

Tobias Gamisch und Volker Bettzieche

# Materialauslaugung in Bruchstein-Staumauern

Die vor mehr als 100 Jahren gebauten Staumauern des Ruhrverbands wurden nach den Plänen von Prof. Intze mit groben Bruchsteinen und einem Trassmörtel hergestellt. Ende des letzten Jahrhunderts sanierte der Ruhrverband diese Staumauern, indem ein Kontrollstollen und ein Drainagesystem in die Mauern vorgetrieben wurden. Hierdurch wird ein Teil des Mauerkörpers zwischen der Wasserseite und der Ebene der Drainagen planmäßig durchströmt. Nach mehreren Jahrzehnten Betrieb untersuchte der Ruhrverband zusammen mit der ETH Zürich, wie die ständige Durchströmung auf den Trassmörtel wirkt.

## 1 Einführung

Die vor gut 100 Jahren in Nordrhein-Westfalen gebauten Staumauern entstanden nach den Konstruktionsprinzipien von Prof. Intze, zu damaliger Zeit Wasserbauprofessor an der Universität Aachen [3]. Er wählte grobes Bruchsteinmauerwerk, das mit seinem Gewicht dem Druck des Talsperrenwassers standhalten konnte. Das Mauerwerk wurde mit einer eigenen Rezeptur von Trassmörtel mit der Zusammensetzung „1 Teil Fettkalk, 1 ½ Teile besser blaugrauer Plaidter Trass und 1 ¾ Teile Rheinsand“ ausgeführt. Die so konstruierten Staumauern waren tatsächlich in den ersten Betriebsjahren praktisch dicht. Nur geringe Wassermengen gelangten in die Drainagerohre, die etwa 1,5 m hinter der Wasserseite eingebaut waren, und konnten von dort abgeführt werden. Im Laufe der Zeit versinterten jedoch diese Drainagen und es kam zu Durchnässungen der Staumauern. Unglücklicherweise versuchte man in den 1950er-Jahren die Staumauern durch Injektionen abzudichten, wodurch die bereits in Mitleidenschaft gezogenen Drainagerohre zum Teil vollständig verstopft wurden. Zwischen 1980 und 2000 wurden nahezu alle Intze-Staumauern saniert. Eine vom Ruhrverband bereits 1965 beim Umbau der Listertalsperre angewendete Sanierungsmethode war der nachträgliche Einbau eines Kontroll- und Drainagestollens im Gründungsbereich der Staumauer und von diesem ausgehend die Drainierung des Mauerkörpers durch Bohrungen ([1], [2]; **Bild 1**).

Im Bereich zwischen der wasserseitigen Oberfläche der Staumauer und der Drainageebene wird das Mauerwerk nun planmäßig durchströmt, was nach den ursprünglichen Plänen von Prof. Intze so nicht vorgesehen war. Aus diesem Grunde ergab sich die Fragestellung, wie der Mauerwerksmörtel auf diese ständige Durchströmung reagiert, ob sich durch die Durchströmung Mörtelbestandteile lösen sowie die Mauer undicht werden kann und ob in der Folge mit Standsicherheitsverlusten zu rechnen ist.

## 2 Untersuchungsprogramme der ETH Zürich

Zur Untersuchung der Auswirkungen der Durchsickerung an der Ennepe- und Möhnestaumauer beauftragte der Ruhrverband im Herbst 2005 die ETH Zürich mit der Entwicklung eines Untersuchungsprogramms. Von November 2005 bis Dezember 2006 wurden an beiden Staumauern insgesamt 293 Wasserproben (**Bild 2**) und 6 Feststoffproben genommen [4], [5] und durch das Labor des Ruhrverbands auf über 9 200 Parameter analysiert.

Nach 8 Jahren entschloss sich der Ruhrverband, eine erneute Untersuchungskampagne von März 2014 bis März 2015 an Ennepe-, Möhne- und Fürwiggestaumauer durchzuführen. Durch die Gegenüberstellung beider Kampagnen können insbesondere zeitliche Entwicklungen der zwei wichtigsten Mechanismen für die Dauerhaftigkeit des Mauermörtels untersucht werden:

1. Umwandlung und Elution der Calcium-Phasen des Mörtels und
2. Alkali-Kieselsäure-Reaktionen (AKR).

## 3 Untersuchungsergebnisse

### 3.1 Elution der Calcium-Phasen

Nach Erstellung der Staumauern enthielt der Mörtel eine Überschussmenge an Portlandit (Fettkalk). Ein Teil des Fettkalks reagierte mit dem Trass zu Calciumsilikathydrat (CSH), das dem Mörtel seine Festigkeit verleiht. Das freie Portlandit gewährleistet einen hohen pH-Wert und eine hohe Calcium-Konzentration in der Porenlösung und dadurch die Stabilität der CSH-Phasen [6].

In der 1. Elutionsphase reagiert das Sickerwasser mit dem freien Portlandit: Das Talsperrenwasser ist nicht calcitgesättigt und enthält Kohlendioxid, das mit dem Portlandit zu Calciumcarbonat reagiert. Dieser Prozess ist die Carbonatisierung und vom Betonbau bekannt [6]. Durch die Carbonatisierung wird das Kohlendioxid im Mauer Mörtel fixiert. Auf dem weiteren Sickerweg löst das kohlendioxidarme Sickerwasser Portlandit und kann dabei pH-Werte bis ca. 13 erreichen [7].

In der 2. Elutionsphase ab pH-Werten  $\leq 10,4$  endet die Carbonatisierung. Das freie Portlandit wurde soweit reduziert, dass der pH-Wert des Sickerwassers nicht mehr über 10,4 ansteigt. Ab diesem Punkt löst das Sickerwasser das Calciumcarbonat im Mauer Mörtel auf. Die Elution des Calciumcarbonats beginnt langsam und nimmt zu, je weniger stark der pH-Wert

des Sickerwassers in der Staumauer erhöht wird. Die Elution des Calciumcarbonats ist maximal, wenn das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht erreicht wird – bei atmosphärischen Verhältnissen bei einem pH-Wert um 8,3 [7].

Mit der Auflösung des Calciumcarbonats nimmt die Wasserdurchlässigkeit des Mauermörtels deutlich zu. Die Festigkeit nimmt jedoch nur geringfügig ab, da die CSH-Phasen noch stabil sind.

In der 3. Elutionsphase, nachdem ein Großteil des Calciumcarbonats eluiert ist, sinkt die Calcium-Konzentration in der Porenlösung. Dadurch steigt der lösende Angriff des Sickerwassers auf die CSH-Phasen und die Festigkeit des Mauermörtels.

Die Untersuchungen an Ennepe-, Fürwigg- und Möhnestaumauer zeigen, dass alle drei Staumauern auch heute noch freies Portlandit enthalten und sich weitgehend noch in der 1. Elutionsphase bewegen. Es gibt jedoch auch lokale Stellen, an denen die Elution bereits die 2. Phase erreicht hat. Die Drainagebohrungen D102 90° und D102 70° der Ennepestaumauer erreichen nur noch pH-Werte von 9,0 bis 9,2 und entsprechende Calcium-Gehalte. Das Gleiche gilt für die Bohrung A8 der Fürwiggstaumauer, wobei die Elution hier im unteren Mauerbereich weiter fortgeschritten ist.

Die pH-Werte und Calcium-Gehalte im Drainagewasser können sich durch Kohlendioxid-Absorption sehr schnell ändern [7]. Die Zustandsbeurteilung muss deshalb anhand des Magnesium-Gehalts geprüft werden. Magnesium ist bei hohen pH-Werten schlecht wasserlöslich und wird in der Staumauer fixiert, wenn das Sickerwasser hohe pH-Werte erreicht.

Die Drainagewässer aus den Drainagebohrungen D102 90° und D102 70° weisen gleich hohe Magnesium-Gehalte auf wie das Stauwasser. In diesen Bereichen der Ennepestaumauer findet keine signifikante pH-Wert-Anhebung mehr statt. Das Drainagewasser aus der Bohrung A8 der Fürwiggstaumauer weist sogar leicht höhere Magnesium-Gehalte als das Talsperrenwasser auf, was auf eine Auflösung von früher fixiertem Magnesium hindeutet.

### 3.2 Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Bei hohen pH-Werten und Vorhandensein von Wasser und Alkalien (Natrium, Kalium) können reaktive Kieselsäuren Alkalihydrogensilicates bilden, die hygroskopisch sind und bei Wasseranlange-

lung Treiberscheinungen verursachen können. Bei weiterer Wasseraufnahme können sich leicht lösliche Wassergläser bilden [6].

Reaktive Kieselsäure kommt im Trass des Mauermörtels und in den Grauwacke-Bruchsteinen vor [6], [8]. Wasser und Alkalien sind ebenfalls an einigen Stellen der untersuchten Staumauern vorhanden. Treiberscheinungen wurden nicht beobachtet.

Alkali-Kieselsäure-Reaktionen treten im Bereich der Bohrungen D13 45° und D13 70° der Ennepestaumauer auf. Der zeitliche Verlauf lässt vermuten, dass die Alkalien über die Mauervorderseite eingetragen werden und dort aufgrund der hohen pH-Werte des Mörtels Alkalihydrogensilikate entstehen, die durch den atmosphärischen Niederschlag gelöst und bis in

die luftseitigen Drainagebohrungen transportiert werden können.

An der Möhnestaumauer enthalten die Drainagewässer aus den Bohrungen D520 86°, D452 86°, D524 70° und D520 44° gelöste Alkalihydrogensilikate, die aus oberen Mauerbereichen stammen. Die Quelle der Alkalien können Streusalze oder auch frühere Wasserglas-Verpresungen sein, die aufgrund der hohen pH-Werte bisher nicht auskristallisiert sind.

Alkalihydrogensilikate können in einer durchströmten Bruchsteinstaumauer durch das Sickerwasser ausgespült werden, bevor Treiberscheinungen auftreten. Zudem kann der Mörtel aufgrund seiner Elastizität und Porosität geringe Volumenänderungen schadlos absorbieren. Die schädigende Wirkung von Alkali-Kieselsäure-Reaktionen bewirkt deshalb

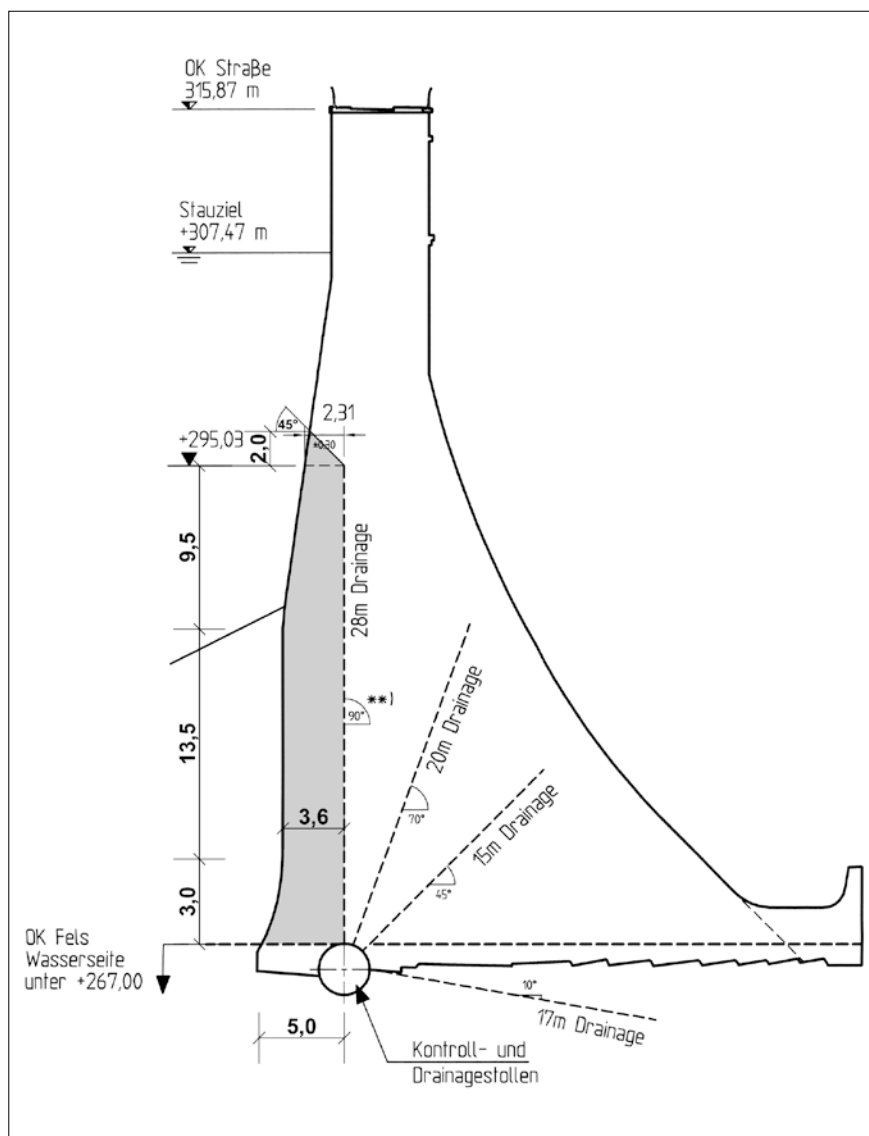


Bild 1: Elutionsprisma einer Bohrung in der Staumauer der Ennepetalsperre (Quelle: [4])

hauptsächlich den langfristigen Verlust der Festigkeit des Mörtels und des Verbunds mit den Bruchsteinen.

#### 4 Empfehlungen zur Überwachung der Staumauern

Die Elution des Kalk-Trass-Mörtels ist ein langsamer Vorgang. Wenn neben der Elution keine Schadreaktionen ablaufen, nimmt zuerst die Wasserdurchlässigkeit der Staumauer zu, bevor die Mörtelfestigkeit abnimmt. Die laufende Überwachung kann deshalb durch eine einfache, fortlaufende Messung der Sickerwassermengen erfolgen. Sollte die Sickerwassermenge bei gleicher Einstauhöhe ansteigen, sind einzelne Drainagebohrungen genauer zu untersuchen.

Die laufende Überwachung der Sickerwassermengen sollte durch Mengen-

messungen an einzelnen Drainagebohrungen ergänzt werden. Zu beproben sind vor allem die wasserseitigen Bohrungen mit geringen pH-Werten ein- bis zweimal pro Jahr, da hier die Elution am stärksten ist. Ergänzend sind auch die in den Drainagebohrungen entstehenden Ablagerungen hinsichtlich Menge, Farbe, Festigkeit und Veränderungen zu dokumentieren.

Chemische Analysen des Drainagewassers, wie sie 2006 und 2015 an Ennepe-, Fürwigge- und Möhnestaumauer durchgeführt wurden, eignen sich für Standortbestimmungen des Elutionszustands und zur Feststellung von Schadreaktionen. Solche Analysen sind nur in großen Zeitabständen (etwa 10 Jahre, z. B. im Zuge der Vertieften Überprüfung), nach außerordentlichen Ereignissen (z. B. Schadstoffeintrag) oder zur Planung von Sanierungsmaßnahmen wirtschaftlich sinnvoll.

Falls der Elutionszustand einer Staumauer regelmäßig chemoanalytisch überwacht werden soll, reicht es aus, nach einer Standortbestimmung jeweils ein- bis zweimal pro Jahr die Leitparameter (pH-Wert, Temperatur, elektrische Leitfähigkeit) an ausgewählten Bohrungen zu messen sowie gegebenenfalls einzelne Parameter von Schadreaktionen zu bestimmen.

#### 5 Zusammenfassung

Die Untersuchungen an Ennepe-, Fürwigge- und Möhnestaumauer haben gezeigt, dass die Elution des Kalk-Trass-Mörtels trotz Einbau neuer Drainagebohrungen ein langsamer und gut überwachbarer Prozess ist, der mit dem Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht in 3 Phasen beschrieben werden kann. Der momentane Elutionszustand kann durch Analysen des Drainagewassers zuverlässig beurteilt werden.

Alle drei Staumauern befinden sich noch in der 1. Elutionsphase. Die Elution ist jedoch aufgrund von Inhomogenitäten im Mauerwerk, Druckunterschieden und schwankenden Einstauhöhen nicht gleichverteilt über die Höhe und Breite der Staumauern. Bei der Ennepestaumauer ist die Elution am weitesten fortgeschritten. Der Einzugsbereich des Drainagefächers D102 befindet sich bereits in der 2. Phase. Bei der Fürwiggestaumauer befindet sich der Einzugsbereich der Drainagebohrung A8 in der 2. Phase. Bei der Möhnestaumauer liegen alle untersuchten Drainagebohrungen deutlich in der 1. Elutionsphase.

Quantitative Auswertungen am Elutionsprisma (Bild 1) zeigen, dass sich die chemischen Gleichgewichte im Sickerwasser der Staumauern nicht vollständig einstellen aufgrund der großen Porosität und definierten Fließwege im Mauerwerk, die auch auf den Kamerabefahrungen der Drainagebohrungen sichtbar sind. Die tatsächliche Elution des Mörtels ist deshalb weniger weit fortgeschritten als dies die Wasseranalysen vermuten lassen. Die Beurteilung des Elutionszustands liegt somit auf der sicheren Seite.

Der Ruhrverband misst die Drainagewassermengen in Ennepe- und Möhnestaumauer seit Jahren kontinuierlich mittels Messwehren. An beiden Staumauern wurde bisher kein bleibender Anstieg der Wassermengen festgestellt. Die Sickerwassermengen folgen streng den Einstauhöhen. Daher ist sichergestellt, dass die

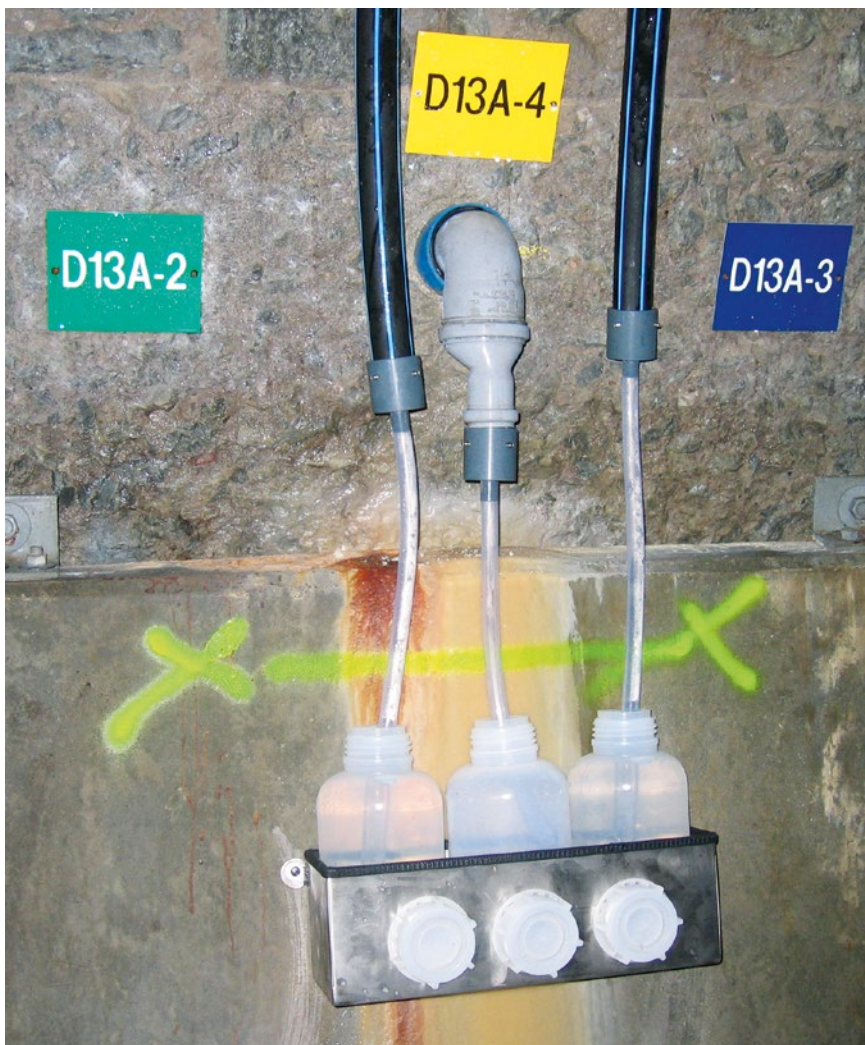


Bild 2: Einrichtung zur Entnahme von Proben in der Ennepestaumauer (Quelle: [4])

Elution des Mörtels bisher zu keiner Erhöhung der Wasserdurchlässigkeit geführt hat. Zudem beschränken sich die Alkali-Kieselsäure-Reaktionen auf eng eingrenz- bare Bereiche. Treiberscheinungen sind bisher nicht aufgetreten. Somit kann eine Abnahme der Festigkeit des Mauerwerks an allen drei Staumauern zum heutigen Zeitpunkt ausgeschlossen werden.

### Autoren

#### Prof. Dr.-Ing. Volker Bettzieche

Ruhrverband  
Kronprinzenstr. 37  
45128 Essen  
vbe@ruhrverband.de

#### Dr. Tobias Gamisch

Im Straumeier 16  
5436 Würenlos, Schweiz  
tobias.gamisch@tbwnet.ch

### Literatur

- [1] Bettzieche, V.; Heitefuss, C.: Monitoring als Grundlage einer kostengünstigen Talsperrensanierung. In: Internationales Symposium Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau, ETH Zürich, 2002.
- [2] Bettzieche, V.: Experience with subsequently installed Drainage Systems inside of Masonry Dams. In: Llanos, J. A. et al. (Hrsg.): Dam Maintenance and Rehabilitation. Lisse: Balkema 2003.
- [3] Intze, O.: Entwicklung des Talsperrenbaues in Rheinland & Westfalen von 1889 bis 1903. Aachen: La Ruelle'sche Accidenzdruckerei, 1903.
- [4] Girmscheid, G.; Gamisch, T.: Gutachten über die Elution von Gewichtsstau-mauern aus Bruchsteinmauerwerk und Massnahmen zur Instandhaltung der Mauerdrainagen – Teil II/II: Ennepetalsperre. Zürich: ETH Zürich, 2008 (unveröffentlicht).
- [5] Girmscheid, G.; Gamisch, T.: Gutachten über die Elution von Gewichtsstau-mauern aus Bruchsteinmauerwerk und Massnahmen zur Instandhaltung der Mauerdrainagen – Teil II/II: Möhnetalsperre. Zürich: ETH Zürich, 2008 (unveröffentlicht).
- [6] Stark, J; Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton. Berlin: Springer Vieweg, 2013.
- [7] Gamisch, T.; Girmscheid, G.: Versinterungsprobleme in Bauwerksentwässerungen. Berlin: Bauwerk, 2007.
- [8] Jungermann, B.: Untersuchungsbericht A 050612 – Mikroskopisch-morphologische Untersuchung von Baustoffproben. Staumauer Fürwige Talsperre, 1. Ausfertigung. Kirchhunden, 20.06.2005.

Tobias Gamisch and Volker Bettzieche

### Elution of Material from Masonry Dams

The masonry dams of the Ruhrverband were built more than 100 years ago according to the principles of Prof. Intze, by using masonry blocks and trass mortar. At the end of last century the Ruhrverband rehabilitated these dams, by driving an inspection gallery and a drainage system into the dam. Based on these an intended seepage exists from the upstream face of the dam to the plane of the drainage system. After some decades in operation, the question arised, how the constant flow acts on the trass mortar. Therefore the Ruhrverband and the ETH Zürich realized an intensive measurement campaign in 2006 and 2014 at the Möhne, Ennepe and Fürwige dam. In each campaign about 300 samples of water and more than 9 000 chemical analyses were carried out. Based on this, the conversion and elution of the calcium-phase of the mortar could be investigated and harming effects of an alkali-silica reaction (ASR) could be excluded.



Weitere Empfehlungen aus [www.springerprofessional.de](http://www.springerprofessional.de):

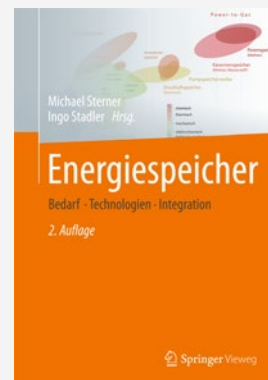
#### Bruchstein-Staumauer

Lahmer, T.; Könye, C.; Bettzieche V.: Optimale Positionierung von Messeinrichtungen an Staumauern zur Bauwerksüberwachung. In: WasserWirtschaft, Ausgabe 10/2010. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2010.  
[www.springerprofessional.de/link/5012570](http://www.springerprofessional.de/link/5012570)

Bettzieche, V.: 100 Jahre technische Entwicklung des Talsperrenbaus in Deutschland. In: WasserWirtschaft, Ausgabe 01-02/2010. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2010.  
[www.springerprofessional.de/link/5012198](http://www.springerprofessional.de/link/5012198)

 Springer Vieweg

## Ausführliche und umfassende Übersicht über alle Speichertechnologien



Sterner, M., Stadler, I. (Hrsg.)  
**Energiespeicher**  
Bedarf, Technologien, Integration  
2. korrigierte Auflage  
750 S., 513 Abb. Mit Online-Extras. Brosch.  
€ (D) 69,99 | € (A) 71,95 | \*sFr 74.00  
ISBN 978-3-662-48892-8  
€ 54,99 | \*sFr 59.00  
ISBN 978-3-662-48893-5 (eBook)

- Vergleich der Speichersysteme
- 4farbiges attraktives Layout

€ (D) sind gebundene Ladenpreise in Deutschland und enthalten 7 % MwSt. € (A) sind gebundene Ladenpreise in Österreich und enthalten 10 % MwSt. Die mit \* gekennzeichneten Preise sind unverbindliche Preisempfehlungen und enthalten die landesübliche MwSt. Preisänderungen und Irrtümer vorbehalten.

Jetzt bestellen auf [springer-vieweg.de](http://springer-vieweg.de) oder in Ihrer lokalen Buchhandlung

A26387