



---

# Kolkberechnung an Offshore-Bauwerken: a state of the art review

---

Gesa Ungruh

Werner Zielke

Juni 2003

(aktualisiert im Juni 2004)

## Abstract

The process of scouring depends on manifold parameters and has been subject to empirical as well as numerical studies focussing on scour depth and time dependency. This report characterizes the process of scouring and gives a review of the typical methods of examination, emphasizing on empirical equations. Several approaches, mostly developed to predict bridge scour and to a lesser extend to calculate scour at offshore-structures have been investigated. The typical drawbacks are the unknown scope of applicability and the uncertainties from scale effects. Furthermore, the change of flow direction, not included in most equations, should be considered. Due to these deficiencies none of the approaches sufficiently predicts scour evolution and depth concerning the typical boundary conditions of offshore-structures. As a matter of fact, numerical models should be developed in the future to investigate the process of scouring.

# 1 Einleitung

Offshore-Windenergieanlagen sind vielfältigen Belastungen wie Wind, Strömung und Wellen ausgesetzt. Die durch die Struktur geänderten Strömungs- und Wellenbedingungen können zu Sedimentverlusten in der unmittelbaren Umgebung der Gründung führen. Die entstehenden Kolke vermindern die Einbindetiefe und führen unter Umständen zu Standsicherheitsproblemen.

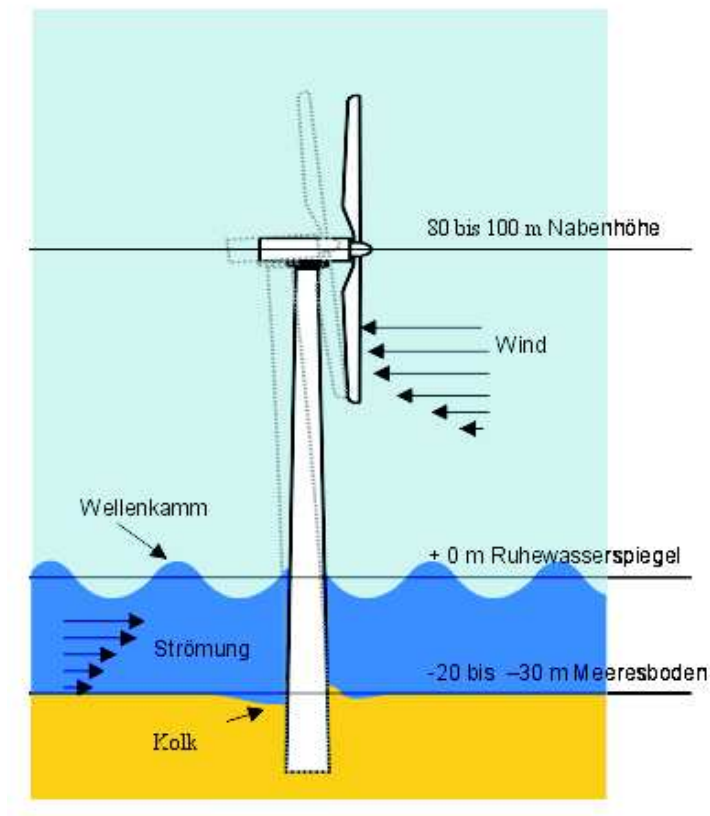


Abbildung 1: System und Belastungen der Windenergieanlage (WEA)

Die Gründung der Windenergieanlagen (WEA) erfolgt wahlweise mit Hilfe von Schwerkraftfundamenten oder als Pfahlgründung. Bei der Pfahlgründung sind im wesentlichen die Monopilegründung und die Tripodgründung zu unterscheiden. Mögliche Gründungskonzepte sind in Abb.2 dargestellt.

In Abschnitt 2 werden die kolkbildenden Prozesse am Beispiel eines Pfeilers beschrieben. Da Offshore-WEA teilweise in Gewässern mit Gezeitenströmungen gegründet werden, erfolgt zusätzlich eine Untersuchung der zeitlichen Kolkentwicklung. Eventuell auftretende Gruppeneffekte sowie Einflüsse von Verstreubungen werden nicht berücksichtigt. Einen generellen Überblick der Faktoren, die den Umströmungsvorgang und damit die Turbulenzbedingungen und die Kolkbildung beeinflussen, gibt Abschnitt 3.



Abbildung 2: Mögliche Gründungskonzepte für WEA (Monopile - Schwerkraftfundament - Tripod)

Zur Untersuchung von Kolkprozessen existieren verschiedene Möglichkeiten. Diese unterscheiden sich in Methodik, Aufwand und Güte der Ergebnisse. Abschnitt 4 liefert eine Zusammenstellung der möglichen Ansätze, Vorgehensweisen und zu erwartenden Ergebnisse. Dabei wird der Schwerpunkt auf die empirischen Verfahren gelegt. Zur besseren Verständlichkeit und Übersicht werden die verschiedenen Ansätze anhand von Beispielberechnungen vorgestellt.

Die Sicherung eines Bauwerkes in Bezug auf Kolkbildung kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Je nach Nutzungsdauer, Einbaumöglichkeiten und Konstruktion des Bauwerkes können verschiedene Verfahren gewählt werden. Eine Darstellung der möglichen Konzepte wird in Abschnitt 5 gegeben. In Abschnitt 6 folgt ein kurzer Ausblick.

Ein Verzeichnis der benutzten Variablen und der Literatur, sowie Erläuterungen zur Anwendung der linearen Wellentheorie, den Auswahlverfahren der untersuchten empirischen Formeln (Anwendungsgebiet Klarwasserbereich und Vergleich mit Feldmessungen) und zur Kolkformel nach (Melville & Coleman, 2000) sind im Anhang zu finden.

## 2 Grundlagen der Kolkbildung

Die Errichtung eines Bauwerkes in einem strömenden Gewässer führt zu Veränderungen im Strömungsfeld und unter Umständen zu erhöhtem Sedimenttransport im Bauwerksbereich. Im Folgenden werden das entstehende Wirbelfeld und seine Folgen am Beispiel eines Zylinders in gleichmäßiger Strömung beschrieben. Im Anschluss daran wird auf die zusätzlichen Phänomene bei Pfahlgruppen eingegangen. Vor allem für den Kolkprozess in Tidegebieten ist zudem die Entwicklungsgeschwindigkeit des Kolkes von Bedeutung, da die wechselnde Strömungsrichtung die Entstehung eines Gleichgewichtszustandes verhindern kann. Auf die zeitliche Kolkentwicklung wird deshalb in Abschnitt 2.4 eingegangen.

### 2.1 Kolkbildung an einem Zylinder

Beim Umströmungsvorgang kommt es zur Bildung eines Wirbelsystems, das aus dem Hufeisenwirbel und der Bugwelle im Frontalbereich des Pfeilers und den Nachlaufwirbeln an der Pfeilerrückseite besteht. Die Entstehung der einzelnen Wirbel wird im Folgenden näher erläutert.

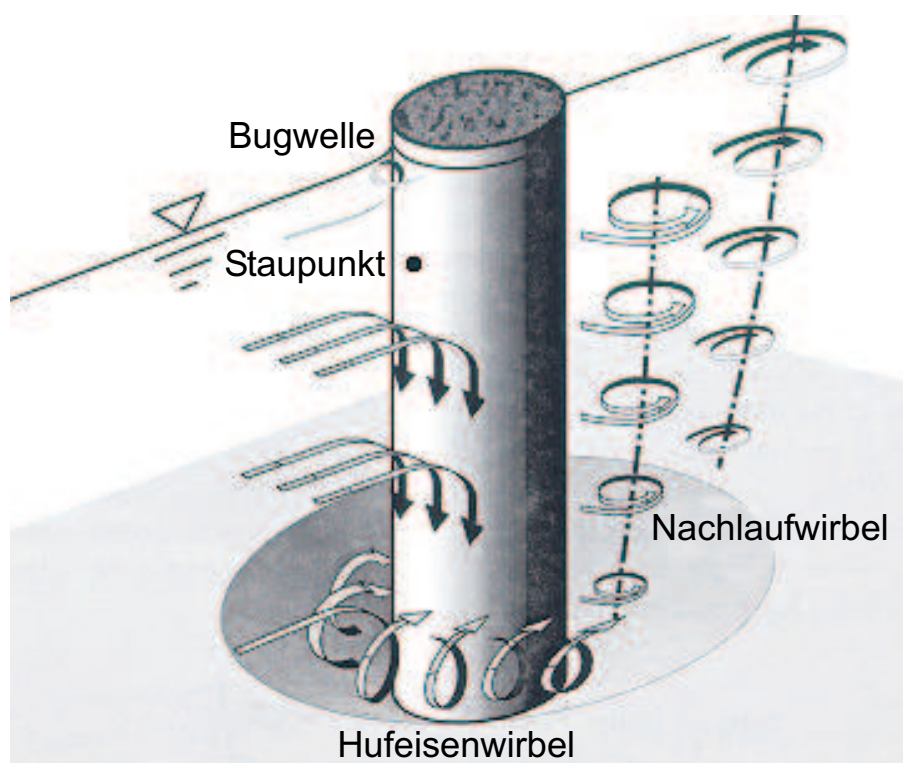


Abbildung 3: Wirbelsystem eines umströmten Pfeilers nach (Melville & Coleman, 2000)

### 2.1.1 Hufeisenwirbel und Bugwelle

Im Frontalbereich des Zylinders kommt es zu einer Verlangsamung der Strömung und einem Druckaufbau. Der entstehende Staudruck wird durch Strömungen in Gebiete niedrigeren Drucks abgebaut. Dabei ist neben der Wasseroberfläche der bodennahe Bereich zu nennen, in dem durch die reibungsbedingt geringere Strömungsgeschwindigkeit ein niedrigerer Druck herrscht. Die Grenze zwischen Gebieten mit Auf- bzw. Abwärtsströmung im Frontalbereich des Pfeilers bildet der in Abb. 3 dargestellte Staupunkt. Als direkte Folgen dieser Strömungen bilden sich an der Wasseroberfläche die Bugwelle und im Bodenbereich die Hufeisenwirbel mit horizontaler Achse.

### 2.1.2 Nachlaufwirbel

Die Umströmung bewirkt eine erhöhte Geschwindigkeit in den seitlichen Bereichen des Bauwerkes. Dies wird aus dem in Abb. 4 dargestellten Stromlinienverlauf deutlich. Die Umströmung hat im Bereich der Grenzschicht einen Rückstrom zur Folge, der der eigentlichen Strömungsrichtung entgegengesetzt ist (siehe Abb.4). Dieser führt zur Bildung der in Abb.3 dargestellten Nachlaufwirbel mit vertikaler Achse. Die Wirbel bewegen sich stromabwärts und transportieren Sedimente aus dem Bereich des Zylinders ab.

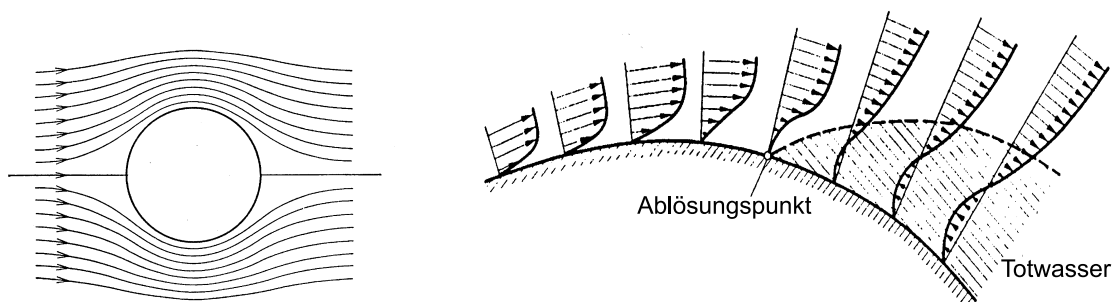


Abbildung 4: Stromlinienverlauf und Grenzschichtbildung im Bereich eines Pfeilers (Kohlmeier & Pawlus, 1997/98)

Die Kolke, die als Folge des beschriebenen Wirbelsystems entstehen, werden als lokale Kolke bezeichnet.

## 2.2 Sohlschubspannungen

Die Auswirkungen des Wirbelsystems werden unter anderem bei Betrachtung der Schubspannungsverteilung am Boden deutlich. In Abb. 5 ist der Erhöhungsfaktor der Bodenschubspannungen für einen Pfeiler in gleichmäßiger Strömung gegeben.

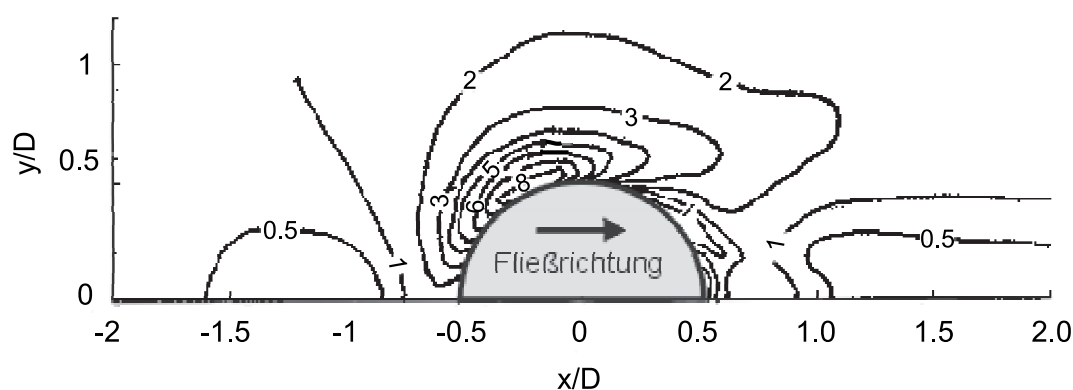


Abbildung 5: Erhöhungsfaktor der Bodenschubspannungen  $\tau/\tau_\infty$  (Roulund, 2000)

## 2.3 Kolkbildung an Pfahlgruppen

Bei der Untersuchung von Kolkprozessen im Gründungsbereich von Offshore-Bauwerken existiert neben der lokalen auch die globale Kolkung (siehe Abb.6).

- Lokale Kolke

Lokale Kolke entstehen als direkte Folge des beschriebenen Wirbelsystems im Nahfeld des Bauwerkes. In Abb. 6 sind die Ausbuchtungen im Bereich der Pfeiler deutlich zu erkennen.

- Globale Kolke

Zusätzlich zu den lokalen Kolken kann es zu einem flächenhaften Sedimentverlust, der globalen Kolkung, kommen. Diese besteht, wie in Abb. 6 zu sehen, im gesamten Bereich des Offshore-Bauwerks. Beobachtungen dieser Art wurden an verschiedenen marinen Bauwerken gemacht. Die Reproduktion mit Hilfe von Modellversuchen wird in (Sumer, Whitehouse, & Torum, 2001) beschrieben. Der flächenhafte Sedimentverlust entsteht durch Verflüssigungsprozesse der Sohle infolge der Turbulenzen im Bereich des Bauwerkes. Globale Kolkprozesse sind von der Art und Anordnung der Gründungselemente

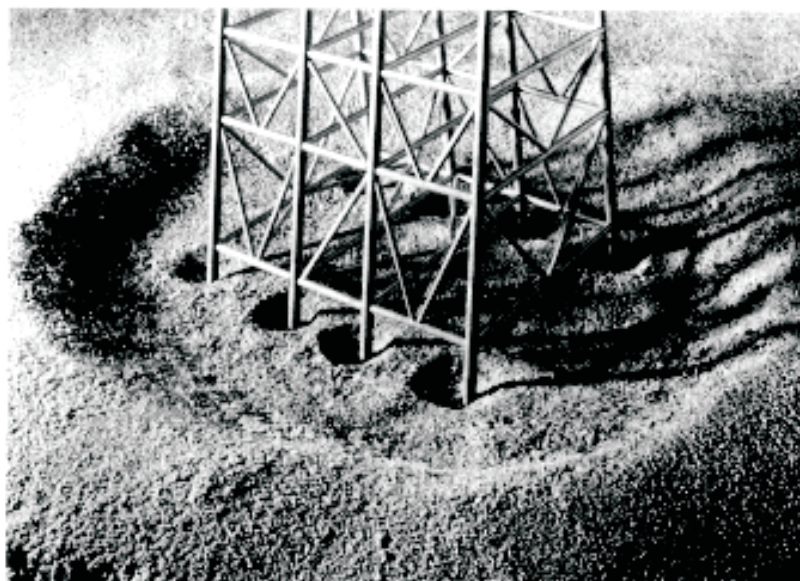


Abbildung 6: Globale und lokale Kolkbildung an einem Offshore-Bauwerk (Whitehouse, 1998)

abhängig und bilden im Vergleich zur lokalen Kolkung oftmals den größeren Anteil an der Gesamtkolkentiefe.

Die zu berücksichtigende Gesamtkolkentiefe setzt sich aus der Summe beider Vorgänge zusammen.

## 2.4 Zeitliche Entwicklung des Kolkes

Für die Untersuchung von Offshore-WEA ist die zeitliche Entwicklung von entscheidender Bedeutung. Im Gegensatz zum konstanten Strömungsregime in Flüssen ändert sich hier die Fließrichtung mit der Tide. Der Kolk hat demzufolge nur eine begrenzte Entwicklungszeit. Wird innerhalb dieser Zeitspanne keine Gleichgewichtskolkentiefe erreicht, wäre eine Bemessung, wie sie im gleichmäßigen Strömungsregime eines Flusses korrekt ist, unrealistisch und zu ungünstig.

### 2.4.1 Formeln zur Untersuchung der Entwicklungsdauer

In der Literatur sind verschiedene Angaben zur zeitlichen Entwicklung von Kolken zu finden. Mögliche Ansätze werden z.B. von (Zanke, 1982) und (Sumer & Fredsoe, 1999) gegeben.

- Ansatz von (Sumer & Fredsoe, 1999)

Die entwickelte Formel wird in (Roulund, 2000) mit Messergebnissen und numerischen

Berechnungen verglichen. Dabei wird die empirische Konstante  $p$  zunächst auf 1 gesetzt. Mit der Gleichgewichtskolkttiefe  $S_{GG}$  und dem Zeitmaßstab  $T_{63}$  ergibt sich die Kolkttiefe  $S$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  zu:

$$S(t) = S_{GG} \left( 1 - \exp \left( -\frac{t}{T_{63}} \right)^p \right) \quad (1)$$

Der Zeitmaßstab  $T_{63}$  ist definiert als die Zeit, nach der 63 % der Gleichgewichtskolkttiefe erreicht sind. Er berechnet sich zu:

$$T_{63} = \frac{D^2}{\sqrt{g(s-1)} d^3} T^* \quad (2)$$

mit

$$T^* = \frac{1}{2000} \frac{\delta}{D} \theta^{-2.2} \quad (3)$$

Der durchgeführte Vergleich dieser Gleichung mit numerischer Modellrechnung und Experiment ( $D=10\text{cm}$ ) liefert die in Abb. 8 dargestellten Ergebnisse. Zu sehen sind die zeitlichen Verläufe der Kolkttiefe für ober- und unterhalb des Pfeilers. Dabei ergeben alle drei Methoden im Oberstrombereich des Kolkes einen um ca. 20 % größeren Kolk als unterstrom. Der Vergleich des Funktionsverlaufes mit den Ergebnissen, die mit Hilfe des numerischen Modells ermittelt wurden, führt zu einem abweichenden Verlauf bei nahezu gleichen Endwerten. Die im Experiment gemessenen Werte liegen zu allen Zeitpunkten deutlich unter den übrigen. Hier ergeben sich Maximalwerte von  $S/D \approx 1.2$  (oberstrom) bzw.  $S/D \approx 1.0$  (unterstrom) statt  $S/D \approx 1.5$  (oberstrom) und  $S/D \approx 1.2$  (unterstrom).

(Whitehouse, 1998) wendet die von (Sumer & Fredsoe, 1999) entwickelte Formel im Rahmen eines numerischen Modells an. Dabei wird die Kolkentwicklung für kleine Zeitintervalle betrachtet, in denen von einer gleichmäßigen Strömung ausgegangen werden kann. Es wird angenommen, dass

$$\delta S = \frac{dS}{dt} \delta t \quad (4)$$

gilt. In Abhängigkeit von der empirischen Konstante  $p$ , dem Zeitmaßstab  $T_{63}$ , der Gleichgewichtskolkttiefe  $S_{GG}$  und der aktuellen Kolkttiefe  $S$  ergibt sich mit (1):

$$\frac{dS}{dt} = \frac{p \cdot (S_{GG} - S)}{T_{63} \left[ -\ln \left( \frac{S_{GG} - S}{S_{GG}} \right) \right]^{\frac{1}{p}-1}} \quad (5)$$



- Ansatz von (Zanke, 1982)

In (Zanke, 1982) wird eine Formel zur zeitlichen Entwicklung eines zweidimensionalen Kolkes gegeben. Diese geht aus der allgemeinen Differentialgleichung für Erosionsvorgänge hervor und kann unter der Annahme, dass sich Querschnittsfläche und Volumen eines Kolkes proportional verhalten, auf den dreidimensionalen Pfeilerkolk übertragen werden. Die folgende Formel wird angegeben:

$$T = \frac{1.94 H^2}{\left[ \left[ \left( \left( \frac{U_c \cdot \omega}{1+S/D} \right)^2 - U_{cr}^2 \right) \frac{U_c}{U_{cr}} \right]^2 - (U_c^2 - U_{cr}^2)^2 \right] \left( \frac{D^*}{W} \right)^4 \cdot \nu_f} \quad (6)$$

mit:

$$D^* = \left( \frac{\rho' g}{\nu_f^2} \right)^{1/3} \quad (7)$$

Der Vergleich dieser Formel mit Messergebnissen erfolgt in Abb.7.

#### 2.4.2 Vergleich der Formeln mit Experimenten und Modellergebnissen

Die Ergebnisse der vorgestellten Formeln werden in diesem Abschnitt mit Experimenten und teilweise auch mit Ergebnissen numerischer Modelle verglichen. Dabei werden die folgenden Parameter vorausgesetzt:

Pfeilerdurchmesser	$D \approx 0.10 \text{ m}$
Wassertiefe	$h = 0.40 \text{ bis } 0.55 \text{ m}$
Strömungsgeschwindigkeit infolge Strömung	$U_c = 0.42 \text{ bis } 2.20 \text{ m/s}$
Mittlerer Korndurchmesser	$d \approx 0.25 \text{ mm}$

Die Entwicklung der Kolkentiefe wird in den Abb.7 und 8 dargestellt. Die Autoren kommen zu leicht unterschiedlichen Zeitverläufen. Während die maximale Kolkentiefe in (Zanke, 1982) nach 3 Stunden erst näherungsweise erreicht wird, ist der Gleichgewichtszustand bei den Ergebnissen von (Sumer & Fredsoe, 1999) spätestens nach 3 Stunden erreicht. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die Endkolkentiefe nach 3 Stunden erreicht ist. Zur Verifizierung dieser Annahme sollten jedoch weitere Untersuchungen angestrebt werden.

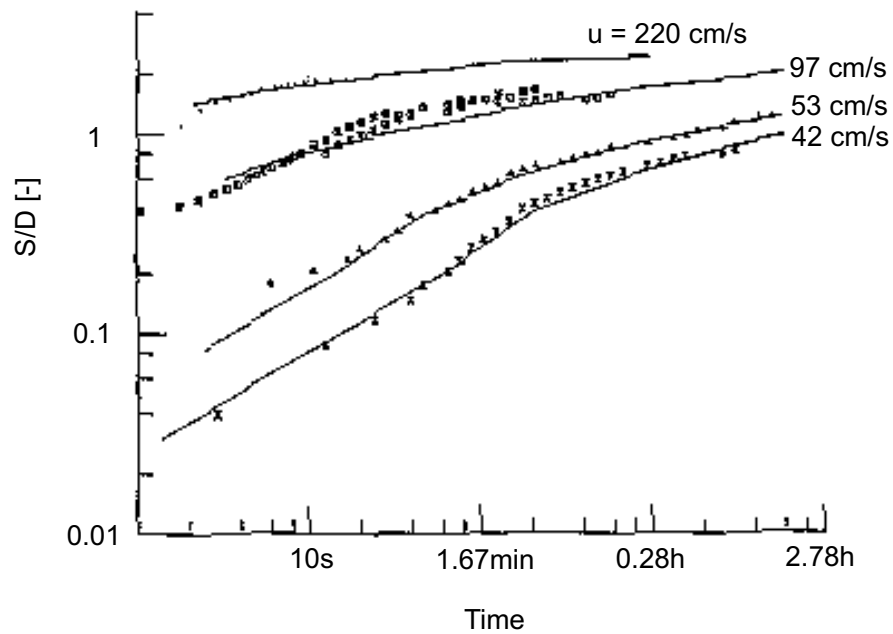


Abbildung 7: Kolktiefe am Pfeiler (Messwerte und Berechnung) nach (Zanke, 1982)

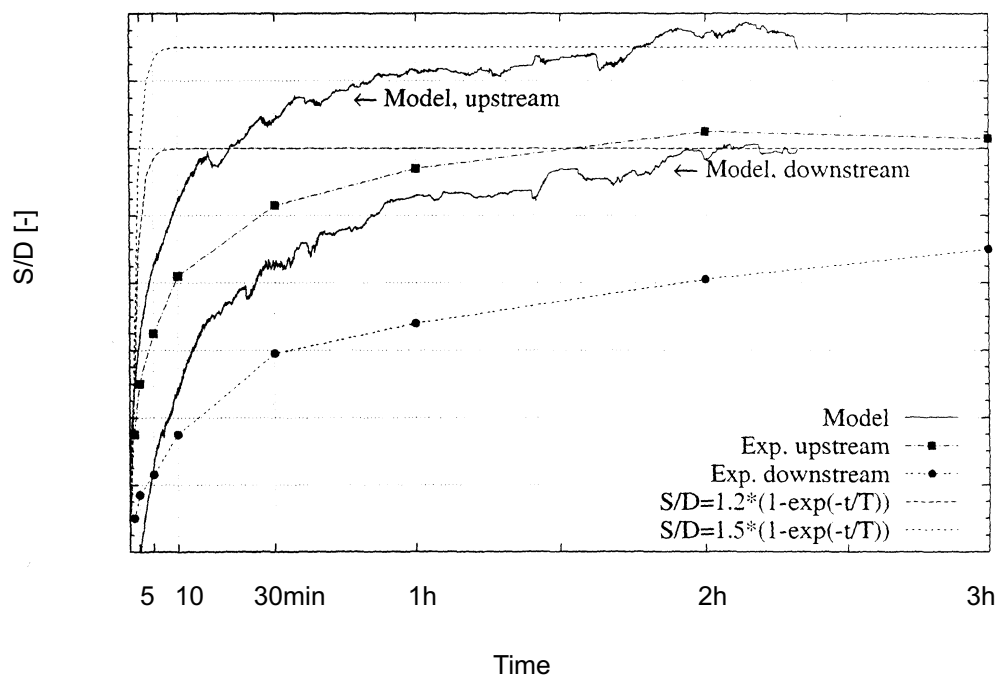


Abbildung 8: Kolktiefe am Pfeiler (Messwerte und Berechnung) nach (Roulund, 2000)

### 2.4.3 Übertragung in Naturverhältnisse

Zur Übertragung der Modellergebnisse auf die tatsächlichen Gegebenheiten ( $D=6.00\text{ m}$ ) werden die Ähnlichkeitsgesetze (siehe z.B. (Kobus, 1978)) angewandt. Dazu werden zunächst die benötigten Maßstäbe aufgestellt. Danach werden die Zeitmaßstäbe berechnet, bei denen zwischen der hydraulischen Modellähnlichkeit und der Ähnlichkeit für Feststofftransport (sedimentologische Ähnlichkeit) zu unterscheiden ist. Der Ermittlung der Maßstabszahlen sind die folgenden Werte zugrunde gelegt:

	Modell	Natur
Pfeilerdurchmesser	$D \approx 0.10\text{ m}$	$D = 6.00\text{ m}$
Wassertiefe	$h \approx 0.50\text{ m}$	$h = 30.00\text{ m}$
Dichte des Sediments	$2650\text{ kg/m}^3$	$2650\text{ kg/m}^3$
Dichte des Fluids	$1000\text{ kg/m}^3$	$1000\text{ kg/m}^3$

- Längenmaßstab

$$\lambda_L = \frac{L_{Modell}}{L_{Natur}} = \frac{10\text{ cm}}{600\text{ cm}} = 0.0167 \quad (8)$$

- Höhenmaßstab

$$\lambda_h = \frac{h_{Modell}}{h_{Natur}} = \frac{50\text{ cm}}{3000\text{ cm}} = 0.0167 \quad (9)$$

- Maßstab der Dichteunterschiede

$$\lambda_\rho = \frac{(\rho_s - \rho_f)_{Modell}}{(\rho_s - \rho_f)_{Natur}} = \frac{2650 - 1000}{2650 - 1000} = 1 \quad (10)$$

Mit diesen Werten ergeben sich der hydraulische und der sedimentologische Zeitmaßstab auf folgende Weise:

1. Hydraulischer Zeitmaßstab

Für den hydraulischen Zeitmaßstab ergibt sich nach Froude:

$$\lambda_{T,h} = \sqrt{\lambda_L} = 0.129 \quad (11)$$

2. Zeitmaßstab des Feststofftransports

Die Feststofftransportzahl  $g_s$  [kg/ms] ist ein Maß für die transportierte Geschiebemenge je Breiten- und Zeiteinheit. Sie ist abhängig von den Stoffeigenschaften des Fluids und des Feststoffes, dem Korndurchmesser, der Wassertiefe und dem Gefälle. Bei der Ermittlung des Zeitmaßstabs wird davon ausgegangen, dass die Feststofftransportzahl in Modell und Natur gleich ist.

$$\text{Annahme:} \quad g_{s,Modell} = g_{s,Natur} \quad (12)$$

Unter dieser Voraussetzung ergibt sich für den sedimentologischen Zeitmaßstab

$$\lambda_{T,s} = \frac{\lambda_L^{5/2} \lambda_\rho}{\lambda_h^2}. \quad (13)$$

Nach Einsetzen von  $\lambda_L = \lambda_h$  und  $\lambda_\rho = 1$  ergibt sich mit

$$\lambda_{T,s} = \sqrt{\lambda_L} = 0.129 \quad (14)$$

die gleiche Maßstabszahl wie für die hydraulischen Prozesse.

Der Zeitpunkt der Endkolktiefe in der Natur  $T_{Natur}$  steht damit in folgender Abhängigkeit zur Endzeit im Modell  $T_{Modell}$ :

$$\begin{aligned} T_{Natur} &= \frac{1}{\lambda_T} \cdot T_{Modell} \\ &= 7.7459 \cdot 3 h \\ &\approx 23 h \\ &\approx 1 d \end{aligned} \quad (15)$$

Bei Erreichen einer Endkolktiefe im Modell nach ca. 3 h, wie es die Experimente und Berechnungen im Schnitt wiedergeben, würde die Kolkentwicklung in der Natur erst nach ca. 23 h  $\approx 1 d$  abgeschlossen sein. Bei einer tidebedingten Änderung der Strömungsrichtung nach 6 h würde sich die Variable  $t/T_{GG}$  damit zu

$$\frac{t}{T_{GG}} = \frac{6}{23} \approx \frac{1}{4} \quad (16)$$

ergeben.

### 2.4.4 Zeitliche Kolkentwicklung in der Natur

In (Melville & Coleman, 2000) wird die folgende Formel zur Ermittlung der Kolktiefe vorgestellt:

$$S = K_{hD}K_I K_d K_s K_\theta K_t. \quad (17)$$

Wie in Anhang D beschrieben, werden die verschiedenen Einflüsse mit Hilfe der Faktoren  $K$  einbezogen. Der zeitliche Verlauf der Kolkentwicklung wird dabei durch den Faktor  $K_t$  berücksichtigt. Dieser liegt zwischen 0 und 1 und berechnet sich wie folgt:

$$K_t = \exp\left(-0.03 \left| \frac{U_{cr}}{U} \ln\left(\frac{t}{T_{GG}}\right) \right|^{1.6}\right) \quad (18)$$

Die Darstellung in Abb.9 zeigt den zeitlichen Verlauf des Faktors  $K_t$ , der mit Hilfe des Verhältnisses der aktuellen zur Endkolkentiefe ausgedrückt wird. Dies ist hier möglich, da alle beeinflussenden Faktoren fest gewählt sind und für jede Kurve von einer zeitlich konstanten Strömungsgeschwindigkeit  $U_c$  ausgegangen wird. Die Endkolkentiefe bleibt daher konstant, während die aktuelle Kolkentiefe nur vom zeitlichen Verlauf beeinflusst wird.

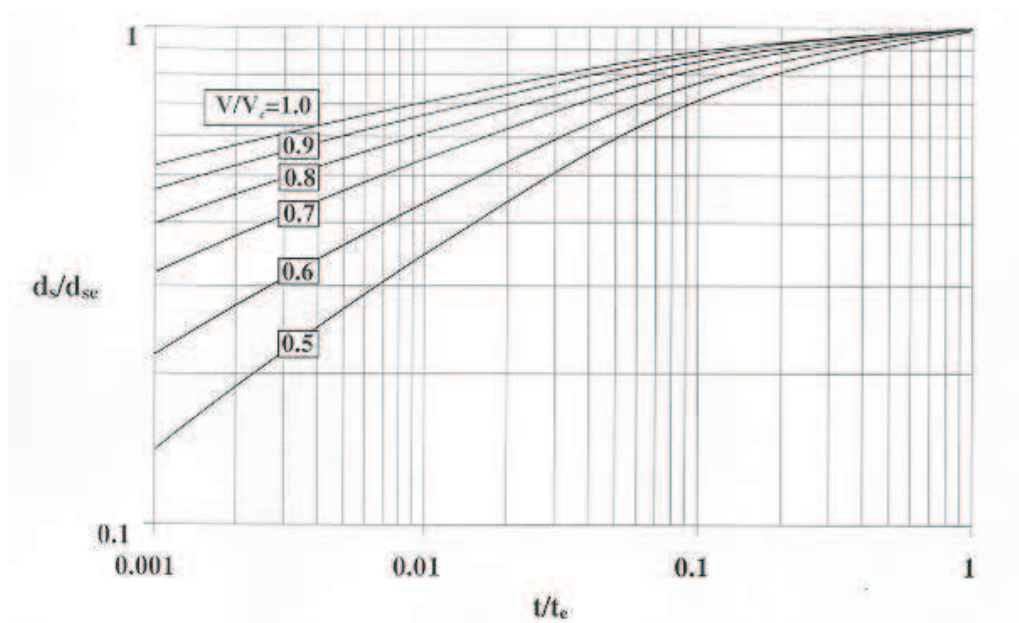


Abbildung 9: Zeitliche Kolkentwicklung in Klarwasserbereichen nach (Melville & Coleman, 2000); Bezeichnungen:  $d_s$ : aktuelle Kolkentiefe;  $d_{se}$ : Endkolkentiefe;  $V$ : aktuelle Strömungsgeschwindigkeit;  $V_c$ : kritische Strömungsgeschwindigkeit;  $t$ : Zeit;  $t_e$ : Gesamtentwicklungszeit des Kolkes

Nach 6h ( $t/T_{GG}=1/4$ ) ist nach dieser Darstellung schon mit einer Kolkentiefe von 85 % bis 95 % von der Gesamtkolkentiefe ( $S/S_{GG}$ ) zu rechnen. Der positive Einfluss der Tide wäre somit vernachlässigbar gering und sollte bei Bemessungen nicht angesetzt werden. Im untersuchten Gebiet der Deutschen Bucht treten jedoch teilweise sehr viel günstigere Verhältnisse von  $U_c/U_{cr}$  auf. Diese werden in den nachfolgenden Darstellungen berücksichtigt.

Für weitere Untersuchungen soll außerdem die reale zeitliche Entwicklung der Strömung in einer Tide berücksichtigt werden. Dies führt dazu, dass die Endkolkentiefe nicht mehr allein vom zeitlichen Fortschritt, sondern zusätzlich von der vorhandenen Strömungsgeschwindigkeit abhängt. Es folgt daher zunächst eine Untersuchung des zeitlichen Verlaufs des Faktors  $K_t$ . Im Anschluss daran wird die Kolkentwicklung unter Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung und der veränderlichen Endkolkentiefe dargestellt.

### 1. Zeitlicher Verlauf des Zeitfaktors $K_t$

Zur Untersuchung des zeitlichen Verlaufs des Faktors  $K_t$  wurde in MATLAB eine Routine implementiert, in der die aktuellen Strömungsgeschwindigkeiten in jedem Zeitschritt berücksichtigt werden können. Der Programmablauf ist dabei wie folgt realisiert:

#### (a) Modifizierung der Funktion der Strömungsgeschwindigkeit

Die zeitlich veränderliche Kurve der Strömungsgeschwindigkeit wird zu einer Treppenfunktion vereinfacht.

#### (b) Berechnung des 1. Zeitschritts

Ausgehend von einer ebenen Unterlage ( $S_0=0$ ) wird die Kolkentiefe  $S_1$  in Abhängigkeit von  $K_{t,1}$  und  $K_{I,1}$  ermittelt, die bei einer Geschwindigkeit  $U_{c,1}$  nach einem Zeitschritt  $\Delta t$  erreicht ist. Die Bestimmung des Faktors  $K_t$  ist der Abb.10 zu entnehmen, während  $K_I = U_c/U_{cr}$  für  $U_c/U_{cr} < 1$  und  $K_I = 1$  für  $U_c/U_{cr} > 1$ .

#### (c) Berechnung der weiteren Zeitschritte n

Zur Bestimmung des Faktors  $K_{t,n}$  wird der im Zeitschritt n-1 erreichte Faktor  $K_{t,n-1}$  als Eingabeparameter für den bereits erreichten Zustand verwendet. Ein Vergleich mit der Entwicklung bei der aktuellen Strömungsgeschwindigkeit  $U_{c,n}$  (z.B.  $U_{c,n}/U_{crit}=2/3$ ) liefert den Zeitpunkt, nach dem der Faktor  $K_{t,n-1}$  bei dieser Strömungsgeschwindigkeit erreicht wäre. Von diesem Zeitpunkt aus wird ein Zeitschritt  $\Delta t$  untersucht und der neue Faktor  $K_{t,n}$  ermittelt (siehe Abb.10). Nach Bestimmung von  $K_{I,n}$  wie oben ergibt sich die aktuelle Kolkentiefe  $S_n$ .

#### (d) Abbruchkriterium

Dieses Vorgehen wird so lange wiederholt, bis der Faktor  $K_{t,n} = 1$  und die Endkolkentiefe erreicht ist. Der zeitliche Entwicklungsverlauf ist nun bekannt.

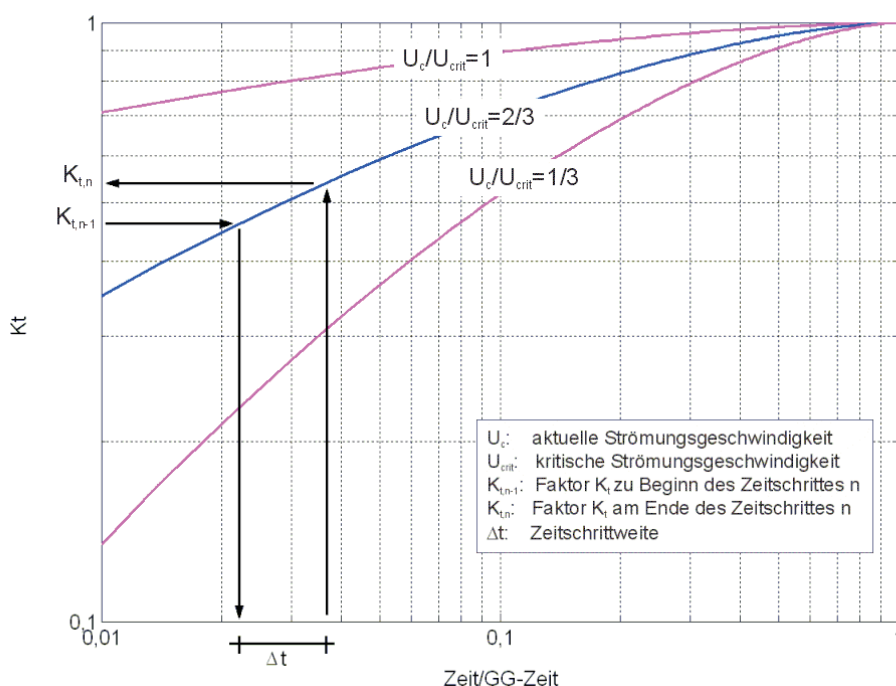


Abbildung 10: Rechenablauf eines Zeitschrittes n

Im folgenden soll die Entwicklung des Zeitfaktors  $K_t$  für einen Zeitraum mit hohen und einen mit mittleren Strömungsgeschwindigkeiten untersucht werden. Neben der zeitlich veränderlichen Strömungsgeschwindigkeit wird hier die kritische Strömungsgeschwindigkeit  $U_{cr}$  variiert. Diese berechnet sich aus dem mittleren Korndurchmesser und schwankt innerhalb des untersuchten Gebietes zwischen 0,5 m/s und 2,5 m/s. Für die Untersuchungen innerhalb einer Tide sind die ersten 6 h der Entwicklungszeit maßgebend. Diese entsprechen 1/4 der Gesamtentwicklungszeit des Kolkes. In den Abb. 11 und 12 sind jeweils die zeitliche Entwicklung der Strömungsgeschwindigkeit und die zeitliche Entwicklung des Faktors  $K_t$  dargestellt.

Liegt die mittlere Strömungsgeschwindigkeit weit unterhalb der kritischen Strömungsgeschwindigkeit, kann die Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung der Strömung einer Tide vorteilhaft sein (siehe Abb.12 rechts). In Bereichen mit entsprechend niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten und im Vergleich dazu hohen kritischen Strömungsgeschwindigkeiten werden teilweise nur ca. 60% der Gleichgewichtskolkentiefe erreicht.

Es stellt sich die Frage, ob die Berücksichtigung einer gemittelten Strömungsgeschwindigkeit ausreichend ist. In Abb.13 ist daher der Entwicklungsverlauf für eine Strömungsgeschwindigkeit von  $U=0,5$  m/s angegeben. Dies entspricht ungefähr dem Mittelwert des in Abb.12 dargestellten zeitlichen Verlaufs der Strömungsgeschwindigkeit. Wie zu erwarten, ergeben sich stark unterschiedliche Entwicklungsverläufe. Soll dennoch mit

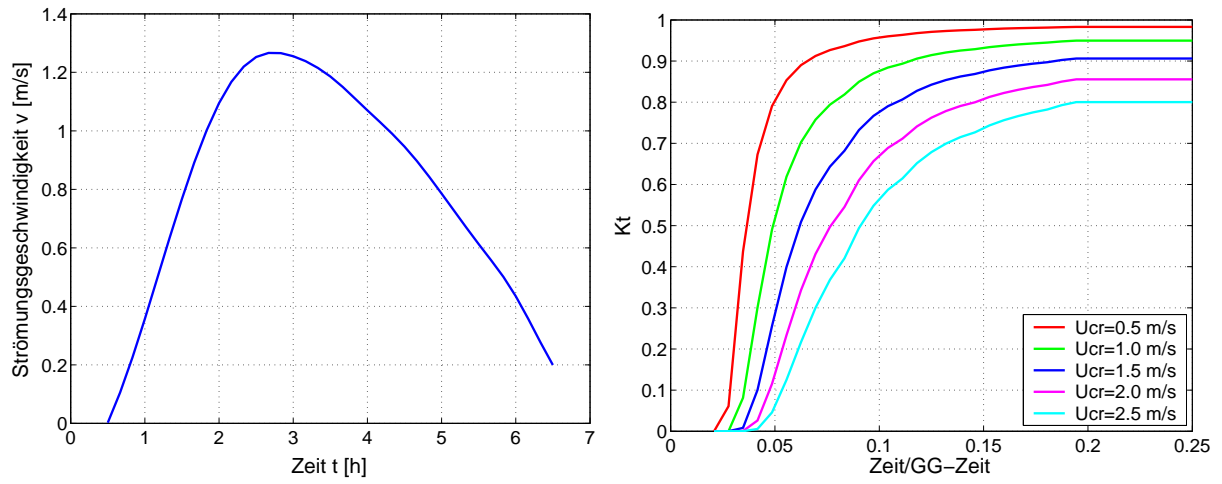


Abbildung 11: Zeitfaktor  $K_t$  bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten

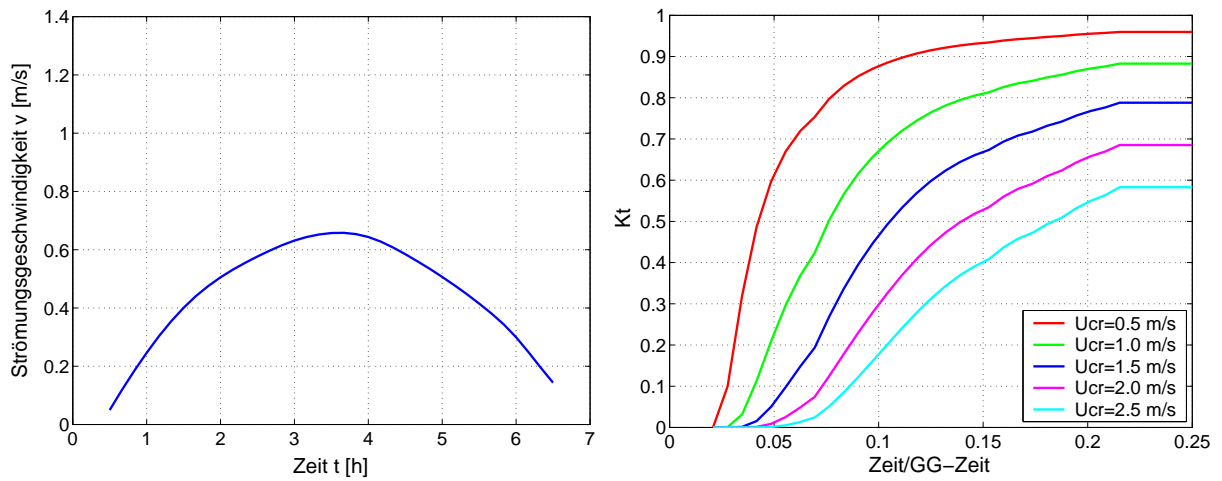


Abbildung 12: Zeitfaktor  $K_t$  bei mittleren Strömungsgeschwindigkeiten



einem Mittelwert gerechnet werden, ist dieser daher ausreichend hoch anzusetzen.

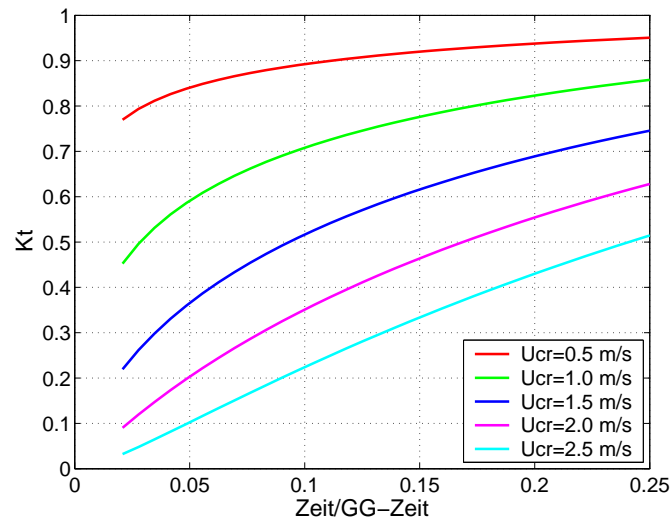


Abbildung 13: Kolkentwicklung bei einer konstanten Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s

## 2. Kolkentwicklung bei zeitlich veränderlicher Strömungsgeschwindigkeit

Verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten haben unterschiedliche Endkolkiefen zur Folge. Dieser Zusammenhang wird in der Formel (17) durch den Faktor  $K_I$  berücksichtigt. In diesem Abschnitt soll daher die Kolkentwicklung für einen konkreten Beispielfall untersucht werden. Dabei wird von einer Wassertiefe  $h = 30$  m, einem Durchmesser  $D = 6$  m, gleichförmigem Sand, einem mittleren Korndurchmesser von 0,0005 m und einem kreisförmigen Einzelpfahl ausgegangen. Unter diesen Voraussetzungen ergeben sich für die in den Abb. 14 und 15 jeweils links dargestellten Strömungsgeschwindigkeiten die jeweils rechts dargestellten Kolkentwicklungen.

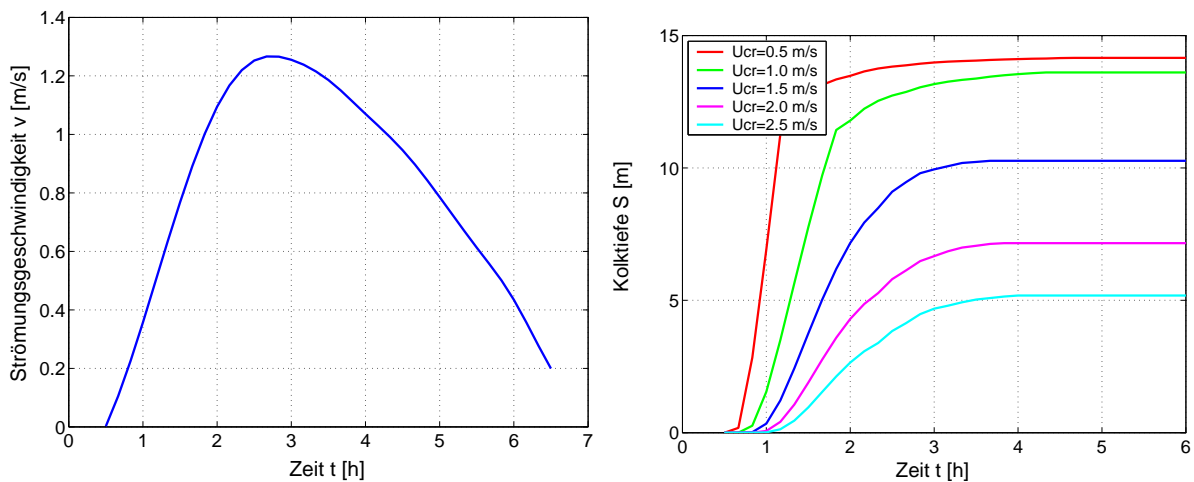


Abbildung 14: Kolkentwicklung bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten

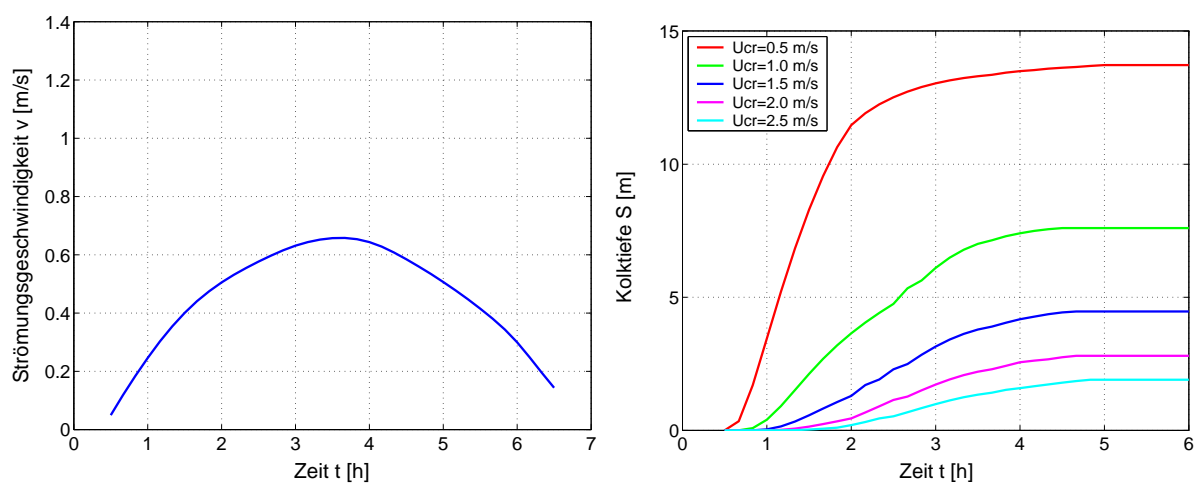


Abbildung 15: Kolkentwicklung bei mittleren Strömungsgeschwindigkeiten

## 3 Einflussfaktoren der Kolkbildung

Der Kolk wird in seiner Größe, Entwicklungsgeschwindigkeit und Form von verschiedenen Faktoren unterschiedlich stark beeinflusst. Neben dem Einfluss der Strömungseigenschaften sowie Form und Abmessungen des Bauwerkes sind die Parameter des Fluids und des Untergrundes zu beachten. Im Folgenden wird auf die Auswirkungen der verschiedenen Parameter eingegangen.

### 3.1 Strömungseigenschaften

Die Strömungseigenschaften beeinflussen die Bodenschubspannung und haben somit einen entscheidenden Einfluss auf die Kolkbildung. Als Parameter sind hier die Wassertiefe, die Fließgeschwindigkeit, die Strömungsbedingungen und die Fließrichtung zu nennen. Diese werden in den folgenden Abschnitten näher untersucht.

#### 3.1.1 Wassertiefe

Wenn die Tiefe so groß ist, dass sich der Hufeisenwirbel und die Bugwelle nicht beeinflussen, ist die Kolktiefe gegenüber einer Änderung der Wassertiefe unempfindlich. Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass die Wassertiefe ab einem Verhältnis von  $h/D > 3$  nicht mehr entscheidend ist (siehe (Whitehouse, 1998)).

Bei niedrigeren Wasserständen ist die Kolkbildung von der Wassertiefe und dem mittleren Korndurchmesser abhängig. Nähere Angaben hierzu können (Raudkivi, 1982) oder (Stein, 1981) entnommen werden. Auf den Einfluss der Korngrößen wird außerdem in Abschnitt 3.3 eingegangen.

In den derzeitigen Planungsräumen für Offshore-Windenergieanlagen in Deutschland liegen Tiefen um die 30 m vor. Bei Pfahldurchmessern zwischen ca. 2,50 m (Tripod) und ca. 6,00 m (Monopile) kann unter diesen Bedingungen davon ausgegangen werden, dass die Kolkbildung von der Wassertiefe unabhängig ist. In flacheren Bereichen sowie bei anderen Bauwerksabmessungen ist zu überprüfen, ob eine Beeinflussung vorliegt.

#### 3.1.2 Strömungsgeschwindigkeit

Die Strömungsgeschwindigkeit ist von entscheidender Bedeutung für die Kolkbildung. Der Staudruck im Frontalbereich des Bauwerkes sowie die Gradienten des Druckes und der Geschwindigkeit nehmen mit steigender Geschwindigkeit zu. Höhere Fließgeschwindigkeiten be-

deuten demnach immer eine größere Gefahr für das Bauwerk. Dies wird auch bei Betrachtung der dimensionslosen Kennzahlen deutlich, die die Strömungsbedingungen charakterisieren. Die Strömungsgeschwindigkeit geht sowohl in die Reynoldszahl  $Re$  als auch in die Keulegan-Carpenter-Zahl  $KC$  direkt und linear ein. Bei Untersuchungen in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit ist zu beachten, dass diese sich im Bereich des Bauwerkes verdoppelt (siehe (Whitehouse, 1998)). Es ergibt sich daher:

$$U_B = 2 \cdot U_{max} \quad (19)$$

### 3.1.3 Strömungsbedingungen

Bauwerke können gleichmäßigen Strömungen (z.B. in Flüssen oder als Tidenströmungen), Wellen oder einer Kombination aus beidem ausgesetzt sein. Je nach Fließzustand entstehen im Bereich des Bauwerkes Turbulenzen unterschiedlicher Stärke. Diese haben unterschiedliche Erosionskapazitäten und damit verschiedene Kolkgefährdungen zur Folge. Die Kolkbildung kann daher häufig in Abhängigkeit von Kennzahlen dargestellt werden, die die Strömungsbedingungen beschreiben.

#### 1. Gleichmäßige Strömung

Der Einfluss einer gleichmäßigen Strömung auf die Ausbildung von Kolken ist ausführlich untersucht worden. Insbesondere im Zusammenhang mit der Kolkbildung an Brückenturmpfeilern existiert vielfältige Fachliteratur. Als Kennwert für das Strömungsregime in Bauwerksnähe wird die Reynoldszahl  $Re$  angegeben. Sie berechnet sich aus der Strömungsgeschwindigkeit, dem Bauwerksdurchmesser und der kinematischen Viskosität:

$$Re = \frac{U_c \cdot D}{\nu_f} \quad (20)$$

#### 2. Tidebewegung

Tidebewegungen sind über einen bestimmten Zeitraum als gleichmäßige Strömungen anzusehen, bevor sie ihre Richtung ändern. Erreicht die Kolktiefe innerhalb dieses Zeitraums nicht ihren Maximalwert, verhindert die veränderte Strömungsrichtung die Ausbildung eines Kolkes mit Gleichgewichtskolkentiefe. Die Tidebewegung würde der Kolkbildung in diesem Fall entgegen wirken. Genauere Untersuchungen zur zeitlichen Entwicklung des Kolkes werden in Abschnitt 2.4 erläutert.

In (Zanke, 1982) werden Tidebewegungen als langperiodisch alternierende Wellen bezeichnet. Dabei wird die Größe  $d_0/D$  definiert. Darin ist  $d_0$  ein Maß für die absolute

Weglänge, die ein Störungsteilchen in Bodennähe bei Durchgang einer Welle bzw. Tide durchmisst. (Zanke, 1982) berichtet, dass die maximale Kolkentiefe ab einem Wert von

$$d_0/D < 50 \quad (21)$$

merkbar abfällt. Die Ermittlung des Wertes  $d_0$  ist nur mit Hilfe von maßstabsgetreuen Versuchen (in Wellengroßversuchsanlagen) möglich. Im Seebau kann jedoch mit Größenordnungen von  $d_0/D < 10$  gerechnet werden. Bei diesen Verhältnissen liegt die Maximaltiefe nicht mehr im Front- sondern im Seitenbereich des Pfeilers. Zudem ist sie deutlich geringer, als die Tiefe infolge einer gleichmäßigen Strömung. Genaue Aussagen können aufgrund der geringen Anzahl von Versuchsergebnissen nicht gemacht werden.

### 3. Wellen

Die Auswirkung von Wellen auf die Kolkbildung an Bauwerken ist nicht in dem Maße untersucht worden, wie die der gleichmäßigen Strömung. Generell kann jedoch festgehalten werden, dass die zeitlich und örtlich variierende Belastung aus Wellen zu einer in Umfangsrichtung gleichmäßigeren Endkolkentiefe führt, als dies bei einer gleichmäßigen Strömung mit konstanter Anströmrichtung der Fall ist. Die Folge ist ein in der Regel weniger tiefer, jedoch ausgedehnterer Kolk, der das Bauwerk komplett umschließen kann. Als Kennwert wird hier die Keulegan-Carpenter Zahl  $KC$  angegeben. Diese ist folgendermaßen definiert:

$$KC = \frac{U_{max} \cdot T}{D} \quad (22)$$

Dieser Wert ist ein Maß dafür, wie groß die Schwingamplitude der Welle im Vergleich zum Pfahldurchmesser ist. Untersuchungen von Sumer et al. zeigen, dass sich bei einer  $KC$ -Zahl  $KC > 6$  Wirbelsysteme ausbilden. Im Bereich der Windenergieanlagen ist in der Regel mit  $KC$ -Zahlen über  $3 \cdot 10^5$  zu rechnen.

### 4. Überlagerung aus gleichmäßiger Strömung und Wellen

Beim gleichzeitigen Auftreten von gleichmäßiger Strömung und Wellen werden die Geschwindigkeiten  $U_c$  und  $U_w$  vektoriell addiert. Als Maß für den Einfluss der Wellen auf die Strömungsbedingungen dient weiterhin die  $KC$ -Zahl. Generell kann festgestellt werden, dass sich die Kolkentiefe unter dieser kombinierten Belastung dem Wert nähert, der beim alleinigen Auftreten einer gleichmäßigen Strömung auftritt (Raudkivi, 1982). Dieser Zusammenhang wird in Abb.22 dargestellt. Unterschiedliche Einflüsse ergibt die Überlagerung mit brechenden oder nichtbrechenden Wellen. Werden nichtbrechende Wellen

der Strömung überlagert, sinkt die Kolktiefe. Bei brechenden Wellen steigt sie aufgrund der höheren Orbitalgeschwindigkeiten an (Sumer & Fredsoe, 1999).

#### 5. Sturm

Über die Auswirkungen von Sturm auf die Kolkbildung an Pfeilern existieren wenige Untersuchungen. In (DiNatale, 1991) wird von Kolkiefen berichtet, die während eines Sturms 4 bis 7 mal größer als am Ende des Sturms waren. Dabei wird festgestellt, dass der Zeitpunkt der maximalen Kolktiefe nicht mit dem Zeitpunkt der größten Belastungen übereinstimmt.

(Martinez Mendez, 2002) stellt fest, dass die maximale Kolktiefe erreicht wird, wenn die Fließgeschwindigkeit der kritischen Geschwindigkeit für Sedimenttransport entspricht. Eine Erhöhung über diesen Wert hinaus soll zu keiner Steigerung der Kolktiefe führen.

#### 3.1.4 Fließrichtung

Die Fließrichtung kann bei nichtzylindrischen Bauwerken von entscheidender Bedeutung sein. Auch bei mehreren Störkörpern wie z.B. Pfeilergruppen ist die Anströmrichtung zu berücksichtigen. Die Fließrichtung betreffende Untersuchungen werden u.a. in (Sumer et al., 2001) beschrieben.

### 3.2 Bauwerk

Die Konstruktion des Bauwerkes beeinflusst die Änderungen im Strömungsbild und damit die Kolkbildung. Entscheidend sind dabei vor allem die Form und Abmessungen des Bauwerkes, die Art der Gründung und die Größen und Anordnung bei Pfeilergruppen. Auf diese Einflussfaktoren wird in diesem Abschnitt näher eingegangen.

#### 3.2.1 Form und Abmessungen des Bauwerkes

Die Kolkbildung ist u.a. von der Form und den Abmessungen des Bauwerkes abhängig. So sind stromförmige oder elliptische Körper weniger kolkgefährdet als z.B. rechteckige. Das Kolkverhalten rechteckiger Bauwerke wird zudem vom Seitenlängenverhältnis beeinflusst. So haben breite Körper starke Kolke zur Folge. Ausführliche Untersuchungen zu diesem Thema werden in (Breusers & Raudkivi, 1991) vorgestellt.

### 3.2.2 Pfeilergruppen

Pfeiler mit einem geringen Abstand beeinflussen sich bei der Kolkbildung gegenseitig. Dabei können die entstehenden Turbulenzen und Sedimentbewegungen verstärkt oder abgeschwächt werden. Tabelle 1 basiert auf Modellversuchen von Breusers und Raudkivi (1971) und gibt einen Überblick über die Größenverhältnisse der Kolke in bezug auf die Kolke eines Einzelpfahles. Dabei wird nach (Hoffmans & Verheij, 1997) ein Faktor  $K_g$  zum Einfluss der Gruppenwirkung in Abhängigkeit von der Breite  $b$  der Pfeiler angegeben.

	Pfeilerabstand	$K_g$ vorderer Pfahl	$K_g$ hinterer Pfahl
→ ○ ○	1b	1,0	0,9
	2b bis 3b	1,15	0,9
	> 15b	1,0	0,8
→ ○	1b	1,9	1,9
	5b	1,15	1,2
	> 8b	1,0	1,0
→ ○	1b	1,9	1,9
	2b bis 3b	1,2	1,2
	> 8b	1,0	1,0

Tabelle 1: Einfluss der Anordnung zweier Pfeiler auf die Kolkbildung (Hoffmans & Verheij, 1997)

Untersucht werden verschiedene Pfahlanordnungen deren Ergebnisse in Abhängigkeit des Verhältnisses Pfeilerabstand zu Pfeilerdurchmesser dargestellt werden. Es wird deutlich, dass die Pfeiler sich bei größeren Entfernungen (8b bzw. 15b) kaum noch beeinflussen. Bei kleineren Abständen und ungünstiger Anordnung muss mit einer erhöhten Kolkbildung gerechnet werden. Dabei können Tiefen erreicht werden, die fast der doppelten Tiefe (1,9) eines Kolkes bei einem einfachen Pfahl entsprechen. Ausnahmen bilden Pfeiler, die in Strömungsrichtung hintereinander liegen. Hier wird am hinteren Pfeiler eine verminderte Kolkbildung beobachtet. Die Änderungen bei der Kolkbildung sind nach (Breusers & Raudkivi, 1991) von folgenden Vorgängen abhängig:

- Einflüsse, die die Kolkbildung vermindern

1. Geringere Fließgeschwindigkeit

Die Bildung des Hufeisenwirbels ist stark von der umgebenden Strömungsgeschwindigkeit abhängig. Sinkt diese durch stromaufwärts gelegene Nachbarpfeiler, kann es zu einer verminderten Kolkbildung kommen.

2. Sedimentablagerung

Pfeiler, die sich innerhalb der Gruppe stromaufwärts befinden, erzeugen im Rahmen der Kolkbildung Sedimenttransport. Erfolgt die Ablagerung der Sedimente im Bereich der stromabwärts liegenden Pfeiler, kann die Kolkbildung an diesen zeitlich verzögert oder vermindert werden.

- Einflüsse, die die Kolkbildung verstärken

1. Überlagerung der Kolke

Besteht zwischen einzelnen Pfeilern ein so geringer Abstand, dass die Kolke sich gegenseitig berühren, kann es zu einer Veränderung des Gleichgewichtszustandes kommen. Im hinteren Bereich des vorderen Pfeilers entsteht mit dem Kolk des hinteren Pfeilers eine Absenkung des Bettes. Der Abtransport von Sediment im hinteren Bereich des vorderen Pfeilers wird dadurch erleichtert und es kommt zu einer vermehrten Kolkbildung.

2. Einfluss der Nachlaufwirbel

Die Nachlaufwirbel des vorderen Pfeilers können den Abtransport des Sediments im Bereich des stromabwärts gelegenen Pfeilers verstärken. Dieser Vorgang ist abhängig vom Abstand der Pfeiler, der Fließgeschwindigkeit, dem Druck der Wirbel und dem Abstand der Wirbelstraße vom Pfeiler.

3. Überlagerung der Hufeisenwirbel

Dieser Effekt tritt bei Pfeilergruppen auf, die nicht genau in Fließrichtung angeordnet sind. Im Bereich jedes einzelnen Pfeilers bildet sich ein Hufeisenwirbel. Ist der Abstand zwischen den Pfeilern so gering, dass die Hufeisenwirbel sich gegenseitig einengen, kommt es zu einer erhöhten Fließgeschwindigkeit im Seitenbereich der Pfeiler. Diese führt zu einer stärkeren Kolkbildung.

All diese Effekte sind von den Abständen zwischen den einzelnen Bauteilen abhängig. Bei steigendem Verhältnis von Entfernung zu Pfeilerdurchmesser werden sie unwirksam, so dass die Gruppenwirkung dann zu vernachlässigen ist. Im Bereich der Offshore-Windenergieanlagen ist die Gruppenbildung bei Tripod-Gründungen zu berücksichtigen. Dabei sind weitere Änderungen des Strömungsbildes durch eventuelle Verstrebungen einzubeziehen.



### 3.3 Untergrund

#### 3.3.1 Korngrößenverteilung des Baugrundes

Die Einflüsse der Korngrößenverteilung und der Lagerungsdichte des Untergrundes sind in der Regel in der kritischen Fließgeschwindigkeit zur Erzeugung von Sedimentbewegungen berücksichtigt.

Die zeitliche Entwicklung eines Kolkes sowie seine Endtiefe hängen von der Größe und Gleichförmigkeit des Kornes ab. Große Körner mit einer gleichmäßigen Verteilung haben einen hemmenden Einfluss auf die Kolkbildung. Das weit gestreute Material kann einer Kolkung länger widerstehen als Baugrund mit einer einheitlichen Größe, da es hier erst zu einem teilweisen Abtrag der Sedimente (Armierung) kommt.

Das Bodenmaterial im Meer besteht in der Regel aus Korngrößen, die im Vergleich zum typischen Pfeilerdurchmesser sehr klein sind. Da die Korngrößen zudem sehr einheitlich sind, ist der positive, hemmende Einfluss, den Korngröße und Kornverteilung auf die Kolkbildung haben können, vernachlässigbar gering (Whitehouse, 1998). Genauere Angaben über den Einfluss der Korngrößenverteilung des Baugrundes können z.B. (Breusers, Nicollett, & Shen, 1977), (Breusers & Raudkivi, 1991) und (Hoffmans & Verheij, 1997) entnommen werden.

#### 3.3.2 Kornform

Ungleichmäßige Kornformen vergrößern die Wasserangriffsfläche und somit den Sedimenttransport. Als Bodenmaterial sind runde Körnungen, wie sie in marinen Gebieten häufig vorkommen, am besten geeignet.

#### 3.3.3 Kohäsive Böden

Die kohäsiven Eigenschaften eines Bodens vergrößern die Widerstandsfähigkeit gegen Kolkungen. Die in kohäsiven Böden entstehenden Kolke haben eine komplexere Struktur und steilere Begrenzungen.

## 4 Berechnungsansätze

Zur Voraussage der Kolktiefe und -ausdehnung werden zur Zeit verschiedene Möglichkeiten untersucht. In diesem Abschnitt werden die folgenden Methoden näher beschrieben:

1. Empirische Formeln
2. Probabilistischer Ansatz
3. Sequenzieller Ansatz
4. Berechnung anhand eines einzelnen Belastungsfalls
5. Numerische Modelle

Der probabilistische Ansatz und die Berechnung anhand einer Beispielbelastung werden oftmals zusammen angewendet, so dass die Vorteile beider Methoden genutzt werden. Die Besonderheiten der jeweiligen Verfahren sollten bei der Interpretation berücksichtigt werden.

### 4.1 Empirische Gleichungen

Die einfachste und schnellste Möglichkeit der Kolkberechnung stellen die empirischen Gleichungen dar. Diese sind vom Praktiker leicht anzuwenden und zu interpretieren. In der Literatur existieren zahlreiche empirische Gleichungen, die die Kolkbildung für Brückenpfeiler oder ähnliche Bauwerke voraussagen. Da die Geometrie eines senkrecht im Wasser stehenden Zylinders bei der Monopile-Gründung ebenso Anwendung findet, stellt sich die Frage, ob eine Anwendung der existierenden Gleichungen für diesen Gründungstyp möglich ist. Dabei sind vor allem die Auswirkungen der wesentlich kleineren Pfeilerdurchmesser im Vergleich zur Monopile-Gründungen (ca. 2 m zu ungefähr 6 bis 10 m) zu berücksichtigen. Da empirische Gleichungen in der Regel nur für bestimmte Parameterbereiche gültig sind, kann es bei der Übertragung der Gleichungen zu Maßstabsproblemen kommen. Problematisch ist außerdem, dass die jeweiligen Gültigkeitsbereiche meist nicht ausreichend dokumentiert sind.

#### 4.1.1 Formeln für gleichmäßige Strömung

Bei der Behandlung der Formeln für gleichmäßige Strömung wird nach dem in Abb. 16 dargestellten Prinzip vorgegangen.

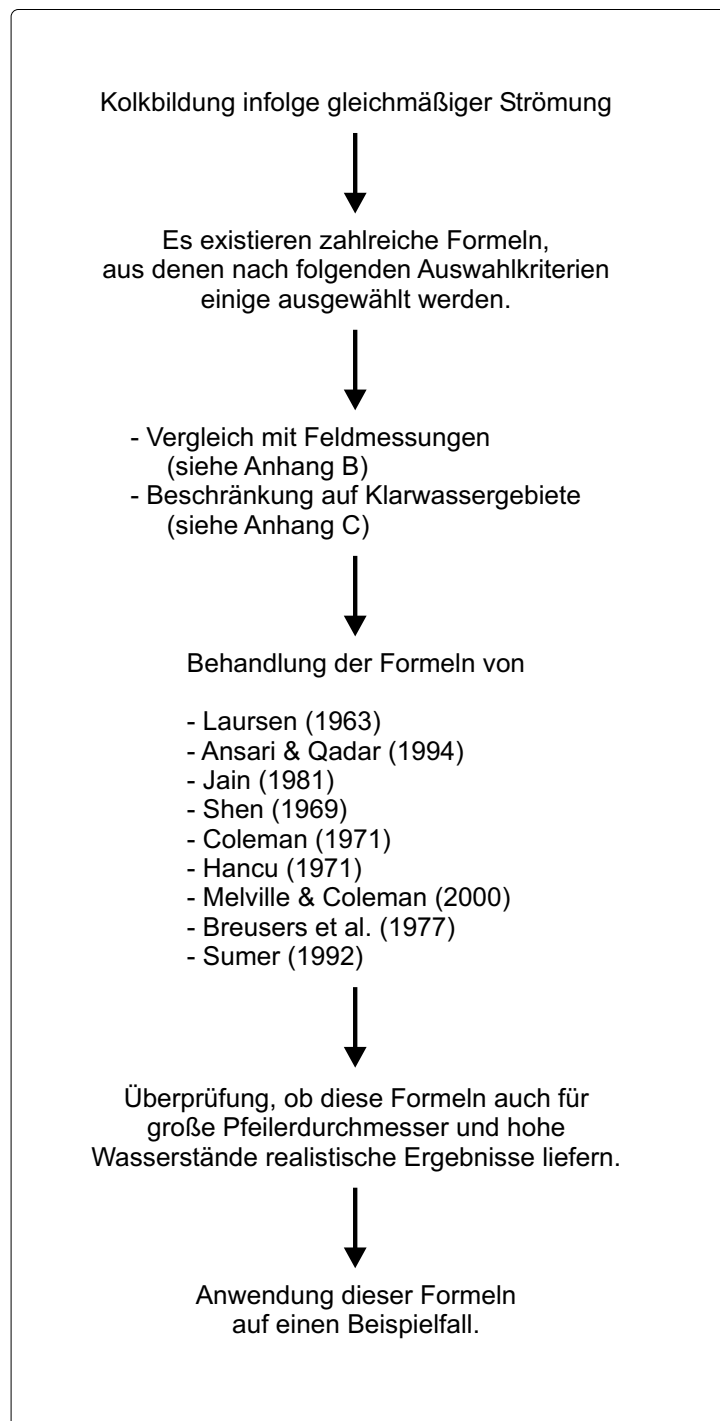


Abbildung 16: Untersuchung von Kolkformeln für gleichmäßige Strömung

### 1. Auswahlkriterien der behandelten Kolkformeln

Im Folgenden sollen einige der in der Literatur vorgestellten Kolkformeln näher behandelt werden. Die Anzahl der untersuchten Formeln wird mit Hilfe zweier Auswahlkriterien eingeschränkt. In Anhang B werden die Ergebnisse von Vergleichen mit Feldmessungen dargestellt. Die Formeln, die dabei die besten Ergebnisse liefern, werden weiterhin behandelt. In Anhang C wird gezeigt, dass es sich bei den Bereichen, die momentan für Offshore-Windenergieanlagen in Betracht kommen, um Klarwasserbereiche handelt. Die Untersuchung der empirischen Formeln wird daher auf Ansätze beschränkt, die im Klarwasser gelten. Im Einzelnen werden die in Tabelle 2 dargestellten Formeln weiter behandelt. Dabei werden von einigen Autoren mehrere Formeln angegeben. Dies ist der Fall, wenn die in (Qadar & Ansari, 1994) untersuchte Formel in späteren Jahren abgewandelt bzw. korrigiert wurde.

Autor	Jahr	Formel	Literatur
Laursen & Toch	1956	$S/D = 1.5 \cdot (h/D)^{0.3}$	(Qadar et al.)
Laursen	1963	$S/D = 1.34 \cdot (h/D)^{0.5}$	(Melville et al.)
Qadar	1981	$S/D = 1.33 D^{-0.36}$	(Qadar et al.)
Ansari & Qadar	1994	$S/D = 3.60 D^{-0.6}$ (für $D > 2.2$ m)	(Melville et al.)
Jain	1981	$S/D = 1.41 (h/D)^{0.3} \cdot (U_{cr}/\sqrt{gh})^{0.25}$	(Qadar et al.)
Jain	1981	$S/D = 1.84 (h/D)^{0.3} \cdot (U_{cr}/\sqrt{gh})^{0.25}$	(Melville et al.)
Shen II	1969	$S/D = 3.4 (U_c/\sqrt{gD})^{0.66}$	(Qadar et al.)
Coleman	1971	$S/D = 0.54 (h/D)^{0.19} \cdot (U_{cr}/\sqrt{gh})^{1.19} \cdot h^{0.41}$	(Melville et al.)
Hancu I	1971	$S/D = 3.3 (d/D)^{0.2} \cdot (h/D)^{0.13}$	(Qadar et al.)
Melville & Coleman	2000	$S/D = 2.4 K_y K_d K_s K_\theta$	(Anhang D)
Breusers et al.	1977	$S/D = 2.0 \tanh(h/D) K_s K_\theta$	(Anhang D)
Sumer	1992	$S/D = 1.3$	

Tabelle 2: Nach den in Anhang B und C vorgestellten Kriterien zu behandelnde Kolkformeln

### 2. Anwendung der Formeln bei verschiedenen Durchmesser

Viele Formeln wurden für kleinere Pfeilerdurchmesser entwickelt als die im Offshore-Bereich vorliegenden. (Die in (Melville & Coleman, 2000) vorgestellten Beispiele ent-

halten z.B. nur Pfeiler mit Durchmessern von weniger als 2.50 m.) Die ausgewählten Formeln werden in den Abb. 17 in Abhängigkeit vom Pfeilerdurchmesser dargestellt. Dabei wird zwischen linearen und nichtlinearen Formeln unterschieden.

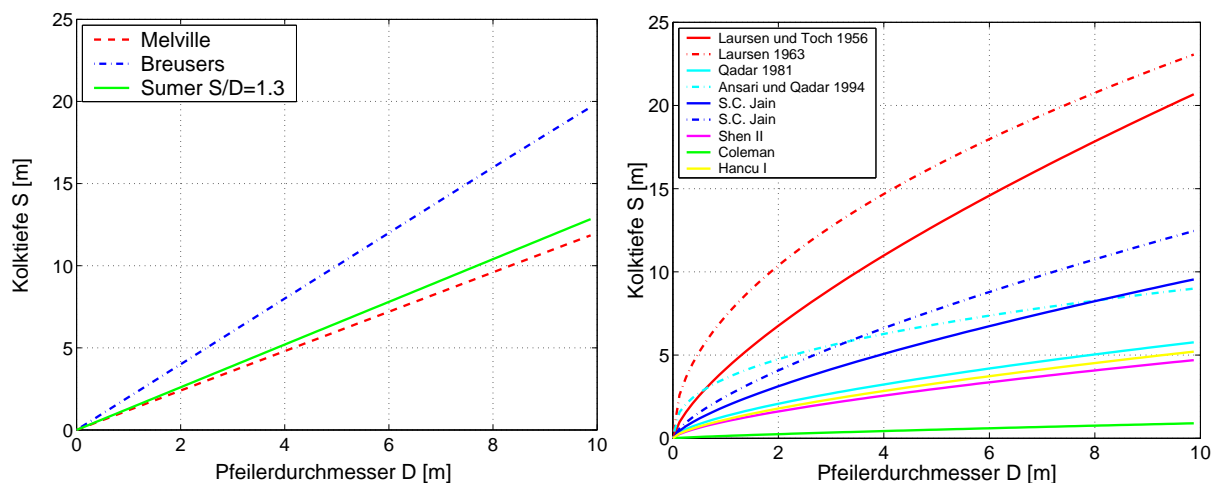


Abbildung 17: Kolkiefen linearer (links) und nichtlinearer (rechts) Kolkformeln in Abhängigkeit vom Pfeilerdurchmesser (für  $h = 30.00$  m)

Es wird deutlich, dass einige Ansätze für große Pfeilerdurchmesser zu extremen Kolkiefen führen. Dies ist vor allem bei den linearen Formeln der Fall. Aber auch die von Laursen et al. entwickelten Formeln liefern für Pfeilerdurchmesser von 10.00 m Kolkiefen von bis zu fast 25.00 m. Die übrigen behandelten Formeln liegen in einem Bereich zwischen ca. 0.90 und 9.00 m für 10.00 m Pfeilerbreite (siehe auch Abb. 18).

### 3. Anwendung der Formeln bei verschiedenen Wassertiefen

Viele Formeln wurden für geringere Wassertiefen entwickelt als die im Offshore-Bereich vorliegenden. (Die in (Melville & Coleman, 2000) vorgestellten Beispiele enthalten z.B. nur Wassertiefen von ca. 1.50 bis 7.00 m.) Die ausgewählten Formeln werden in Abb. 19 in Abhängigkeit von der Wassertiefe dargestellt. Dabei liefert die Formel von Laursen et al. eine mit steigender Wasserhöhe ansteigende Kolkiefe. Alle anderen Formeln zeigen spätestens ab einer Wassertiefe von 15.00 m einen konstanten Verlauf. Änderungen der Wassertiefe scheinen somit ab einem bestimmten Wasserstand keinen oder einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf die Kolkiefe zu haben. Die Unterschiede in der Kolkiefe resultieren aus den bereits dargestellten differierenden Werten der Formeln.

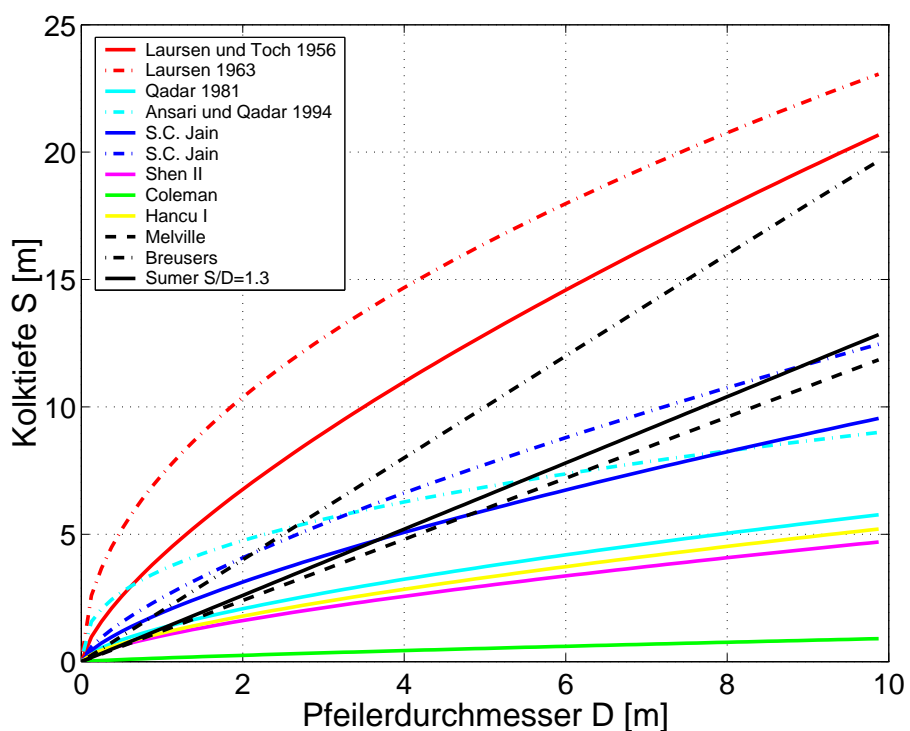


Abbildung 18: Abhängigkeit der Kolktiefe vom Pfeilerdurchmesser (für  $h = 30.00$  m)

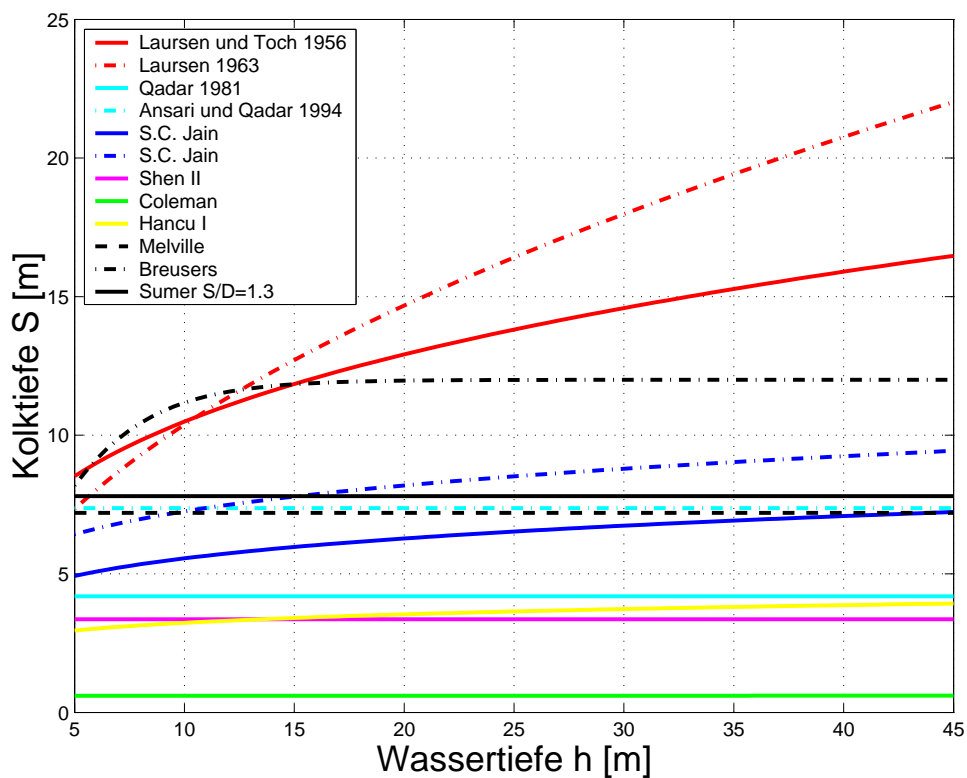


Abbildung 19: Abhängigkeit der Kolktiefe vom Wasserstand (für  $D = 6.00$  m)

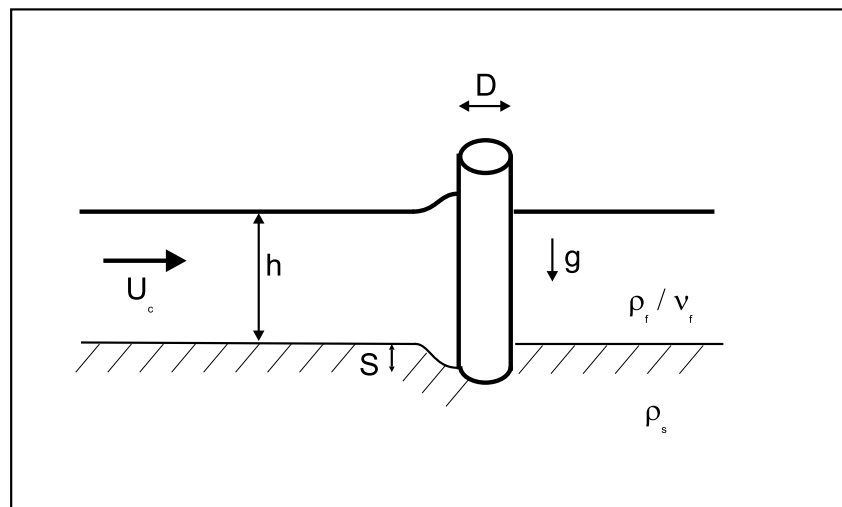
4. Untersuchung eines Beispielfalles

Abbildung 20: Variablenbezeichnung

Die verschiedenen Ansätze werden im Folgenden anhand eines Beispiels verglichen. Dabei werden die in Abb. 20 dargestellten Bezeichnungen gewählt. Die für die Rechnungen benötigten Werte ergeben sich folgendermaßen:

Wassertiefe	$h = 30.00 \text{ m}$
Pfeilerdurchmesser	$D = 6.00 \text{ m}$
Erdbeschleunigung	$g = 9.81 \text{ m/s}^2$
Sedimentdichte	$\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$
Mittlerer Korndurchmesser	$d = 0.0005 \text{ m}$
Fluiddichte	$\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$
Viskosität der Flüssigkeit bei 10°C	$\nu_f = 1.3 \cdot 10^{-6}$
Strömungsgeschwindigkeit infolge Strömung	$U_c = 0.5 \text{ m/s}$
Kritische Strömungsgeschwindigkeit	$U_{cr} = 1.0 \text{ m/s}$
Mittlerer Korndurchmesser	$d = 0.5 \text{ mm}$

Mit den vorgestellten Formeln ergeben sich die in Tabelle 3 dargestellten Werte.

Autor	Jahr	Ermittelte Kolktiefe [m]	
Laursen & Toch	1956	14,59	
Laursen	1963	17,98	MAX.
Qadar	1981	4,19	
Ansari & Qadar	1994	7,37	
Jain	1981	6,74	
Jain	1981	8,79	
Shen II	1969	3,36	
Coleman	1971	0,60	MIN.
Hancu I	1971	3,73	
Melville & Coleman	2000	7,20	
Breusers et al.	1977	12,00	
Sumer	1992	7,80	

Tabelle 3: Ergebnisse der vorgestellten Kolkformeln für den Beispielfall

#### 4.1.2 Formeln für gleichmäßige Strömung und Wellen

Zur Behandlung von Kolkprozessen in gleichmäßiger Strömung und Wellen werden in der Literatur die Formeln von (Sumer, Fredsoe, & Christiansen, 1992) und (Melville & Coleman, 2000) beschrieben. Diese beinhalten jeweils die Keulegan-Carpenter Zahl  $KC$ , die sich folgendermaßen definiert

$$KC = \frac{U_{max} \cdot T}{D} \quad (23)$$

Die Kolkbildung unter Wellenbelastung ist demnach von der maximalen Anströmgeschwindigkeit  $U_{max}$ , der Wellenperiode  $T_w$  und dem Pfeilerdurchmesser  $D$  abhängig. Die erwähnten Formeln werden im Folgenden kurz vorgestellt. Im Anschluss daran werden ihre Ergebnisse für verschiedene Durchmesser dargestellt und der gewählte Beispielfall untersucht.

##### 1. Formel von (Sumer et al., 1992)

Diese Formel gibt die maximale Kolktiefe (Gleichgewichtskolktiefe) in Abhängigkeit vom



Pfahldurchmesser und der Keulegan-Carpenter-Zahl  $KC$  an. Sie gilt für reguläre Wellenbelastungen auf einen einzelnen Pfahl bei beweglicher Sohle.

$$\frac{S}{D} = 1.3 \cdot \{1 - e^{(-0.03 \cdot (KC-6))}\} \quad (24)$$

Der Kurvenverlauf und vergleichende Messwerte verschiedener Autoren sind in Abb.21 dargestellt. Auffällig ist, dass auch die Überlagerung einer geringen gleichmäßigen Strömung über Wellen einen erheblichen Anstieg der Kolkttiefe bewirkt. Mit dem Sonderfall  $KC \rightarrow \infty$  wird hier auch das alleinige Auftreten einer gleichmäßigen Strömung erfasst, bei dem die größten Kolkttiefen erreicht werden.

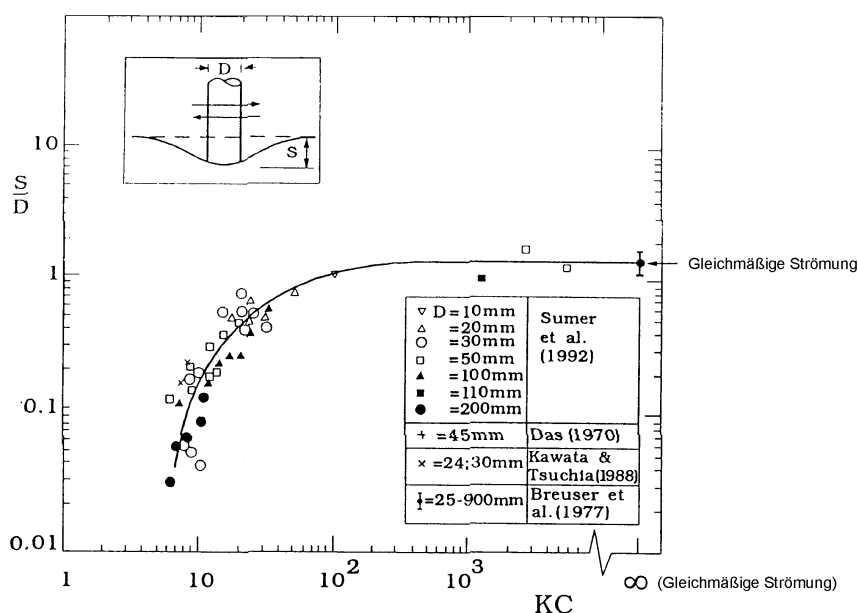


Abbildung 21: Gleichgewichtskolkttiefe in Abhängigkeit von der  $KC$ -Nummer (Sumer & Fredsoe, 1999)

Die Überlagerung der gleichmäßigen Strömung durch eine Welle führt zur Verringerung der Gleichgewichtskolkttiefe. In Abb. 22 ist die Abhängigkeit der maximalen Kolkttiefe von dem Verhältnis der Strömungs- zur Wellengeschwindigkeit gegeben. Desweiteren behandeln (Sumer et al., 2001) den Einfluss der Anordnung bei Pfahlgruppen und die Auswirkungen der Fließrichtung bei rechteckigen Bauwerken.

Die vorgestellten Ergebnisse werden in (Bayram & Larson, 2000) mit den von Bayram und Larson ermittelten Messwerte verglichen. Der Vergleich ergibt eine gute Übereinstim-

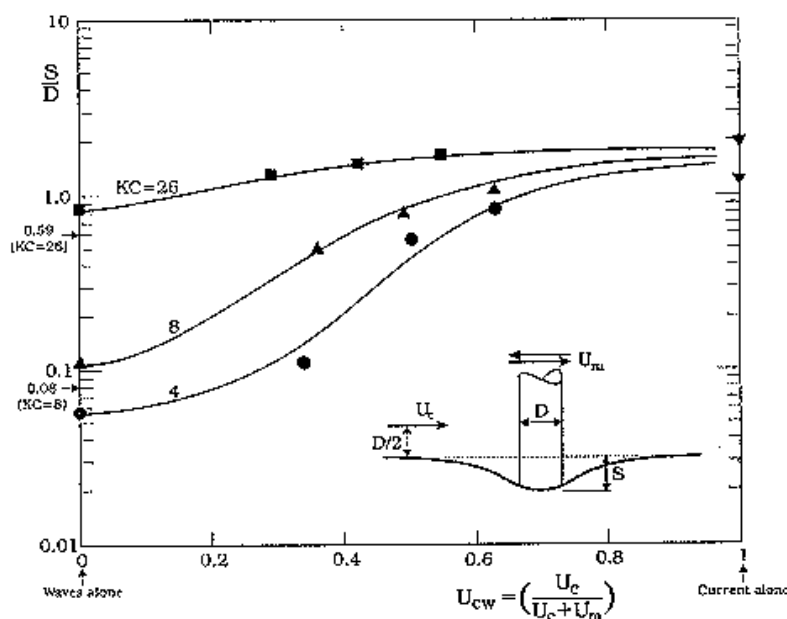


Abbildung 22: Abhängigkeit der Kolktaiefe vom Verhältnis der Wellen zur gleichmäßigen Strömung (Sumer & Fredsoe, 2001)

mung der Daten. Desweiteren werden in diesem Artikel die Abhängigkeiten der Kolktaiefe von anderen Parametern, wie z.B. der Reynolds-Zahl  $Re$ , untersucht. Die Ermittlung der Breite der Kolke liefert lediglich geringe Abhängigkeiten von den Fließbedingungen. Es wird vermutet, dass dieser Wert hauptsächlich von der Pfeilgeometrie abhängt.

Für die Untersuchung von Offshore-Windenergieanlagen bleibt zu untersuchen, in welchem Maße die Tidebewegungen die Kolkbildung beeinflussen. Auf der sicheren Seite liegend könnte die Formel von Sumer et al. verwendet werden. Dies wird sich jedoch als unwirtschaftlich erweisen, sobald die maximale Kolktaiefe nicht innerhalb einer Tide erreicht und die Kolkbildung so vermindert wird. Nähere Untersuchungen dazu sind Abschnitt 2.4 zu entnehmen.

## 2. Formel von (Melville & Coleman, 2000)

In (Melville & Coleman, 2000) geben die Autoren den schon von Sumer et al. gegebenen Lösungsansatz zur Ermittlung der Kolktaiefe an. Dabei erhöhen sie den Faktor 1.3 auf 2.0, so dass sich die folgende Formel ergibt.

$$\frac{S}{D} = 2.0 \cdot \{1 - e^{(-0.03(KC-6))}\} \quad (25)$$

### 3. Anwendung der Formeln bei verschiedenen Durchmessern

Wie bereits erläutert, ist die Kolktiefe von der Anströmgeschwindigkeit, der Wellenperiode sowie dem Pfeilerdurchmesser abhängig. Beispielhaft wird in Abb. 23 die Abhängigkeit der Kolktiefe vom Pfeilerdurchmesser dargestellt. Dabei werden eine Periodendauer  $T_w = 12$  s und eine Strömungsgeschwindigkeit  $U_{max} = 4$  m/s gewählt. Die Abbildung macht deutlich, dass die maximale Kolktiefe für diese Werte bei einem Pfeilerdurchmesser von  $D = 2.00$  m erreicht wird. Zu beachten ist, dass dieser ungünstigste Pfeilerdurchmesser sowohl von der angesetzten Periodendauer als auch der Strömungsgeschwindigkeit abhängt. Die vorgestellte Formel gilt nur für KC-Zahlen  $> 6$ . Für kleinere Werte, wie sie hier ab einem Pfeilerdurchmesser von 8.00 m auftreten, ergeben sich negative Kolkiefen.

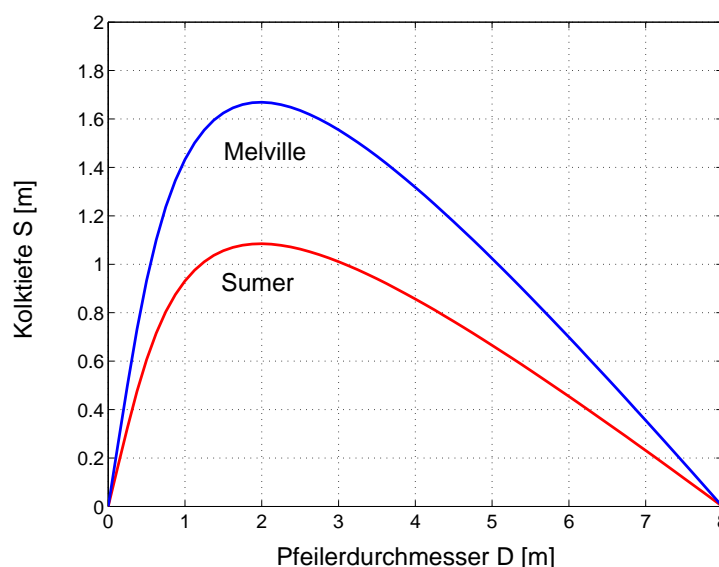


Abbildung 23: Kolktiefe S in Abhängigkeit vom Pfeilerdurchmesser D

### 4. Untersuchung eines Beispielfalles

Zur Behandlung des in Abschnitt 4 vorgestellten Beispiels sind Angaben zur Wellenbelastung nötig. Zusätzlich zu den oben angegebenen Werten werden deshalb die folgenden Parameter angenommen.

Periodenlänge	$T_w = 12$ s
Strömungsgeschwindigkeit infolge Wellen und gleichm. Strömung	$U_{max} = 4$ m/s

Damit ergibt sich für KC:

$$\begin{aligned}
 KC &= \frac{U_{max} \cdot T}{D} & (26) \\
 &= \frac{4.00 \cdot 12}{6.00} \\
 &= 8 \\
 &> 6
 \end{aligned}$$

Mit den von (Sumer et al., 1992) und (Melville & Coleman, 2000) vorgestellten Formeln ergeben sich für diesen Beispielfall die in Tabelle 4 dargestellten Werte.

Autor	Jahr	Ermittelte Kolktiefe [m]
Sumer et al.	1992	0.45
Melville et al.	2000	0.70

Tabelle 4: Ergebnisse der vorgestellten Kolkformeln für den Beispielfall

### 4.1.3 Ergebnis

- Formeln für gleichmäßige Strömung

Die vorhandenen empirischen Gleichungen liefern aufgrund der fehlenden Angaben über Gültigkeitsbereiche, verbunden mit Maßstabsproblemen bei der Übertragung in andere Größenordnungen keine verlässlichen Aussagen über Kolkiefen bei Offshore-WEA. Zudem ist ihre Anwendbarkeit auf Monopile-Gründungen begrenzt. Gruppeneffekte wie sie bei Tripod-Gründungen auftreten oder die Vorgänge an Schwergewichtsgründungen werden nicht berücksichtigt.

Weitere Angaben zu Vergleichen zwischen den verschiedenen Gleichungen sind z.B. (Raudkivi, 1982), (Qadar & Ansari, 1994) oder (Whitehouse, 1998) zu entnehmen.

- Formeln für gleichmäßige Strömung und Wellen

Die vorgestellten Gleichungen liefern für kleine KC-Zahlen sehr geringe Kolkiefen. Die Anwendbarkeit dieser Formeln bzw. der Kennzahl KC sollte daher überprüft werden. Verschiedene Messungen ergeben bei Sturmereignissen immerhin erhebliche Kolkiefen. Generell kann jedoch festgehalten werden, dass die Wellenbelastung zu einer Verwischung des in Abschnitt 2 dargestellten Kolkes führt. Statt des asymmetrischen Kolkes entsteht je nach Variation der Anströmrichtung ein gleichmäßiger, um weite Teile des Bauwerkes herum reichende Kolk.

## 4.2 Probabilistischer Ansatz

Dieser z.B. in (Whitehouse, 1998) vorgestellte Ansatz berücksichtigt alle auftretenden Belastungen mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsverläufen. Die durchschnittliche Anzahl verschiedener Wellenhöhen, -perioden und -richtungen wird angegeben, sodass eine Gewichtung der Ereignisse erfolgt. Durch diese Methode werden auch Ermüdungserscheinungen erfasst. Probleme sind in der Vernachlässigung des zeitlichen Ablaufs sowie der Verwendung der linearen Wellentheorie zu sehen, deren Anwendungsbereich in Anhang E näher erläutert wird. Generelle Aussagen zu probabilistischen Verfahren sind z.B. (Oumeraci & Kortenhaus, 1999) zu entnehmen.

### 4.2.1 Eingabedaten

Die Eingabedaten werden in der Regel über einen längeren Zeitraum anhand von Messungen gewonnen. Sie können aber auch recht gut anhand von numerischen Modellen bestimmt werden.

Zeitlicher Verlauf	{	$H_w$ Wellenhöhe, $k$ Wellenzahl, $T_w$ Wellenperiode, $h$ Wassertiefe, $U_c$ Strömungsgeschwindigkeit.
--------------------	---	---

### 4.2.2 Verarbeitung

#### 1. Berechnung der Geschwindigkeiten $U_w$ und $U_c$

Zur Anwendung des probabilistischen Ansatzes werden Angaben über die Fließgeschwindigkeit der Strömung  $U_c$  und die Drehgeschwindigkeit am Boden infolge von Wellen  $U_w$  benötigt. Diese können folgendermaßen bestimmt werden.

- Fließgeschwindigkeit der Strömung  $U_c$

Die Strömungsgeschwindigkeit kann direkt mit Hilfe von Messungen erfasst werden. Häufig ist sie eine direkte Folge der Tidebewegung, sodass entsprechende Informationen vorliegen. Im Rahmen des probabilistischen Ansatzes wird die Fließgeschwindigkeit am Boden in Form einer Auftretenswahrscheinlichkeit  $p(U_c)$  angegeben.

- Drehgeschwindigkeit am Boden  $U_w$

Die Ermittlung der Drehgeschwindigkeit am Boden erfolgt mit Hilfe der Messdaten von Wellenhöhe und -periode anhand folgender Schritte:

- Geschwindigkeitsspektrum am Boden

Das Geschwindigkeitsspektrum am Boden  $S_u$  wird folgendermaßen ermittelt:

$$S_u(\omega) = H(\omega)^2 \cdot S_\eta(\omega) \quad (27)$$

Dabei steht  $\omega$  für die Kreisfrequenz, die sich zu  $\omega = 2\pi/T$  berechnet. Bei  $H$  handelt es sich um die Antwortfunktion. Diese wird unter Annahme linearer Wellentheorie wie folgt ermittelt:

$$H(\omega) = \frac{\omega}{\sinh(kh)} \quad (28)$$

Die Variable  $S_\eta$  steht für das Varianzspektrum des Seegangs. Dieses wird z.B. mit Hilfe des JONSWAP-Spektrums in Abhängigkeit von der Wellenhöhe und -periode bestimmt. Nähere Angaben zum JONSWAP-Spektrum sind z.B. (Summer & Fredsoe, 1997) zu entnehmen.

- Quadratischer Mittelwert der Drehgeschwindigkeit

$$U_{MW}^2 = \int_0^\infty S_u(\omega) d\omega \quad (29)$$

- Drehgeschwindigkeit

Die Drehgeschwindigkeit wird für jede Kombination von  $H_w$  und  $T_w$  ermittelt.

$$U_w = \sqrt{2} U_{MW} \quad (30)$$

## 2. Berechnung strömungsabhängiger Variablen

Bekannt sind die Geschwindigkeiten  $U_c$  und  $U_w$  und ihre Gewichtungen. Mit Hilfe dieser Werte kann für beliebige strömungsabhängige Variablen eine Verteilungskurve und damit Auftretenswahrscheinlichkeiten angegeben werden. Dabei entspricht die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten z.B. einer bestimmten Schubspannung infolge der Werte  $U_c$  und  $U_w$  der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten dieser Werte  $U_c$  und  $U_w$ .

$$p(\tau(U_{c,i}, U_{w,j})) = p(U_{c,i}, U_{w,j}); i = 1, \alpha; j = 1, \beta \quad (31)$$

Wobei  $\alpha$  die Anzahl der Intervalle der Strömungsberechnung und  $\beta$  die Anzahl der Intervalle der Wellenberechnung sind.

Für die Untersuchung der Kolkbildung ist der Sedimenttransport von entscheidender Bedeutung. Dieser berechnet sich aus der Auftretenswahrscheinlichkeit für eine bestimmte Kombination aus  $U_c$  und  $U_w$  multipliziert mit dem Sedimenttransport  $q$ , den diese Kombination auslöst.

$$p(q)_{ij} = p(U_{c,i}, U_{w,j}) \cdot q_{ij}(U_{c,i}, U_{w,j}) \quad (32)$$

Der Sedimenttransport  $q$  in Abhängigkeit von der Korngröße kann nach Soulsby-Van Rijn berechnet werden. Nähere Angaben sind (Soulsby, 1997) zu entnehmen.

### 4.2.3 Ergebnis

Der Sedimenttransport infolge aller berücksichtigten Fließgeschwindigkeitskombinationen und ihrer Gewichtung kann mit Hilfe dieser Methode angegeben werden. Der zeitliche Ablauf, der für die Kolkbildung entscheidend sein kann, wird jedoch nicht berücksichtigt. Weitere mögliche Fehlerquellen wie z.B. die Bildung eines Mittelwertes bei der Betrachtung der Strömungsgeschwindigkeit und die meist ungenaue Kenntnis der Bodenparameter sollten bei der Interpretation der Ergebnisse einbezogen werden.

Der vorgestellte Wahrscheinlichkeitsansatz ist vielseitig anwendbar, einfach zu benutzen und in den meisten Fällen ausreichend. Er wird deshalb in zunehmendem Maße angewendet. Die Kombination mit anderen Ansätzen, wie z.B. der Berechnung anhand einer Beispielbelastung, kann die Fehlerquellen minimieren und zu brauchbaren Aussagen führen.

## 4.3 Sequenzieller Ansatz

Der sequenzielle Ansatz berücksichtigt den zeitlichen Verlauf der Belastungen. Hier besteht das Problem darin, dass die zukünftigen Einwirkungen und ihr Verlauf unbekannt sind. Soulsby (Soulsby, 1997) schlägt vor, eine größere Anzahl (ca. 30) von Zeitverläufen zu untersuchen und ein Risiko oder statistische Werte zur Risikoabschätzung anzugeben. Diese Methode führt jedoch zu einer immensen Vergrößerung der schon umfangreichen Ergebnisse und ist daher auf seine Zweckmäßigkeit und Durchführbarkeit zu untersuchen.

## 4.4 Berechnung anhand eines einzelnen Belastungsfalls

Im Rahmen dieser Berechnung wird in der Regel ein extremer Belastungsfall untersucht. Je nach Standzeit des Bauwerkes werden z.B. die Extremdaten mit 50- oder 100-jähriger Auftretenswahrscheinlichkeit berücksichtigt. Nähere Angaben zu diesem Verfahren sind z.B. in (Stein, 1981) und (Whitehouse, 1998) zu finden.

### 4.4.1 Eingabedaten

Für diese Methode werden Daten eines Lastfalls benötigt. Dabei wird in der Regel eine Extrembelastung ausgewählt.

Daten eines Lastfalls	}	$H_w$	Wellenhöhe,
		$k$	Wellenzahl,
		$T_w$	Wellenperiode,
		$h$	Wassertiefe,
		$\bar{U}$	mittlere Fließgeschwindigkeit,
		$\rho_f$	Dichte der Flüssigkeit,
		$z_0$	Bodenrauigkeit.

### 4.4.2 Verarbeitung

#### 1. Berechnung der Schubspannungen $\tau_c$ , $\tau_w$ und $\tau_{c,w,max}$

- Schubspannung  $\tau_c$  infolge der Strömung

Die Schubspannung errechnet sich zu:

$$\tau_c = \rho_f C_D \bar{U}^2 \quad (33)$$

Dabei stellt  $C_D$  den Widerstandsbeiwert dar, der sich aus dem Verhältnis der Wassertiefe  $h$  und der Bodenrauigkeit  $z_0$  berechnen lässt.

- Schubspannung  $\tau_w$  infolge der Wellen

Die Schubspannung infolge der Wellen berechnet sich durch:

$$\tau_w = 0,5 \cdot \rho_f f_w U_w^2 \quad (34)$$



Dabei stellt  $f_w$  den Widerstandsbeiwert der Welle dar, der sich zu  $U_w T / (2\pi z_0)$  berechnet. Bei Verwendung der linearen Wellentheorie ergibt sich die Drehgeschwindigkeit am Boden infolge Wellenbelastung  $U_w$  zu:

$$U_w = \frac{\pi H_w}{T_w} \frac{1}{\sinh(kh)} \quad (35)$$

- Schubspannung infolge Strömung und Wellen

Die maximale Schubspannung  $\tau_{c,w,max}$  am Boden infolge Strömung und Wellen wird mit Hilfe der Hauptschubspannung  $\tau_m$  ermittelt. Dazu wird zunächst die Hauptschubspannung berechnet:

$$\tau_m = \tau_c \left( 1 + 1,2 \left( \frac{\tau_w}{\tau_c + \tau_w} \right)^{3,2} \right) \quad (36)$$

Die maximale Schubspannung ergibt sich dann zu:

$$\tau_{c,w,max} = [(\tau_m + \tau_w \cos \phi)^2 + (\tau_w \sin \phi)^2]^{0,5} \quad (37)$$

Wobei  $\phi$  den Winkel zwischen der Wellen- und der Strömungsrichtung darstellt. Ist dieser nicht bekannt, kann stattdessen ein Durchschnittswert von  $45^\circ$  angesetzt werden.

## 2. Berechnung Schubspannungsgeschwindigkeit

Die Untersuchung des Sedimenttransportes kann anhand der Schubspannungen oder anhand der Schubspannungsgeschwindigkeit erfolgen. Die Berechnung der Schubspannungsgeschwindigkeit erfolgt nach Stein (Stein, 1981) anhand folgender Formel:

$$u = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_f}} \quad (38)$$

## 3. Berechnung des Sedimenttransportes

Die Berechnung des Sedimenttransportes kann nach (Stein, 1981) anhand zweier verschiedener Möglichkeiten erfolgen:

- Vergleich vorhandener mit kritischer Schubspannung

Sedimenttransport tritt auf, wenn die maximale Schubspannung  $\tau_{max}$  die kritische Schubspannung  $\tau_{crit}$  überschreitet. Für die Ermittlung der kritischen Schubspannung gibt es verschiedene Ansätze. Der von Shield entwickelte und in (Raudkivi, 1982) vorgestellte ist der bekannteste.  $\tau_{crit}$  wird dabei folgendermaßen definiert:

$$\tau_{crit} = \theta_{crit} (\rho_s - \rho_f) g d_{50} \quad (39)$$

wobei  $\theta_{crit}$  den kritischen Shieldsparameter und  $d_{50}$  den mittleren Korndurchmesser darstellen.

- Vergleich Schubspannungsgeschwindigkeit mit Sedimentsinkgeschwindigkeit

In (Stein, 1981) wird

$$\frac{u}{W} \geq 1,7 \quad (40)$$

als Grenzwert zum Auftreten von Sedimenttransport angegeben. Dabei bezeichnet  $W$  die Sinkgeschwindigkeit des Sediments, die sich nach (Zanke & Bode, 1980) folgendermaßen berechnet:

$$W = \frac{11 \nu_f}{d} \left( \left( 1 + 0,01 \frac{\rho' g d^3}{\nu_f^2} \right)^{1/2} - 1 \right) \quad (41)$$

#### 4. Berechnung der Gleichgewichtskolktiefe

Nach Whitehouse (Whitehouse, 1998) steigt die Gleichgewichtskolktiefe mit zunehmender Schubspannung linear an, bis der Grenzwert

$$M \cdot \tau_0 = \tau_{crit} \quad (42)$$

erreicht ist. Dabei stellt  $M$  einen Vergrößerungsfaktor der Schubspannung dar, der von der umströmten Struktur abhängt. Wird der kritische Wert  $\tau_{crit}$  überschritten, kommt es zu keinen erheblichen Änderungen der Gleichgewichtskolktiefe mehr.

#### 4.4.3 Ergebnis

Untersucht wird der Sedimenttransport infolge eines konkreten Lastfalls. Der Vergleich von kritischen mit vorhandenen Werten erlaubt Aussagen, ob mit Sedimenttransport zu rechnen ist oder nicht. Diese Aussage ist jedoch auf einen speziellen Lastfall bezogen. Die Schwierigkeiten bei der Bestimmung der ungünstigsten Lastfälle im Rahmen einer Kolkuntersuchung sind bei der Interpretation der Ergebnisse auf jeden Fall zu berücksichtigen.

### 4.5 Numerische Modelle

Die numerische Modellierung der Kolkbildung ist Gegenstand der aktuellen Forschung. Einen generellen Überblick über diese Methode liefert (DVWK, 1999), während neueste Erkenntnisse

z.B. in den Arbeiten von Roulund (Roulund, 2000) und Weilbeer (Weilbeer, 2001) wiedergegeben sind. Innerhalb dieser Arbeiten konnten die Ergebnisse stetig verbessert werden, sodass eine qualitative Berechnung der Strömungsvorgänge während des Kolkungsprozesses möglich wurde. Die Simulation eines realistischen morphodynamischen Verhaltens und die Berechnung einer Endkolkentiefe werden in (Weilbeer, 2001) dargestellt. Für die Zukunft ist zu erwarten, dass numerische Modelle entstehen, die sowohl die dreidimensionale Bauwerksumströmung berechnen als auch die morphodynamische Reaktion. Voraussetzung für deren Erfolg sind ein angemessenes Turbulenzmodell, ein Bodenmodell (ggf. mit fraktioniertem Transport und geschichtetem Bodenaufbau sowie Rutschungen an steilen Neigungen). Diese Modelle müssen sehr hochauflösend sein und erfordern deshalb besonders schnelle Lösungsverfahren. Im Folgenden sollen die grundsätzliche Vorgehensweise sowie die zu berücksichtigenden Prozesse kurz vorgestellt werden.

#### 4.5.1 Grundlagen der numerischen Kolkmodellierung

Bei der Simulation sind die folgenden kolkbildenden Prozesse zu berücksichtigen:

##### 1. Hydrodynamik

- Turbulenz

Die Turbulenzmodellierung kann auf verschiedene Weise erfolgen. Dabei bietet sich bei statistisch-stationären Strömungen eine zeitliche und bei statistisch-homogenen Strömungen eine räumliche Mittelung (Grobstruktur- bzw. „Large Eddy Simulation“) an. Im Rahmen der Untersuchung der Kolkbildung finden beide Modelle Anwendung, da die komplexen Vorgänge weder dem einen noch dem anderen Fall eindeutig zugeordnet werden können. Eine Kombination aus beidem bildet die „Very Large Eddy Simulation“.

- Nicht-hydrostatische Druckverteilung

Aufgrund der erheblichen Abweichungen vom hydrostatischen Fall hat die Druckverteilung einen entscheidenden Einfluss auf die Strömung und die Kolkbildung. Zur Lösung der Navier-Stokes-Gleichung sollte daher ein nicht-hydrostatischer, wie der in (Jankowski, 1999) vorgestellte Ansatz verwendet werden.

##### 2. Morphologie

Der Sedimenttransport wird mit Hilfe einer Bodenevolutionsgleichung berechnet, bei der die Massenerhaltung innerhalb eines bestimmten Volumens untersucht wird. Beachtet werden müssen dabei steile Bodengradienten, da diese zu Modifikationen der kritischen

Schubspannung oder Sandrutschungen führen können. Entsprechende Ansätze werden in (Göthel, 2001) und (Weilbeer, 2001) vorgestellt.

Die Kopplung dieser Prozesse erfolgt durch eine stetige Anpassung der veränderten Boden-  
geometrie. Der dazu erforderliche Programmablauf ist in Abb.24 dargestellt.

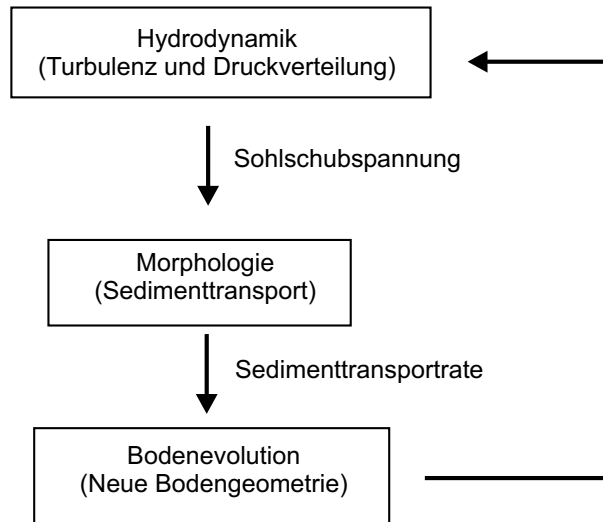


Abbildung 24: Programmablauf bei der numerischen Untersuchung von Kolkungsprozessen

## 5 Sicherungsmaßnahmen gegen Kolkbildung

Die im Flussbau angewendeten Kolkschutzverfahren sind nicht auf den Offshore-Bereich übertragbar. Während das relativ stationäre Strömungsbild eines Flusses zu einem örtlich und zeitlich konstanten Kolk führt, haben die periodischen Wechsel der Tideströmung und die ständige Veränderung der Wellenparameter eine dauerhafte Umwandlung des Kolkes im Offshore-Bereich zur Folge. Nähere Angaben zu möglichen Kolkschutzverfahren werden von Stein in (Stein, 1981) gemacht. An der Forschungsplattform Nordsee gesammelte Erfahrungen können in (Maidl & Stein, 1980) nachgelesen werden. Im Allgemeinen beruhen die möglichen Kolkschutzverfahren auf den folgenden Funktionen:

### 1. Verminderung des Sedimenttransportes

- Maßnahmen am Baugrund

Zum Schutz des Baugrundes können Verfahren wie z.B. die Steinschüttung, Sandsäcke oder -matten verwendet werden. Bei diesen ist jedoch die Gefahr der Kontakterosion im Übergangsbereich zwischen Baugrund und Kolkschutz gegeben. Um Sedimentverlust und damit Kolkbildung zu verhindern, bieten sich in diesen Fällen Filter an. Diese gibt es in verschiedenen Ausführungen z.B. als Mineralkornfilter, Kunststofffilter oder in Form von Matten. Nähere Angaben sind (Stein, 1981) zu entnehmen. Zur Herstellung dieser Filter sind ruhige Strömungsverhältnisse und in der Regel Taucher nötig. Ist die Sicherung eingebracht und ordnungsgemäß mit dem Bauwerk verbunden, ist sie jedoch anpassungsfähig und stellt eine gute Form der Kolksicherung dar.

- Senken der Strömungsgeschwindigkeit

Künstliche Gräser führen zu einer Verminderung der Strömungsgeschwindigkeit und damit zu einer geringeren Gefahr der Kolkbildung. In Gebieten mit beweglicher Sohle kann es in ihrem Umfeld zusätzlich zu Sandablagerungen kommen. Die entstehenden faserbewehrten Sandgemische haben eine hohe Resistenz gegenüber kolkbildenden Prozessen. Zu unterscheiden ist zwischen hängenden und stehenden Gräsern, deren Konstruktion und Eigenschaften in (Stein, 1981) näher erläutert werden.

### 2. Erhöhung der Resistenz des Bauwerkes

Die bauwerksintegrierten Kolkschutzsysteme sind fest mit dem Bauwerk verbunden, erfordern also keine zusätzlichen Transporte, haben einen geringen Montageaufwand und sind sofort nach Errichtung des Bauwerkes einsetzbar. Verwendet werden z.B. Skirts, Kolkschutzklappen, Kolkschutznetze oder Betonklappen mit Steinhinterfüllung (siehe

---

(Stein, 1981)). Diese vermindern die Kolkbildung bzw. verbessern die Anpassungsfähigkeit des Bauwerkes an wechselnde und ungleichmäßige Untergrundverhältnisse.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Bezüglich der Kolkbildung an Brückenpfeilern und ähnlichen Bauwerken gibt es umfangreiche Literatur. In diesem Bericht wird daher untersucht, ob die vorhandenen Formeln zur Berechnung von Kolken an Offshore-Windenergieanlagen geeignet sind. Dazu wird zunächst auf die Kolkentstehung (Abschnitt 2) und die Einflussfaktoren der Kolkbildung eingegangen (Abschnitt 3). In Abschnitt 4 erfolgt schließlich eine genauere Untersuchung der verschiedenen Rechenmethoden zur Untersuchung von Kolkprozessen. Hier werden vor allem die existierenden empirischen Formeln genauer untersucht. Um deren Anwendbarkeit beurteilen zu können, müssen zunächst die Unterschiede in den Randbedingungen erläutert und ihre Auswirkungen festgestellt werden. Dabei wird deutlich, dass die vorhandenen Formeln sich nicht auf alle Gründungstypen von Offshore-WEA anwenden lassen. Für Schwergewichts- und Tripod-Gründungen sind mit ihnen gar keine Aussagen über die Kolkentwicklung möglich. Bei Monopile-Gründungen führen insbesondere die sehr großen Pfeilerdurchmesser zu Problemen. Hinzukommend macht die fehlende Dokumentation der Gültigkeitsbereiche der Formeln eine zuverlässige Aussagen der zu erwartenden Kolktiefe schwierig. Die Entwicklung neuer und Untersuchung bestehender Formeln für die bei Windenergieanlagen vorliegenden Gegebenheiten und Abmessungen sollte daher Ziel der zukünftigen Forschung sein. Insbesondere die Validierung der Formeln anhand geeigneter Modellversuche und Naturmessungen ist dabei in den Vordergrund zu stellen. Neben den empirischen Verfahren, die zu probabilistischen Ansätzen ausgeweitet werden können, stellen numerische Modelle eine zukünftige Alternative dar. Die verschiedenen Ansätze werden in Abschnitt 4 dargestellt. Der Vergleich der Ergebnisse verschiedener Rechenmethoden ist anzustreben.

Im Vergleich zu den häufig untersuchten Brückenpfeilern existieren bei Offshore-WEA Belastungen aus Tide und Wellen. Dies führt dazu, dass die zeitliche Entwicklung der Kolkentstehung näher zu untersuchen ist. Die Darstellungen in Abschnitt 2.4 zeigen, dass für Baugrund mit hohen kritischen Strömungsgeschwindigkeiten ein abmindernder Einfluss der tidebedingten Änderung der Strömungsrichtung existieren kann. Zum Einfluss der Wellen auf die Kolkentwicklung existieren wenige Aussagen. (Sumer et al., 1992) stellen in Abhängigkeit von der KC-Zahl einen Zusammenhang zwischen den Strömungsbedingungen und der Kolktiefe auf. Dieser ergibt für hohen Einfluss aus Wellen jedoch sehr geringe Kolkiefen, so dass weitere Untersuchungen angebracht scheinen.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass das Einbringen eines Kolkschutzes im Regelfall notwendig ist. Die Ausdehnung des entstehenden Kolkes steht in direktem Zusammenhang zu seiner Tiefe. Die Entscheidung über Größe und Art des Kolkschutzes sollte vor allem auch deshalb gewissenhaft geklärt werden, weil eine schnelle Sanierung, z.B. nach einem Sturm,

---

aufgrund der hohen Anzahl der Bauwerke kaum möglich ist. Bei der Wahl der Kolksicherung sind unter anderem verfahrenstechnische Gesichtspunkte entscheidend. Die Herstellung des Schutzes muss bei den gegebenen Wassertiefen und Strömungsverhältnissen möglich sein.



## A Variablenverzeichnis

Variable SI-Einheit Bedeutung

---

Variable	SI-Einheit	Bedeutung
$d$	m	Mittlerer Korndurchmesser
$D$	m	Pfeilerdurchmesser
$g$	$\text{m/s}^2$	Erdbeschleunigung
$g_s$	$\text{kg/ms}$	Feststofftransportzahl
$h$	m	Wassertiefe
$H_w$	m	Wellenhöhe
$k$	$1/\text{m}$	Wellenzahl $k = \frac{2\pi}{L}$
$L$	m	Wellenlänge
$M$	-	bauwerksabhängiger Verstärkungsfaktor der Schubspannung
$p$	-	Empirische Konstante
$q$	$\text{m}^2/\text{s}$	Sedimenttransport
$S$	m	Kolktiefe
$S_{GG}$	m	Gleichgewichtskolktiefe
$T$	$1/\text{s}$	Periode der oszillierenden Strömung
$T_w$	$1/\text{s}$	Wellenperiode (Abstand zwischen den Nulldurchgängen)
$T_{63}$	s	Zeit, nach der 63% der Gleichgewichtskolktiefe erreicht sind
$T_{GG}$	s	Zeit, in der die Gleichgewichtskolktiefe erreicht ist
$t$	s	Zeit
$U$	$\text{m/s}$	Strömungsgeschwindigkeit
$U_B$	$\text{m/s}$	Strömungsgeschwindigkeit im Bereich eines Bauwerkes
$U_{cr}$	$\text{m/s}$	Strömungsgeschwindigkeit, bei der Sedimenttransport einsetzt (nach Shields)
$U_c$	$\text{m/s}$	Strömungsgeschwindigkeit in Bodennähe
$\bar{U}$	$\text{m/s}$	gemittelte horizontale Fließgeschwindigkeit des Wassers
$U_{max}$	$\text{m/s}$	maximale horizontale Fließgeschwindigkeit des Wassers
$U_w$	$\text{m/s}$	Drehgeschwindigkeit am Boden infolge Wellenbelastung
$W$	$\text{m/s}$	Sinkgeschwindigkeit des Sediments
$z_0$	-	Bodenrauigkeit

---

---



---

Variable SI-Einheit Bedeutung

---



---

$\nu_f$	$\text{m}^2/\text{s}$	kinematische Viskosität der Flüssigkeit
$\rho_f$	$\text{kg}/\text{m}^3$	Dichte der Flüssigkeit
$\rho_s$	$\text{kg}/\text{m}^3$	Dichte des Sediments
$\rho'$	$\text{kg}/\text{m}^3$	Relative Dichte $(\rho_s - \rho_f)/\rho_f$
$\tau_c$	$\text{N}/\text{m}^2$	Schubspannung infolge der Strömung
$\tau_w$	$\text{N}/\text{m}^2$	Schubspannung infolge der Welle
$\tau_{cr}$	$\text{N}/\text{m}^2$	Schubspannung, bei der Sedimenttransport am Boden einsetzt
$\tau_m$	$\text{N}/\text{m}^2$	Hauptschubspannung am Boden
$\tau_{max}$	$\text{N}/\text{m}^2$	Maximale Schubspannung am Boden

---



---

## Dimensionslose Kennzahlen

- Reynolds-Zahl:

$$Re = \frac{U_c \cdot D}{\nu_f}$$

- Froude-Zahl:

$$Fr = \frac{U_c}{\sqrt{g \cdot h}}$$

- Keulegan-Carpenter-Zahl:

$$KC = \frac{U_{max} \cdot T}{D}$$

## B Vergleich verschiedener Formeln

### B.1 Vergleich mit Feldmessungen

(Qadar & Ansari, 1994) führen einen Vergleich verschiedener Kolkformeln mit unterschiedlichen Feldmessungen durch. Dabei unterteilen sie die Messergebnisse nach Korngrößen. Untersucht werden Korngrößenbereiche zwischen  $d_{50}=0.008$  und  $20.00$  mm. Da in der Deutschen Bucht hauptsächlich Korngrößen um die  $0.50$  mm und kleiner vorliegen, werden im Rahmen dieses Berichts nur die Ergebnisse innerhalb dieser Korngrößenbereiche wiedergegeben.

Untersucht wurden 23 verschiedene Ansätze zur Berechnung von Kolkvorgängen. Der Vergleich mit Feldmessungsergebnissen lieferte in den betrachteten Korngrößenbereichen für die folgenden Gleichungen die besten Ergebnisse. Dargestellt werden jeweils die durchschnittliche Variation der Messergebnisse und die Standardabweichung.

Autor	Jahr	Formel	Durchschnittliche		Standard- abweichung [%]
			Variation [%]		
Laursen&Toch	1956	$S/D = 1.5 \cdot (h/D)^{0.3}$	-7.65	25.85	12.71
HEC 18	1992	$S/h = 2.1 \cdot (D/h)^{0.65} \cdot (U_c(\sqrt{gh})^{0.43}$	-12.95	16.29	10.34
Qadar <sup>1</sup>	1981	$S = 538 (u_0 r_0)^{1.28}$	-14.94	15.69	9.92
Shen II	1969	$S/D = 3.4 (U_c/\sqrt{gD})^{0.66}$	-14.27	17.83	10.60
Arunachalam	1965	$S/h = 1.95 (D/h)^{1/6} - 1$	-14.73	10.11	10.67

Tabelle 5: Ergebnisse des Vergleichs für Korngrößen von  $0.10$  bis  $0.726$  mm (Indische Daten)

<sup>1</sup>Für  $d \leq 0.5$ mm. Mit Wirbelradius:  $r_0 = 0.1 \cdot D$  und Wirbelgeschwindigkeit:  $u_0 = 0.092 \cdot D^{-0.5}$ .

Autor	Jahr	Formel	Durchschnittliche Variation [%]		Standard- abweichung
S.C. Jain	1981	$S/D = 1.41 \cdot (h/D)^{0.3} \cdot (U_{cr}/\sqrt{gh})^{0.25}$	-6.50	31.23	2.28
Coleman	1971	$U_c/\sqrt{2gS} = 0.6 (U_c/\sqrt{gD})^{0.9}$	-5.69	38.15	3.03
Hancu I	1971	$S/D = 3.3 (d/D)^{0.2} \cdot (h/D)^{0.13}$	-12.50	29.54	3.28

Tabelle 6: Ergebnisse des Vergleichs für Korngrößen von 0.10 bis 0.78 mm

## B.2 Ergebnisse in Abhängigkeit von Pfeilerdurchmesser D und Wassertiefe h

Die Anwendung dieser Formeln auf das in 4.1.1 vorgestellte Beispiel liefert die in den Abb. 25 und 26 dargestellten Ergebnisse. Dabei werden jeweils der Pfeilerdurchmesser bei einer Wassertiefe von  $h=30.00$  m bzw. die Wassertiefe bei einem Pfeilerdurchmesser von  $D=6.00$  m variiert.

Es wird deutlich, dass sowohl die Änderung des Pfeilerdurchmessers als auch der Wassertiefe in den verschiedenen Formeln stark differierende Einflüsse haben. Bei der Anwendung der Formeln nach HEC 18 und Arunachalam führen sowohl hohe Wasserstände als auch große Pfeilerdurchmesser zu extrem ansteigenden Kolk-tiefen. Diese Formeln werden bei den weiteren Betrachtungen nicht mehr berücksichtigt, da sie für die vorliegenden Pfeilerdurchmesser und Wassertiefen unrealistische Werte liefern.

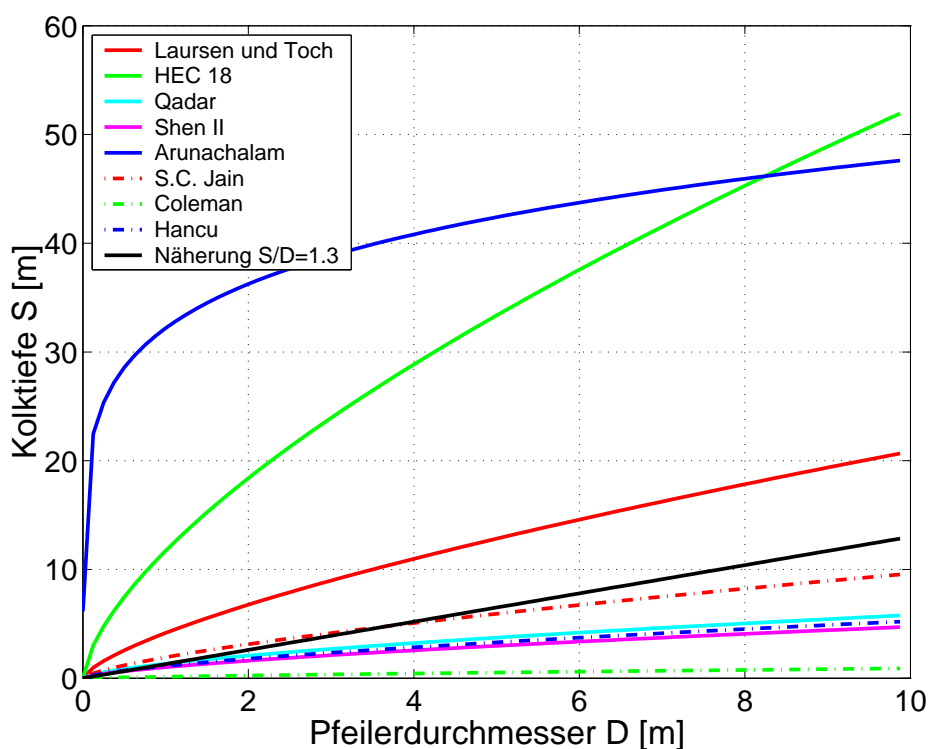


Abbildung 25: Kolktaufe in Abhängigkeit des Pfeilerdurchmessers D

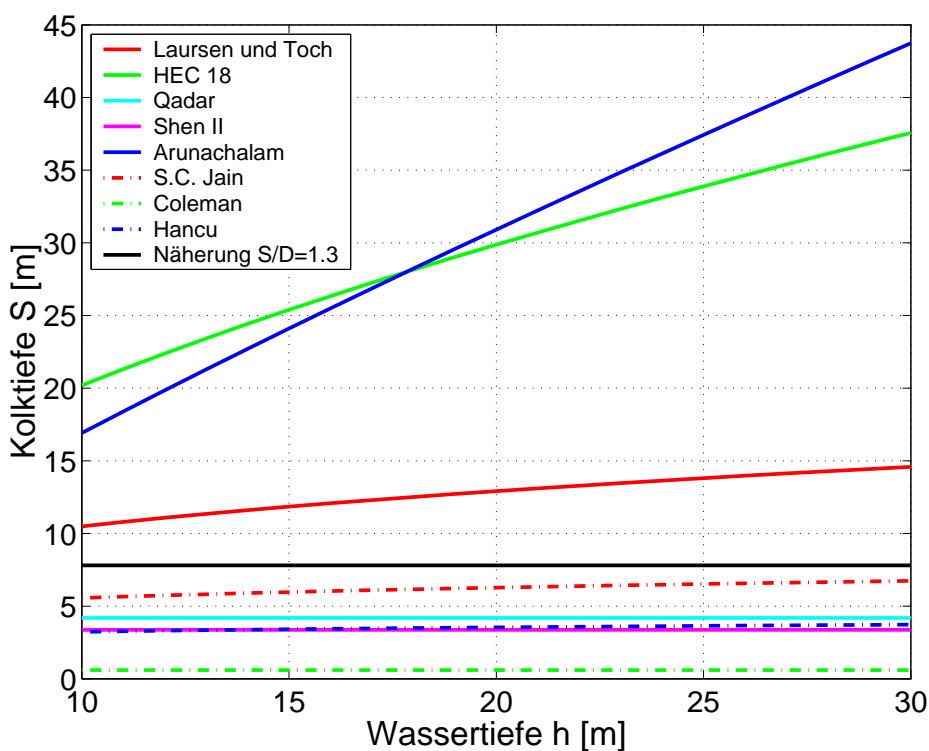


Abbildung 26: Kolktaufe in Abhängigkeit der Wassertiefe h

## C Empirische Formeln in Klarwasserbereichen

Die Untersuchung der empirischen Formeln begrenzt sich auf Formeln, die im Klarwasserbereich gültig sind, da ein Großteil des Untersuchungsgebietes zu diesem Bereich gezählt werden kann. Zudem liegen die ermittelten Werte sowohl bezüglich der Kolktaufe als auch der Entwicklungszeit auf der sicheren Seite.

In Abb.27 ist das Untersuchungsgebiet im Bereich der Nordsee zu sehen. Dargestellt ist die Überschreitung der kritischen Strömungsgeschwindigkeit, bei deren Erreichen Sedimenttransport einsetzt. Es wird deutlich, dass in den für Offshore-WEA entscheidenden Gebieten die kritischen Schubspannungen nicht oder nur unwesentlich überschritten werden. Nähere Angaben hierzu sind (Mittendorf & Zielke, 2003) zu entnehmen.

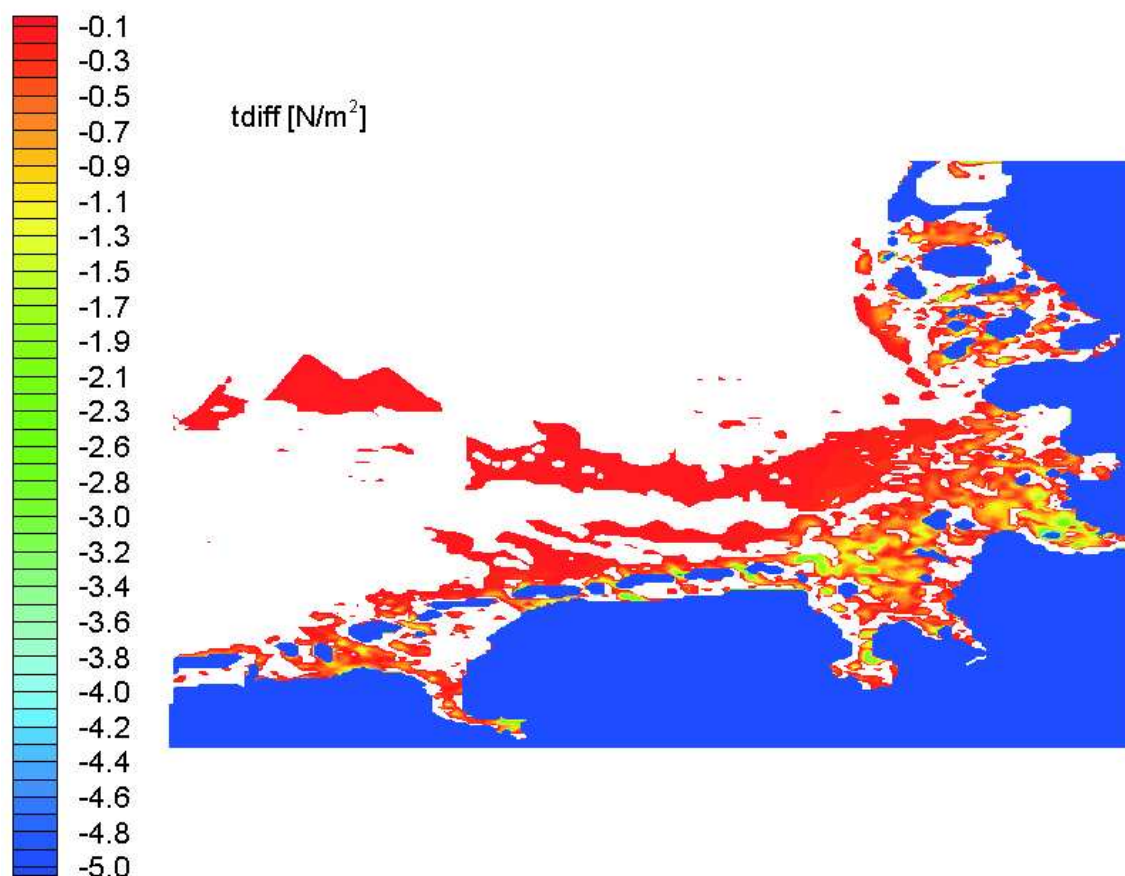


Abbildung 27: Überschreitung kritischer Strömungsgeschwindigkeiten aus (Mittendorf & Zielke, 2003)

Für Gebiete mit gleichmäßigen Sedimentgrößen, wie sie hier vorliegen, entsteht die maximale Kolktaufe im Klarwasserbereich. Die Behandlung der zu untersuchenden Gebiete als Klarwas-

serbereiche liegt somit auf der sicheren Seite. (Siehe Abb.28)

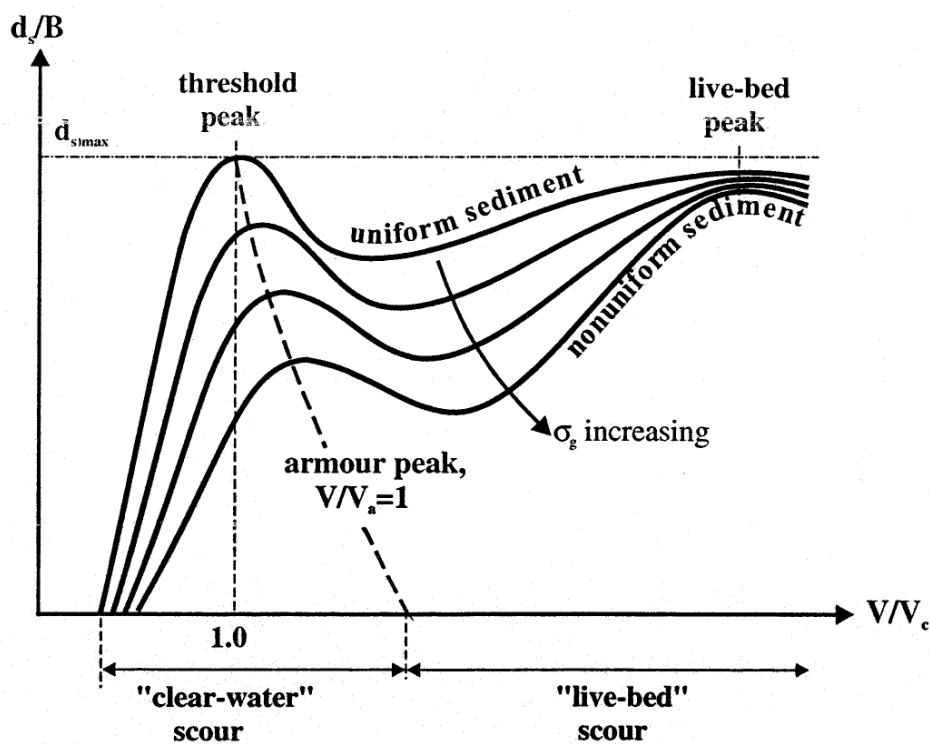


Abbildung 28: Kolk­tiefe in Ab­hän­gig­keit von der Strömungs­ge­schwin­dig­keit (Melville & Coleman, 2000)

Bei der Beurteilung der in Abschnitt 2.4 dargestellten Überlegungen zur zeitlichen Kolkentwicklung sollte beachtet werden, dass in Klarwasserbereichen zwar die größten Kolk­tie­fen auftreten, diese jedoch längere Entwicklungszeiten haben, als Kolke in Bereichen mit beweglicher Sohle. (Siehe Abb.29)

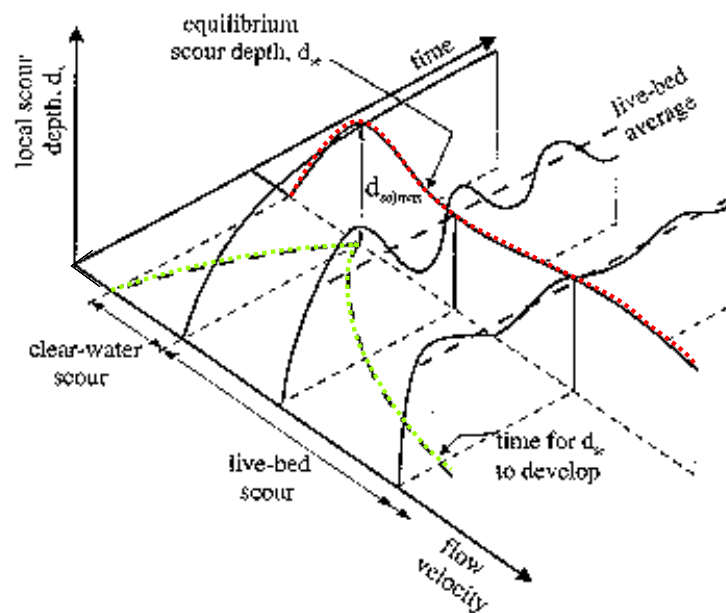


Abbildung 29: Kolkentwicklung bei verschiedenen Strömungsbedingungen nach (Melville & Coleman, 2000)



## D Kolkformel nach Melville (2000)

Die von (Melville & Coleman, 2000) entwickelte Kolkformel lautet

$$S = K_{hD}K_IK_dK_sK_\theta K_t. \quad (43)$$

Dabei stellen die empirischen Ausdrücke einen Bezug zu den folgenden, die Kolkbildung beeinflussenden Verhältnissen her:

$K_{hD}$  = Verhältnis Bauwerksbreite zu Wassertiefe

$K_I$  = Intensität der Strömung

$K_d$  = Sedimentgröße

$K_s$  = Grundriss des Bauwerkes

$K_\theta$  = Anordnung des Bauwerkes

$K_t$  = Zeit

Die einzelnen Parameter berechnen sich folgendermaßen:

- Verhältnis von Bauwerksbreite zu Wassertiefe:  $K_{hD}$

$$K_{hD} = 2.4D \quad \frac{D}{h} < 0.7 \quad (44)$$

$$K_{hD} = 2\sqrt{hD} \quad 0.7 < \frac{D}{h} < 5 \quad (45)$$

$$K_{hD} = 4.5h \quad 5 > \frac{D}{h} \quad (46)$$

Bei dem Verhältnis im Beispielfall von  $h/D=30.00/6.00=0.2$  ergibt sich  $K_{hD}=2.4D$ .

- Einfluss der Strömungsintensität:  $K_I$

Der Faktor  $K_I$  ergibt sich aus dem Verhältnis der Kolktiefe bei bestimmten Strömungsbedingungen zur maximalen Kolktiefe. Für gleichförmige Sedimente ergibt sich

$$K_I = \frac{U_c}{U_{cr}} \quad \frac{U_c}{U_{cr}} < 1 \quad (47)$$

$$K_I = 1 \quad \frac{U_c}{U_{cr}} \geq 1 \quad (48)$$

Im Beispielfall ergibt sich  $U_c/U_{cr}=0.5/1.0=0.5$  und damit  $K_I=0.5$ .

- Einfluss der Sedimentgröße:  $K_d$

$$K_d = 0.57 \log \left( 2.24 \frac{D}{d} \right) \quad \frac{D}{d} \leq 25 \quad (49)$$

$$K_d = 1.0 \quad \frac{D}{d} > 25 \quad (50)$$

Im Beispielfall ergibt sich mit einem Pfeilerdurchmesser von 6.00 m und einem mittleren Korndurchmesser von 0.0005 m ein Verhältnis  $\gg 25$ , so dass  $K_d = 1.0$  ist.

- Einfluss des Grundrisses:  $K_s$

Für kreisförmige Querschnitte ergibt sich  $K_s$  zu 1.0.

- Einfluss der Anordnung:  $K_\theta$

Dieser Faktor berücksichtigt die gegenseitige Anordnung mehrerer Pfeiler. Wird nur ein Einzelpfahl betrachtet, ergibt er sich zu  $K_\theta=1.0$ .

- Einfluss der Zeit:  $K_t$

Die zeitliche Entwicklung des Kolkes wird mit diesem Wert berücksichtigt. Er ergibt sich zu

$$K_t = \exp \left( -0.03 \left| \frac{U_{cr}}{U_c} \ln \left( \frac{t}{T_{GG}} \right) \right|^{1.6} \right). \quad (51)$$

Im Rahmen der Betrachtung der Endkolktiefe wird dieser Wert  $K_t=1.0$  gesetzt.

Genauere Angaben zur Ermittlung der Parameter sind in (Melville & Coleman, 2000) nachzulesen.

Für das in 4.1.1 dargestellte Beispiel ergibt sich

$$S/D = 2.4 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 1.0. \quad (52)$$

## E Anwendungsbereich der linearen Wellentheorie

Verschiedenen Berechnungsansätzen wird die lineare Wellentheorie zugrunde gelegt. Diese ermöglicht eine einfache Ermittlung der horizontalen und vertikalen Geschwindigkeiten der Wasserteilchen in einer fortschreitenden Welle. Der Anwendungsbereich dieser Theorie ist jedoch beschränkt. Wie aus Abb. 30 hervorgeht, kann die lineare Wellentheorie nur in Tiefwasser und im Übergangsbereich angewendet werden. Weiterhin wird ihr Einsatzbereich durch die Wellenhöhe begrenzt.

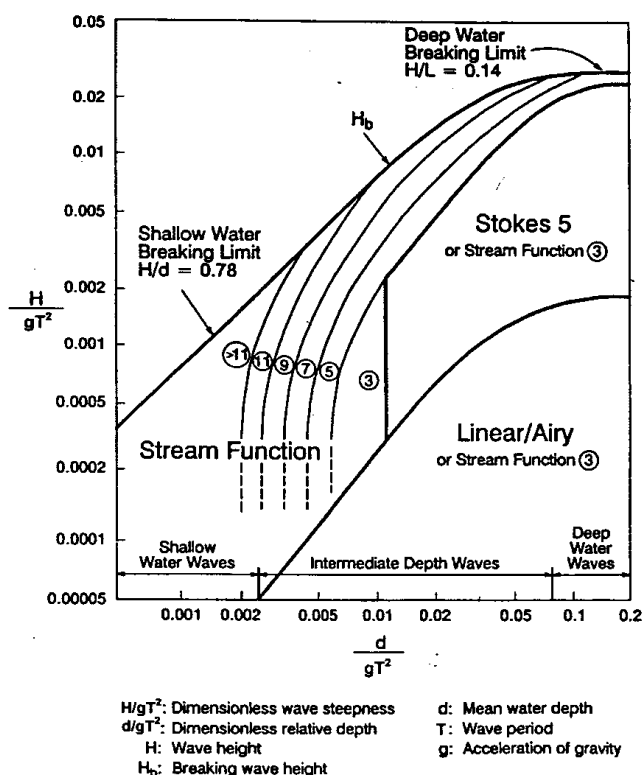


Abbildung 30: Anwendungsbereiche der verschiedenen Wellentheorien (API, 1993)

Offshore-Windenergieanlagen liegen nicht zwingend im Tiefwasserbereich. Die Einteilung in die verschiedenen Bereiche wird in Tabelle 7 verdeutlicht.

	Flachwasser	Übergangsbereich	Tiefwasser
Definition	$\frac{h}{L} < \frac{1}{20}$	$\frac{1}{20} < \frac{h}{L} < \frac{1}{2}$	$\frac{h}{L} > \frac{1}{2}$

Tabelle 7: Einteilung in tiefenabhängige Bereiche

Bei dieser Definition muss davon ausgegangen werden, dass Windenergieanlagen im Übergangsbereich oder sogar im Flachwasser anzusiedeln sind. Die Anwendbarkeit der linearen Wellentheorie ist darum für den Einzelfall zu überprüfen.

## Literatur

- API. (1993). Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Load and Resistance Factor Design. American Petroleum Institute.
- Bayram, A., & Larson, M. (2000). Analysis of scour around a group of vertical piles in the field *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 215-220.
- Breusers, H., Nicollet, G., & Shen, H. (1977). Local scour around cylindrical piers *Journal of Hydraulic Research*, 15, 211-252.
- Breusers, H., & Raudkivi, A. (1991). Scouring. A.A. Balkema.
- DiNatale, M. (1991). Scour around cylindrical piles due to wave motion in the surf-zone *Coastal Zone*. (Long Beach, California)
- DVWK. (1999). Numerische Modelle von Flüssen, Seen und Küstengewässern. Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn. (zusammengestellt von: W. Zielke)
- Göthel, O. (2001, November). Ansätze zur Kolksimulation mit hydrodynamisch-numerischen Modellen. (Studienarbeit am Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover)
- Hoffmans, G., & Verheij, H. (1997). Scour Manual. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield.
- Jankowski, J. (1999). A non-hydrostatic model for free surface flows. Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover. (Bericht Nr. 56)
- Kobus, H. (1978). Wasserbauliches Versuchswesen. DVWW Deutscher Verband für Wasserwirtschaft. (4)
- Kohlmeier, M., & Pawlus, P. (1997/98). Darstellung und Auswertung von Pfeilerumströmungen am Beispiel des Emssperrwerkes. (Studienarbeit am Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Universität Hannover)
- Maidl, B., & Stein, D. (1980). Erfahrungen mit verschiedenen Kolkschutzverfahren an der Forschungsplattform „Nordsee“ *Meerestechnik*(4), 128-132.
- Martinez Mendez, G. (2002). Estimations of scour depths around offshore wind park structures on the German Bight. , Coastal Research Laboratory - Institute of Geosciences - Christian Albrechts University, Kiel, Germany.

- Melville, B., & Coleman, S. (2000). Bridge Scour. Water Resources Publications, LLC.
- Mittendorf, K., & Zielke, W. (2003). Sedimentmobilität in der deutschen Bucht (in Vorbereitung). Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover.
- Oumeraci, H., & Kortenhaus, A. (1999). Probabilistische Bemessungsverfahren im Küsteningenieurwesen - Stand, Probleme, Perspektiven *Tagungsband des HTG-Kongresses*.
- Qadar, A., & Ansari, S. A. (1994). Bridge Pier Scour Equations - An Assessment *Hydraulic Engineering, 1*, 61-67. (Proceedings of the 1994 Conference)
- Raudkivi, A. (1982). Grundlagen des Sedimenttransports. Springer-Verlag.
- Roulund, A. (2000). Three-dimensional numerical modelling of flow around a bottom-mounted pile and its application to scour. , Department of Hydrodynamics and Water Resources Technical University of Denmark.
- Soulsby, R. (1997). Dynamics of marine sands - A manual for practical applications. Thomas Telford.
- Stein, D. (1981). Kolkbildung und ihre Verhinderung an Offshore-Plattformen. Verlag Glückauf GmbH.
- Sumer, B., & Fredsoe, J. (1997). Hydrodynamics around cylindrical structures. World Scientific.
- Sumer, B., & Fredsoe, J. (1999). Wave Scour around Structures World Scientific, Singapore.
- Sumer, B., & Fredsoe, J. (2001). Scour around Pile in Combined Waves and Current *Journal of Hydraulic Engineering*, 403-411.
- Sumer, B., Fredsoe, J., & Christiansen, N. (1992). Scour around vertical piles in waves *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 118(1), 15-31.
- Sumer, B., Whitehouse, R., & Torum, A. (2001). Review: Scour around coastal structures: a summary of recent research *Coastal Engineering*(44), 153-190.
- Weilbeer, H. (2001). Strömung und Kolkung an Wasserbauwerken. , Institut für Strömungsmechanik und Elektronisches Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover. (Dem Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen vorgelegte Dissertation)
- Whitehouse, R. (1998). Scour at marine structures - A manual for practical applications. Thomas Telford.

Zanke, U. (1982). Grundlagen der Sedimentbewegung. Springer-Verlag. (Hochschultext)

Zanke, U., & Bode, E. (1980). Neue Erkenntnisse im Sedimenttransport - Ergebnisse aus der Arbeit des Teilprojektes B5 im SFB 79. Eigenverlag des Franzius-Instituts für Wasserbau und Küsteningenieurwesen der Technischen Universität Hannover.