

Basiswissen

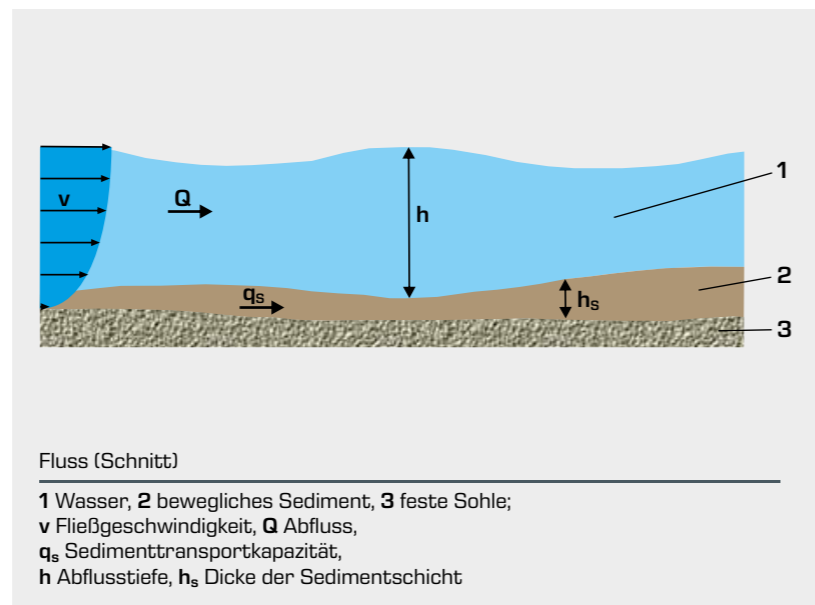
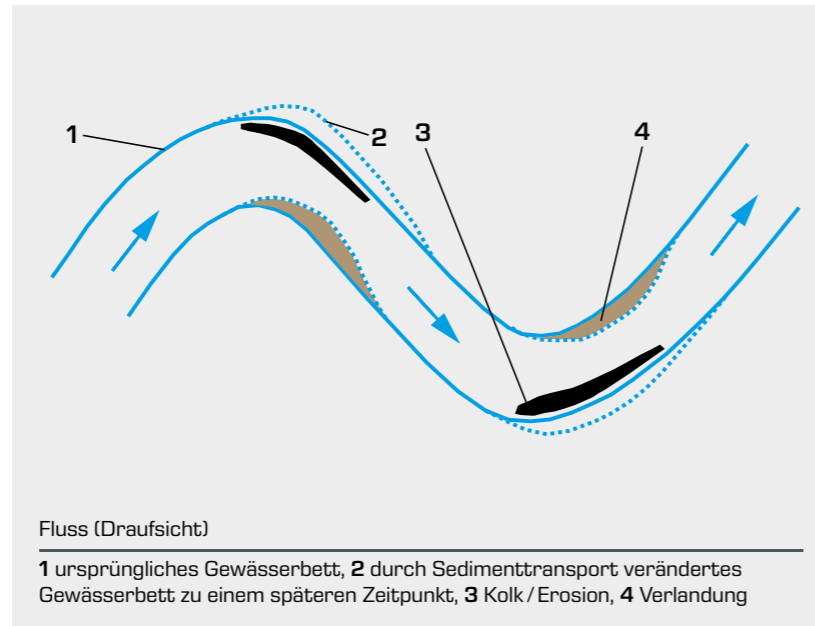
Grundlagen des Sedimenttransports

Strömungen in Flüssen, Kanälen und im Küstenbereich sind oft von Sedimenttransport begleitet. Sedimenttransport besteht aus **Schwebstofftransport** und **Geschiebetransport**.

Der Geschiebetransport spielt sich im sohl-nahen Bereich ab und ist deshalb ein sehr wichtiger Faktor bei der Ausformung des Gewässerbetts. In natürlichem Fließgewässer wechseln Erosion und Sedimentationsvorgänge ständig ab und charakterisieren den Geschiebehalt der Gewässerstrecke.

Für das Abflussverhalten in Gerinnen ist der Geschiebetransport die maßgebliche Komponente. Sediment, das sich ablagert (Verlandung) oder abtransportiert wird (Erosion bzw. Kolkbildung), kann z.B. den durchströmten Querschnitt oder die Spiegellinien verändern. Sedimenttransport kann auch zu einer veränderten Sohlenstruktur führen (Bildung von Rippeln oder Dünen, Änderung der Rauheit).

Sediment, das als Schwebstoffe transportiert wird, ist nur dann für das Transportgleichgewicht relevant, wenn es sich ablagert und so zur Verlandung beiträgt, z.B. bei sehr langsam fließenden oder stehenden Gewässern.



Zur Beurteilung des Abflussverhaltens eines Gerinnes kommen im Fall von Normalabfluss zu den bereits bekannten Gleichungen zur Energieerhaltung, Impulserhaltung und Massenerhaltung noch die Berücksichtigung des Transportgleichgewichts am Kontrollvolumen dazu – wird die gleiche Menge Sediment, die das Kontrollvolumen verlässt, auch wieder zugeführt? Transportformeln sind empirische Formeln, z.B. nach Meyer-Peter & Müller.

Die GUNT-Versuchsstände zu diesem Themengebiet behandeln vor allem den Geschiebetransport.

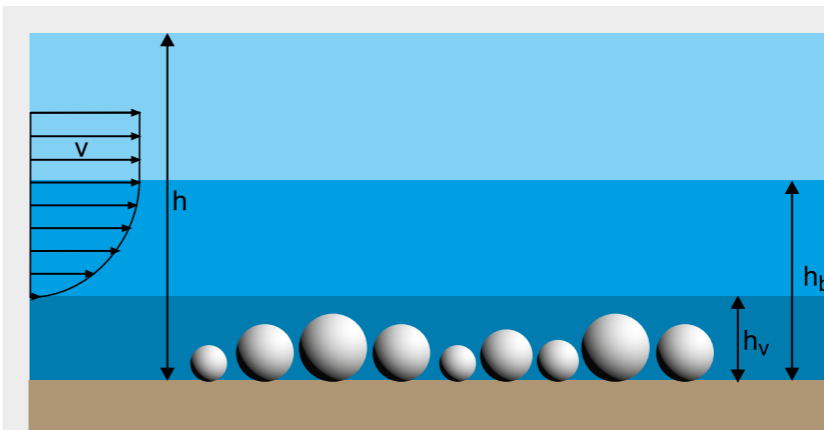
Beginn der Sedimentbewegung

Die am Boden befindlichen Sedimentkörner werden erst in Bewegung gesetzt, wenn die kritische Sohlschubspannung überschritten wird. Dabei werden drei Möglichkeiten unterschieden:

- häufiges bzw. dauerhaftes Überschreiten: **Rippel-** bzw. **Dünenbildung** an der Sohle
- Überschreiten nur bei Extremereignissen wie Sturmflut oder Hochwasser: sprunghafte Änderung der Sohle
- kein Überschreiten: Ablagerung der Schwebstoffe, Sohle kann mittelfristig verschlickern.

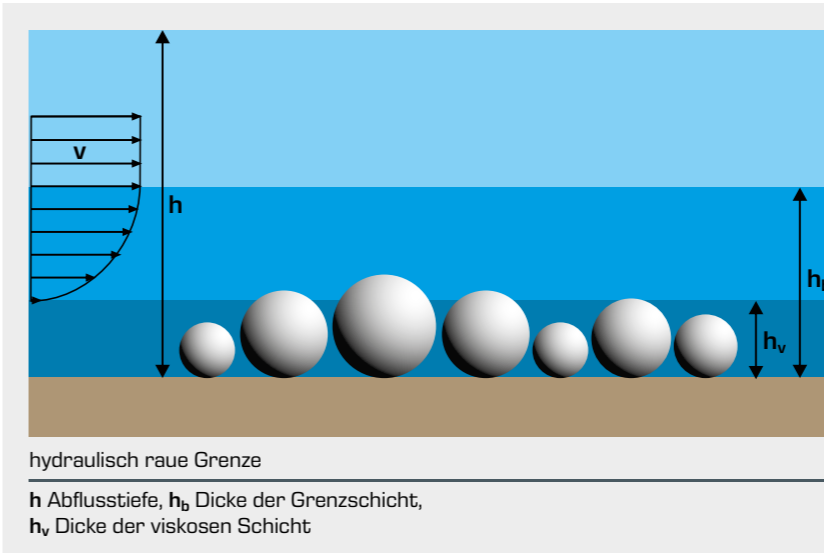
Üblicherweise besteht Sediment aus unterschiedlich großen Körnern. Größere Körner sind der Strömung stärker ausgesetzt und halten größeren Strömungskräften stand als kleine Körner. Kleine Körner können von den größeren Körnern abgeschirmt werden (Hiding-Effekt) und fangen dadurch an, sich erst bei größeren Strömungskräften zu bewegen als nicht abgeschirmte Körner.

Aufbau der beweglichen Schichten im Fließgewässer



Die Fließgeschwindigkeit des Wassers geht in der Nähe der Gerinnesohle gegen Null. Dieser Bereich wird **Grenzschicht** genannt. Die **viskose Unterschicht** befindet sich direkt oberhalb der Gerinnesohle und ist sehr dünn. Die Ausbildung der viskosen Unterschicht hängt von der Oberflächenbeschaffenheit der Gerinnesohle ab. Man spricht von einer hydraulisch glatten Grenze, wenn Rauheitselemente wie Sedimentkörner vollständig innerhalb der Unterschicht liegen. Sobald die Sedimentkörner über die Unterschicht hinausragen, spricht man von einer hydraulisch rauen Grenze.

Die hydraulisch glatte Grenze (smooth boundary) zwischen Sedimentschicht und Strömung entsteht bei langsamen Fließgeschwindigkeiten (dünne viskose Unterschicht) und/oder kleinen Korndurchmessern des Sediments. Im Fall von großen Korndurchmessern (> 0,6 mm) und/oder hohen Fließgeschwindigkeiten (dicke viskose Schicht) spricht man von der hydraulisch rauen Grenze (rough boundary).



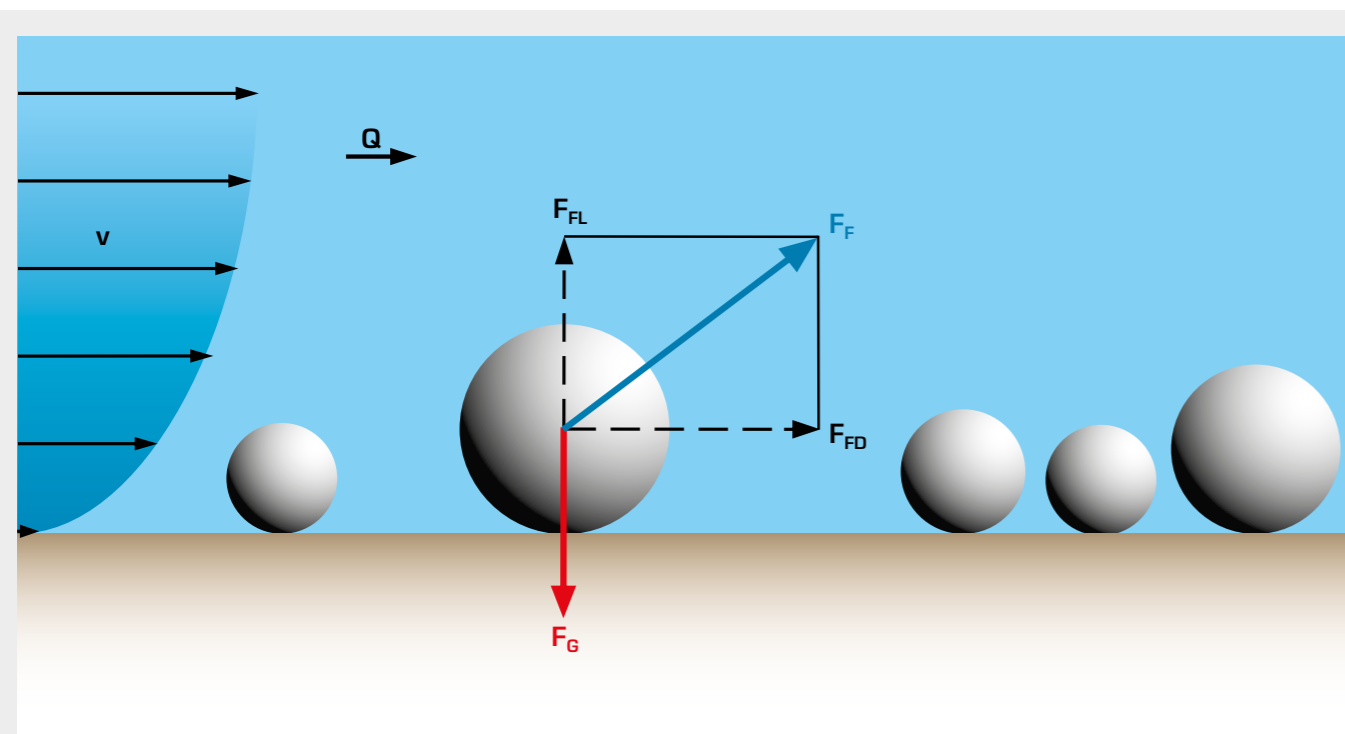
Basiswissen

Grundlagen des Sedimenttransports

Formen des Sedimenttransports

Auf ein Sedimentkorn in einer Strömung wirken unterschiedliche Kräfte. Welche Form des Sedimenttransports auftritt, entscheidet sich nach der Größe, Masse und Form des Kornes und

nach der angreifenden Strömungskraft. In der Abbildung sind alle relevanten Kräfte aufgetragen:



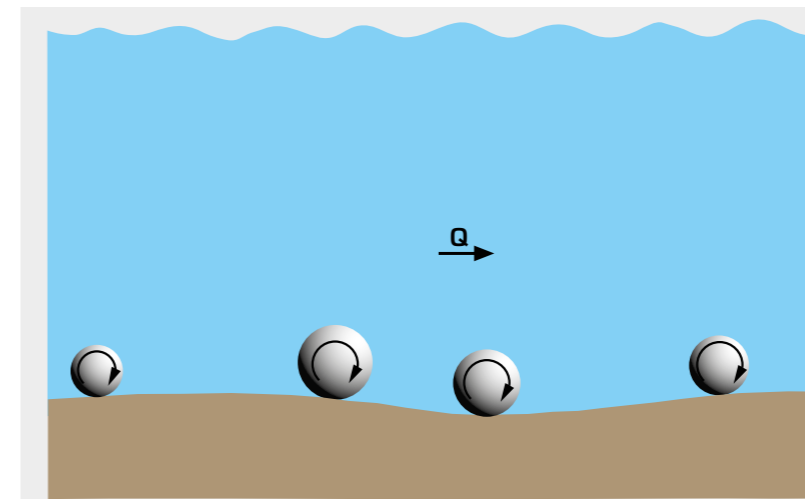
Kräfte am Sedimentkorn an der Gerinnesohle

v Fließgeschwindigkeit, Q Abfluss, F_G Gewichtskraft, F_F Strömungskraft, F_{FL} Liftkraft (lift), F_{FD} Schleppkraft (drag)

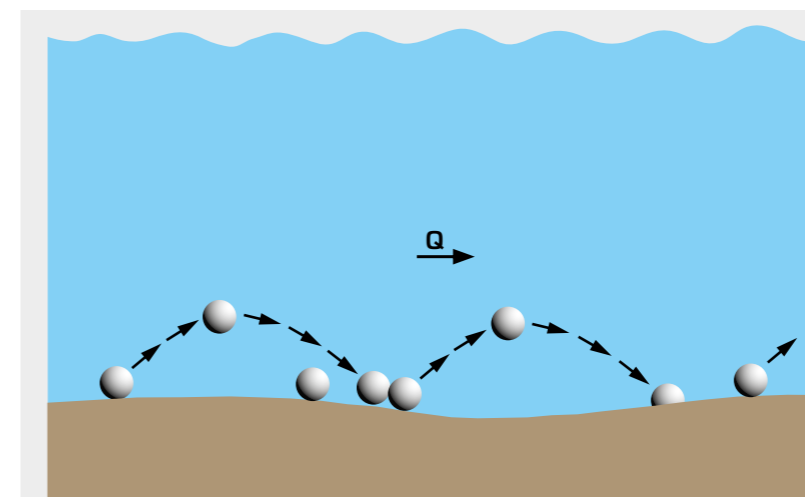
Die Strömungskraft F_F ist die resultierende Kraft aus senkrecht wirkender Liftkraft F_{FL} und der horizontal angreifenden Schleppkraft F_{FD} . Damit das Sedimentkorn die Gerinnesohle verlässt (für den springenden Geschiebetransport oder als Schwebstoff), muss die Liftkraft größer als die ihr entgegen gerichtete Gewichtskraft F_G des Sedimentkorns sein.

An kleinen Körnern ist die angreifende Strömungskraft aufgrund der Verteilung der Fließgeschwindigkeit v zwischen Gerinnesohle und Wasseroberfläche kleiner als an einem größeren Korn. Dafür ist beim größeren Korn die Gewichtskraft F_G größer und verhindert den Schwebstofftransport.

Große Körner (z.B. Steine) rollen oder rutschen über die Sohle, während kleine Sandkörner zu Schwebstoffen werden. Sedimentkörner, die größer als Sand sind, z.B. feiner Kies, können auch springend transportiert werden.

**rollender Geschiebetransport (rolling)**

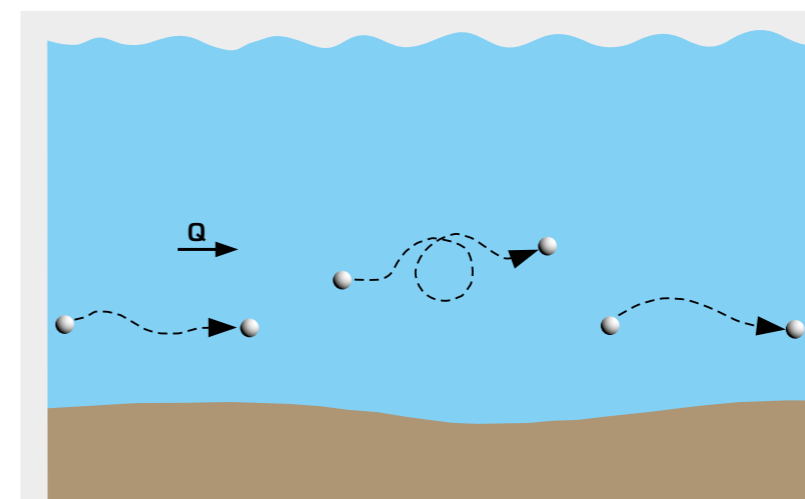
Das Sediment bleibt in ständigem Kontakt mit der Sohle. Normalerweise rollen große Sedimentkörner, z.B. Steine.

**springender Geschiebetransport (saltation)**

Das Sedimentkorn, z.B. kleine Kieselsteine, wird durch die Strömung aus der Sohle gerissen und verlässt dabei kurzzeitig den Boden. Die Strömung reißt es weiter mit, bevor es sich wieder ablagert. Es sieht aus, als ob das Korn springt.

Geschiebe sind Feststoffe, die an der Sohle entlang bewegt werden. Wesentliche Faktoren sind:

- Abfluss
- Gefälle
- Sohlenstruktur
- Feststoffangebot

**Schwebstofftransport (suspension)**

Schwebstoffe sind Feststoffe, die im Wasser suspendiert sind und keinen Kontakt zur Sohle haben.

Wesentliche Faktoren sind:

- Sinkgeschwindigkeit (Korndurchmesser, Kornform, Korndichte, Dichte des Wassers)
- Strömungsparameter (Geschwindigkeitsverteilung im Gerinne, Turbulenz)

Basiswissen

Grundlagen des Sedimenttransports



Transportkörper



Die Vorgänge, die Wind in einer (Sand-)Wüste verursacht, sind mit den Vorgängen in Fließgewässern vergleichbar.

Sobald die Fließgeschwindigkeit etwas höher als die kritische Geschwindigkeit ist, bei der das Sediment in Bewegung kommt, entstehen Unebenheiten an der Gerinnesohle, die sogenannten **Transportkörper**. Diese Unebenheiten können eine Höhe von ca. 1/3 der Abflusstiefe erreichen. Es gibt im Wesentlichen drei Grundformen des Transportkörpers: **Rippel**, **Dünen** und **Antidünen**.

Strömungsrippel entstehen durch Prozesse in der Grenzschicht, so dass die minimale Abflusstiefe ungefähr die dreifache Rippelhöhe beträgt. Der maximale Sandkorndurchmesser für die Entstehung von Rippeln beträgt ca. 0,6 mm. Rippel sind durchschnittlich 3...5 cm hoch und haben eine Wellenlänge von 4...60 cm. Sie sind so klein, dass ihr Einfluss auf die Strömung nicht bis zur Oberfläche reicht.

Dünen sind große Rippel und können als größere, oft regelmäßige Sohlenschwellen beschrieben werden. Ihre Höhe ist von der Abflusstiefe abhängig. Sie beeinflussen auch die Strömung bis an die Oberfläche. Rippel und Dünen können überlagert auftreten.

Rippel und Dünen bewegen sich in Fließrichtung, die selteneren **Antidünen** entgegen der Fließrichtung. Antidünen entstehen bei überkritischem Abfluss und bilden wellige Sohlenformen.

Rippelarten

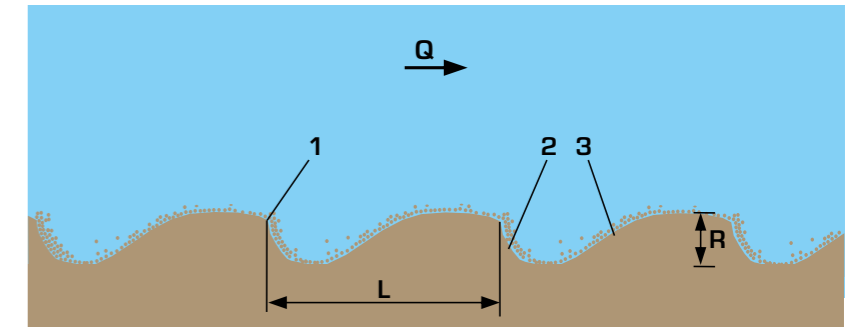
Es gibt **Strömungsrippel** (auf dieser Seite erklärt) und **Wellenrippel**, die durch die Oberflächenwellen des Wassers im Flachwasserbereich entstehen. Asymmetrische Rippel entstehen z.B. bei der Überlagerung einer Strömung mit Oberflächenwellen.

Bildung und Bewegung von Strömungsrippeln

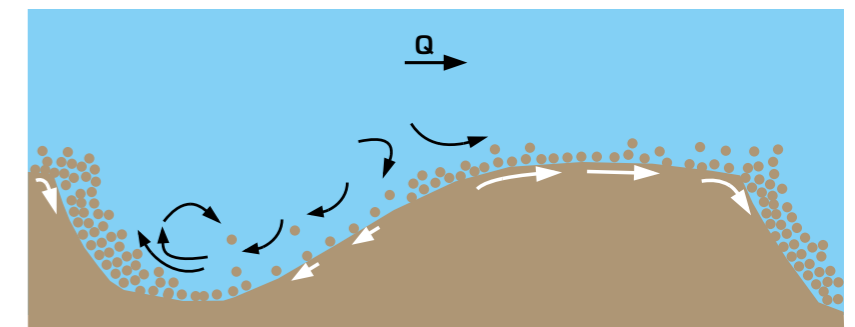
Wenn die kritische Fließgeschwindigkeit für die Bewegung von Sand erreicht ist, beginnen sich die Körner zu bewegen. Sie bilden kleine Cluster (Hügel). Die Hügel wirken wie Unregelmäßigkeiten auf der Sedimentoberfläche. Diese Unregelmäßigkeiten sind nur wenige Körner dick und beeinflussen die Strömung in der Grenzschicht. Oberhalb eines Hügels liegen die Stromlinien enger beisammen, die Fließgeschwindigkeit ist hier höher (**Bernoulli-Effekt**; siehe Abbildung Erosion im Trog). Durch die höhere Fließgeschwindigkeit können weitere Körner auf der Luvseite des Hügels rollen oder springen und sammeln sich auf der Oberseite am Top. Wenn zu viele Körner angehäuft wurden, wird die Lage instabil, sie rutschen die Leeseite des Hügels hinunter. Die Leeseite ist steiler als die Luvseite.

Am Top des Hügels löst sich die Stromlinie, die sozusagen auf der Sandoberfläche liegt, von der Oberfläche und prallt später wieder auf die Sandoberfläche auf (siehe Abbildung Entstehung von Gegenströmungen auf der Leeseite). Unterhalb dieser Stromlinie liegt die sogenannte Ablösezone (separation zone). In dieser Zone kann sich ein Ablösungswirbel bilden, der eine kleine Gegenströmung verursacht. Außerdem herrschen Turbulenzen und Erosion, so dass sich die Täler zwischen den Rippeln bilden bzw. vertiefen. Diese Täler werden Trog genannt. Einige der erodierten Körner lagern sich am Fuß der Leeseite ab, andere werden vom Fluid aufgenommen und / oder auf der Luvseite abgelagert.

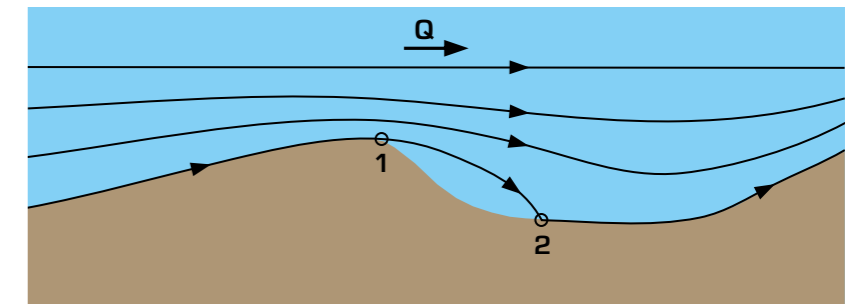
Die Sandkörner an der Oberseite der Sedimentschicht werden ständig weiter transportiert, so dass die Rippel sich in Fließrichtung bewegen und scheinbar wandern.



1 Top des Rippels, 2 Leeseite des Rippels, 3 Luvseite des Rippels;
L Wellenlänge, R Rippelhöhe

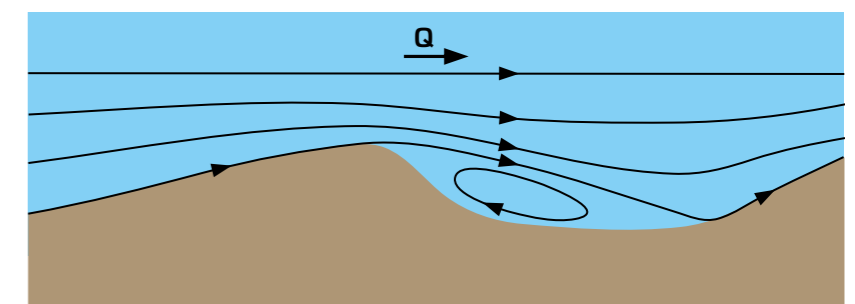


schwarze Pfeile Turbulenzen im Wasser,
weiße Pfeile Bewegungsrichtung des Sands



Erosion im Trog

1 Ablösung der Stromlinie am Top, 2 Aufprallpunkt, schwarze Linien Stromlinien



Entstehung von Gegenströmungen auf der Leeseite

Ablösezone mit Wirbel

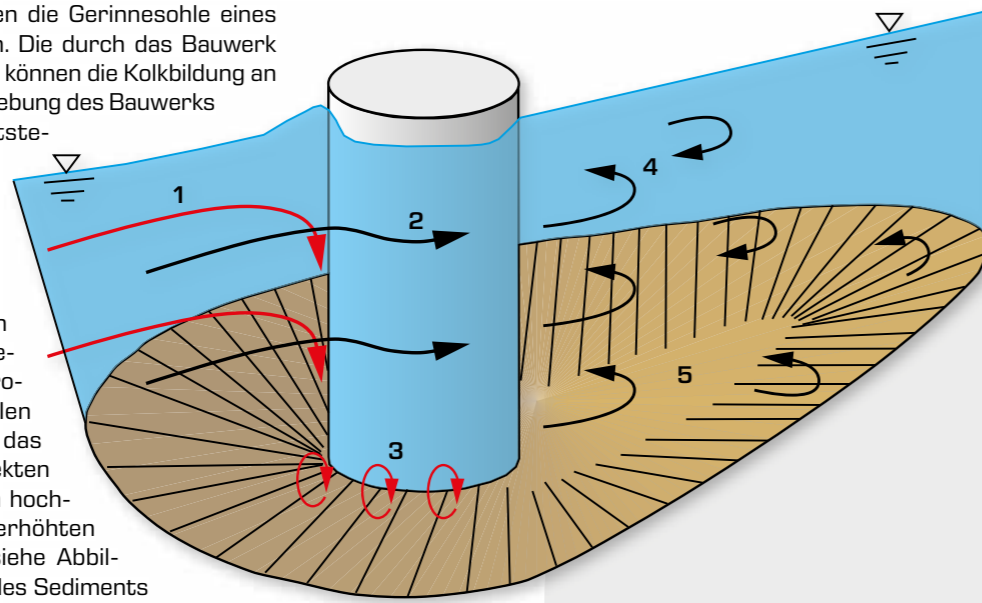
Basiswissen

Grundlagen des Sedimenttransports

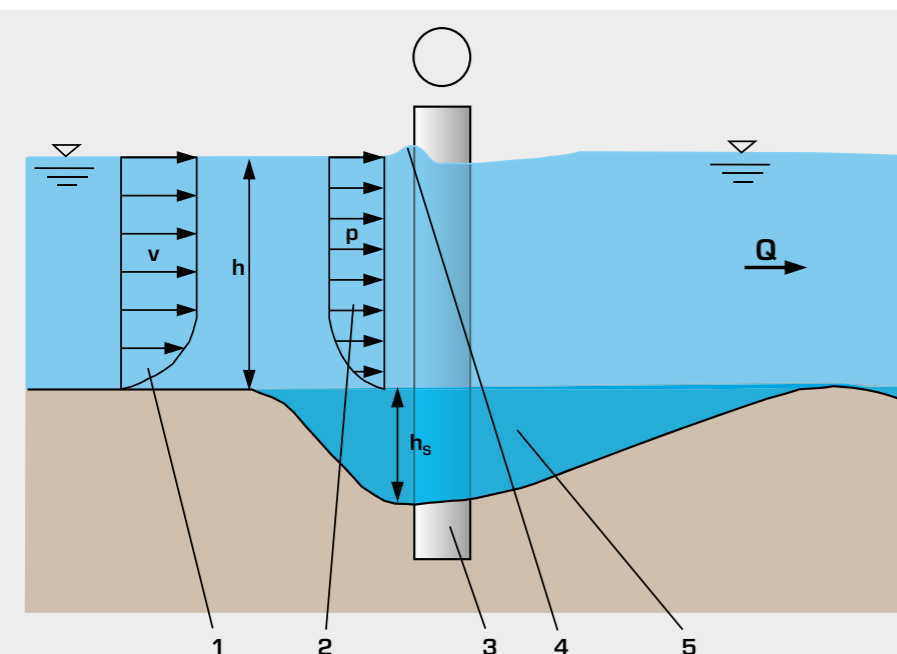
Sedimenttransport an Brückenpfeilern

Bauwerke, z.B. Brückenpfeiler, können die Gerinnesohle eines Fließgewässers langfristig verändern. Die durch das Bauwerk veränderten Strömungsbedingungen können die Kolkbildung an der Gerinnesohle in der direkten Umgebung des Bauwerks verursachen. Kolk kann bereits entstehen, wenn im Fließgewässer kein eigentlicher Sedimenttransport stattfindet. In diesem Fall spricht man vom **Klarwasserkolk** (clear-water scour).

Bei der Kolkbildung an Bauwerken gibt es zwei Hauptursachen: der sogenannte Kontraktionskolk und lokale Erosionserscheinungen. Bei der lokalen Erosion wird die Strömung durch das Bauwerk lokal abgelenkt. In der direkten Umgebung des Bauwerks bilden sich hochturbulente Wirbelsysteme, die zu erhöhten lokalen Geschwindigkeiten führen (siehe Abbildungen). Damit wird die Abtragraten des Sediments erhöht. Beim Kontraktionskolk verursacht die Verringerung des Fließquerschnitts durch das Bauwerk, z.B. Brückenpfeiler, höhere Fließgeschwindigkeiten. Die erhöhten Fließgeschwindigkeiten induzieren erhöhte Sohlschubspannungen, also eine erhöhte Transportkapazität. Die Erosion am Fuß bzw. Fundament des Pfeilers kann fatale Folgen haben, die unter Umständen bis zum Zusammenbruch des Bauwerks führen. Deshalb ist es wichtig, die Mechanismen der Kolkbildung zu verstehen, um die voraussichtliche Kolktiefe vorherzusagen zu können bzw. um geeignete Schutzmaßnahmen zu ergreifen.

Klarwasserkolkbildung
am zylindrischen Pfeiler

- 1 Abwärtsströmung,
- 2 Umströmung des Pfeilers,
- 3 Hufeisenwirbel,
- 4 Nachlaufwirbel,
- 5 Kolk



Klarwasserkolkbildung (Seitenansicht)

- 1 Geschwindigkeitsverteilung des Abflusses,
- 2 Druckverteilung,
- 3 zylindrischer Pfeiler,
- 4 Pfeilerstau,
- 5 Kolk;
- h Abflusstiefe,
- h_s Kolkentiefe,
- Q Abfluss

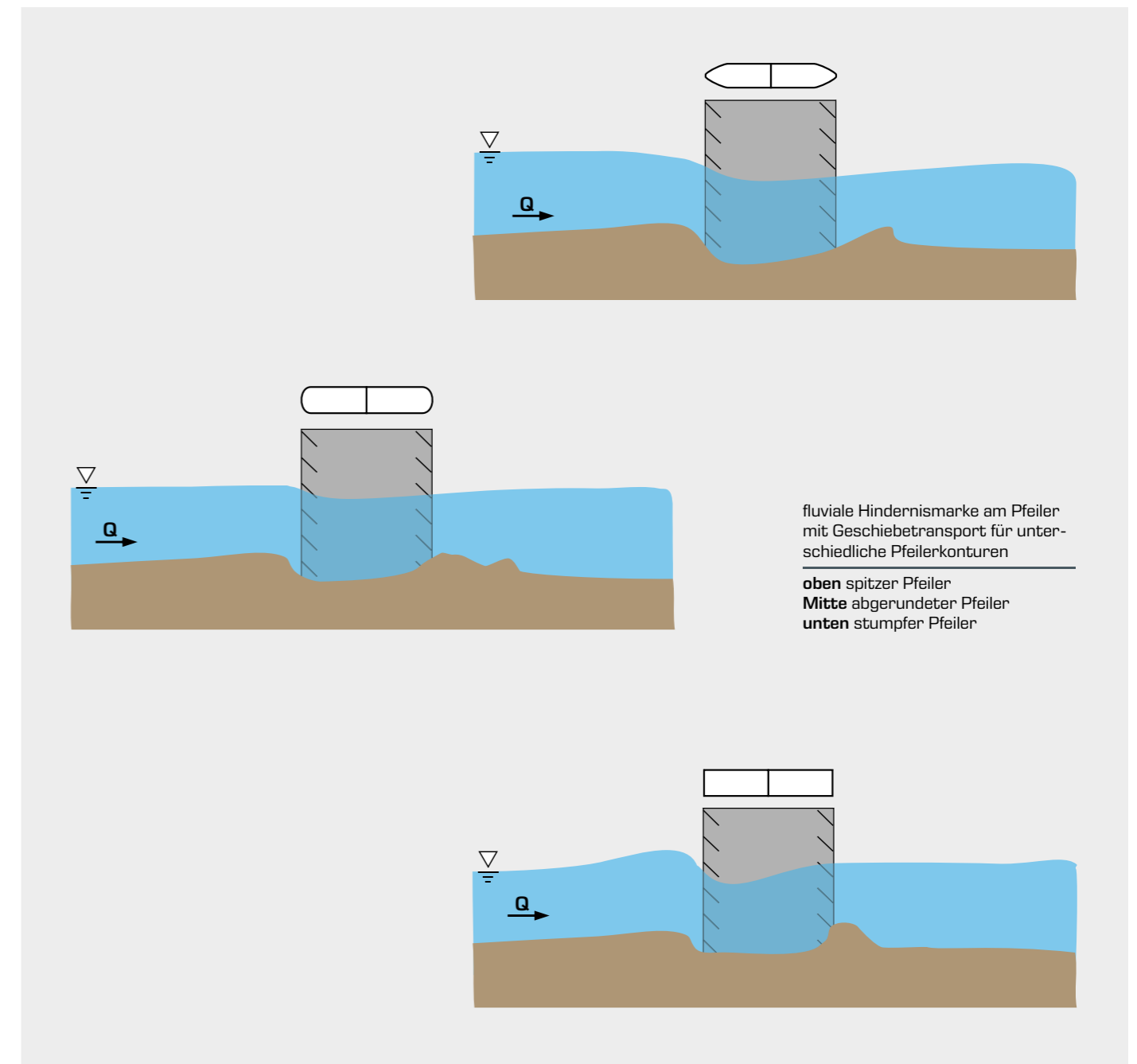
Bei der Kolkbildung treten zwei von einander weitgehend unabhängige Wirbelsysteme auf: das **Hufeisenwirbelsystem** und das **Nachlaufwirbelsystem** (siehe Abbildung Klarwasserkolkbildung am zylindrischen Pfeiler). Dabei ist das Hufeisenwirbelsystem das maßgebliche System bei der Kolkbildung. Hufeisenwirbel entstehen durch die abwärts gerichtete Strömung an der Anströmseite des Bauwerks. Die abwärtsgerichtete Strömung entsteht aufgrund des Druckabfalls (siehe rote Pfeile in der oberen Abbildung und Druckverteilung in der Seitenansicht unten). Die Nachlaufwirbel entstehen bei der Ablösung der Grenzschicht an den Seiten des umströmten Zylinders (schwarze Pfeile in der oberen Abbildung).

Bei zylindrischen Pfeilern ist der (Klarwasser-)Kolk auf der Anströmseite am größten, während rechteckige Pfeiler seitlich die größte Kolkbildung haben.

Fluviale Hindernismarke

Bei der Kolkbildung ist auch die nach dem Hindernis auftretende Verlandung, auch Rücken genannt, wichtig. Beide Phänomene werden unter dem Begriff fluviale Hindernismarke zusammengefasst.

In den Abbildungen unten ist die fluviale Hindernismarke am Pfeiler zu sehen, wenn im Fließgewässer bereits stromaufwärts Geschiebetransport stattfindet.

fluviale Hindernismarke am Pfeiler
mit Geschiebetransport für unterschiedliche Pfeilerkonturen

- oben spitzer Pfeiler
- Mitte abgerundeter Pfeiler
- unten stumpfer Pfeiler