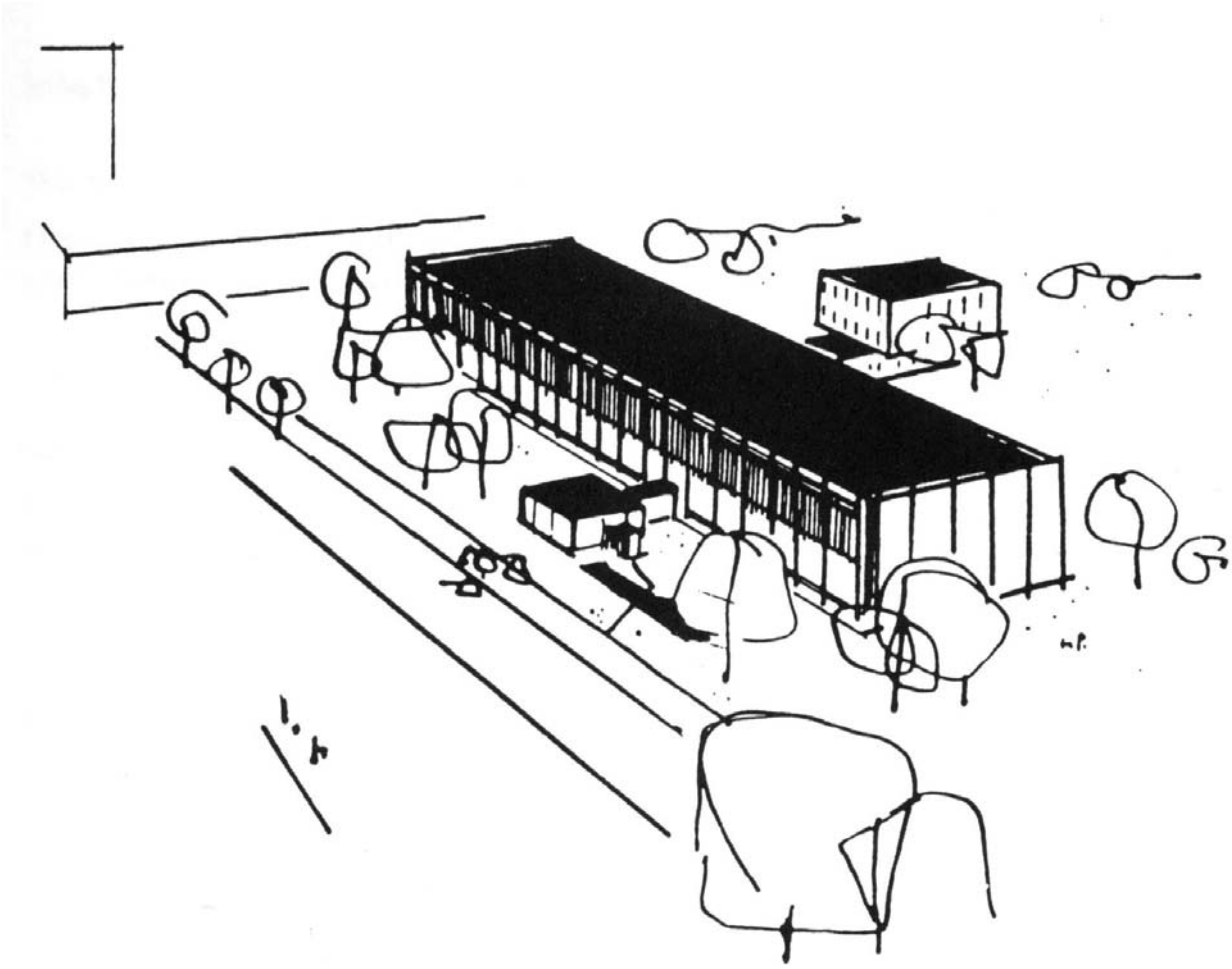


INSTITUT FÜR WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT

Die Gestalt von natürlichen Steinen und ihr Fallverhalten in Wasser

Timm Stückrath
Gerhild Völker
Jian-hua Meng

Mitteilung Nr. 137
Technische Universität Berlin

ISSN 0409-1744
Berlin 2004
D83

Zusammenfassung

Am IWAWI der TU Berlin werden umfangreiche Forschungsarbeiten zu Steinschüttungen in Wasser für Bauwerke im Küstenschutz und Hafenbau durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeiten wurde ein Bedarf an einer objektiven Gestaltklassifikation natürlicher Steinblöcke festgestellt.

Daher wurde ein Klassifikationsschema eingeführt, das drei unabhängige Parameter verwendet: die Größe über das Volumen, die Form nach Zingg und die Rundheit nach Diepenbroek oder als Abweichung vom trägheitsäquivalenten Ellipsoid. Diese Klassifikation wird anschaulich in einem dreidimensionalen Merkmalraum visualisiert.

Die Falleigenschaften natürlicher Steine in Wasser wurden in einer systematischen Reihenuntersuchung ermittelt. Diese Falleigenschaften sind mit der Steingestalt im vorgestellten Klassifikationsschema eng verbunden.

Die digitalen Steinmodelle der untersuchten Steine sowie deren geometrische und hydraulische Eigenschaften sind in einem interaktiven Informationssystem RockDataBase zusammengefasst worden. Der Benutzer kann RockDataBase als moderne Vergleichstafel verwenden, um für einen beliebigen Stein Informationen über seine Gestalt und sein Fallverhalten in Wasser zu erhalten.

Abstract

Research at IWAWI of TU Berlin focuses on rock placement in coastal engineering and port construction. During research work it was found that objective and descriptive shape classification of rocks was needed.

The introduced method utilizes three independent parameters: size referred to by volume, shape according to Zingg and roundness according to Diepenbroek or by the degree of shape deviation of the rock's equivalent ellipsoid of inertia. This classification is visualized in a three dimensional parameter space.

Underwater falling properties of natural rocks were object of a systematic experimental examination. These properties are associated with the parameter space.

The digital visualization of the examined rocks and the experimental results on properties and motion are presented in a PC-based interactive information system RockDataBase. The user can query information on any rock by using RockDataBase as a modern form of comparison table to acquire shape properties, hydraulic properties and a visualization of its under water motion.

Inhalt

1 Kurzfassung **9**

2 Einführung in die Forschungsaufgabe **10**

2.1 Wie kommt es zu dieser Fragestellung? 10
2.2 Überblick über die bisherigen Arbeiten am FG Konstruktiver Wasserbau 10
2.3 Wissenslücke 14
2.4 Ziel 15

3 Beschreibung eines Steines **16**

3.1 Begriffe 16
3.2 Gewähltes Klassifikationsschema 22
3.3 Darstellung der Klassifikation und des hydraulischen Verhaltens 28

4 Informationssystem RockDataBase **34**

4.1 Aufbau des Informationssystems RockDataBase 34
4.2 Handhabung des Informationssystems RockDataBase 40

Literatur **49**

Anhänge **51**

Anhang A Trägheitsmomente des Steinoberflächenmodells 51
Anhang B Berechnung des trägheitsäquivalenten Ellipsoids 56

1 Kurzfassung

Am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft IWAWI der Technischen Universität Berlin werden eine Vielzahl von Forschungsarbeiten durchgeführt, welche Steinschüttungen in Wasser zum Gegenstand haben. Dabei handelt es sich um geschüttete Bauwerke im Hafenbau und im Küstenschutz. Es wurde ein Bedarf an einer Gestaltklassifikation von natürlichen Steinblöcken festgestellt. Daher wurde ein neues Klassifikationsschema eingeführt, das die folgenden Eigenschaften hat:

- Die Beschreibung eines Steines ist anschaulich und praktikabel,
- die Beschreibung ist eindeutig und reproduzierbar, also objektiv,
- die gewählten Parameter sind voneinander unabhängig und
- sie sind unabhängig von der Lage und der Größe des Steines.

Darüber hinaus sind die hydraulischen Falleigenschaften eines Steinblockes mit dem vorgestellten Klassifikationsschema einer Steinform zuzordnen.

Die Gestaltklassifikation verwendet die drei Parameter Größe, Form und Rundheit. Dabei wird die Größe durch das Volumen des Steines und die Form mit den beiden Parametern Plattigkeit und Länglichkeit nach der Klassifikation von Zingg angegeben. Die Rundheit wird als Rundungsgrad nach Diepenbroek oder als Abweichung vom trägheitsäquivalenten Ellipsoid des Steinblocks angegeben. Anschaulich kann diese Klassifikation in einem dreidimensionalen Merkmalraum visualisiert werden.

Das Fallverhalten des Einzelsteines wird von seiner Körpergestalt bestimmt. Die Eigenschaften Widerstandsbeiwert und Bewegungsart sind in einer Reihenuntersuchung für repräsentative, konvexe Steine untersucht worden. Sie können der Steingestalt im dreidimensionalen Merkmalraum zugeordnet werden.

Die Visualisierung der Gestaltklassifikation ist zusammen mit den Ergebnissen der Reihenuntersuchung zum Fallverhalten in einem Informationssystem RockDataBase zusammengefasst worden. Das Informationssystem RockDataBase kann zugleich auch als „moderne Vergleichstafel“ verwendet werden: Einem vorliegenden Stein kann einer der untersuchten repräsentativen Steine aus dem- Informationssystem zugeordnet werden. So kann der Benutzer am PC Informationen zu Gestalt und Fallverhalten „seines“ Steines erhalten.

2 Einführung in die Forschungsaufgabe

2.1 Wie kommt es zu dieser Fragestellung?

Bei einer Vielzahl von Bauwerken des Küsteningenieurwesens, des See- und Hafenbaus und auch der Offshorekonstruktionen werden Steinschüttungen verwendet. Bauwerke wie Wellenbrecher und Hafenmolen oder Gründungen von Tunnelelementen, von Schwimmkästen und von Brückenpfeilern, aber auch Erosions- und Havarieschutzlagen für Tunnel, für Pipelines und für Unterseekabel erfordern den Einbau von großen Mengen Steinmaterials. Die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit dieser Ingenieurbauwerke werden durch wirtschaftliche Einbauweisen bei gleichzeitig gesicherter Einbauqualität erreicht.

Am Fachgebiet Konstruktiver Wasserbau der TU Berlin wird die Gefährdung von unter Wasser eingebauten Steinschüttungen durch Korngrößenseparation bei unterschiedlichen Einbringverfahren untersucht. Bei diesen Untersuchungen stellte sich sehr bald heraus, dass die Korngestalt einen großen Einfluss auf das Fallverhalten des Einzelkornes in Wasser hat. Damit war der Bedarf an einer eindeutigen Klassifikation und Parametrisierung und nicht zuletzt auch an einer eindeutigen und unmissverständlichen sprachlichen Differenzierung der Korn- bzw. Partikelgestalt geweckt.

2.2 Überblick über die bisherigen Arbeiten am FG Konstruktiver Wasserbau

Die Sedimentologen haben bis zu einer Korngröße von 2 mm Durchmesser (Sandkorngröße), die in vielen Flüssen als Bettmaterial transportiert wird, das Fallverhalten von Einzelkörnern und Korngemischen in vielfältigen Vorhaben untersucht und in zahlreichen Veröffentlichungen beschrieben. Für Steinmaterial mit größerem Korndurchmesser, das im Flussbett kaum noch mitbewegt wird, fehlen jedoch solche Untersuchungen. Die Strömungsmechaniker untersuchten zwar größere Körper, aber sie spezialisierten ihre Forschungen zum einen auf spezielle Formen (Kugeln, Geschosse, Schiffskörper) und zum anderen stand selten der freie Fall im Vordergrund.

Um diese Lücke zu füllen, wird in der aktuellen Forschungsarbeit am FG Konstruktiver Wasserbau seit 1995 das hydraulische Verhalten von Steinschüttmaterial bei der Herstellung von Unterwasserschüttungen untersucht. Zunächst wurde dabei das Fallverhalten von Einzelkörpern anhand des Modellkörpers Würfel bei großen Reynoldszahlen betrachtet. Einige wenige Versuche wurden auch mit Kugeln durchgeführt, die sich allerdings als Modellkörper für scharfkantig gebrochenes Steinmaterial nicht eignen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden in der

Mitteilungsreihe des Institutes veröffentlicht [Stückrath, Völker, Meng, 1996]. Die wesentlichen Ergebnisse werden hier kurz zusammengefasst, um die Begriffe zu erläutern.

Beim freien Fall eines Körpers durch Wasser erfährt dieser eine Widerstandskraft, die entgegen seiner Bewegungsrichtung wirkt. Diese Widerstandskraft lässt sich durch folgende Gleichung beschreiben:

$$F_W = \frac{1}{2} c_D \rho_W v^2 A \tag{2.1}$$

F_W : Widerstandskraft
c_D : dimensionsloser Widerstandsbeiwert
ρ_W : Dichte des Wassers
v : Anströmgeschwindigkeit
A : Bezugsfläche.

Die Bezugsfläche A kann willkürlich gewählt werden, hier wird die angeströmte Projektionsfläche verwendet. Da ein Körper während des freien Falls durch Wasser in den meisten Fällen rotiert, verändert sich die angeströmte Fläche (Schattenfläche) bei allen nicht rotationssymmetrischen Körpern während des Falls ständig. Bei einem Würfel ist eine Veränderung zwischen folgenden Grenzen möglich:

$$K^2 \leq A_{St} \leq \sqrt{3}\, K^2 = 1{,}73\, K^2 \tag{2.2}$$

K : Kantenlänge des Würfels
A_{St} : Schattenfläche.

Bei $\min A_{St} = K^2$ steht eine Würfelfläche senkrecht zur Anströmrichtung, bei $\max A_{St} = \sqrt{3}\, K^2$ wird der Würfel in Richtung einer Würfeldiagonalen angeströmt. Ein Würfel hat aufgrund dieser sich ständig verändernden Schattenfläche einen sich ständig verändernden Widerstand. Da der Würfel die Strömung mit seinen Flächen stets unter einem anderen Winkel anschneidet, ist auch der Widerstandsbeiwert für jede Anströmrichtung verschieden. Man kann die Veränderungen des Widerstandsbeiwertes c_D und der Schattenfläche A_{St} bei einem rotierenden Körper im Fallversuch nicht richtig trennen, deshalb wurde für alle Auswertungen angenommen:

$c_D = \text{const.}$ (als Mittelwert der gesamten Fallbewegung) und

$A_{St} = \max A_{St} = \sqrt{3}\, K^2$ (als Bezugsfläche).

Die Auswertungen der Fallbahnen ergaben, dass aufgrund der Körperrotation die momentane Fallgeschwindigkeit eines Würfels um die mittlere stationäre Fallgeschwindigkeit oszilliert.

Dabei wurden Amplituden von bis zu 25 % der mittleren Geschwindigkeit beobachtet. Außerdem führt die Rotation zu einer seitlichen Ablenkung der Würfel (Magnuseffekt). In den Versuchen wurde im stationären Bereich eine mittlere Neigung der Fallbahn von etwa 1:5 unabhängig von Würfelgröße und -dichte ermittelt.

Der Ansatz des Kräftegleichgewichtes an einem fallenden Körper in vertikaler Richtung führt zu einer Differentialgleichung, deren Lösung das mittlere Fallverhalten des Körpers in vertikaler Richtung beschreibt. Daraus erhält man eine Bestimmungsgleichung für den Widerstandsbeiwert:

$$c_D = \frac{2\,V_K\,g}{v_s^2\,A_{St}} \cdot \frac{\rho_K - \rho_W}{\rho_W} \tag{2.3}$$

c_D : dimensionsloser Widerstandsbeiwert
V_K : Volumen des Körpers
g : Erdbeschleunigung
v_s : mittlere stationäre Setzungsgeschwindigkeit (vertikale Komponente)
A_{St} : Schattenfläche des Körpers
ρ_K : Dichte des Körpers
ρ_W : Dichtes des Wassers.

Die Fallversuche mit Würfeln unterschiedlicher Kantenlängen und Dichten ergaben, dass sich die mittlere Endfallgeschwindigkeit eines Würfels durch einen konstanten Widerstandsbeiwert $c_D = 0{,}8$ kennzeichnen lässt, der sich auf die größte Schattenfläche $\max A_{St}$ bezieht. Dichte und Größe der Würfel bei Schottergröße und die Reynoldszahl haben keinen Einfluss auf den Widerstandsbeiwert. Die Reynoldszahl Re ist hier definiert als:

$$Re = \frac{v_s\,K}{\nu} \tag{2.4}$$

v_s : mittlere stationäre Setzungsgeschwindigkeit (vertikale Komponente)
K : Kantenlänge des Würfels
ν : kinematische Viskosität des Wassers.

Ist der Widerstandsbeiwert c_D für einen beliebigen Körper bekannt und werden das Volumen V_K, die Dichte ρ_K und die größte Schattenfläche $\max A_{St}$ für den Körper bestimmt, kann seine mittlere vertikale Setzungsgeschwindigkeit v_s theoretisch berechnet werden:

$$v_s = \sqrt{\frac{2\,V_K\,g}{c_D\,\max A_{St}} \cdot \frac{\rho_K - \rho_W}{\rho_W}} \tag{2.5}$$

An die ersten Versuche schlossen sich weitere Untersuchungen an. In diesen Arbeiten wurde zunächst ebenfalls der Einzelkörper Würfel untersucht, wobei die Reynoldszahlen systematisch verkleinert und Einflüsse wie eine aufgeraute Oberfläche untersucht wurden. In der folgenden Abbildung 2.1 sind alle Ergebnisse für die am FG Konstruktiver Wasserbau untersuchten Würfel im Vergleich zu der aus der Literatur bekannten Kurve für Kugeln dargestellt.

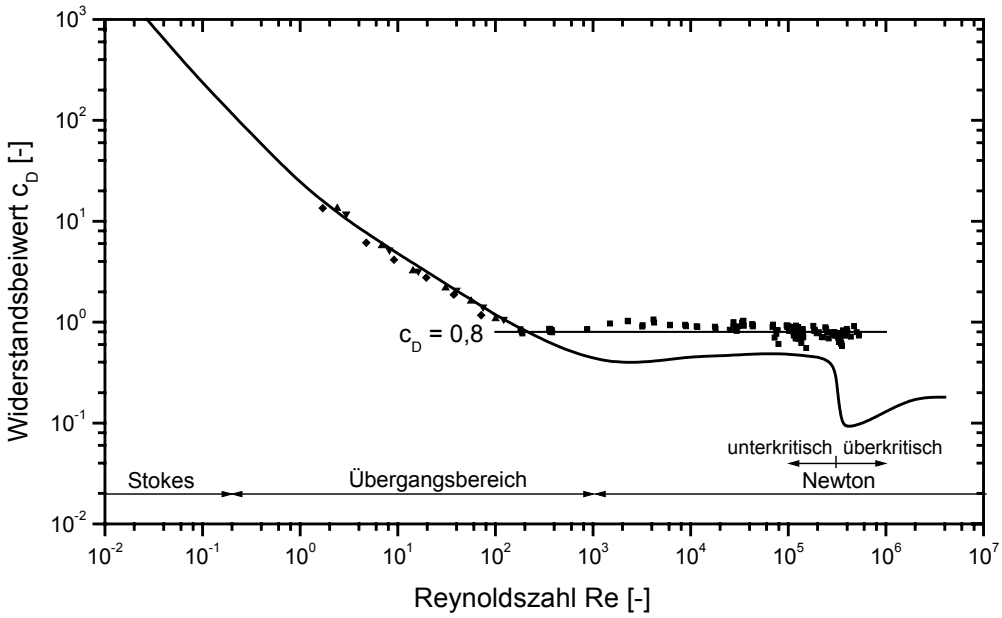


Abbildung 2.1: Widerstandsbeiwert c_D in Abhängigkeit von der Reynoldszahl Re für Würfel (Versuche am FG Konstruktiver Wasserbau) im Vergleich zu der aus der Literatur bekannten Kurve für Kugeln

Danach wurde begonnen, das Fallverhalten des Modellkörpers Würfel im Schwarm zu untersuchen. Gleichzeitig wurde in den Einzelversuchen von der Würfelform abgewichen. Als Modellkörper dienten nun Quader mit verschiedenen Kantenverhältnissen. Bei den Quadern wurden unterschiedliche Bewegungsarten in Abhängigkeit von der Ausprägung ihrer Hauptabmessungen beobachtet, die typisch für die jeweilige Körperform sind: Gedrungene, kubische Körper rotieren gleichmäßig, räumlich nach jeder Richtung wechselnd (räumliche Rotation). Stängelige Körper rotieren lediglich um die längste Köperachse (ebene Rotation). Flachstängelige Körper führen eine Pendelbewegung in eine Raumrichtungen aus (ebenes Pendeln), flache Körper in mehrere Raumrichtungen (räumliches Pendeln). Daneben gibt es Übergangsformen und Kombinationen dieser Bewegungen. Anschließend wurden Versuche mit natürlichen Steinen durchgeführt, um zu untersuchen, ob die quaderförmigen Modellkörper in ihrem Fallverhalten die entsprechenden natürlichen Steine mit den gleichen Achsenverhältnissen repräsentieren. Außerdem wurden

künstliche abgerundete Körper (Ellipsoide, Linsen) mit den gleichen Achsenverhältnissen wie die Quader verwendet, um den Einfluss der Kantenrundung auf das Fallverhalten zu ermitteln.

In zwei verschiedenen Versuchsständen wurden die beiden Einbringverfahren mit Schuten bzw. Hinterkippern im Modell nachgebildet. Als Versuchsmaterial wurde Natursteinsplitt verwendet. In diesen Versuchen wurde ermittelt, ob sich die Schuten- oder LKW-Ladung auf dem Fallweg durch das Wasser unzulässig entmischt und damit eine unerwünschte Schichtung des Materials in dem fertigen Bauwerk auftritt. Die Vorgänge beim Auftreffen der Steine auf eine bereits vorhandene Schicht, d. h. beim Herabrutschen auf der bereits geschütteten Unterwasserböschung, und die seitliche Abweichung der verschiedenen Korngrößen wurden ebenfalls untersucht.

Außerdem wurde an 223 natürlichen Steinen unterschiedlicher Achsenverhältnisse und Rundungsgrade eine systematische Reihenuntersuchung durchgeführt. Darin wurde der Zusammenhang zwischen dem Fallverhalten (Bewegungsart, Fallgeschwindigkeit bzw. Reynoldszahl, Widerstandsbeiwert) und der Körpergestalt (Achsenverhältnisse und Rundungsgrad der Steine) ermittelt. In der Natur selten auftretende Formen wurden dabei ausgeschlossen, die Auswahl blieb auf konvexe Formen (Steine ohne Einbuchtungen) beschränkt. Die dafür erforderlichen Arbeiten hat Herr Andreas Beutel als studentische Hilfskraft durchgeführt und in seiner Diplomarbeit zusammengefasst.

Um die Untersuchungen zu vervollständigen, wurden auch wieder Versuche mit Kugeln begonnen. Im Gegensatz zu kantigen Körpern ist bei Kugeln das Fallverhalten stark von der Reynoldszahl abhängig, und große Kugeln weichen sehr viel weiter zur Seite ab als Würfel mit den gleichen Reynoldszahlen. In Vorversuchen wurden bei unterschiedlichen Kugeldurchmessern verschiedenartige Phänomene im Fallverhalten beobachtet. Daher wurden zunächst Versuche mit Kugeln unterschiedlicher Durchmesser und Dichten durchgeführt, um die Reynoldszahlbereiche für die beobachteten Phänomene abzustecken. Anschließend soll untersucht werden, welchen Einfluss die Parameter „Achsenverhältnisse“, „Rauheit der Oberfläche“ und „Turbulenz des Wassers“ auf das Fallverhalten haben.

2.3 Wissenslücke

Aufgrund der bisherigen Untersuchungen am FG Konstruktiver Wasserbau kann man sagen, dass bei konvexen Körpern geometrisch ähnliche Körper die gleiche Bewegungsart ausführen und den gleichen Widerstandsbeiwert besitzen. Diese Falleigenschaften werden am Fachgebiet in einem wassergefüllten Tank für die oben erwähnten 223 Steine ermittelt, so dass für einen

beliebigen natürlichen Stein mittels Vergleich Vorhersagen über sein Fallverhalten getroffen werden können. Diese Einschätzung des Fallverhaltens ist für die Beurteilung der Eignung bestimmten Steinmaterials für die Verwendung als Schüttmaterial unter Wasser wichtig.

Bisher wurde bei den Untersuchungen die Gestalt eines unregelmäßigen natürlichen Steines qualitativ nach Augenschein bestimmt. Für die Erstellung eines Vergleichskataloges ist es nun erforderlich, die geometrischen Eigenschaften quantitativ mit exakten Parametern zu beschreiben. Dafür muss festgelegt werden, wie viele Parameter und welche Parameter erforderlich sind, um einen Stein eindeutig zu beschreiben. Die gesuchten Parameter müssen folgende Eigenschaften erfüllen:

- Die Beschreibung eines Steines muss anschaulich und praktikabel sein,
- sie muss eindeutig und reproduzierbar, also objektiv sein,
- die gewählten Parameter müssen voneinander unabhängig sein und
- sie müssen unabhängig von der Lage und der Größe des Steines sein.

Einfache Bezugsgrößen, wie sie in der Literatur häufig zu finden sind, reichen dafür nicht aus, da sie in den meisten Fällen die o. g. Eigenschaften nicht uneingeschränkt erfüllen.

Wenn die Gestalt der untersuchten Steine eindeutig und reproduzierbar beschrieben ist, kann jeder geometrischen Steingestalt ein Fallverhalten, d. h. eine Bewegungsart, ein Widerstandsbeiwert, eine Setzungsgeschwindigkeit und eine Reynoldszahl, zugeordnet werden.

2.4 Ziel

Die vorliegende Veröffentlichung bildet einen Ausschnitt aus den Untersuchungen, die am FG Konstruktiver Wasserbau der Technischen Universität Berlin zur Zeit vorgenommen werden. In diesem Projekt wird das Fallverhalten von natürlichen Steinen unterschiedlicher Formen und Rundheiten in Abhängigkeit von der Steingestalt ermittelt. Mit den Hilfsmitteln, die dem Leser mit der vorliegenden Veröffentlichung zur Verfügung gestellt werden, soll der Anwender in kurzer Zeit ermitteln können, wie ein natürlicher Stein, der vor ihm liegt, in Wasser fällt. Der Stein kann dabei beliebige Abmessungen besitzen, die Wassertiefe kann die Tiefe eines Seehafens überschreiten.

Zu diesem Zweck haben die Verfasser 223 Steine untersucht und klassifiziert und daraus einen Vergleichskatalog erstellt, der auf CD-Rom erhältlich ist. Einzelheiten zu der Erstellung und Verwendung dieses Kataloges sind in Kapitel 4 dargestellt, die gewählte Klassifikationsmethode ist in Kapitel 3.2 beschrieben. Der Anwender muss lediglich über einen Suchalgorithmus aus

dem Steinkatalog denjenigen Stein aussuchen, der seinem Stein am ähnlichsten ist. Hat er eine Auswahl getroffen, erhält er Informationen über die geometrischen Eigenschaften und die Falleigenschaften des ausgesuchten Steines. Mit Hilfe dieser Informationen kann er die zu erwartenden Falleigenschaften wie Widerstandsbeiwert, Setzungsgeschwindigkeit, Reynoldszahl und Bewegungsart seines eigenen Steines beurteilen.

3 Beschreibung eines Steines

3.1 Begriffe

3.1.1 Gestalt

Die dreidimensionale Geometrie eines Steines ist ausschlaggebend für sein dynamisches Verhalten. Der Begriff Gestalt wird als Oberbegriff für alle geometrischen Eigenschaften eines Steines verwendet.

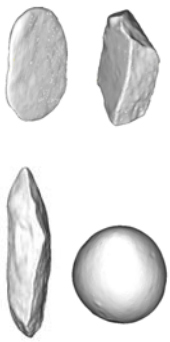
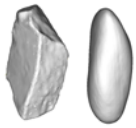
Gestalt			
Größe	Form	Rundheit	Rauheit
Unterscheidung von Körpern unterschiedlicher Größe	Unterscheidung von flachen, kubischen, stängeligen und flachstängeligen Körpern	Unterscheidung von kantigen und gerundeten Körpern	Unterscheidung von Körpern mit einer glatten oder rauen Oberfläche
Klassifikation nach Volumen	Klassifikation z. B. nach Zingg	Klassifikation z. B nach Diepenbroek oder nach der Ähnlichkeit zum trägheitsäquivalenten Ellipsoid	Klassifikation wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet
			

Abbildung 3.1: Charakterisierung eines Körpers durch geometrisch definierte Gestaltparameter

Die Gestalt umfasst die vier unterschiedlichen, weitgehend voneinander unabhängigen Aspekte

- Größe,
- Form, d. h. die räumliche Ausdehnung,
- Rundheit, d. h. die grobe Ausprägung der Steinoberfläche und
- Rauheit, d. h. die Feinstruktur der Oberfläche (Abbildung 3.1).

Da ein natürlicher Stein kein regelmäßiger Körper ist, lässt sich seine Gestalt weder sprachlich noch mathematisch leicht beschreiben. Im Folgenden wird daher auf die Begriffe Größe, Form, Rundheit und Rauheit genauer eingegangen. Die folgenden Kapitel sind kein vollständiger Überblick über die bisher in der Literatur vorgeschlagenen Methoden zur Beschreibung der Körpergestalt, sie sollen lediglich die verwendeten Begriffe verdeutlichen. Zusammenstellungen von vorgeschlagenen Kornformparametern liefern z. B. Köster [1964], Dobkins & Folk [1970] oder Barrett [1980].

3.1.2 Größe

Die Körpergröße kann mit Hilfe des Körpervolumens geometrisch eindeutig beschrieben werden. Die Angabe des Volumens ermöglicht die Unterscheidung von Körpern unterschiedlicher Größe unabhängig von der Form der Körper [Huller, 1985].

3.1.3 Form (Makrobereich)

Unter dem Begriff Form versteht man die Ausdehnung eines Körpers im Raum oder anschaulich die Abweichung der groben Form des Körpers von der Kugelform. In der Literatur wird daher stattdessen auch häufig der Begriff Sphärizität verwendet. Zur Definition dieses Begriffes gibt es zahlreiche Vorschläge unterschiedlicher Autoren, von denen hier zwei Definitionen von Wadell [1932, 1934] als Bespiele genannt werden:

$$\psi = \frac{s}{S} \tag{3.1}$$

ψ : Sphärizität
s : Oberfläche der volumengleichen Kugel
S : tatsächliche Oberfläche des Partikels.

$$\psi = \sqrt[3]{\frac{V_p}{V_{cs}}} \tag{3.2}$$

ψ : Sphärizität
V_p : Volumen des Partikels
V_{cs} : Volumen der umschreibenden Kugel.

Wegen der Schwierigkeiten bei der Bestimmung von Körpervolumen und Körperoberfläche wurde versucht, die Form mit anderen messbaren Größen zu beschreiben. Dafür wurde die Körperform durch eine einfache geometrische Form, in der Regel Ellipsoid oder Quader, angenähert und die Längen der drei aufeinander senkrecht stehenden Achsen dieser Vergleichskörper bestimmt. Diese drei Achsen werden als die längste, die kürzeste und die mittlere Achse bezeichnet. Es ist auch möglich, die drei Achsenlängen an dem Körper direkt zu messen. Werden die Achsenlängen zueinander ins Verhältnis gesetzt, erhält man dimensionslose Faktoren zur Beschreibung der Form. Beispiele dafür sind der Corey Shape Factor CSF [Komar und Reimers, 1978] oder der Formfaktor E [Baba und Komar, 1981]:

$$CSF = \frac{D_s}{\sqrt{D_i \, D_\ell}} \tag{3.3}$$

CSF : Corey shape factor
D_s, D_i, D_ℓ : kürzester (**s**hort), mittlerer (**i**ntermediate) und längster (ℓong) Körperdurchmesser

$$E = D_s \left[\frac{D_s^2 + D_i^2 + D_\ell^2}{3} \right]^{-1/2} \tag{3.4}$$

E : Formfaktor
D_s, D_i, D_ℓ : kürzester (**s**hort), mittlerer (**i**ntermediate) und längster (ℓong) Körperdurchmesser.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Form eines Körpers mit zwei Größen zu beschreiben, indem die Verhältnisse von jeweils zwei Achsenlängen gebildet werden, z. B. das Verhältnis der kürzesten zur mittleren Achse und das Verhältnis der mittleren zur längsten Achse. Anhand dieser beiden Größen können die Körper in Formklassen eingeteilt werden. Damit ist eine Unterscheidung in kubische bzw. kugelige, flache, stängelige und flachstängelige Körper möglich.

3.1.4 Rundheit (Mesobereich)

Die Rundheit eines Körpers wird mit dem Parameter Rundungsgrad angegeben. Der Rundungsgrad gibt die grobe Ausprägung der Oberfläche, d. h. den Grad ihrer Abrundung, wieder. Anhand dieses Parameters können kantige und abgerundete Körper unterschieden und in Rundheitsklassen eingeteilt werden. In der Literatur wird dieser Parameter auch als Angularität oder Kantigkeit bezeichnet.

Der Rundungsgrad eines dreidimensionalen Körpers wird zur Vereinfachung oft an zweidimensionalen Projektionen, z. B. Schnittflächen oder Schattenflächen des Körpers, bestimmt. In der Literatur wurden eine Vielzahl von Methoden zur Bestimmung des Rundungsgrades vorgeschlagen, die konzeptionell wichtigen Ideen dafür stammen aber von Wentworth und Wadell [Diepenbroek, 1993]. Wentworth [1919] benutzte für seine Definition den Krümmungsradius der schärfsten Ecke auf der Körperoberfläche im Verhältnis zur Hälfte des längsten Körperdurchmessers, der durch die gemessene Ecke verläuft. Im Gegensatz zu dieser Messung, die an dem dreidimensionalen Körper erfolgt und sich nur auf die schärfste Ecke bezieht, bildete Wadell [1932] für die Umrisslinie eines Körperschnittes das arithmetische Mittel aus den Rundheiten aller Ecken der betrachteten Schnittebene. Unter Rundheit einer Ecke versteht er dabei das Verhältnis von dem Krümmungsradius der jeweiligen Ecke zu dem Radius des größten einbeschriebenen Kreises in den Körperschnitt.

Diese Methoden der rechnerischen Bestimmung des Rundungsgrades erfordern einen hohen manuellen Aufwand. Daher wurden zahlreiche Rundungsvergleichstafeln entwickelt, mit deren Hilfe der Rundungsgrad eines Körpers visuell durch Vergleich bestimmt werden kann. Mit diesem optischen Vergleich kann der Rundungsgrad wesentlich schneller und einfacher als mit einem geometrischen Verfahren ermittelt werden. Viele dieser Vergleichstafeln beruhen dabei auf dem Konzept der Rundungsbestimmung von Wadell. Beispiele dafür sind:

Russell & Taylor [1937],
Pettijohn [1957],
Powers [1953] oder
Krumbein [1941].

Daneben gibt es aber auch Rundungstafeln, die auf anderen Prinzipien der Rundungsbestimmung beruhen, z. B.:

Guggenmoos [1934],
Eißele [1957] oder
Reichelt [1961].

Eine Auflistung der von verschiedenen Verfassern vorgeschlagenen Rundungstafeln gibt z. B. Köster [1964]. In Abbildung 3.2 sind zwei Beispiele gezeigt.

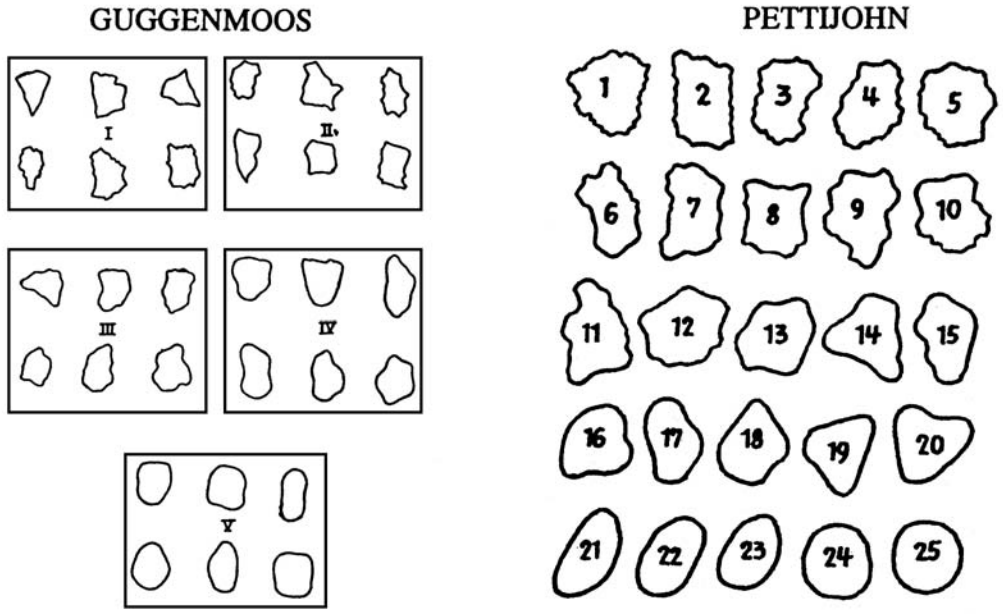


Abbildung 3.2: Rundungstafeln nach den Vorschlägen von Guggenmoos und Pettijohn [aus Köster, 1964]

Die modernen Methoden zur Bestimmung Rundungsgrades beruhen auf der Untersuchung der Körperkontur mittels Fourier-Analyse. Dafür wird die Körperkontur einer Schnittfläche abgewickelt und als periodische Funktion dargestellt. Als Ergebnis der Fourier-Analyse erhält man das Amplitudenspektrum der Körperkontur, das alle maßgeblichen Informationen über die Körpergestalt enthält, da die Amplituden der einzelnen Frequenzen als charakteristische Konturmerkmale interpretierbar sind. Für die Methoden, wie die Körperkontur abgewickelt wird und wie aus den Fourierkoeffizienten ein Rundungsgrad berechnet werden kann, gibt es in der Literatur wiederum zahlreiche Vorschläge der einzelnen Verfasser, die hier allerdings nicht aufgezählt werden sollen.

Für einen groben Überblick ist auf der folgenden Seite tabellarisch die Geschichte der Rundungsmessung mit einer kurzen Bewertung der einzelnen Methoden gezeigt [aus Diepenbroek, 1993].

AUTHOR	METHOD	CHARACTERISTICS	PROBLEMS
Wentworth (1919)	$\frac{d_s}{L_s}$	regards position of measured corner on the particle, definite ultimate shape (sphere)	only one corner, influence of sphericity, extremely laborious
Wentworth (1922)	$\frac{d_s}{(L+I)/2}$	Reduction to maximum projection plane measurement	only one corner, influence of sphericity, laborious
Wadell (1932)	$\frac{((\Sigma d_i)/n)}{D_i}$	curvatures of all corners averaged, influence of sphericity reduced	only convex parts, no definite ultimate shape, laborious
Szadeczky-Kardoss (1933)	Relation: $\%C_p$, $\%C_v$, $\%C_c$	curvatures of the complete outline are evaluated	semi-quantitative, no single roundness value, very laborious
Russell & Taylor (1937)	visual chart 5 classes	[Wadell], quick procedure	subjective (operator error), no discrimination of higher roundness grades
Krumbein (1941)	visual chart 9 classes at equal steps	[Wadell], quick procedure, closely spaced discrimination	subjective (operator error), difficult assignment of deviating forms
Cailleux (1947)	$\frac{d_s}{L}$	[Wentworth]	strong influence of sphericity, only one corner, laborious
Pettijohn (1949)	visual chart 5 classes, geometrical scale	[Wadell], quick procedure	subjective (operator error), no discrimination of higher roundness grades
Powers (1953)	visual chart 6 classes, geometrical scale	[Wadell], quick procedure, sensitive to lower roundness grades	subjective (operator error), no discrimination of higher roundness grades
Kuenen (1956)	$\frac{d_s}{I}$	[Wentworth], influence of spericity reduced	only one corner, laborious
Schwarcz & Shane (1969)	Fourier analysis: 'roughness'-root-mean-square-difference (RMS) between calculated and observed radii on outline	rapid procedure, objective, influence of sphericity is compensated, regards position of curvatures	no definite ultimate shape, insufficient discrimination of higher roundness grades
Ehrlich & Weinberg (1970)	Fourier anlysis: 'roughness' $\sum (a_i^2 + b_i^2)^{-1/2}$	rapid procedure, objective	no definite ultimate shape, insufficient discrimination of higher roundness grades, influence of sphericity
Dobkins & Folk (1970)	$\frac{d_s}{D_i}$	[Wentworth] & [Wadell], influence of sphericity reduced	only one corner, laborious
Swan (1974)	$\frac{(d_{s1} + d_{s2})}{(D_i/2)}$	[Wentworth] & [Wadell], influence of sphericity reduced	only two corners, laborious
Mazzullo & Heines (1988)	Fourier analysis	rapid procedure	no definite ultimate shape, high mean errors, no discrimination of higher roundness grades, influence of sphericity

Explanation of abbreviation:

n	number of corners	L	Long-axis
d_s	diameter of sharpest corner	I	Intermediate-axis
d_i	diameter of i-th corner	C_p	curvature of plane parts
D_i	diameter of largest inscribed circle	C_v	curvature of convex parts
L_s	longest diameter through measured corner	C_c	curvature of concave parts
a_i, b_i	Fourier coefficients		

[Wadell] based on Wadell's concept [Wentworth] based on Wentworth's concept

Abbildung 3.3: Geschichte und kurze Bewertung von Methoden zur Rundungsmessung [aus Diepenbroek, 1993]

3.1.5 Rauheit (Mikrobereich)

Die Rauheit gibt die Feinstruktur der Körperoberfläche wieder. Mit diesem Parameter lassen sich Körper mit einer glatten Oberfläche von Körpern mit einer rauen Oberfläche unterscheiden. Die Rauheit bezieht sich auf ähnliche geometrische Eigenschaften wie der Parameter Rundungsgrad, nur der Maßstab der zu beschreibenden Elemente ist dabei geringer. Der Übergang zwischen beiden Eigenschaften ist fließend [Huller, 1985].

Um die Rauheit zu bestimmen, muss die Textur der Oberfläche analysiert werden. Dafür ist wiederum die Fourier-Analyse ein geeignetes Mittel, wenn bei der Abwicklung der Körperkontur die Anzahl der Konturpunkte hoch genug gewählt ist, so dass die erforderliche Auflösung erreicht wird. Die Rauheit wird dann aus den Fourierkoeffizienten höherer Ordnung berechnet [Huller, 1985].

3.2 Gewähltes Klassifikationsschema

3.2.1 Größe

Die Größe der Steine wird mit Hilfe ihres Volumens angegeben, das über Tauchwägung bestimmt wird. Die Tauchwägung beruht auf dem archimedischen Prinzip, d. h. ein in eine Flüssigkeit eingetauchter Körper verliert scheinbar so viel von seiner Gewichtskraft, wie die von ihm verdrängte Flüssigkeit wiegt. Wird die Masse eines Körpers sowohl in Luft als auch in Wasser unter Auftrieb bestimmt, kann aus folgender Gleichung sein Volumen ermittelt werden:

$$V_K = V_W = \frac{m_K - m'_K}{\rho_W} = \frac{m_W}{\rho_W} \tag{3.5}$$

V_K : Volumen des Körpers
V_W : Volumen des verdrängten Wassers
m_K : Masse des luftfeuchten Körpers
m'_K : Masse des Körpers unter Auftrieb
m_W : Masse des verdrängten Wassers
ρ_W : Dichte des Wassers.

Ist das Volumen des Körpers bekannt, kann daraus auch seine Dichte berechnet werden:

$$\rho_K = \frac{m_K}{V_K} \tag{3.6}$$

ρ_K : Dichte des Körpers
m_K : Masse des luftfeuchten Körpers
V_K : Volumen des Körpers.

3.2.2 Form

Von den in der Literatur vorgeschlagenen Definitionen zur Beschreibung der Form sind viele nicht eindeutig, d. h. für unterschiedliche Körperformen wird der gleiche Formparameter erhalten. Auch das Kriterium der Unabhängigkeit ist z. T. nicht erfüllt, weil bei der Berechnung des Formparameters die Ausprägung der Oberfläche, also die Rundheit, einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis hat. Außerdem wurden die meisten dieser Parameter für die Untersuchung eines speziellen Aspektes entwickelt und sollten daher auch nur in diesem Anwendungsbereich verwendet werden.

Am FG Konstruktiver Wasserbau wurde zur Beschreibung der Form der natürlichen Steine das Klassifikationsverfahren nach Zingg [1935] gewählt. Zingg misst an einem Stein drei aufeinander senkrecht stehende charakteristische Achsen, in denen die Maximal- und Minimalausdehnung des Steines zur Geltung kommen, indem er die Kantenlängen des umschließenden Quaders bestimmt. Diese drei Achsen werden als der längste ℓ (**ℓ**ong), der mittlere i (**i**ntermediate) und der kürzeste s (**s**hort) Durchmesser des Steines bezeichnet (Abbildung 3.4).

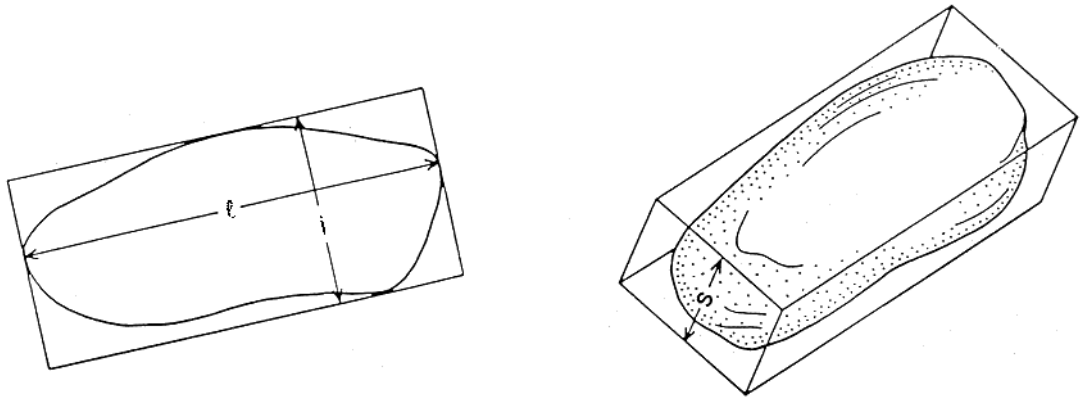
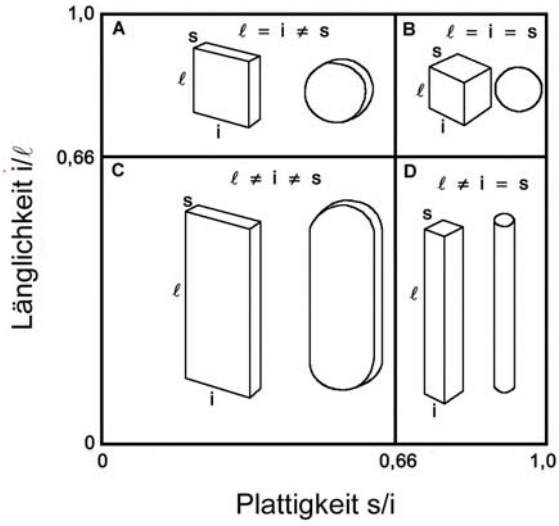


Abbildung 3.4: Bestimmung des längsten, kürzesten und mittleren Durchmessers eines Steines mit Hilfe des umschließenden Quaders [aus McLane, 1995]

Die Form wird von Zingg mit zwei Parametern definiert, der Länglichkeit $q = i/\ell$ und der Plattigkeit $p = s/i$. Dabei gibt die Länglichkeit an, ob ein Stein isometrisch oder stängelig ist, die Plattigkeit, ob der Stein flach ist. Anhand dieser beiden Parameter werden die Steine in vier Formklassen eingeteilt, deren Grenzen von Zingg bei

$$\frac{s}{i} = \frac{i}{\ell} = \frac{2}{3} = 0{,}66 \tag{3.7}$$

gezogen werden (Abbildung 3.5).



Benennung der Formklassen nach Zingg [1935]:

Formklasse A: flach

Formklasse B: kugelig (kubisch)

Formklasse C: flachstängelig

Formklasse D: stängelig

Abbildung 3.5: Einteilung der Körperformen in vier Formklassen nach Zingg [aus Tucker, 1985]

Wie in Abbildung 3.5 zu erkennen ist, haben z. B. der Würfel und die Kugel sowohl die gleiche Länglichkeit als auch die gleiche Plattigkeit. Diese Einteilung in Formklassen enthält keine Aussage über die Ausbildung der Kontur eines Körpers, die beiden Parameter Form und Rundheit sind also, wie in Kapitel 2.3 gefordert, voneinander unabhängig. Da bei diesem Klassifikationsverfahren die Achsenverhältnisse gebildet werden, d. h. eine normierte Darstellung verwendet wird, ist die Unabhängigkeit der beiden Formparameter von der Größe der Steine ebenfalls gegeben.

Das Verfahren von Zingg wurde für die Untersuchungen am FG Konstruktiver Wasserbau in folgenden Punkten modifiziert:

a) Die Lage des Achsenkreuzes, das von Zingg mit Hilfe des umschließenden Quaders in den Stein gelegt wird, ist von der Beurteilung des Bearbeiters abhängig. Damit wäre das Kriterium der Eindeutigkeit und Reproduzierbarkeit nicht vollständig erfüllt. In dieser Arbeit wird daher ein objektives Bezugssystem so in jeden Stein gelegt, dass der Ursprung des Koordinatensystems in dem Volumenschwerpunkt des Körpers liegt und die Achsen entlang den Hauptträgheitsachsen des Körpers verlaufen.

b) Die kürzeste, mittlere und längste Achse werden nicht an dem Körper direkt gemessen, sondern an dem trägheitsäquivalenten Ellipsoid, d. h. an dem Ellipsoid mit den gleichen Hauptträgheitsachsen und Hauptträgheitsmomenten wie der betrachtete Körper. Damit wird ausgeschlossen, dass Elemente der Rundheit wie z. B. vorstehende Ecken die Messung der Achsen beeinflussen. Mit dieser Messmethode ist also gewährleistet, dass die Bestimmung der Form vollständig unabhängig von der Rundheit des Körpers ist.

3.2.3 Rundheit

3.2.3.1 Berechnung mit Hilfe der Fourier-Analyse

Zur Ermittlung eines objektiven Rundheitsparameters, der theoretisch Werte zwischen 0 (vollständig kantig) und 1 (vollständig gerundet) annehmen kann, wird auf das Verfahren der Fourier-Analyse zurückgegriffen. Dabei wird für die drei aufeinander senkrecht stehenden, entlang den Hauptträgheitsachsen des Körpers verlaufenden Schnittflächen (2D) jeweils der Rundungsgrad berechnet. Der Rundungsgrad des Körpers (3D) wird als Mittelwert der Rundungsgrade der drei Schnitte definiert.

Die Abwicklung der Umrisslinie einer Schnittfläche und die Berechnung des Rundungsgrades aus den Fourierkoeffizienten erfolgen hier nach den Vorschlägen von Diepenbroek [1993], der mehr als 20.000 Gerölle und deren Amplitudenspektren untersucht hat. Diepenbroek rechnet die Umrisspunkte in Polarkoordinaten um, d. h. der Umriss wird durch eine Abfolge von Radien repräsentiert (Abbildung 3.6). Die Umrechnung in Polarkoordinaten muss in gleichen Winkelabständen erfolgen, da äquidistante Stützstellen der Kurve die Voraussetzung für eine erfolgreiche Fourier-Analyse sind.

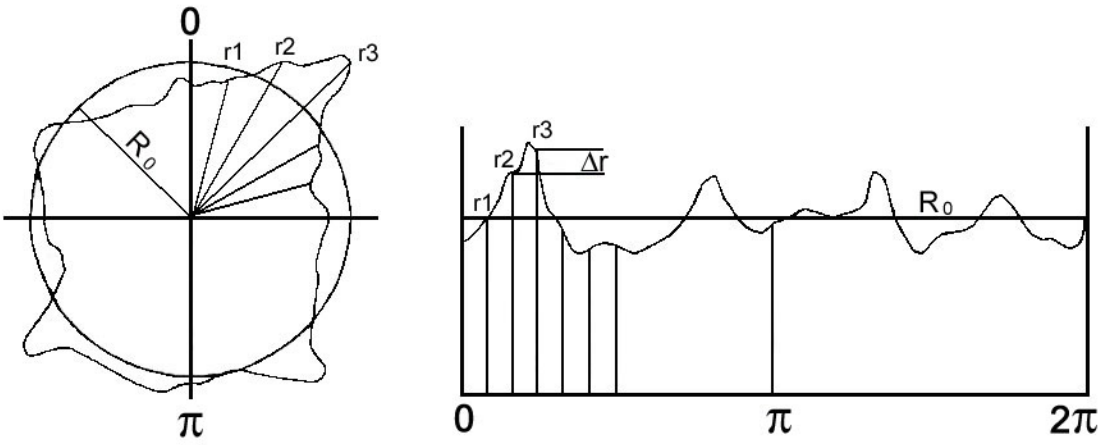


Abbildung 3.6: Polarkoordinatendarstellung der Umrisslinie [aus Diepenbroek, 1993]
R_0 ist die Nullfrequenz und entspricht dem mittleren Radius.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde dabei als eindeutig festgelegter und reproduzierbarer Polpunkt für die Abwicklung der Volumenschwerpunkt des Körpers gewählt. Als Umrissauflösung wurden wie bei Diepenbroek 64 Stützstellen verwendet und für die so entstandenen Kurven jeweils die Frequenzen 1-24 berechnet. Aus den so erhaltenen Amplitudenspektren wird für jede der drei Umrisslinien deren Rundungsgrad folgendermaßen berechnet:

$$P_i = e^{(-1,25 \cdot P_{pre})} \tag{3.8}$$

$$P_{pre} = \sum_{m=3}^{24} c_m (R_m - R_{em}) \tag{3.9}$$

$$c_m = 0,56 \cdot e^{0,2 \cdot m} \tag{3.10}$$

$$R_m = \frac{\sqrt{a_m^{\ 2} + b_m^{\ 2}}}{R_0} \tag{3.11}$$

$$R_0 = \frac{a_0}{2} \tag{3.12}$$

P_i : Rundungsgrad des untersuchten Schnittes i (i = 1 bis 3)
P_{pre} : vorläufiger Rundungswert des untersuchten Schnittes
c_m : Gewichtungsfaktor
R_m : normierte Amplitude der m-ten Frequenz
R_{em} : normierte Amplitude der m-ten Frequenz der partikeläquivalenten Ellipse
R_0 : mittlerer Radius des untersuchten Schnittes
a_0, a_m : Fourierkoeffizienten
b_m : Fourierkoeffizienten
m : Frequenznummer.

Das Amplitudenspektrum der partikeläquivalenten Ellipse, deren Fläche gleich der Fläche des Körperquerschnittes ist, wird von dem des Körpers abgezogen, um bei der Berechnung des Rundungsgrades den Einfluss der Form weitgehend zu eliminieren, so dass die Unabhängigkeit der gewählten Gestaltparameter gewährleistet ist. Da die für die drei Schnittflächen berechneten Rundungsgrade in normierter Form vorliegen, ist die Unabhängigkeit von der Größe des Körpers ebenfalls gegeben.

Der Rundungsgrad des dreidimensionalen Körpers wird im Rahmen dieser Arbeit als Mittelwert aus den Rundungsgraden der drei Schnittflächen berechnet:

$$P_{DIEP} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3} \tag{3.13}$$

P_{DIEP} : Rundungsgrad des Körpers
P_1, P_2, P_3 : Rundungsgrade der drei Schnittflächen des Körpers entlang den Hauptträgheitsachsen.

3.2.3.2 Berechnung mit Hilfe des trägheitsäquivalenten Ellipsoids

In Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe 3D der Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e. V. (GFaI-Berlin e. V.) wurde aus folgenden Gründen eine alternative Methode zur Berechnung des Rundungsgrades entwickelt:

a) Die Eliminierung des Einflusses der Form durch Subtraktion des Amplitudenspektrums der partikeläquivalenten Ellipse bei der Berechnung des Rundungsgrades eines Querschnittes ist nur bis zu einem Achsenverhältnis von 1:3 akzeptabel [Diepenbroek, 1993]. Die vollständige Unabhängigkeit der beiden Parameter Rundungsgrad und Form ist demnach nicht gewährleistet. Bei langgestreckten Körpern mit kleineren Achsenverhältnissen als 1:3 sollte dieses Verfahren nicht angewendet werden.

b) Der Rundungsgrad eines Körpers wird als Mittelwert der Rundungsgrade drei charakteristischer Schnittflächen berechnet. Der dreidimensionale Rundungsgrad wird also aus einer sehr geringen Anzahl zweidimensionaler Rundungsgrade extrapoliert und kann daher nur als Näherung betrachtet werden.

Bei der Berechnung des Rundungsgrades mit Hilfe des trägheitsäquivalenten Ellipsoids wird angenommen, dass ein Ellipsoid als perfekt runder Stein angesehen werden kann (P = 1). Als Maß für den Rundungsgrad eines Steines wird demnach seine Abweichung von dem zugehörigen, eindeutig bestimmten trägheitsäquivalenten Ellipsoid definiert (Abbildung 3.7).

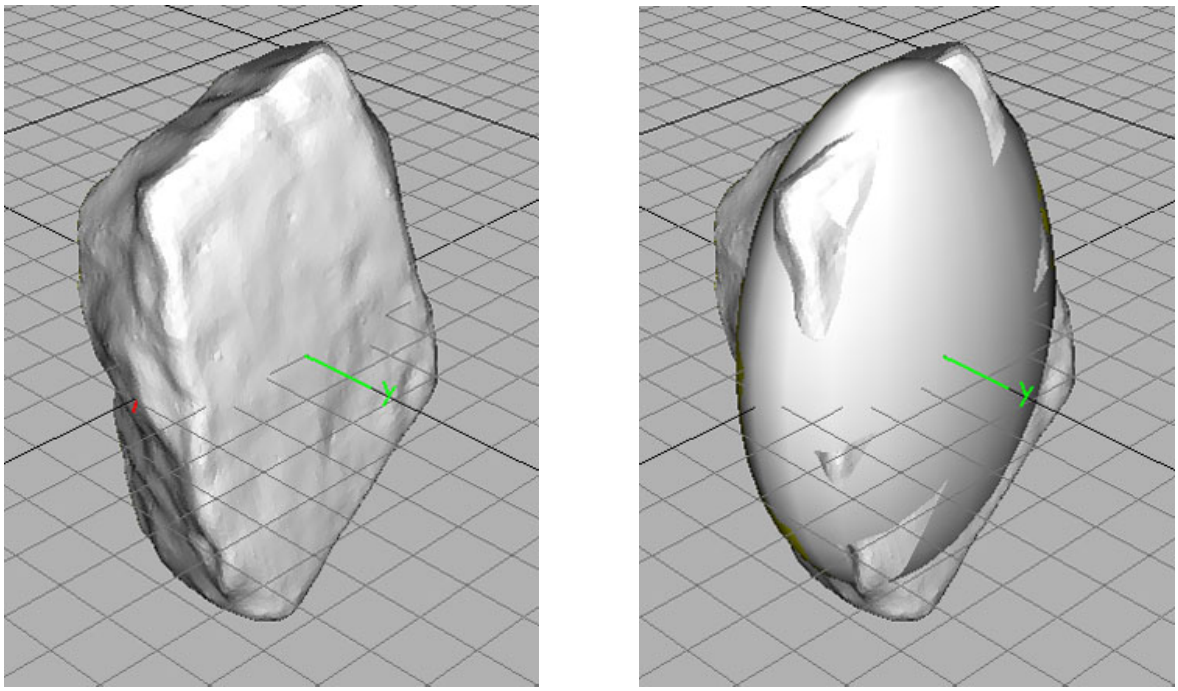


Abbildung 3.7: Darstellung eines natürlichen Steines (Rundungsgrad P = 0,30) und des zugehörigen trägheitsäquivalenten Ellipsoids (Rundungsgrad P = 1)

Unter Abweichung sei hierbei die Wurzel aus der mittleren Summe aller radialen Quadratabstände der Oberflächenpunkte des Steinmodells zum trägheitsäquivalenten Ellipsoid zu verstehen:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(1-\sqrt{\frac{x_i^2}{a^2}+\frac{y_i^2}{b^2}+\frac{z_i^2}{c^2}}\right)^2}{n}} \tag{3.14}$$

S : Abweichung des Steines von dem trägheitsäquivalenten Ellipsoid
x_i, y_i, z_i : Oberflächenpunkte des Steinmodells
a, b, c : Halbachsen des trägheitsäquivalenten Ellipsoids
n : Anzahl der Oberflächenpunkte.

Um diese Abweichung auf das Intervall]0,1] abzubilden, eignet sich folgender Ansatz:

$$P_{ee} = f\,(S) = e^{-\alpha \cdot S^2} \tag{3.15}$$

P_{ee} : Rundungsgrad
α : frei wählbarer positiver Parameter.

Der so ermittelte Rundungsgrad ist vollständig unabhängig von der Form, da die Abweichung des Steines von seinem zugehörigen trägheitsäquivalenten Ellipsoid zu Grunde gelegt wird. Bei der Berechnung des Rundungsgrades wird die gesamte Steinoberfläche berücksichtigt, so dass es sich hierbei um einen dreidimensionalen Parameter handelt.

3.2.4 Rauheit

Untersuchungen an Würfeln haben gezeigt, dass bei kantigen Körpern die Rauheit der Oberfläche keinen Einfluss auf das Fallverhalten hat. Nur bei exakt runden Körpern, d. h. künstlichen Körpern wie Kugeln und Ellipsoiden, ist ein geringer Einfluss nachweisbar. Da diese Körper für die praktische Anwendung bedeutungslos sind, wird die Feinstruktur der Oberfläche im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

3.3 Darstellung der Klassifikation und des hydraulischen Verhaltens

3.3.1 Darstellung der Klassifikation

Die Klassifikation der Steine wird in einem dreidimensionalen Merkmalraum dargestellt, der alle Informationen über die Gestalt, d. h. über die Form und über die Rundheit, enthält. Die Grundfläche dieses Merkmalraumes bildet das Diagramm nach Zingg, in dem die Informationen über die Form der Steine, d. h. über die Plattigkeit und über die Länglichkeit, enthalten sind (Abbildung 3.8).

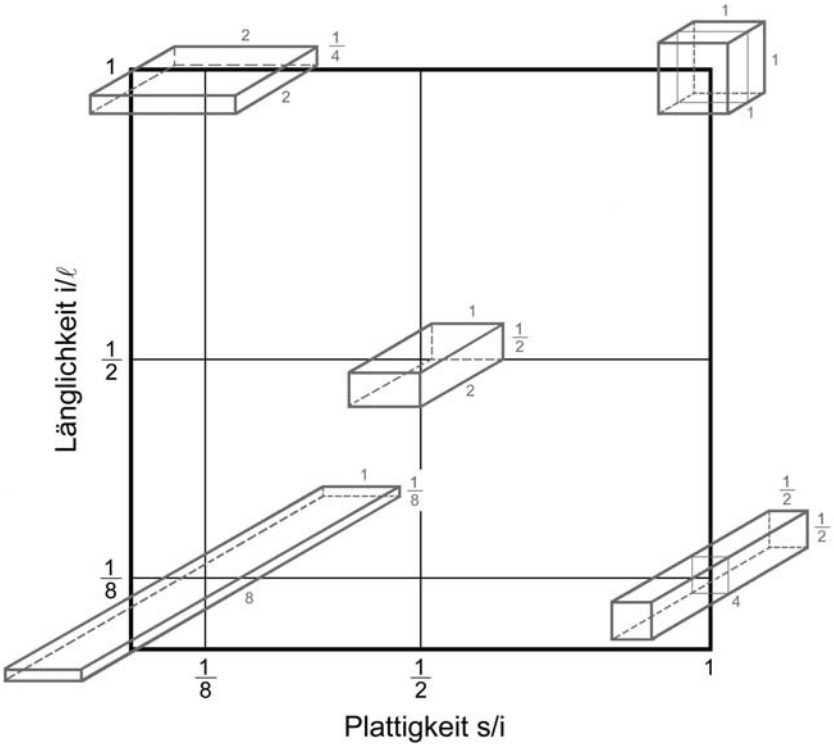


Abbildung 3.8: Grundfläche des dreidimensionalen Merkmalraumes
Als Beispiele für Körper sind die Quader an den vier Eckpunkten und in dem Mittelpunkt des Diagramms dargestellt.

Auf der dritten Achse, die senkrecht auf den beiden anderen steht, wird der Rundungsgrad aufgetragen. Jeder Körper wird in dem so entstandenen dreidimensionalen Merkmalraum durch einen Punkt repräsentiert, dessen Lage durch die Plattigkeit, die Länglichkeit und den Rundungsgrad des Körpers eindeutig festgelegt ist (Abbildung 3.9).

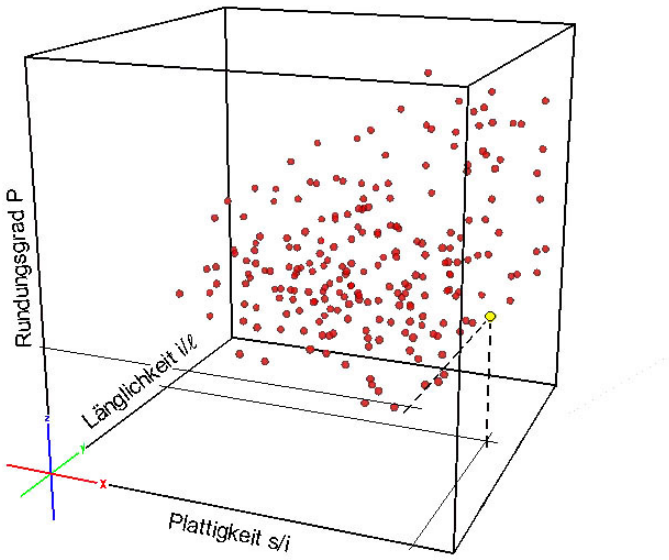


Abbildung 3.9: Dreidimensionaler Merkmalraum zur Beschreibung der Körpergestalt

3.3.2 Darstellung des hydraulischen Verhaltens

Frei in Wasser fallende Körper führen in Abhängigkeit von ihrer Form unterschiedliche Bewegungsarten aus. An den Quadern mit verschiedenen Kantenverhältnissen wurden die vier folgenden charakteristischen Bewegungsarten in Abhängigkeit von der Ausprägung ihrer Hauptabmessungen beobachtet:

- Räumliche Rotation: Der Körper rotiert während des Fallens um eine Achse, deren Lage sich im Raum ständig ändert.
- Ebene Rotation: Der Körper rotiert während des Fallens um seine längste Körperachse, wobei diese Achse senkrecht zur Anströmrichtung steht.
- Ebenes Pendeln: Der Körper pendelt während des Fallens um seine längste Körperachse, wobei diese Achse senkrecht zur Anströmrichtung steht.
- Räumliches Pendeln: Der Körper pendelt während des Fallens abwechselnd um seine längste und seine mittlere Körperachse, wobei diese beiden Achsen senkrecht zur Anströmrichtung stehen.

Diese Bewegungsarten der Quader traten während des Fallens nicht immer in reiner Form auf. Oft gab es Übergänge zwischen zwei Bewegungen, wobei häufig eine der beiden Bewegungsarten dominierte. Weiterhin verlief bei einigen Quadern die Fallbahn spiralförmig um die Vertikale. Diese spiralförmige Fallbahn ist keine eigenständige Bewegungsart, sie überlagert eine der vier oben genannten charakteristischen Bewegungsarten und konnte bei Quadern aller Formklassen beobachtet werden.

Die Bereiche für das Auftreten der charakteristischen Bewegungsarten in Abhängigkeit von der Körperform lassen sich in dem zweidimensionalen Diagramm nach Zingg gut darstellen. Bei den untersuchten Quadern korrelieren die vier Bewegungsarten mit den Formklassen nach Zingg (Abbildung 3.10).

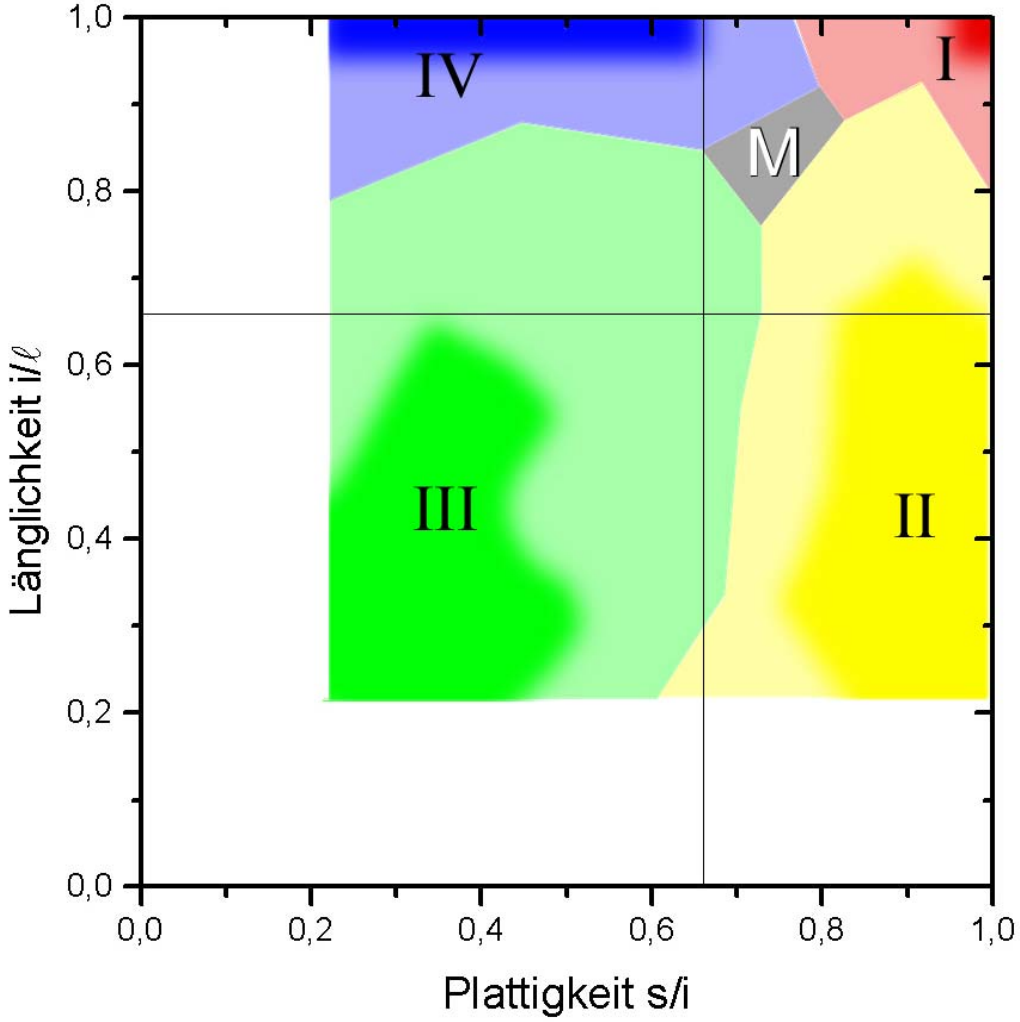


Abbildung 3.10: Charakteristische Bewegungsarten von Quadern in Abhängigkeit von der Körperform
I: Räumliche Rotation, II: Ebene Rotation, III: Ebenes Pendeln, IV: Räumliches Pendeln,
M: Mischbereich, in dem keine Bewegungsart dominiert
Dunkle Farbe: reine Bewegungsart, helle Farbe: Übergang zwischen zwei Bewegungsarten

Bei den untersuchten 223 natürlichen Steinen, die in dem Informationssystem RockDataBase enthalten sind, wurden die gleichen vier charakteristischen Bewegungsarten wie bei den Quadern beobachtet. Auch hier traten in einigen Fällen spiralförmige Fallbahnen als Überlagerung einer der anderen Bewegungsarten auf. Dabei konnte bei den sehr kantigen Steinen, die den Quadern noch relativ ähnlich sind, dieses Fallverhalten ebenfalls bei allen Körperformen beobachtet werden, mit zunehmendem Rundungsgrad blieb das Auftreten jedoch auf stängelige und flachstängelige Körperformen beschränkt.

Für die Darstellung des Auftretens der Bewegungsarten in Abhängigkeit von der Körperform wurden die 223 Steine in vier Rundheitsklassen (vollständig kantig, kantig, rund, vollständig

rund) eingeteilt und die Bereiche der Bewegungsarten für jede Rundheitsklasse jeweils in einem ebenen Diagramm dargestellt (Abbildung 3.11).

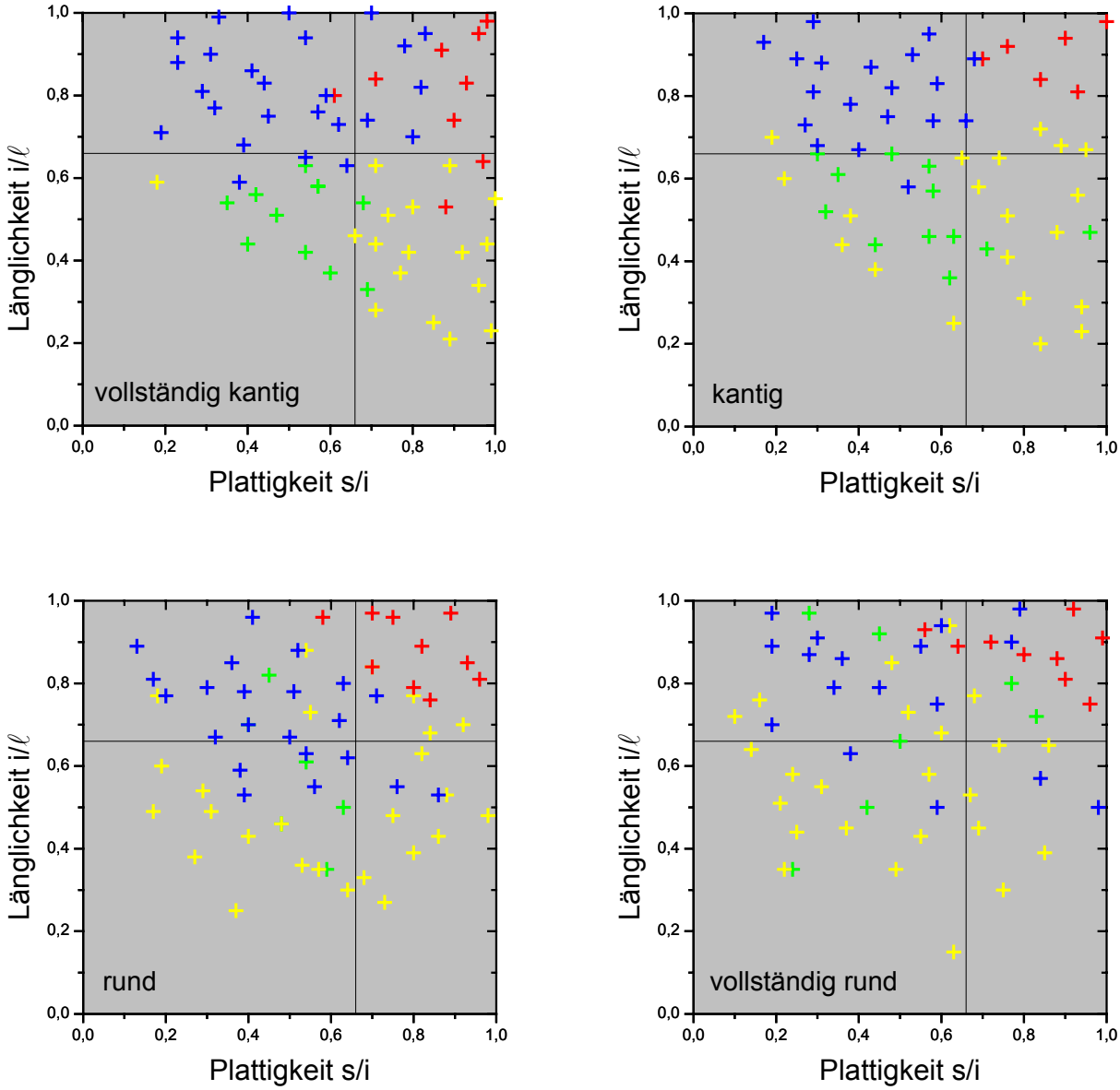


Abbildung 3.11: Charakteristische Bewegungsarten von natürlichen Steinen in Anhängigkeit von der Körperform für vier verschiedene Rundheitsklassen
Rot: Räumliche Rotation, Gelb: Ebene Rotation, Grün: Ebenes Pendeln,
Blau: Räumliches Pendeln

Da die Beschreibung der ausgeführten Bewegung eines fallenden Steines in Worten sehr schwierig ist, wird im Rahmen des Informationssystems RockDataBase auf eine verbale Beschreibung des Fallverhaltens verzichtet. Stattdessen wird für jeden Stein ein Video, das ihn während des Fallens von der Seite und von oben zeigt, bereitgestellt.

Die Widerstandsbeiwerte der Steine in Abhängigkeit von ihrer Körperform lassen sich ebenfalls in dem Diagramm nach Zingg gut darstellen. Abbildung 3.12 zeigt die ermittelten dimensionslosen Widerstandsbeiwerte der Steine für jede Rundheitsklasse als Isolinien.

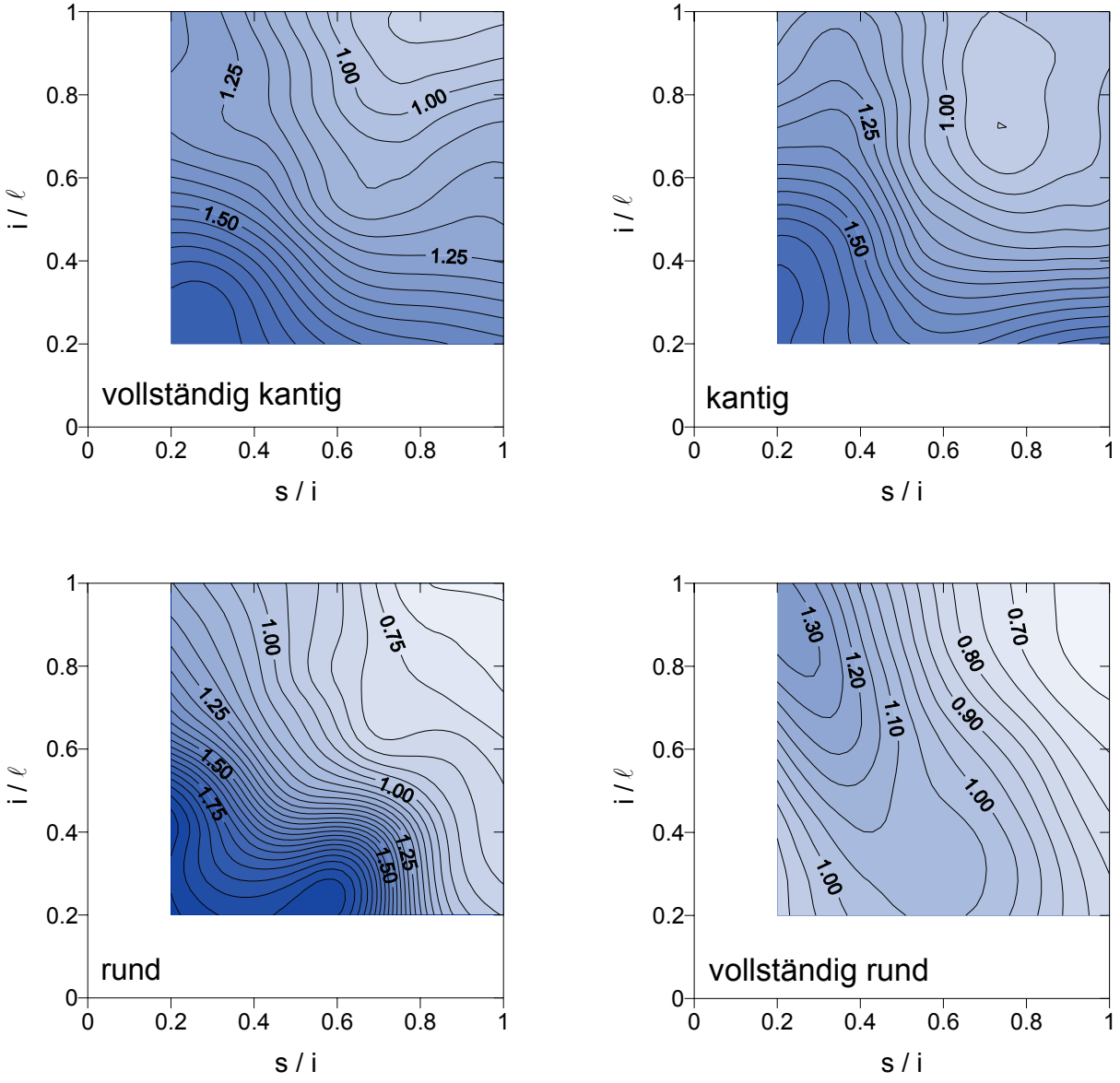


Abbildung 3.12: Widerstandsbeiwerte c_D von natürlichen Steinen in Abhängigkeit von der Körperform für vier verschiedene Rundheitsklassen

4 Informationssystem RockDataBase

4.1 Aufbau des Informationssystems RockDataBase

4.1.1 Inhalt

RockDataBase ist eine Informationsdatenbank mit 223 Steinen. Diese Steine wurden als typische Vertreter für natürlich vorkommende konvexe Körperformen und Körperrundheiten ausgewählt. Die Steine wurden nach ihrer Gestalt klassifiziert und in ihrem hydraulischen Fallverhalten untersucht. Aus den untersuchten Steinen wurde eine Datenbank zusammengestellt, welche Informationen über die geometrischen Eigenschaften und die Falleigenschaften der Steine in Wasser für den Benutzer leicht abrufbar enthält. Das Informationssystem RockDataBase sowie eine Kurzanleitung zur Handhabung sind auf der beiliegenden CD zu finden.

RockDataBase enthält die folgenden Informationen:

4.1.1.1 Veranschaulichung des 3D-Merkmalraumes

Die ebene Darstellung der Klassifikation der Form nach Zingg ist von den Verfassern um eine dritte Achse erweitert worden. Auf dieser Achse ist der Parameter „Rundungsgrad“ dargestellt (siehe 3.3.1). Die Darstellung der Einordnung von Körpern in einen dreidimensionalen Merkmalraum ist auf dem Computerbildschirm sehr viel anschaulicher als auf dem Papier.

RockDataBase enthält eine Abbildung des 3D-Merkmalraumes, in dem alle in der Datenbank enthaltenen Steine durch einen Punkt repräsentiert sind (Abbildung 4.4, Kapitel 4.2).

4.1.1.2 Informationen über die repräsentativen Steine

Der Anwender kann jeden in der Datenbank enthaltenen Stein auswählen und betrachten. Für den ausgewählten Stein werden das Steinmodell, das trägheitsäquivalente Ellipsoid bzw. die drei Körperschnittumrisslinien entlang den Hauptträgheitsachsen, die maximale Schattenfläche und die Einordnung in den 3D-Merkmalraum gezeigt (Abbildungen 4.7 und 4.8, Kapitel 4.2). Zu jedem Stein sind dessen geometrische Parameter sowie Informationen zu seinem hydraulischen Fallverhalten enthalten.

Die geometrischen Parameter sind in einer Liste (Infofenster) zusammengestellt und umfassen:

- Plattigkeit s/i und Länglichkeit i/ℓ nach Zingg sowie
- Rundungsgrad P_{DIEP} nach Diepenbroek oder P_{ee} bezüglich des trägheitsäquivalenten Ellipsoids.

Die folgenden geometrischen Parameter sind auf einen normierten Stein mit dem Volumen von $V = 1\ cm^3$ bezogen und sind ebenfalls in der Liste enthalten:

- Volumen ($V = 1\ cm^3$),
- Körperoberfläche,
- maximale Schattenfläche und
- Längen der Achsen s, i und ℓ des trägheitsäquivalenten Ellipsoids.

Die in der Liste aufgeführten hydraulischen Parameter

- Widerstandsbeiwert c_D,
- maximale Fallgeschwindigkeit v_{max} in Wasser bei T = 10,6°C,
- Reynoldszahl Re für $\nu = 1{,}29\ 10^{-6}\ m^2/s$,
- Beschleunigungsdauer t_1 und
- Beschleunigungsstrecke z_1

beziehen sich auf einen normierten Stein mit dem Volumen von $V = 1\ cm^3$ und der Dichte von $\rho = 2{,}5\ g/cm^3$.

Die typischen Bewegungsarten der in Wasser fallenden Steine können in jeweils einer kleinen Filmsequenz sowohl von der Seite als auch von oben betrachtet beobachtet werden.

4.1.1.3 Vergleich eines eigenen Steines „myRock“

Der Anwender kann über einen ihm vorliegenden Stein „myRock“ Informationen zu dessen Fallverhalten und Klassifikation erhalten.

Zunächst muss aus den 223 repräsentativen Steinen ein möglichst ähnlicher anhand von Vergleichsabbildungen oder anhand von Parametern ausgewählt werden. Dazu stehen dem Anwender verschiedene Auswahlmethoden zur Verfügung, zwischen denen er wählen kann. Dabei ist die Körpergestalt bezüglich der Form und der Rundheit zu beachten, die Größe des Steines spielt bei der Auswahl zunächst keine Rolle. Genauere Hinweise zur Auswahl und Bedienung sind in Kapitel 4.2 zu finden.

Nach dem Auffinden eines geometrisch ähnlichen Steines kann der Anwender in dem Dialogfeld „myRock“ das Volumen und die Dichte „seines“ Steines eingeben. Nun werden vom Informationssystem RockDataBase alle o. g. geometrischen und hydraulischen Parameter auf diesen Stein umgerechnet und im Infofenster angezeigt. Der Benutzer erhält hiermit eine recht gute Vorstellung von den Eigenschaften „seines“ Steines.

4.1.2 Parametergewinnung

4.1.2.1 Geometrische Parameter

Um die geometrischen Parameter eindeutig, reproduzierbar und exakt bestimmen zu können, mussten die 223 repräsentativen Steine zunächst digitalisiert werden. Dafür wurden alle Steine unter Zuhilfenahme einer räumlichen videometrischen Digitalisierung der Arbeitsgruppe 3D der Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e. V. (GFaI-Berlin e. V.) in konsistente, einfach geschlossene, mit einheitlicher Dreiecksorientierung versehene Dreiecksoberflächenmodelle überführt. Anhand dieser Steinmodelle der realen Steine konnten die geometrischen Parameter berechnet werden:

- **Achsenverhältnisse s/i und i/ℓ nach Zingg** (siehe 3.2.2)

  Für jedes digitale Steinmodell wurden die Hauptträgheitsmomente (siehe Anhang A) und daraus das trägheitsäquivalente Ellipsoid (siehe Anhang B), das die gleichen Hauptträgheitsmomente wie der Stein hat, bestimmt. Dabei wurden die Dichten des Steines und des Ellipsoids als konstant und gleich vorausgesetzt. Dieses Ellipsoid existiert immer und ist eindeutig bestimmt. Die Achsen des Ellipsoids sind die Hauptträgheitsachsen des Steines, die paarweise senkrecht aufeinander stehen. Die Längen s, i und ℓ der drei Achsen des Ellipsoids wurden für die Berechnung der Plattigkeit s/i und der Länglichkeit i/ℓ verwendet. Diese beiden Achsenverhältnisse des trägheitsäquivalenten Ellipsoids beschreiben gut die entsprechenden Achsenverhältnisse des Steines.

- **Rundungsgrad nach Diepenbroek** (siehe 3.2.3.1)

  Für jedes Steinmodell wurden die Hauptträgheitsachsen und die drei Schnittumrisslinien entlang den Hauptträgheitsachsen bestimmt. Für diese Umrisslinien wurde jeweils eine Fourier-Analyse durchgeführt und nach den Gleichungen (3.8) bis (3.13) der Rundungsgrad P_{DIEP} berechnet.

- **Rundungsgrad bezüglich des trägheitsäquivalenten Ellipsoids** (siehe 3.2.3.2)

  Für jeden Stein wurde die Abweichung der Oberfläche des Steinmodells von der des zugehörigen trägheitsäquivalenten Ellipsoids bestimmt und der Rundungsgrad P_{ee} nach den Gleichungen (3.14) und (3.15) berechnet.

- **Volumen** (siehe 3.2.1)

  Die Volumina wurden für die realen Steine mittels Tauchwägung nach Gleichung (3.5) bestimmt.

- **Körperoberfläche**

  Die Körperoberflächen wurden für die Steinmodelle mit Hilfe der Dreiecksnetze berechnet.

- **Maximale Schattenfläche**

  Von der Arbeitsgruppe 3D der GFaI-Berlin wurde ein Algorithmus zur Ermittlung der maximalen Schattenflächen der Steinmodelle entwickelt.

Die so gewonnenen geometrischen Parameter wurden folgendermaßen skaliert:

Größen	**Maßstabsfaktor**
Längen	$\sqrt[3]{V_{Stein}}$
Flächen	$\sqrt[3]{V_{Stein}^2}$
Volumina	V_{Stein}

Abbildung 4.1: Faktoren für die Skalierung der geometrischen Parameter der Steine

Anhand der Plattigkeit, der Länglichkeit und des Rundungsgrades konnte die Klassifikation der Steine und damit ihre Einordnung in den 3D-Merkmalraum eindeutig vorgenommen werden.

4.1.2.2 Hydraulische Falleigenschaften

Um die hydraulischen Parameter zu ermitteln, haben die Verfasser das Fallverhalten der 223 natürlichen Steine in einem wassergefüllten Falltank (Abbildung 4.2) untersucht.

Abbildung 4.2: Frontansicht des Falltanks am FG Konstruktiver Wasserbau

Die fallenden Steine wurden gleichzeitig sowohl von vorn (Seitenansicht, horizontale Kamera) als auch von oben (Draufsicht, vertikale Kamera) gefilmt. Aus den Videoaufnahmen der horizontalen Kamera wurde für jeden Stein der Widerstandsbeiwert aus der stationären Setzungsgeschwindigkeit bestimmt:

- **Widerstandsbeiwert**

  Bei der Fallbewegung eines Körpers in ruhendem Wasser handelt es sich um eine beschleunigte Bewegung, d. h. die Fallgeschwindigkeit nähert sich von null beginnend einer konstanten Endgeschwindigkeit an (Abbildung 4.3). Der Körper beschleunigt solange, bis der Widerstand des Wassers gleich den entgegengesetzten Kräften ist; es herrscht ein Gleichgewichtszustand. Die Bestimmung der Fallgeschwindigkeiten und der Widerstandsbeiwerte der Steine erfolgte in diesem stationären Bereich.

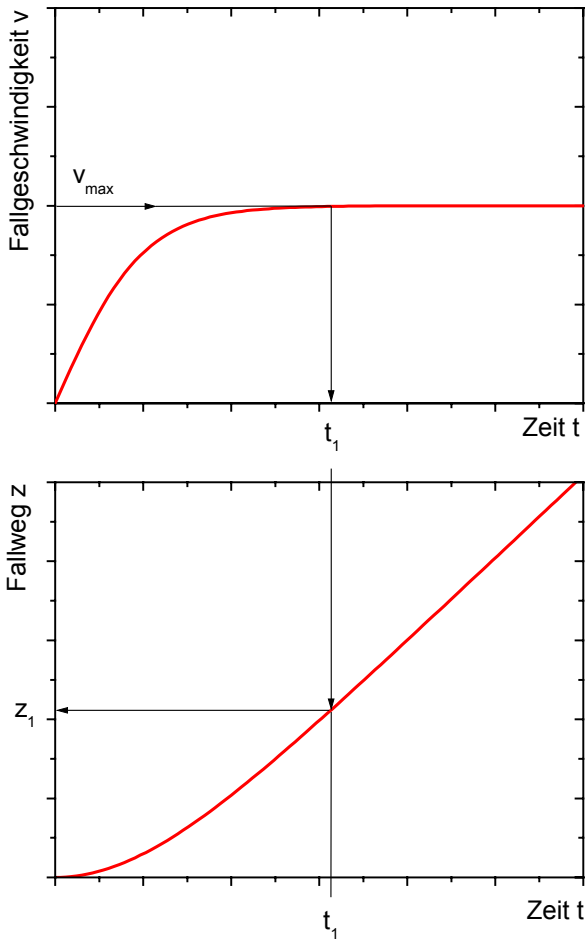


Abbildung 4.3: Endgeschwindigkeit v_{max}, Beschleunigungsdauer t_1 und Beschleunigungsstrecke z_1 für einen frei in Wasser fallenden Körper

Die stationären Setzungsgeschwindigkeiten wurden aus der vertikalen Strecke, die innerhalb von zehn aufeinanderfolgenden Einzelbildern von den Steinen zurückgelegt wurde, berechnet:

$$v_s = \frac{\Delta z}{\Delta t} = \frac{\Delta z}{0{,}4\,\mathrm{s}} \tag{4.1}$$

v_s : stationäre Setzungsgeschwindigkeit (vertikale Komponente)
Δz : vertikale Komponente des Weges, der in $\Delta t = 0{,}4$ s zurückgelegt wird
Δt : Zeit (hier $\Delta t = 0{,}4$ s).

Die dimensionslosen Widerstandsbeiwerte der Steine wurden nach Gleichung (2.3) unter Verwendung der stationären Setzungsgeschwindigkeiten (Gleichung (4.1)) und der maximalen Schattenflächen (siehe 4.1.2.1) bestimmt.

Die Widerstandsbeiwerte sind größenunabhängig; geometrisch ähnliche Körper haben den gleichen Widerstandsbeiwert. Eine Ausnahme bilden lediglich perfekt runde Körper (z. B. Kugeln), bei denen der Widerstandsbeiwert stark von der Reynoldszahl abhängig ist. Diese künstlichen Körper sind nicht Bestandteil dieser Veröffentlichung.

Die maximalen Fallgeschwindigkeiten, die Beschleunigungsdauern und die Beschleunigungsstrecken wurden aus der Lösung der Differentialgleichung, die das Fallverhalten der Steine in vertikaler Richtung beschreibt, berechnet:

- **Maximale Fallgeschwindigkeit**

  Die maximalen Fallgeschwindigkeiten wurden für jeden Stein nach Gleichung (2.5) berechnet.

- **Beschleunigungsdauer**

  Die Beschleunigungsdauern wurden nach folgender Gleichung berechnet:

$$t_1 = \frac{\operatorname{ar\,cosh}\left(1/\sqrt{0{,}05}\right)}{\sqrt{\dfrac{c_D\,\rho_W\,A_{St}\,g\,(\rho_K - \rho_W)}{2\,V_K\,\rho_K^2}}} \tag{4.2}$$

t_1 : Beschleunigungsdauer
c_D : dimensionsloser Widerstandsbeiwert
A_{St} : maximale Schattenfläche
V_K : Volumen des Körpers
ρ_K : Dichte des Körpers
ρ_W : Dichte des Wassers
g : Erdbeschleunigung.

- **Beschleunigungsstrecke**

  Die Beschleunigungsstrecken wurden nach folgender Gleichung berechnet:

$$z_1 = \frac{2\,V_K\,\rho_K}{c_D\,\rho_W\,A_{St}}\,\ln\cosh\left(\sqrt{\frac{c_D\,\rho_W\,A_{St}\,g\,(\rho_K-\rho_W)}{2\,V_K\,\rho_K^2}}\,t_1\right) \tag{4.3}$$

z_1 : Beschleunigungsstrecke
t_1 : Beschleunigungsdauer
c_D : dimensionsloser Widerstandsbeiwert
A_{St} : maximale Schattenfläche
V_K : Volumen des Körpers
ρ_K : Dichte des Körpers
ρ_W : Dichte des Wassers
g : Erdbeschleunigung.

Die Reynoldszahlen der Steine wurden für die maximalen Fallgeschwindigkeiten berechnet und beziehen sich auf die größte Körperabmessung:

- **Reynoldszahl**

  Die Reynoldszahlen wurden nach folgender Gleichung berechnet:

$$Re = \frac{v_{max}\cdot\ell}{\nu} \tag{4.4}$$

Re : Reynoldszahl
v_{max} : maximale Fallgeschwindigkeit
ℓ : längste Achse des zugehörigen trägheitsäquivalenten Ellipsoids
ν : kinematische Viskosität des Wassers (hier $\nu = 1{,}29\ 10^{-6}\ m^2/s$).

Die hydraulischen Parameter maximale Fallgeschwindigkeit, Beschleunigungsdauer, Beschleunigungsstrecke und Reynoldszahl werden für den normierten Stein mit den geometrischen Parametern des normierten Steines berechnet, die hydraulischen Parameter des eigenen Steines mit den geometrischen Parametern des eigenen Steines.

Die Beschreibung der typischen Bewegungsarten der Steine ist in Worten sehr schwierig. Daher ist in dem Informationssystem RockDataBase für jeden Stein ein Video, das den fallenden Stein von der Seite und von oben zeigt, abrufbar.

4.2 Handhabung des Informationssystems RockDataBase

Mit Hilfe von RockDataBase kann jeder der 223 Steine ausgewählt und angezeigt werden. Für den ausgewählten Stein werden die Gestaltparameter sowie seine im Labor ermittelten hydraulischen Falleigenschaften angegeben.

4.2.1 Auswahl eines Steines

Die Auswahl des Steines kann über drei verschiedene Methoden erfolgen:

4.2.1.1 Auswahl im 3D-Merkmalraum

Im 3D-Merkmalraum sind alle in der Datenbank enthaltenen Steine durch einen Punkt repräsentiert. Die Auswahl erfolgt durch einfaches Anklicken (Abbildung 4.4).

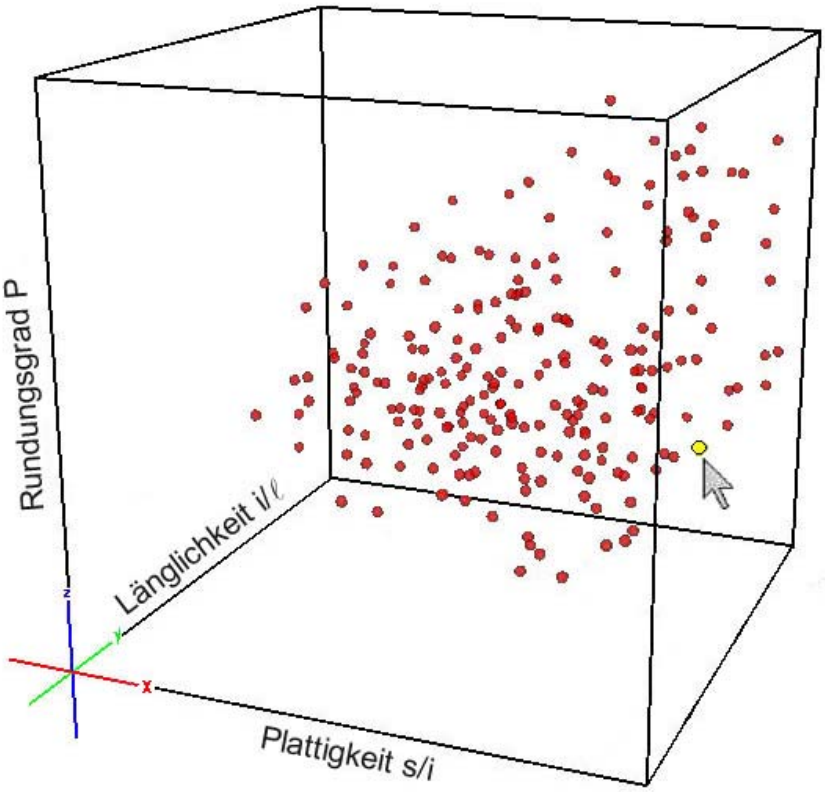


Abbildung 4.4: 3D-Merkmalraum
Mit Hilfe der Maus kann ein Stein ausgewählt werden, der dann gelb hervorgehoben wird.

4.2.1.2 Auswahl per Ansicht (Selection by View)

Durch die Wahl des Buttons `Selection by View` wird ein Dialogfeld aktiviert (Abbildung 4.5).

Dieses Dialogfeld stellt eine Matrix aus typischen Vertretern der Formen flach (tabular), kubisch (equant), flachstängelig (bladed) und stängelig (prolate) sowie den Rundheitsklassen von vollständig rund (well rounded) bis vollständig kantig (angular) dar.

Durch Anklicken eines Steines in der Matrix wird nur noch derjenige Bereich, den der gewählte Stein repräsentiert, im 3D-Merkmalraum angezeigt. D. h. alle Bereiche, die NICHT dem gewählten Vertreter entsprechen, werden ausgeblendet. Einzelne Steine des gewählten Bereiches werden dann durch Anklicken (siehe 4.2.1.1) im reduzierten 3D-Merkmalraum ausgewählt.

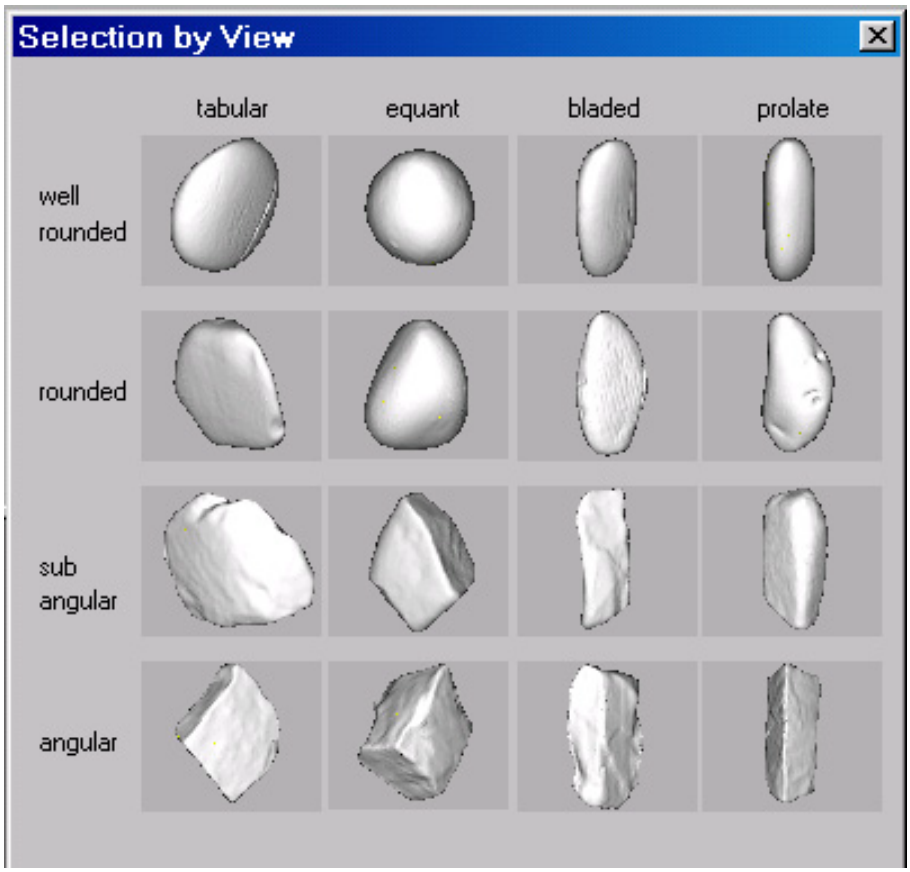


Abbildung 4.5: Dialogfeld „Selection by View“

4.2.1.3 Auswahl per Parameter (Selection by Parameters)

Durch die Wahl des Buttons `Selection by Paramters` wird ein Dialogfeld aktiviert (Abbildung 4.6).

Der obere Teil dieses Dialogfeldes ist eine Eingabemaske für die Parameter s/i, i/ℓ und P. Es können wahlweise für diese Parameter einschränkende Grenzen gewählt werden. Gültige Eingaben sind Zahlen von 0.0 bis 1.0. Der 3D-Merkmalraum wird entsprechend der getroffenen Auswahl angezeigt. Einzelne Steine werden dann durch Anklicken (siehe 4.2.1.1) im reduzierten 3D-Merkmalraum ausgewählt.

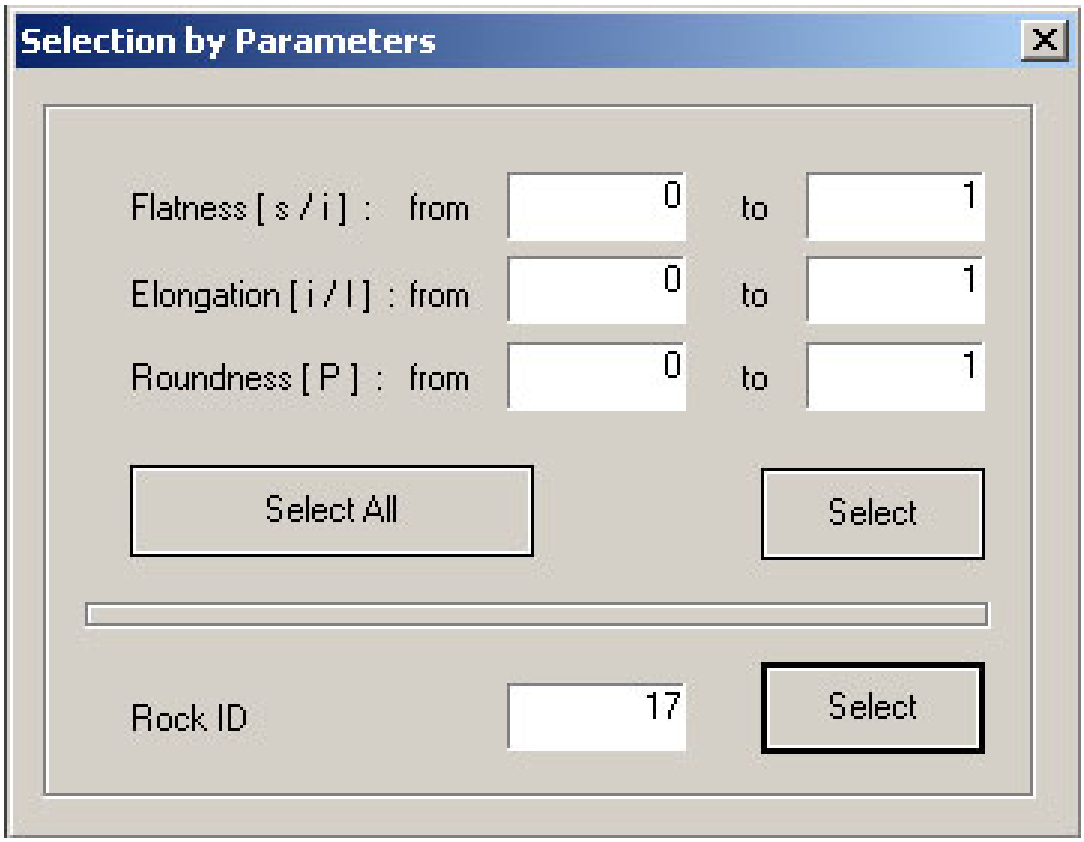


Abbildung 4.6: Dialogfeld „Selection by Parameters“

Der untere Teil ist eine Eingabemaske für die Stein-Identifikationsnummer rockID. In dieser Maske können Steine direkt per Eingabe ihrer Stein-Identifikationsnummer ausgewählt werden. Gültige Eingaben sind ganze Zahlen von 0 bis 222.

4.2.2 Ansichten

Die Informationsdatenbank RockDataBase unterstützt zwei verschiedene Konzepte der Rundheitsklassifikation: Den Rundungsgrad nach Diepenbroek (DIEP) und den Rundungsgrad bezüglich des trägheitsäquivalenten Ellipsoids (eqivalent ellipsoid - ee).

Alle Fenster sind mit einer mausgesteuerten „Move-and-Zoom“-Funktion versehen:

linke Maustaste (halten, Maus bewegen): Objekt drehen,

rechte Maustaste (halten, Maus bewegen): Objekt zoomen.

4.2.2.1 Ansicht DIEP

Die Ansicht nach Diepenbroek ist in sechs Fenstern dargestellt (Abbildung 4.7):

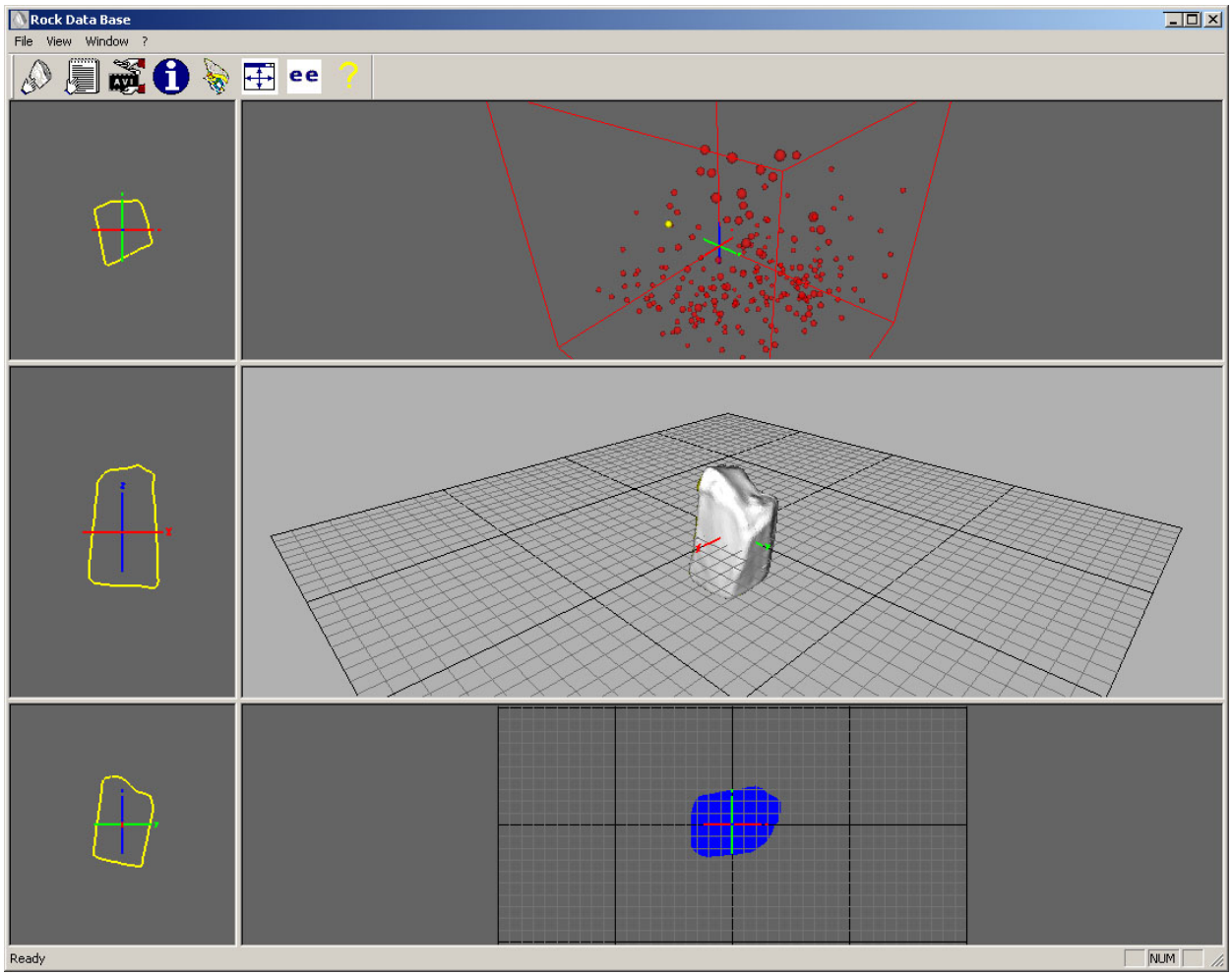


Abbildung 4.7: Ansicht nach Diepenbroek (DIEP)

Die Fenster der linken Spalte stellen drei orthogonal aufeinander stehende Schnitte längs der Hauptträgheitsachsen des Steines dar. Von diesen Schnittumrisslinien wurden die Rundungsgrade mittels Fourier-Analyse ermittelt. Gemittelt ergeben sie den Rundungsgrad P_{DIEP}.

Der Rundungsgrad P_{DIEP} führt zusammen mit den Achsenverhältnissen s/i und i/ℓ des trägheits-äquivalenten Ellipsoids zu der Einordnung in den 3D-Merkmalraum, dargestellt im Fenster oben rechts.

Der ausgewählte Stein ist im Fenster rechts-Mitte dargestellt.

Im Fenster rechts-unten ist die größte Schattenfläche des Steines dargestellt.

4.2.2.2 Ansicht ee

Die Ansicht bezüglich des trägheitsäquivalenten Ellipsoids ist in vier Fenstern dargestellt (Abbildung 4.8):

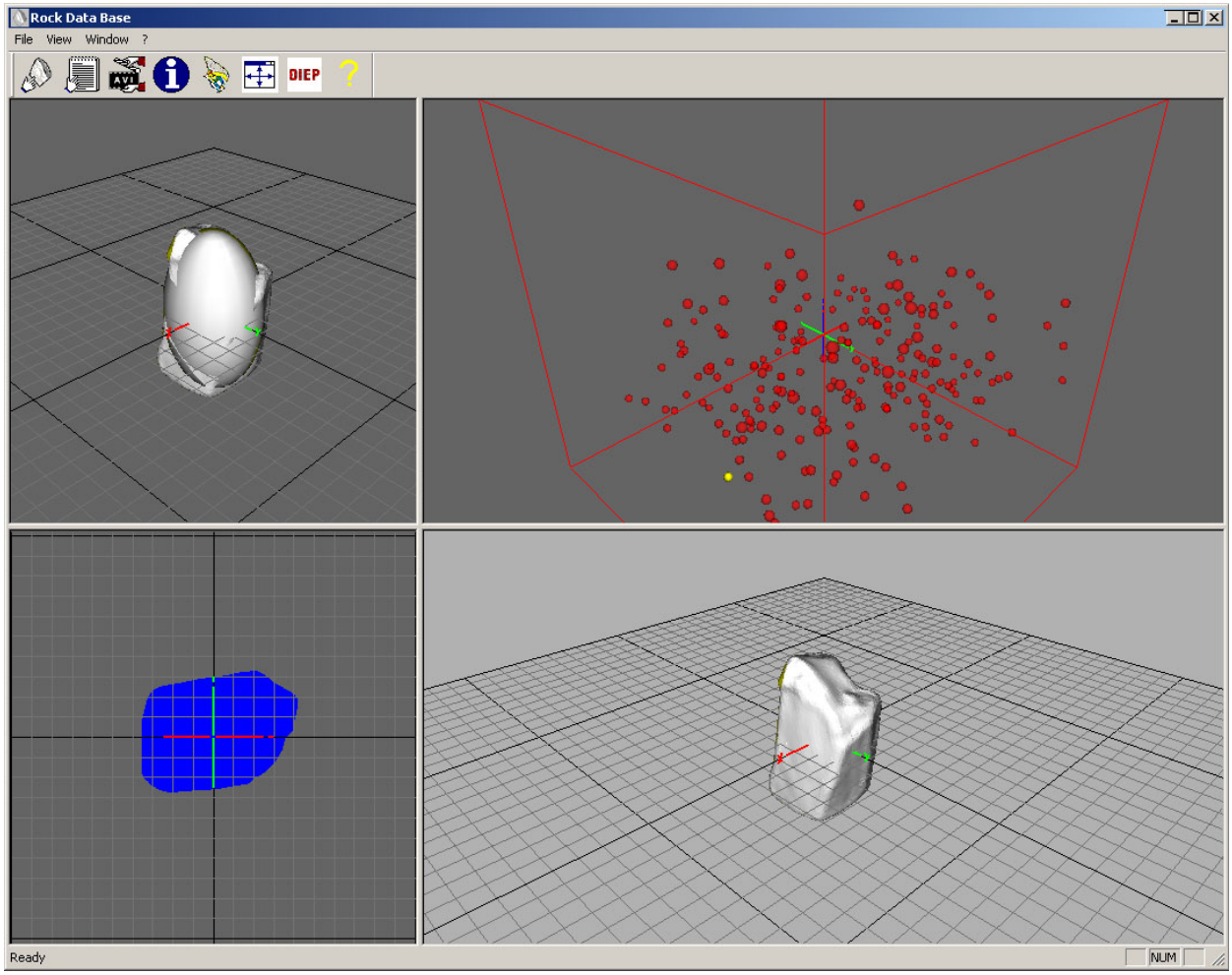


Abbildung 4.8: Ansicht entsprechend dem trägheitsäquivalenten Ellipsoid

Das Fenster oben-links stellt den Stein zusammen mit seinem trägheitsäquivalenten Ellipsoid dar. Die Abweichung der gesamten Steinkontur von dem trägheitsäquivalenten Ellipsoid wird als Rundungsgrad P_{ee} definiert.

Der Rundungsgrad P_{ee} führt zusammen mit den Achsenverhältnissen s/i und i/ℓ des trägheits-äquivalenten Ellipsoids zu der Einordnung in den 3D-Merkmalraum, dargestellt im Fenster oben-rechts.

Der ausgewählte Stein ist im Fenster unten-rechts dargestellt.

Im Fenster links-unten ist die größte Schattenfläche des Steines dargestellt.

4.2.2.3 Single Window / Split Screen

Durch die Wahl des Buttons `Single Window / Split Screen` wird das aktive Fenster (hellgrau) als einzelnes Fenster angezeigt. Durch wiederholte Wahl des Buttons wird wieder auf die Anzeige mit sechs Fenstern (Ansicht DIEP) oder vier Fenstern (Ansicht ee) zurückgestellt.

4.2.3 Informationen

Für jeden Stein sind Informationen verfügbar, die wahlweise per Button oder Menü angezeigt werden können.

4.2.3.1 Hydraulisches Fallverhalten (Video)

Von jedem Stein wurde im Labor ein Film angefertigt, welcher den fallenden Stein in Seitenansicht und Draufsicht zeigt. Durch Drücken des Buttons `Play Video` wird der Windows Media Player geöffnet und das Video gezeigt (Abbildung 4.9).

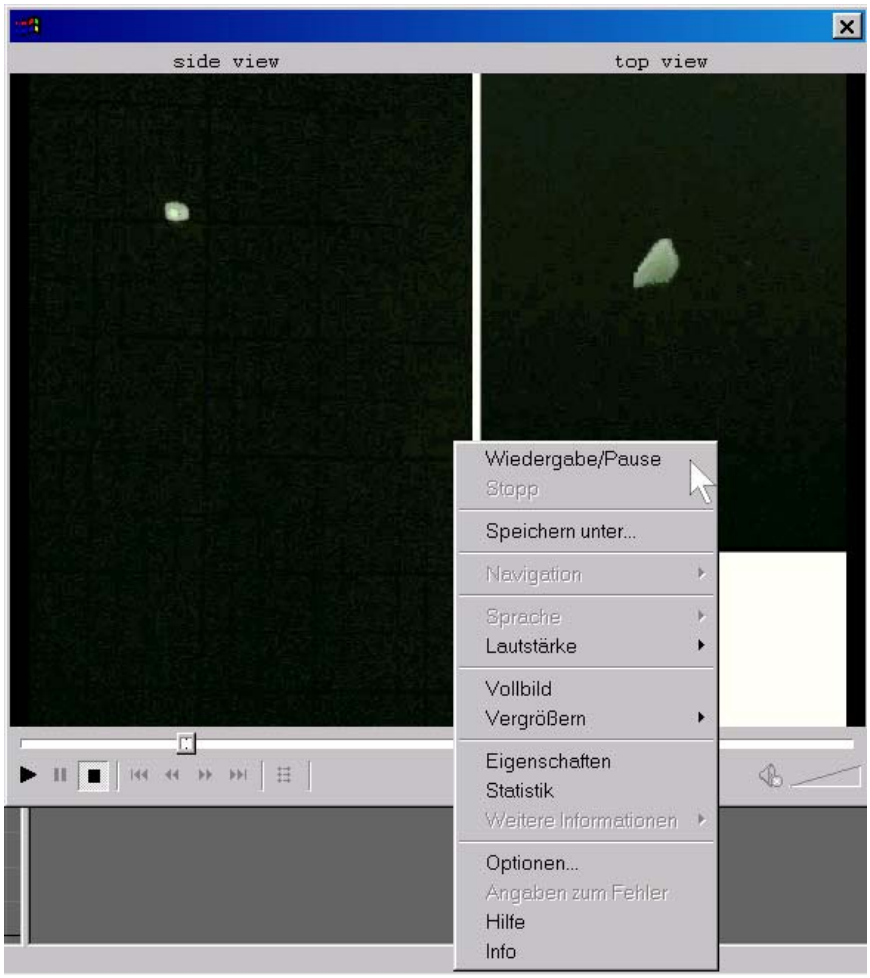


Abbildung 4.9: Windows Media Player, Video des fallenden Steines

Der Benutzer kann damit die charakteristische Fallbewegung des ausgewählten Steines betrachten.

Der Windows Media Player kann frei auf dem Bildschirm vergrößert und positioniert werden. Das Abspielverhalten kann per rechtem Mausklick verändert werden.

4.2.3.2 Infofenster (Info Box)

Per Button `Info Box` erscheint das Infofenster. Hier werden zu jedem Stein folgende Informationen angegeben:

Rock ID (Stein Identifikationsnummer)

Shape Parameters (Gestaltparameter):

- Achsenverhältnisse s/i und i/ℓ nach Zingg
- Rundungsgrad nach Diepenbroek P_{DIEP} bzw. bezüglich des trägheitsäquivalenten Ellipsoids P_{ee}.

Parameters of Normalized Rock (Paramter des normierten Steines):
Folgende Eigenschaften des gewählten Steines werden für das Volumen von 1 cm^3 und die Dichte von 2,5 g/cm^3 angegeben:

- Volumen, Oberfläche, maximale Schattenfläche, Längen der Achsen s, i und ℓ des trägheits-äquivalenten Ellipsoids,
- Widerstandsbeiwert,
- maximale Fallgeschwindigkeit,
- Reynoldszahl,
- Beschleunigungsdauer und
- Beschleunigungsstrecke.

myRock Parameters (Parameter des eigenen Steines):
Alle o. g. Parameter und Eigenschaften des gewählten eigenen Steines **myRock** (siehe 4.2.4) werden hier angegeben.

4.2.4 myRock

Auf der Grundlage des gewählten und angezeigten Steines kann der Benutzer „seinen“ Stein angeben und dessen Eigenschaften anzeigen lassen.

Mit der Auswahl des Buttons `myRock` erscheint ein Dialogfeld (Abbildung 4.10):

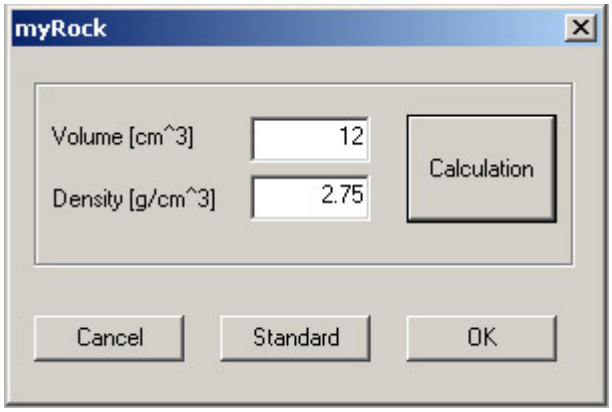


Abbildung 4.10: Dialogfeld „myRock“

In diesem Dialogfeld kann der Benutzer ein Steinvolumen und eine Steindichte seiner Wahl angeben. Mit `Calculation` werden alle myRock-Parameter auf der Grundlage dieser Angaben ermittelt und im unteren Teil des Infofensters angegeben. Mit `Standard` werden die Eingabefelder auf Standardwerte zurückgesetzt.

Literatur

Aus dem Fachgebiet Konstruktiver Wasserbau:

Stückrath, T., Meng, J. und Völker, G., 1996: Untersuchungen zum Fallverhalten würfelförmiger Einzelkörper in Wasser. Mitteilungen aus dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Berlin, Nr. 134, S. 7-99.

Die Diplomarbeiten von: Beutel, A. (2001), Kaufmann, S. (1997), Lömker, R. (1999), Meng, J. (1995), Schütze, M. (2000), Strecker, M. (1998), Ullmann, C. (1998), Völker, G. (1995).

Von der Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e. V.:

Bohnet, M., Gast, R. und Paul, L., 2001: Gewinnung physikalischer Größen aus 3D-Dreiecks-polyedermodellen von Steinen zu deren Klassifizierung. 3D-Nordost Tagungsband, 4. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Verarbeitung, Modellierung und Auswertung von 3D-Daten, S. 69-74.

Benutzte Quellen:

Baba, J. und Komar, P. D., 1981: Settling velocities of irregular grains at low Reynolds numbers. Jour. Sed. Petrology, Vol. 51, No. 1, S. 121-128.

Baier, V., 1996: Bestimmung und Beschreibung der Form von Schwebstoffpartikeln mittels Unterwasservideomikroskop und digitaler Bildverarbeitung. Mitteilung Heft 57, Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr in München.

Barrett, P. J., 1980: The shape of rock particles, a critical review. Sedimentology, Bd. 27, S. 291-303.

Bronstein, I. N., Semendjajew, K. A., Musiol, G. und Mühlig, H., 1999: Taschenbuch der Mathematik. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main.

Diepenbroek, M., 1993: Die Beschreibung der Korngestalt mit Hilfe der Fourier-Analyse: Parametrisierung der morphologischen Eigenschaften von Sedimentpartikeln. Mitteilungen des Alfred-Wegener-Institutes für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven.

Dobkins, J. E. & Folk, R. L., 1970: Shape development on Tahiti-Nui. Jour. Sed. Petrology, Bd. 40, S. 1167-1203.

Eißele, K. (1957): Kritische Betrachtung einer Methode zur Bestimmung des Rundungsgrades von Sandkörnern. In: Lotze, Fr., Schindewolf, O. H. und Schwarzbach, M., E. (Hrsg.): Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Bd. 9, Schweizerbart'sche Verlagsbuch-handlung, Stuttgart, S. 410-419.

Huller, D., 1985: Quantitative Formanalyse von Partikeln. Fortschrittsberichte VDI, Reihe 3: Verfahrenstechnik, Nr. 101, VDI-Verlag, Düsseldorf.

Komar, P. D. und Reimers, C. E., 1978: Grain shape effects on settling rates. Jour. Geol., Vol. 86, S. 193-209.

Köster, E., 1964: Granulometrische und morphometrische Meßmethoden an Mineralkörnern, Steinen und sonstigen Stoffen. Enke, Stuttgart, 336 S.

Krumbein, W. C., 1941: Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. Jour. Sed. Petrology, Bd. 11, S. 64-72.

Landau, L. D. und Lifschitz, J. M., 1984: Lehrbuch der theoretischen Physik. Band I, Akademieverlag, Berlin.

McLane, M., 1995: Sedimentology. Oxford University Press, New York, Oxford.

Mende, D. und Simon, G., 1983: Physik Gleichungen und Tabellen. Fachbuchverlag, Leipzig.

Pettijohn, F. J., 1957: Sedimentary Rocks. Harper & Bros, New York.

Powers, M. C., 1953: A new roundness scale for sedimentary particles. Jour. Sed. Petrology, Bd. 23, S. 117-119.

Russell, R. D. & Taylor, R. E., 1937: Roundness and shape of Mississippi river sands. Jour. Geol., Bd. 45, S. 225-267.

Tucker, M. E., 1985: Einführung in die Sedimentpetrologie. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.

Wadell, H., 1932: Volume, shape and roundness of rock particles. Jour. Geol., Bd. 40, S. 443-451.

Wadell, H., 1934: Shape determinations of large sedimental rock fragments. Pan-American-Geologist, 61, S. 187-220.

Wentworth, C. K., 1919: A laboratory and field study of cobble abrasion. Jour. Geol., Bd. 40, S. 507-521.

Zingg, Th., 1935: Beitrag zur Schotteranalyse. Schweiz. mineralog. und petrog. Mitt., Bd. 15, S. 39-140.

Anhang A
Trägheitsmomente des Steinoberflächenmodells

Ausgangspunkt für die Berechnung der Trägheitsmomente und anderer Parameter des Steinmodells ist eine gedachte Zerlegung des Volumens des Dreiecksoberflächenmodells in Teilpyramiden (Abbildung A.1). Deren Spitzen liegen sämtlich im Koordinatenursprung im Inneren des Körpers, und ihre Grundflächen werden durch die Dreiecke des Gitternetzes gebildet. Sei eine Pyramide $T = [\overrightarrow{P_0}, \overrightarrow{P_1}, \overrightarrow{P_2}, \overrightarrow{P_3}]$ mit den vier Eckpunkten $\overrightarrow{P_0} = [0,0,0]$, $\overrightarrow{P_1} = [x_1, y_1, z_1]$, $\overrightarrow{P_2} = [x_2, y_2, z_2]$ und $\overrightarrow{P_3} = [x_3, y_3, z_3]$ beliebig gewählt. Dann ergeben sich das Volumen, der Schwerpunkt und die Dreiecksgrundfläche aus folgenden Gleichungen:

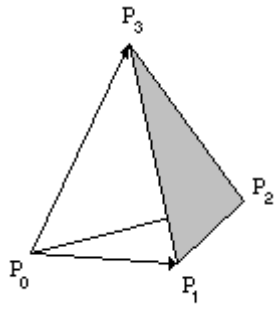


Abbildung A.1: Teilpyramide

$$V = \frac{1}{6} \cdot < \overrightarrow{P_1} \times \overrightarrow{P_2}, \overrightarrow{P_3} >$$

$$\vec{S} = \frac{1}{4} \cdot (\overrightarrow{P_1} + \overrightarrow{P_2} + \overrightarrow{P_3})$$

$$A = \frac{1}{2} \cdot \left\| ((\overrightarrow{P_2} - \overrightarrow{P_1}) \times (\overrightarrow{P_3} - \overrightarrow{P_1})) \right\|$$

Oder in den Komponenten ausgedrückt:

$$V = \frac{1}{6} \cdot \left(x_1 y_2 z_3 - x_1 z_2 y_3 - x_2 y_1 z_3 + x_2 z_1 y_3 + x_3 y_1 z_2 - x_3 z_1 y_2 \right) \tag{A.1}$$

$$S_x = \frac{1}{4} \cdot \left(x_1 + x_2 + x_3 \right)$$

$$S_y = \frac{1}{4} \cdot \left(y_1 + y_2 + y_3 \right)$$

$$S_z = \frac{1}{4} \cdot \left(z_1 + z_2 + z_3 \right) \tag{A.2}$$

$$A = \frac{1}{2}[((y_2 - y_1)\cdot(z_3 - z_1) - (z_2 - z_1)\cdot(y_3 - y_1))^2 + ((x_2 - x_1)\cdot(z_3 - z_1) - (z_2 - z_1)\cdot(x_3 - x_1))^2 + ((x_2 - x_1)\cdot(y_3 - y_1) - (y_2 - y_1)\cdot(x_3 - x_1))^2]^{\frac{1}{2}} \tag{A.3}$$

Das Volumen wird über das Spatprodukt der die Pyramide aufspannenden Vektoren ermittelt und ist somit vorzeichenbehaftet in Abhängigkeit vom Umlaufsinn der Dreiecksgrundfläche. Diese Eigenschaft erlaubt es, das Volumen, den Schwerpunkt und die Trägheitsmomente des Gesamtkörpers auch dann zu berechnen, wenn der Koordinatenursprung nicht im Inneren des Körpers liegt oder der Körper nicht konvex ist.

Der für die Berechnung der Hauptträgheitsachsen wichtige sogenannte Trägheitstensor T ist eine reelle, symmetrische, positiv definite Matrix, deren sechs unabhängige Komponenten jeweils durch ein Volumenintegral definiert sind [Landau, Lifschitz, 1984].

$$T = \begin{pmatrix} J_{x,x} & J_{x,y} & J_{x,z} \\ J_{x,y} & J_{y,y} & J_{y,z} \\ J_{x,z} & J_{y,z} & J_{z,z} \end{pmatrix}$$

mit

$$J_{x,x} = \iiint \rho(x,y,z)\cdot(y^2 + z^2)\,dx\,dy\,dz$$

$$J_{y,y} = \iiint \rho(x,y,z)\cdot(x^2 + z^2)\,dx\,dy\,dz$$

$$J_{z,z} = \iiint \rho(x,y,z)\cdot(x^2 + y^2)\,dx\,dy\,dz$$

$$J_{x,y} = \iiint -\rho(x,y,z)\cdot x\cdot y\,dx\,dy\,dz$$

$$J_{y,z} = \iiint -\rho(x,y,z)\cdot y\cdot z\,dx\,dy\,dz$$

$$J_{x,z} = \iiint -\rho(x,y,z)\cdot x\cdot z\,dx\,dy\,dz$$

Dabei ist $\rho(x,y,z)$ die Massendichte, und die Integration erfolgt über das gesamte Volumen des Körpers. Bei homogener Massendichte $\rho = \text{const}$ lassen sich die Integrale für die Pyramiden analytisch lösen. Zu lösen sind die Integrale folgender Form mit verschiedenen Integranden F und einer Integration über das Volumen der Pyramide (worin die eigentliche Schwierigkeit besteht):

$$J = \iiint F(x,y,z)\,dx\,dy\,dz$$

Lösungsansatz: Variablen- oder Gebietstransformation für das Dreifachintegral

[Bronstein et al., 1999]

$$x = x(u,v,w) = x_1 \cdot u + x_2 \cdot v + x_3 \cdot w$$

$$y = y(u,v,w) = y_1 \cdot u + y_2 \cdot v + y_3 \cdot w$$

$$z = z(u,v,w) = z_1 \cdot u + z_2 \cdot v + z_3 \cdot w$$

Durch diese Transformationen wird das Innere der Pyramide eindeutig auf die Einheitspyramide [(0,0,0), (1,00), (0,1,0), (0,0,1)] im Parameterraum (u,v,w) abgebildet.

Die Funktionaldeterminante dieser Abbildung ist:

$$D = \left| \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial z}{\partial u} \\ \frac{\partial x}{\partial v} & \frac{\partial y}{\partial v} & \frac{\partial z}{\partial v} \\ \frac{\partial x}{\partial w} & \frac{\partial y}{\partial w} & \frac{\partial z}{\partial w} \end{pmatrix} \right| = \left| \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{pmatrix} \right|$$

D ist eine Konstante und kann somit vor das Integral gezogen werden. Damit vereinfacht sich das Dreifachintegral zu:

$$J = D \cdot \int_0^1 \int_0^{1-u} \int_0^{1-u-v} F(x(u,v,w), y(u,v,w), z(u,v,w))\, dw\, dv\, du$$

Durch diese Wahl der Integrationsgrenzen wird gerade über die oben erwähnte Einheitspyramide integriert. Für F = 1 erhält man das Volumen der Pyramide, also:

$$V = D \cdot \int_0^1 \int_0^{1-u} \int_0^{1-u-v} 1\, dw\, dv\, du$$

$$V = D \cdot \int_0^1 \int_0^{1-u} (1 - u - v)\, dv\, du$$

$$V = D \cdot \int_0^1 \left(\frac{1}{2} - u + \frac{1}{2} \cdot u^2\right) du$$

$$V = \frac{1}{6} \cdot D$$

Wie man sieht, ist die Funktionaldeterminante D gerade das 6fache des Volumens der Pyramide:

$$D = 6 \cdot V \qquad \text{(A.4)}$$

Kommen wir nun zu den Trägheitsmomenten der Pyramide:

$$J_{x,x} = \rho \cdot \iiint (y^2 + z^2)\, dz\, dy\, dx$$

$$J_{x,x} = \rho \cdot D \cdot \int_0^1 \int_0^{1-u} \int_0^{1-u-v} [(y_1 \cdot u + y_2 \cdot v + y_3 \cdot w)^2 + (z_1 \cdot u + z_2 \cdot v + z_3 \cdot w)^2]\, dw\, dv\, du$$

Nach einer etwas aufwändigen aber dennoch elementaren Rechnung erhält man:

$$J_{x,x} = \frac{\rho \cdot D}{60} \cdot (y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + y_1 \cdot y_2 + y_1 \cdot y_3 + y_2 \cdot y_3 + z_1^2 + z_2^2 + z_3^2 + z_1 \cdot z_2 + z_1 \cdot z_3 + z_2 \cdot z_3)$$

was sich weiter umformen lässt zu:

$$J_{x,x} = \frac{\rho \cdot D}{120} \cdot [y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + (y_1 + y_2 + y_3)^2 + z_1^2 + z_2^2 + z_3^2 + (z_1 + z_2 + z_3)^2]$$

mit (A.4) ergibt sich:

$$J_{x,x} = \frac{\rho \cdot V}{20} \cdot [y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + z_1^2 + z_2^2 + z_3^2 + (y_1 + y_2 + y_3)^2 + (z_1 + z_2 + z_3)^2]$$

Analoge Rechnungen führen zu $J_{y,y}$ und $J_{z,z}$ und man erhält:

$$J_{y,y} = \frac{\rho \cdot V}{20} \cdot [x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + z_1^2 + z_2^2 + z_3^2 + (x_1 + x_2 + x_3)^2 + (z_1 + z_2 + z_3)^2]$$

$$J_{z,z} = \frac{\rho \cdot V}{20} \cdot [x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + (x_1 + x_2 + x_3)^2 + (y_1 + y_2 + y_3)^2]$$

Hier nun die Rechnung für die gemischten Komponenten des Trägheitstensors:

$$J_{x,y} = -\rho \cdot \iiint x \cdot y\, dz\, dy\, dx$$

$$J_{x,y} = -\rho \cdot D \cdot \int_0^1 \int_0^{1-u} \int_0^{1-u-v} (x_1 \cdot u + x_2 \cdot v + x_3 \cdot w) \cdot (y_1 \cdot u + y_2 \cdot v + y_3 \cdot w)^2\, dw\, dv\, du$$

$$J_{x,y} = -\frac{\rho \cdot D}{120} \cdot (2x_1y_1 + 2x_2y_2 + 2x_3y_3 + x_1y_2 + x_1y_3 + x_2y_1 + x_2y_3 + x_3y_1 + x_3y_2)$$

$$J_{x,y} = -\frac{\rho \cdot D}{120} \cdot [x_1y_1 + x_2y_2 + x_3y_3 + (x_1 + x_2 + x_3) \cdot (y_1 + y_2 + y_3)]$$

mit (A.4) ergibt sich:

$$J_{x,y} = -\frac{\rho \cdot V}{20} \cdot [x_1y_1 + x_2y_2 + x_3y_3 + (x_1 + x_2 + x_3) \cdot (y_1 + y_2 + y_3)]$$

Auf die selbe Weise ergeben sich $J_{x,z}$ und $J_{y,z}$:

$$J_{x,z} = -\frac{\rho \cdot V}{20} \cdot [x_1 z_1 + x_2 z_2 + x_3 z_3 + (x_1 + x_2 + x_3) \cdot (z_1 + z_2 + z_3)]$$

$$J_{y,z} = -\frac{\rho \cdot V}{20} \cdot [y_1 z_1 + y_2 z_2 + y_3 z_3 + (y_1 + y_2 + y_3) \cdot (z_1 + z_2 + z_3)]$$

Dabei ist V das bereits bestimmte Volumen der Pyramide.

Das Volumen des gesamten Steinmodells ergibt sich aus der Summation aller Pyramidenvolumina. Analoges gilt für die Oberfläche und den Trägheitstensor. Der Schwerpunkt des Steinmodells wird durch eine gewichtete Mittelwertbildung der einzelnen Pyramidenschwerpunkte bestimmt. Die Gewichte dabei sind die Volumina der Teilpyramiden geteilt durch das Volumen des Gesamtkörpers. Vor der Berechnung der Tensorkomponenten muss der Gesamtkörper schwerpunktzentriert werden, um die Hauptträgheitsmomente zu erhalten.

Ist der Trägheitstensor des Gesamtkörpers bestimmt, ergeben sich die Hauptträgheitsmomente J_x, J_y und J_z und die Hauptträgheitsachsen aus dem Eigenwertproblem $T \cdot x = J \cdot x$, wobei die Eigenwerte die Hauptträgheitsmomente und die Rechtseigenvektoren die Hauptträgheitsachsen sind. Als numerisches Eigenwertverfahren wurde das Jacobiverfahren verwendet.

Anhang B
Berechnung des trägheitsäquivalenten Ellipsoids

Die Hauptträgheitsmomente [J_x, J_y, J_z] eines Ellipsoids lassen sich als Funktion seiner Halbachsen [a, b, c] angeben. Weiterhin bezeichne ρ eine konstante Massendichte und V das Volumen des Ellipsoids. O. B. d. A. sei außerdem $J_x \geq J_y \geq J_z$ vorausgesetzt. Nach Mende, Simon [1983] gilt:

$$J_x = \frac{1}{5} \cdot (\rho \cdot V) \cdot (b^2 + c^2) \tag{B.1}$$

$$J_y = \frac{1}{5} \cdot (\rho \cdot V) \cdot (a^2 + c^2) \tag{B.2}$$

$$J_z = \frac{1}{5} \cdot (\rho \cdot V) \cdot (a^2 + b^2) \tag{B.3}$$

Umgekehrt ergeben sich die Halbachsen des Ellipsoids in Abhängigkeit vorgegebener Hauptträgheitsmomente auf folgendem Weg:

$$\begin{aligned} J_x + J_y - J_z &= \frac{1}{5} \cdot (\rho \cdot V) \cdot (b^2 + c^2 + a^2 + c^2 - a^2 - b^2) \\ &= \frac{2}{5} \cdot (\rho \cdot V) \cdot c^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_y + J_z - J_x &= \frac{1}{5} \cdot (\rho \cdot V) \cdot (a^2 + c^2 + a^2 + b^2 - b^2 - c^2) \\ &= \frac{2}{5} \cdot (\rho \cdot V) \cdot a^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_x + J_z - J_y &= \frac{1}{5} \cdot (\rho \cdot V) \cdot (b^2 + c^2 + a^2 + b^2 - a^2 - c^2) \\ &= \frac{2}{5} \cdot (\rho \cdot V) \cdot b^2 \end{aligned}$$

Dies gilt genau dann, wenn (in Reihenfolge, d. h. $a \leq b \leq c$)

$$a = \sqrt{\frac{5}{2 \cdot \rho \cdot V}} \cdot \sqrt{J_y + J_z - J_x} = \frac{s}{2} \tag{B.4}$$

$$b = \sqrt{\frac{5}{2 \cdot \rho \cdot V}} \cdot \sqrt{J_x + J_z - J_y} = \frac{i}{2} \tag{B.5}$$

$$c = \sqrt{\frac{5}{2 \cdot \rho \cdot V}} \cdot \sqrt{J_x + J_y - J_z} = \frac{\ell}{2} \tag{B.6}$$

Das Volumen des Ellipsoids erhält man bei gegebenen Hauptträgheitsmomenten und gegebener konstanter Massendichte mit (B.4), (B.5) und (B.6) wie folgt:

$$V = \frac{4}{3}\pi \cdot a \cdot b \cdot c$$

$$V = \frac{4}{3}\pi \cdot \sqrt{\frac{5}{2 \cdot \rho \cdot V}} \cdot \sqrt{J_y + J_z - J_x} \cdot \sqrt{\frac{5}{2 \cdot \rho \cdot V}} \cdot \sqrt{J_x + J_z - J_y} \cdot \sqrt{\frac{5}{2 \cdot \rho \cdot V}} \cdot \sqrt{J_x + J_y - J_z}$$

$$V = \frac{4}{3}\pi \cdot \left(\frac{5}{2 \cdot \rho \cdot V}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{J_y + J_z - J_x} \cdot \sqrt{J_x + J_z - J_y} \cdot \sqrt{J_x + J_y - J_z}$$

$$V = \sqrt{\frac{250 \cdot \pi^2}{9}} \cdot \frac{1}{\rho^{3/2} \cdot V^{3/2}} \cdot \sqrt{J_y + J_z - J_x} \cdot \sqrt{J_x + J_z - J_y} \cdot \sqrt{J_x + J_y - J_z}$$

$$V^{\frac{5}{2}} = \sqrt{\frac{250 \cdot \pi^2}{9 \cdot \rho^3}} \cdot \sqrt{J_y + J_z - J_x} \cdot \sqrt{J_x + J_z - J_y} \cdot \sqrt{J_x + J_y - J_z}$$

$$V^5 = \frac{250 \cdot \pi^2}{9 \cdot \rho^3} \cdot (J_y + J_z - J_x) \cdot (J_x + J_z - J_y) \cdot (J_x + J_y - J_z)$$

$$V = \left[\frac{250 \cdot \pi^2}{9 \cdot \rho^3} \cdot (J_y + J_z - J_x) \cdot (J_x + J_z - J_y) \cdot (J_x + J_y - J_z)\right]^{\frac{1}{5}}$$

Die Halbachsenlängen [a, b, c] lassen sich dann als Funktion von den Hauptträgheitsmomenten [J_x, J_y, J_z] und einer vorgegebenen konstanten Dichte ρ berechnen.

Anschrift der Verfasser

Prof. Dr.-Ing. Timm Stückrath, E-Mail: stueckrath@iwawi.tu-berlin.de
Dipl.-Ing. Gerhild Völker, E-Mail: voelker@iwawi.tu-berlin.de
Dipl.-Ing. Jian-hua Meng, E-Mail: meng@iwawi.tu-berlin.de

Technische Universität Berlin
Institut für Bauingenieurwesen
Fachgebiet Konstruktiver Wasserbau (Sekr. W)
Postfach 100 320
10563 Berlin

MITTEILUNGEN AUS DEM INSTITUT FÜR WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

Nr./Jahrgang		
1-36 vergriffen	1913-43	Eine Zusammenstellung befindet sich in Mitteilung Nr. 50
37 vergriffen	1950	Prof. Dr.-Ing. H. Preß **Die Entwicklung des Lehrstuhles für Wasserwirtschaft und des Instituts für Wasserbau (Wasserbaulaboratorium) der Technischen Universität Berlin-Charlottenburg**
		Dipl.-Ing. S. Eicke **Gestaltung eines Kühlwassereinlaufes unter Berücksichtigung von Schwebstoffzurückhaltung**
		Dipl.-Ing. S. Eicke **Bemerkungen zu einigen Gebieten der Versuchs- und Meßtechnik hydrodynamischer und wasserbaulicher Modellversuche**
		Dipl.-Ing. H. Schaumann **Stand der Berechnung von Streichwehren**
38	1951	Dipl.-Ing. J. Ohde **Zur Statik der Staudämme mit Betonkern**
		Prof. Dr.-Ing. H. Preß **Über die Herstellung von Beton für Gewichtsstaumauern**
		Prof. Dr.-Ing. H. Preß **Modellversuche an Staumauern zur Überprüfung des statischen Verhaltens**
		Dipl.-Ing. J. Pickert **Die Anwendung der statischen Modellgesetze für Untersuchungen an Sperrmauermodellen**
		Prof. Dr.-Ing. H. Preß **Herunterbringen von Senkbrunnen mit Hilfe von Druckluftdüsen**
39	1952	Prof. Dr.-Ing. H. Preß **Turbineneinläufe ohne Einlaufspirale für Pfeilerkraftwerke**
		Dipl.-Ing. S. Eicke **Modelluntersuchungen an Turbineneinläufen ohne Spirale für Pfeilerkraftwerke**
40	1953	Dipl.-Ing. H. Preß **Bau von Stauanlagen ohne Unterbrechung des Schiffahrtsbetriebes**
		Dipl.-Ing. A. B. Schulz **Das Entfernen von Geschiebeansammlungen bei Grundwehren mit Fischbauchstauklappen**

Nr./Jahrgang		
41 vergriffen	1954	Dipl.-Ing. M. Schmidt **Zur Frage des Abflusses über Streichwehre**
42 vergriffen	1954	Dipl.-Ing. A. B. Schulz **Die strömungstechnische Gestaltung der Wehre und Flußkraftwerke**
43	1955	Dipl.-Ing. H.U. Smoitczyk **Beitrag zur Ermittlung der Feingeschiebe-Mengenganglinie**
44	1955	Dr.-Ing. E. Leopold **Abflußvorgang und Frachtraumverluste auf den natürlichen Binnenwasserstraßen**
45	1956	Prof. Dr.-Ing. H. Preß **Einige neuere Untersuchungen unter Verwendung neu entwickelter Meßgeräte aus dem Institut für Wasserbau an der Technischen Universität Berlin**
		Dipl.-Ing. G. Stapelfeldt **Überlegungen zum Entwurf eines Tosbeckens**
		Dipl.-Ing. H. J. Hoffmann **Vergleichende Untersuchungen über das Leistungsvermögen eines Absturzbauwerkes herkömmlicher Bauart und eines Kesselabsturzes in vier Varianten**
		Dipl.-Ing. R. Schröder **Neue Wege der Flügelmeßtechnik**
		Dr.-Ing. M. Schmidt **Einige Besonderheiten bei den Modellversuchen für die Isar-Staustufen Gummering und Dingolfing**
		Dipl.-Ing. G. Stapelfeldt, K. Ernst **Darstellung des Regelvorganges eines Turbinen-Leitapparates durch eine elektronische Steuerungsanlage**
		Dipl.-Ing. G. Stapelfeldt, K. Ernst **Beitrag zur Ermittlung der Potentiallinien nach einem elektronischen Analogie-Verfahren**
46	1956	Dipl.-Ing. A. Gsaenger **Speicherwirtschaft und Hochwasservorhersage**
47 vergriffen	1956	Dipl.-Ing. F. Bassler **Gesichtspunkte bei der Wahl einer Talsperren-Bauart**

MITTEILUNGEN AUS DEM INSTITUT FÜR WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

Nr./Jahrgang

48 1957 vergriffen
Dipl.-Ing. R. Schröder
Untersuchungen über diskontinuierliche Abflußvorgänge in Freispiegelrinnen

49 1959 vergriffen
Dipl.-Ing. H. Bretschneider
Beitrag zur Beobachtung und Messung von Wasserströmungen im wasserbaulichen Versuchswesen mit Tellur

Dipl.-Ing. F. J. Mock
Eine Weiterentwicklung auf dem Gebiet der photographischen Methode der Strömungsrichtungs- und Geschwindigkeitsbestimmung

Dr.-Ing. M. Schmidt
Die Berechnung von Streichwehren beim Auftreten eines Fließwechsels

Dr.-Ing. R. Schröder
Gegenüberstellung zweier Drehzahlübertragungssysteme für induktive Meßflügelsonden

Dipl.-Ing. G. Stapelfeldt
Ausbildung einer Schleuseneinfahrt am konvexen Flußufer

50 1959
Prof. Dr.-Ing. H. Preß
Das Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Berlin

Prof. Dr.-Ing. N. Engez
Untersuchungen über den Einfluß des Sinkstoffgehalts auf den Fließwiderstand in Rohrleitungen

Dipl.-Ing. H. Bretschneider
Die Kühlwasserversorgung von Wärmekraftwerken, insbesondere des Kraftwerks Moabit in Berlin

Dipl.-Ing. F. Helmert
Bestimmungen der Wasserspiegellage in einem gegliederten Profil bei kontinuierlich abnehmender Wassermenge

Dr.-Ing. F. Mock
Der Anspringvorgang bei Hebern

Dr.-Ing. R. Schröder
Über die hydraulische Sicherheit von Tosbecken

Dr.-Ing. A. B. Schulz
Überfalleitungen und Luftabscheider in den Wassertürmen der Berliner Wasserwerke

Nr./Jahrgang

51 1959
Dipl.-Ing. G. Mundt
Die Untersuchungen des Einflusses der Geschiebe- und Schwebstofführung auf die Sohlen- und Wasserspiegellage in Stauseen, abgeleitet aus Messungen und Beobachtungen an der Innstufe Ering

52 1960
Dipl.-Ing. F. J. Mock
Strömungsvorgänge und Energieverluste in Verzweigungen von Rechteckgerinnen

53 1961
Dipl.-Ing. H. Bretschneider
Abflußvorgänge bei Wehren mit breiter Krone

54 1961
Prof. Dr. sc. Techn. C. Jaeger
Der heutige Stand der Felsmechanik und ihre Beziehung zum Bau von Wasserkraftwerken

Prof. Dr.-Ing. N. Engez
Verlandungserscheinungen in Talsperrenbecken und die Wirkung der Grundablässe

Sonderheft T. P. Padmarajaiah, B. E.
Strömungswiderstand in gekrümmten Rohrleitungen

55 1961 vergriffen
Dr.-Ing. H. Bretschneider
Modelluntersuchungen für die Hochwasserentlastungsanlage des Mariental-Dammes in Südwestafrika

Dipl.-Ing. F. Helmert
Die Rauhigkeit poröser Betonrohre

Dipl.-Ing. L. Macha
Gleichzeitige automatische Wasserspiegelmessung an mehreren Meßstellen

Dr.-Ing. F.J. Mock
Nomographische Lösungen der Gleichung von Bernoulli und der Extremalwerte für offene Gerinne mit regelmäßigem Querschnitt

Dipl.-Ing. W. Richter
Die Isar-Staustufen Gummering und Dingolfing

Dr.-Ing. M. Schmidt
Hochwassererwägungen beim Entwurf des Mariental-Dammes in Südwestafrika

Dr.-Ing. R. Schröder
Fotoelektrische Meßverfahren im wasserbaulichen Versuchswesen

Prof. Dr.-Ing. H. Preß
Zusammenstellung seiner wichtigsten Veröffentlichungen

MITTEILUNGEN AUS DEM INSTITUT FÜR WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

Nr./Jahrgang

56 1962 Dr.-Ing. H. Bretschneider
Die Grundlagenforschung im Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Dr.-Ing. F.-J. Mock
Modellbehandlung von Druckstoßproblemen mit Hilfe von Kunststoffrohren

Dipl.-Ing. S. Eicke
Der Abfluß in teilgefüllten Rohrleitungen

57 1962 vergriffen Dipl.-Ing. H. Tessendorff
Untersuchungen zum Widerstandsgesetz für die Durchströmung von Kugelschüttungen

58 1963 vergriffen Dipl.-Ing. F. Helmert
Einlaufprobleme bei Fallschächten

59 1963 Dr.-Ing. R. Schröder
Die turbulente Strömung im freien Wechselsprung

60 1963 Dr.-Ing. H. Bretschneider
Die Modelluntersuchungen für die Hochwasserentlastungsanlage des Pineios-Dammes in Griechenland

Priv.-Doz. Dr.-Ing. R. Schröder
Schiffbugförmige Trennpfeiler für Flußkraftwerke

Dipl.-Ing. G. Fuchs
Die wirksamste Abstufung von künstlichen Kiesschüttungen in den Filterstrecken bei Bohrbrunnen

Dr.-Ing. H. Bretschneider
Der Schleppwagen im Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft Berlin

Priv.-Doz. Dr.-Ing. R. Schröder
Bemerkenswerte Ausführung eines Wehrmodells

61 1963 vergriffen Dipl.-Ing. L. Macha
Untersuchungen über die Wirksamkeit von Tosbecken

62 1965 Dipl.-Ing. L. Macha
Die Energieumwandlung in räumlichen Tosbecken
(Fortsetzung zu Mitteilung Nr. 61)

Dr.-Ing. H. Bretschneider
Die neue Steueranlage zum Betrieb von Wellenmaschinen im Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Berlin

Priv.-Doz. Dr.-Ing. R. Schröder,
Dipl.-Ing. D. Krause
Automatische Geschwindigkeitsmessungen mit Staugeräten

Nr./Jahrgang

Dipl.-Ing. W. Gaede
Modelluntersuchungen zur Umgestaltung der Spreemündung

Dr.-Ing. H. Bretschneider,
Dipl.-Ing. D. Krause
Die Modellversuche für die Hochwasserentlastungsanlage der Innerste-Talsperre im Harz

63 1966 Dr.-Ing. H. Bretschneider,
Ing. G. Retzlaff
Messungen von kleinen Geschwindigkeiten im wasserbaulichen Versuchswesen

Dr.-Ing. H. Bretschneider,
Dipl.-Ing. J. Schmeitzner
Kraftschlußbauwerke in Kühlsystemen von Dampfkraftwerken

Dipl.-Ing. G. Fuchs
Analytische und graphische Verfahren zur Untersuchung der Wellenbewegungen in offenen Seehäfen

Dipl.-Ing. W. D. Geiseler
Untersuchungen der Abhängigkeit zwischen Korndurchmesser und Strömungsgeschwindigkeit im Untergrund hinsichtlich des Wanderungsbeginns

Dipl.-Ing. S. Nanack
Stauraumverlandung

Dipl.-Ing. H. Hartmann
Maßnahmen zur Stabilisierung des Schußstrahles in einer im oberen Teil stark gekrümmten Schußrinne

Dipl.-Ing. H. Kaldenhoff
Abflußmessungen am Modell der Lechstaustufe 2 Prem

Dipl.-Ing. D. Krause
Vorbemessung von Tosbecken mit konzentrierter Beaufschlagung

Dipl.-Ing. F.-J. Mock
Afghanistan, Land alter Bewässerungskultur

Dipl.-Ing. H. Neubert
Bau und Betrieb von Horizontalfilterrohrbrunnen

Dipl.-Ing. H. Raisner
Zur Frage der Rauhigkeitsdarstellung bei extrem rauhen Gerinnen

Dipl.-Ing. F. W. Renz
Dimensionierung eines Nachlaufbehälters zur Druckstoßsicherung einer langen Rohrleitung mit Zwischenhochpunkten

MITTEILUNGEN AUS DEM INSTITUT FÜR WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

Nr./Jahrgang		
		Dr.-Ing. M. Schmidt **Die Granetalsperre als Ergänzung der Okertalsperre**
		Priv.-Doz. Dr.-Ing. R. Schröder **Indirekte Bestimmung der Geschwindigkeitsverteilung bei Rohrströmungen einfacher nichtnewtonscher Flüssigkeiten**
		Dr.-Ing. H. Stefan, Dipl.-Ing. P. Franke, Priv.-Doz. Dr.-Ing. R. Schröder **Abbildung von Druckstoßerscheinungen in Metallrohren mit nichtkreisförmigen Querschnitten**
		Dr.-Ing. H. Stefan, Dipl.-Ing. J. Meyer **Untersuchungen ebener Sickerströmungen in heterogenem Untergrund mit Hilfe der elektrischen Analogie**
		Dipl.-Ing. L. Macha **Unterwassertunnel bei Paraná-Santa Fé**
64	1967 vergriffen	Dipl.-Ing. H. J. Hoffmann **Über die Wechselwirkungen einer senkrechten Tauchwand mit periodischen Schwerewellen**
65	1967 vergriffen	Dipl.-Ing. W.-D. Geiseler **Über die Strömungsvorgänge bei Vertikalfilterrohrbrunnen mit einfachen Kiesschüttungen unter besonderer Berücksichtigung der Leistungssteigerung durch Entsanden**
66	1967 vergriffen	Dr.-Ing. H. Bretschneider **Maßstabseinflüsse bei Kavitation**
67	168	Dipl.-Ing. S. Hanack, Dr.-Ing. H. Stefan **Strömungen von Tonsuspensionen mit einem hohen Feststoffgehalt**
68	1968	Dipl.-Ing. G. Fuchs **Die Änderung der Wellenelemente durch positive Unterwasserstufen**
69	1969 vergriffen	Dipl.-Ing. H. Hartmann **Das Stabgitter in instationärer Strömungsbewegung**
70	1969	Dipl.-Ing. D. Krause **Geschwindigkeitsverteilung und Fließverluste der turbulenten Strömungen in Rohren und Gerinnen**
71	1969	Prof. Dr.-Ing. H. Bretschneider **Programmiertes Praktikum für das Wasserbauliche Versuchswesen. Ein Beispiel zur Rationalisierung des Unterrichts an Hochschulen**
		Dipl.-Ing. S. Emsmann, Dipl.-Ing. J. Meyer **Beitrag zur experimentellen Bestimmung der Energiehöhenverluste an Rohrabzweigungen**

Nr./Jahrgang		
		Dipl.-Ing. P. Franke, Dipl.-Ing. M. Malik **Voraussetzung für den Einsatz leistungsfähiger Turbinen und Pumpen**
		Dr.-Ing. G. Fuchs **Das Bewässerungssystem des landwirtschaftlichen Siedlungsgebietes Hardap in Südwestafrika**
		Dipl.-Ing. H. Hartmann **Studium der Sandwanderung unter Welleneinwirkung am Seehafenmodell Rethymnon**
		Dr.-Ing. H. Hoffmann, Dipl.-Ing. K. Riemer **Der neue Hamburger Elbtunnel**
		Dipl.-Ing. H. Kaldenhoff, O. Hoffmann, M. Sc. **Einfache Bestimmung der exakten Wasseroberfläche bei stationärem Brunnenzufluß aus einem ungespannten Grundwasserleiter durch eine Modifizierung der Dupuitschen Brunnengleichungen**
		Dipl.-Ing. H.-J. Koch, O. Hoffmann, M. Sc. **Spiegellinienberechnung eines beschleunigten Abflusses nach dem Runge-Kutta-Verfahren**
		Dipl.-Ing. G. Mundt **Beziehungen zwischen der Stauweite und dem Wendepunkt der Abflußkurven im Staubereich**
		Dipl.-Ing. S. Savidis **Die Wellenkraft auf einen eingetauchten horizontalen Kreiszylinder**
		Dr.-Ing. G. Stapelfeldt **Ansatz zur näherungsweisen Berechnung des Spannungszustandes im Haufwerk unter Berücksichtigung des inneren Verschiebungszustandes**
		Dr.-Ing. H. Tessendorff **Möglichkeiten und Grenzen der Berechnung großflächiger vermaschter Wasserrohrnetze auf elektronischen Datenverarbeitungsanlagen**
72	1970	Dipl.-Ing. B. Popov **Über die Ausbildung der Kavitation in einer diskontinuierlichen Strömung**
73	1971	Dipl.-Ing. H. Kaldenhoff **Näherungslösungen bei der instationären Brunnenzuströmung**
74	1971	Dipl.-Ing. J. Meyer **Wandschubspannungs- und Geschwindigkeitsverteilung im glatten Dreieckgerinne (Öffnungswinkel 90°)**

MITTEILUNGEN AUS DEM INSTITUT FÜR WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

Nr./Jahrgang

75 1971 vergriffen — Dipl.-Ing. U. Drewes
Ebene instationäre Grundwasserströmungen mit freier Oberfläche in Wechselwirkung mit einem Oberflächengewässer

76 1972 — Dipl.-Ing. M. Malik
Die hydromechanischen Parameter und ihr Einfluß auf die charakteristischen Größen des Wechselsprunges

77 1972 vergriffen — Dipl.-Ing. H.-J. Koch
Die Umströmung der quadratischen Schwelle im Rechteckgerinne bei überkritischem Fließzustand

78 1972 — **Tätigkeitsbericht 1971/1972**

79 1973 — Dr.-Ing. S. Emsmann
Experimentelle Ermittlung der Geschwindigkeitsverteilung in einer oszillierenden turbulenten Rohrströmung

80 1974 — Dr.-Ing. U. Drewes
Die Berechnung räumlicher instationärer Grundwasserströmungen mit Hilfe eines Differenzenverfahrens

Dr.-Ing. S. A. Savidis
Kraftangriff und Dämpfung periodischer Schwerewellen beim Durchgang durch ein aus horizontalen Stäben bestehenden Gitter

81 1974 — Dr.-Ing. S. Emsmann, Dipl.-Ing.J. Köngeter
Geschwindigkeits-Eichanlage für Thermistorsonden

Dr.-Ing. S. Emsmann,
cand. ing. A. Lehmann
Über die Entwicklung eines Thermistor-CT-Anemometers zur Messung instationärer Wassergeschwindigkeiten

O. Hoffmann, M. Sc.
Programmsystem für die Druckstoßberechnung nach dem Stoßgeradenverfahren

Ing. (grad.) P. Ch. Lang
Einige Geräteentwicklungen des Elektroniklabors

Dipl.-Ing. D. Morgenstern
Hydraulische Stabilität von Wasserkraftanlagen mit Wasserschloß im Ober- und Unterwasserstollen

Prof. Dr.-Ing. C. Schreck
Beitrag zum Problem des Wasserschlages

82 1974 — **Tätigkeitsbericht 1973/1974**

Nr./Jahrgang

83 1975 — Dr.-Ing. D. Morgenstern
Dimensionierung von Differentialwasserschlössern mit optimaler Schwingungsdämpfung

84 1975 — Dr.-Ing. O. Hoffmann
Beitrag zur Druckstoßberechnung bei Pumpenausfall

85 1976 — Dr.-Ing. F. Waßelewsky
Strukturermittlung und Parameterschätzung hydrologischer Speichermodelle durch Approximation des Frequenzgangs

86 1976 — **Tätigkeitsbericht 1975/1976**

87 1976 — Dipl.-Ing. S. Gökcesu
Beitrag zum Auflaufvorgang des natürlichen Seegangs im Flachwassergebiet auf glatten Böschungen

88 1977 — Dipl.-Ing. R. Krüger
Strömungserscheinungen an einer Blende in oszillierender Rohrströmung

89 1978 — Dipl.-Ing. H. Berger
Druckstoßverhalten an Blenden bei Berücksichtigung der Anlaufströmung

90 1978 — **Tätigkeitsbericht 1977/1978**

91 1979 — Dipl.-Ing. M. Heinl
Die Stabilität der Schwingung in Differentialwasserschlössern bei idealer Regelung auf konstante Leistung

92 1980 — Dipl.-Ing. W. Behrendt
Die dreidimensionale Geschwindigkeitsverteilung in der Laufradebene einer spezifisch schnelläufigen Pumpe, deren Anströmung durch Einbauten vor dem Beschleunigungskrümmer gestört wird

93 1980 — Dipl.-Ing. P. Bade
Erzeugung kurzer seegangsähnlicher Wellenzüge in Wasser begrenzter Tiefe durch Überlagerung dispergierender permanenter Wellenpakete

94 1980 — Dipl.-Ing. J. Weiß
Beitrag zur Ermittlung des Gasgehaltes und der Blasenaufstiegsgeschwindigkeit in einer Blasensäule eines Wasser-Luft-Gemisches in Abhängigkeit vom Luftmassenstrom und von der Höhe

MITTEILUNGEN AUS DEM INSTITUT FÜR WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

Nr./Jahrgang

95 1980 Dipl.-Ing. J. Köngeter
Rohrreibungsverluste einer oszillierenden turbulenten Strömung in einem Kreisrohr konstanten Querschnitts

96 1980 Dipl.-Ing. E. Papamastorakis
Reflexion, Transmission und Kräfte von Oberflächenwellen an aufgelösten Konstruktionen

97 1980 Dipl. Phys. H.-H. Schneider
Turbulentes Entrainment über eine Dichtezwischenschicht mit einem Freistrahl als Turbulenzquelle

98 1981 **Tätigkeitsbericht 1979/1980**

99 1981 Dipl.-Ing. H. Geipert
Schwall und Sunk als Übergangsbereich zwischen Teil- und Vollfüllung in Rohrleitungen mit rechteckigem Querschnitt

100 1982 Prof. Dipl.-Ing. P. Franke
Vorwort

Prof. Dr.-Ing. H. Blind
Kontrollmaßnahmen in Stauanlagen -ein Beitrag zur Sicherheit-

Dr.-Ing. H. Hartmann
Der Marinenhafen Lumut in West-Malaysia unter besonderer Beachtung der Gründungsprobleme beim Bau der Pieranlagen

Dr.-Ing. D. Krause
Dimensionierungsfragen bei Kühlwassersystemen

Prof. Dr.-Ing. R. C. M. Schröder
Versickerung aus Talsperren -Messungen und Simulation-

Prof. Dr.-Ing. H. Bretschneider
Luftgesteuerte Heber zur Hochwasserentlastung bei Stauanlagen

Dipl.-Ing. F. Busch
Die Länge des Wechselsprunges in einem parallelwandigen Rechteckgerinne mit horizontaler Sohle und glatter Wand

Dipl.-Ing. J .Dignatz,
Prof. Dr.-Ing. H. Kaldenhoff
Tendenzen in der modernen Seegangsforschung

Dr.-Ing. J .Meyer,
Dr.-Ing. H.-J. Koch
Modelluntersuchung für den Grund- und Betriebsauslaß Randenigala, Sri Lanka

Nr./Jahrgang

Dipl.-Ing. C. Rack
Unsicherheiten bei der Abflußmessung mit Ultraschall und mit Meßflügeln in offenen Gerinnen

Dipl.-Ing. G. Schulz
Programmsystem GRUWA
Ein Finite-Element-Modell zur Berechnung ebener Grundwasserströmungen

101 1983 **Tätigkeitsbericht 1981/1982**

102 1983 Dipl.-Ing. H. Arlt
Experimentelle Untersuchungen über das instationäre, turbulente Reibungsverhalten bei aufgeprägten Druckimpulsen in einer Rohrleitung mit Kreisquerschnitt

103 1984 Dipl.-Ing. F. Busch
Schwingungsstabilität des Verschlusses und Abflußvermögen eines Abschlagsbauwerkes der Kanalisation

104 1984 Dipl.-Ing. J. Dignatz,
Prof. Dr.-Ing. H. Kaldenhoff,
Dipl.-Ing. G. Schulze
Einsatz von Tracern zur Bestimmung der Ausbreitungsvorgänge von Nährsalzen in stehenden Gewässern

105 1985 **Tätigkeitsbericht 1977/1978**

106 1985 Dipl.-Ing. O. Müller
Eine Strategie zur Schließfunktionsermittlung für Armaturen in Fernwasserleitungen

107 1987 Dipl.-Ing. A. Schulz
Zur Näherungsberechnung des Abflusses in naturnah gestalteten Fließgewässern

108 1987 **Tätigkeitsbericht 1985/1986**

109 1987 Dipl.-Ing. M. Zapp
Auswirkungen von Grundwasserentnahmen aus tieferen Schichten eines mehrstöckigen Aquifersystems, untersucht am Beispiel des Grundwassersystems im Norden Berlins

110 1987 Dipl.-Ing. P. Brinkmann,
Dr.-Ing. M. Heinl,
Dipl.-Ing. R. Holländer
Grundwasserströmung im Nubischen Aquifersystem, Nordost-Afrika

111 1988 Dr.-Ing. G. Schulz-Terfloth
Untersuchungen zur Wechselbeziehung zwischen Oberflächengewässern und dem Grundwasser

MITTEILUNGEN AUS DEM INSTITUT FÜR WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

Nr./Jahrgang

112 1988 vergriffen — Dipl.-Ing. K.-U. Graw
Der Einsatz laseroptischer Verfahren zur Untersuchung von Geschwindigkeitsfeldern im wasserbaulichen Versuchswesen

113 1989 **Tätigkeitsbericht 1987/1988**

114 1989 vergriffen — Dr.-Ing. C. Rack
Entscheidungsgrundlagen zur Wahl des Entwässerungskonzepts bei besiedelten Flächen unter besonderer Berücksichtigung des Gewässerschutzes und alternativer Methoden

115 1989 — Dr.-Ing. R. Holländer
Zum Dispersionseinfluß bei Altersbestimmungen des Grundwassers im Nubischen Aquifersystem

116 1990 — Prof. Dr.-Ing. H. Bretschneider
Lufteintrag durch Nischen mit und ohne Rampe in Grundablässen

117 1991 — Dipl.-Math. E. Holzbecher
Numerische Modellierung von Dichteströmungen im porösen Medium

118 1991 **Tätigkeitsbericht 1989/1990**

119 1991 — Dipl.-Ing. Klaus Möller
Das Absenken einer thermisch bedingten Dichtezwischenschicht in einem nichtprismatischen Wasserspeicher

120 1991 **Modellierung von Strömung und Transport im Grundwasser**

Prof. Dr.-Ing. G. Holtorff
Vorwort

Dipl.-Ing. M. Thiele
Stationäre Konzentrationsverteilungen bei der Überströmung der festen Wand im porösen Medium

Dr. rer. nat V. Koß
Geochemische Modelle

Dr. rer. nat. H. Scholz
Mathematische und numerische quasi dreidimensionale Simulation des Mengen- und Stofftransports

Dr.-Ing. M. Heinl
Ein Strömungsmodell für den Nubischen Aquifer

Dr. rer. nat. G. Nützmann
Simulation von Strömung und Stofftransport in ungesättigt/gesättigten Bodenprofilen

Nr./Jahrgang

Dr.-Ing. Dipl.-Math. E Holzbecher
Zur Modellierung von Dichteströmungen in porösen Medien

Dipl.-Ing. H. Moser
Modellierung der Salzwasserexperimente des INTRAVAL-Workshops Testcase 13

Dr.-Ing. G. Schulz-Terfloth
Der Einsatz von Grundwassermodellen bei der Standortuntersuchung von Deponien am Beispiel der geplanten Deponie Weeze-Wemb

Dr. rer. nat. M. Schafmeister-Spierling
Geostatistische Simulationstechniken

Dipl.-Geogr. R. Baumann
Meerwasserinvasion im Delta arider und semiarider Gebiete am Beispiel des Nildeltas

Dipl.-Ing. R. Mansouri
Das Nildelta und die Modellierung des Salztransports im ungesättigten Bodenbereich

121 1991 — Dipl.-Ing. P. J. Brinkmann
Niederschlagsverhältnisse und Grundwasserneubildung in Darfur (Sudan)

122 1993 — Dipl.-Ing. M. Thiele
Vermischung von Süß- und Salzwasser in horizontalen Scherschichtströmungen im porösen Medium

123 1994 — Dipl.-Ing. A. Schmidt
Schätzung des Schwebstofftransports in kleinen Einzugsgebieten auf der Grundlage von Abflußmessungen

124 1994 — Dipl.-Ing. J. Skripalle
Zwangsbelüftung von Hochgeschwindigkeitsströmungen an zurückspringenden Stufen im Wasserbau

125 1994 — Dipl.-Ing. R. Mansouri
Simulation des Wasser- und Salztransports an grundwassernahen Standorten am Beispiel des Einzugsgebietes "El-Scheikh" (Nord-Nildelta)

126 1994 **Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsprozessen**

Prof. Dr.-Ing. G. Holtorff
Vorwort

Dipl.-Ing. K. Hildebrand
Modellierung zur simulationsgestützten Steuerung des Bodenwassergehalts

MITTEILUNGEN AUS DEM INSTITUT FÜR WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

Nr./Jahrgang

Dr.-Ing. Dipl.-Math. E. Holzbecher
Simultane Modellierung von Transport- und Abbauprozessen

Dr. rer. nat. V. Koß
Zur geochemischen Modellierung der Bleiadsorption

Dr. rer. nat H. Langmach
Zur numerischen Simulation des reaktiven Schadstofftransports im porösen Medium

Dr. rer. nat. G. Nützmann
Zur Bestimmung der hydraulischen Funktionen eines homogenen Sandes durch indirekte Parameteridentifikation

Dr.-Ing. M. Thiele
Vertikalprofile für den Gleichgewichtstransport von Schwebstoffgemischen in offenen Kanälen

127 1995 Dipl.-Ing. F. Schumacher
Zur Durchflußberechnung gegliederter, naturnah gestalteter Fließgewässer

128 1995 Dr.-Ing. H. Moser
Einfluß der Salzkonzentration auf die hydrodynamische Dispersion im porösen Medium

129 1995 Dipl.-Geogr. R. Baumann
Untersuchungen zum anthropogenen Einfluß auf die Salzwasserintrusion am Beispiel des Nildeltas

130 1995 D. Arlt, M.Sc.
A Hydrogeological Study of the Nile Delta Aquifer with Emphasis on Saltwater Intrusion in the Northern Area

131 1995 **Probleme des Wasser- und Stoffhaushalts und der Nutzung ehemaliger Rieselfelder Berlins und Umgebung**
Felduntersuchungen-Laborexperimente-Modellierung

Dipl.-Hydr. S. Göritz
Zum oberirdischen Abfluß der Rieselfelder südlich Berlins

Dipl.-Geol. M. Asbrand
Hydrogeologische Situation der Rieselfelder südlich Berlins

Dipl.-Geol. H. Handke
Beeinflussung des Wasser- und Stoffhaushaltes ehemaliger Rieselfeldflächen durch Infiltration mit weitgehend gereinigtem Abwasser

Nr./Jahrgang

Dr. rer. nat. B. Marschner,
Dipl.-Ing. L. Schlenther
Die Böden der Rieselfelder in Berlin-Buch: Bodentypen, Bodeneigenschaften und Schadstoffbelastung

Dipl.-Ing. S. Pudenz
Ein Kompartimentmodell zur Simulation des vertikalen P-Transports auf einem ehemaligen Rieselfeldstandort

132 1996 Dipl.-Ing. I. Mendes Pereira
Wirbelablösungen, die Oberflächenwellen beim Passieren einer Stufe erzeugen

133 1996 Prof. Dr.-Ing. T. Stückrath,
Dr.-Ing. M. Heinl
Dämpfung der Tidebewegung in einem Polder

134 1996 Prof. Dr.-Ing. T. Stückrath,
Dipl.-Ing. G. Völker,
Dipl.-Ing. J. Meng
Untersuchungen zum Fallverhalten würfelförmiger Einzelkörper in Wasser

Dr. T. Özbek
Zur Durchflußberechnung von geometrisch gegliederten Gerinne

135 2000 Dipl.-Hydrologe H. Messal
Rückkopplungen und Rückwirkungen in der hydrologischen Modellierung am Beispiel von kontinuierlichen Niederschlag-Abfluß-Simulationen und Hochwasservorhersagen

136 2000 Dipl.-Ing. S. Knoll
Das Abflußverhalten von extensiven Dachbegrünungen

137 2004 Prof. Dr.-Ing. T. Stückrath,
Dipl.-Ing. G. Völker
Dipl.-Ing. J. Meng
Die Gestalt von natürlichen Steinen und ihr Fallverhalten in Wasser