

Conocimientos básicos

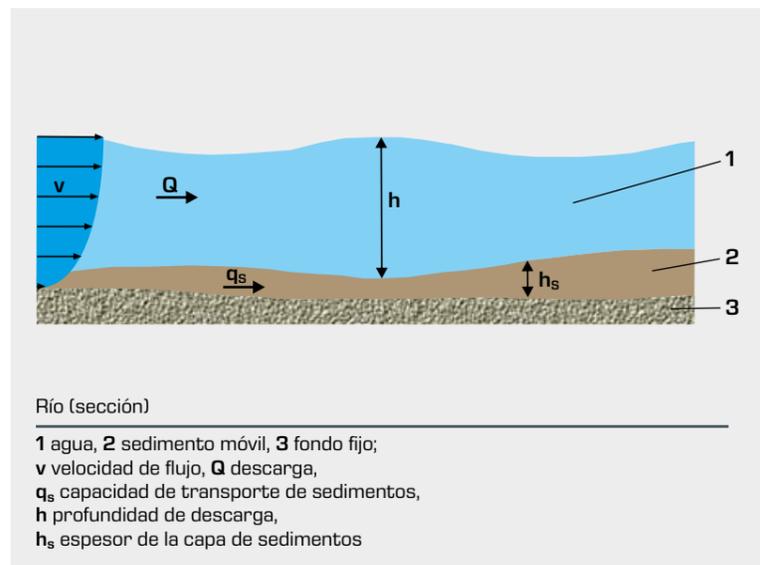
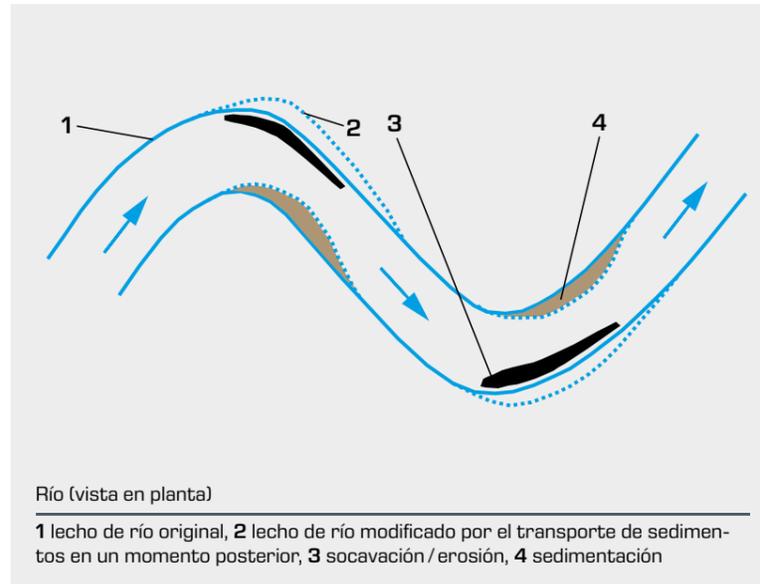
Fundamentos del transporte de sedimentos

Los flujos en ríos, canales y en la zona de la costa suelen ir acompañados por transporte de sedimentos. El transporte de sedimentos consta de **transporte de sedimentos en suspensión** y **transporte de depósitos arrastrados por la corriente**.

El transporte de depósitos arrastrados por la corriente se da en el área cercana al fondo y es un factor muy importante de moldeado del lecho de río. En aguas corrientes naturales, los procesos de erosión y sedimentación se alternan constantemente y caracterizan el balance de escombros del tramo del lecho de río.

Para el comportamiento de desagüe en canales, el transporte de depósitos arrastrados por la corriente es el componente fundamental. Los sedimentos que se depositan (sedimentación) o transportan (erosión o formación de socavación) pueden, p.ej., modificar la sección transversal por la que pasa el flujo o los perfiles de la superficie del agua. El transporte de sedimentos también puede modificar la estructura del fondo (formación de ripples o dunas, modificación de la rugosidad).

Los sedimentos transportados como materias en suspensión solo son relevantes para el equilibrio de transporte, cuando se depositan y contribuyen a la sedimentación, p.ej., en aguas que fluyen muy despacio o están estancadas.



Para evaluar el comportamiento de descarga de un canal con una descarga normal, se debe tener en cuenta, además de las ecuaciones que ya conocemos sobre conservación de la energía, la conservación del impulso y conservación de la masa, el equilibrio de transporte en el volumen de control – ¿se vuelve a alimentar la misma cantidad de sedimentos que deja el volumen de control? Las fórmulas de transporte son fórmulas empíricas, p.ej., según Meyer-Peter y Müller.

Los bancos de ensayos GUNT sobre este tema tratan principalmente el transporte de depósitos arrastrados por la corriente.

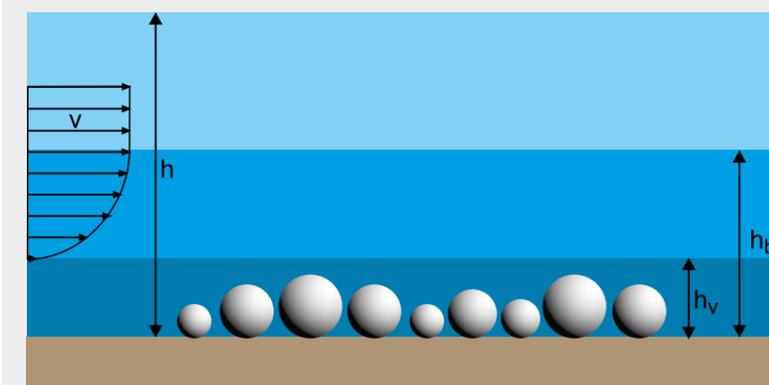
Inicio del movimiento de sedimentación

Los granos de sedimentos que se encuentran en el suelo se ponen en movimiento cuando se excede la tensión de corte crítica del fondo. Se diferencia entre tres posibilidades:

- exceso frecuente o permanente: **formación de ripples o dunas** en el fondo
- exceso solo en casos extremos como marejadas o inundaciones: cambio repentino del fondo
- ningún exceso: depósito del material en suspensión, el fondo puede enlodarse a medio plazo.

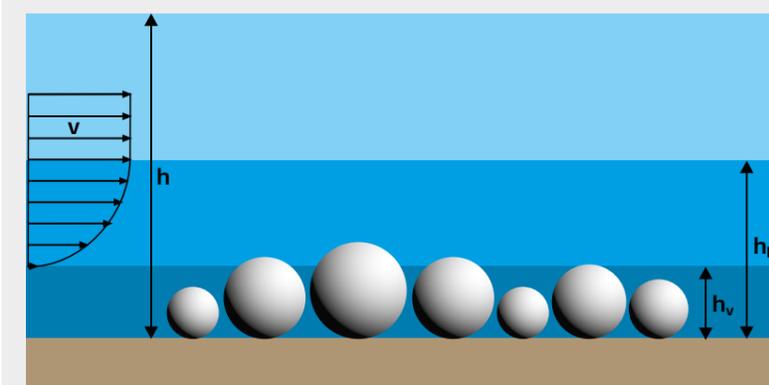
Normalmente, los sedimentos constan de granos de distinto tamaño. Los granos grandes están más expuestos al flujo y resisten mayores fuerzas de flujo que los granos pequeños. Los granos pequeños pueden ser protegidos por los granos grandes (efecto de escondido) y empiezan a moverse con fuerzas de flujo mayores como granos no protegidos.

Estructura de las capas móviles en aguas corrientes



La velocidad de flujo del agua cerca del fondo del canal se aproxima a cero. Esta región se denomina **capa límite**. La **subcapa viscosa** se encuentra justo por encima del fondo del canal y es muy delgada. La formación de la subcapa viscosa depende de las características de la superficie del fondo del canal. Hablamos de un contorno hidráulico liso cuando los elementos de rugosidad, como los granos de sedimentos, se encuentran completamente dentro de la subcapa. Cuando los granos de sedimentos sobresalen de la subcapa, hablamos de un contorno hidráulico rugoso.

El contorno hidráulico liso entre la capa de sedimentos y el flujo se produce a velocidades de flujo bajas (subcapa viscosa delgada) y/o con granos de diámetros pequeños de los sedimentos. Si los granos tienen un diámetro grande (>0,6 mm) y/o las velocidades de flujo son altas (capa viscosa gruesa), hablamos de un contorno hidráulico rugoso.



Conocimientos básicos

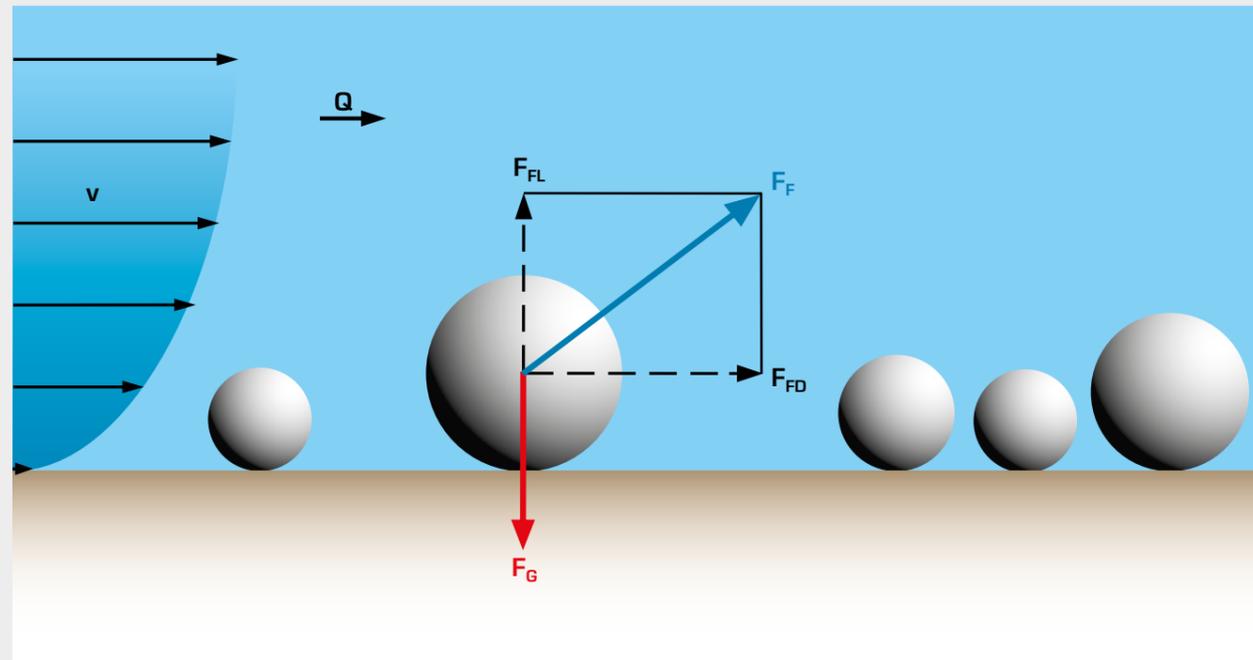
Fundamentos del transporte de sedimentos



Formas del transporte de sedimentos

En un grano de sedimento en un flujo actúan distintas fuerzas. La forma del transporte de sedimentos depende del tamaño, la

masa y la forma del grano y de la fuerza de flujo que actúa. En la ilustración se representan todas las fuerzas relevantes:



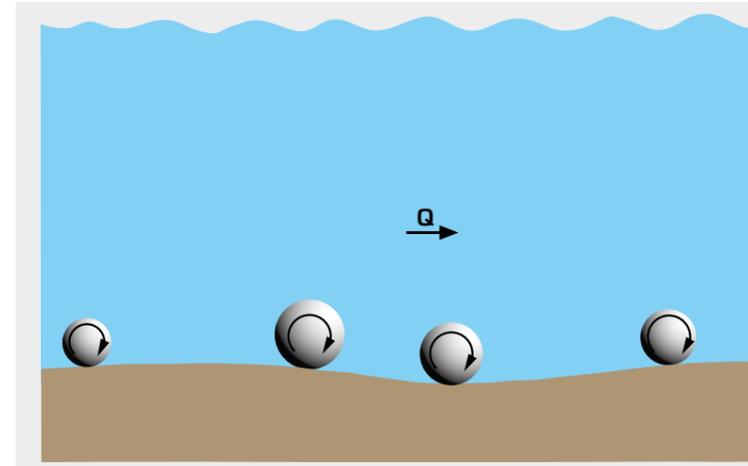
Fuerzas en el grano de sedimento en el fondo del canal

v velocidad de flujo, Q descarga, F_G peso, F_F fuerza de flujo, F_{FL} fuerza de sustentación (lift), F_{FD} fuerza de arrastre (drag)

La fuerza de flujo F_F es la fuerza resultante de la fuerza de sustentación F_{FL} , que actúa verticalmente, y la fuerza de arrastre F_{FD} , que actúa horizontalmente. Para que el grano de sedimento deje el fondo del canal (por saltación o como materia en suspensión), la fuerza de sustentación debe ser mayor que el peso opuesto F_G del grano de sedimento.

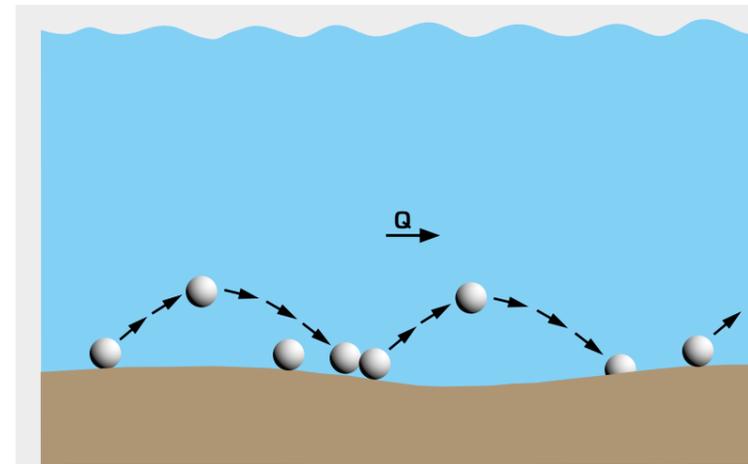
La fuerza de flujo que actúa en los granos pequeños es menor que en los grandes debido a la distribución de la velocidad de flujo v entre el fondo del canal y la superficie del agua. En los granos más grandes, el peso F_G es mayor y evita el transporte de sedimentos en suspensión.

Los granos grandes (p.ej., piedras) ruedan o se deslizan sobre el fondo, mientras los granos de arena pequeños se convierten en materia en suspensión. Los granos de sedimentos más grandes que la arena, p.ej., grava fina, pueden transportarse también en saltación.



Rodadura (rolling)

Los sedimentos permanecen en contacto constante con el fondo. Normalmente, ruedan granos de sedimentos grandes, p. ej., piedras.

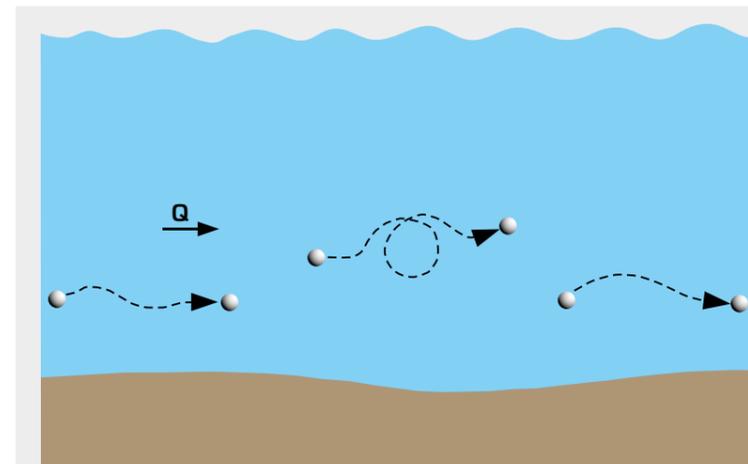


Saltación

El grano de sedimentación, p.ej., pequeñas piedras de grava, es arrancado del fondo por el flujo y deja brevemente el suelo. El flujo lo arrastra consigo antes de que se vuelva a depositar. Parece como si el grano saltara.

Los depósitos son materias sólidas que se arrastran a lo largo del fondo. Los factores fundamentales son:

■ descarga ■ pendiente ■ estructura del fondo ■ cantidad de sustancias sólidas



Transporte de sedimentos en suspensión

Las materias en suspensión son materias sólidas suspendidas en el agua y sin contacto con el fondo.

Los factores fundamentales son:

- velocidad de sedimentación (diámetro del grano, forma del grano, densidad del grano, densidad del agua)
- parámetros de flujo (distribución de la velocidad en el canal, turbulencia)

Conocimientos básicos

Fundamentos del transporte de sedimentos



Formas de lecho



Los procesos que el aire provoca en un desierto (arena) se pueden comparar con los procesos en aguas corrientes.

En cuanto la velocidad de flujo es un poco más alta que la velocidad crítica, con la que los sedimentos comienzan a moverse, se producen irregularidades en el fondo del canal, lo que se denomina **forma de lecho**. Estas irregularidades pueden alcanzar una altura de aprox. 1/3 de la profundidad de descarga. Básicamente existen tres formas básicas de lecho: **ripples, dunas y antidunas**.

Los **ripples de corriente** se producen por procesos en la capa límite, de modo que la profundidad de descarga mínima es aproximadamente tres veces la altura del ripple. El diámetro máximo del grano de arena para la generación de ripples es de aprox. 0,6mm. Los ripples suelen ser de media 3...5cm de alto y tienen una longitud de onda de 4...60 cm. Son tan pequeños que su influencia en el flujo no alcanza a la superficie.

Las **dunas** son ripples grandes y pueden considerarse como umbrales mayores y a menudo más regulares. Su altura depende de la profundidad de descarga. Estos influyen también en el flujo hasta la superficie. Los ripples y las dunas pueden aparecer superpuestos.

Los ripples y las dunas se mueven en la dirección del flujo. Las **antidunas**, menos habituales, se mueven en dirección contraria al flujo. Las antidunas se forman con una descarga supercrítica y crean formas del fondo onduladas.

Tipos de ripple

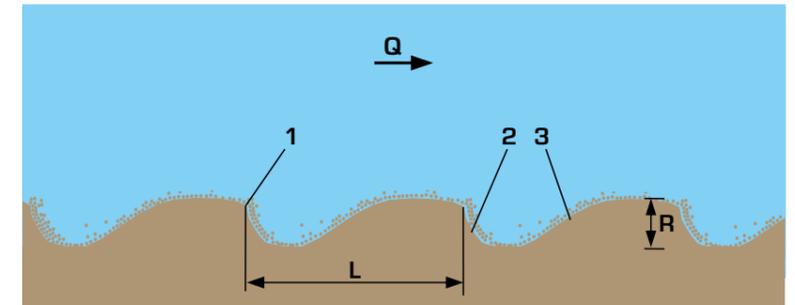
Existen **ripples de corriente** (explicados en esta página) y **ripples de olas**, que se forman por las ondas superficiales del agua en áreas de aguas poco profundas. Los ripples asimétricos se producen, p.ej., por la superposición de un flujo con ondas superficiales.

Formación y movimiento de ripples de corriente

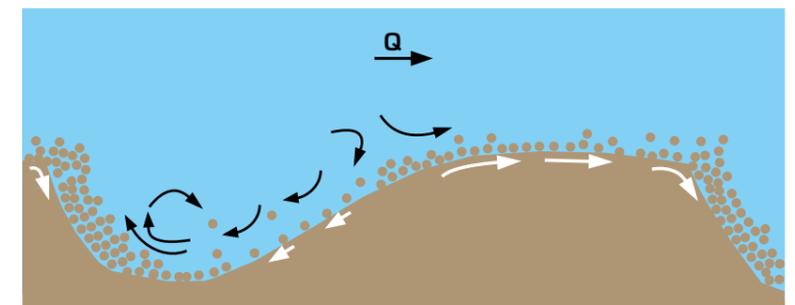
Cuando se alcanza la velocidad de flujo crítica para el movimiento de arena, los granos empiezan a moverse. Se forman pequeños cúmulos (colinas). Las colinas actúan como irregularidades en la superficie de los sedimentos. Estas irregularidades solo tienen unos pocos granos de grosor e influyen en el flujo de la capa límite. Las líneas de corriente por encima de una colina están más juntas y la velocidad de flujo es mayor (**efecto de Bernoulli**; véase la ilustración de erosión en la depresión). Debido a la mayor velocidad de flujo, otros granos pueden rodar en el costado de barlovento de la colina o saltar y acumularse en la parte superior en la cresta. Cuando se amontonan demasiados granos, la situación es inestable, y se deslizan por el costado de sotavento de la colina. El costado de sotavento es más pronunciado que el de barlovento.

En la cresta de la colina, la línea de corriente sobre la superficie de la arena se desprende de la superficie y vuelve a rebotar después en la superficie de la arena (véase la ilustración sobre la formación de contracorrientes en el costado de sotavento). Por debajo de esta línea de corriente está la denominada zona de separación (separation zone). En esta zona se puede formar un vórtice de separación, provocando una pequeña contracorriente. Además se producen turbulencias y erosión, de modo que se forman y profundizan los valles entre los ripples. Estos valles se llaman depresiones. Algunos granos erosionados se depositan en la base del costado de sotavento, y otros son transportados por el fluido y/o se depositan en el costado de barlovento.

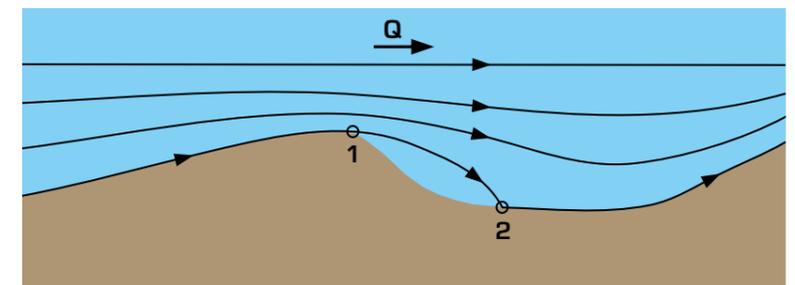
Los granos de arena en la parte superior de la capa de sedimentos se siguen transportando continuamente, de modo que los ripples se mueven en la dirección del flujo y se desplazan.



1 cresta del ripple, 2 costado de sotavento del ripple, 3 costado de barlovento del ripple; L longitud de onda, R altura del ripple

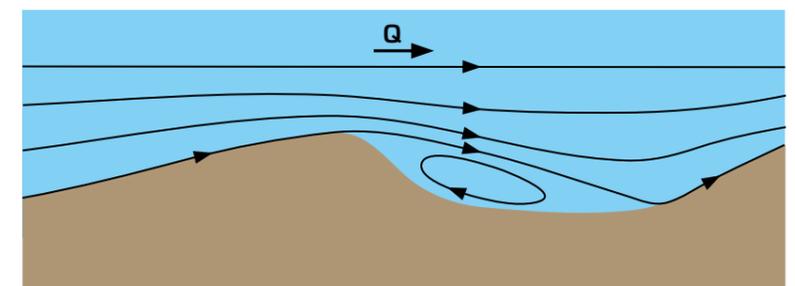


Flechas negras turbulencias en el agua, flechas blancas migración de la arena



Erosión en la depresión

1 separación de la línea de corriente en la cresta, 2 punto de impacto, líneas negras líneas de corriente



Formación de contracorrientes en el costado de sotavento zona de separación con vórtice

Conocimientos básicos

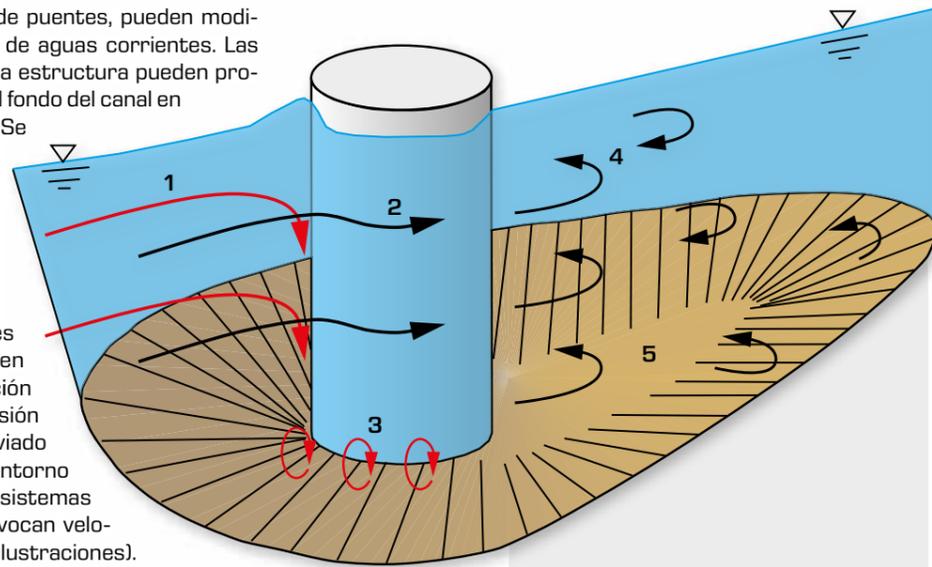
Fundamentos del transporte de sedimentos

Transporte de sedimentos en pilares de puentes

Las estructuras como, p.ej., pilares de puentes, pueden modificar a largo plazo el fondo del canal de aguas corrientes. Las condiciones de flujo modificadas por la estructura pueden provocar la formación de socavación en el fondo del canal en el entorno directo de la estructura. Se puede producir socavación incluso cuando no existe un transporte de sedimentos en las aguas corrientes. En este caso hablamos de **socavación en agua clara** (clear-water scour).

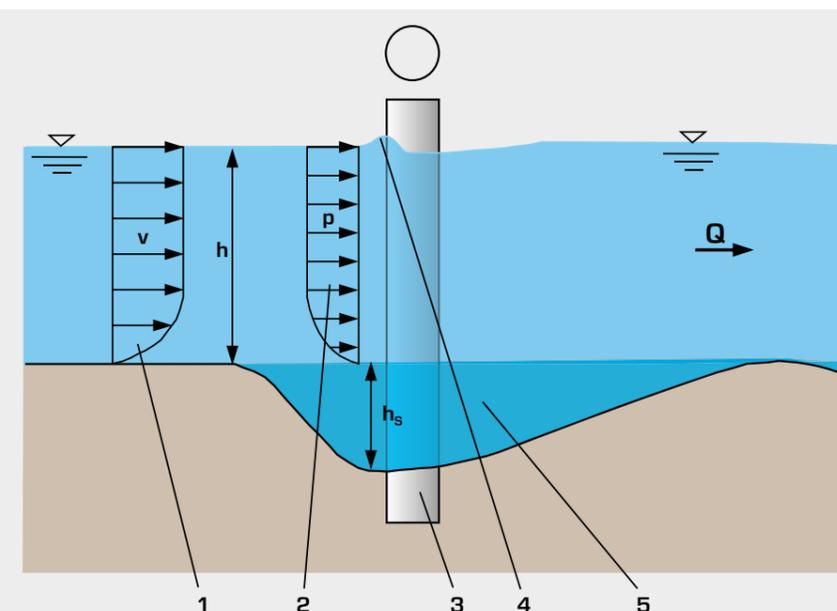
Hay dos tipos de causas principales para la formación de socavación en estructuras: la denominada socavación por contracción y la aparición de erosión local. En la erosión local, el flujo es desviado localmente por la estructura. En el entorno directo de la estructura se forman sistemas de vórtice muy turbulentos, que provocan velocidades locales elevadas (véanse las ilustraciones).

De este modo se aumenta la tasa de erosión de los sedimentos. En la socavación por contracción, la reducción de la sección transversal del flujo por la estructura, p.ej., pilares de puentes, provoca velocidades de flujo más altas. Las velocidades de flujo elevadas inducen tensiones de corte del fondo elevadas, es decir, una capacidad de transporte elevada. La erosión en la base o en la cimentación del pilar puede tener consecuencias fatales, que eventualmente pueden provocar el hundimiento de la estructura. Por esta razón es importante comprender los mecanismos de la formación de socavación, para poder prever la profundidad de la socavación prevista o tomar medidas de protección adecuadas.



Formación de socavación en agua clara en el pilar cilíndrico

- 1 flujo descendente,
- 2 flujo alrededor del pilar,
- 3 vórtice en herradura,
- 4 vórtice de estela,
- 5 socavación



Formación de socavación en agua clara (vista lateral)

- 1 distribución de la velocidad de la descarga,
- 2 distribución de la presión,
- 3 pilar cilíndrico,
- 4 remanso debido al pilar,
- 5 socavación;
- h profundidad de descarga,
- h_s profundidad de la socavación,
- Q descarga

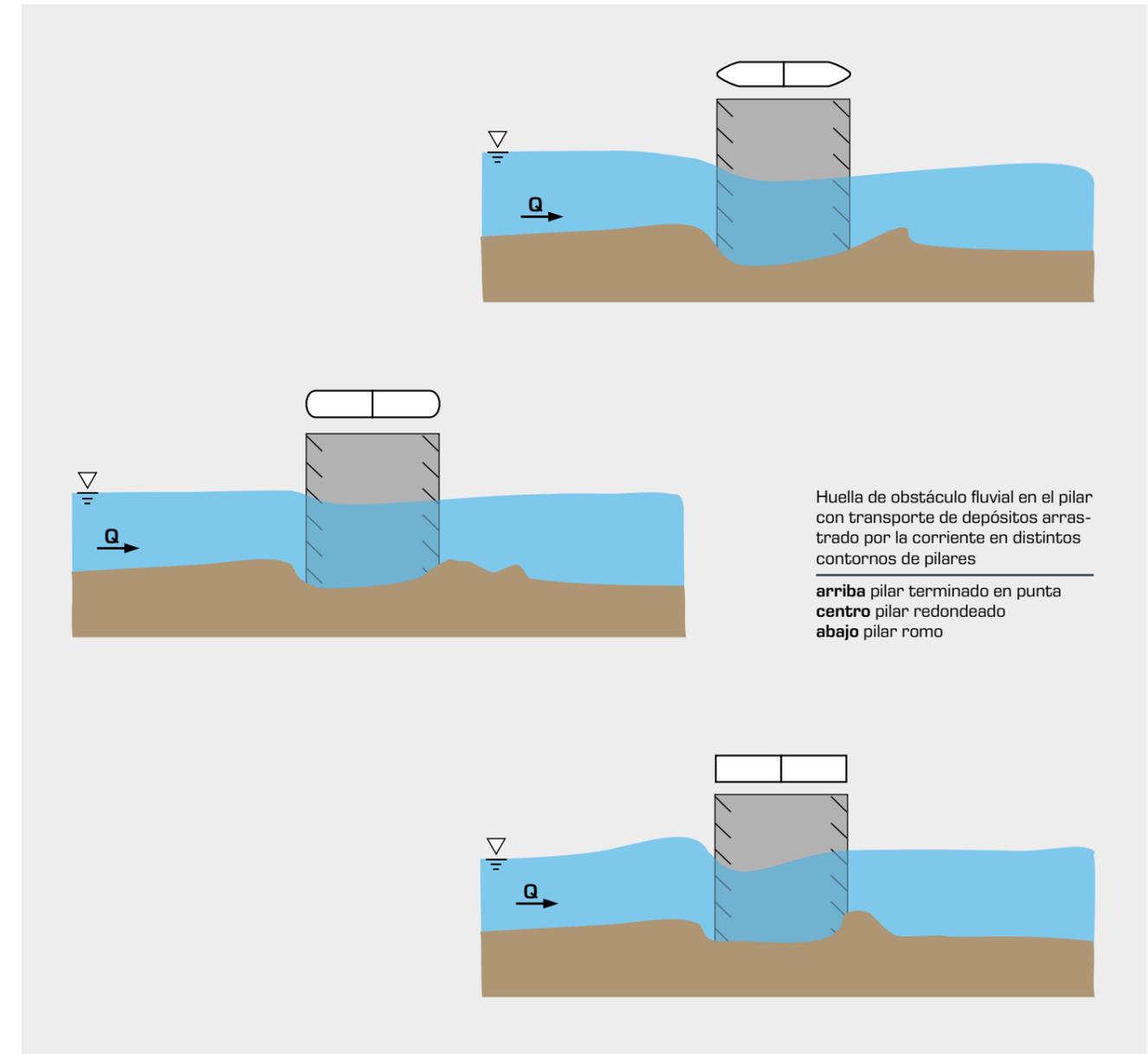
En la formación de socavación se dan dos sistemas de vórtice totalmente independientes entre sí: el **sistema de vórtice de herradura** y el **sistema de vórtice de estela** (véase la ilustración de formación de socavación en agua clara en el pilar cilíndrico). Aquí el sistema de vórtice de herradura es el sistema fundamental en la formación de socavación. Los vórtices de herradura se producen por el flujo dirigido hacia abajo en el lado de aguas arriba de la estructura. El flujo dirigido hacia abajo se origina debido a la caída de presión (véase la flecha roja en la ilustración superior y la distribución de presión en la vista lateral abajo). Los vórtices de estela se originan con la separación de la capa límite en los lados del cilindro expuestos a flujos alrededores (flecha negra en la ilustración superior).

La socavación en agua clara es mayor en el lado de aguas arriba, mientras que en los pilares con perfil rectangular es mayor en los laterales.

Huella de obstáculo fluvial

En la formación de socavación también es importante la sedimentación producida después del obstáculo, denominada encañamiento. Estos dos fenómenos se agrupan bajo el término huella de obstáculo fluvial.

Las ilustraciones inferiores muestran la huella de obstáculo fluvial en el pilar cuando se produce transporte de depósitos arrastrados por la corriente aguas arriba.



Huella de obstáculo fluvial en el pilar con transporte de depósitos arrastrado por la corriente en distintos contornos de pilares

arriba pilar terminado en punta
centro pilar redondeado
abajo pilar romo