

**WASSERBAU  
UND  
WASSERWIRTSCHAFT**



Oskar v. Miller-  
Institut  
in Obernach



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
MÜNCHEN

---

**Betrieb, Unterhalt  
und Modernisierung von Wasserbauten**

Beiträge zum Symposium vom 29. bis 31.  
Oktober 1992 in Garmisch-Partenkirchen

---

Berichte der Versuchsanstalt Obernach und des Lehrstuhls für Wasserbau  
und Wassermengenwirtschaft der Technischen Universität München.  
herausgegeben von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Theodor Strobl

---

**Nr. 73**

**1992**

## EINFLUSS DER STAUREGELUNG AUF GRUNDWASSER

M. Joppen, Wildegg / P. Sulser, Baden / P. Blaser, Villnachern / A. Kohler, Baden

### 1 Problemstellung

Der Einfluss von Flusskraftwerken und deren Betrieb auf das Grundwasser resp. auf das Zusammenspiel zwischen Oberflächen- und Grundwasser ist von zentraler Bedeutung für die Projektierung von Neu- und Umbauten solcher Wasserkraftwerke.

Bei einem Neueinstau eines Flusses ist damit zu rechnen, dass durch die Verringerung der Fließgeschwindigkeit eine erhöhte Geschiebe- und Schwebstoffablagerung erfolgt. Dieser Vorgang, der die Kolmation der Flussole stark beeinflusst, hat zusammen mit der Änderung der Potentialdifferenzen zwischen Fluss- und Grundwasser Auswirkungen auf das Zusammenspiel zwischen Oberflächen- und Grundwasser.

Nicht nur beim Neubau von Flusskraftwerken, sondern auch beim Ausbau und der Erweiterung von bestehenden Anlagen, ergeben sich aufgrund der Auswirkungen auf das Zusammenspiel zwischen Oberflächen- und Grundwasser wichtige Randbedingungen für die Projektierung. Ebenso wie die Ausgestaltung einer Stauanlage (Stauziel, Stauffläche) hat auch deren Betrieb (Spülregime, Absenkungsvorschriften bei Hochwasser und Stauraumpülungen) einen grossen Einfluss auf das Wechselspiel zwischen Oberflächen- und Grundwasser.

Im folgenden sind Erkenntnisse zu dieser Problematik zusammengefasst, die im Rahmen zweier Umweltstudien der Holinger AG in Baden erarbeitet wurden /1/ /2/.

### 2 Rolle der Kolmation

Unter Kolmation versteht man die Verdichtung eines porösen Mediums (der Flussole) durch die Ablagerung von Wasserinhaltsstoffen auf dessen Oberfläche bzw. durch den hydrodynamischen Transport dieser Stoffe in das Innere des Mediums /1/.

Wie aus obiger Definition der Kolmation hervorgeht und Beobachtungen bestätigen, lässt sich die Kolmation in eine innere und eine äussere Kolmationsschicht unterteilen. Die äussere Kolmation besteht aus der Ablagerung feiner Schwebstoffe auf der Flussole, wo sie eine wenig durchlässige Schicht bildet. Die innere Kolmation entsteht, wenn sich feine Schwebstoffe zusammen mit dem Flussinfiltrat in die Flussole verlagern und sich dort im groben Korngerüst des Flussbettes ablagern. Ein wichtiger Aspekt dieser Unterscheidung liegt darin, dass die innere Kolmation wesentlich stabiler ist als die äussere. So wird bei einem Hochwasser oder einer Stauraumpülung die äussere Kolmation wesentlich früher weggespült als die innere, bei der schon ein Aufbruch der Sohle stattfinden muss, damit sie angegriffen wird. \*

Durch einen Flusseinstau erhöht sich der hydraulische Gradient zwischen Oberflächen- und Grundwasser, was zu einer verstärkten Grundwasserbildung führt. Diese grösseren

Infiltrationsraten zusammen mit der erhöhten Sedimentation im Stauraum haben eine verstärkte Kolmation der Flussole zur Folge, was wiederum zu einer massiven Reduktion der Infiltrationen in den Grundwasserleiter führt. Dieses zeitlich und örtlich sehr variable Zusammenspiel hat zentrale Bedeutung bei der Festlegung flankierender Massnahmen zur Steuerung des Grundwasserhaushaltes, wie die Absenkung von bestehenden Drainagen oder Kanälen, den Bau von zusätzlichen Sickerleitungen oder das Anbringen von Dichtungswänden zur Reduktion der Infiltrationen.

Neben dieser mechanischen Kolmation können auch die biologische und die chemophysikalische Kolmation eine bedeutende Rolle spielen. Die biologischen Kolmationsvorgänge sind stark vom Eutrophierungsgrad des Gewässers abhängig. Bei nährstoffreichen Gewässern kann es zur Bildung eines hydraulisch und biologisch sehr aktiven Biofilms kommen. Dementsprechend ist bei der Projektierung und dem Betrieb von Stauanlagen auch die Qualität des Infiltrates von ausschlaggebender Bedeutung.

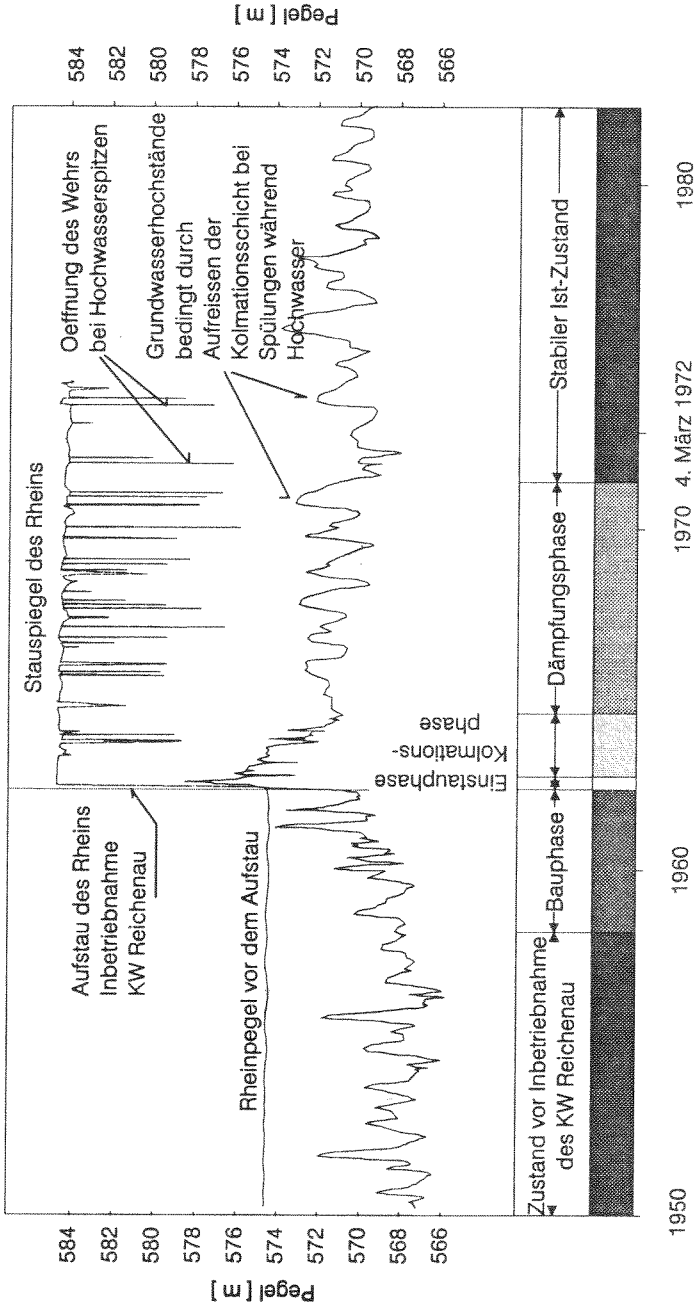
### 3 Fallstudie Rhein bei bestehendem Wehr KW Reichenau

Der Einfluss einer Stauhaltung auf das Grundwasser wurde am Beispiel des Kraftwerkes Reichenau näher untersucht. Das Kraftwerk Reichenau nutzt das Gefälle des Alpenrheins zwischen dem Zusammenfluss von Vorder- und Hinterrhein und Ems und hat die Leistung von 18 MW (Ausbauwassermenge 120 m<sup>3</sup>/s, nutzbares Gefälle 18 m, Stauraumfläche 0.17 km<sup>2</sup>, Stauraumvolumen 0.86 Mio. m<sup>3</sup>, Stauraumabsenkungen bei Abflüssen über 400 m<sup>3</sup>/s).

Abbildung 1 /4/ dokumentiert die Veränderung des Zusammenspiels zwischen Oberflächen- und Grundwasser während und nach der Inbetriebnahme des Kraftwerkes. Vor dem Einstau schwankte der Grundwasserspiegel im Wehrbereich zwischen 566 und 571 m ü.M. (Jahresmittel 568 m ü.M.). Damit lag der Grundwasserspiegel 3 - 4 m tiefer als der Rhein, welcher das Grundwasser perkolatativ alimentierte. Mit dem Einstau des neu erstellten Wehres erhöhte sich die Infiltration drastisch. Der Grundwasserspiegel stieg im Frühjahr 1962 innert Monatsfrist um 10 m auf 578 m ü.M. an. Mit zunehmender Kolmation der durch den Aufstau benetzten Fläche und des ursprünglichen Flussbettes senkte sich der Grundwasserspiegel innerhalb zweier Jahre um ca. 7 m (Kolmationsphase). Nach den ersten zwei Betriebsjahren senkte sich der Grundwasserspiegel während weiteren 8 Jahren noch weiter um ca. 1 m (Dämpfungsphase). Der stabile Ist-Zustand stellte sich erst etwa 10 Jahre nach dem Aufstau ein. Heute liegt der Grundwasserspiegel etwa 2 m höher als vor der Inbetriebnahme des Wehres. Die Infiltrationen im gesamten Stauraum wurden anhand eines Grundwassermodelles auf 870 l/s abgeschätzt, was einer Infiltrationsrate von  $5.3 \cdot 10^{-6}$  m/s entspricht /5/.

Schwankungen des Grundwasserstandes sind im heutigen Zustand stark beeinflusst von Stauraumpülungen und den entsprechenden Entkolmationen. Bei einer beobachteten Stauraumabsenkung während des Hochwassers von 607 m<sup>3</sup>/s am 6. Juni 1990 wurde die Kolmationsschicht wohl angerissen aber bei weitem nicht vollständig entfernt. Das Anreisen der Kolmation führte sofort zu Grundwasserstandsanstiegen. Weitergehende Beobachtungen dieses Hochwassers lassen noch folgende Schlussfolgerungen zu. Das Hochwasser führte zur Mobilisierung von Schlammdepots im Stauraum und während einiger Stunden zu nachweisbar erhöhten Gewässerbelastungen. Vor allem nimmt durch

Abb. 1: Ganglinien des Grundwasserspiegels und des Rheinpegels vor, während und nach Inbetriebnahme des Rheinkraftwerkes Reichenau.



eine solche Stauraumpülung resp. während eines solchen Hochwassers die Belastung mit partikulären und organischen Fraktionen zu. Bis zur Rückbildung der Kolmation im Stauraum ist während 3 - 4 Monaten nach einem Hochwasser mit erhöhten Infiltrationen des Flusswassers ins Grundwasser zu rechnen. Allerdings wird dadurch die Grundwasserqualität nicht beeinträchtigt, denn das Oberflächenwasser ist nur für einige Stunden während eines Hochwassers erhöht belastet. Die übrige Zeit der 3 - 4monatigen Periode erhöhter Infiltration weist das Flusswasser wieder normale, für das Grundwasser unbedenkliche Qualität auf.

#### 4 Fallstudie Aare bei bestehendem Wehr KW Ruppoldingen

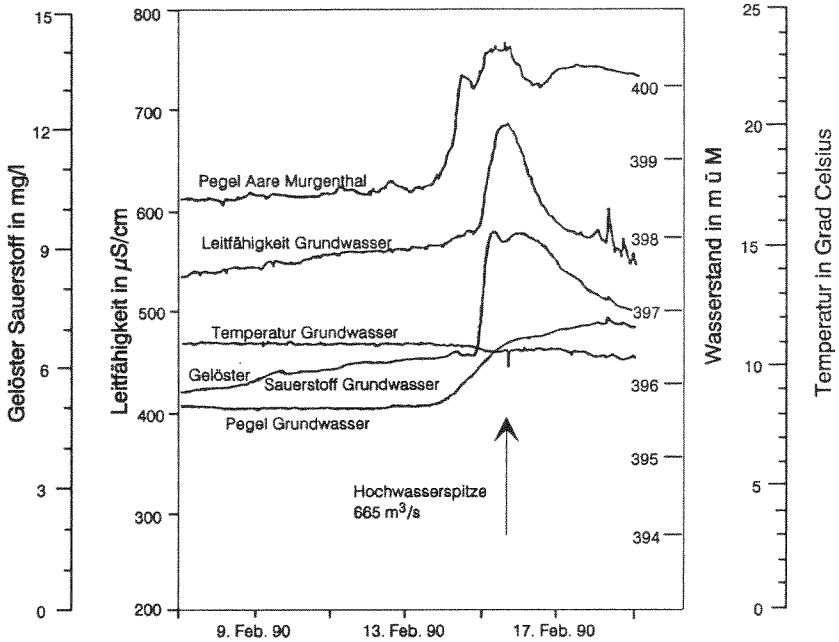
Das Flusskraftwerk Ruppoldingen (Baujahr 1896) an der Aare oberhalb Olten hat eine Leistung von 6 MW (Ausbauwassermenge 210 m<sup>3</sup>/s, nutzbares Gefälle 4 m, Stauraumfläche 0.41 - 0.47 km<sup>2</sup>, Stauraumvolumen 1.15 - 1.32 Mio. m<sup>3</sup>, bei Hochwasser keine Stauraumabsenkungen). Grundwasseruntersuchungen im angrenzenden für Trinkwasser genutzten Grundwasservorkommen Rothrist dokumentieren, dass die Aare im unteren Bereich des Stauraumes über ca. 3 km als Infiltrant wirkt (ca. 80 l/s). Im Unterwasser exfiltriert der Grundwasserleiter ca. 150 l/s in die Aare. Bei aarenahen Piezometern wurden Grundwasserschwankungen ( $\pm 1$  m) festgestellt, die direkt korrelierbar sind mit dem Aarepegel.

Die Aare ist ein mit organischen Inhaltsstoffen deutlich belastetes Gewässer (Jahresmittel DOC 2.9 mg/l). Beim Durchtritt des Aarewassers durch die Kolmationsschicht finden sauerstoffzehrende Abbauvorgänge statt, die sich in einer zeitweisen Sauerstoffarmut des Infiltrates äussern (Juni bis Oktober  $< 0.5$  mg O<sub>2</sub>/l). Der Jahresgang zeigt, dass bei tieferen Temperaturen während des Winters die Mikroorganismen in der Kolmationsschicht weniger aktiv sind.

Die Wasserversorgung von Rothrist ist durch die zeitweise Sauerstoffarmut im Infiltrat nicht beeinträchtigt (Jahresmittel  $> 7.0 \pm 1.0$  mg O<sub>2</sub>/l, DOC  $0.9 \pm 0.2$  mg/l), da der Infiltrationsanteil bei der Grundwasserfassung weniger als 40 % ausmacht und eine deutliche Wiederanreicherung von Sauerstoff auf dem Transportweg ( $> 1$  km) stattfindet.

Grosse Hochwasserereignisse wirken sich kurzfristig auf die Quantität und Qualität des Infiltrates aus, wie Abbildung 2 bei dem zweijährlichen Hochwasserabfluss von 665 m<sup>3</sup>/s dokumentiert. Der rapide Pegelanstieg der Aare von ca. 2 m führte zum Überströmen der Kolmationsschicht und damit zu einer Zunahme der Infiltrationsraten. Während 5 Tagen stieg der Grundwasserpegel um ca. 1.2 m. Der gelöste Sauerstoff erfuhr ca. 30 Stunden nach dem Einsetzen des Aarehochwassers einen Anstieg um 3 mg/l auf 9 mg/l. Die Spitzenwerte fielen innerhalb von 2 Tagen auf 7 mg/l. Ähnliches wurde bei der Leitfähigkeit festgestellt. Der kurzfristige, pulsartige Anstieg der Leitfähigkeit im Infiltrat wird durch die Aktivierung von Depots im ungesättigtem Saum oberhalb des Niederwasserspiegels verursacht.

Abb. 2: Einfluss des Aarehochwassers vom 13. Februar 1990 auf angrenzenden Grundwasserleiter Rothrist



## 5 Fallstudie Rhein für geplanten Kraftwerksbau

Auf der 27 km langen Rheinstrecke zwischen Trübbach-Balzers und Sennwald-Ruggell sind fünf Laufkraftwerke geplant. Die Gesamtleistung der geplanten Kraftwerke beträgt 93 MW (Ausbauwassermenge 250 m<sup>3</sup>/s, nutzbares Gefälle 44,5 m, Stauraumfläche 2,82 km<sup>2</sup>, Stauraumvolumen 14,6 Mio. m<sup>3</sup>).

Der Wasserhaushalt des Rheintales in der Projektstrecke zeichnet sich durch einen direkten Kontakt zwischen Oberflächen- und Grundwasser aus, bei dem von Ort zu Ort und saisonal unterschiedlich Wasseraustausch in beiden Richtungen stattfindet.

Der Einfluss der durch das Vorhaben veränderten Wasserspiegellagen des Rheins auf den Grundwasserhaushalt wurde qualitativ mit einem ebenen, vertikal integrierten Grundwassermodell untersucht. Dazu wurden stationäre Zustände behandelt, wobei die instationären Infiltrationsverhältnisse während der Einstauphase als quasi-stationär betrachtet und mit lokalen zweidimensionalen Vertikalmodellen näher untersucht wurden.

Erkenntnisse aus den Beobachtungen am KW Reichenau, aus hydraulischen Modellversuchen der VAW (Kolmationsmodell) und aus Modellrechnungen der Rheinpegelstände wurden für die Formulierung von Prognose Szenarien verwendet.

Für die Betrachtung der Durchlässigkeiten der Rheinsohle können drei Zeiträume unterschieden werden. Als kurzfristig gilt der Zustand während der Bauphase und beim Ersteinstau, bis sich eine erste Kolmationsschicht gebildet hat. Mittelfristig ist die daran anschliessende weitere Kolmationsentwicklung zu nennen. Als langfristig kann die Entwicklung der Kolmation im Zusammenhang mit dem Geschiebetransport und den damit zusammenhängenden Ab- und Umlagerungen von grobem Bettmaterial betrachtet werden. In Abbildung 3 sind die zu den einzelnen Entwicklungsstufen der Kolmation angenommenen Durchlässigkeiten der Flussohle aufgeführt. Bei der Festlegung der Durchlässigkeiten unterschied man zwischen Staukopf, Stauraum und Stauwurzel. Ebenso sind auch die vermuteten Durchlässigkeiten nach Hochwasser und Stauraumspülungen bei den verschiedenen Entwicklungsstufen der Kolmation angegeben.

Die in Modellversuchen gemessenen Durchlässigkeiten zusammen mit den Beobachtungen am KW Reichenau führten zur Festlegung von drei Modellierungsszenarien. Abbildung 4 zeigt in Form einer Ideenskizze auf, wie der komplexe Vorgang der Kolmation einer Staustufe mittels stationärer Modellierungen erfasst wurde.

Die Abbildungen 3 und 4 zeigen deutlich auf, dass die zeitlich und örtlich sehr variable Kolmationsentwicklung durch die Bildung von Szenarien und einer anschliessenden Interpretation der Resultate Aufschlüsse über die Projektauswirkungen geben.

Aufgrund der Modellierungen konnte unter anderem festgestellt werden, dass bei einem sofortigen Einstau der Staustufen kurzfristig mit sehr hohen Infiltrationsraten und entsprechend grossen Grundwasseranstiegen gerechnet werden muss. Da diese Grundwasseranstiege nur mit einem massiven Ausbau des Drainagesystemes, dem Kanalsystem und lokalen Grundwasserabsenkungen beherrscht werden könnte, wurde ein schrittweiser Einstau vorgeschlagen. Darin werden vier Einstauschritte zu einmal 4 m und dreimal 2 m während zweier Jahre vorgeschlagen. Die Untersuchungen zeigten deutlich die Wichtigkeit auf, dass sowohl für den Ersteinstau als auch für den Betrieb einer Staustufe ein Konzept erarbeitet werden muss, welches zusammen mit einem integralen Grundwasserüberwachungsnetz die wasserwirtschaftlich optimale Steuerung der Stauhaltungen ermöglicht.

Abb. 3: Erwartete Durchlässigkeiten der Rheinsohle, k-Werte nach Darcy bezüglich einer 80 cm dicken Schicht der Flusssohle in m/s

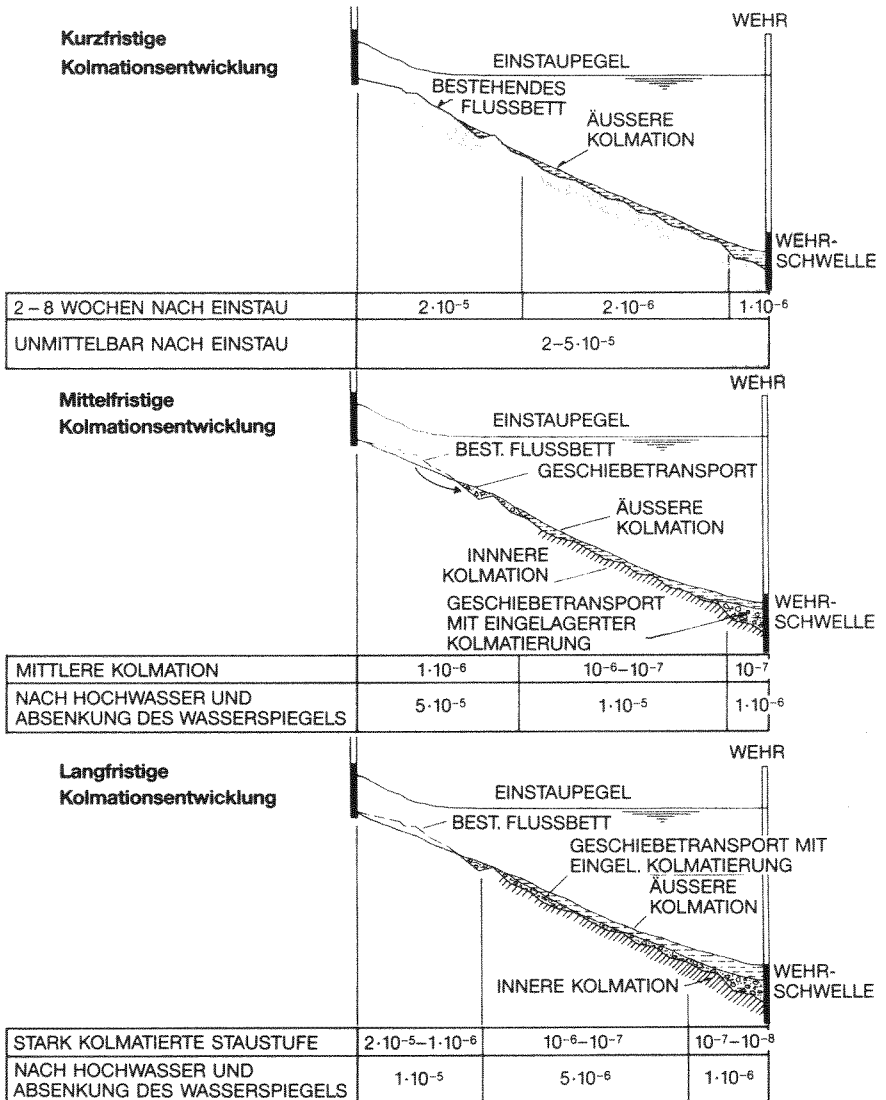
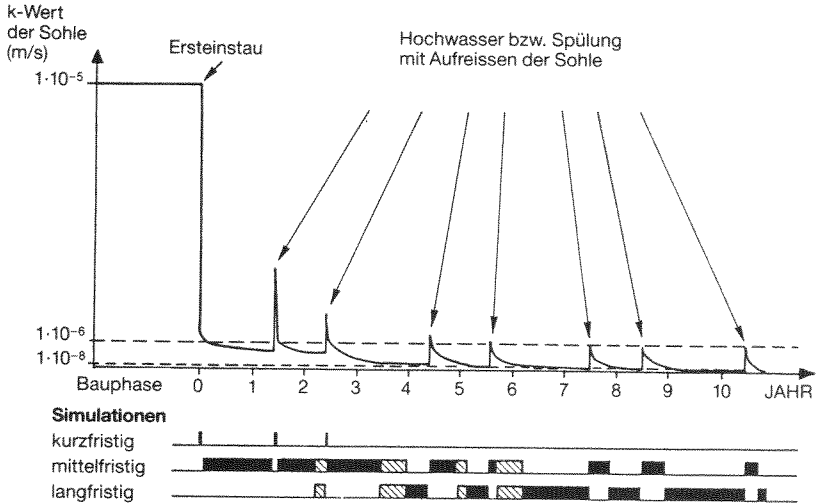




Abb. 4: Ideenskizze der Rheinsohlendurchlässigkeit einer Staustufe (bei Inbetriebnahme der Staustufe im Jahre 0)

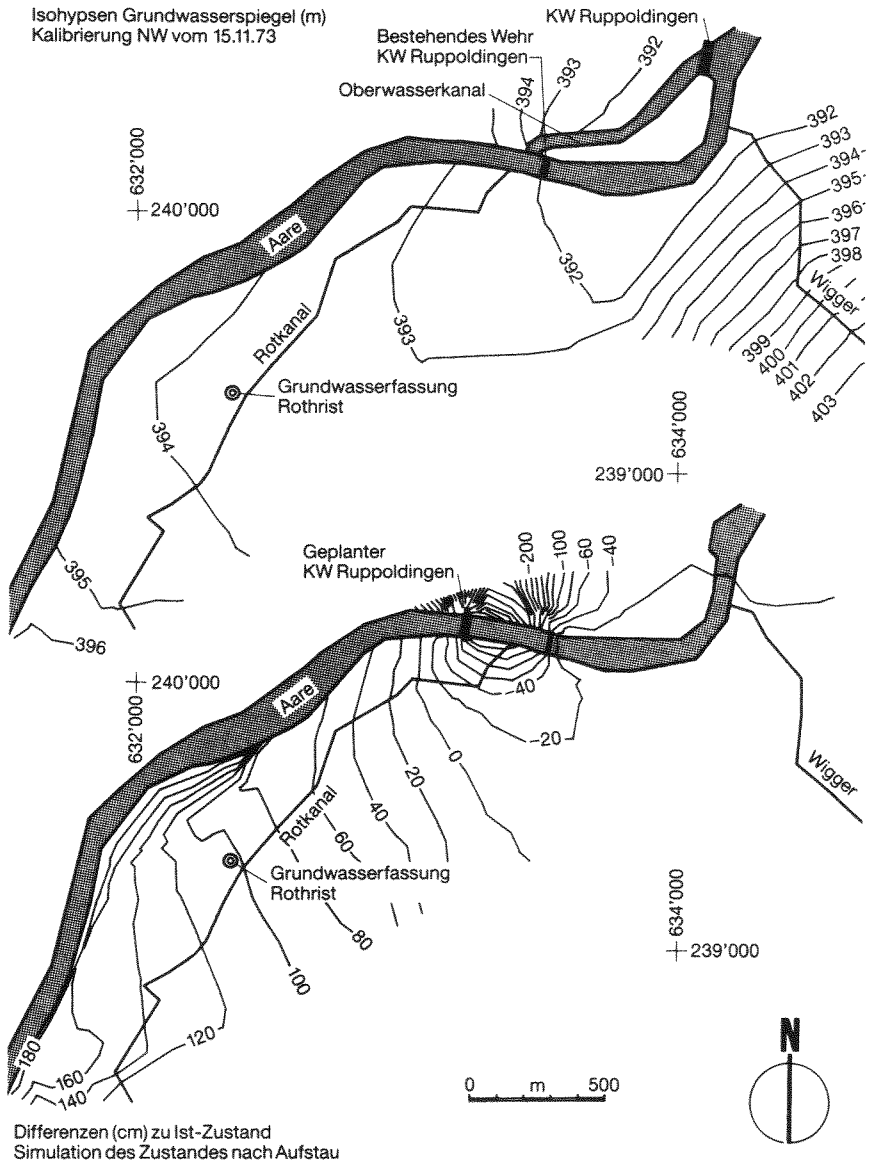


## 6 Fallstudie Aare für geplanten Neubau KW Ruppoldingen

Das Projekt Neubau KW Ruppoldingen sieht eine Stauwehrverschiebung um 300 m flussaufwärts vor. Die Ausbauwassermenge wird von jetzt  $210 \text{ m}^3/\text{s}$  auf  $450 \text{ m}^3/\text{s}$  und das Stauziel um rund 2 m erhöht, was zu einer Anhebung der Leistung auf 19.5 MW führt (Jahresproduktion 115 Mio. kWh, nutzbares Gefälle 5.5 m, Stauraumfläche  $0.77 - 0.81 \text{ km}^2$ , Stauraumvolumen  $3.07 - 3.23 \text{ Mio. m}^3$ ).

Die quantitativen und qualitativen Auswirkungen auf das Grundwasser im angrenzenden Grundwasservorkommen bei Rothrist und die Grundwasserfassung wurden durch ein Grundwassermodell untersucht und prognostiziert. Abbildung 5 a zeigt die Isohypsen des kalibrierten Grundwassermodells für den Niederwasserstand (das Modell wurde anhand eines Mittelwasserstandes validiert). Es wurde ein horizontal-ebenes Grundwassermodell (354 Flächenelemente, 341 Modellknoten) verwendet. Die Kolmationsschicht wurde durch einen Streifen (ca. 20 m) mit geringer Durchlässigkeit entlang der Aare berücksichtigt. Die Durchlässigkeit dieser fiktiven Grenzschicht entlang der Aare wurde durch den Kalibriervorgang ermittelt.

Abb. 5: Isohypsen für kalibriertes Grundwassermodell Rothrist (a) und prognostizierte Grundwasserspiegeländerungen nach dem Höherstau (b)



Für die Simulation des Grundwassers im Zustand nach dem geplanten Höherstau wurde die Durchlässigkeit der Kolmationsschicht variiert und die geplanten Staukoten als Fixpotentiale vorgegeben. Dabei wurden verschiedene Szenarien (langfristig, kurzfristig) simuliert unter der Annahme, dass sich die für den Basisfall im bestehenden Zustand ermittelte Durchlässigkeit der Kolmationsschicht durch das Vorhaben nicht wesentlich ändert (Tabelle 1). Dabei wurde festgestellt, dass bei Zunahme der Durchlässigkeit eine Abnahme der Infiltrationsmenge erfolgt. Dies ist auf die Abnahme der Potentialdifferenz zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser bei ansteigendem Grundwasserspiegel zurückzuführen.

Beschreibung	Zustand	Durchlässigkeit k (m/s)	Infiltration (l/s)
Basisfall Validierung Mittelwasser vom 30.03.90	Ausgangszustand	$2 \cdot 10^{-4}$	9
Kolmation "stark"	Projektzustand "langfristig"	$1 \cdot 10^{-4}$	28
Basisfall Simulation Mittelwasser		$2 \cdot 10^{-4}$	28
Kolmation "schwach"	Projektzustand "kurzfristig"	$4 \cdot 10^{-4}$	26

Tab. 1: Langfristige und kurzfristige Prognose der Infiltrationsmengen im westlichen Teil des Grundwasservorkommens Rothrist nach dem geplanten Höherstau

Das Resultat der Simulierung nach dem geplanten Höherstau ist in Figur 5 b dargestellt. Ein maximaler Grundwasseranstieg von 1.8 m im westlichen Teil des Vorkommens ist ersichtlich.

Der Infiltrationsanteil am geförderten Grundwasser bei der Fassung Rothrist wird gemäss der Simulation auf 70 % ansteigen, was zu einem erwarteten Jahresmittel des Sauerstoffgehaltes von  $5.5 \pm 1.0$  mg/l führt (DOC  $1.1 \pm 0.2$  mg/l). Diese Prognose gilt unter der Annahme, dass sich die bestehende Kolmationsschicht in ihrem Aufbau nicht wesentlich ändert und dass sich die Anreicherungsprozesse ähnlich verhalten.

Das Beispiel Neubau KW Ruppoldingen zeigt, dass das Instrument der Grundwassermodellierung gezielt für die Auswirkungen eines geplanten Höherstaus auf das Grundwasser eingesetzt werden kann. Die aus dem Grundwassermodell abgeleitete Grundwasserbilanzierung und Resultate von Datenerhebungen der Grundwasserqualität im Ist-Zustand erlauben zusätzlich Aussagen über Auswirkungen auf die Grundwasserqualität.

## 7 Schlussfolgerungen

- Jeder Kraftwerksneubau/-umbau muss als Einzelfall getrennt betrachtet werden.
- Das Wechselspiel Oberflächenwasser/Grundwasser muss sowohl für die Projektierung als auch für den Bau/Betrieb betrachtet werden.
- Für den Betrieb ist ein integrales Spül-/Überwachungskonzept auszuarbeiten.
- Die Grundwassermodellierung, unterstützt durch Felddaten und Laborversuche, stellt ein wirksames Instrument zur Projektierungshilfe dar.

- /1/ Holinger AG (1991): Umweltverträglichkeitsbericht Rheinkraftwerke Schweiz-Liechtenstein
- /2/ Holinger AG (1991): Umweltverträglichkeitsbericht Neubau KW Ruppoldingen
- /3/ Beyer W. und Banscher E. (1975): Zur Kolmation der Gewässerbetten bei der Uferfiltratgewinnung. Zeitschrift für angewandte Geologie, Heft 12/75
- /4/ Jäckli H. Dr. AG (1984): Die Kolmation des Rheinbettes in der Stauhaltung Reichenau und ihre Auswirkung auf das Grundwasser Domat/Ems GR
- /5/ Büchi & Müller AG (1981): Erarbeitung eines Modelles zur Simulation und Bilanzierung der Grundwasserströmung im Bündnerischen Rheintal; Geologische und hydrogeologische Verhältnisse zwischen Bonaduz und Fläsch