden für jede Meißelvariante achtzehn Fallversuche durchgeführt. Die Gesamtanzahl der durchgeführten Versuche für den leichten und schweren Meißel beträgt damit 216. Die Ergebnisse der Versuche lassen sich sehr gut in den Diagrammen in Abb. 7.10 ablesen. Darin sind die ermittelten Rotationswerte für beide Meißelversionen mit verschiedenen Lenkblechanstellungen anhand von Boxplots¹ in Abhängigkeit der Lenkblechneigung dargestellt. Bei beiden Modellen lassen sich bereits bei einer vertikalen Anordnung der Lenkbleche (LB0°) Rotationswerte erkennen, welche dem nicht perfekt symmetrischen Modell zuzuordnen sind. Bei dieser Lenkblechanstellung werden beim leichten Modell auch die größten Streuungen erhalten, welche mit zunehmender Lenkblechanstellung deutlich geringer werden. Mit größerer Lenkblechneigung kann hier ein genaueres Ergebnis als beim schweren Meißelmodell angegeben werden. Der Verlauf der Kurven für das leichte und schwere Modell ist qualitativ sehr ähnlich, wodurch die Richtigkeit der Meßmethode bestätigt wird. Darüber hinaus liegen auch die Größenordnungen der Gesamtrotationen für beide Meißelversionen im gleichen Bereich, die darauf schließen lassen, daß die Masse des Meißels in Summe wenig Einfluß auf die absolute Rotation hat.

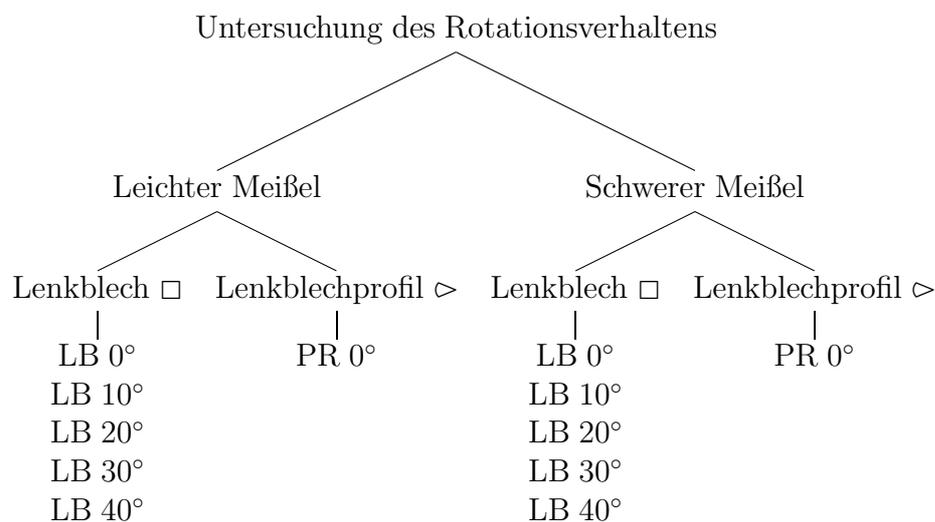
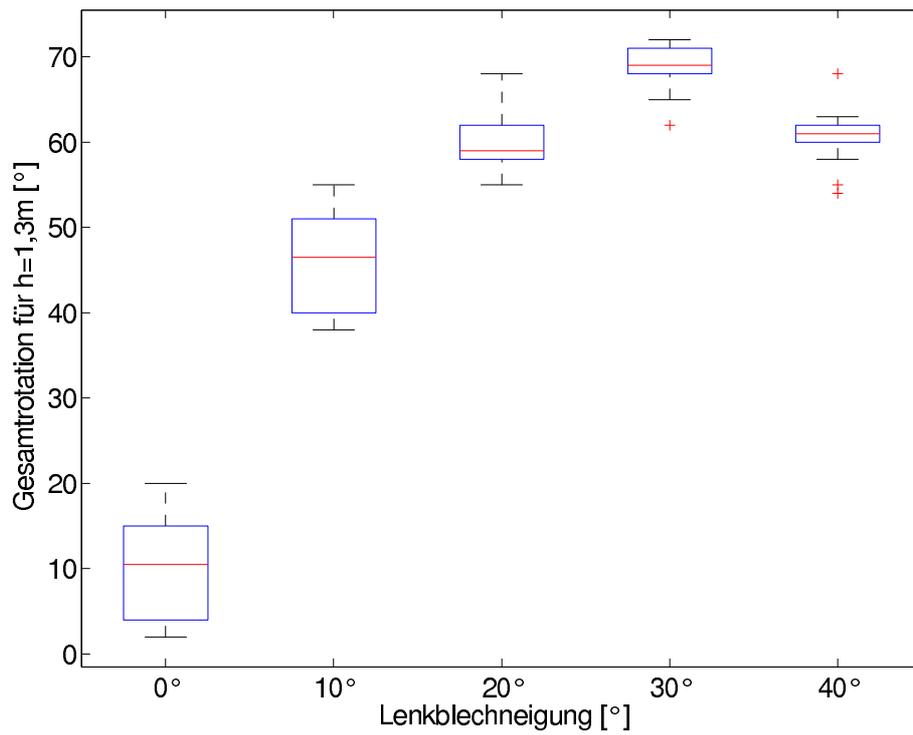
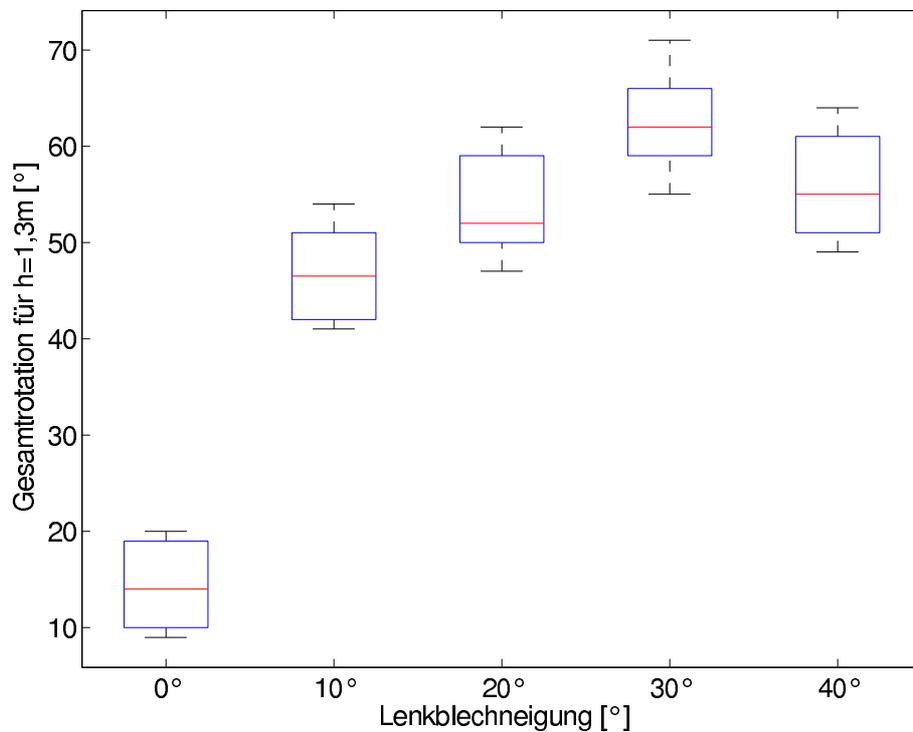


Abb. 7.9: Übersicht über die gemessenen Gesamtrotationen bei einer Fallhöhe von 1.3m

¹Ein Boxplot dient zur graphischen Darstellung einer Serie von Einzelbeobachtungen. Es werden Median, Quartile, Extrema und Ausreißer dargestellt [35].



(a) Leichtes Meißelmodell



(b) Schweres Meißelmodell

Abb. 7.10: Experimentell ermittelte Rotationswerte nach einer Fallhöhe von 1.3 m für beide Flachmeißelmodelle bei unterschiedlicher Lenkblechanstellung

7.4 Freier Fall auf die Wasseroberfläche

Im Baustelleneinsatz fällt der Meißel oft zunächst im freien Fall und taucht erst nach einer bestimmten Fallhöhe in die Wassersäule ein. Damit besitzt der Meißel beim Auftreffen auf die Wasseroberfläche eine vom bereits zurückgelegten Fallweg abhängige Geschwindigkeit. Es interessiert nun, wie der Meißel durch das Eintauchen verzögert wird und wie schnell der Meißel wieder seine Endgeschwindigkeit im Fallvorgang unter Wasser erreicht. Dies soll durch Modellversuche aus verschiedenen "freien" Fallhöhen gemäß Abb. 7.11 untersucht werden.

Die freie Fallhöhe definiert sich aus der Distanz der Meißelschneide bis zur Wasseroberfläche in der Ausgangsposition und wurde mit 0, 20 und 40 cm festgelegt. Alle Versuche wurden ausschließlich mit dem leichten Fallmeißelmodell mit unterschiedlichen Lenkblechanstellungen (0° , 10° , 30°) durchgeführt. Die Aufnahme der Meißelgeschwindigkeiten wurde wieder mit dem photogrammetrischen Meßverfahren durchgeführt, welches durch die Turbulenzbildung beim Eintauchvorgang adaptiert werden mußte (siehe Abb. 7.12). Zusätzlich wurden einige Punkte der Kurven manuell hinzugefügt.

In den folgenden Abbildungen 7.13, 7.14 und 7.15 sind die Ergebnisse der durchgeführten Versuche dargestellt. Dabei kann in allen Versuchsvarianten zunächst eine starke Beschleunigungsphase (freier Fall) festgestellt werden. Die Maximalgeschwindigkeit v_{max} tritt unmittelbar nach dem Eintauchen des Meißels in die Flüssigkeit auf und wird umso schneller erreicht, je höher die Geschwindigkeit des Meißels bereits beim Auftreffen auf die Wasseroberfläche war. Dabei werden trotz unterschiedlicher Lenkblechanstellung ungefähr gleiche Maximalgeschwindigkeiten erzielt (vgl. Tab. 7.3). Nach dem Eintauchen erfolgt aufgrund des zunehmenden Strömungswiderstandes eine starke Verzögerung des Meißelmodells und die Geschwindigkeit fällt bis auf die, bereits aus den anderen Versuchen bekannte, Endgeschwindigkeit v_{end} ab. Ab diesem Zeitpunkt ist wieder der stationäre Fallzustand erreicht.

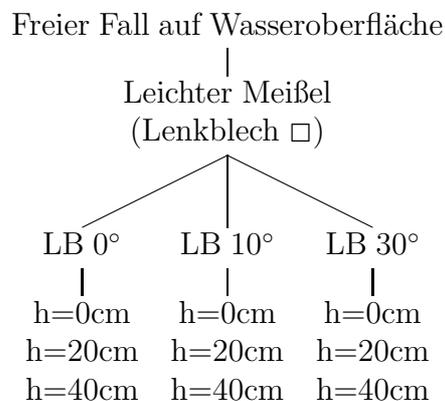


Abb. 7.11: Übersicht über die freien Fallversuche auf die Wasseroberfläche



Abb. 7.12: Eintauchvorgang des Meißelmodells in die Flüssigkeit mit erheblicher Turbulenzbildung

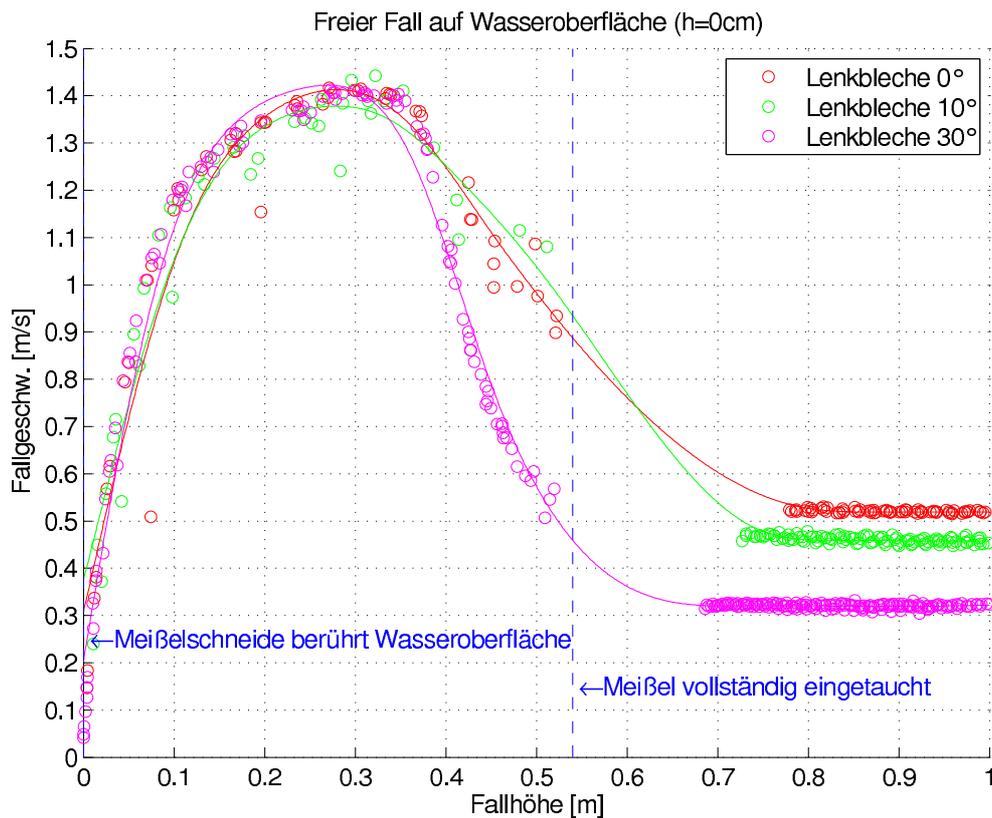


Abb. 7.13: Freier Fall der Meißelmodelle aus einer Höhe von 0 cm auf die Wasseroberfläche

In den Diagrammen kann außerdem der erforderliche Fallweg zwischen dem vollständig eingetauchten Meißelmodell und dem Erreichen des stationären Zustandes abgelesen werden (siehe Tab. 7.3). Die maximale Distanz beträgt bei allen Versuchen etwa 0.27 m und entspricht damit der halben Meißelmodelllänge ($l_m=0.54$ m).

Freier Fall auf WOF		h=0 cm	h=20 cm	h=40 cm
Fallgeschwindigkeit v_{max}	[m/s]	1.40	2.10	2.80
Fallweg zw. Eintauchen u. v_{max}	[m]	0.29	0.10	0.07
Fallweg zw. vollst. eingetaucht u. v_{end}	[m]	0.28	0.26	0.26

Tab. 7.3: Auswertung des freien Falls auf die Wasseroberfläche

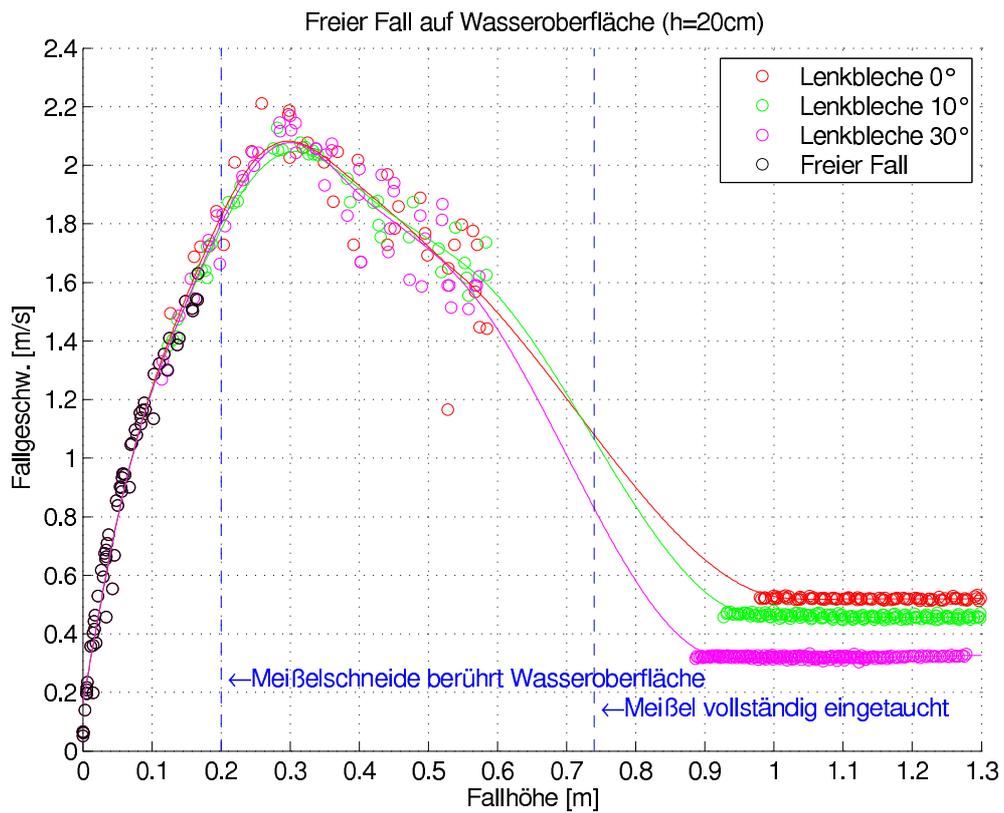


Abb. 7.14: Freier Fall der Meißelmodelle aus einer Höhe von 20 cm auf die Wasseroberfläche

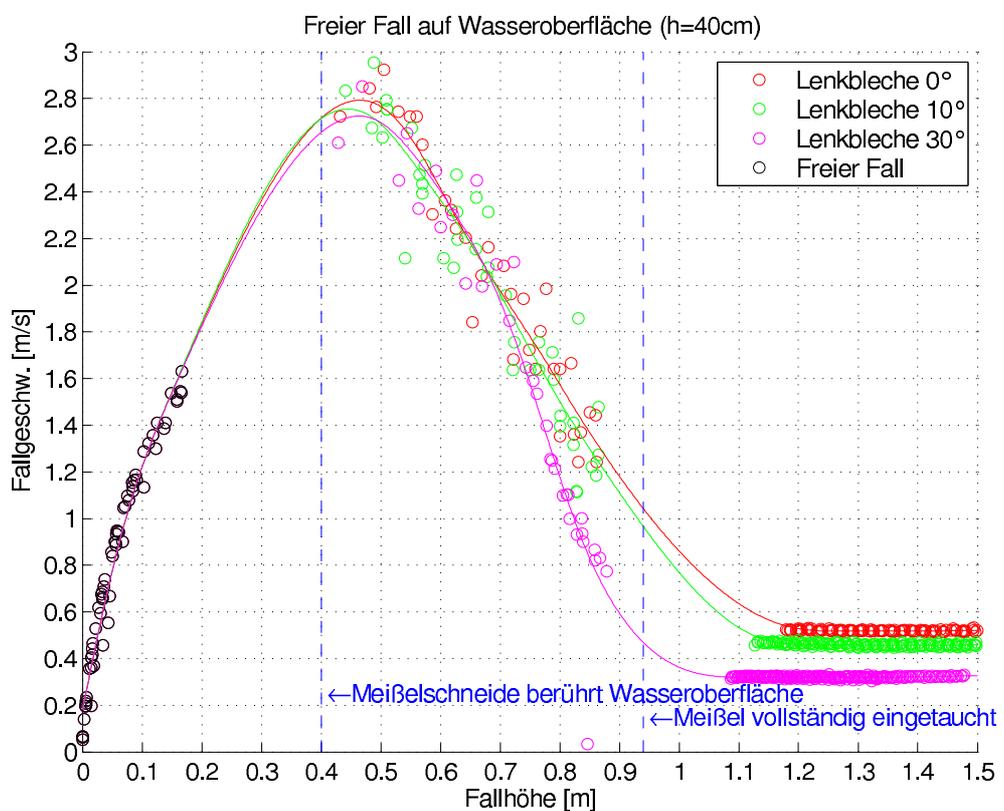


Abb. 7.15: Freier Fall der Meißelmodelle aus einer Höhe von 40 cm auf die Wasseroberfläche

7.5 Vergleich der Ergebnisse mit der analytischen Lösung

7.5.1 Gegenüberstellung der Fallbewegung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Modellversuche den analytischen Lösungen gegenübergestellt. Dies betrifft zunächst die aufgestellten Gleichungen für die Fallbewegung des Meißels. In den Diagrammen in Abb. 7.16 sind die Geschwindigkeitskurven für das leichte und schwere Flachmeißelmodell mit der analytischen Lösung aus Kap. 5 für den Fallvorgang unter Wasser gegenübergestellt. Die Strömungswiderstandskoeffizienten für die analytischen Kurven wurden dabei in Kap. 6 mit numerischen Methoden ermittelt. Bei allen Kurven zeigt sich ein grundsätzlich guter qualitativer und quantitativer Zusammenhang. Besonders beim schweren Fallmeißel kann jedoch eine geringfügig niedrigere, analytisch ermittelte Fallgeschwindigkeit festgestellt werden. erinnert man sich an den in Abschnitt 6.6.2.2 auf Seite 80 untersuchten Zusammenhang zwischen der Gitterauflösung und der Rechengenauigkeit, so werden für die verwendete Auflösung von ca. 32 Voxels entlang der charakteristischen Länge etwa 4 % höhere Rechenwerte erhalten. Durch eine Abminderung des Strömungswiderstandskoeffizienten um genau diesen Fehler kann die Übereinstimmung zwischen den Modellversuchen und der analytischen Lösung erhöht werden.

Ein weiterer Unterschied fällt in der Beschleunigungsphase der analytisch und experimentell ermittelten Kurven auf. Bei der analytischen Lösung ist ein steilerer Anstieg der Geschwindigkeiten und ein früheres Erreichen der Endgeschwindigkeit als im Modellversuch zu bemerken. Dies läßt sich dadurch begründen, daß die (konstanten) Strömungswiderstandskoeffizienten in den Simulationsberechnungen immer für einen stationären Zustand mit konstanter Anström- bzw. Fallgeschwindigkeit ermittelt wurden. In Abschnitt 5.2.2 (Kräfteansatz am Meißel) wurde jedoch bereits gezeigt, daß der Strömungswiderstandskoeffizient stark von der Reynolds-Zahl abhängt und nur in einzelnen Bereichen einen konstanten Wert annimmt. In der Beschleunigungsphase des Meißels wird daher jedenfalls ein größerer Wert anzunehmen sein, bis stationäre Verhältnisse erreicht werden. In Abb. 7.17 wurde dies berücksichtigt und der Widerstandsbeiwert mit einem Korrekturfaktor in Abhängigkeit des zurückgelegten Fallweges beaufschlagt. Stellt man nun die Ergebnisse der Modellversuche den beiden analytischen Lösungen gegenüber, so wird eine ausgezeichnete Übereinstimmung mit dem verbesserten analytischen Modell erhalten. Für die gegenständlichen Untersuchungen ist aber vorwiegend die erreichbare Endgeschwindigkeit des Meißels von Bedeutung. Daher kann auf die hier dargestellte Verbesserung der analytischen Lösung zugunsten der Übersichtlichkeit und Handhabung verzichtet werden.

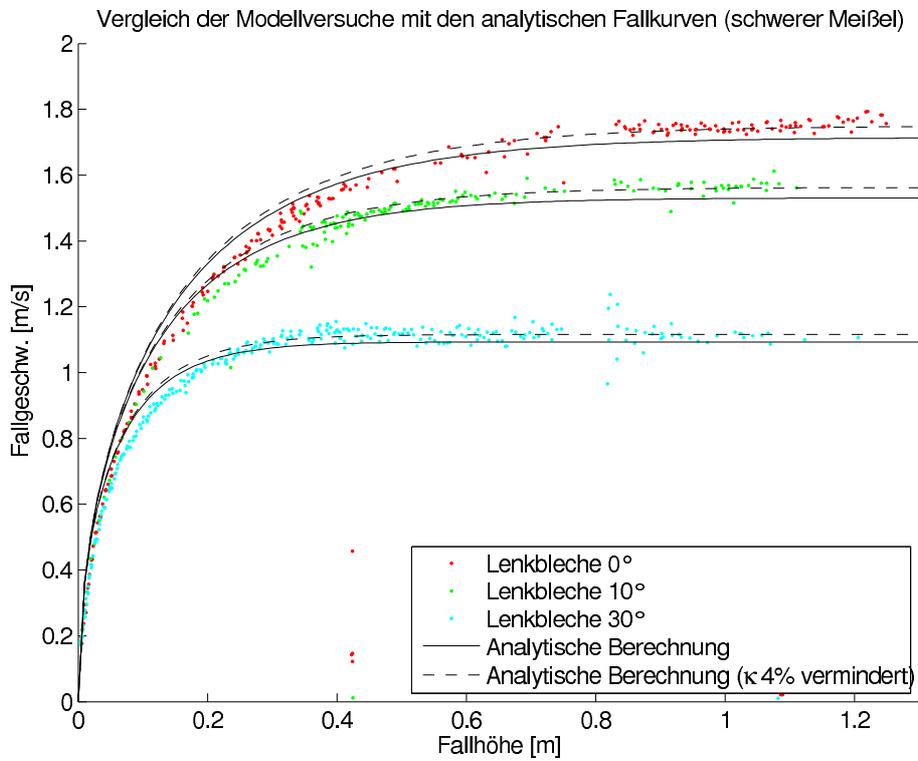
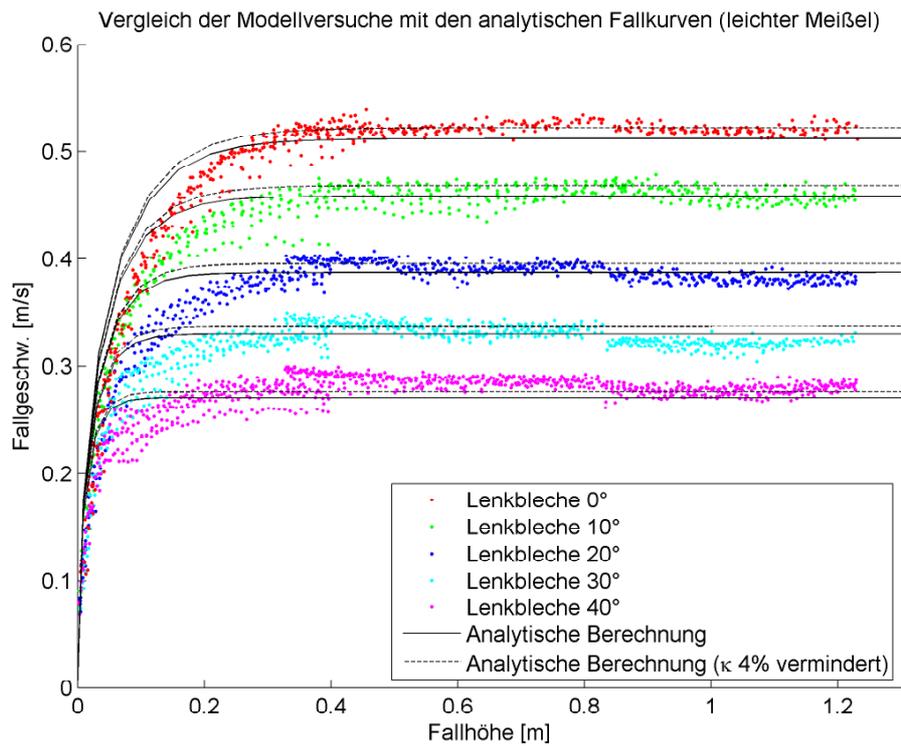
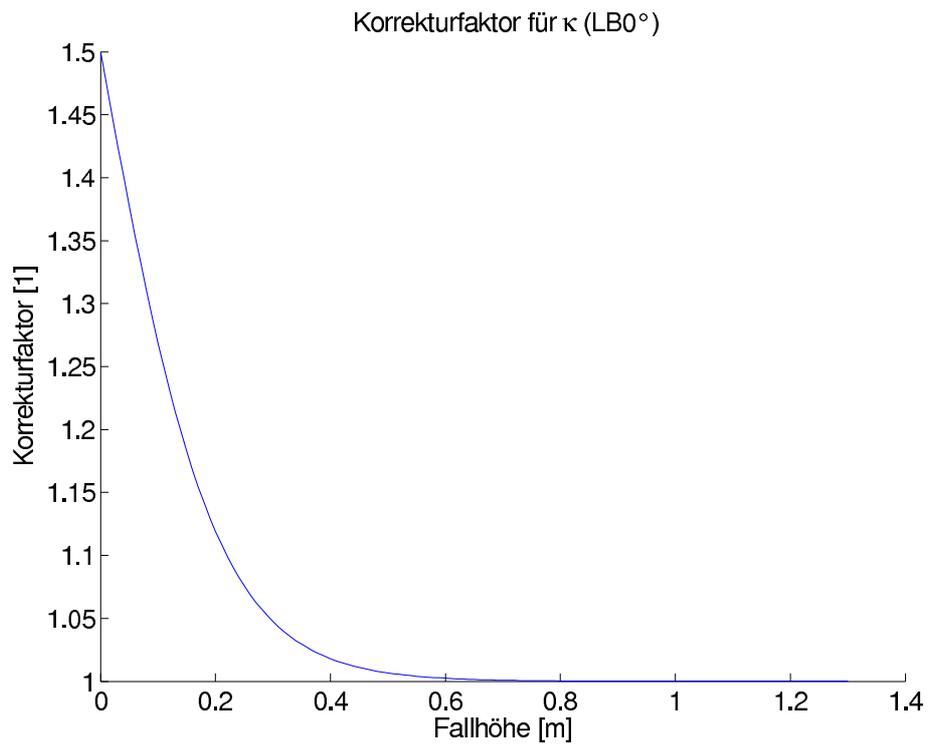
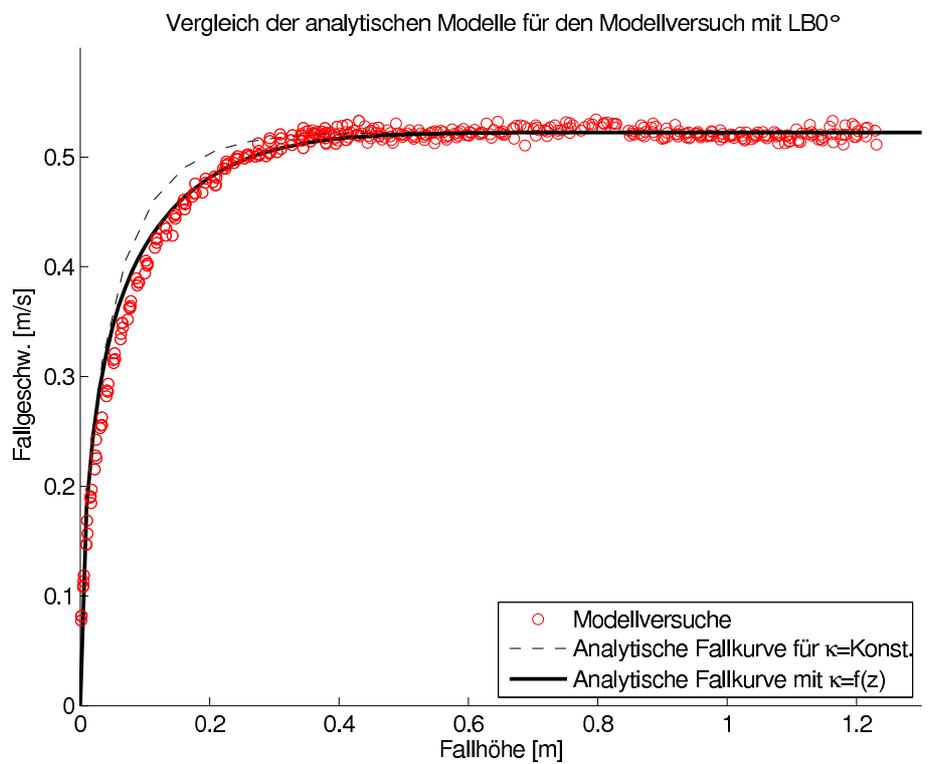


Abb. 7.16: Vergleich der experimentell und analytisch ermittelten Fallgeschwindigkeitskurven für beide Flachmeißelmodelle bei unterschiedlicher Lenkblechanstellung



(a) Korrekturfaktor für κ



(b) Verbessertes analytisches Modell

Abb. 7.17: Verbesserung des analytischen Modells durch Variation des Strömungsbeiwertes (dargestellt für LB0°)

7.5.2 Gegenüberstellung der Rotationsbewegung

Die Gegenüberstellung der Drehbewegung des Meißels erfolgt anhand der gemessenen Gesamtrotationen im Modellversuch. Daher muß die Verdrehung des Meißels aus der jeweiligen analytischen Rotationskurve für eine (Modell)Fallhöhe von 1.3 m ausgelesen werden (siehe Abb. 7.18). Somit erhält man für die Varianten des leichten und schweren Meißels jeweils einen Rotationswert, der den experimentellen Ergebnissen gegenübergestellt werden kann.

In Abb. 7.19 ist der Vergleich mit den analytischen Modellen dargestellt. Die theoretisch ermittelten Werte stimmen für beide Meißelmodelle qualitativ sehr gut mit den Modellversuchen überein. Die analytische Lösung liefert jedoch absolut gesehen geringfügig niedrigere Werte. Wie bereits bei der Darstellung der Rotationsergebnisse erwähnt, liegt eine geringe Antimetrie des Meißelmodells vor, weshalb bereits bei einer Lenkblechanstellung von 0° Rotationswerte erhalten wurden. Bis jetzt konnte nicht festgestellt werden, ob sich diese Antimetrie auch bei höheren Lenkblechneigungen mit betragsmäßig gleichem Fehler auswirkt. Aufgrund der Ähnlichkeit im Verlauf des analytischen Modells kann jedoch angenommen werden, daß es sich um einen für alle Meißelmodelle näherungsweise konstanten

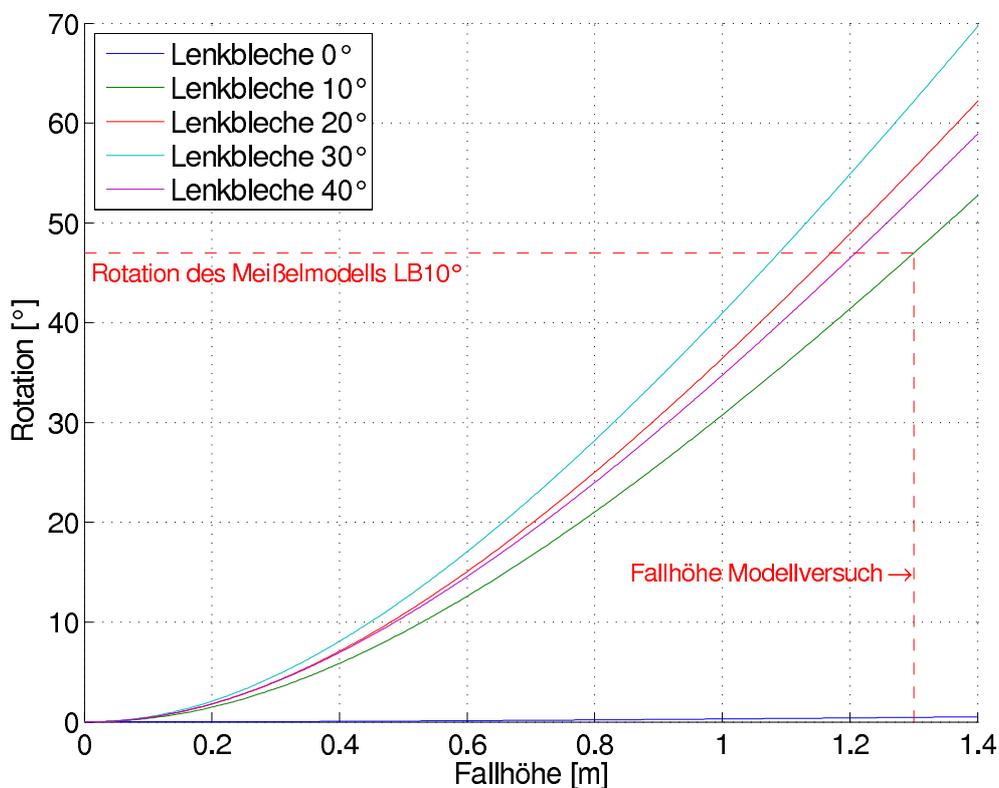
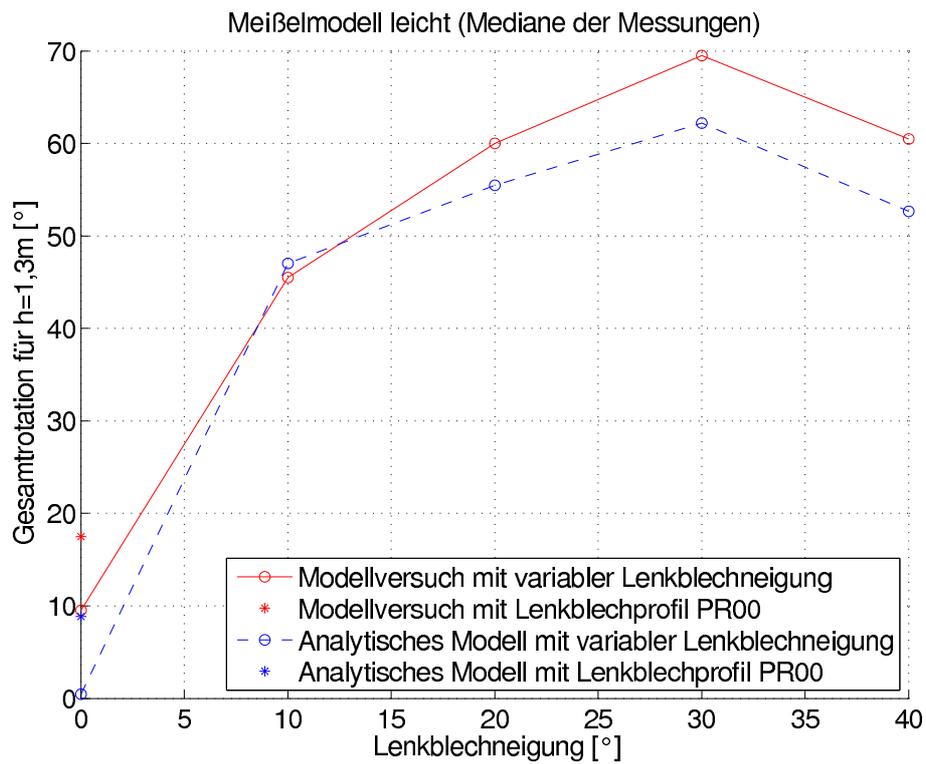


Abb. 7.18: Analytische Rotationskurven der Flachmeißelmodelle (leicht) in Abhängigkeit der Fallhöhe (Ablesung für LB10° bei einer Fallhöhe von 1.3m)

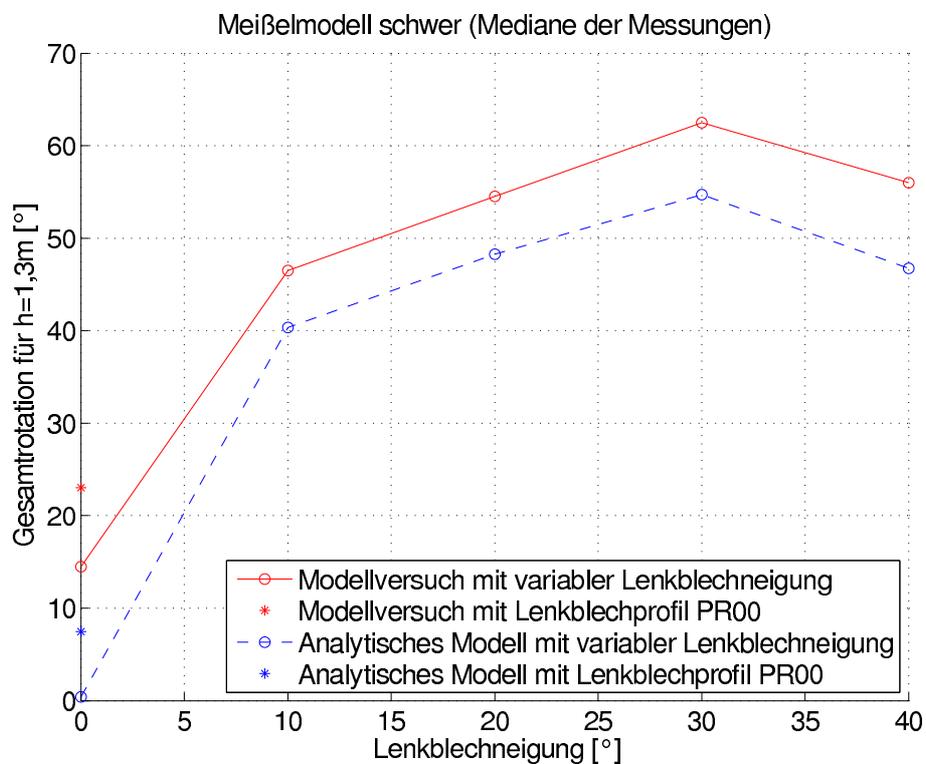
Fehler handelt. Es wurde daher in erster Näherung von allen Ergebnissen der Modellversuche ein konstanter Wert von 7° subtrahiert und die Ergebnisse nochmals in Abb. 7.20 gegenübergestellt. Damit erhält man einen großteils identischen Verlauf der analytisch und experimentell ermittelten Werte. Lediglich beim leichten Meißelmodell $LB10^\circ$ und den schweren Meißelmodellen $LB0^\circ$ und $PR0^\circ$ ergeben sich noch erwähnenswerte Differenzen. Bei letzteren Lenblechvarianten stimmen jedoch die quantitativen Abweichungen auffallend gut überein (jeweils ca. 8°). Die äquivalenten, leichten Meißelmodelle weisen diese Ähnlichkeit in der Abweichung ebenfalls auf (jeweils ca. 2°). Dies läßt auf eine hohe Verlässlichkeit der Meßergebnisse schließen und folgern, daß nur bei den schweren Meißelvarianten $LB0^\circ$ und $PR0^\circ$ durch einen systematischen (Modell)fehler eine etwas höhere Korrektur erforderlich wäre.

7.5.3 Schlußfolgerung

Anhand der Modellversuche konnten die analytischen Modelle sowohl für die Fall- als auch für die Drehbewegung überprüft und verifiziert werden. Durch den Vergleich der Modellversuche mit den ebenso maßstäblich durchgeführten numerischen Simulationen konnte auf Ähnlichkeitsmodelle und die schwierige Übertragung der experimentell erhaltenen Ergebnisse auf die realen Vorgänge in der Natur verzichtet werden. Stattdessen wurden die Gültigkeit der analytischen Modelle in qualitativer Hinsicht und die numerischen (maßstäblichen) Berechnungen in quantitativer Weise überprüft. Dabei ließ sich eine sehr gute Übereinstimmung feststellen, welche durch weitere, geringfügige Adaptionen sogar zu einer ausgezeichneten Übereinstimmung der Ergebnisse führte. Für den angedachten Verwendungszweck, zur Abschätzung der Endgeschwindigkeit, sowie der Verdrehung des Meißels z.B. in Abhängigkeit von der Fallhöhe, sind die in Kap. 5 einführend getroffenen analytischen Modelle jedoch völlig ausreichend. Eine weitere Verfeinerung würde unnötigerweise die Komplexität der Gleichungen erhöhen und die Verwendbarkeit einschränken. Das Ziel der Modellversuche, die aufgestellten Ansätze und die Vorgangsweise grundsätzlich zu überprüfen, konnte damit klar erfüllt werden.

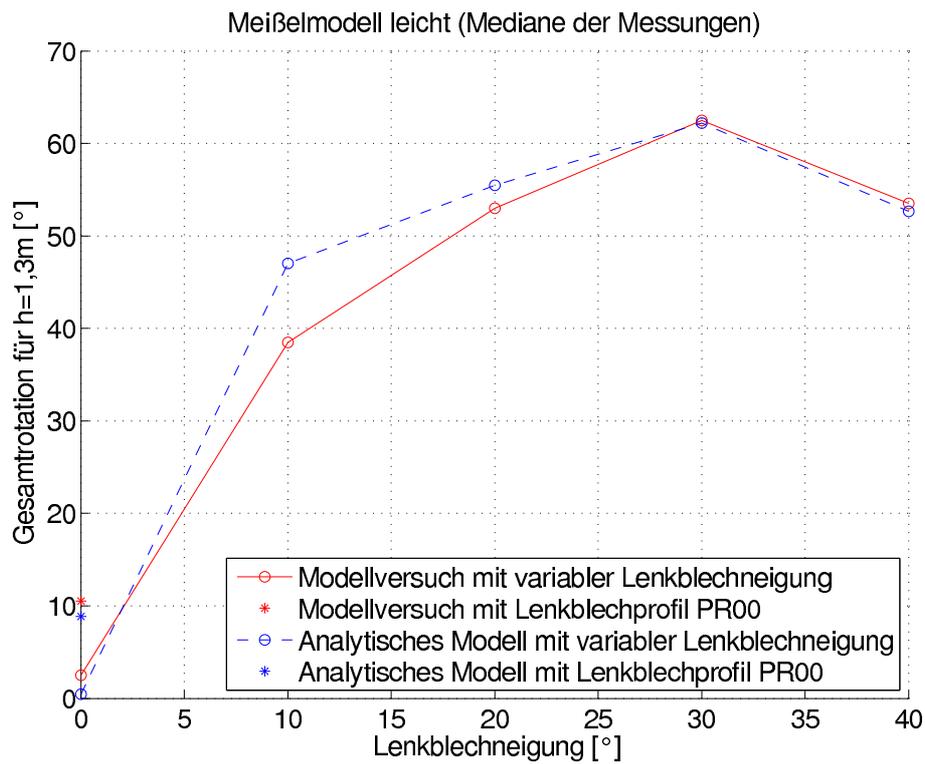


(a) Leichtes Meißelmodell

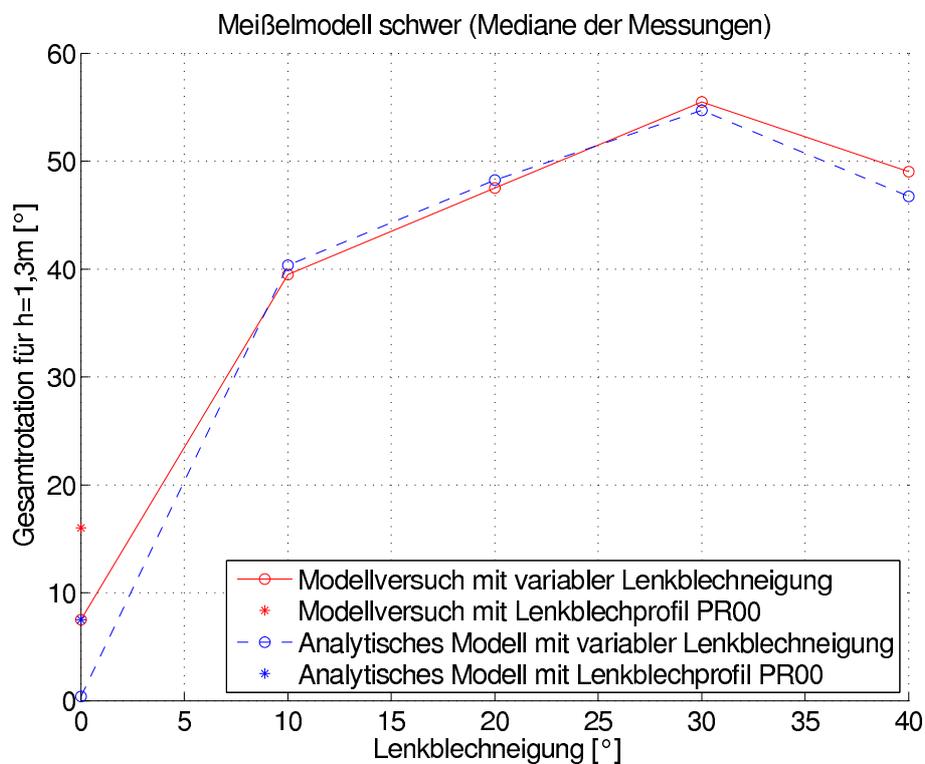


(b) Schweres Meißelmodell

Abb. 7.19: Vergleich der experimentell und analytisch ermittelten Rotationswerte für die verschiedenen Flachmeißelmodelle



(a) Leichtes Meißelmodell



(b) Schweres Meißelmodell

Abb. 7.20: Vergleich der experimentell (korrigiert um 7°) und analytisch ermittelten Rotationswerte für die verschiedenen Flachmeißelmodelle

8 Baustellenmessungen

8.1 Einleitung

Die nachfolgenden Meßeinsätze konnten auf Baustellen der Grund-, Pfahl- und Sonderbau GmbH durchgeführt werden. Bei der Auswahl der Projekte war es erforderlich, daß die Pfahlbohrarbeiten mit dem Schlagbohrverfahren (Greifer und Meißel) hergestellt wurden. Außerdem sollten (umfangreiche) Meißelarbeiten erfolgen, die eine große Anzahl an Messungen ermöglichen. Es wurden ausschließlich Pfahlbohrungen mit einem Durchmesser von 120 cm bis zu einer maximalen Bohrtiefe von ca. 21 m untersucht. Bei gleichzeitiger Beschleunigungsmessung am Meißel mußte die Bohrtiefe aufgrund der Kabelführung am Hubseil mit ca. 15 m begrenzt werden. Die Versuche decken den vollständig trockenen, teilweise und vollständig wassergefüllten Zustand des Bohrloches ab.

Die Auflistung der Baustellenmessungen erfolgt idealerweise in chronologischer Reihenfolge, da im Zuge der Meßeinsätze die Verfahren ständig verbessert und ergänzt wurden und daher die Entstehung des in Kap. 4 beschriebenen Meßsystems gut nachvollzogen werden kann.

8.2 Baustellenmessung LT34

8.2.1 Allgemeines

Am Baulos Lainzer Tunnel LT34 konnten die ersten Messungen für das gegenständliche Projekt durchgeführt werden. In Tabelle 8.1 sind die Eckdaten der Messungen angegeben. Es wurden Fallzeitmessungen bei Meißelarbeiten nach der in Kap. 4 beschriebenen Methode durchgeführt. Diese wurden an zwei Meßtagen mit den jeweils gleichen Geräten (Bagger: Sennebogen, Werkzeug: Flachmeißel) aufgenommen und dienten zur Abschätzung der Fallbewegung im Sinne einer Voruntersuchung.

Projekt		Meißel	
Meßdatum	21.12.2005, 11.01.2006	Typ	Flachmeißel
Bauvorhaben	Lainzer Tunnel LT34	Nr.	1194
Pfahl-Daten		Masse	5.2 t
Pfahl Nr.	versch.	Länge	4.2 m
Durchmesser	120 cm	Greifer	
Bohrlänge ab GOK	versch.	Typ / Fabrikat	Leffer / HW
GW (Wassersäule)	nein	Nr.	L1070 / 1206
Messungen		Masse	3.7 - 6.7 to
Fallhöhe	7.7 - 18.1 m	Seil	
Typ	Fallzeitmessung	Durchmesser	26 mm
Anzahl	41	Bagger	Sennebogen 655

Tab. 8.1: Eckdaten zur Messung LT34

8.2.2 Fallzeitmessung

Die Fallzeiten wurden gleichzeitig von zwei Beobachtern bei drei verschiedenen Fallhöhen (7.7, 15.7 und 18.1 m) gemessen. Je Fallhöhe konnten 12-15 Schläge aufgenommen werden. Die gemessenen Fallzeiten sind in Diagramm 8.1 ausgewertet. Die Mediane der, durch die beiden Beobachter aufgenommenen, Fallzeiten stimmen sehr gut überein und weisen nur bei der geringsten Fallhöhe eine maximale Abweichung von $\leq 0,1$ s auf. Betrachtet man die Daten in einem Zeit-Weg Diagramm, so läßt sich anhand der Mediane der Fallzeiten eine Regressionsanalyse durchführen. Dabei wurde das Regressionsmodell zur besseren Übereinstimmung bei einer Zeit von ≈ 1.9 s in zwei Bereiche unterteilt. Im ersten Teil wurde ein quadratisches Modell (konstante Beschleunigung) und darüber ein hyperbolisches Modell (abnehmende Beschleunigung) verwendet. Die abnehmende Beschleunigung ab einer Fallhöhe von ca. 15 m ist auf ein verstärktes Bremsen des Seiltriebes durch den Baggerfahrer zurückzuführen, um einen langen Seilnachlauf durch die hohen Fallgeschwindigkeiten zu vermeiden. Durch das Abbremsen des Seiles wird die maximale Geschwindigkeit an der Grenze der beiden Regressionsmodelle mit ca. 12 m/s erreicht.

Aufgrund der punktuellen Daten für nur drei Fallhöhen ist die Gültigkeit der zugrundegelegten Modelle noch nicht überprüfbar. Es kann jedoch eine Abschätzung der Fallbewegung und -geschwindigkeit und ein qualitativer Zusammenhang erkannt werden (zunächst positive, dann negative Krümmung der Fallkurve).

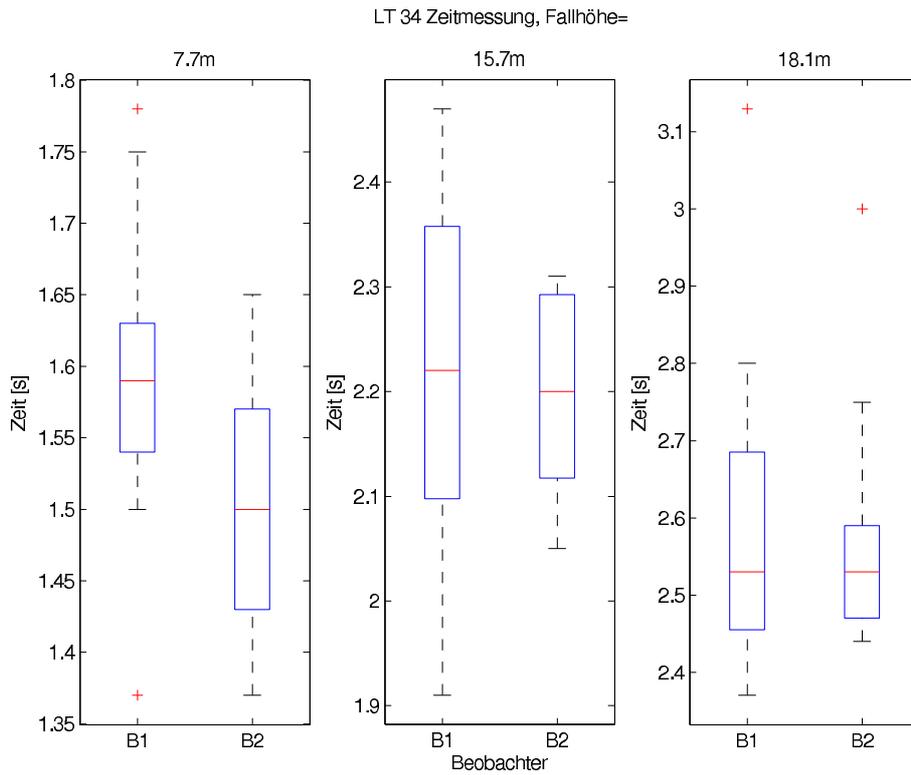


Abb. 8.1: Boxplots der Zeitmessungen durch zwei Beobachter für verschiedene Fallhöhen (Baustellenmessung LT34)

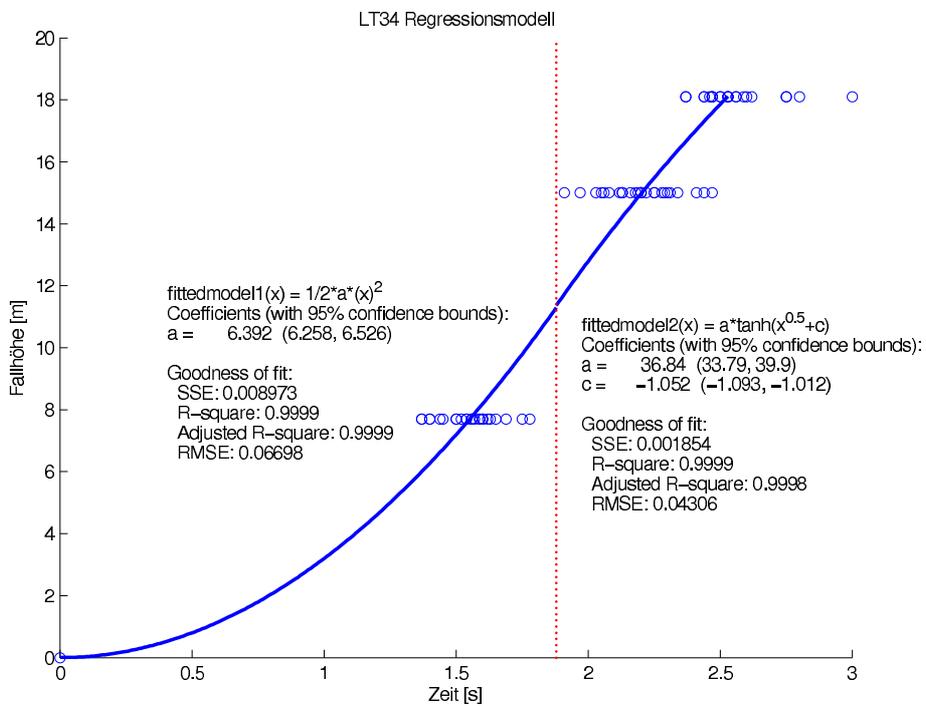


Abb. 8.2: Zweistufiges Regressionsmodell anhand der Mediane der Zeitmessungen beider Beobachter (Baustellenmessung LT34)

8.3 Baustellenmessung Horn

8.3.1 Allgemeines

Die Baustellenmessung "Horn" wurde bei der Herstellung einer Böschungssicherung in der Nähe von Horn (Pernegg) durchgeführt. Durch die umfangreichen Meißelarbeiten im Festgestein (Gneis) konnten im Zuge eines Meßtages 202 Messungen aufgenommen werden. Die Untersuchungen fanden im vollständig trockenen Zustand des Bohrloches statt und die Fallhöhe der Meißelarbeiten war mit ca. 10 m begrenzt. Die Messungen lassen sich sehr gut mit jenen der Baustelle LT34 vergleichen, da der gleiche Flachmeißel und ein Bagger des gleichen Typs verwendet wurde (Baustellendaten siehe Tab. 8.2).

Die Messungen umfassen wieder die Aufnahme der Fallzeiten durch zwei Beobachter und die gleichzeitige photogrammetrische Bewegungsmessung des Meißels mit einer handelsüblichen DV-Kamera. Darüber hinaus wurden Proben des gebohrten Materials entnommen und bodenphysikalische, sowie felsmechanische Versuche im Laboratorium durchgeführt.

8.3.2 Fallzeitmessung

Analog zur Messung in Kapitel 8.2 wurden auch hier Zeitmessungen der Fallvorgänge durch zwei Beobachter durchgeführt. In Tab. 8.3 ist eine Übersicht aller Messungen inkl. Fallhöhe und Anzahl der Messungen angegeben. Dabei wurden die Zeitangaben in jeder Zeile der Tabelle wieder durch die Mediane der gemessenen Fallzeiten ermittelt. Die Streuungen für die Messungen der einzelnen Beobachter lassen sich sehr gut in Abb. 8.3 ablesen. Die maximale Abweichung zwischen den Medianen der Messungen beider Beobachter beträgt stets weniger als 0.1 s und stimmt damit qualitativ mit den Ergebnissen bei

Projekt		Meißel	
Meßdatum	10.08.2006	Typ	Flachmeißel
Bauvorhaben	Böschungssich. nahe Horn	Nr.	1194
Pfahl-Daten		Masse	5.2 to
Pfahl Nr.	34	Länge	4.2 m
Durchmesser	120 cm	Greifer	
Bohrlänge ab GOK	-	Typ / Fabrikat	Hartfuß
GW (Wassersäule)	nein	Nr.	1222
Messungen		Masse	4.45 to
Fallhöhe	von 5.5 - 10.0 m	Seil	
Typ	Fallzeit- und Wegmessung	Durchmesser	26 mm
Anzahl	202	Bagger	Sennebogen 640

Tab. 8.2: Eckdaten zur Messung Horn

der Baustellenmessung LT34 überein. Aus den Ergebnissen der Zeitmessung in Tab. 8.3 lassen sich Fallkurven für den Meißel ermitteln, die in Abb. 8.4 angegeben sind. Auf Basis der analytischen Modelle wurden Regressionskurven zweiten Grades verwendet und die Koeffizienten der Kurven für die Messungen der beiden Beobachter und der bildgestützten Messung bestimmt. Letztere stellt eine Untergrenze des Fallmodells für den Meißel dar und konnte durch eine "Zeitauswertung der Videodateien" gefunden werden (siehe Abschnitt 8.3.4).

8.3.3 Photogrammetrische Bewegungsmessung

Die in Kap. 4 beschriebene photogrammetrische Messung wurde hier erstmals mit einer handelsüblichen DV-Kamera durchgeführt. Es sollte zunächst erhoben werden, ob und wie gut sich dieses bildgestützte Meßverfahren tatsächlich für die Aufnahme des Fallvorganges auf einer Baustelle eignet. Es gab jedenfalls Bedenken hinsichtlich

- der Staubentwicklung im eingestellten Bildbereich über der Verrohrung,
- der Positionierbarkeit der Kamera vor Ort (Gegenlicht, Entfernung),
- der Sichtbarkeit der Meßmarken am Seil nach mehreren Meißelvorgängen sowie
- der Mindestbildfrequenz bei der Aufnahme.

Im besonderen konnte man bereits im Vorfeld ahnen, daß die Bildfrequenz des Camcorders nur knapp für die Auswertung genügen würde. Wie in Kap. 4 beschrieben, liefert das DV-Format bei einer Auflösung von 720x576 Bildpunkten lediglich eine Frequenz von 25 Bildern/s mit den erwähnten Schwierigkeiten. Für die gegenständliche Messung mit Fallhöhen von max. ≈ 10 m, mit entsprechend niedrigen Seilendgeschwindigkeiten sollte dies jedoch für eine erste Abschätzung genügen.

In Abb. 8.5 ist die Aufstellung der Kamera in ca. 15 m Entfernung von der Verrohrung dargestellt. Der vertikale Bildausschnitt wurde auf einen Bereich unmittelbar über der Verrohrung eingestellt und variierte für die Messungen von 1.3 bis 2.4 m. Die Seilmarken wurden in 1.0 m Abständen abwechselnd mit rotem und blauem Spray markiert. Von den 202 durchgeführten Messungen wurden 14 repräsentative Fallsequenzen manuell ausgewertet und in einem Zeit-Weg Diagramm dargestellt (siehe Abb. 8.6a). Dabei mußten die einzelnen Fallvorgänge nach der in Kap. 4 beschriebenen Methode ausgewertet werden. Die erhaltenen Kurven besitzen augenscheinlich einen ähnlichen Verlauf, sind aber geringfügig in der Zeitachse versetzt. Dies ergibt sich vor allem durch

- ein unterschiedlich schnelles Lösen der Bremse an der Seilwinde am Beginn des Fallvorganges und

Messung Nr.	Anzahl [l]	Fallhöhe [m]	Beobachter 1 [s]	Beobachter 2 [s]	Optische Mess. [s]
R0	21	5.63	1.05	1.07	1.24
R1	23	9.65	1.40	1.47	-
R2	26	9.55	1.44	1.47	-
R3	27	9.65	1.41	1.50	-
R4	34	9.64	1.41	1.50	1.68
R5	35	9.65	1.47	1.50	-
R6	36	9.65	1.47	1.47	-

Tab. 8.3: Meßübersicht und ermittelte Fallzeiten bei der Baustellenmessung Horn (alle Zeitangaben sind Mediane der Messungen für die angegebene Fallhöhe)

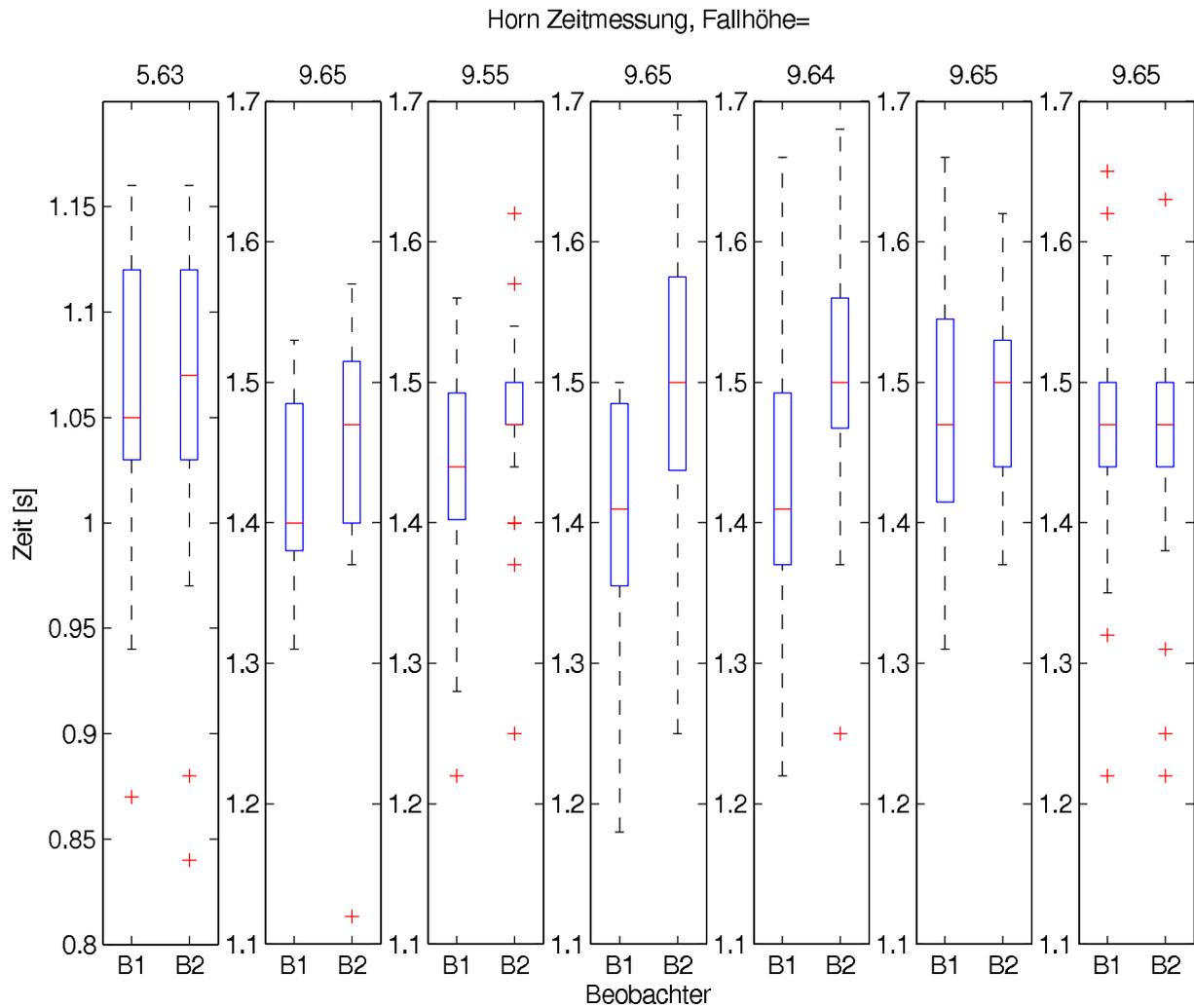


Abb. 8.3: Boxplots der Zeitmessungen durch zwei Beobachter für verschiedene Fallhöhen (Baustellenmessung Horn)

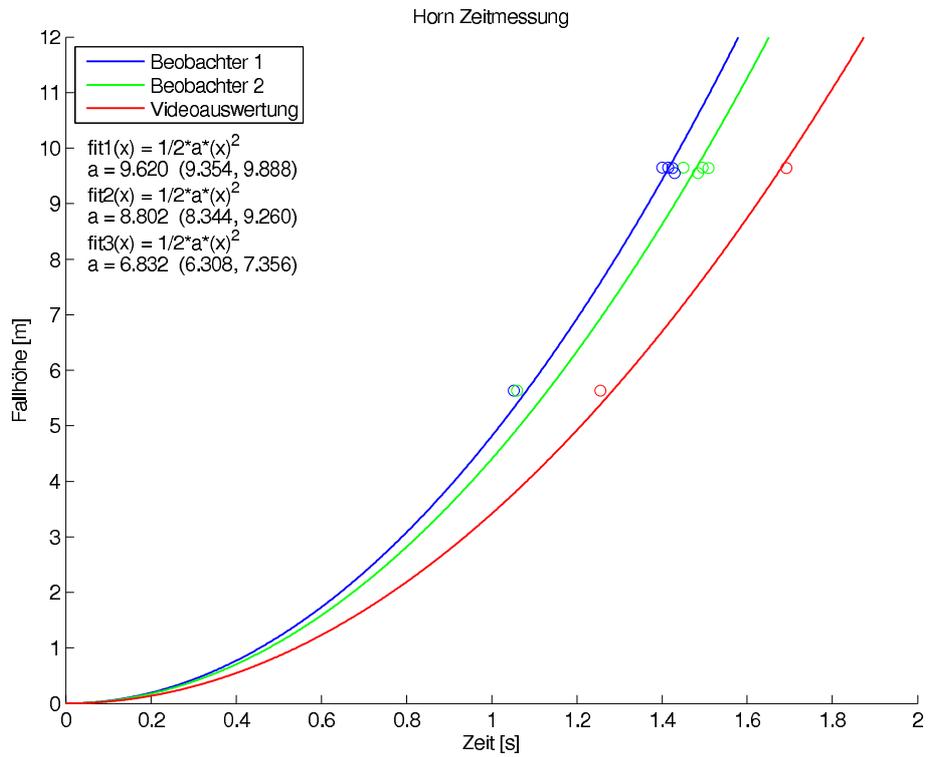


Abb. 8.4: Regressionskurven für die ermittelten Fallzeiten bei der Baustellenmessung Horn

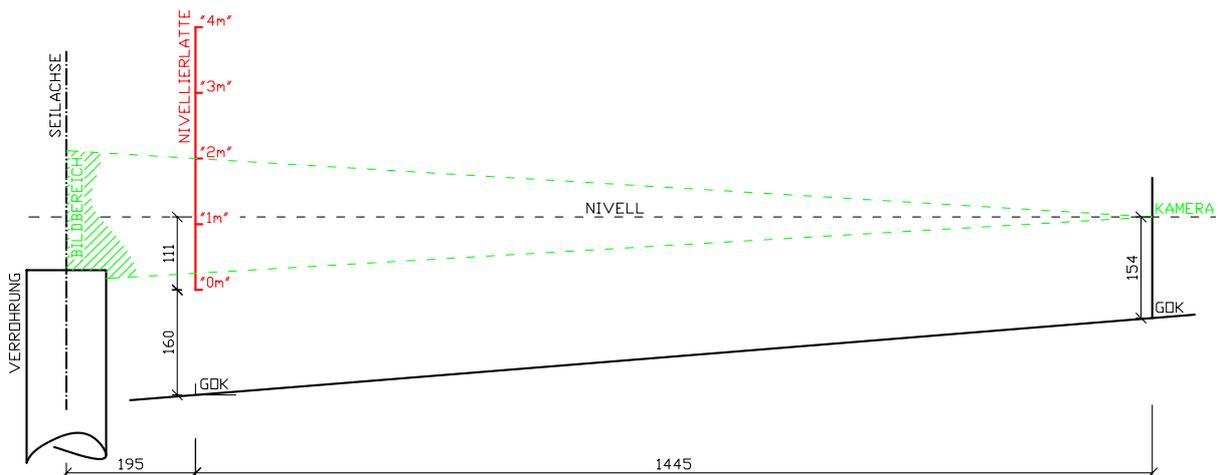


Abb. 8.5: Aufstellungsskizze für die bildgestützte Fallbewegungsmessung bei der Baustellenmessung Horn (Maße in cm)

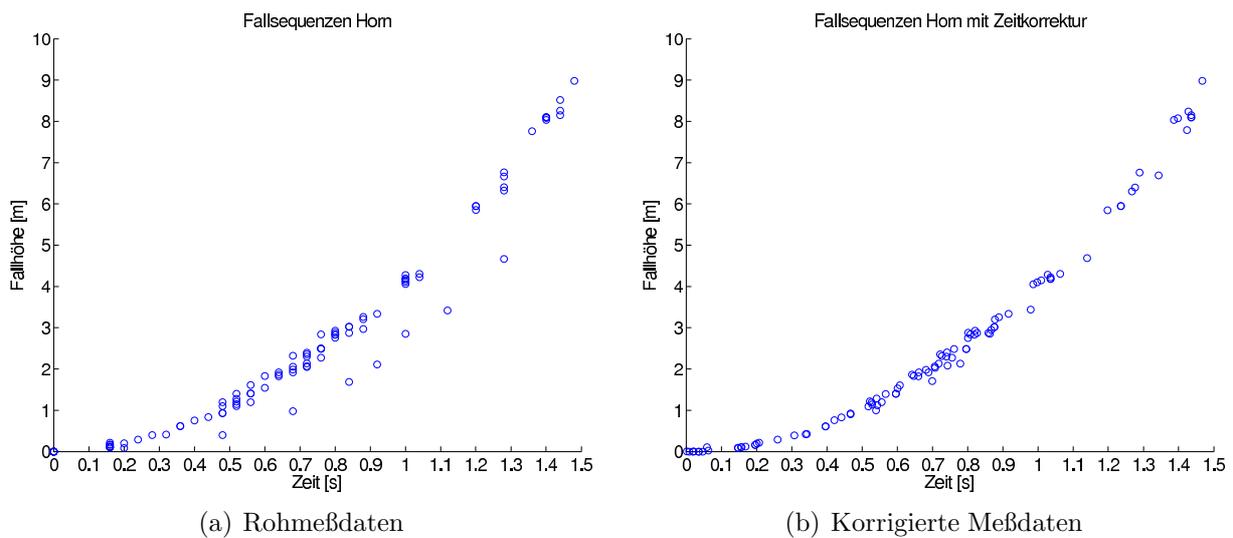


Abb. 8.6: Exemplarische Auswertung und Korrektur der photogrammetrisch ermittelten Meßdaten

- unvermeidliche Abweichungen beim Bestimmen des "Startbildes" in der manuellen Auswertung.

Um einen gemeinsamen Nullpunkt der Kurven zu erhalten, wurden daher Regressionsmodelle mit der in Gl. 8.1 angegebenen Kurve für jeden der 14 Fallvorgänge gerechnet. Die Meßpunkte konnten dann jeweils um den ermittelten Faktor b in der Zeitachse korrigiert werden (siehe Abb. 8.6b).

$$z(t) = a * (t + b)^2 \quad (8.1)$$

Anhand der korrigierten Meßergebnisse aller Fallsequenzen in Abb. 8.6b ließ sich nun eine Regressionsanalyse mit unterschiedlichen Modellen durchführen. Dabei wurde, wie bereits bei der letzten Messung in Abschnitt 8.2, zunächst ein quadratisches Fallmodell verwendet. Zu Vergleichszwecken bot sich auch eine Berechnung mit einem kubischen Modell an. Anhand des Bestimmtheitsmaßes (R^2 -Werte) in den Diagrammen in Abb. 8.7 kann die Güte der beiden Modelle überprüft werden. Diese weisen eine praktisch idente Qualität für die ermittelten Meßpunkte auf ($R^2=0.9961$ u. 0.9962). Beim kubischen Modell verringert sich die Beschleunigung in geringem Ausmaß mit zunehmender Fallzeit bzw. -geschwindigkeit. Geht man davon aus, daß keine Bremsvorgänge eingeleitet wurden, welche mit deutlich stärkerer Verzögerung verbunden wären, so läßt sich die abnehmende Beschleunigung beispielsweise durch einen mit der Seilgeschwindigkeit ansteigenden Reibungsanteil erklären. Dies würde zwar den Annahmen in Abschnitt 5.3 prinzipiell widersprechen (etwa konstante Reibungskräfte), läßt sich aber aufgrund des geringen Ausmaßes der Abminderung

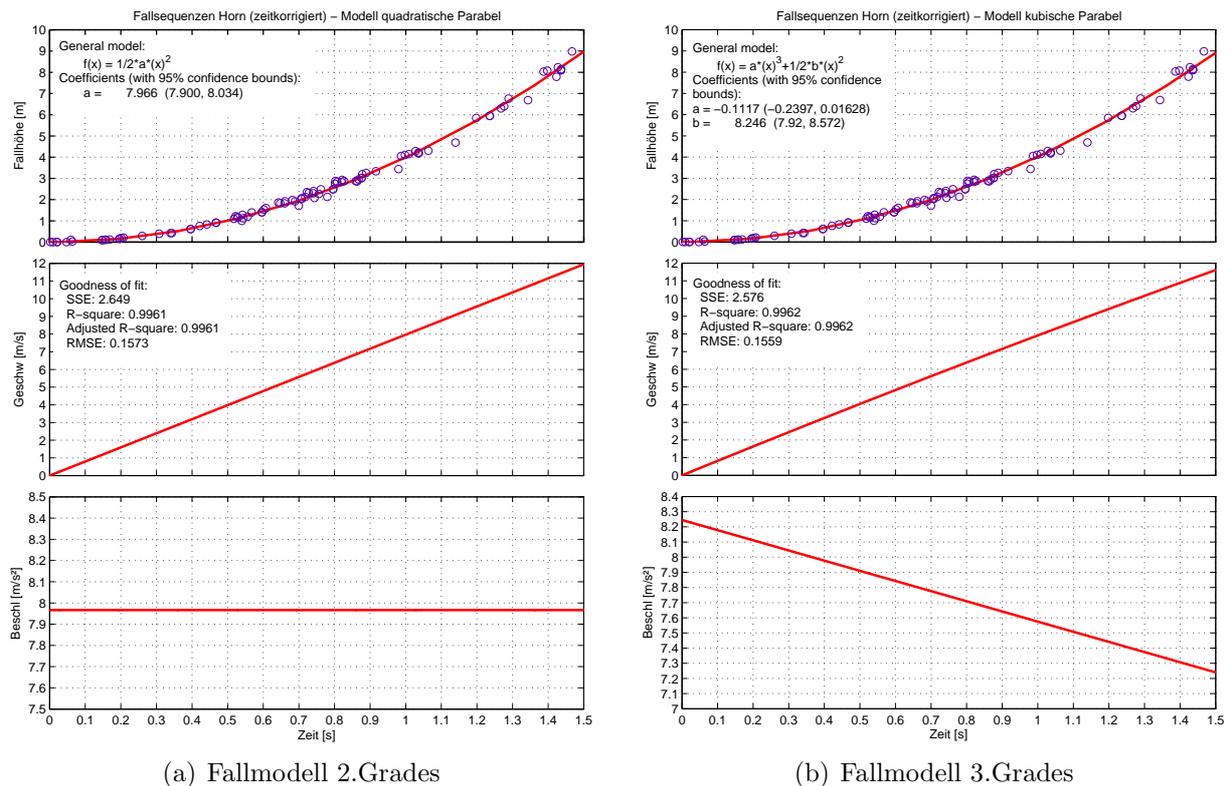


Abb. 8.7: Regressionsanalyse anhand der korrigierten Meßdaten

nicht genau feststellen. Außerdem kann die Verminderung der Beschleunigung aus nicht quantifizierbaren Reibungsvorgängen zwischen dem Meißel und der Verrohrung stammen. Grundsätzlich ist das Bestimmtheitsmaß beider Modelle beinahe identisch. Somit kann nur festgestellt werden, daß die Meßergebnisse durch beide Gleichungen in sehr guter Weise beschrieben werden, aber nicht welches Modell tatsächlich besser geeignet ist.

8.3.4 Vergleich der Messungen und Interpretation

Durch das hier eingesetzte bildgestützte Meßverfahren konnte der Fall des Meißels während der Schlagvorgänge erfaßt werden. Die Bildfrequenz der DV-Kamera mit 25 Bildern/s stellte sich jedoch bereits bei dieser Fallhöhe (≈ 10 m) mit Maximalgeschwindigkeiten von ca. 12m/s als zu niedrig heraus. Obwohl die geringe Bildrate und das Aufnahmeformat (Zeilensprungverfahren) mit den in Abschnitt 4.2 beschriebenen Schwierigkeiten verbunden waren, konnten doch, durch eine präzise manuelle Auswertung von 14 untersuchten Fallsequenzen, sehr gute Ergebnisse erzielt werden (siehe Abb. 8.7).

Vergleicht man die Ergebnisse bzw. das Fallmodell aus der bildgestützten Meßmethode mit jenen der Zeitmessung durch die beiden Beobachter, so kann festgehalten werden, daß

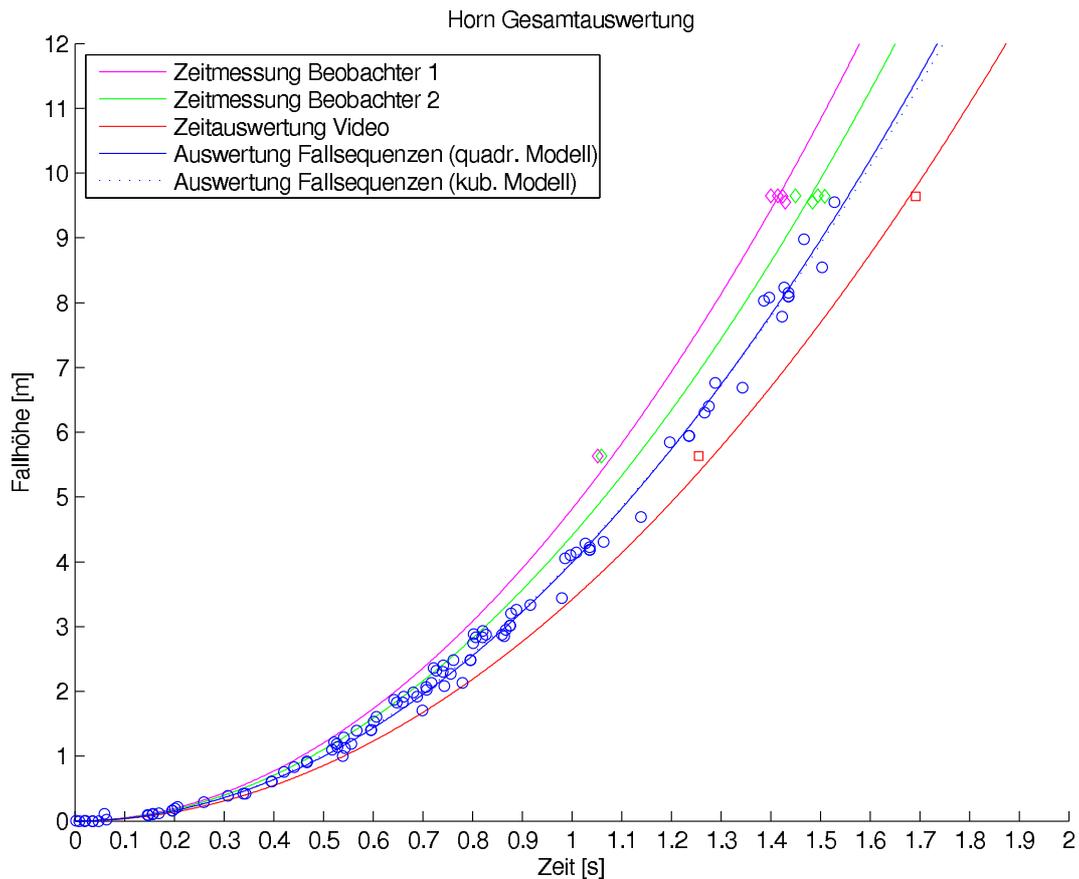


Abb. 8.8: Gesamtvergleich der experimentell ermittelten Fallkurven

die Zeitmessungen eine obere Abschätzung des Fallmodells darstellen (steilere Fallkurven, siehe Abb. 8.8). Durch eine weitere Auswertung der Bilddateien läßt sich außerdem eine untere Abschätzung der Fallkurve angeben. Dazu werden der Anfangszeitpunkt der Fallbewegung des Meißels und die Erschütterung des Rohres bzw. der Kamera aus den Einzelbildern bestimmt. Die Erschütterung des Rohres bzw. der Kamera tritt jedenfalls erst dann auf, wenn der Aufprall des Meißels bereits erfolgt ist, und stellt somit ein oberes Limit für das Ende der Fallbewegung dar. Anhand der so ermittelten Werte kann eine untere Abschätzung der Fallkurve angegeben werden. Diese Auswertung wurde für 55 Fallsequenzen durchgeführt und in Abb. 8.8 ergänzt ("Zeitauswertung Video"). Die photogrammetrisch ermittelten Fallkurven (quadratisches und kubisches Modell) fügen sich genau in die Mitte der Zeitmessungen ein, wodurch die Richtigkeit bzw. Präzision der Meßmethode bestätigt wird.

8.4 Baustellenmessung S35V

8.4.1 Allgemeines

Im Zuge des Lückenschlusses der S35 (Brucker Schnellstraße) konnte im Bereich des Stausees Zlatten eine Baustellenmessung durchgeführt werden. Die untersuchte Pfahlbohrung besitzt einen Durchmesser von 120 cm und wurde bis zu einer Pfahltiefe von knapp 9 m mit verschiedenen Meßmethoden aufgenommen. Die Verrohrung war zum Meßzeitpunkt teilweise mit Wasser gefüllt (ca. 2-3 m ab Bohrlochsohle). Bei den registrierten Fallvorgängen bewegte sich der Flachmeißel daher zunächst im trockenen Bohrloch und tauchte in den letzten Metern teilweise in die Wassersäule ein. Zusätzlich zur photogrammetrischen Bewegungsmessung wurden bei diesem Meßeinsatz auch die Beschleunigungen am Meißel und an der Verrohrung aufgenommen. Das Meßprogramm entsprach damit exakt dem in Abb. 4.2 auf S. 20 angegebenen Meßkonzept. In Summe konnten fünf Meßserien mit insgesamt 61 Fallsequenzen aufgenommen werden (siehe Tab. 8.4).

8.4.2 Photogrammetrische Bewegungsmessung

In Abb. 8.9 ist die Aufstellung der Meßkamera in 11 m Entfernung von der Bohrpfahlachse dargestellt. Bei dieser Baustellenmessung konnte erstmals die in Kap. 4 beschriebene Industriekamera mit hoher Bildfrequenz eingesetzt werden. Aufgrund der gleichzeitigen Beschleunigungsmessung am Meißel dienten Seilklemmen am Hubseil als Meßmarkierungen. Von den fünf Meßserien ist die Auswertung der letzten Serie "M5" exemplarisch in Abb. 8.10a dargestellt (20 gemessene Fallsequenzen). Die Geschwindigkeiten der Meßmarken zeigen zunächst einen deutlich parallelen Verlauf. Allerdings sind die einzelnen

Projekt		Meißel	
Meßdatum	02.08.2007	Typ	Flachmeißel
Bauvorhaben	S35-23 Brucker Schnellstraße	Nr.	1184
Pfahl-Daten		Masse	8.5 to
Pfahl Nr.	P4012	Länge	6.0 m
Durchmesser	120 cm	Greifer	
Bohrtiefe ab GOK	≈ 8.6 m	Typ / Fabrikat	Leffer
GW (Wassersäule)	≈ 2-3 m ab BLS	Nr.	UB 312 0021
Messungen		Masse	5.05 to
Fallhöhe	≈ 5.5 m	Seil	
Typ	Beschl.- u. Wegmessung	Durchmesser	26 mm
Anzahl	61	Bagger	Sennebogen 640

Tab. 8.4: Eckdaten zur Messung S35V

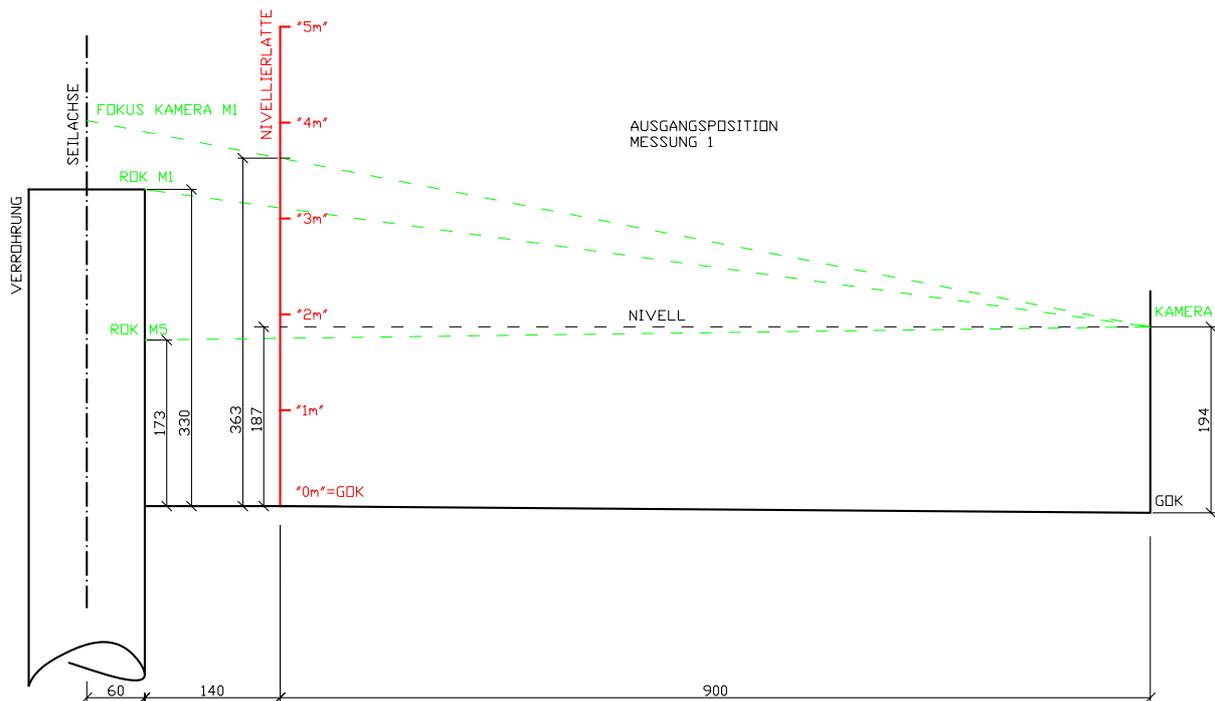


Abb. 8.9: Aufstellungsskizze für die bildgestützte Fallbewegungsmessung bei der Baustellenmessung S35V (Messung M1, Maße in cm)

Fallsequenzen wie schon zuletzt durch unterschiedliche Startzeitpunkte in der Zeitachse versetzt. Analog zur letzten Messung werden daher wieder Regressionsmodelle für die einzelnen Fallvorgänge gemäß Gl. 8.2 gerechnet und eine Zeitkorrektur um die ermittelten Parameter b ausgeführt. Das Ergebnis der korrigierten Fallsequenzen ist in Abb. 8.10b angegeben.

$$z(t) = a * (t + b) \quad (8.2)$$

Aufgrund der Länge des Meißels ist der Fallvorgang mit einer Höhe von ca. 5.5 m begrenzt, wovon die letzten 2 bis 3 Meter im Grundwasser stattfinden. Im Anfangsbereich des Fallvorganges kann eine deutlich lineare Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der Zeit festgestellt werden (Fallvorgang im trockenen Bohrloch). Daher wird eine lineare Regression an einem Teilbereich der Meßpunkte ($t < 0.7$ s) gerechnet (Fallmodell trocken gemäß Gl. 5.63 auf S.66). Durch das Eintauchen des Meißels in die Wassersäule werden erhöhte Widerstandskräfte wirksam und die Geschwindigkeitskurve verflacht sich. Aufgrund dieser Tatsache wird an der Gesamtheit der Meßpunkte näherungsweise auch ein Fallmodell unter Wasser gemäß Gl. 5.64 herangezogen. Die Ergebnisse beider Regressionsanalysen sind in Abb. 8.11 dargestellt.

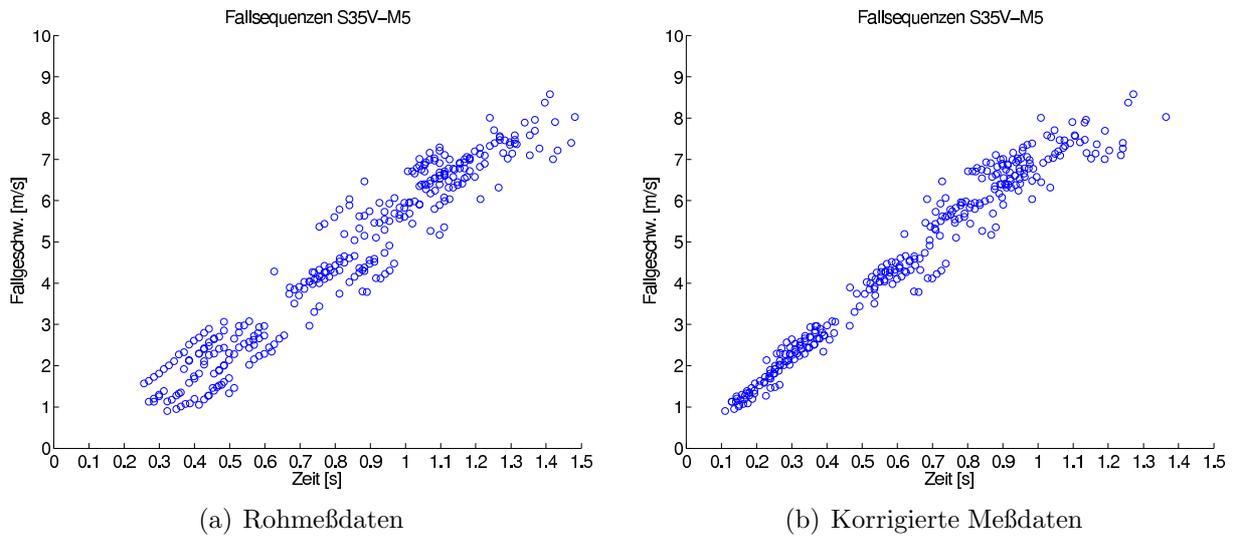


Abb. 8.10: Exemplarische Auswertung der Bewegungsmessung an 20 Fallsequenzen (Messung M5)

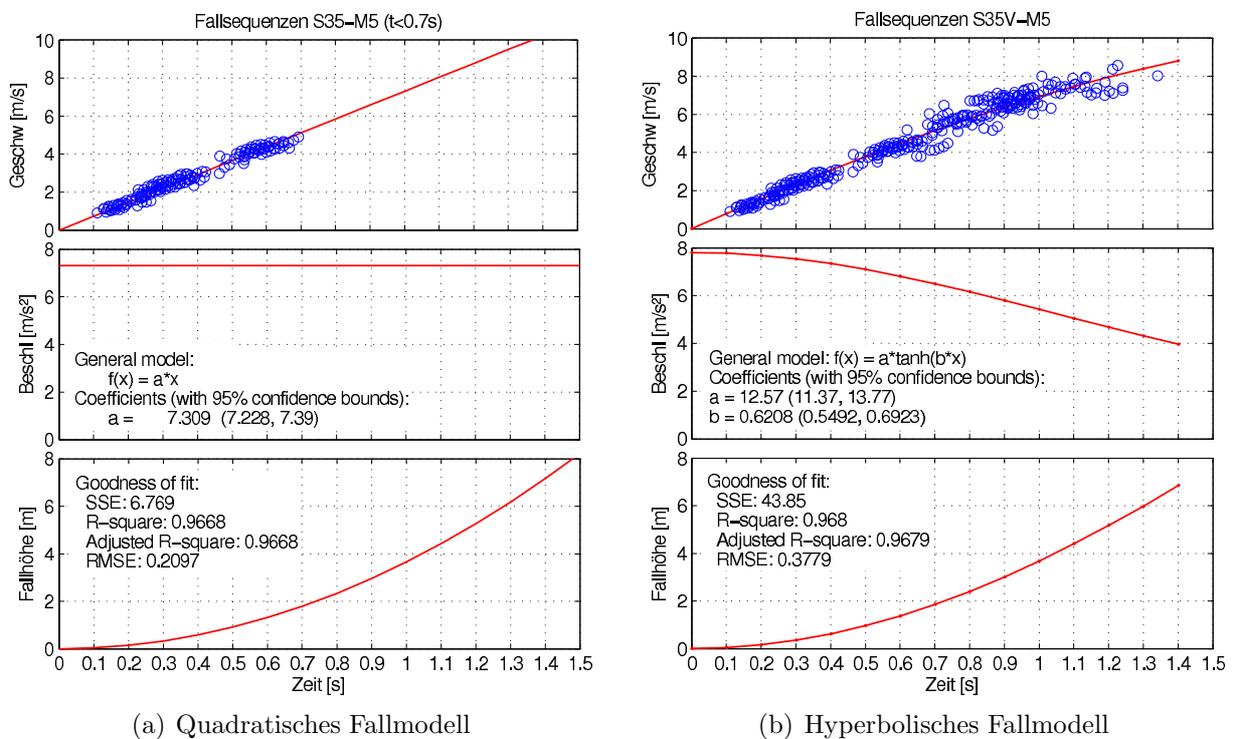


Abb. 8.11: Regressionsanalysen anhand der korrigierten Meßdaten (Messung M5)

8.4.3 Beschleunigungsmessung

Der Aufbau und die Funktionsweise des hier eingesetzten Meßsystems ist bereits eingehend in Kap. 4 (Methodenwahl und -beschreibung) erläutert worden. An dieser Stelle sind daher nur die Meßergebnisse sowie deren Auswertung angeführt.

In Tab. 8.5 ist eine Übersicht über die gemessenen Beschleunigungen bei den Meißelarbeiten angegeben. Dabei setzen sich die 61 aufgenommenen Schlagvorgänge aus drei Beschleunigungsmeßserien zusammen, zwischen denen jeweils das Bohrklein mit dem Bohrgreifer und der Schlambüchse gefördert wurde. Die ersten beiden Meßserien wurden aufeinanderfolgend bei einer Fallhöhe von ca. 5.5 m aufgenommen. Zwischen der zweiten und dritten Meßserie wurden weitere, nicht gemessene Meißelarbeiten ausgeführt. Die Schlagvorgänge der dritten Meßserie erfolgten ebenfalls bei einer durchschnittlichen Fallhöhe von 5.5 m, aber bei bereits fortgeschrittener Bohrtiefe, und stellen zugleich die letzten Meißelarbeiten vor dem Betonieren des Pfahles dar.

Die Beschleunigungsmessungen wurden nach Nullsetzen aller Aufnehmer jeweils zu Beginn jedes Schlagvorganges gestartet und zeichnen den gesamten Fallvorgang, den Aufschlag des Meißels auf den Untergrund, sowie den Ausschwingvorgang auf (siehe Abb. 8.12). Nach dem Lösen der Bremse an der Freifallwinde geht der Meißel in eine etwa 1.3 s dauernde Fallphase über (erkennbar durch negative Beschleunigung, ca. -7 m/s^2). Beim Aufprall des Meißels an der Bohrlochsohle wird der Meißel von einer Geschwindigkeit mit ca. 8 m/s schlagartig abgebremst. Das Ausmaß des Schlages läßt sich in Abb. 8.12 anhand der Beschleunigungswerte mit ca. 700 m/s^2 angeben und entspricht damit etwa der 70-fachen Erdbeschleunigung. In Abb. 8.13 ist der Detailbereich beim Aufschlag des Meißels exemplarisch für den zuvor abgebildeten Schlagvorgang dargestellt (Messung M7). Die Messung der Beschleunigungen am Meißel und an der Verrohrung erfolgte zeitsynchron, sodaß die

Vorgang	Meßserie	Startzeit	Schlaganzahl	Fallhöhe
Meißeln	1	13:16	23	≈ 5.5 m
Greifern	-			
Meißeln	2	14:18	18	≈ 5.5 m
Greifern	-			
Meißeln	nicht aufgenommen	14:40	46	-
Greifern	-			
Meißeln	nicht aufgenommen	15:00	≈ 40	-
Greifern	-			
Meißeln	3	15:32	20	≈ 5.5 m
Greifern	-			

Tab. 8.5: Übersicht über die bei den Meißelarbeiten gemessenen Beschleunigungen

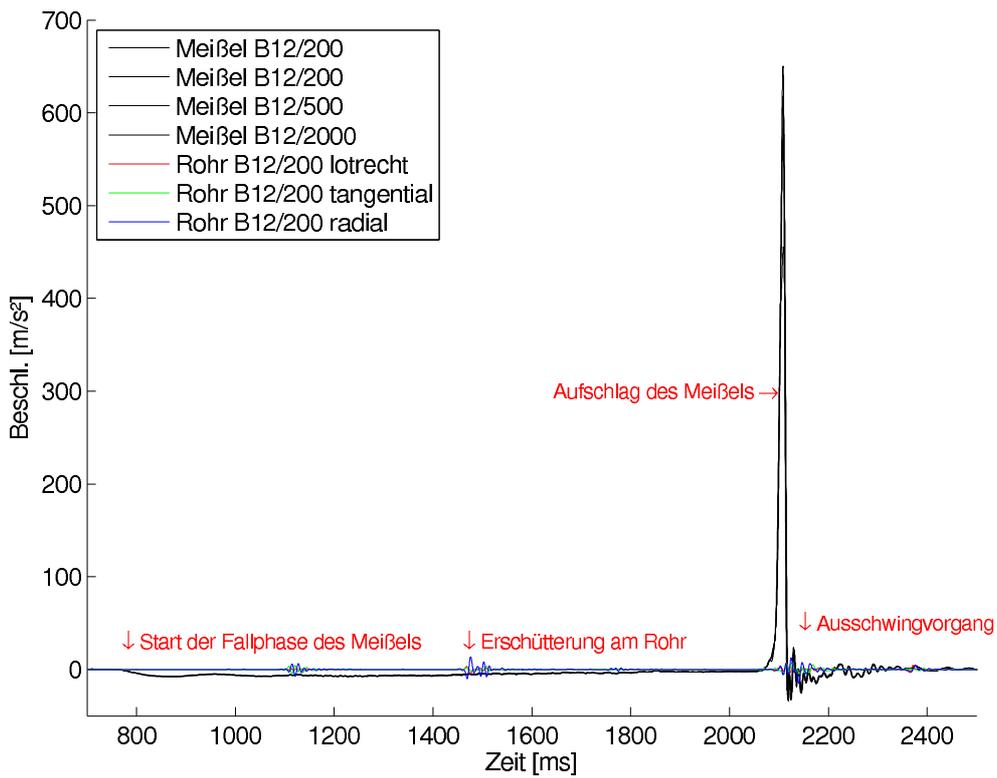


Abb. 8.12: Darstellung eines kompletten Schlagvorganges anhand der Meßwerte aller Beschleunigungsaufnehmer (Messung M7)

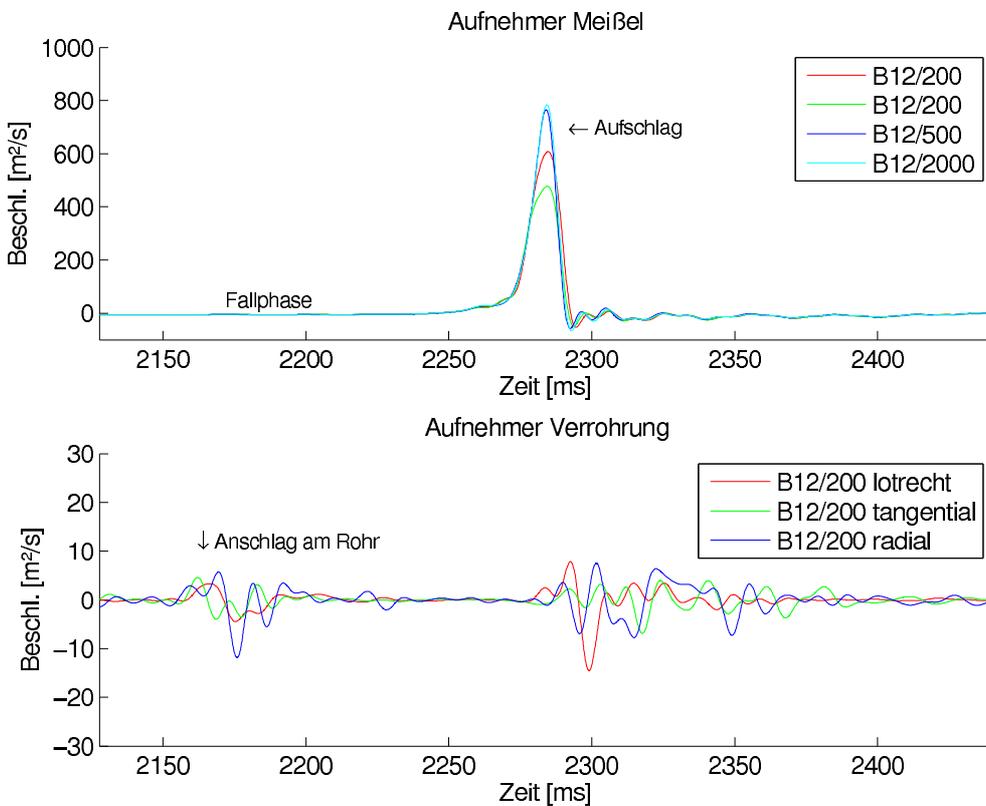


Abb. 8.13: Darstellung des Meißelaufschlages anhand der Meßwerte aller Beschleunigungsaufnehmer (Messung M7)

aufgezeichneten Signale an der Verrohrung eindeutig dem Meißelschlag zuzuordnen waren (vgl. mit sonstigen Erschütterungen am Rohr während der Fallphase). Die in den Boden eingetragene Stoßwelle erreichte die Aufnehmer an der Verrohrung mit geringer Zeitverzögerung. Dabei konnte in einem Großteil der Messungen der stärkste Ausschlag beim lotrecht an der Verrohrung positionierten Beschleunigungsaufnehmer festgestellt werden. Schlägt der Meißel hingegen während der Fallphase an der Verrohrung an, so ist das Maximum meist am radial positionierten Aufnehmer an der Verrohrung erkennbar. Diese Tatsache kann für die Auswertung künftiger Messungen von Bedeutung sein.

Die maximal gemessenen Beschleunigungen sind in Abb. 8.14 dargestellt und betragen bei der gegenständlichen Baustellenmessung etwa 300 bis 1300 m/s². In den ersten beiden Meßserien zeigen die erhaltenen Werte beider Aufnehmer eine gute Übereinstimmung und eine leicht fallende Tendenz mit zunehmender Schlaganzahl. In der dritten Meßreihe wurden mit dem Aufnehmer B12/500 jedoch zu geringe Beschleunigungswerte erhalten (Aufnehmer teilweise außerhalb des Meßbereiches). Außerdem konnte in der dritten Meßserie eine tendenzielle Erhöhung der Schlagkräfte mit der Schlaganzahl festgestellt werden. Dies dürfte auf den bereits vorangeschrittenen Bohrfortschritt, verbunden mit dem Antreffen von härteren Untergrundbedingungen, zurückzuführen sein (zwei Meißelserien zwischen der zweiten und der dritten Meßserie wurden nicht gemessen). Die Heranziehung der maximalen Beschleunigungen als qualitatives Kriterium für die Optimierung der Bohrarbeiten (Werkzeugwechsel) erscheint dadurch wenig geeignet.

Deutlich bessere Aussagen konnten durch die Berechnung der Stoßdauer gewonnen werden, da diese in allen drei Meßserien einen mit der Schlaganzahl markanten Anstieg aufwies (siehe Abb. 8.15). Somit ist die Stoßdauer als maßgebliches Kriterium für den optimalen Werkzeugwechsel durchaus vorstellbar. Der Zusammenhang sollte allerdings noch durch weitere Messungen bestätigt werden. Qualitativ vergleichbare Ergebnisse erhält man ebenfalls durch die Berechnung der Eindringtiefe anhand der am Meißel gemessenen Beschleunigungen (siehe Abb. 8.16).

Abschließend werden die Ergebnisse der gemessenen Beschleunigungen an der Verrohrung mit jenen am Meißel verglichen. Die Stoßdauer läßt sich an der Verrohrung aufgrund der Störeinflüsse (z.B. Anschläge des Meißels an der Verrohrung nach dem Aufschlag) nicht sinnvoll ermitteln. Die maximal erhaltenen Beschleunigungen können ebenfalls nicht für einen Vergleich verwendet werden. Ein guter Zusammenhang der Meßwerte läßt sich jedoch anhand der quadrierten und über die jeweilige Stoßdauer aufintegrierten Beschleunigungen erkennen. Diese wurden zusätzlich um den Median aller erhaltenen Werte normiert (siehe Abb. 8.17). Damit läßt sich der Verlauf der Meßwerte am Meißel und an der Verrohrung qualitativ vergleichen. Korrelationen zwischen den Messungen lassen sich in

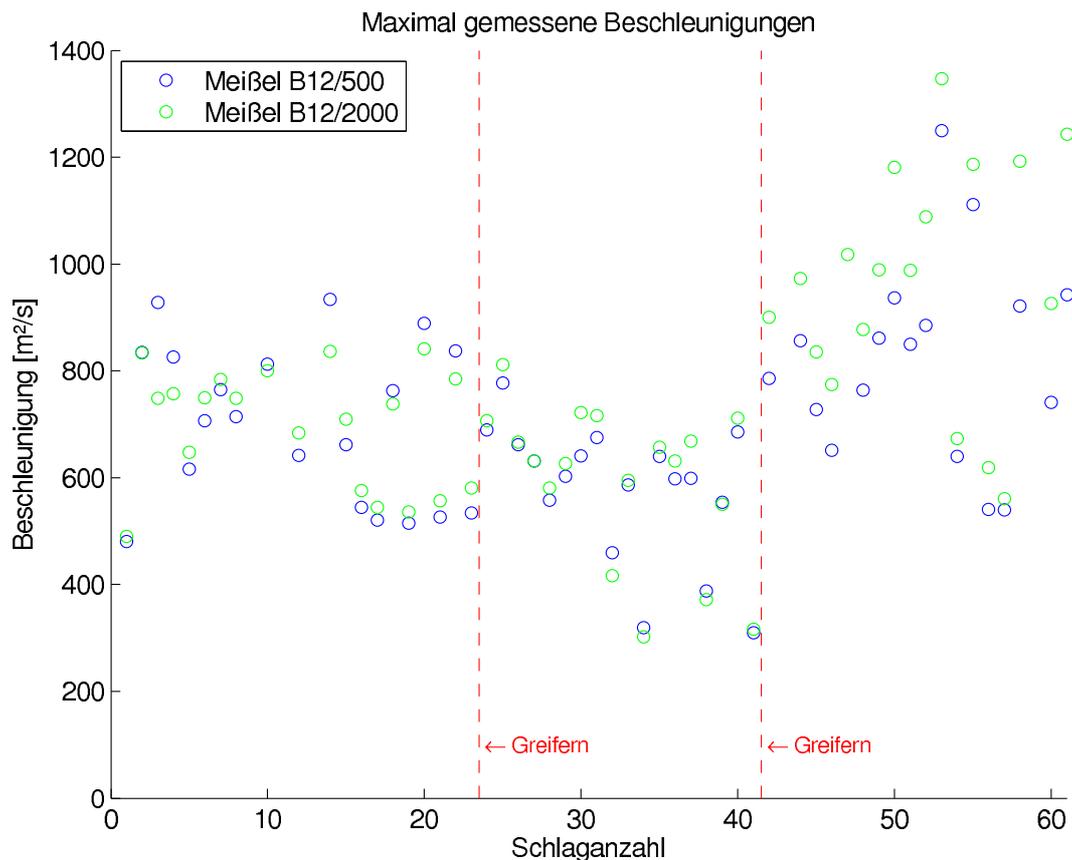


Abb. 8.14: Verlauf der maximal gemessenen Beschleunigungen am Fallmeißel

der ersten und der dritten Meßserie für den vertikalen und radialen Aufnehmer an der Verrohrung feststellen. In der zweiten Serie werden überdurchschnittlich hohe Ergebnisse an der Verrohrung erhalten. Dies dürfte auf die nicht vollständig geöffnete Klemmschelle an der Verrohrungsmaschine zurückzuführen sein, welche die Erschütterung des Rohres behindert (siehe Abb. 8.18).

Durch die Messung der Beschleunigungen an der Verrohrung konnten qualitative Zusammenhänge mit den Meßergebnissen am Meißel gefunden werden. Ein für die Praxis verwendbarer Zusammenhang, wie er für die Meßwerte am Meißel gefunden werden konnte, läßt sich an den am Rohr gemessenen Werten zunächst aber noch nicht erkennen. Weitere Messungen unter verschiedenen Bohr- bzw. Untergrundbedingungen sind daher jedenfalls notwendig. Zur Bestätigung der bereits erkannten Zusammenhänge anhand der Beschleunigungswerte am Meißel sind ebenfalls weitere Versuche anzuraten.

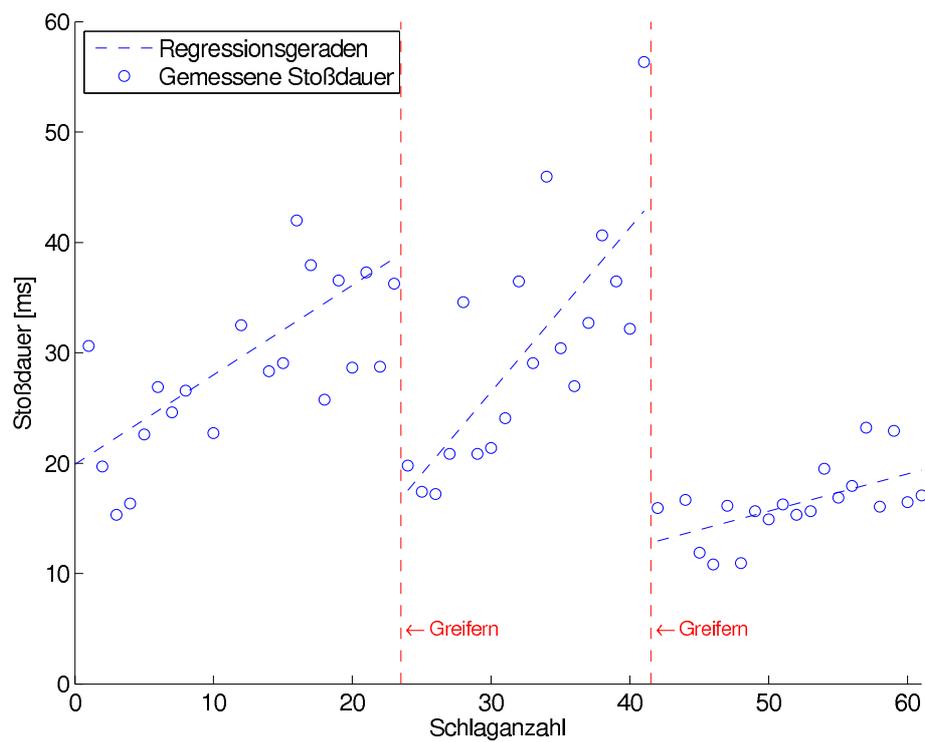


Abb. 8.15: Aus den Beschleunigungsdaten am Meißel ermittelter Verlauf der Stoßdauer bei den Schlagvorgängen

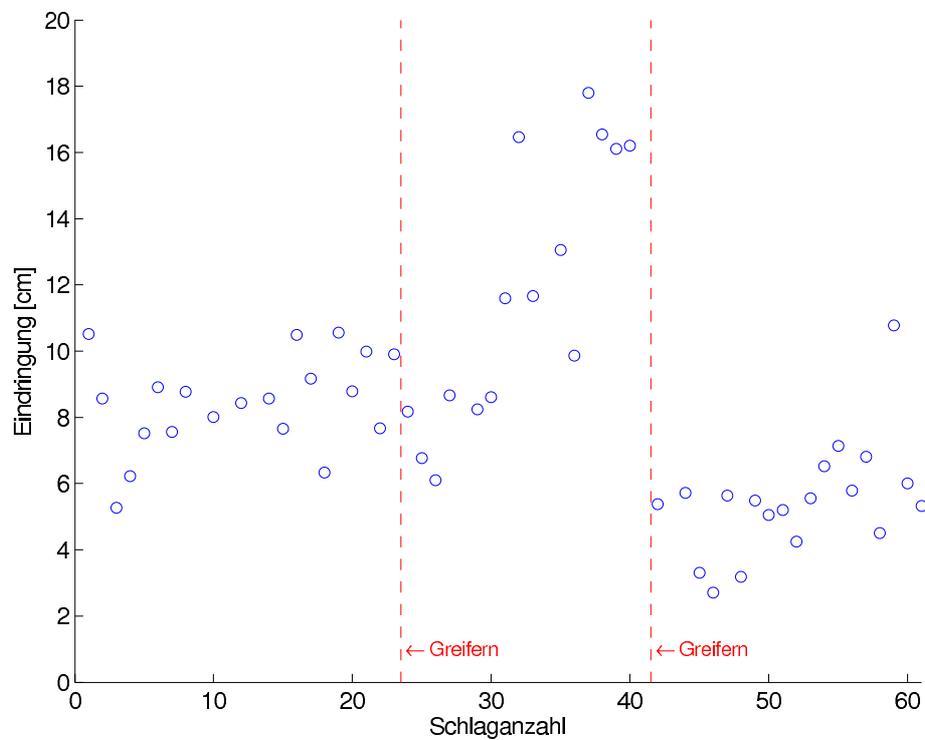
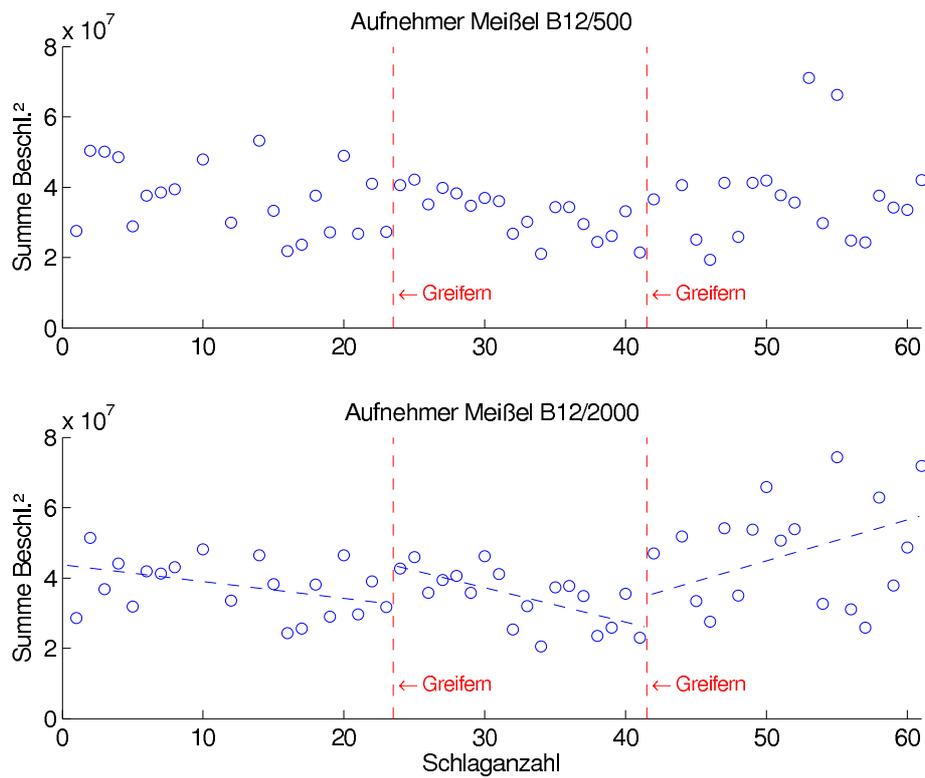
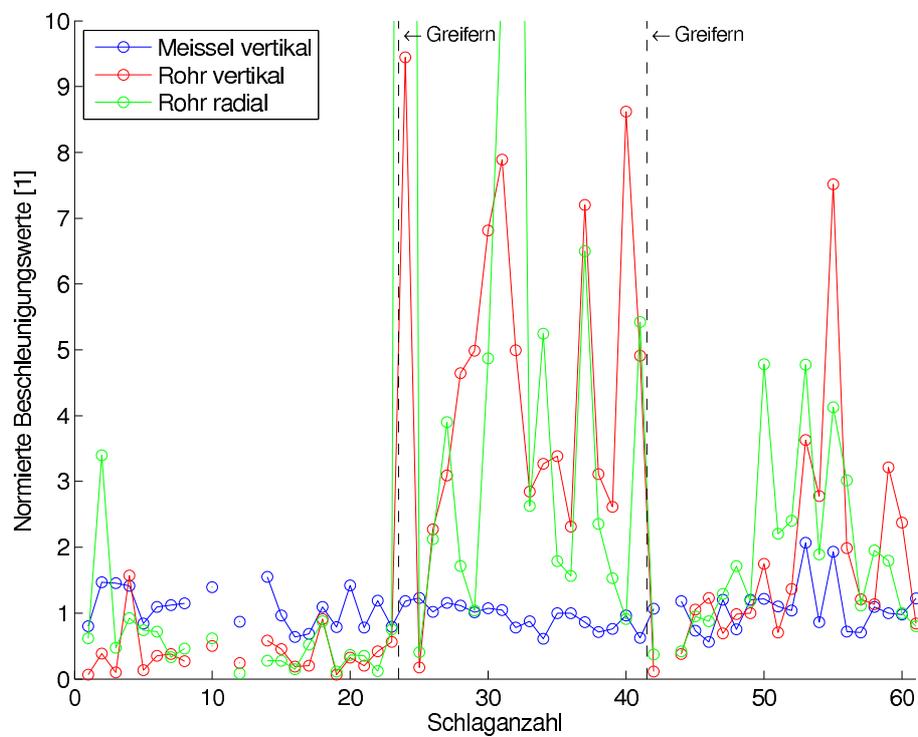


Abb. 8.16: Aus den Beschleunigungsdaten am Meißel ermittelter Verlauf der maximalen Eindringtiefe des Meißels



(a) Ergebnisse für die Aufnehmer am Meißel



(b) Normierte Beschleunigungswerte am Fallmeißel und an der Verrohrung

Abb. 8.17: Vergleich der quadrierten und aufintegrierten Beschleunigungen am Fallmeißel und an der Verrohrung



(a) Meßserie 1

(b) Meßserie 2

(c) Meßserie 3

Abb. 8.18: Öffnung der Klemmschelle an der Verrohrung während den Messungen

8.5 Baustellenmessung A5

8.5.1 Allgemeines

Im Zuge des Neubaus der A5 Nord Autobahn wurde ein Großversuch bei der Pfahlherstellung für ein Brückenwiderlager durchgeführt. Durch das beinahe vollständig wassergefüllte Bohrloch konnte erstmals ein gänzlich unter Wasser stattfindender Fallvorgang des Meißels beobachtet werden (siehe Tab. 8.6). Für die Aufnahme der Fallbewegung wurde das schon zuvor verwendete photogrammetrische Meßverfahren eingesetzt. Bei dem untersuchten Meißel handelt es sich um einen Kreuzmeißel mit Tangentialschneiden, der in Abschnitt 6.6.2 auf Seite 78 bereits für numerische Simulationen verwendet wurde. Somit kann das analytische Modell für den Fallvorgang unter Wasser nicht nur durch maßstäbliche Modellversuche, sondern auch anhand realer Baustellenbedingungen überprüft werden.

Projekt		Meißel	
Meßdatum	18.10.2007	Typ	Kreuzmeißel
Bauvorhaben	A5-11, Brückenwiderlager	Nr.	UB 649 4115
Pfahl-Daten		Masse	4.3 to
Pfahl Nr.	29	Länge	3.4 m
Durchmesser	120 cm	Greifer	
Bohrlänge ab GOK	20.9 m	Typ / Fabrikat	Leffer
GW (Wassersäule)	20 m ab BLS	Nr.	UB 494 099
Messungen		Masse	≈ 5.0 to
Fallhöhe	21.2 m	Seil	
Typ	Beschl.- u. Wegmessung	Durchmesser	26 mm
Anzahl	18	Bagger	Liebherr

Tab. 8.6: Eckdaten zur Messung A5

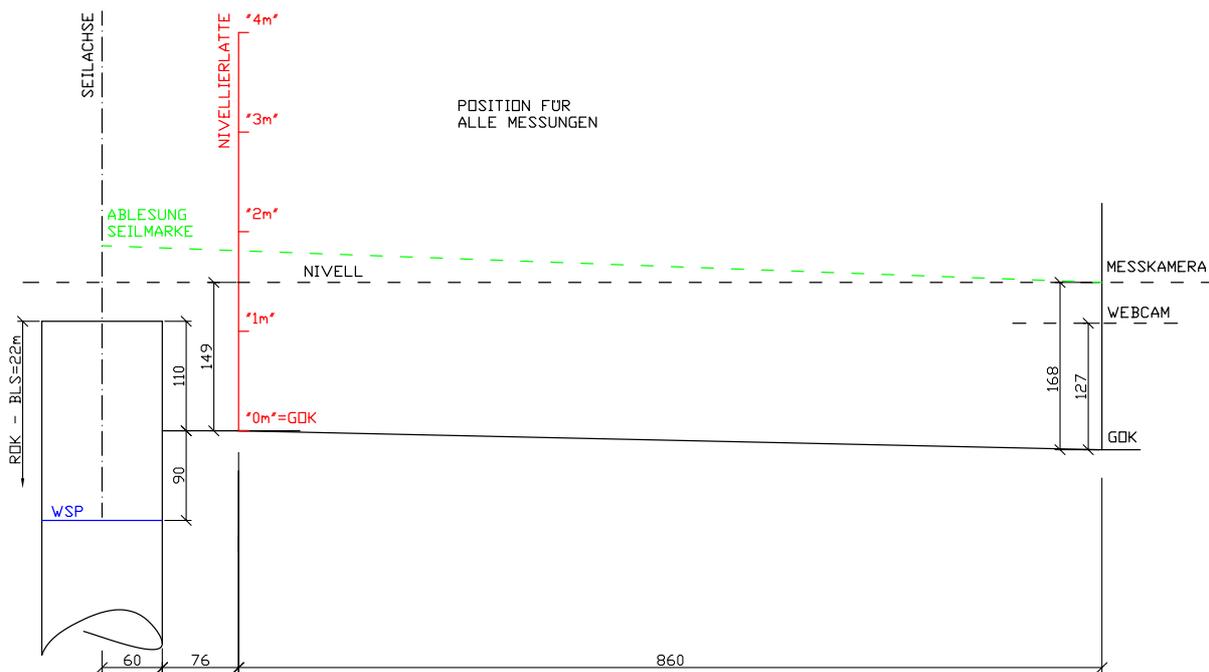


Abb. 8.19: Aufstellungsskizze für die bildgestützte Fallbewegungsmessung bei der Baustellenmessung A5 (Maße in cm)

8.5.2 Photogrammetrische Bewegungsmessung

Für die bildgestützte Fallbewegungsmessung wurden Markierungen am Hubseil in 1.0 m Abständen mit Signalbändern angebracht. Die Meßkamera wurde gemäß Abb. 8.19 in einem Abstand von ca. 10 m zum Pfahl positioniert. In Summe konnten achtzehn Fallvorgänge aufgezeichnet werden.

Alle Fallsequenzen wurden zum Vergleich sowohl manuell als auch rechnergestützt ausgewertet. In Abb. 8.20 ist die manuelle Auswertung eines Falles exemplarisch dargestellt (Fallsequenz A5-M13). Im Diagramm sind sowohl die Fallgeschwindigkeit als auch -beschleunigung des Meißels angegeben. Die Geschwindigkeit nimmt in der Anfangsphase stark zu und verflacht sich mit zunehmender Zeit. Bei den untersuchten Fallhöhen wird die Endgeschwindigkeit des Meißels gerade erreicht und kann mit ca. 8 m/s angegeben werden. Das Erreichen der Endgeschwindigkeit äußert sich auch durch die gegen Null gehende Beschleunigungskurve. Die Unregelmäßigkeiten in den ermittelten Beschleunigungen zeigen dabei einen Nachteil der manuellen Auswertung. Trotz präziser Auslesung der Seilmarken ergeben sich unvermeidliche, geringfügige Abweichungen.

Dem Diagramm wurden noch andere auswertbare Informationen hinzugefügt. Aufgrund der bekannten Fallhöhe und des bereits zurückgelegten Fallweges konnte der Bereich des Meißelaufschlages relativ genau bestimmt werden (Bereich "Aufschlag"). Die plötzliche

Abnahme der Seilgeschwindigkeit läßt auf den erfolgten Aufschlag des Meißels schließen und liegt genau in dem prognostizierten Bereich. Darüber hinaus ist auch der Zeitpunkt der Erschütterung der Meßkamera eingetragen, welcher bereits bei der Baustellenmessung Horn ausgewertet wurde. Aus der Zeit zwischen dem Aufschlag und der Erschütterung der Kamera läßt sich somit die Laufzeit der Welle im Boden feststellen (im Mittel 0.23 s).

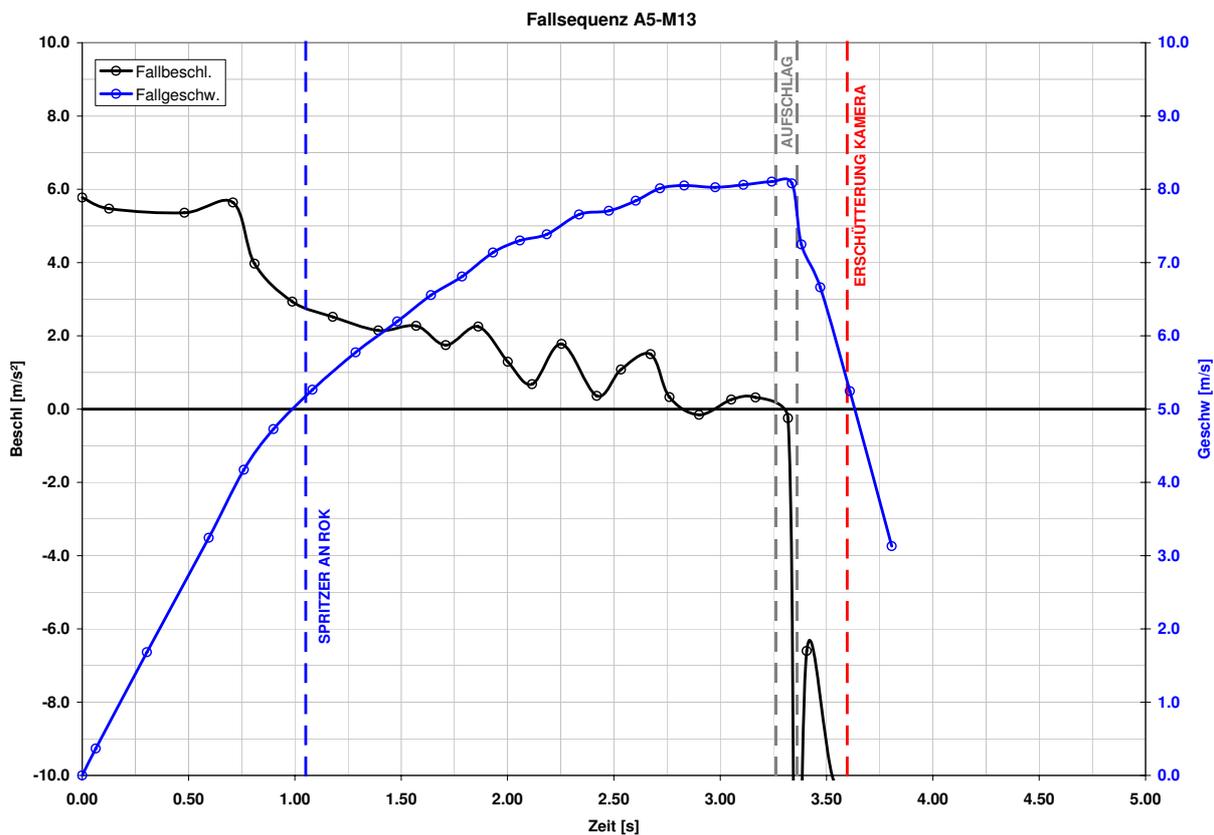


Abb. 8.20: Manuelle Auswertung der Fallsequenz A5-M13

In Abb. 8.21 ist die rechnergestützte Auswertung der Fallsequenz A5-M13 dargestellt. Dabei wird die Geschwindigkeit des Meißels in Abhängigkeit der Zeit angegeben und die erreichte Endgeschwindigkeit kann wie zuvor mit ca. 8 m/s angegeben werden. Nach dem Aufprall des Meißels ist ebenfalls ein steiler Abfall der Geschwindigkeitskurve erkennbar. Anhand eines Teilbereiches der Meßdaten werden ein Regressionsmodell gemäß Gl. 8.3 gerechnet und die Koeffizienten bestimmt (in Anlehnung an Kap. 5, Analytische Lösung der Fallbewegung).

$$f(t) = a \cdot \tanh [b(t + c)] \quad (8.3)$$

Diese Vorgangsweise wird mit den achtzehn automatisch ausgewerteten Meßdaten wiederholt. Somit können die Koeffizienten für jede Fallgeschwindigkeitskurve und die jeweilige

Streuung in Abb. 8.23 anhand von Boxplots ausgegeben werden. Anhand der Koeffizienten können auch der in Abb. 8.22 dargestellte Fallweg und die Fallbeschleunigung des Meißels dargestellt werden. Der Koeffizient "a" bestimmt die Endgeschwindigkeit der gemessenen Fallbewegung und kann mit $\approx 7.7 - 8.2$ m/s angegeben werden (unteres bis oberes Quartil). Der Koeffizient "b" ist für die Gestalt der Kurve und das Erreichen der Fallendgeschwindigkeit maßgebend und beträgt ≈ 0.62 . Der dritte Koeffizient "c" wurde eingeführt, um einen einheitlichen Startzeitpunkt der Fallkurven zu erhalten und liegt in den meisten Fällen nahe Null.

In Abb. 8.24 sind die manuell und rechnergestützt erhaltenen Meßpunkte mit der analytischen Lösung exemplarisch wieder für die Messung A5-M13 dargestellt. Für die Meßpunkte kann eine ausgezeichnete Übereinstimmung festgestellt werden. Die analytische Kurve weist eine geringfügige Abweichung gegenüber den experimentellen Ergebnissen auf, wie sie schon in Kap. 7 bei den Modellversuchen festgestellt werden konnte. Dies betrifft vor allem die Beschleunigungsphase des Meißels, in der die analytische Kurve einen steileren Verlauf annimmt, als bei den Baustellenversuchen ermittelt. Die analytisch berechnete Endgeschwindigkeit des Meißels $v_{end}=7.94$ m/s stimmt hingegen sehr gut mit den Meßwerten überein (Koeffizient "a"= $\approx 7.7 - 8.2$ m/s, vgl. Abb. 8.23).

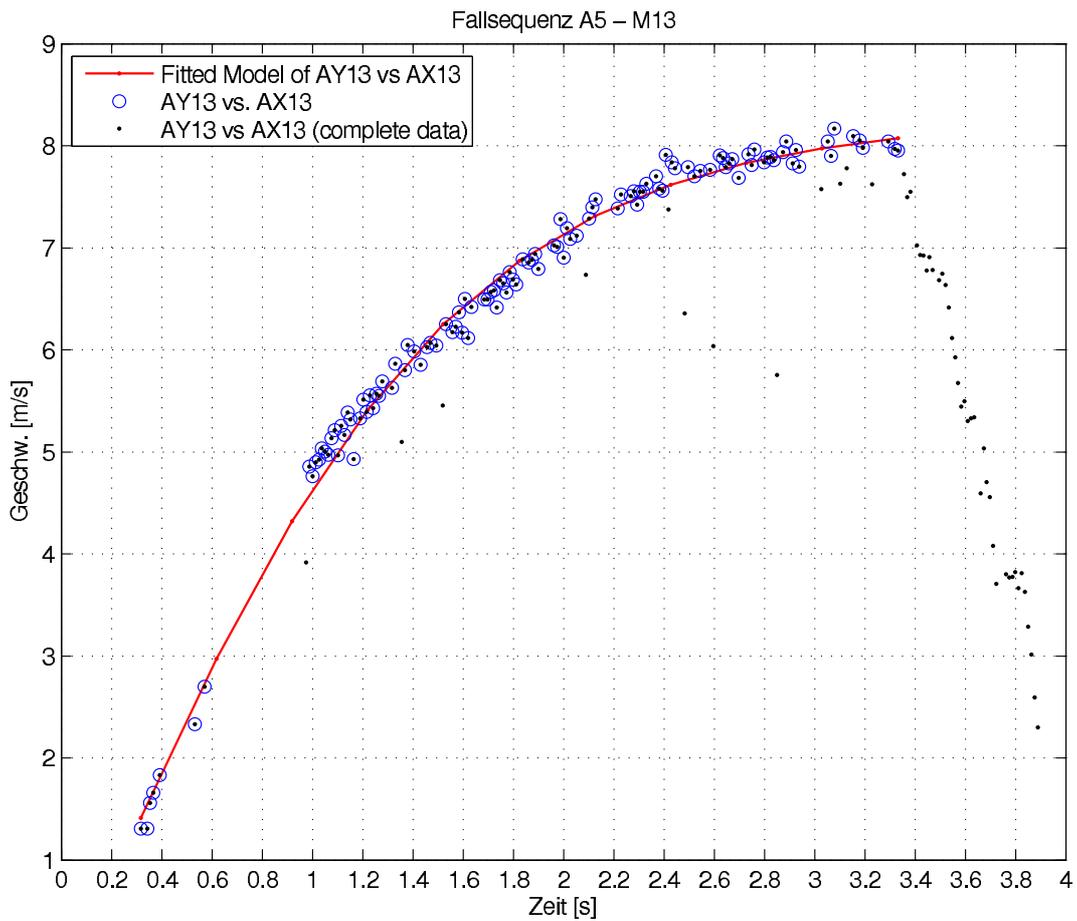
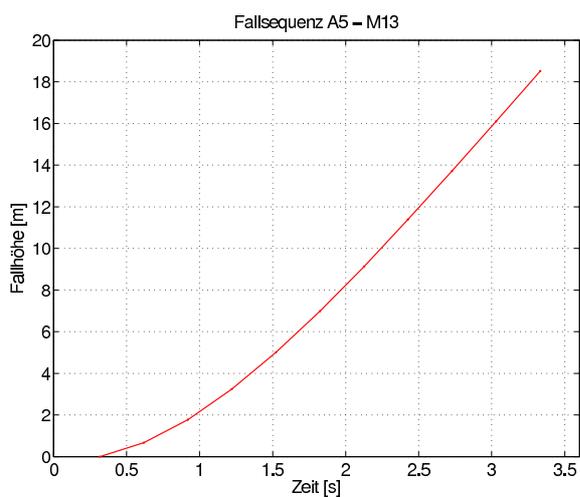
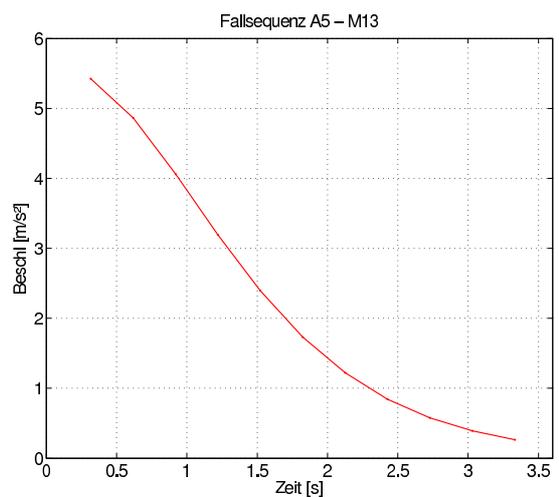


Abb. 8.21: Rechnergestützte Auswertung der Fallsequenz A5-M13 mit Regressionskurve für einen Teilbereich der Meßpunkte



(a) Fallweg



(b) Fallbeschleunigung

Abb. 8.22: Fallweg und Fallbeschleunigung für die Regressionskurve der Messung A5-M13

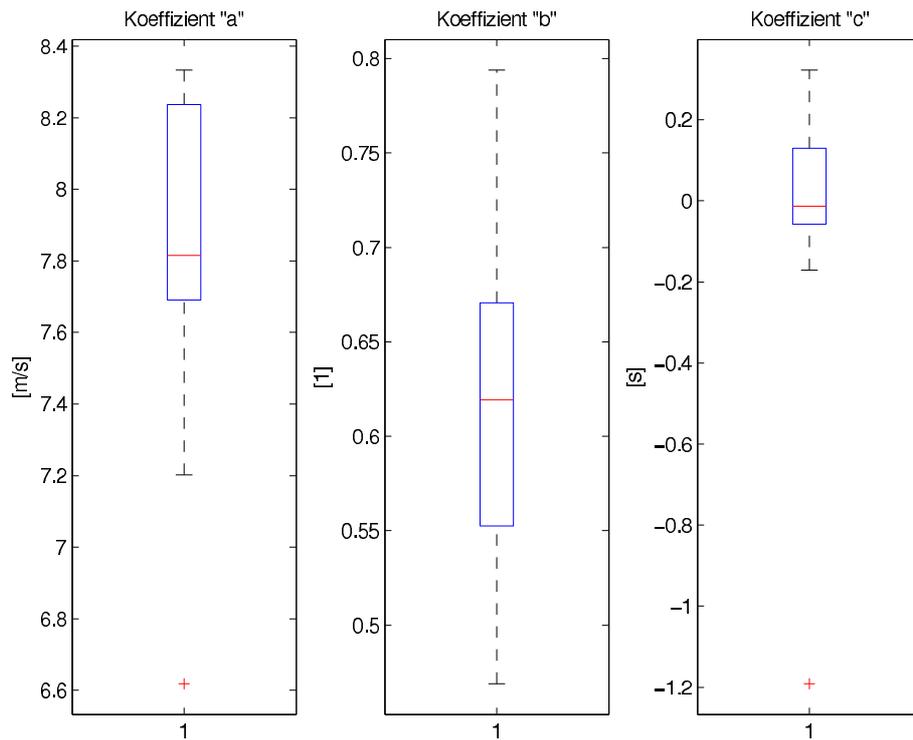


Abb. 8.23: Boxplots für die ermittelten Koeffizienten aller Regressionskurven nach Gl. 8.3

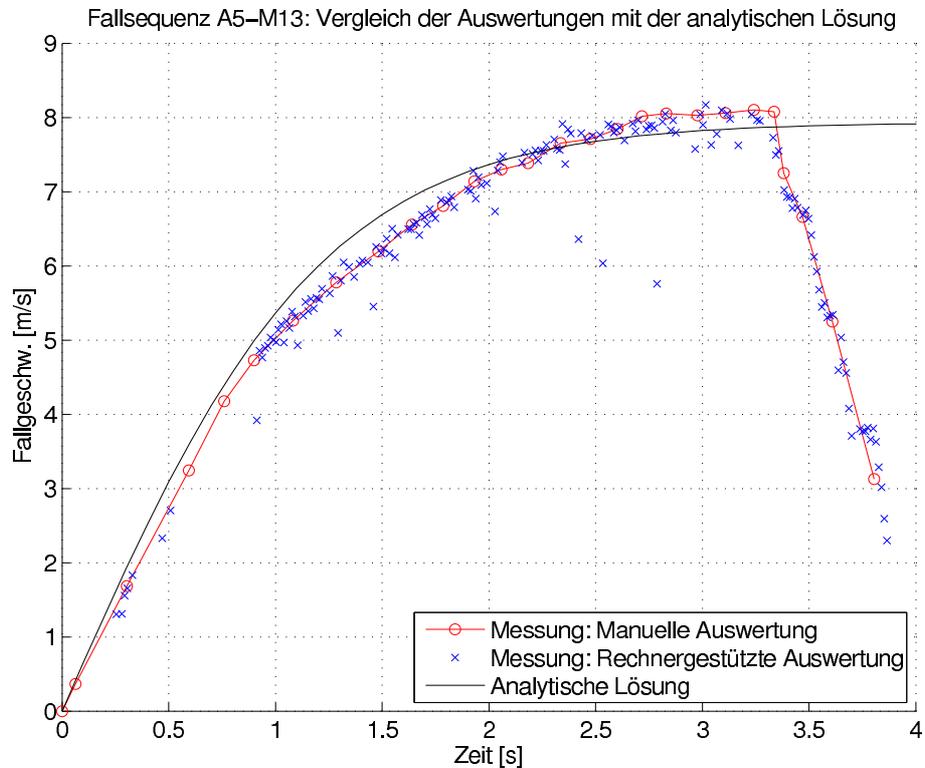


Abb. 8.24: Vergleich der Auswertungen (manuell und rechnergestützt) mit der analytischen Lösung für die Messung A5-M13

9 Ergebnisauswertung und Hinweise für den praktischen Einsatz

9.1 Allgemeines

An dieser Stelle wird eine Zusammenfassung der Auswerteergebnisse aller durchgeführten Untersuchungen angegeben. Dabei werden die Fallvorgänge unter verschiedenen Bohrbedingungen (trocken, trocken/unter Wasser, gänzlich unter Wasser) betrachtet. Für jeden Fall werden Gegenüberstellungen angeführt, die im praktischen Einsatz von Bedeutung sind. Dazu sind Verknüpfungen der einzelnen Kapitel notwendig, wie beispielsweise die analytischen Fallmodelle mit den Baustellenmessungen. Eine ausführliche Auswertung wird für die Fallbewegung verschiedener Meißelvarianten unter Wasser angegeben. Außerdem werden "kombinierte" Fallbewegungen betrachtet, welche sich beim Eintauchen des Meißels mit vorgegebener Geschwindigkeit in die Wassersäule ergeben. Die Rotationsbewegung geeigneter Meißelmodelle wird beim Fallvorgang unter Wasser in quantitativer Hinsicht überprüft. Abschließend werden Empfehlungen für den praktischen Einsatz der Meißelwerkzeuge angegeben.

9.2 Fallvorgang im trockenen Bohrloch

Der Fallvorgang im trockenen Bohrloch kann gemäß Kap. 5 (Analytische Lösung der Fallbewegung), ohne Berücksichtigung der Reibungswiderstände, mit einem quadratischen Fallmodell beschrieben werden. Dabei ergibt sich die Fallgeschwindigkeit gemäß Gl. 9.1 vorwiegend aus der Masse des Meißels und dem Trägheitsmoment der Seilwinde. Aufgrund der Überlegungen in Abschnitt 5.3 kann das quadratische Fallmodell näherungsweise auch unter Berücksichtigung konstant auftretender Reibungswiderstände verwendet werden. Es bietet sich daher an, die Beschleunigungen a des Meißels gemäß Gl. 9.2 aus den Baustellenmessungen zu ermitteln und zu vergleichen.

Fallvorgang trocken		LT34	Horn	S35V	A5
Beschleunigung	[m/s ²]	6.4 ¹⁾	8.0	7.3	7.1 ²⁾
Abminderung zum freien Fall	[%]	35	18	26	28

¹⁾ nicht genau feststellbar (geringe Anzahl von Meßwerten)

²⁾ aus Fallvorgang unter Wasser rückgerechnet

Tab. 9.1: Durchschnittliche Beschleunigungswerte für die Fallvorgänge im trockenen Bohrloch bei den Baustellenmessungen

$$v(t) = \frac{m_1 g}{m_1 + (h + \frac{h}{\sin\alpha})m_s + \frac{J_0}{r_0^2}} \cdot t \tag{9.1}$$

$$v(t) = a \cdot t \tag{9.2}$$

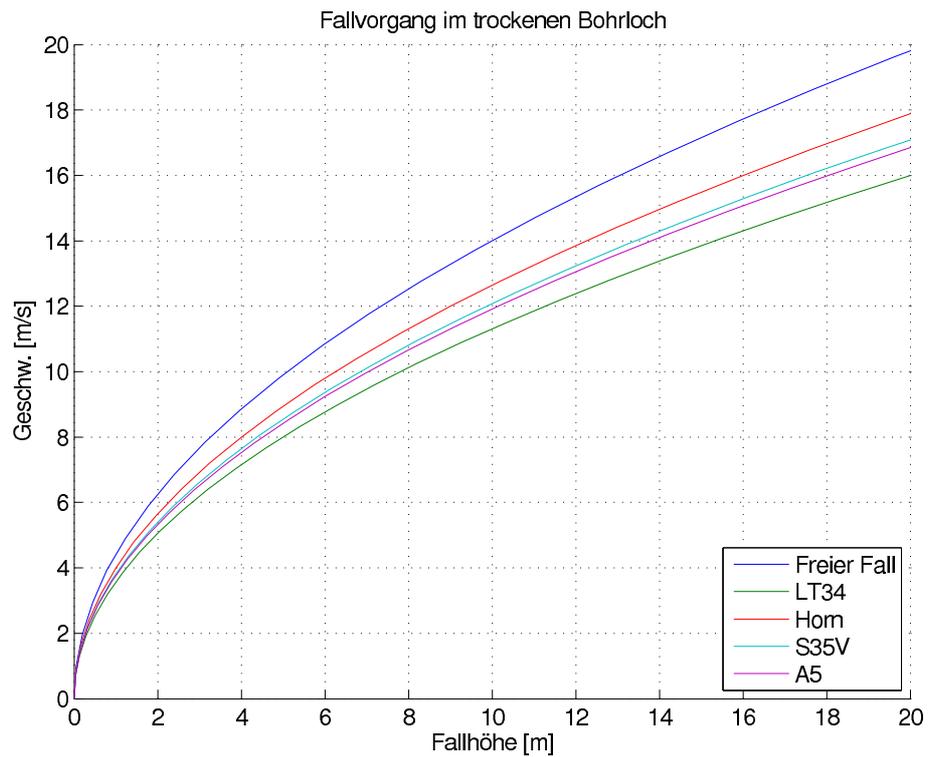
In Tab. 9.1 sind die auf den vier Baustellen experimentell ermittelten Beschleunigungswerte aufgelistet. Zur Bestimmung werden immer mehrere Fallvorgänge herangezogen und die Abminderung der Beschleunigung im Bezug auf den freien Fall angegeben. Die Baustellenmessung LT34 liefert hierfür keinen zuverlässigen Wert, da die Meßpunkte nur zu einzelnen Fallhöhen vorhanden sind und daher keine genaue Ermittlung des Fallkurvenverlaufes möglich ist. Der Beschleunigungswert der Baustellenmessung A5 ist vom Fallvorgang unter Wasser auf den trockenen Bohrlochzustand rückgerechnet. Alle angegebenen Werte sind Durchschnittswerte aus mehreren Fallvorgängen und stellen daher nicht die maximal gemessene Fallbeschleunigung dar. Die sich ergebende Verminderung gegenüber dem freien Fall beträgt somit ca. 18 bis 28% (Baustellenmessung LT34 ausgenommen).

Es interessiert weiters, inwiefern sich diese Abminderung auf die Geschwindigkeit und die Meißelleistung in Abhängigkeit von der Fallhöhe auswirkt. Dazu wird die Geschwindigkeit des Meißels nach dem zurückgelegten Fallweg umformuliert (Gl. 9.3).

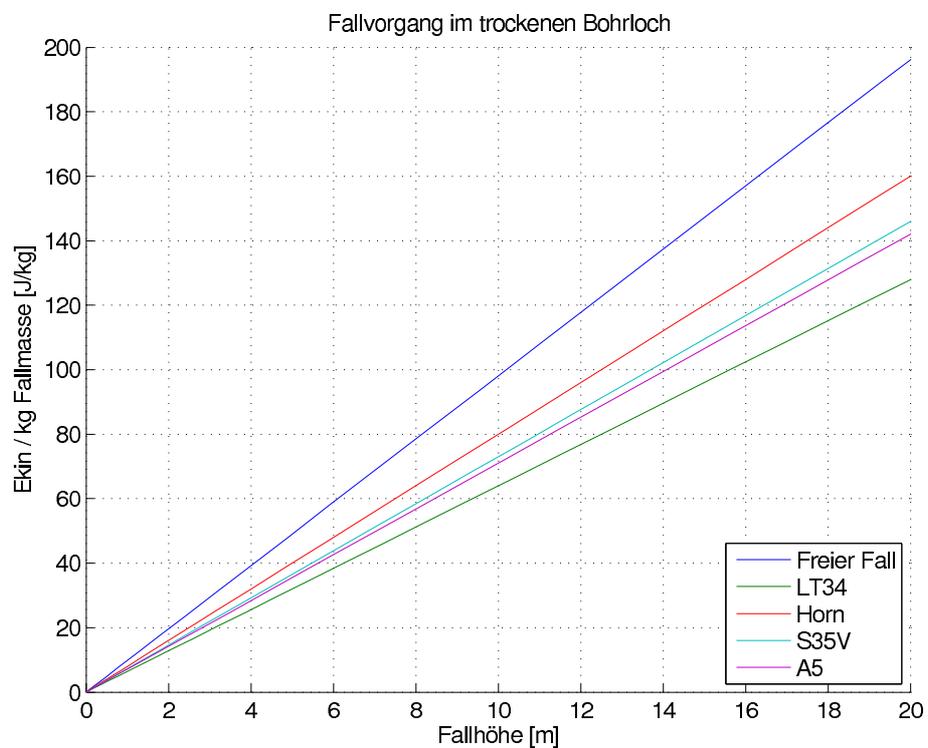
$$v(z) = \sqrt{2 \cdot a \cdot z} \tag{9.3}$$

z ... zurückgelegter Fallweg

Fügt man diese Gleichung in die Formel für die kinetische Energie ein, so läßt sich diese als linearer Term der Masse des Meißels, der Beschleunigung sowie der Fallhöhe darstellen (siehe Gl. 9.4, gleiche Formel wie für potentielle Energie, jedoch anderer Beschleunigungswert). Bei gleich bleibender Fallhöhe und Masse des Meißels gehen die zuvor ausgerechneten Abminderungen also linear in die kinetische Energie ein. Der Verlauf der Fallge-



(a) Fallgeschwindigkeitskurve in Abhängigkeit von der Fallhöhe



(b) Kinetische Energie in Abhängigkeit von der Fallhöhe

Abb. 9.1: Experimentell ermittelte Fallvorgänge und Energien bei Meißelarbeiten im trockenen Bohrloch (Baustellenmessungen)

schwindigkeit und der kinetischen Energie in Abhängigkeit von der Fallhöhe ist in Abb. 9.1 dargestellt. Die kinetische Energie ist dabei auf eine Fallmasse von 1 kg bezogen.

$$E_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2} = m \cdot a \cdot z \tag{9.4}$$

9.3 Fallvorgang im wassergefüllten Bohrloch

Bei Meißelarbeiten unter Wasser sind vor allem die Strömungseigenschaften der verwendeten Werkzeuge entscheidend. Für den Vergleich der Meißeltypen erscheint es günstig, die für den Fallvorgang unter Wasser aufgestellte Fallgeschwindigkeitsgleichung aus Kap. 5 (Analytische Lösung der Fallbewegung) nochmals zu betrachten:

$$v(t) = \underbrace{\sqrt{\frac{(m_1 - V_1 \rho_f)g}{\kappa}}}_{\text{Endgeschwindigkeit}} \cdot \underbrace{\tanh\left(\frac{\sqrt{(m_1 - V_1 \rho_f)g\kappa}}{A_1} \cdot t\right)}_{\text{Kurvenverlauf}} \tag{9.5}$$

$$\text{bzw. } v(z) = \sqrt{\frac{(m_1 - V_1 \rho_f)g}{\kappa}} \cdot \left(1 - e^{\frac{-2\kappa}{A_1} \cdot z}\right) \tag{9.6}$$

$$\text{mit } A_1 = m_1 + \left(h + \frac{h}{\sin\alpha}\right)m_s + \frac{J_0}{r_0^2} \tag{9.7}$$

Bezeichnung der Variablen gemäß Kap. 5

Die Gleichung für die Fallgeschwindigkeit setzt sich aus der Endgeschwindigkeit des Meißels und einer hyperbolischen Funktion für den Kurvenverlauf zusammen. Dabei gehen die geräteseitigen Parameter im Koeffizienten A_1 (Trägheit der Seilwinde, Seilmasse) nur in den Kurvenverlauf ein. Die erzielbare Endgeschwindigkeit ist hingegen von der Masse und dem Volumen des Meißels, sowie dem Strömungswiderstandskoeffizienten κ abhängig. Für gegenüberzustellende Meißelvarianten mit gleicher Masse ist aufgrund derselben Materialdichte ebenfalls das Volumen konstant und daher nur mehr der Strömungswiderstandskoeffizient κ entscheidend. Untersuchungen dieser Art ergeben sich beispielsweise bei unterschiedlichen Lenkblechausführungen an einem Meißel oder bei sonstigen, geometrisch verschiedenen Meißeltypen mit gleicher Masse. Aufgrund der Reduktion auf den Strömungswiderstandskoeffizienten als maßgebenden Parameter, sei in diesem Fall auf die Gegenüberstellung in Abschnitt 6.9 auf S. 104 (Gegenüberstellung der numerisch ermittelten Strömungsparameter) verwiesen.

Die in den letzten Kapiteln untersuchten Meißelmodelle besitzen jedoch keine einheitliche Masse und entsprechen realen, auf Baustellen aufgenommenen Meißeln. Für einen

	Länge	Masse	Trägheitsmoment	Masse/lfm	Trägheitsmoment/lfm
	[m]	[to]	[kgm ²]	[to/m]	[kgm]
Basismodelle					
Flachmeißel LB0°	4.24	5.20	574.00	1.23	135.38
Kreuzmeißel	3.44	4.30	445.47	1.25	129.50
Ringmeißel	3.87	5.59	1128.75	1.44	291.67
Normierte Modelle					
Flachmeißel LB0°	4.00	4.91	541.51	-	-
Kreuzmeißel	4.00	5.00	517.99	-	-
Ringmeißel	4.00	5.78	1166.67	-	-

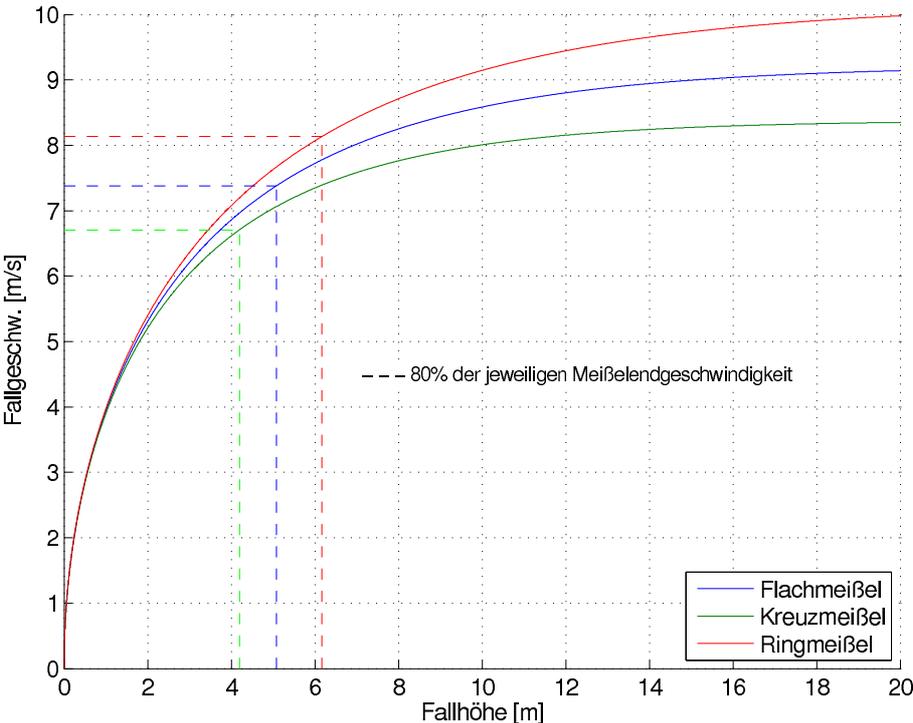
Tab. 9.2: Eigenschaften der (normierten) Meißel für den Vergleich

Auswertung		Flachmeißel LB0°	Kreuzmeißel	Ringmeißel
Meißelendgeschw. v_{end}	[m/s]	9.2	8.4	10.2
$v_{end(i)}/v_{end(RM)}$	[%]	91%	82%	100%
80% d. Meißelendgeschw.	[m/s]	7.4	6.7	8.1
Fallhöhe für 80% v_{end}	[m]	5.1	4.2	6.2
90% d. Meißelendgeschw.	[m/s]	8.3	7.5	9.2
Fallhöhe für 90% v_{end}	[m]	8.3	6.8	10.0

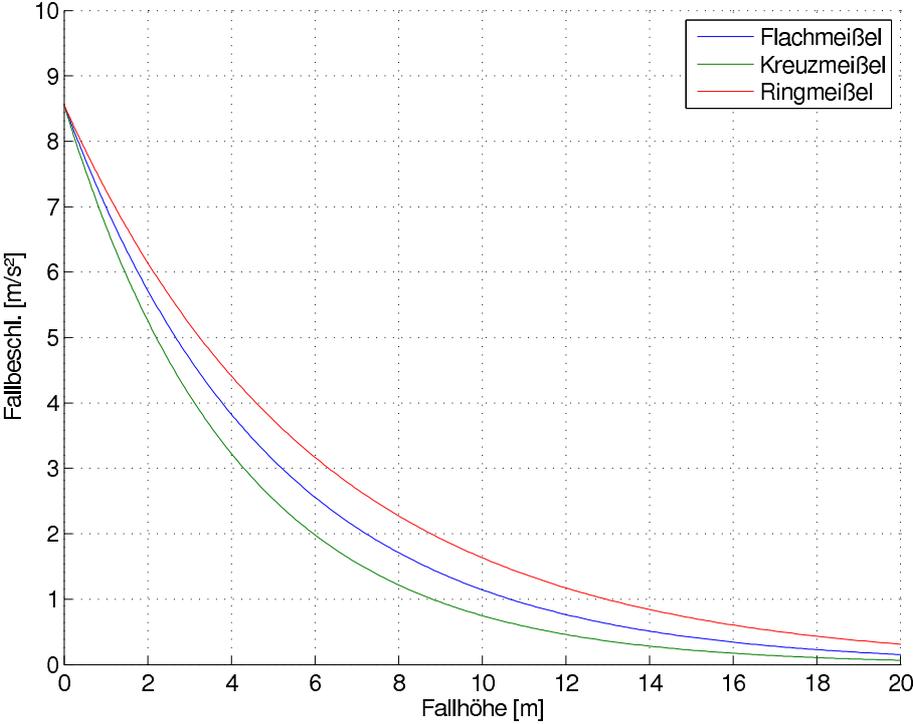
Tab. 9.3: Vergleich der Endgeschwindigkeiten für die normierten Meißel

Vergleich zwischen den verschiedenen Typen ist es erforderlich, daß diese auf ein sinnvolles Vergleichsniveau gestellt werden. Eine Möglichkeit besteht darin, die Werkzeuge auf die gleiche geometrische Länge zu normieren. Damit besitzen die normierten Meißel bei gleicher Ausgangslage der Fallvorgänge im praktischen Einsatz die gleiche, durch die Bohrlochtiefe vorgegebene, Fallhöhe. Die Masse der Meißel bleibt allerdings unterschiedlich und muß in der Beschreibung der Fallkurven berücksichtigt werden. In Tab. 9.2 sind die untersuchten Flach-, Kreuz- und Ringmeißel auf die einheitliche Länge von 4.0 m normiert und deren Eigenschaften angegeben. Nachdem der Ring- und Kreuzmeißel nicht über Lenkbleche verfügen, wurde beim Flachmeißel ebenfalls das äquivalente Modell ohne Rotationswirkung ausgewählt (Lenkblechanstellung 0°). Der Strömungswiderstand ergibt sich hauptsächlich aus dem Druckwiderstand, weshalb für einen Vergleich näherungsweise die am Originalmodell ermittelten Widerstandskoeffizienten verwendet werden können (trotz abweichender Länge zum Originalmodell, vgl. Ergebnisse in Kap. 6, Numerische Strömungssimulationen)

In Abb. 9.2 sind die Fallgeschwindigkeits- und Fallbeschleunigungskurven für die normierten Modelle dargestellt. Der Ringmeißel erreicht die größte Endgeschwindigkeit mit $v_{end} \approx 10.2$ m/s. Die Endgeschwindigkeit des Flachmeißels ist mit 9.2 m/s um etwa 9%, jene des Kreuzmeißels mit 8.4 m/s bereits um 18% gegenüber dem Ringmeißel vermin-



(a) Fallgeschwindigkeitskurve



(b) Fallbeschleunigungskurve

Abb. 9.2: Fallgeschwindigkeit und -beschleunigung der normierten Meißeltypen in Abhängigkeit von der Fallhöhe

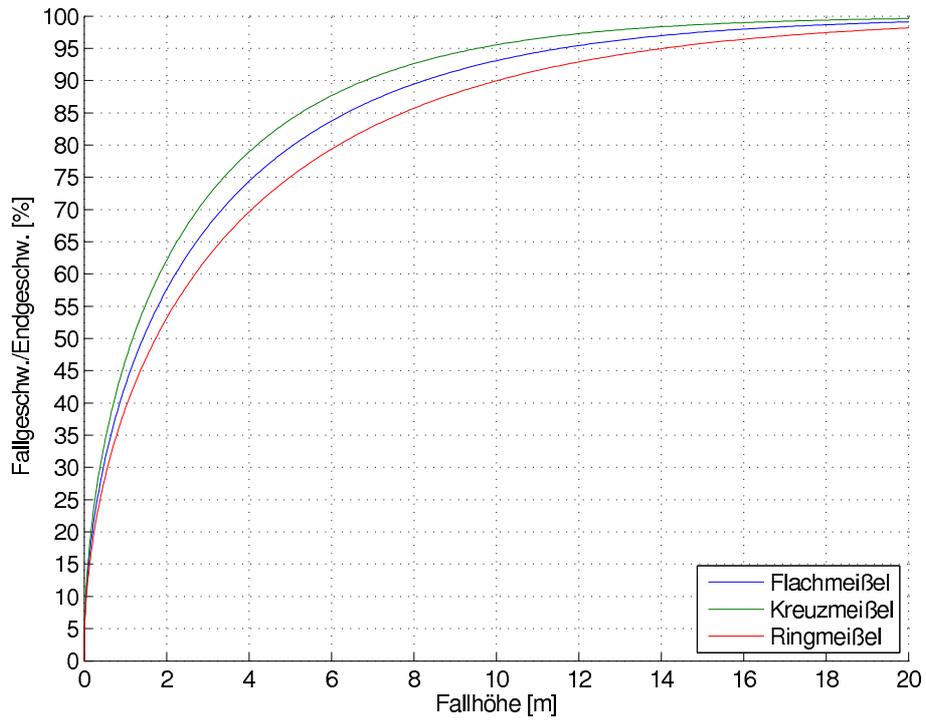


Abb. 9.3: Prozentueller Verlauf der Fallgeschwindigkeit zur Endgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Fallhöhe

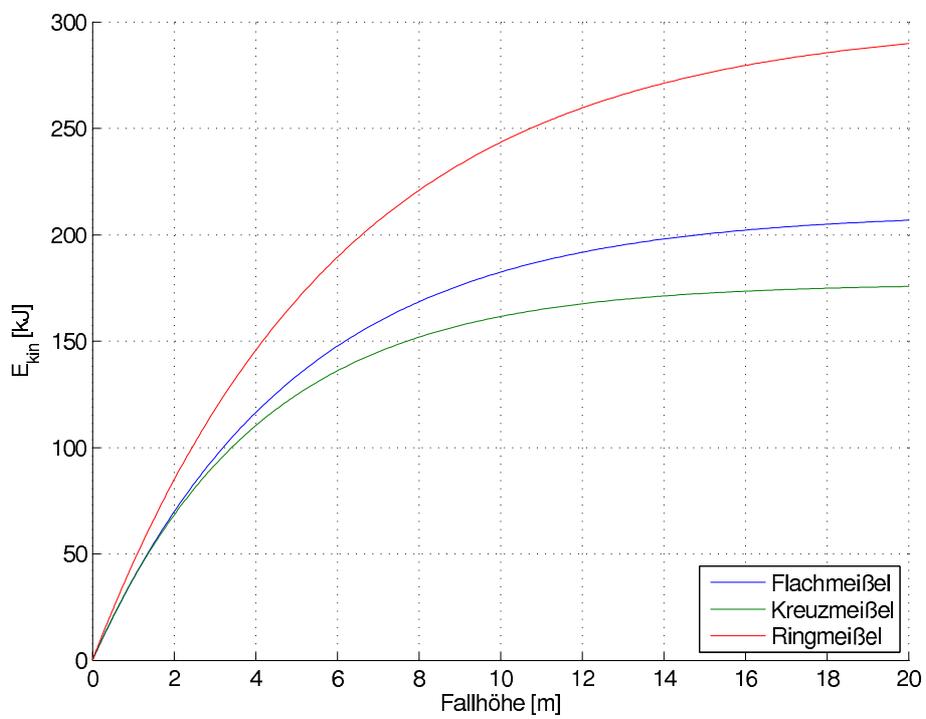


Abb. 9.4: Kinetische Energie in Abhängigkeit von der Fallhöhe

dert. Die Fallgeschwindigkeiten nähern sich den Maximalwerten asymptotisch an und benötigen "theoretisch" eine unendliche Fallhöhe, um diese zu erreichen. Praktisch wird jedoch ein Großteil der Fallendgeschwindigkeit bereits nach den ersten Fallmetern erzielt. Für die Meißelarbeiten interessiert daher eine Fallhöhe-Geschwindigkeitskombination, die einen möglichst effizienten Arbeitsablauf gewährleistet. Als sinnvoll erscheinender Ansatz wurden die 80% Werte der Endgeschwindigkeiten berechnet und die korrespondierenden Fallhöhen abgelesen (siehe Tab. 9.3). Um 80% der Endgeschwindigkeit zu erreichen, benötigen die betrachteten Meißeltypen Fallhöhen von ca. 4.2 bis 6.2 m, die ungefähr der 1 bis 1.5-fachen Meißellänge entsprechen (siehe Abb. 9.2a). Jede größere Fallhöhe kann somit nur mehr eine Geschwindigkeitssteigerung von 20% bewirken. Diese Abschätzung kann generell für verschiedene prozentuelle Anteile von der Endgeschwindigkeit erfolgen und läßt sich bequem aus Diagramm 9.3 ablesen. Für 90% der Endgeschwindigkeit sind beispielsweise schon deutlich größere Fallhöhen von 6.8 bis 10 m erforderlich (Vergrößerungsfaktor für die Fallhöhe ≈ 1.6), die Fallgeschwindigkeit steigt jedoch nur mehr um 10%. Dabei wird die gewählte Geschwindigkeit umso schneller erreicht, je größer der Strömungswiderstandskoeffizient des Meißels ist (siehe Abb. 9.3 und Gl. 9.5).

Für die Meißelarbeit ist wie beim Fallvorgang im trockenen Bohrloch die kinetische Energie beim Auftreffen auf der Bohrlochsohle entscheidend. Die kinetische Energie ist nach Gl. 9.4 von der Fallmasse und vom Quadrat der Fallgeschwindigkeit abhängig. Da sich die Massen der betrachteten Meißel unterscheiden, müssen diese für einen Vergleich der Meißelleistung berücksichtigt werden. In Abb. 9.4 ist der Kurvenverlauf der kinetischen Energie wieder in Abhängigkeit von der Fallhöhe dargestellt. Die Kurve für den Ringmeißel setzt sich nun deutlich stärker ab, als zuvor im Geschwindigkeitsdiagramm 9.2a.

9.4 Fallvorgang im teilweise wassergefüllten Bohrloch

Bei der Auswertung der maßstäblichen Modellversuche werden auch Fallversuche im teilweise wassergefüllten Zylinder betrachtet und das Eintauchverhalten und die Geschwindigkeitsentwicklung ausgewertet. Dabei kann bei allen Versuchen ein relativ rasches Erreichen der Maximalgeschwindigkeit unmittelbar nach dem Eintauchen der Meißelschneide festgestellt werden (außer beim Versuch aus einer Fallhöhe von $h=0\text{cm}$ auf die freie Wasseroberfläche, siehe Kap. 7). Nach dem Erreichen der Maximalgeschwindigkeit erfolgt zunächst eine starke Verzögerung des Meißels bis dieser sich wieder mit konstanter Fallgeschwindigkeit bewegt. Der stationäre Fallzustand wird dabei spätestens nach einer der halben Meißellänge entsprechenden Fallhöhe nach dem vollständigen Eintauchen des Meißels erreicht (bzw. 1.5-fache Meißellänge ab Eintauchen der Meißelschneide, siehe Abb. 9.5).

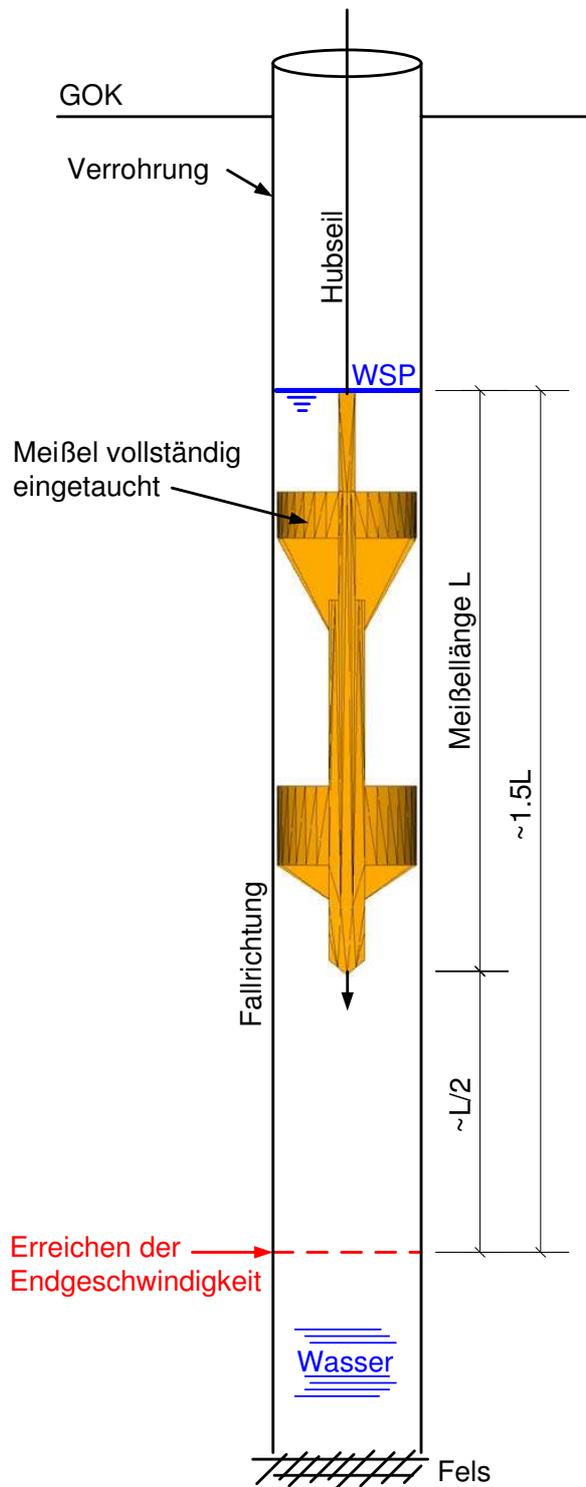


Abb. 9.5: Erreichen der Endgeschwindigkeit in den Modellversuchen beim "kombinierten" Fallvorgang

Die Fallgeschwindigkeitsgleichung unter Wasser (Gl. 9.6) läßt sich unter Berücksichtigung einer Anfangsgeschwindigkeit v_{anf} des Meißels wie folgt angeben:

$$v(z) = \sqrt{\frac{(m_1 - V_1\rho_f)g}{\kappa} \left(1 - \left[1 - v_{anf}^2 \cdot \frac{\kappa}{(m_1 - V_1\rho_f)g} \right] \cdot e^{\frac{-2\kappa}{A_1} \cdot z} \right)} \quad (9.8)$$

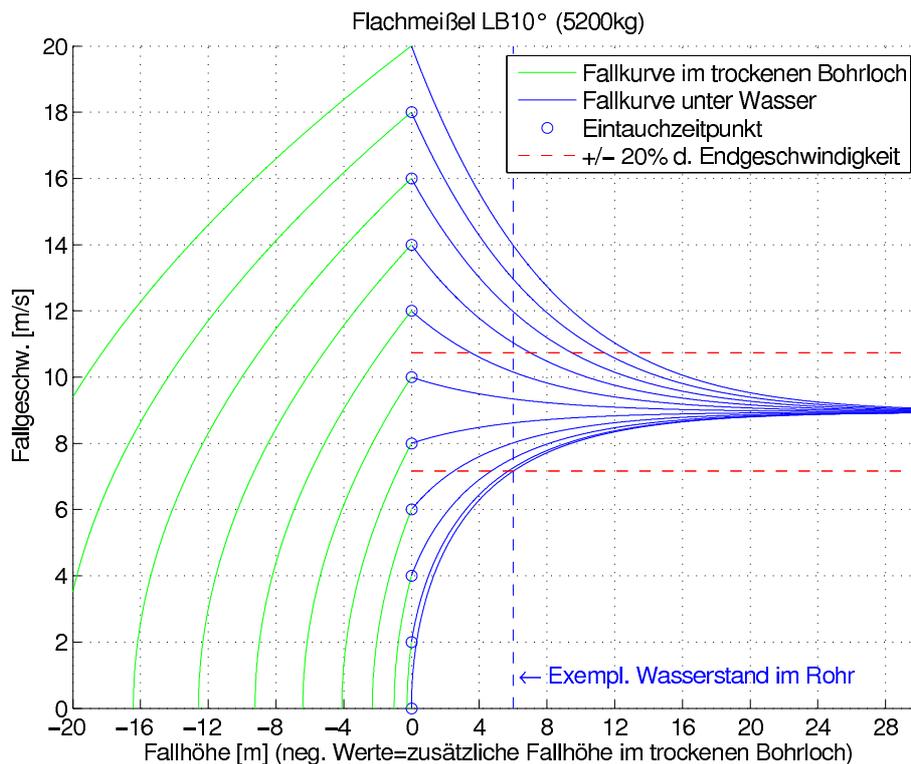
$$\text{mit } A_1 = m_1 + \left(h + \frac{h}{\sin\alpha} \right) m_s + \frac{J_0}{r_0^2} \quad (9.9)$$

$$v_{anf} \dots \text{Anfangsgeschwindigkeit des Meißels [m/s]} \quad (9.10)$$

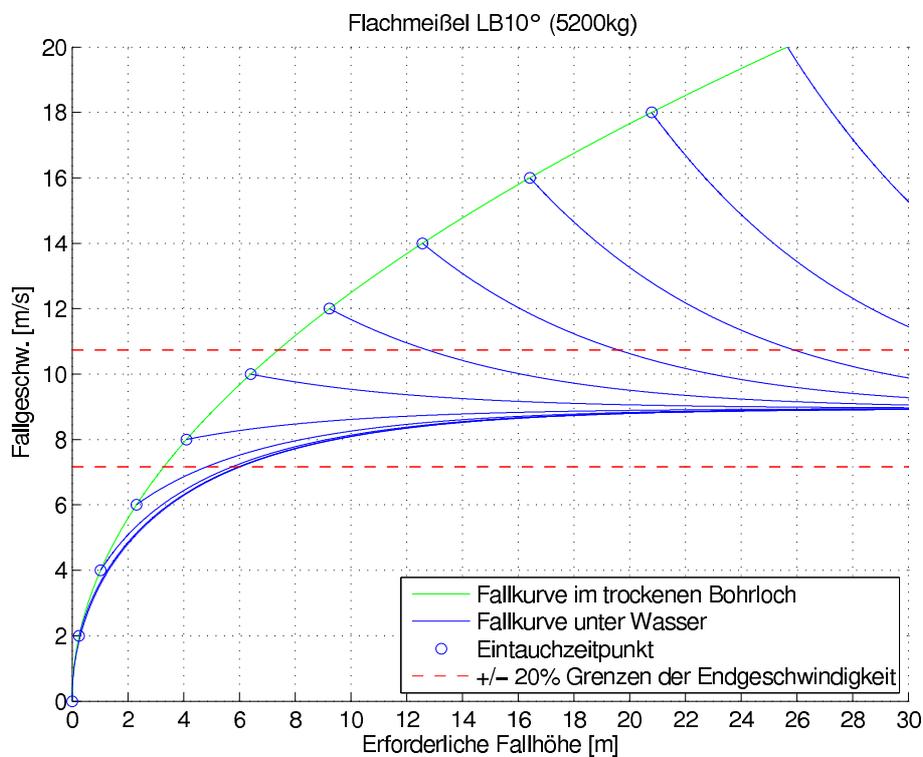
Dadurch lassen sich auch Verzögerungsvorgänge unter Wasser von einer definierten Anfangsgeschwindigkeit bis zum Erreichen der Endgeschwindigkeit für eine beliebige Gerätekonfiguration analytisch darstellen. In Abb. 9.6a ist dies beispielsweise für den Flachmeißel mit einer Lenkblechanstellung von 10° und den Baustellenparametern Horn angegeben. Dabei beschreiben die blauen Fallkurven den Geschwindigkeitsverlauf des Meißels unter Wasser ausgehend von verschiedenen Anfangsgeschwindigkeiten. Alle Fallkurven unter Wasser nähern sich asymptotisch der Endgeschwindigkeit. Auf der negativen Seite der x-Achse im Diagramm sind die zugehörigen analytischen Fallkurven im trockenen Bohrloch für das Erreichen der Anfangsgeschwindigkeiten dargestellt. Für eine näherungsweise Betrachtung genügt der unstetige Übergang zwischen den beiden Fallbewegungsmodellen. Ebenfalls vernachlässigt bleibt der durch den eintauchenden Meißel mit der Verdrängung des Wassers relativ gering ansteigende Wasserspiegel.

Im Diagramm 9.6a kann nun der im Bohrloch vorhandene Wasserstand ab der Bohrlochsohle eintragen und die Geschwindigkeit beim Auftreffen des Meißels aus einer beliebigen Fallhöhe abgelesen werden. Dabei setzt sich die Fallhöhe aus dem Bewegungsanteil im trockenen Bohrloch (negativer Ast der x-Achse) und dem Bewegungsanteil unter Wasser (positiver Ast der x-Achse) zusammen. Für den eingetragenen Wasserstand von 6 m wird beispielsweise beim reinen Fallvorgang unter Wasser der 80% Wert der Endgeschwindigkeit erreicht. Will man jedoch 100% der Endgeschwindigkeit erreichen, so benötigt der Meißel einen etwa 5.2 m langen vorausgehenden Fallvorgang im trockenen Bohrloch. Anhand des Diagrammes können also sinnvolle "kombinierte" Fallhöhen aus einer Fallbewegung im trockenen Bohrloch und einer Fallbewegung unter Wasser beim Meißeln ermittelt werden. Diese ergeben sich eindeutig nur bei geringen Wasserständen in der Verrohrung, da ansonsten sehr große Fallhöhen verbunden mit langen Hubvorgängen für den vorausgehenden Fall im trockenen Bohrloch notwendig sind.

Überträgt man diese Ergebnisse auf den praktischen Einsatz, so kann hier ähnlich wie bei den Modellversuchen ein "vernünftiger" Grenzwasserstand mit der 1.5-fachen Meißellänge angegeben werden. Ist der Wasserstand in der Verrohrung höher als der Grenzwasserstand,



(a) Fallkurven für vorgegebenen Wasserstand mit variabler Fallhöhe



(b) Zusammensetzung einer Fallkurve trocken und UW

Abb. 9.6: Fallgeschwindigkeitskurven für den Flachmeißel mit Lenkblechneigung 10° in teilweise wassergefüllten Bohrlöchern in Abhängigkeit von der Fallhöhe (unstetiger Übergang zwischen den Fallmodellen, Baustellenparameter Horn)

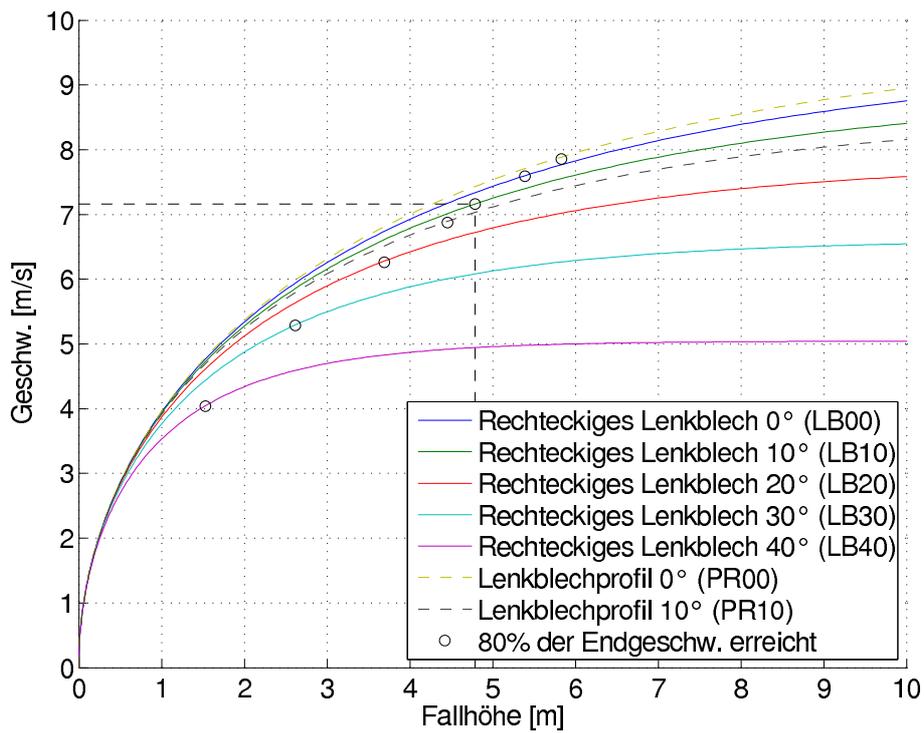
so wird ein vorausgehender Fall im trockenen Bohrloch, unter Einbeziehung der erforderlichen Zeit für die Fall- und Hubvorgänge, in Summe keine positive Auswirkung auf die Meißelleistung zeigen. In einer zweiten Darstellung in Abb. 9.6b kann der Fallvorgang des Werkzeuges aus einem Anteil im trockenen Zustand und unter Wasser zusammengesetzt werden. Die Fallbewegung des Meißels wird hier zuerst entlang der Fallkurve für den trocken Zustand und danach entlang der Kurve für den Zustand unter Wasser beschrieben. Darüber hinaus läßt sich anhand des Diagrammes auch der Geschwindigkeitsunterschied zwischen den beiden Fallmodellen (trocken / UW) sehr gut erkennen.

Der hier dargestellte Zusammenhang wurde speziell für das Flachmeißelmodell LB10° anhand der Baustellenparameter Horn erstellt. Weichen die Masse des Meißels, sowie der Strömungswiderstandsbeiwert oder die Geräteparameter von der betrachteten Konfiguration wesentlich ab, so müssen die zugehörigen Diagramme gemäß Abb. 9.6 neu erstellt werden.

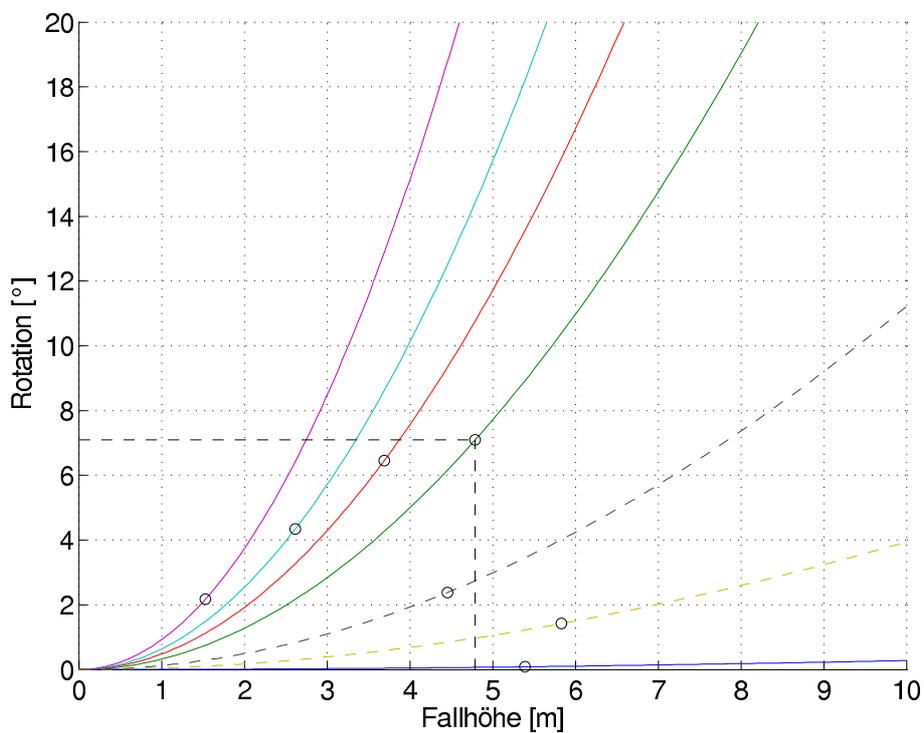
9.5 Rotationsbewegung beim Fallvorgang unter Wasser

Bisher wurden die Drehbewegungen der Meißel vorwiegend anhand der Rotationskoeffizienten gegenübergestellt. Für den Baustelleneinsatz werden jedoch die absoluten Rotationsbewegungen benötigt, welche im folgenden für verschiedene Meißelvarianten anhand der Baustellenparameter Horn ausgewertet sind. Unter den gegenständlich betrachteten Meißeltypen erzeugt nur der Flachmeißel mit angestellten Lenkblechen eine Rotationsbewegung. Das bei den Modellversuchen und in den numerischen Simulationen eingesetzte tragflächenförmige Lenkblechprofil am Flachmeißel wird für den Vergleich ebenfalls herangezogen. Wie zuletzt werden die Rotationskurven idealerweise in Abhängigkeit von der Fallhöhe angegeben (siehe Abb. 9.7).

Dabei muß beachtet werden, daß der unterschiedliche Strömungswiderstandskoeffizient der Meißelvarianten sowohl die Endgeschwindigkeit als auch die Beschleunigungsphase beim Fallvorgang unter Wasser beeinflusst (siehe Abb. 9.7a). Für einen effizienten Meißeleinsatz wurde zuletzt die Fallhöhe bei Erreichen der 80% Endgeschwindigkeit ermittelt. Trägt man die erforderlichen Fallhöhen für diese Geschwindigkeit in Abb. 9.7b ein, so läßt sich die Verdrehung beim, hinsichtlich der Geschwindigkeit optimierten, Meißeleinsatz ablesen. Unter Einbeziehung der Geschwindigkeit erscheinen die Modelle LB10°, LB20° und PR10° besonders strömungs- und rotationsgünstig. Diese benötigen ca. die 1-fache Meißellänge als Fallweg, um 80% der Fallendgeschwindigkeit zu erreichen. Gleichzeitig wird eine Verdrehung von ca. 7°, 6.5° bzw. 2.5° erreicht.

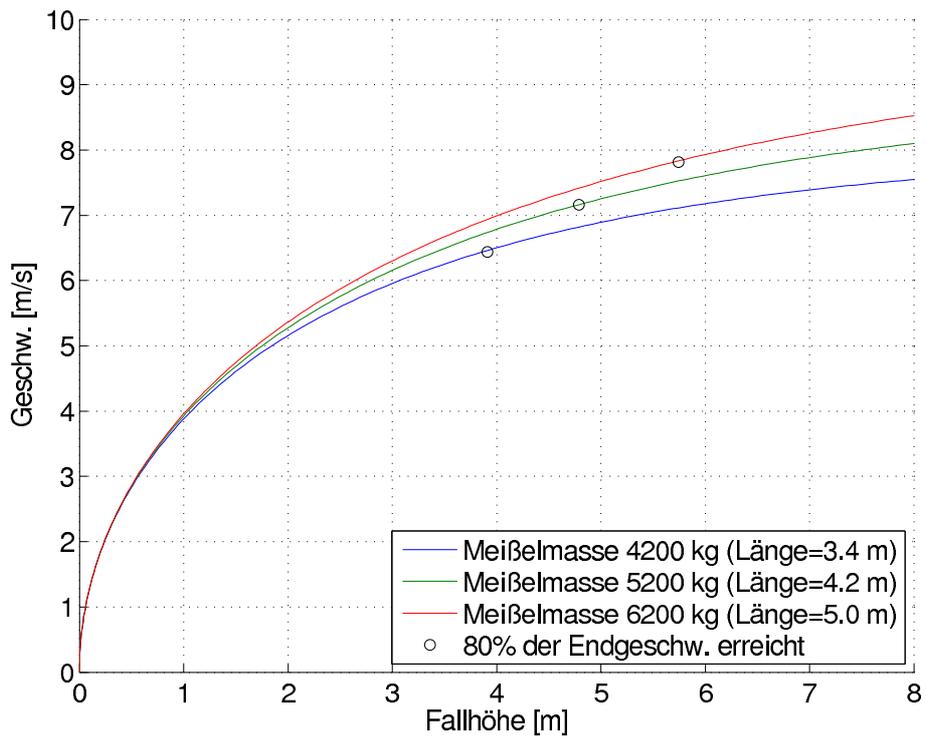


(a) Fallgeschwindigkeitskurven

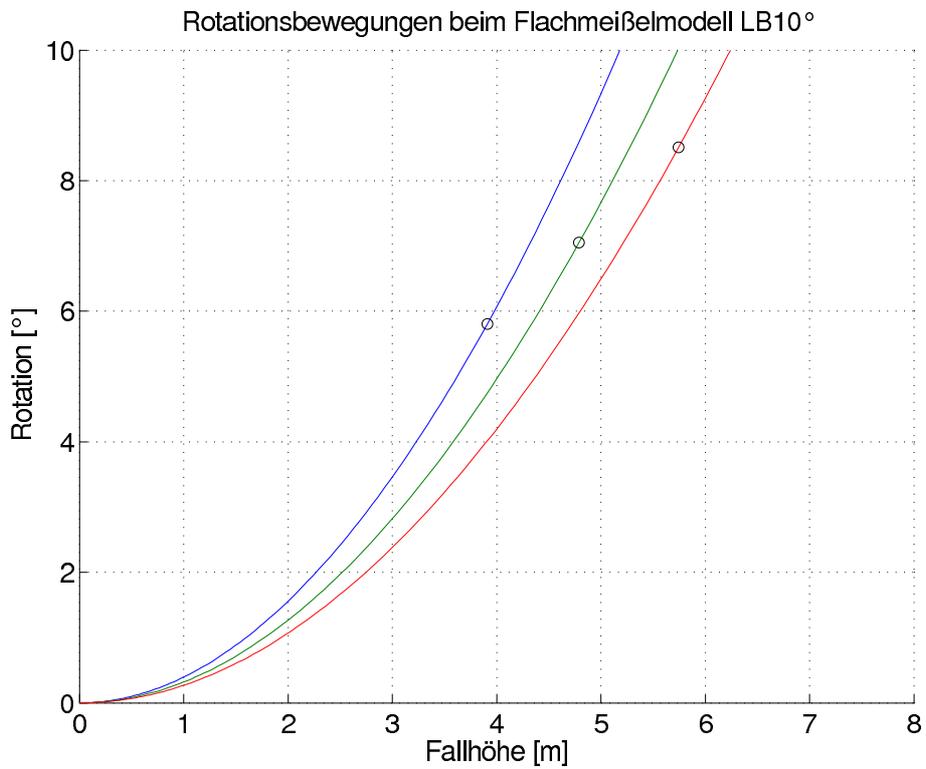


(b) Rotationsbewegung

Abb. 9.7: Vergleich der Fallgeschwindigkeiten und Rotationsbewegungen beim Flachmeißel in Abhängigkeit von der Fallhöhe und der Lenkblechausführung (Baustellenparameter Horn)



(a) Fallgeschwindigkeitskurven



(b) Rotationsbewegung

Abb. 9.8: Vergleich der Fallgeschwindigkeiten und Rotationsbewegungen beim Flachmeißelmodell LB10° mit unterschiedlicher Meißellänge und Fallmasse (Baustellenparameter Horn)

In Abb. 9.8 sind die Rotationsbewegungen für das Flachmeißelmodell LB10° mit unterschiedlicher Fallmasse dargestellt (4200, 5200 und 6200 kg). Um eine unterschiedliche Fallmasse bei annähernd gleichem Strömungswiderstandskoeffizient der Meißelvarianten zu erzielen, muß die Länge des Meißels variiert werden. Bei Betrachtung der verschiedenen Rotationskurven wird deutlich, daß sich diese im Verhältnis zur Änderung der Fallmasse um jeweils 1000 kg nur wenig unterscheiden. Mit zunehmender Masse des Meißels wird bei gleicher Fallhöhe eine geringere Verdrehung erzielt. Dieser Zusammenhang kann auch durch die Ergebnisse bei den Modellversuchen bestätigt werden.

Für die Berechnung der Gesamtverdrehung des Meißels nach mehreren Schlagvorgängen muß die Rückdrehung bei den Hubvorgängen berücksichtigt werden. Die kumulierte Verdrehung kann nach der folgenden Formel berechnet werden:

$$\phi_{tot}(h, n) = n \cdot [\phi_{Fall}(h) - \phi_{Hub}(h)] \quad (9.11)$$

h ... Fallhöhe

n ... Anzahl der Schläge

$\phi_{Fall}(h)$... Rotation beim Fallvorgang

$\phi_{Hub}(h)$... Rotation beim Hubvorgang

$\phi_{tot}(h, n)$... Gesamtrotation

In der Untersuchung der Drehbewegung beim Fall- und Hubvorgang in Kap. 6 konnten erhebliche Abweichungen der Rotationskoeffizienten festgestellt werden. Für das Meißelmodell LB10° kann der Faktor für die Verdrehung zwischen Fall- und Hubvorgang beispielsweise mit ca. 6.8 angegeben werden. In einer näherungsweisen Betrachtung kann obige Formel somit weiter vereinfacht werden:

$$LB10^\circ : \quad \phi_{tot}(h, n) = n \cdot \left[\phi_{Fall}(h) - \frac{1}{6.8} \phi_{Fall}(h) \right] = n \cdot \frac{5.8}{6.8} \phi_{Fall}(h) \quad (9.12)$$

Für ein vollständiges Aufmeißeln der Bohrlochsohle ist beim Flachmeißel theoretisch eine Verdrehung von 180° notwendig. Bei der oben angegebenen, optimalen Fallhöhe von 4.8 m wird eine Verdrehung um ca. 7° pro Fallvorgang erreicht (ca. 1° beim Hubvorgang). Damit läßt sich die Anzahl der benötigten Schläge näherungsweise mit 30 angeben. Für eine noch exaktere Ermittlung kann die Verdrehung beim Hubvorgang $\phi_{Hub}(h)$ auch direkt aus der entsprechenden Rotationskurve für die betrachtete Fallhöhe ermittelt werden.

$$\phi_{tot}(4.8, n) = 180^\circ = n \cdot \frac{5.8}{6.8} \cdot 7^\circ \quad (9.13)$$

$$\rightarrow n_{erf} \approx 30 \quad (9.14)$$

9.6 Hinweise für den praktischen Einsatz

Im folgenden sind einige Hinweise und zusammenfassende Bemerkungen für den praktischen Einsatz der Meißelwerkzeuge aufgelistet. Dabei erfolgt die Unterteilung nach den Randbedingungen für den Fallvorgang. Die Angabe von quantitativen Ergebnissen bezieht sich exemplarisch immer auf die Baustellenmessung Horn.

- **Fallvorgang im trockenen Bohrloch**

- Abminderung der kinetischen Energie gegenüber dem freien Fall ca. 18-28%
- Wesentliche Parameter: Meißelmasse, Trägheiten am Seilbagger und Reibungswiderstände
- Fallhöhe muß auf Untergrund und Meißelwerkzeug abgestimmt werden
- Anzahl der Schlagvorgänge kann theoretisch über die Messung der Stoßdauer optimiert werden

- **Fallvorgang unter Wasser**

- Erhebliche Abminderung gegenüber dem Fallvorgang im trockenen Bohrloch (siehe beispielsweise Abb. 9.6b)
 - * Flachmeißel LB10°: Die Fallgeschwindigkeit nach 10 m Fallhöhe unter Wasser beträgt ca. 65% jener Geschwindigkeit im trockenen Bohrloch
 - * Flachmeißel LB30°: Die Fallgeschwindigkeit nach 10 m Fallhöhe unter Wasser beträgt ca. 50% jener Geschwindigkeit im trockenen Bohrloch
- Wesentliche Parameter: Masse des Meißels und Strömungswiderstand
- Strömungswiderstand ist deutlich von der Stirnfläche des Meißels abhängig
- Meißelgeschwindigkeit nähert sich asymptotisch einer Endgeschwindigkeit
- Empfohlene Fallhöhe wird bei Erreichen des 80%-Wertes der Endgeschwindigkeit angenommen (unter Einbeziehung der Zeit für die Meißelspiele)
 - * Je größer der Strömungswiderstand des Meißels, desto schneller wird der 80%-Wert erreicht
 - * Für die normierten Meißelmodelle (Flach-, Kreuz- und Ringmeißel) ist gemäß Abb. 9.3 die Fallhöhe mit ca. der 1 bis 1.5-fachen Meißellänge anzunehmen

- * Für Meißelmodelle mit entsprechend größerem Widerstand (z.B. durch Lenkbleche) kann die erforderliche Fallhöhe weiter verkürzt werden (z.B. Flachmeißel LB30°: Erforderliche Fallhöhe = 3/4 der Meißellänge!)
- Anzahl der Schlagvorgänge kann theoretisch über die Messung der Stoßdauer optimiert werden

- **Fallvorgang im teilweise wassergefüllten Bohrloch**

- Ideale Arbeitsweise hängt vom Wasserstand im Bohrloch ab
- Grenzwasserstand für den eingesetzten Meißeltyp und die Baustellenparameter ermitteln (anhand Diagrammen gemäß Abb. 9.6a)
 - * Je größer der Strömungswiderstand des Meißels, desto niedriger ist der ermittelte Grenzwasserstand
 - * z.B. Flachmeißel LB10°: Grenzwasserstand entspricht ca. der 1.5-fachen Meißellänge (siehe Abb. 9.6a)
- Wasserstand im Bohrloch ist größer als der Grenzwasserstand:
 - * Reiner Fallvorgang unter Wasser nach den o.a. Kriterien empfohlen
- Wasserstand im Bohrloch ist kleiner als der Grenzwasserstand:
 - * Vorausgehender Fallvorgang im trockenen Bohrloch empfohlen, um Fallgeschwindigkeit aufzubauen
 - * Auswahl der geeigneten Fallhöhe für die betrachtete Gerätekonfiguration nach Diagrammen wie in Abb. 9.6a
 - * Anordnung geeigneter Lenkbleche z.B. im unteren Ring des Meißels, um eine Verdrehung auch bei geringem Wasserstand zu erzielen (Untersuchung noch erforderlich)

- **Rotationsbewegung des Meißels beim Fallvorgang unter Wasser**

- Rotationsbewegung wird üblicherweise durch angestellte Lenkbleche erzeugt
- Wesentliche Parameter: Anstellwinkel der Lenkbleche zur Anströmrichtung; Fläche der Lenkbleche; Geometrische Ausführung
- Mit zunehmender Anstellung der Lenkbleche wird die Rotationsbewegung erhöht und die Fallgeschwindigkeit des Meißels vermindert
 - * Die Rotationsbewegung muß mit der Fallbewegung abgestimmt werden

- * Für den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Flachmeißel kann ein optimaler Anstellwinkel der Lenkbleche mit ca. 10° bis max. 20° angegeben werden
- Beim Hubvorgang tritt bei den betrachteten Flachmeißeln mit Lenkblechen nur ein Bruchteil der Rotationsbewegung vom Fallvorgang ein
- Durch die Lenkbleche wird eine kontinuierliche Verdrehung des Werkzeuges mit zunehmender Schlaganzahl erzielt
- Die Anzahl der Schläge bewirkt in Kombination mit der gewählten Fallhöhe und dem Meißelmodell das Ausmaß der Verdrehung
 - * z.B. Flachmeißel LB 10° : Beim Einsatz aus jeweils optimaler Fallhöhe (hier: Fallhöhe für das Erreichen der 80% Endgeschwindigkeit) während den Einzelschlägen wird nach einer Anzahl von 30 Schlägen eine Gesamtrotation von ca. 180° erreicht
- Ausstattung der Kreuz- und Ringmeißel mit entsprechend angepaßten Lenkblechen wird empfohlen

10 Zusammenfassung und Ausblick

10.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Dissertation wird der Einsatz von Meißelwerkzeugen beim Schlagbohrverfahren zur Herstellung von Bohrpfählen untersucht. Bei dieser Pfahlherstellungsmethode erfolgt das Lösen und Fördern des Untergrundes im Bohrloch mit verschiedenen Bohrwerkzeugen, die nach den vorhandenen Verhältnissen (Festigkeit, Lösbarkeit, etc.) ausgewählt werden müssen. Meißelwerkzeuge kommen dabei zum Einsatz, wenn der anstehende Untergrund zuerst in schlagender Weise gelöst werden muß, damit das Fördern mit dem Bohrgreifer möglich wird. Eine besondere Berücksichtigung in den gegenständlichen Untersuchungen findet der erschwerende Einfluß des Grundwassers bei den Meißelarbeiten.

Für die erzielbare Meißelleistung ist die kinetische Energie des Werkzeuges beim Auftreffen auf den zu lösenden Untergrund hauptmaßgeblich. Die kinetische Energie ergibt sich aus der Fallmasse und der Fallgeschwindigkeit, wobei letztere von der Dauer des Fallvorganges bzw. von der Fallhöhe des Meißels im Bohrloch abhängt. Um die erzielbaren Energien bei den Meißelarbeiten berechnen zu können, wurden die am Fallvorgang mitwirkenden Systemkomponenten erfaßt und analytische Modelle für die Bewegung der Meißel abgeleitet. Diese wurden mit allgemeinen Variablen für verschiedene Bohrbedingungen (trocken oder unter Wasser) erstellt und können daher für jede beliebige Gerätekonfiguration verwendet werden. Die für die analytischen Modelle wesentlichen Eingangsparameter sind beispielsweise die Masse des Meißels und die zu überwindenden Trägheitskräfte, sowie beim Fallvorgang unter Wasser der Strömungswiderstand des Werkzeuges. Anhand der Modelle können die Bewegungsvorgänge bei Meißelarbeiten unter den oben angegebenen Bohrbedingungen beschrieben werden. Fallvorgänge in teilweise wassergefüllten Bohrlöchern lassen sich durch die Kombination beider Fallbewegungen abschätzen.

Für ein systematisches Aufmeißeln der Bohrlochsohle unter Wasser werden den Werkzeugen üblicherweise Lenkbleche zur Erzeugung einer Rotationsbewegung angeschweißt. Die auftretenden Rotationsbewegungen konnten ebenfalls analytisch beschrieben werden.

Somit läßt sich die Verdrehung der Meißel bei einem Fallvorgang aus einer vorgegebenen Höhe ermitteln, und die erforderliche Schlaganzahl für ein vollständiges Aufmeißeln der Bohrlochsohle abschätzen. Im Zuge dieser Arbeit konnten damit alle Bewegungsvorgänge bei Meißelarbeiten analytisch erfaßt werden.

Unter den für die analytischen Modelle benötigten Eingangsparametern ist besonders der Strömungswiderstand der Meißel schwer zu bestimmen. Im Rahmen der gegenständlichen Untersuchungen wurden die strömungstechnisch relevanten Parameter vorwiegend anhand von numerischen Strömungssimulationen ermittelt. Diese wurden für eine Vielzahl von Meißeltypen bzw. -varianten bestimmt und können direkt für einen qualitativen Vergleich der Werkzeuge bzw. Werkzeugausführungen herangezogen werden. Außerdem dienen die numerisch ermittelten Parameter als Eingangswerte für die analytischen Fallmodelle. Dazu zählen der Strömungswiderstandskoeffizient sowie der Rotationskoeffizient des Werkzeuges. Letzterer ergibt sich aus der Momenteneinwirkung zufolge der Umströmung bei geeigneten Meißelmodellen (z.B. Flachmeißel mit Lenkblechen). Durch die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen konnten Optimierungen für die Meißelausführung angegeben werden (z.B. Anstellwinkel der Lenkbleche am Flachmeißel).

Anhand der bisher beschriebenen Untersuchungen lassen sich die Bewegungsvorgänge bei Meißelarbeiten beschreiben. Da diese jedoch auf theoretischen Überlegungen und numerischen Berechnungen basieren, wurden zusätzlich umfangreiche klein- und großmaßstäbliche Versuche durchgeführt. Die kleinmaßstäblichen Versuche wurden mit einem Flachmeißelmodell mit unterschiedlicher Masse sowie Detailausführung im Maßstab 1:7.4 durchgeführt. Da in den Modellversuchen einige Parameter in den Fallgleichungen entfallen (Trägheit der Seilwinde, Reibungsvorgänge, etc.), läßt sich ein sehr guter Vergleich zwischen den theoretisch und experimentell ermittelten Fall- und Drehbewegungen vollziehen. Folglich konnten die Ergebnisse aus den Modellversuchen die analytischen Gleichungen für beide Bewegungsvorgänge, sowohl in qualitativer als auch quantitativer Hinsicht, sehr gut bestätigen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde außerdem eine Reihe von Großversuchen auf verschiedenen Baustellen durchgeführt. Es wurden unter anderem die Fallvorgänge bei Meißelarbeiten registriert und den jeweiligen analytischen Modellen gegenübergestellt. Dadurch lassen sich die Fallbewegungen auch im praktischen Einsatz überprüfen und die tatsächlichen Abweichungen zum "freien Fall" bestimmen.

Für die Aufnahme der Fallvorgänge wurde ein photogrammetrisches (bildgestütztes) Meßsystem entwickelt, welches sowohl bei den Modellversuchen als auch bei den Baustellenmessungen eingesetzt werden konnte. Die Aufzeichnungen wurden zunächst manuell und später rechnergestützt ausgewertet. Dieses Verfahren konnte sich bestens bewähren und

wird sicherlich auch bei künftigen Meßeinsätzen Verwendung finden.

Bei den Baustellenmessungen wurden außerdem die Beschleunigungen am Meißel und an der Verrohrung während den Schlagvorgängen gemessen. Mit dem Ziel der Ermittlung der Schlagkräfte sowie des optimalen Meißeleinsatzes (Anzahl der Schläge, Werkzeugwechsel) kam ein speziell für diesen Anwendungsfall entwickeltes Meßsystem zum Einsatz. Durch die Messung der Beschleunigungen bei einer Serie von aufeinander folgenden Schlägen konnten der Verlauf der Schlagkräfte, der Stoßdauer und Eindringung sowie andere relevante Parameter ermittelt werden. Dabei läßt sich vor allem durch die Angabe der Stoßdauer in Abhängigkeit von der Schlaganzahl der optimale Meißeleinsatz ableiten.

In einer abschließenden Betrachtung werden anhand aller im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen Hinweise bzw. Empfehlungen für den praktischen Einsatz der Meißelwerkzeuge aufgelistet. Unter Berücksichtigung dieser Empfehlungen kann die Meißelleistung bei Bohrarbeiten zur Pfahlherstellung deutlich verbessert werden.

10.2 Ausblick

Im Zuge dieser Arbeit konnten wesentliche Zusammenhänge bei Meißelarbeiten erkannt und beschrieben werden (Bewegungsvorgänge, Werkzeugoptimierungen, etc.). Daraus ergeben sich weitere noch zu prüfende Details, die im folgenden angeführt sind.

Für ein systematisches Aufmeißeln der Bohrlochsohle ist eine Drehbewegung der Werkzeuge bei den Arbeiten erforderlich. Dazu können beispielsweise Zwangsumsetzwirbel eingesetzt werden, die zwischen den Meißel und das Hubseil des Baggers gehängt werden (siehe Kap. 3). Im freien Fall bewirkt der Zwangsumsetzwirbel zuerst eine Verdrehung des Hubseiles, bevor die Drehbewegung des Meißels in Abhängigkeit von der freien Seillänge nach etwa 20-30 Schlagvorgängen einsetzt.

Beim Fallvorgang unter Wasser können dem Meißel jedoch Lenkbleche angeschweißt werden, die eine sofortige Drehwirkung bei der Fallbewegung verursachen. Bisher konnten diese Lenkbleche im praktischen Einsatz nur bei Flachmeißeln mit Anordnung im oberen Führungsring beobachtet werden. Bei einem geringen Wasserstand im Bohrloch (weniger als ca. die 1-fache Meißellänge) kann dadurch jedoch keine Verdrehung mehr bewirkt werden. Durch eine Anordnung der Lenkbleche im unteren Teil des Meißels kann theoretisch eine geringe Drehbewegung auf den letzten Fallmetern erzielt werden. Die Anstellung und Ausführung der Lenkbleche oder einer anderen geeigneten Konstruktion in diesem Bereich sollte daher im Hinblick auf den praktischen Einsatz geprüft werden. Dies erscheint un-

so sinnvoller, da auch mit dem vorher erwähnten Zwangsumsetzwirbel erfahrungsgemäß keine effizienten Ergebnisse erzielbar sind.

Außerdem ist in einer weiterführenden Untersuchung die Anordnung und Ausführung von Lenkblechen an anderen Meißelmodellen (Kreuzmeißel, Ringmeißel) zur Erzeugung einer Rotationsbewegung anzuraten. Bei diesen ist aufgrund der Schneidenausbildung eine geringere Verdrehung erforderlich.

Anhand der durchgeführten Beschleunigungsmessungen am Meißel konnte eine ansteigende Stoßdauer bzw. Eindringung mit zunehmender Schlaganzahl gemessen werden. Diese läßt auf die zunehmende Bildung von Bohrklein an der Bohrlochsohle schließen. Für eine eindeutige Aussage sollten jedoch weitere Messungen durchgeführt werden, um diesen Zusammenhang auch bei anderen Untergrund- bzw. Bohrbedingungen bestätigen zu können.

Da die Beschleunigungsmessung am Meißel in der gegenständlichen Weise mit erheblichem Aufwand verbunden ist, wäre die Entwicklung einer drahtlosen Messung am Meißel oder einer indirekten Meßmethode sehr sinnvoll. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgten bereits erste vergleichende Aufnahmen der Beschleunigungen an der Verrohrung. Die Ergebnisse der Meßwerte an der Verrohrung zeigen zwar einen Zusammenhang mit den erhaltenen Werten am Meißel, lassen aber noch keine geeigneten Schlußfolgerungen zu (im Gegensatz zu den am Meißel gemessenen Werten). Aus diesem Grund sollten auch an der Verrohrung weitere Messungen, gegebenenfalls mit einer höheren Anzahl von Schlägen pro Meßserie, unter verschiedenen Bohrbedingungen durchgeführt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] BAUER SPEZIALTIEFBAU GMBH (Hrsg.): *Firmenbroschüre: Bohrpfahlgreifer Bauer BSG - BHG*. Schrobenehausen: Bauer Spezialtiefbau GmbH, 1993
- [2] BOHL, Willi ; ELMENDORF, Wolfgang: *Technische Strömungslehre: Stoffeigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen, Hydrostatik, Aerostatik, Inkompressible Strömungen, Kompressible Strömungen, Strömungsmesstechnik*. 13. Auflage. Vogel Buchverlag, 2005. – ISBN 3834330299
- [3] BOYCE, William E. ; DIPRIMA, Richard C.: *Gewöhnliche Differentialgleichungen: Einführung, Aufgaben, Lösungen*. Studienausgabe. Spektrum Akademischer Verlag, 2000. – ISBN 3827405971
- [4] BRANDL, Heinz: *Studienblätter zur Vorlesung Grundbau und Bodenmechanik*. Wien: Technische Universität Wien, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, 2007
- [5] BRANDL, Heinz ; JODL, Hans G. ; KOHLBÖCK, Dietmar: *Ökoeffiziente Entscheidungskriterien im Tiefbau - Modul 3*. Wien, 2005. – Unveröffentlichte Forschungsarbeit
- [6] BUJA, Heinrich-Otto: *Handbuch des Spezialtiefbaus. Geräte und Verfahren*. 2. Auflage. Werner Verlag, 2001. – ISBN 3804142338
- [7] BUJA, Heinrich-Otto: *Praxishandbuch Ramm- und Vibrationstechnik*. 1. Auflage. Bauwerk Verlag, 2004. – ISBN 3934369855
- [8] DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK E.V. (Hrsg.): *Empfehlung des Arbeitskreises „Pfähle“ EA-Pfähle*. 1. Auflage. Ernst & Sohn, 2007. – ISBN 9783433018705
- [9] DUBBEL, Heinrich: *Taschenbuch für den Maschinenbau*. 21. Auflage. Springer-Verlag GmbH, 2004. – ISBN 3540221425
- [10] ERNST, Uwe: *Schadensursachen bei der Herstellung von Bohrpfählen im Grundwasser*. Braunschweig, Fachbereich für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Dissertation, 2000

- [11] EXA CORPORATION (Hrsg.): *PowerFLOW FAQs*. : Exa Corporation, 1998
- [12] EXA CORPORATION (Hrsg.): *PowerFLOW Release 3.4, Basic Training Course*. : Exa Corporation, 2002
- [13] EXA CORPORATION (Hrsg.): *PowerFLOW User's Guide*. Release 4.0, Revision 1. : Exa Corporation, 2006
- [14] EXA CORPORATION (Hrsg.): *PowerCASE User's Guide*. Release 4.0, Revision 3. : Exa Corporation, 2007
- [15] HAYDEN, Martin: *Bautechnische Dokumentation des Bauloses LT25 im Projekt Lainzer-Tunnel*. Wien, Universität für Bodenkultur Wien, Department für Bautechnik und Naturgefahren, Institut für Geotechnik, Diplomarbeit, 2002
- [16] HOFFMANN, Josef ; QUINT, Franz: *Signalverarbeitung mit MATLAB und Simulink: Anwendungsorientierte Simulationen*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2007. – ISBN 3486584278
- [17] HOFFMANN, Klaus ; KRENN, Erhard ; STANKER, Gerhard: *Fördertechnik Bd.1: Bauelemente, ihre Konstruktion und Berechnung*. 7. Auflage. Oldenbourg Industrieverlag, 2005. – ISBN 3835630598
- [18] HOHLFELDER ; VOGT ; HARTFUSS: Bohrpfähle im Festgestein, Stand der Technik. In: *TBG-Fachtagung Spezialtiefbau*. Gelsenkirchen, 2003
- [19] HOLZMANN, Günther ; MEYER, Heinz ; SCHUMPICH, Georg ; ELLER, Conrad ; DREYER, Hans-Joachim: *Technische Mechanik, Statik*. 11. Auflage. Teubner Verlag, 2007. – ISBN 3835101757
- [20] HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH (Hrsg.): *Produktdatenblatt B12, Beschleunigungsaufnehmer mit induktivem Meßsystem*. Darmstadt: Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH
- [21] HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH (Hrsg.): *Handbuch Digitales Meßverstärkersystem DMCplus*. Darmstadt: Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH, 1993
- [22] HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK GMBH (Hrsg.): *Montageanleitung Beschleunigungsaufnehmer B12*. Darmstadt: Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH, 2000
- [23] IDS IMAGING DEVELOPMENT SYSTEMS GMBH (Hrsg.): *Benutzerhandbuch uEye USB 2.0 Kameras*. Version 2.20, Stand: Mai 2006. : IDS Imaging Development Systems GmbH, 2006
- [24] KÖNIG, Horst: *Maschinen im Baubetrieb. Grundlagen und Anwendung*. 1. Auflage. Vieweg + Teubner Verlag, 2005. – ISBN 351900495X

- [25] KORIES, Ralf ; SCHMIDT-WALTER, Heinz: *Taschenbuch der Elektrotechnik: Grundlagen und Elektronik*. 7. Auflage. Verlag Harri Deutsch GmbH, 2006. – ISBN 3817117930
- [26] KRAUS, Karl: *Photogrammetrie, Band 1, Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. 7. Auflage. de Gruyter Verlag, 2004. – ISBN 3110177080
- [27] KRAUS, Karl ; JANSKA, Josef ; KAGER, Helmut: *Photogrammetrie, Band 2, Verfeinerte Methoden und Anwendungen*. 3. Auflage. de Gruyter Verlag, 1996. – ISBN 3110181630
- [28] THE MATHWORKS, INC. (Hrsg.): *Matlab Help*. R2007b. : The MathWorks, Inc., 2007
- [29] MEYERS KONVERSATIONS-LEXIKON, Ausgabe aus dem Jahr 1888:
<http://www.peter-hug.ch/lexikon/>, Abruf: 21.04.2008
- [30] ÖNORM B 2205: *Erdarbeiten, Werkvertragsnorm*. Wien : Österreichisches Normungsinstitut, 2000
- [31] OERTEL, Herbert (Hrsg.): *Prandtl - Führer durch die Strömungslehre: Grundlagen und Phänomene*. 12. Auflage. Vieweg + Teubner Verlag, 2008. – ISBN 9783834804303
- [32] OERTEL, Herbert Jr. ; LAURIEN, Eckart: *Numerische Strömungsmechanik*. Springer Verlag, 2000. – ISBN 9783540585695
- [33] PULLER, D. ; JÖRGER, R.: Bohrpfähle in Europa, Stand der Technik für hochbelastete Pfähle. In: *Beiträge zum 19. Christian Veder Kolloquium: Tiefgründungen, Bemessung und Ausführung*. Graz, 2004
- [34] RIEG, Frank (Hrsg.) ; KACZMAREK, Manfred (Hrsg.): *Taschenbuch der Maschinenelemente*. 1. Auflage. Hanser Fachbuchverlag, 2006. – ISBN 3446401679
- [35] SACHS, Lothar ; HEDDERICH, Jürgen: *Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R*. 12. Auflage. Springer Verlag, 2006. – ISBN 3540321608
- [36] SCHADE, Heinz ; KUNZ, Ewald ; PASCHEREIT, Oliver ; KAMEIER, Frank: *Strömungslehre*. 3. Auflage. de Gruyter Verlag, 2007. – ISBN 9783110189728
- [37] SCHAEFFLER KG: <http://medias.ina.de/medias>, Abruf: 18.03.2008
- [38] SCHEFFLER, Martin ; FEYRER, Klaus ; MATTHIAS, Karl: *Fördermaschinen, Bd.1, Hebezeuge, Aufzüge, Flurförderzeuge*. 1. Auflage. Vieweg Verlag, 1998. – ISBN 3528066261

- [39] SCHLICHTING, Hermann ; TRUCKENBRODT, Erich: *Aerodynamik des Flugzeugs Band 1*. 3. Auflage. Springer Verlag, 2001. – ISBN 9783540673743
- [40] SCHMIDT, H.-G. ; KLUCKERT, K.D.: Rückblick auf 40 Jahre Bohrpfehltechnik - Gibt es noch Impulse für die Zukunft? In: *Vorträge der 25. Baugrundtagung*. Stuttgart, 2003, S. 513 – 527
- [41] SCHMIDT, Ulrich: *Professionelle Videotechnik: Analoge und digitale Grundlagen Filmtechnik, Fernsehtechnik, HDTV, Kameras, Displays, Videorecorder, Produktion und Studiotechnik*. 4. Auflage. Springer Verlag, 2005. – ISBN 9783540242062
- [42] SCHNELL, Wolfgang: *Verfahrenstechnik der Pfahlgründungen*. Teubner Verlag, 2002. – ISBN 3519050706
- [43] SEITZ, Jörn M. ; SCHMIDT, Heinz-Günter: *Bohrpfähle*. 1. Auflage. Ernst & Sohn Verlag, 2000. – ISBN 343301308X
- [44] STÖTZER, E.: Stand der Technik bei der Herstellung von Großbohrpfählen. In: *Vortrag auf dem VDBUM-Seminar*. Braunlage, 1997
- [45] STUDER, Jost A. ; KOLLER, Martin G. ; LAUE, Jan: *Bodendynamik: Grundlagen, Kennziffern, Probleme und Lösungsansätze*. 3. Auflage. Springer Verlag, 2007. – ISBN 9783540296249
- [46] SZABÓ, Marek: *Der Einsatz des Greiferbohrverfahrens unter Grundwasserbedingungen*. Wien, Technische Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Diplomarbeit, 2007
- [47] VEREIN FÜR PFAHLBAU- UND HEIMATKUNDE E.V.: *Pfahlbaumuseum Unteruhldingen Bodensee*. <http://www.pfahlbauten.de/>, Abruf: 20.07.2008
- [48] WAGNER, Walter: *Strömung und Druckverlust: Mit Beispielsammlung*. 5. Auflage. Vogel Buchverlag, 2001. – ISBN 380231879X
- [49] WEBERS, Johannes: *Handbuch der Film- und Videotechnik*. 7. Auflage. Franzis Verlag, 2002. – ISBN 9783772371172
- [50] WINKLER, Johannes ; AURICH, Horst: *Taschenbuch der Technischen Mechanik*. 8. Auflage. Hanser Fachbuchverlag, 2006. – ISBN 3446228705
- [51] WINZBERGER, Heinrich: Pfahlbau. In: *VÖBU Bohrhandbuch, Bd. 2, Praxis*. Eigenverlag VÖBU (Vereinigung österreichischer Bohr-, Brunnenbau- und Spezialtiefbauunternehmungen), 2004
- [52] ZIEGLER, Franz: *Technische Mechanik der festen und flüssigen Körper*. 2. Auflage. Springer-Verlag, 1992. – ISBN 9783211823354

- [53] ZOLLERN GMBH & CO. KG (Hrsg.): *Firmenbroschüre: Zollern Antriebstechnik, Freifallwinden.* : Zollern GmbH & Co. KG, 2006. <http://www.zollern.de/>, Abruf: 07.03.2006