

Nachweis gegen Aufschwimmen und Maßnahmen zur Auftriebssicherung von Wehrsohlen

Bernhard Odenwald, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

1 Einleitung

Die Bundeswasserstraßen im deutschen Binnenland haben eine Gesamtlänge von ca. 7.310 km. Davon entfallen ca. 3.030 km auf staugeregelte Fließgewässer mit insgesamt 287 Wehranlagen. Nach Kloé und Bödefeld (2013) weisen 70% der Schleusen und Wehre der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) des Bundes ein Alter von mehr als 50 Jahren und 25% von mehr als 100 Jahren auf. Deshalb ist davon auszugehen, dass zukünftig bei vielen Stauanlagen umfangreiche Instandsetzungsarbeiten oder Ersatzneubauten erforderlich werden.

Einen wesentlichen Bestandteil des Wehres bildet die zwischen den Wehrpfeilern, unterhalb des beweglichen Wehrverschlusses angeordnete und nach ober- und unterstrom reichende Wehrsohle. Die i. d. R. aus Beton bestehende, massive Wehrsohle dient zur Sicherung des ober- und unterwasserseitigen Flussbetts und erforderlichenfalls als Tosbecken zur Energieumwandlung. Sowohl beim Neubau als auch bei der Instandsetzung von Wehranlagen ist die Standsicherheit der Wehrsohlen für alle maßgebenden Bau- und Betriebssituationen nachzuweisen. Hierzu zählen die Nachweise der Sicherheit gegen Aufschwimmen, sowie gegen Kippen (zulässige Außermittigkeit der Sohldruckresultierenden) und Gleiten. Dazu sind die maßgebenden hydraulischen Beanspruchungen auf die Wehrsohle aus dem Grund- und Oberflächenwasser zu ermitteln. Insbesondere zu berücksichtigen sind die Grundwasserüberdrücke auf die Wehrsohle, die sich nach Auftreten eines relevanten Hochwassers während eines raschen Abfalls der Hochwasserstandsganglinie im Unterwasser des Wehres einstellen können. Weiterhin ist die Standsicherheit auch für den Revisionsfall nachzuweisen, bei dem die Wehrsohle zur Durchführung von Bauwerksprüfungen und ggf. Instandsetzungsarbeiten trockengelegt wird.

2 Nachweis gegen Aufschwimmen der Wehrsohle

Die grundlegenden Anforderungen an die Zuverlässigkeit und die Durchführung der erforderlichen bautechnischen Tragfähigkeits- und geotechnischen Standsicherheitsnachweise werden für Massivbauwerke im Wasserbau in der DIN 19702 (2013) geregelt. Eine wesentliche Festlegung betrifft den charakteristischen Wert für veränderliche Einwirkungen, zu denen zumeist auch die Einwirkungen aus Grund- und Oberflächenwasser gehören. Demnach ist der charakteristische Wert veränderlicher Einwirkungen in der ständigen Bemessungssituation entsprechend den Anforderungen der DIN EN 1990 (2010) in der Regel mit einem Wiederkehrintervall von

$T = 100$ a (jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit 10^{-2}) festzulegen. D. h. die oberen charakteristischen Werte für die Einwirkungen aus Grund- und Oberflächenwasser sind auf Grundlage eines 100-jährlichen Hochwassers anzusetzen. Abweichend davon darf für Bau- und Revisionszustände (vorübergehende Bemessungssituation) ein bauzeitlicher Hochwasserstand festgelegt werden.

Weiterhin wird bezüglich der möglichen Abhängigkeiten von Wasserständen darauf hingewiesen, dass zu den Wasserständen auf einer Seite eines Bauwerks (z. B. Oberwasser) je nach Art und Nutzung des Bauwerkes ein Spektrum zugehöriger, möglicher Wasserstände auf der anderen Seite des Bauwerks (z. B. Unterwasser) sowie ein Spektrum zugehöriger, möglicher Grundwasserstände festzulegen ist. Insbesondere trifft dies auf Korrelationen zwischen den Wasserständen in Oberflächengewässern und den zugehörigen Grundwasserständen zu. Hier kann, je nach hydraulischer Anbindung des Grundwasserleiters an das Oberflächengewässer, eine deutliche Abhängigkeit vorliegen. So besteht oft eine starke Korrelation zwischen dem Unterwasserstand eines Wehres oberhalb der Wehrsohle und dem Grundwasserpotential unterhalb der Wehrsohle. Dies ist abhängig von den geohydraulischen Verhältnissen unter Berücksichtigung der durchgeführten baulichen Maßnahmen zur Beeinflussung der geohydraulischen Verhältnisse (z. B. Sickerwegverlängerungen im Oberwasser der Wehrsohle).

Der Nachweis der Sicherheit gegen Aufschwimmen ist nach DIN EN 1997-1 (Eurocode 7, 2009) in Verbindung mit DIN 1054 (2010) bzw. nach Handbuch Eurocode 7, Band 1 (2011) zu führen. Dabei ist zu untersuchen, ob der als UPL (uplift) bezeichnete Grenzzustand der Tragfähigkeit bei einem Gleichgewichtsverlust des Bauwerks oder des Baugrunds infolge von Aufschwimmen durch Wasserdruck oder andere vertikalen Einwirkungen nicht überschritten wird. Es ist nachzuweisen, dass der Bemessungswert der Kombination von destabilisierenden ständigen und veränderlichen vertikalen Einwirkungen $V_{dst;d}$ kleiner oder gleich der Summe des Bemessungswertes der stabilisierenden ständigen vertikalen Einwirkungen ($G_{stb;d}$) und gegebenenfalls des Bemessungswertes eines zusätzlichen Widerstands gegen Aufschwimmen (R_d) ist:

$$V_{dst;d} \leq G_{stb;d} + R_d$$

Dabei ergibt sich die destabilisierende, vertikale Einwirkung $V_{dst;d}$ aus den ständigen Einwirkungen $G_{dst;d}$ und den veränderlichen Einwirkungen $Q_{dst;d}$.

In der DIN 1054, die die in Deutschland geltenden, ergänzenden Regelungen zum EC 7 beinhaltet, ist jedoch festgelegt, dass zur Ermittlung der Bemessungswerte der Einwirkungen aus Wasserdrücken sowohl die aus einem ständigen als auch die aus einem veränderlichen Wasserstand resultierenden, charakteristischen Wasserdrücke mit den Teilsicherheitsbeiwerten für ständige Einwirkungen zu multiplizieren sind. Außerdem sind nach DIN 1054 die Einwirkungen bei der Ermittlung von Bemessungswerten aus charakteristischen Werten immer als einheitli-

ches Ganzes zu behandeln. Wird also eine Einwirkung in Komponenten zerlegt, so sind diese jeweils mit den gleichen Teilsicherheitsbeiwerten zu belegen.

Für den hier betrachteten Nachweis von Wehrsohlen gegen Aufschwimmen bedeutet dies:

- Die Bemessungswerte der Einwirkungen aus Wasserdrücke werden immer mit den Teilsicherheitsbeiwerten für ständige Einwirkungen ermittelt.
- Der Bemessungswert der destabilisierenden, ständigen Einwirkung $G_{\text{stb};d}$ ergibt sich aus dem resultierenden Wasserdruck auf die Wehrsohle. D. h. zur Ermittlung des Bemessungswertes der destabilisierenden, ständigen Einwirkung $G_{\text{stb};d}$ wird der charakteristische Wert des resultierenden Wasserdrucks (Differenz der auf die Unter- und Oberseite der Wehrsohle wirkenden Wasserdrücke) mit dem Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen multipliziert.
- Der in der ständigen Bemessungssituation anzusetzende charakteristische Wert des resultierenden Wasserdrucks entspricht dabei der maximalen Wasserdruckdifferenz, die bei Abflüssen bis zu einem 100-jährlichen Hochwasserabfluss auftreten kann.

Unter der Voraussetzung, dass nur destabilisierende Einwirkungen aus Wasserdruck $G_{\text{dst};d}$ und stabilisierende Einwirkungen aus dem Gewicht der Wehrsohle $G_{\text{stb};d}$ berücksichtigt werden, ergibt sich der Nachweis gegen Aufschwimmen zu:

$$G_{\text{dst};d} \leq G_{\text{stb};d}$$

Für den Nachweis der im Revisionsfall trockengelegten Wehrsohle gegen Aufschwimmen in der vorübergehenden Bemessungssituation ist der maximale Unterwasserstand festzulegen, ab dem die Revision abgebrochen wird und die Wehrsohle geflutet werden muss. Dieser kann z. B. der Oberkante des Revisionsverschlusses oder der Höhe von Flutungsöffnungen entsprechen. Das maximale Grundwasserpotenzial unterhalb der trockengelegten Wehrsohle kann zumeist auf Höhe dieses für die Trockenlegung maximalen Unterwasserstands des Wehres angesetzt werden.

3 Ermittlung des maßgebenden, resultierenden Wasserdrucks auf Wehrsohlen

Während es im Allg. relativ unproblematisch ist, das Gewicht der Wehrsohle zu bestimmen, ist die Ermittlung des resultierenden, auf die Wehrsohle wirkenden, charakteristischen Wasserdrucks zumeist mit einem wesentlich höheren Aufwand verbunden. Prinzipiell können dafür selbstverständlich immer auf der sicheren Seite liegende Annahmen getroffen werden. So kann angenommen werden, dass das Grundwasserpotenzial unterhalb der Wehrsohle bis auf Höhe des Scheitelwasserstands der Hochwasserwelle im Gewässer ansteigt und auf dieser Höhe zunächst auch verbleibt, während der Wasserstand im Unterwasser des Wehres nach Überschreiten des Hochwasserscheitels rasch bis z. B. auf Höhe des Mittelwasserstandes abfällt.

Für diese auf der sicheren Seite liegenden Annahmen ergibt sich der resultierende, charakteristische Wasserdruck aus der Differenz des auf Höhe des Scheitelwasserstand beim 100-jährlichen Hochwasserabfluss angesetzten Grundwasserpotenzials unterhalb der Wehrschwelle und des auf Höhe des Mittelwasserstands im Unterwasser des Wehres angesetzten Wasserstand oberhalb der Wehrschwelle.

Dies stellt jedoch zumeist eine unrealistisch hohe Wasserdruckbeanspruchung der Wehrschwelle dar. Wehrsohlen von Bestandsbauwerken sind auf derartig hohe Wasserdruckbeanspruchungen zumeist auch nicht bemessen, so dass der Nachweis der Wehrsohle gegen Aufschwimmen in der ständigen Bemessungssituation für diesen auf der sicheren Seite liegenden Grundwasserüberdruck nicht geführt werden kann. Um hier einen unnötigen Sanierungsaufwand zu vermeiden, muss der für den Nachweis gegen Aufschwimmen erforderliche, resultierende, charakteristische Wasserdruck auf Grundlage geeigneter Grund- und Oberflächenwasserstandsmessungen ermittelt werden. Dazu sind automatisierte Messungen des Wasserstands oberhalb der Wehrsohle und des Grundwasserpotenzials unterhalb der Wehrsohle in einer ausreichenden Anzahl von Messstellen und in ausreichend kurzem Messintervall über einen möglichst langen, Hochwasserereignisse umfassenden Zeitraum erforderlich.

Während Pegelmessungen im Oberwasser und im Unterwasser eines bestehenden Wehres zumeist über einen entsprechend langen Zeitraum in einem ausreichend kurzem Zeitintervall vorliegen, sind Messungen des Grundwasserpotenzials unterhalb der Wehrsohle oft nicht vorhanden oder liegen zumindest nicht in ausreichender zeitlicher und örtlicher Auflösung vor. Weiterhin sind bei der Bestimmung der maßgebenden Grundwasserpotentiale immer die Baugrundverhältnisse und die räumlichen Grundwasserströmungsverhältnisse zu beachten. Dazu muss die Baugrundsichtung unterhalb der Wehrsohle hydrogeologisch ausreichend erkundet sein, um die Grundwasserströmungsverhältnisse unter Berücksichtigung der Durchlässigkeit der einzelnen Boden- und Felsschichten und von in den Untergrund reichenden Bauteilen, die die geohydraulischen Verhältnisse beeinflussen (z. B. Sickerwegverlängerungen durch Spundwände), beschreiben zu können.

Eine Beurteilung der Grundwasserströmungsverhältnisse kann zunächst auf Grundlage von Grundwassermessstellen erfolgen, die im Uferbereich seitlich neben der Wehranlage sowohl im Oberwasser- als auch im Unterwasserbereich angeordnet sind und unterhalb der Unterkante der Wehrsohle im relevanten Grundwasserleiter verfiltriert sind. Dabei ist auf Grundlage der Informationen zum Baugrund und zu den die geohydraulischen Verhältnisse beeinflussenden baulichen Maßnahmen zu beurteilen, inwieweit die in den Messstellen seitlich des Wehres gemessenen Grundwasserpotentiale repräsentativ für diejenigen unter den Wehrsohlen der einzelnen Wehrfelder sind.

Bei der Instandsetzung von Wehranlagen ist zumeist die Untersuchung der Betonqualität der Wehrpfeiler erforderlich. Dazu werden häufig vertikale Kernbohrungen von der Pfeileroberfläche aus durchgeführt. Durch Verlängerung dieser Bohrungen bis in den unterhalb der Pfeilersohle anstehenden Baugrund lassen sich diese oft zu geeigneten Grundwassermessstellen ausbauen. Da diese unmittelbar neben den Wehrfeldern angeordnet sind, können die Grundwasserverhältnisse unterhalb der Wehrsohlen durch die hier gemessenen Grundwasserpotenziale meist gut beurteilt werden. Dabei sollte eine ausreichende, redundante Anordnung der Messstellen sowohl an der Oberwasserseite als auch an der Unterwasserseite der Pfeiler erfolgen.

In jedem Fall ist es notwendig die Grundwassermessstellen mit automatisierten Datenerfassungssystemen auszustatten, um bei Hochwasser eine ausreichende Auflösung der Messwerte zu erzielen. Dabei sollte das Messintervall an das der Pegelmessung im Oberflächengewässer angepasst werden, um möglichst genaue Wasserstandsdifferenzen ermitteln zu können. Außerdem ist es erforderlich die Beobachtung der Grundwasserstände über einen möglichst langen Zeitraum, der auch relevante Hochwasserereignisse umfassen sollte, durchzuführen. Deshalb müssen die Grundwassermessstellen bei geplanten Instandsetzungen möglichst frühzeitig hergestellt und mit entsprechender Messtechnik ausgestattet werden. Die Auslesung und Auswertung der Messdaten sollte mindestens halbjährlich erfolgen. Dabei sollte jeweils auch eine händische Kontrollmessung der Grundwasserstände in den Messstellen durchgeführt werden.

Auch bei relativ frühzeitiger Anordnung einer ausreichenden Anzahl von Grundwassermessstellen mit geeigneter Datenerfassung ist jedoch davon auszugehen, dass oft keine ausreichende Datengrundlage für eine Extremwertanalyse vorliegt. In diesem Fall muss der maximale resultierende, charakteristische Wasserdruck auf die Wehrsohle für die bis zu einem 100-jährlichen Hochwasserabfluss zu betrachtenden Verhältnisse aus den Messdaten durch eine auf der sicheren Seite liegende Extrapolation festgelegt werden. Die Datengrundlage hat deshalb einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität des für den Nachweis gegen Aufschwimmen festzulegenden charakteristischen Wertes des auf die Wehrsohle wirkenden Grundwasserüberdrucks.

Weiterhin besteht auch die Möglichkeit, die Porenwasserdrücke unter einer Wehrsohle unmittelbar durch Einbau von Druckaufnehmern in durch die Wehrsohle durchgeführten Bohrungen zu messen. Dies wurde von der BAW bereits in Wehrsohlen von mehreren Wehranlagen durchgeführt. Die Messungen dienten dabei als Grundlage für den Nachweis gegen Aufschwimmen der trockengelegten Wehrsohlen für geplante Revisionszustände bzw. zur Festlegung maximal zulässiger Wasserstände im Unterwasser der Wehre. Dabei wurden die Messeinrichtungen nach relativ kurzer Messdauer wieder ausgebaut, da eine langfristige Messung für die hier vorliegenden Fragestellungen nicht erforderlich war. In die Messstellen wurden Systeme, jeweils bestehend aus einem Packer in Verbindung mit einem Druckaufnehmer (Bild 1, links), zur kontinuierlichen Messung des Wasserdrucks in die durch die Betonsohle bis in den darunter anstehenden Baugrund durchgeführten Bohrungen eingebaut. Durch den Einbau des

Packer in der Betonsohle des Wehres wurde die Bohrung druckdicht verschlossen. Das Kabel des Druckaufnehmers wurde ebenfalls druckdicht durch den Packer geführt. Dadurch konnte das Messsystem auf relativ einfache Weise in die Bohrungen ein und wieder ausgebaut werden. Grundlage des Messsystems ist ein mechanischer Packer, durch den das Kabel des Druckaufnehmers hindurchgeführt und mittels Kunstharz dicht mit dem Packer vergossen wurde. Der Einbau der Packer erfolgte durch Taucher, wobei die Abdichtung der Packer in der Messstelle durch Drehen der Spannknebel erfolgte. Das Foto im rechten Teil von Bild 1 zeigt das verwendete Messsystem vor dem Einbau. In Laursen und Odenwald (2010) sind beispielhaft die durchgeführten Maßnahmen und Messungen detailliert beschrieben.

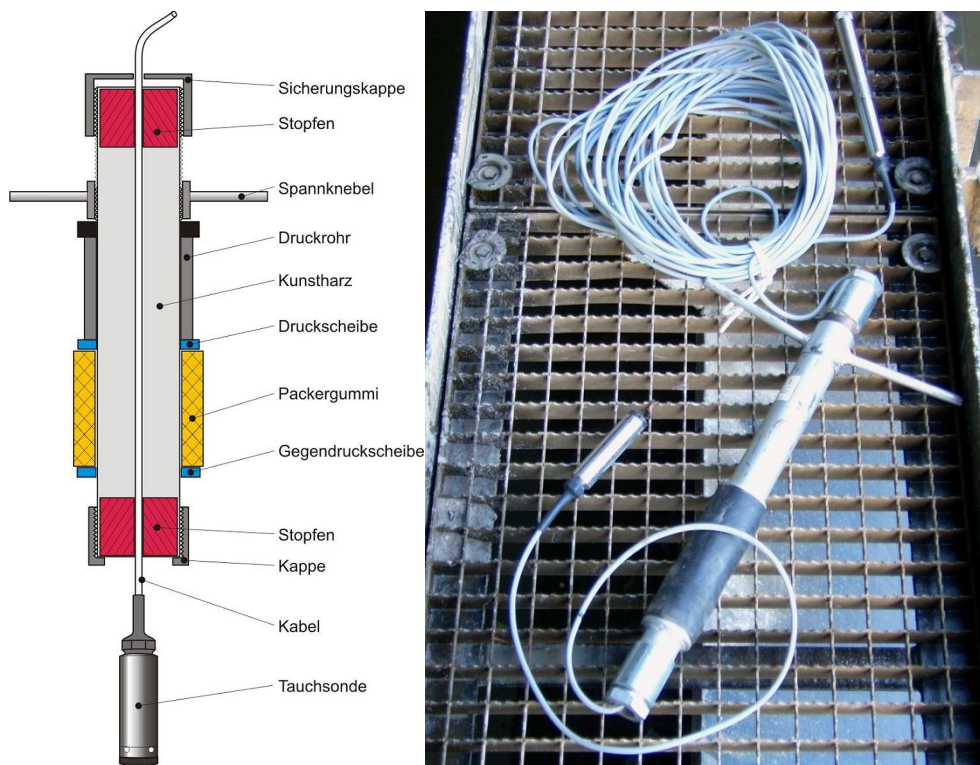


Bild 1: Systemschnitt des Grundwassermesssystems für den Einbau in Wehrsohlen (links), Messsystem vor dem Einbau in die Wehrsohle (rechts)

4 Maßnahmen zur Auftriebssicherung von Wehrsohlen

Kann die Sicherheit gegen Aufschwimmen der Wehrsohle für den auf Grundlage der Messungen festgelegten charakteristischen Grundwasserüberdruck nicht nachgewiesen werden, sind geeignete Maßnahmen zur Auftriebssicherung erforderlich. Prinzipiell kann die Auftriebssicherung durch Verankerung der Wehrsohle im Baugrund erfolgen. Bei älteren Wehranlagen bestehen die Wehrsohlen jedoch oft aus unbewehrtem bzw. schwach bewehrtem Beton mit teilweise geringer Betonqualität. Bei diesen Bauteilen ist eine nachträgliche Verankerung nicht oder nur mit großem Aufwand möglich.

Es ist davon auszugehen, dass bei Ermittlung des maßgebenden Grundwasserüberdrucks auf Grundlage geeigneter Messungen der Nachweis der Wehrsohle gegen Aufschwimmen in der ständigen Bemessungssituation für die meisten bestehenden Wehranlagen geführt werden kann. In vielen Fällen ergibt sich jedoch ein Defizit bei der Sicherheit gegen Aufschwimmen für die im Revisionsfall trockengelegte Wehrsohle. Hier kann der Einbau von Druckentlastungsbrunnen in der Wehrsohle eine geeignete Maßnahme zur Auftriebssicherung bei Trockenlegung darstellen. Dabei sollten die Druckentlastungsöffnungen in der Wehrsohle im Betriebszustand verschlossen werden und nur für den Revisionsfall vor der Trockenlegung durch Taucher geöffnet werden. Die ausreichende Grundwasserdruckentlastung ist dazu im Allg. durch eine geeignete analytische oder numerische Grundwasserströmungsberechnung nachzuweisen.

In Anlehnung an die Regelungen, die für die Kammersohlen der Neckarschleusen getroffen wurden, kann jedoch in Abstimmung mit der BAW auf den Nachweis gegen Aufschwimmen der trocken gelegten Wehrsohle verzichtet werden, wenn:

- sich die Wehrsohle in einem geringdurchlässigen Baugrund aus nicht verwitterungsanfälliger Fels befindet, der keine ausgeprägten Störungszonen oder Hohlräume aufweist, (Gebirgsdurchlässigkeit $k < 10^{-6}$ m/s),
- eine Grundwasserdruckentlastung unter der Wehrsohle bei Trockenlegung durch Entlastungsbrunnen in der Wehrsohle erfolgt,
- sich bei bisherigen Trockenlegungen zu Revisionszwecken keine Auffälligkeiten gezeigt haben und
- für die Zeit der Trockenlegung ein geeignetes Monitoring und ein geeignetes Havariekonzept vorhanden sind.

Dabei wird davon ausgegangen, dass

- zur Druckentlastung maximal eine geringfügige Hebung der Wehrsohle erforderlich ist, so dass ein Zufluss zu den Entlastungsbrunnen innerhalb dieses minimalen Spaltes erfolgen kann,
- der Zufluss aufgrund der geringen Durchlässigkeit des Untergrunds gering ist und
- aufgrund des nicht verwitterungsanfälligen Fels kein Materialtransport stattfindet.

Diese Voraussetzungen liegen zumeist bei einem Baugrund aus einem nur mäßig geklüfteten Fels mit geringer Gebirgsdurchlässigkeit und geringer Verwitterungsanfälligkeit vor.

Sind die maßgebenden, wasserführenden Trennflächen des Fels in ausreichendem Maß vertikal ausgerichtet, so dass bei Entlastung eine Strömung bis unter die Kammersohle erfolgen kann, sind geringfügig in den Fels reichende Entlastungsbrunnen ausreichend. Bei horizontaler Ausrichtung der wasserführenden Trennflächen sind die Brunnen so weit in den Fels unter der Wehrsohle zu führen, dass eine Druckentlastung bis in ausreichende Tiefe für den Nachweis

gegen Aufschwimmen erfolgt. Dabei ist auf der sicheren Seite liegend anzunehmen, dass unter der Unterkante der Entlastungsbrunnen der Grundwasserdruck durch die Entlastungsbrunnen nicht reduziert wird. Die Grundwasserbrunnen sind in Abhängigkeit von der Gebirgsdurchlässigkeit des Fels und der Potenzialdifferenz so zu dimensionieren, dass durch den Grundwasserfluss innerhalb der Brunnen kein relevanter Potenzialabbau stattfindet.

Der Nachweis kann jedoch nicht entfallen, wenn:

- sich die Kammersohle innerhalb eines Baugrunds (ggf. auch nur bereichsweise) aus Lockergestein oder aus stark geklüftetem (ggf. kavernösem) oder verwitterungsanfälligem Fels befindet oder
- wenn der Baugrund unterhalb der Kammersohle geschichtet ist.

In letztem Fall ist Auftriebssicherheit geringdurchlässiger Schichten unterhalb der Baugrubensohle unter Berücksichtigung des Grundwasserpotenzials in ggf. darunter anstehenden, durchlässigen Schichten nachzuweisen.

Literatur

- DIN 1054: 2010-12: Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau - Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1; Beuth Verlag, Berlin
- DIN EN 1990: 2010-12: Grundlagen der Tragwerksplanung; Beuth Verlag, Berlin
- DIN EN 1997-1: 2009-09 - Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln; Deutsche Fassung EN 1997-1; Beuth Verlag, Berlin
- DIN 19702: 2013-02: Massivbauwerke im Wasserbau - Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit; Beuth Verlag, Berlin
- Handbuch Eurocode 7: 2011-06: Geotechnische Bemessung - Band 1: Allgemeine Regeln, vom DIN autorisierte konsolidierte Fassung; Beuth Verlag, Berlin
- Kloé K. und Bödefeld J. (2013): Zustandsprognose für Verkehrswasserbauwerke - ein Modul des Erhaltungsmanagementsystems, Tagungsband des BAW-Kolloquiums „Erhalten und Ertüchtigen von Bauwerken“ am 4. und 5. November 2013 in Karlsruhe, S 23 - 27.
- Laursen C. und Odenwald B. (2010): Messungen zur Ermittlung der Sicherheit gegen Aufschwimmen von Wehr- und Schleusensohlen bei Revisionszuständen, bbr 11/2010, S. 36 - 41.