



Projekt: Forschungsinitiative „Zukunft Bau“

**Verbreitung und Schadenspotenzial saurer
und sulfatreicher Grundwässer in
Deutschland besonderer Berücksichtigung
des Wiederanstiegs des Grundwassers –**

Teil 1: Sachstandbericht

KURZBERICHT

Auftraggeber: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raum-
forschung (BBSR) im
Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
(BBR)

Projektleiter: Prof.-Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher

Bearbeiter: Dr.-Ing. Björn Siebert

Datum des Berichtes: **30.11.2010**

Seiten (inkl. Deckblatt): **8**

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau
des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: SF – 10.08.18.7-09.28 / II 2 – F20-09-51)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Die Veröffentlichung des vorliegenden Berichtes, auch auszugsweise, bedarf unserer schriftlichen Genehmigung.

1 Ziel der Forschungsaufgabe

In verschiedenen Regionen in Deutschland treten erhöhte Säure- und Sulfatkonzentrationen im Grundwasser auf. Während niedrige pH-Werte ($\text{pH} < 5,5$) einen lösenden Angriff auf Beton ausüben, kann die langzeitliche Einwirkung von Sulfationen ($> 200 \text{ mg/l SO}_4^{2-}$) zu treibenden oder zerstörenden Reaktionen im Beton führen. Lokal liegen betonaggressive Säure- und Sulfatkonzentrationen im Grundwasser oftmals nur temporär vor (z.B. infolge Havarien in der chemischen Industrie), so dass die nur langsam ablaufenden Korrosionsprozesse i.d.R. keine nennenswerten Schädigungen des Bauteils hervorrufen. Großräumig treten erhöhte Säure- und Sulfatkonzentrationen v.a. in Regionen mit eisendisulfidhaltigen Bestandteilen z.B. Pyrit im Boden auf, die bei Sauerstoffzutritt vor allem zu Eisen, Sulfat und Protonen (Säure) oxidiert werden. Ein solcher Sauerstoffzutritt kann großflächig beispielsweise von einer Grundwasserabsenkung in Tagebaugebieten ausgehen. Die Oxidationsprodukte reichern sich über Jahre hinweg größtenteils in den belüfteten Bodenschichten von Absenkungstrichtern an und werden nur teilweise über Sickerwässer ins Grundwasser abtransportiert. Verschärft wird diese Problematik durch die ebenfalls in diesen Regionen vorliegenden Tagebaukippen, in denen eine besonders intensive Oxidation von eisendisulfidhaltigem Abraummateriale und folglich ein massiver Austrag von Säure und Sulfat stattfindet.

Auch wenn diese derzeit betroffenen Regionen in Lage und Abmessung bekannt sind, können bei zukünftigem Wiederanstieg des Grundwassers im Zuge der Einstellung der Sumpfung bei bergbaulichem Betriebsabschluss große Mengen an betonaggressiven Oxidationsprodukten des Eisendisulfids im Boden in dem aufsteigenden Grundwasser mobilisiert und in die weitere Umgebung transportiert werden. Eine Abschätzung und Bewertung der aktuellen und zukünftigen Grundwassersituation in Tagebauregionen und deren Angriffspotenzials für Bauwerke fehlen bislang. Als Grundlage für diese komplexen und sehr umfangreichen Fragestellungen sollten im Rahmen dieses Forschungsprojektes der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ im Auftrag des Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) folgende Ziele mit der Erstellung eines Sachstandberichts verfolgt werden:

- Zusammenstellung verfügbarer Daten über die aktuelle und zukünftige Grundwassersituation in Tagebauregionen, insbesondere hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit bzgl. Säure und Sulfat
- Bewertung der Betonaggressivität von bergbaulich beeinflusstem Grundwasser unter Berücksichtigung bisher in der Praxis aufgetretener Schadensfälle
- Formulierung erster Empfehlungen für wirksame Schutz- bzw. Gegenmaßnahmen bei Betonangriff durch saures und sulfatreiches Grundwasser

2 Durchführung der Forschungsaufgabe

Zur Identifizierung und Bewertung saurer und sulfatreicher Grundwasservorkommen wurden Daten und Informationen von diversen Quellen wie z. B. Landesumweltämtern, Landesdirektionen und Universitäten eingeholt. Die daraus hervorgehende Übersicht sollte derzeit und zukünftig (nach Abschluss bergbaulicher Sumpfungsmaßnahmen) betroffene Regionen sowie die dortigen, aktuellen und zukünftigen Flurabstände und Grundwasserbeschaffenheiten v.a. hinsichtlich Sulfat, pH-Wert und kalklösender Kohlensäure aufzeigen. Die in einer einschlägigen Recherche ermittelte Datenbasis beschränkte sich jedoch i. Allg. lediglich auf Teilaspekte und einzelne Lokalitäten (z. B. aktuelle Säure- und Sulfatkonzentrationen an einzelnen Grundwassermessstellen). Am Beispiel des Lausitzer und Mitteldeutschen sowie des Rheinischen Bergbaureviers wird die Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit in der Umgebung von Tagebauen erläutert, wobei hierzu bislang erst ansatzweise detailliertere Kenntnisse vorliegen. Wichtige Informationen hierzu liefern die jüngst veröffentlichten Dissertationen von GRAUPNER [2] und LENK [3].

Auf Basis charakteristischer Beschaffenheiten bergbaulich belasteter Grundwässer wird deren Betonaggressivität bewertet, wobei wesentliche Einflussfaktoren, wie z.B. Transportbedingungen, Betonzusammensetzung etc., berücksichtigt werden. Nicht zuletzt aufgrund fehlender umfangreicher Kenntnisse über Endgrundwasserstände (nach Abschluss des Grundwasserwiederanstiegs), Strömungsverhältnisse bzw. Orientierung des Stoffaustrags in Verbindung mit der Gründungstiefe vorhandener Bauwerke lässt sich momentan das Schädigungsausmaß infolge des Betonangriffs durch bergbaulich belastete Grundwasser quantitativ nicht genau beschreiben. Die Auswirkungen der durch Eisendisulfidoxidation mineralisierten Wässer auf deren Angriffspotenzial auf Betonbauwerke werden daher anhand aktueller Forschungsergebnisse zum kombinierten Säure-Sulfat-Angriff auf Beton sowie der Ergebnisse aus Untersuchungen an säure- bzw. sulfatgeschädigten Bauwerken abgeleitet. Mit Hilfe bisheriger Kenntnisse über die Schädigungsmechanismen bei Einwirkung saurer und sulfatreicher Wässer auf Beton lässt sich der Korrosionsfortschritt für charakteristische Angriffsszenarien unter Berücksichtigung wesentlicher Randbedingungen jedoch näherungsweise abschätzen. Um dem Angriffspotential durch bergbaulich belasteter Grundwässer auf Bauwerke wirksam zu begegnen, werden Maßnahmen aufgezeigt, mit denen sich der Angriffsgrad des angreifenden Mediums verringern bzw. den Widerstand betroffener Bauwerke erhöhen lässt. Hierzu werden einzelne, in der Praxis bewährte Methoden beispielhaft aufgeführt.

3 Zusammenfassung der Ergebnisse

3.1 Vorkommen saurer und sulfatreicher Grundwässer

Erhöhte Säure- und Sulfatkonzentrationen im Grundwasser treten in Deutschland eher selten auf. Die Ursachen für das Vorkommen erhöhter Säure- und Sulfatkonzentrationen in Grund-

wässern sind vielseitig. Häufig liegen die Gründe in anthropogenen Faktoren. Beispielsweise kann die Einleitung von Industrieabwässern, Havarien in Kraftwerken oder der chemischen Industrie, landwirtschaftlichen Nutzung etc. lokal die chemische Beschaffenheit des Grundwassers verändern. Erhöhte Säure- und Sulfatkonzentrationen, die über einen langen Zeitraum hinweg einen nennenswerten Angriff auf Beton ausüben, gehen von solchen i.d.R. temporären „Punkt“-Quellen allerdings nicht aus. [1]

Bedeutende Auswirkungen anthropogener Einflüsse auf die Grundwasserbeschaffenheit treten vornehmlich in Gebieten auf, in denen Eisendisulfidvorkommen in Verbindung mit initiierten Oxidationsprozessen anzutreffen sind. Die Eisendisulfidoxidation findet großräumig und über einen langen Zeitraum hinweg in erster Linie in Tagebauregionen statt, in denen Braunkohle abgebaut wird. Zum einen können durch die bergbaulich bedingte Grundwasserabsenkung Belüftungs- und damit Oxidationsprozesse in tieferen Bodenschichten initiiert werden. Zum anderen lagert oxidierendes eisendisulfidhaltiges Abraummateriale auf Tagebaukippen und setzt im Laufe der Zeit über Sickerwässer erhebliche Frachten an Schwefelsäure und Eisensulfat ins Grundwasser frei. Liegen in solchen Bereichen gleichzeitig erhöhte Carbonatvorkommen vor, kann die freigesetzte Säure teilweise oder vollständig abgepuffert werden. Während bei teilweiser Pufferung erhöhte Gehalte an Sulfat und kalklösender Kohlensäure auftreten, beschränkt sich die Belastung des Grundwassers bei vollständiger Säurepufferung auf erhöhte Sulfatkonzentrationen.

Mit Wiederanstieg des Grundwassers wird ein Großteil der freigesetzten Säure- und Sulfatfrachten mobilisiert und in die Umgebung ausgetragen. Gleichzeitig verringert sich der Anteil der zeitweise belüfteten und oxidierenden eisendisulfidhaltigen Bodenschichten. Erreicht der wiederansteigende Grundwasserspiegel ein Niveau über dem des vorbergbaulichen Grundwasserstandes, findet i.d.R. keine weitere Säure- und Sulfatfreisetzung mehr statt, so dass von dem Zeitpunkt an auch mit einem Rückgang der Belastung des Grundwassers durch Produkte der Eisendisulfidoxidation zu rechnen ist.

Neben den anthropogenen Ursachen können in seltenen Fällen auch natürliche Quellen ein chemisches Angriffspotenzial für Betonbauwerke auslösen (z.B. gipshaltige Bodenschichten, die vom Grundwasser umströmt werden). Da die Lokalitäten solcher Gipsvorkommen und deren Sulfatfreisetzungspotenzial weitgehend bekannt sind, kann das im Einzelfall vorliegende Angriffspotenzial ausreichend genau abgeschätzt und bei der Bewertung des Betonangriffs berücksichtigt werden.

3.2 Angriffspotential saurer und sulfatreicher Grundwässer in Tagebauregionen

Aufgrund des erheblichen Säure- und Sulfatfreisetzungspotenzials oxidierender eisendisulfidhaltiger Böden in Tagebauregionen ist die daraus resultierende Betonaggressivität des Grundwassers im Einflussbereich solcher Stoffquellen von zentraler Bedeutung für das vorliegende Forschungsprojekt. In einigen Regionen ist bereits ein Stoffaustrag an solchen

Oxidationsprodukten von Eisendisulfid in das Grundwasser der Umgebung von Tagebauen zu beobachten. Erste Prognosemodelle lassen darauf schließen, dass auch in den nächsten Jahrzehnten in solchen Gebieten noch mit einem nicht unerheblichen Stoffaustrag zu rechnen ist, was nicht zuletzt auf den Grundwasserwideranstieg infolge der Einstellung bergbaulicher Sumpfungsmaßnahmen zurückzuführen ist. Die im Grundwasser von Tagebauregionen gelösten Produkte der Sulfidoxidation werden in Richtung der Grundwasserströmung in die Umgebung abtransportiert. Infolgedessen ist in möglicherweise bis dato bergbaulich noch weitgehend unbelasteten Regionen mit einem mehr oder weniger raschen Anstieg der Säure- und Sulfatkonzentration im Grundwasser zu rechnen. Die Versauerung und Sulfatanreicherung im Boden und Grundwasser stellt nur für die Bauwerke ein Angriffspotenzial dar, die sich hinsichtlich ihrer geographischen Lage und Gründungstiefe im Einflussbereich der Stofffahnen befinden.

In Regionen, die zwar im Grundwasser durch bergbaulich verursachte Stoffquellen beeinflusst werden, der Grundwasserspiegel – auch nach Einstellung der bergbaubetrieblichen Sumpfung – allerdings in Tiefen von mehreren Metern unterhalb der Gründungstiefe herkömmlicher Bauwerke (üblicherweise < 3 bis 5 m von Geländeoberkante) liegt, ist für die Mehrheit der vorhandenen Bauwerke nicht von einem nennenswerten Angriffspotenzial auszugehen. In solchen Regionen kann sich lediglich für tief gründende Bauwerke, z.B. Tunneln oder Bauten mit Pfahlgründungen, ein Kontakt mit dem betonaggressiven Grundwasser einstellen.

In Regionen, in denen das betonaggressive Grundwasser nur wenige Zentimeter bis Meter unterhalb der Geländeoberkante ansteht (häufig in der Nähe von Oberflächengewässern oder von Kippengebieten [4]), sind erdberührte Bauteile einem chemischen Angriff ausgesetzt. In diesen Regionen sind unterkellerte Bauwerke i.Allg. zwar mit einschlägigen Schutzmaßnahmen, z.B. gegen drückendes Wasser, versehen, doch sind diese i.d.R. nicht für einen dauerhaften Schutz gegenüber einem chemischen Angriff des Grundwassers ausgelegt.

Ein besonders hohes Gefährdungspotenzial liegt für Bauwerke vor, unter denen der Grundwasserspiegel infolge von Sumpfungsmaßnahmen der benachbarten Tagebaugebiete über mehrere Jahre oder Jahrzehnte in größere Tiefen „künstlich“ abgesenkt war. Gegebenenfalls kann sich hier zukünftig bei Einstellung der Sumpfung ein flurnaher Grundwasserstand ergeben. Bei der Festlegung der Endgrundwasserstände bzw. der Endwasserstände in Tagebauseen werden die vorbergbaulichen Grundwasserstände zwar berücksichtigt und i. Allg. unterschritten. Allerdings sind mittlerweile einige Bauwerke im Bereich von ehemaligen Grundwasserabsenkungstrichtern bekannt, die während der Zeit der bergbaubetrieblichen Grundwasserabsenkung ohne Berücksichtigung eines zukünftigen Grundwasserwideranstiegs bzw. ohne weitere Schutzmaßnahmen gebaut wurden und mittlerweile infolge Wiederanstieg des Grundwassers an erdberührten Bauteilen durchfeuchtet sind [4]. Neben Vernässungsproblemen im Bereich Kellern oder unterirdischen Versorgungseinrichtungen

kann sich für die betroffenen Bauwerke ein chemischer Angriff durch betonaggressives Grundwasser ergeben, der die Dauerhaftigkeit des Bauwerkes gefährden kann.

3.3 Maßnahmen für betroffene Bauwerke

Um die Aggressivität des Grundwassers abzuschwächen und den chemischen Angriffsgrad auf Bauwerke zu minimieren, werden in der Fachwelt seit Jahren verschiedene Methoden diskutiert und z.T. auch eingesetzt. Während einige Maßnahmen bereits bei der Verringerung der Oxidationsrate von Eisendisulfid auf Tagebaukippen ansetzen, fokussieren andere Maßnahmen auf die Verringerung der bereits freigesetzten Säure- und Sulfatfrachten. Daneben können u.U. auch Maßnahmen zielführend sein, die lokal betonaggressives Grundwasser von betroffenen Bauwerken fernhalten (z.B. durch großflächige Grundwasserabsenkung).

Kann die Einwirkung von aggressivem Grundwasser nicht verhindert werden, so lässt sich zumindest das Angriffspotenzial durch Abschirmung eines Bauwerks gegenüber einer Grundwasserströmung mit Hilfe von Spundwänden oder Schlitzwänden vermindern. Bei Neubauwerken in Gebieten mit saurem und sulfatreichem Grundwasser sind grundsätzlich Gründungen in grundwasserleitenden Bodenschichten (z.B. Bohrpfähle) - soweit möglich - zu vermeiden. Stattdessen sind Flachgründungen wie z.B. Bodenplatten vorzuziehen, um einen Angriff von aggressivem Grundwasser auf Beton von vorneherein zu verringern bzw. gänzlich zu vermeiden.

Neben Maßnahmen, die das Angriffspotenzial der Umgebung verringern, stehen darüber hinaus auch Mittel zur Verfügung um den Bauteilwiderstand gegenüber einem chemischen Angriff zu erhöhen. Mit Hilfe vorliegender betontechnologischer Kenntnisse lässt sich ein Beton durch besondere Anforderungen an die Ausgangsstoffe und Zusammensetzung mit einem hohen Widerstand gegenüber chemisch angreifenden Medien aus Böden und Wässern konzipieren. Solche Maßnahmen sind sicherlich in erster Linie für Neubauwerke realisierbar und für bestehende Bauwerke nur bei lokalen Ausbesserungen oder Verstärkungen von Bauteilen relevant. In der Praxis wird derzeit die Entwicklung solcher Hochleistungsbetone für den Einsatz in betonaggressiver Umgebung intensiv vorangetrieben.

Unter stark aggressiven Bedingungen reichen rein betontechnologische Maßnahmen für einen dauerhaften Schutz eines Bauwerks bzw. Bauteils nicht mehr aus bzw. können bei bestehenden Bauwerken nicht zweckmäßig eingesetzt werden. In solchen Fällen können konstruktive Maßnahmen (z.B. Abdichtungen, Opferbeton, Schleierinjektion) technische und wirtschaftliche Vorteile bieten.

3.4 Offene Fragen

Im Rahmen des vorliegenden Sachstandsberichts wurden erstmals die bergbaulichen Folgen auf die Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit in Verbindung mit dem daraus resultierenden Angriffspotenzial auf Bauwerke näher behandelt. Insgesamt ließ sich bei der Recher-

che der notwendigen Informationen i.Allg. auch ein wenig ausgeprägtes Bewusstsein in der Fachwelt und in der Öffentlichkeit für diese Problemstellung feststellen. Diese Beobachtung resultiert vermutlich in erster Linie aus der bislang geringen Anzahl der dokumentierten Bauwerksschäden, die durch einen kombinierten Säure-Sulfat-Angriff verursacht wurden. Die Gründe für das bis dato geringe Schädigungsausmaß liegen zum einen in dem noch frühen Stadium des erst allmählich beginnenden Austrags von Säure und Sulfat aus Tagebauen. Wie erste Prognosen vermuten lassen, wird sich dieser allerdings in den nächsten Jahrzehnten weiter intensivieren. Zum anderen erstrecken sich die Schädigungsprozesse an angegriffenen Bauteilen über Zeiträume von mehreren Jahren/Jahrzehnten. Wahrgenommen werden die Schädigungen i.d.R. erst zu einem späten Zeitpunkt, wenn diese bereits weit fortgeschritten sind, zumal sie an wasser- oder erdberührten und damit unzugänglichen Bauteilen auftreten.

Das weitgehend fehlende Bewusstsein über die Problemstellung des vorliegenden Forschungsprojektes wurde ebenfalls anhand der noch vorhandenen Kenntnislücken offenbar, die in erster Linie hydrologische/hydrochemische Aspekte betreffen und für die weitere Abschätzung des Angriffspotenzials saurer und sulfatreicher Grundwasser auf Bauwerke unabdingbar sind.

Dazu zählen im Wesentlichen die langzeitliche Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit (Zeitraum etwa 100 Jahre) bezüglich Sulfat, pH-Wert und kalklösender Kohlensäure in der Umgebung von Tagebauen. Eine zuverlässige Prognose muss den Stoffaustrag aus Tagebaukippen sowie die weitreichenden Folgen des Grundwasserwiederanstiegs berücksichtigen. Zu letzterem zählen in erster Linie die freigesetzten und mobilisierten Frachten im Bereich von ehemaligen Grundwasserabsenkungstrichtern und die mit dem Grundwasserwiederanstieg veränderlichen Strömungsverhältnisse bzw. Richtungen des Stoffaustrags. Für das mitteldeutsche Braunkohlerevier liegen vergleichbare Prognosen bis dato nicht vor. Ebenso existieren noch keine Prognosen zur Entwicklung des pH-Wertes im Grundwasser oder zum Stoffaustrag der Oxidationsprodukte von Eisendisulfid in Bereichen der Absenkungstrichter.

Um schließlich mit Kenntnis über die Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit das Ausmaß der potenziell von einem chemischen Betonangriff betroffenen Bausubstanz abschätzen zu können, sind Angaben zu aktuellen und zukünftigen Flurabständen bzw. Grundwasserständen mit Daten über die Gründungstiefen der Bauwerke in betroffenen Regionen zu verschneiden. Hierbei sind u.U. bereits in Einzelfällen getroffene Schutzmaßnahmen zu berücksichtigen.

Ziel muss es sein, das zu erwartende Schädigungsausmaß an betroffenen Betonbauwerken realitätsnah abschätzen zu können und zielsichere Schutzmaßnahmen für Neubauwerke und bestehende Bauwerke zu entwickeln. Dazu sind vertiefte Kenntnisse zu Schädigungsmechanismen infolge eines kombinierten Säure-Sulfat-Angriffs erforderlich. Erste Ansätze liefern jüngste Untersuchungen von SIEBERT [5].

Auf Basis der nur lückenhaft verfügbaren Informationen über die realen Grundwasser-Verhältnisse waren im Rahmen dieses Berichts nur qualitative Aussagen zum Angriffspotenzial bergbaulich beeinflusster Grundwässer auf Betonbauwerke möglich (z.B. unter Annahme charakteristischer Angriffsszenarien). Quantitative Aussagen über das tatsächlich zu erwartende Schädigungspotenzial dieser Grundwässer erfordern die Erarbeitung der o.g. offenen Fragestellungen. Erst mit Hilfe dieser erweiterten Informationsgrundlage lassen sich Kosten und Risiken etwaiger Sanierungsmaßnahmen für hochmineralisiertes Grundwasser sowie das ggf. verbleibende Angriffspotenzial für Bauwerke realistisch abschätzen. Anhand der Ausführungen im Sachstandbericht wird allerdings deutlich, dass zukünftig mit einer erhöhten Säure-Sulfat-Belastung der Grundwässer in der Umgebung von (ehemaligen) Tagebauen zu rechnen ist und mit einem Grundwasserwiederanstieg auch das Gefährdungspotenzial für Bauwerke in betroffenen Regionen steigt. Im Hinblick auf die bereits vielerorts erkennbare Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit liegt ein dringlicher Forschungsbedarf zu dieser Problematik vor.

4 Literatur

- [1] Bellmann, F.; Erfurt, W.; Stark, J.: Gefährdungspotential der betonschädigenden Thaumazitbildung. Schriftenreihe des F.A. Finger-Instituts für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, 2010.
- [2] Graupner, B.J.: Beitrag zur Prognose der Grundwasserbeschaffenheit im Lausitzer Bergbaurevier auf der Grundlage eines großräumigen prozessorientierten Geoinformationssystems. Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 2008.
- [3] Lenk, S.: Grundwasserbeschaffenheit und hydrogeochemische Prozesse in Rheinischen Braunkohlen-Abraumkippen und in deren Abstrom. Dissertation, Lehrstuhl Angewandte Geologie, Ruhr-Universität Bochum, 2008.
- [4] Richter, D.: Untersuchungen zu der Grundwasser-Beschaffenheitssituation in den Kippengebieten der ehemaligen Braunkohletagebaue Nordwestsachsens mit dem Schwerpunkt auf diffusen Stoffeinträgen an Eisen, Sulfat und Säure. Facharbeit, Karl-Heine-Schule, Leipzig, 2007.
- [5] Siebert, B.: Betonkorrosion infolge kombinierten Säure-Sulfat-Angriffs bei Oxidation von Eisendisulfiden im Baugrund. Dissertation, Lehrstuhl für Baustofftechnik, Ruhr-Universität Bochum, 2009.