

Erfahrungen der Stadtwerke Wiesbaden AG mit einem neuartigen Hochleistungsverfahren zur Trinkwasserentsäuerung

Monika Drews und Andreas Dülberg

Wasserversorgung, Wasseraufbereitung, Entsäuerung, Belüftung, Mischwasser

Ein Teil des Wiesbadener Trinkwassers wird aus vier Tiefstollen im Taunus gewonnen, die Ende des vorletzten Jahrhunderts gebaut worden sind. Das weiche Wasser ist von einwandfreier Qualität und muss vor der Verteilung lediglich entsäuert werden. Die Aufbereitung erfolgt physikalisch mit einer Entsäuerungsanlage nach dem Kreuzstromprinzip. Aufgrund des extrem feinblasigen Luftertrags über keramische Belüftungselemente werden mit vergleichsweise geringem Energieaufwand Kohlensäuregehalte im Reinwasser von unter 2 mg/l ($\text{KB } 8,2 \leq 0,05 \text{ mol/m}^3$) erreicht. Die Anpassung der Entsäuerungsleistung an wechselnde Wasserdurchsätze zwischen 50 und 500 m³/h erfolgt automatisch durch Variation der Luftfördermengen.

Part of Wiesbaden's water is supplied from four deep galleries that were built at the end of the 19th century in the Taunus mountains. The soft water is of excellent quality and requires only deacidification before it is distributed. The removal of Carbon dioxide is achieved with a stripping system, which operates according to the Cross-Flow principle: air is injected into a water basin through glass-ceramic elements to form extremely fine bubbles. The CO₂-concentration in the pure water is reduced to less than 2 mg/l with comparatively small energy requirements. The adjustment of the deacidification performance to changing water through-puts of between 50 and 500 m³/h takes place automatically via variation of the air deliveries.

1. Die Wiesbadener Wasserversorgung

In der hessischen Landeshauptstadt Wiesbaden müssen rund 240 000 Einwohner mit Trinkwasser versorgt werden. Die gesamte Wasserabgabe in das Versorgungsnetz lag im Jahr 1998 bei 16,3 Mio. m³. 40 % dieses Wassers liefert eine Fernversorgung aus dem Hessischen Ried, einem südlich von Darmstadt, zwischen Rhein und Bergstraße gelegenen grundwasserreichen Gebiet, 30 % das Wasserwerk in Wiesbaden Schierstein, wo natürlich anstehendes Grundwasser durch aufbereitetes Rheinwasser angereichert wird, das restliche Drittel wird aus den Quarzitzügen des Taunusgebirges gewonnen. Die drei in Wiesbaden zur Verfügung stehenden Wasserarten sind von deutlich unterschiedlicher Zusammensetzung. Die Wässer aus dem Hessischen Ried und aus dem Wasserwerk Schierstein besitzen Gesamthärten zwischen 15° dH und 18° dH und befinden sich im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht, das Schiersteiner Wasser hat außerdem einen relativ hohen Neutralsalzgehalt. Bei den Taunuswässern handelt es sich um weiche Wässer mit einem Überschuss an aggressiver Kohlensäure.

Neben der komplexen Wassergewinnung ist in Wiesbaden auch die Wasserverteilung schwierig. Beträchtliche Höhenunterschiede im Stadtgebiet und die fortschreitende Bebauung in Hanglagen erfordern eine Versorgung über acht verschiedene

Höhenzonen mit insgesamt 27 Wasserbehältern, 23 Pumpwerken und 95 km Förderleitungen. Bedingt durch die schwierige Verteilungssituation ist es nicht möglich, die mit den drei Wassersorten versorgten Gebiete streng zu trennen. Große Teile des Netzes werden vielmehr im jahreszeitlichen Wechsel und durch die täglichen Verbrauchsschwankungen mit Wässern unterschiedlicher Herkunft beliefert. Durch Zuspeisung verschiedener Wässer in einzelne Behälter kommt es zusätzlich zur Mischwasserbildung und dabei zur ungünstigen Veränderung der Korrosionskoeffizienten.

In den letzten Jahren wurde durch verschiedene Maßnahmen versucht, die Korrosion und die ungünstige Beeinflussung der Trinkwasserqualität im Verteilungsnetz zu minimieren. Hierzu zählten neben Rohrnetztrennungen und optimaler Bewirtschaftung der Speicherbehälter auch die konsequente Einstellung des Sättigungs-pH-Wertes bzw. pH 8 in den Taunuswässern durch Entsäuerungsanlagen. An einigen Stellen ist trotzdem eine Dosierung von Inhibitoren notwendig, die seit einigen Jahren erfolgreich mit alkalisierten Silikaten vorgenommen wird, die neben dem Korrosionsschutz gleichzeitig die Restentsäuerung der Wässer übernehmen.

2. Die Wässer der Taunusstollen

Durch die besondere hydrogeologische und topografische Situation Wiesbadens ergaben sich seit Anbeginn der zentralen Trinkwasserversorgung 1870 Probleme mit der ausrei-

Dr. Andreas Dülberg, Aquadosil Wasseraufbereitung GmbH, Grasstraße 11, D-45356 Essen; und Monika Drews, Stadtwerke Wiesbaden AG, Söhnleinstraße 42, D-65201 Wiesbaden-Schierstein.

chenden Versorgung der Bürger mit Trinkwasser. Echtes Grundwasser, wie es in anderen Städten mit Tiefbrunnen erschlossen wird, fehlt in Wiesbaden fast völlig.

Zuerst suchte man Wasser in den Taunushängen, um es der Stadt in freiem Gefälle zuleiten zu können. Zwischen 1864 und 1875 entstanden Sickergalerien und Flachstollen mit einer Gesamtlänge von ca. 7 km, die zum Teil bis heute noch genutzt werden.

Durch systematische Erkundung des Taunusgebirges erkannte der Landesgeologe *Carl Koch* den Wasserreichtum der klüftigen Quarzitmulden und die wasserstauenden Eigenschaften der umgebenden Phyllite. Ende des 19. Jahrhunderts wurde mit dem Bau von 4 Tiefstollen begonnen:

	Baujahr	Länge
Münzbergstollen	1875–1888	2,9 km
Schläferskopfstollen	1896–1910	2,8 km
Kellerskopfstollen	1899–1906	4,3 km
Kreuzstollen	1901–1907	1,5 km

Alle Tiefstollen haben elliptische Profile und sind mit Steigungen zwischen 0,3% und 1% in das Gebirge vorgetrieben. Um das Wasser aufstauen zu können, wurden in der Nähe der Schichtgrenzen zwischen Phyllit und Quarzit sogenannte „Verschlüsse“ eingebaut, gusseiserne Drucktüren, die das Wasser zurückhalten und von denen es über eine Rohrleitung geregelt abgeführt wird. Hierdurch ist eine Bewirtschaftung der gewinnbaren Wassermenge ähnlich einer unterirdischen Talsperre möglich. Im Winter werden die Stollen eingedrosselt, um das Wasser bis zu 100 m im Gebirge aufzustauen. Im Sommer werden einige Stadtgebiete von Wiesbaden mit reinem Stollenwasser versorgt.

3. Die Entsäuerungsanlage am Wasserbehälter Klosterbruch

Die Bewirtschaftung der Tiefstollen hat Auswirkungen auf die Betriebsweise des Wasserbehälters Klosterbruch. Während in den Sommermonaten nur Wasser aus Schläferskopf- und Kellerskopfstollen einfließt, muss in den Wintermonaten Schiersteiner Wasser zugemischt werden (Tab. 1).

Das kohlenstoffhaltige Stollenwasser wird zunächst physikalisch entsäuert, bevor es in eine Mischrinne mit dem Schiersteiner Wasser zusammengeführt wird und in die Wasserkammer abfließt. Zur Vermeidung von Korrosionserscheinungen im weit verzweigten Verteilungsnetz und zur Restentsäuerung wird dem Mischwasser ein alkalischer Korrosionsinhibitor zugesetzt. Die Steuerung der Dosierung erfolgt in Abhängigkeit der Wassermenge und des gemessenen pH-Wertes; der Chemikalienverbrauch ist somit abhängig von der Wirksamkeit der Anlage zur physikalischen Entsäuerung [1].

Die physikalische Entsäuerung erfolgte bis zum Umbau (Sanierung) mit einer Profilblockkolonne. Der Wirkungsgrad der Anlage erreichte bei geringen Durchsätzen (Winterbetrieb) 90%, im Sommerbetrieb dagegen nur etwa 70%.

Tabelle 1. Wasserdaten WB Klosterbruch.

	Stollenwasser	WW Schierstein
Fördermenge m ³ /h	50 – 550	0 – 300
pH (T [°C])	6,20 (10)	7,50 (10)
pH _C	7,82	7,50
K _{S 4,3} mol/m ³	0,61	3,43
K _{B 8,2} mol/m ³	0,86	0,27
CO ₂ mg/l	38	12
Calcium mg/l	9,6	87,6
Magnesium mg/l	4,4	12,3
Chlorid mg/l	11,0	140,2
Nitrat mg/l	4,7	9,0
Sulfat mg/l	4,7	66,2

Entsprechend lagen die Restkohlenstoffgehalte zwischen 4 und 8 mg/l. Bis zum Jahr 1991 bestand keine Möglichkeit zur Restentsäuerung. Als Korrosionsschutz wurden 2–3 mg/l Monophosphat dosiert. Im Jahr 1992 wurde die Inhibierung auf die Dosierung eines alkalisierten Silikates umgestellt, das gleichzeitig zur Restentsäuerung genutzt werden konnte.

Durch die starken Schwankungen in den Beaufschlagungsmengen bestand bei der vorhandenen Profilblockkolonne aufgrund der großen benetzten Oberflächen bei niedrigem Durchsatz die Gefahr von mikrobiologischen Beeinträchtigungen. Im Jahr 1995 wurde mit den Planungen für den Bau einer neuen Entsäuerungsanlage begonnen.

Folgende Anforderungen wurden an die neue Anlage gestellt:

- möglichst hohe Entsäuerungsleistung, damit sich der nachfolgende Chemikalieneinsatz an den Bedarf für einen wirksamen Korrosionsschutz orientieren kann und nicht mehr überwiegend der „Restentsäuerung“ dient
- stufenlose Anpassung an Wassermengen zwischen 50 und 550 m³/h
- Einbau in das vorhandene Gebäude, so dass das Wasser im freien Gefälle aus den Stollen über die Anlage in die Wasserkammer abfließt
- möglichst wartungsfreier Betrieb
- Aufrechterhaltung der Versorgung während der Bauphase.

Nach intensivem Variantenvergleich fiel die Entscheidung auf das Aquadosil®-System [2].

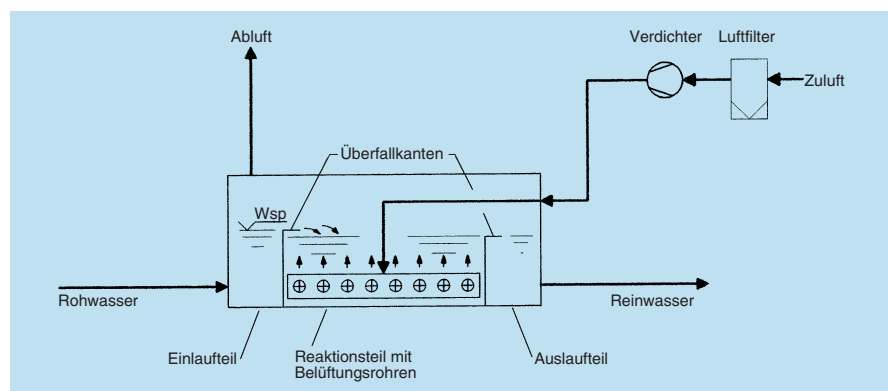


Bild 1. Verfahrensablauf des Aquadosil®-Systems; der Lufteintrag erfolgt im Kreuzstrom zum Wasserfluss über feinporige Keramikelemente.

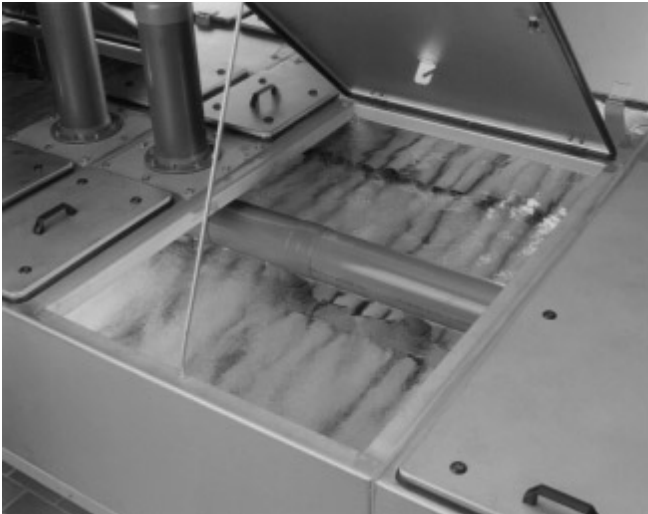


Bild 2. Belüftungselemente der Aquadosil®-Anlage.

Tabelle 2. Anlagenkennndaten.

Wasserdurchsatz:	50 bis 550 m ³ /h	
Entsäuerungsleistung:		
Kohlensäure-Austrag:	von 40 mg/l auf	< 2 mg/l
pH-Anhebung:	von 6,2 auf	> 7,5
Behälterabmessungen		
Länge:	7 800 mm;	
Breite:	3 350 mm,	
Höhe:	600 mm,	
Luftförderung		
4 Seitenkanalverdichter	à 1200 m ³ /h=	4800 m ³ /h
Kraftbedarf:	4 x 5,5 kW =	22 kW
Nennleistung:	4 x 11 kW =	44 kW

Dieses System wird in der Systematik der physikalischen Entsäuerungsanlagen den Kreuzstromverfahren zugeordnet; ein horizontaler Wasserstrom wird in vertikaler Richtung mit Luft beaufschlagt (s. Bild 1). Aufgrund des extrem feinblasigen Luftpneintrags über keramische Belüftungselemente werden mit diesem Verfahren hohe Entsäuerungsleistungen bei vergleichsweise geringem Energiebedarf erzielt.

Bei der mechanischen Entfernung von Gasen aus Wasser ist die Geschwindigkeit des Stoffaustausches durch die Diffusion der Teilchen durch die Grenzschicht Wasser/Luft limitiert [3]. Da die Geschwindigkeit der Diffusion selbst nicht beeinflussbar ist, wird bei allen Systemen eine große Austauschfläche zwischen Wasser und Luft angestrebt. So erzeugt z. B. der Riesler durch Tropfenbildung des Wassers und Einbau von Kontaktkörpern große Wasseroberflächen. Bei der Aquadosil®-Anlage führt der feinblasige Luftpnein-

trag (Blasendurchmesser etwa 0,3 mm) zu einer großen Luftoberfläche [4].

Der Austauschprozess bei diesem System kann mathematisch beschrieben werden als Kombination aus Diffusion und Konvektion [5]. Der Stoffaustausch findet statt, wenn die Blase klein ist und die Keramik gerade verlässt. Die aufsteigenden und sich zusammenballenden Blasen sorgen für intensive „Rührung“ des Wasser/Luft Gemisches, so dass jedes Volumenelement des Wassers mit den feinen Blasen in Kontakt gebracht wird (s. Bild 2).

Mit dem Aquadosil® System werden Kohlensäuregehalte von 2 mg/l sicher erreicht. Der Anwendungsbereich der physikalischen Entsäuerung ist damit in Richtung weicher Wässer verschoben: bis zu einer Säurekapazität des Wassers von etwa 1,9 mmol/l wird damit der Gleichgewichts pH-Wert eingestellt, bei Säurekapazitäten von bis zu etwa 1,6 mmol/l wird ein pH-Wert von 8,0 erreicht. In dem Entwurf zur neuen TrinkwV, die voraussichtlich im Herbst diesen Jahres verabschiedet wird, ist als Parameter für die Beurteilung der Aggressivität eines Wassers die Calcitlösekapazität vorgesehen. Unabhängig vom pH-Wert gilt ein Wasser danach als nicht aggressiv, wenn die Calcitlösekapazität kleiner ist als 5 mg/l. Auf dieser Grundlage lassen sich mit dem Aquadosil® System Wässer bis zu einer Säurekapazität von 0,6 mmol/l ausreichend entsäuern.

Folgende Eigenschaften waren für die Wahl des Systems ausschlaggebend:

- vergleichsweise geringe Energiekosten (geringer hydraulischer Druckverlust, geringer Energiebedarf für die Luftförderung)
- flache Bauweise

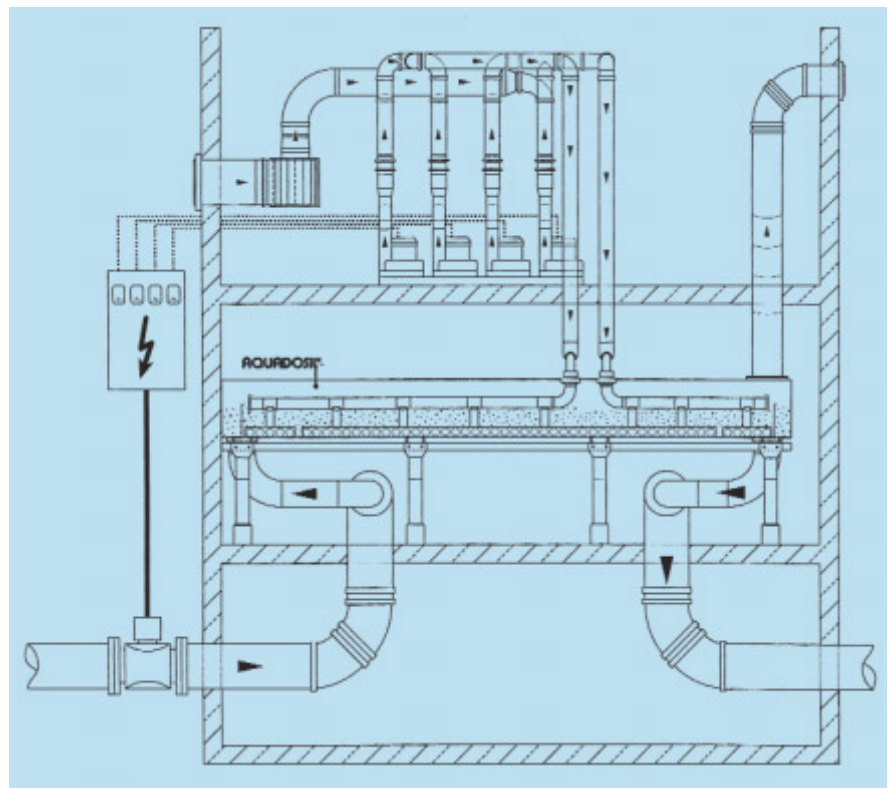


Bild 3. Schematischer Aufbau der Entsäuerungsanlage im Wasserbehälter Klosterbruch.

-
- minimierter Eintrag von Schadstoffen über den Luftweg (im Vergleich zu Anlagen mit Lochböden benötigt das Aquadosil®-System bei hohen Entsäuerungsleistungen nur etwa 10% der Luftfördermenge)
 - durch die kleine benetzte Oberfläche während der Stillstandszeiten besteht ein geringes Potential bzgl. mikrobiologischer Verunreinigungen
 - einfache Anpassung der Entsäuerungsleistung durch Variation der Luftfördermenge.

Die Anlage wurde im Raum der ehemaligen Profilblockkolonne installiert. Nach Einbau einer Zwischendecke wurden die vier Luftfördereinheiten und die Luftaufbereitung platzsparend oberhalb der Entsäuerungsanlage installiert (s. *Bild 3*). Da der Wasserbehälter Klosterbruch innerhalb eines Naturschutzgebietes mit regem Ausflugsverkehr liegt, mussten die Geräuschemissionen so gering wie möglich gehalten werden. Die Seitenkanalverdichter wurden mit einer gemeinsamen Schalldämmhaube ausgerüstet, in den Ansaugstrom wurde ein Kulissenschalldämpfer integriert.

Die Anlagenkenndaten sind in *Tab. 2* zusammengefasst.

Der gesamte Behälter wurde in 6 Segmenten gefertigt, somit konnte die komplette Anlage durch eine Tür (1 x 2 m) eingebracht und am Aufstellungsort geflanscht werden. Die Edelstahloberflächen aller Anlagenteile werden durch Tauchbeizung und Passivierung vorbehandelt. Bei der Montage waren keine Schweißarbeiten mehr notwendig.

Aufgrund der jahreszeitlich stark unterschiedlichen Nutzung des Stollenwassers wurde die Steuerung so ausgelegt, dass bei einem Durchsatz zwischen 50 und 550 m³/h die Entsäuerungsleistung (und damit der pH-Wert im Reinwasser) automatisch konstant gehalten wird.

Die speicherprogrammierte Steuerung verarbeitet die Signale des Wassermengenmessers und steuert 4 Seitenkanalverdichter an. Die Luftförderleistung wird durch Staffelschaltung und Drehzahlregelung der Seitenkanalverdichter stufenlos den wechselnden Anforderungen angepasst. Zur gleichmäßigen Auslastung der Aggregate wechselt die Rangfolge täglich.

Bei der Inbetriebnahme der Anlage wurden die Einschaltpunkte und die spezifische Luftmenge ($Q_{\text{Luft}}/Q_{\text{Wasser}}$) so eingestellt, dass über den gesamten Durchsatzbereich der CO_2 -Gehalt im Reinwasser unter 2 mg/l liegt.

Die installierte pH-Sonde misst kontinuierlich den pH-Wert im Reinwasser; die Messwerte werden, wie die Angaben über den Betriebszustand der Anlage, über die Fernwirkanlage in die Leitzentrale übertragen. Da die Qualität des Rohwassers relativ konstant ist, wird über die mengenabhängige Anpassung der Luftfördermenge der Soll pH-Wert im Reinwasser sehr genau eingehalten (s. Bild 4).

Bei der Inbetriebnahme wurden die Kohlensäuregehalte und die pH-Werte vor Ort bestimmt. Neben der Festlegung der notwendigen spezifischen Luftförderleistung und der Einschaltpunkte der Seitenkanalverdichter wurde auch bei unterschiedlichen Lastfällen der Verlauf der Entsäuerungsleistung über der Reaktionsstrecke gemessen. An verschiedenen Stellen der Anlage wurden dazu Proben entnommen und deren CO_2 -Gehalt bestimmt.

Das Bild 5 zeigt die Abnahme der CO_2 Konzentration mit dem für den Gasaustausch typischen exponentiellen Verlauf [6]. Je geringer der Konzentrationsgradient zwischen Luft und Wasser, desto geringer die Austauschrate. Der Kohlensäuregehalt im Wasser nähert sich asymptotisch dem theoretischen Endwert von 0,7 mg/l (CO_2 -Gehalt im Wasser im thermodynamischen Gleichgewicht mit der Luft bei 10°C).

Durch den feinblasigen Luftertrag hat die Abklingkurve einen sehr steilen Verlauf; bereits bei 30% der Reaktionsstrecke sind etwa 70% der Kohlensäure ausgestrippt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Wert für den CO_2 -Gehalt im Reinwasser von 2 mg/l sicher erreicht wird.

4. Zusammenfassung

Mit der Anlage zur physikalischen Entsäuerung nach dem Kreuzstromprinzip ist ein System gefunden worden, das sich optimal in das vorhandene Gebäude integrieren ließ. Mit vergleichsweise geringem Energieaufwand werden bei automatischer Anpassung an wechselnde Durchsatzmengen hohe Entsäuerungsleistungen erreicht.

Der pH-Wert im Reinwasser ist stabil, und das zur Korrosionsinhibierung eingesetzte Dosiermittel konnte auf ein weniger alkalisiertes Produkt umgestellt werden. Aufgrund der positiven Betriebserfahrungen wurde eine ähnliche Problemstellung in einem weiteren Wasserwerk in Wiesbaden ebenfalls mit dem Aquadosil®-System gelöst.

Literatur

- [1] Drews, M.; Hahl, H. P. und Wehle, V.: Restentsäuerung des Trinkwasser durch Dosierung alkalischer Mittel am Beispiel der Stadtwerke Wiesbaden AG. gwf-Wasser/Abwasser 136 (1995) Nr. 7, S. 360–366.
- [2] Warenzeichen der Fa. Aquadosil GmbH, Essen.
- [3] Schlünder, E.-U.: Einführung in die Stoffübertragung. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York, 1. Aufl. 1984.
- [4] Bröder, T.: Eine neue Entsäuerungsanlage im Wasserwerk Winterberg. Neue Deliwa – Zeitschrift 11 (1991).
- [5] Albin, G. W. and Holdren, G. C.: Removal of organics from water in an aeration basin – a mathematical model. Water Res. 19 (1985) Nr. 3, S. 363.
- [6] Bächle, A.: Gasaustausch. DVGW-Schriftenreihe Nr. 206. zfgw-Verlag, Frankfurt, 3. Aufl. 1987.

(Manuskripteingang: 26.1.2000)

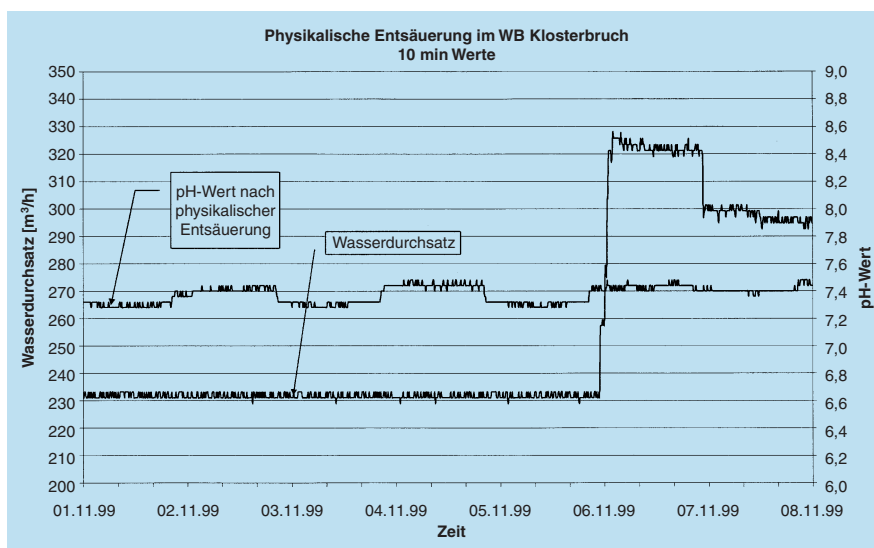


Bild 4. Verlauf von Wasserdurchsatz und pH-Wert im Wasserbehälter Klosterbruch.

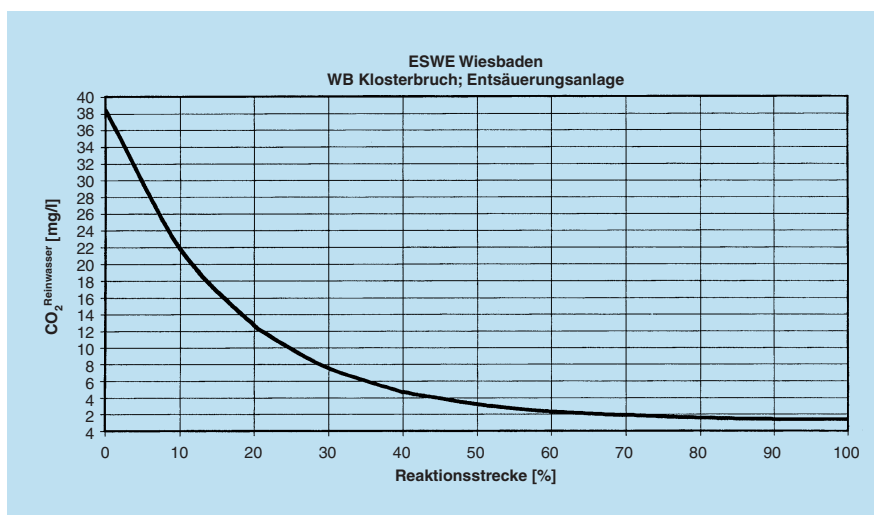


Bild 5. Abnahme des CO_2 -Gehaltes.