Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 87 (1995)
Heft: 1-2

Artikel: Die Rheinkraftwerke Schweiz-Liechtenstein und die Grundwasserfrage
Autor: Kobel, Max
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940394

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 25.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die Rheinkraftwerke Schweiz-Liechtenstein und die Grundwasserfrage

Max Kobel

Der Alpenrhein und das bedeutende Grundwasservorkommen in den Schottern der Talebene stehen in enger Beziehung zueinander. Die Grundwasserfrage, d.h. die Beziehung zwischen den geplanten Rheinkraftwerken und dem Grundwasserverhalten, ist deshalb von massgebender Bedeutung.

Die hydrogeologischen Grundlagen

Übersicht

Die bis einige hundert Meter mächtige Lockergesteinsfüllung des Rheintals besteht zum Grossteil aus feinkörnigen Seeablagerungen. Sie stauen den darüberliegenden Grundwasserleiter, die sandig-kiesigen Schotter. Diese sind von Bad Ragaz bis Balzers rund 70 Meter mächtig und dünnen bis Sennwald/Ruggell infolge des unterschiedlichen Gefälles der Oberfläche der Seeablagerungen und des Talbodens auf etwa 20 m aus. Bis Buchs/Schaan nehmen die Schotter die ganze Talbreite ein und grenzen seitlich an Bachschuttfächer oder direkt an den Fels. Nördlich von Buchs/Schaan bis zur Nordgrenze von Liechtenstein und zum Büchelberg, nördlich Sennwald, sind die Schotter auf die Talmitte beschränkt. Zwischen den Talhängen und den Schottern bestehen auf der Schweizer und der Liechtensteiner Seite ausgedehnte Lehmablagerungen und Torfgebiete (ehemalige Flachseen und Moore). Sie dehnen sich zwischen Buchs und Salez, zwischen Schaan und Bendern sowie nördlich Ruggell randlich auch über die Schotter aus. Zwischen Salez und Sennwald ist die linke Talseite bedeckt von der Trümmermasse eines vorgeschichtlichen Bergsturzes.

Das Projekt

Am Alpenrhein sind auf der 27 Kilometer langen liechtensteinisch-schweizerischen Flussstrecke zwischen Trübbach/Balzers und Sennwald/Ruggell vom Studienkonsortium Rheinkraftwerke Schweiz-Liechtenstein (Liechtensteinische Kraftwerke, Nordostschweizerische Kraftwerke AG, Motor Columbus AG) fünf identische Laufkraftwerke geplant. Jedes Kraftwerk besteht aus einem Stauwehr und einem Maschinenhaus, welche im heutigen korrigierten Rheinbett zwischen den Hochwasser-Schutzdämmen erstellt werden. Das Stauziel liegt einen Meter unter der bestehenden Dammkrone, so dass die Dämme nur unmittelbar vor den Kraftwerken geringfügig erhöht werden müssen, damit das behördlich vorgeschriebene Freibord von 1,50 Metern gewährleistet ist. Die durchschnittliche Fallhöhe pro Stufe beträgt 8,9 Meter. Sie wird von zwei Rohrturbinen mit einer Durchflusskapazität von je 125 m^3/s und einer Leistung von je 9,3 MW genutzt. Die Gesamtleistung aller Staustufen beträgt somit 93 MW. Die mittlere Jahresproduktion beläuft sich auf rund 440 GWh. Dadurch werden die Liechtensteinischen Kraftwerke weitgehend unabhängig von Stromlieferungen der Nordostschweizerischen Kraftwerke, und letztere sind in der Lage, den St. Gallisch-Appenzellischen Kraftwerken den Grossteil der in ihrem Versorgungsgebiet von Sargans bis St. Margrethen benötigten Energie direkt aus der Region zu liefern.

Die Schotter enthalten das Hauptgrundwasservorkommen des Rheintals. Die Durchlässigkeiten betragen $5 \cdot 10^{-4}$ bis $1 \cdot 10^{-2}$ m/s. Sie nehmen einerseits talabwärts – zufolge zunehmenden Sandanteils – und andererseits vertikal von oben nach unten – zufolge zunehmend dichter Lagerung – generell ab. Die Flachsee- und Moorablagerungen der «Rietgebiete» sind schlecht durchlässig und seitliche Stauer des Schottergrundwassers. Wo sie als abdichtender Deckel über den Schottern liegen, ist das Schottergrundwasser gespannt; ebenso dort, wo die allgemein schlecht durchlässige Bergsturztrümmermasse von Sennwald über gut durchlässigen Schottern liegt. In den «Rietgebieten» im Bereich der Bergsturzmasse von Sennwald und in den Schottern bestehen voneinander unabhängige Grundwasserspiegel.

Alimentation und Zirkulation des Schottergrundwassers

Das Schottergrundwasser wird massgebend von Infilrat des Rheins gespeist. Die Speisung erfolgt einerseits durch die Sohlpassage und andererseits seitlich durch die Dämme; letzteres progressiv zunehmend, wenn der Flusspegel bei Hochwasser den kolmatierten unteren Dammbereich übersteigt. Die Passage von Rheinwasser ins Grundwasser geschieht teilweise über eine direkte hydraulische Verbindung teilweise im ungesättigten Porenraum über dem Grundwasserspiegel. Insbesondere die Durchsickerungen im höheren Dammbereich erfolgen weitgehend perkolativ; aber auch die Sohle ist nicht durchgehend hydraulisch mit dem wassergesättigten Porenraum unter dem Grundwas-

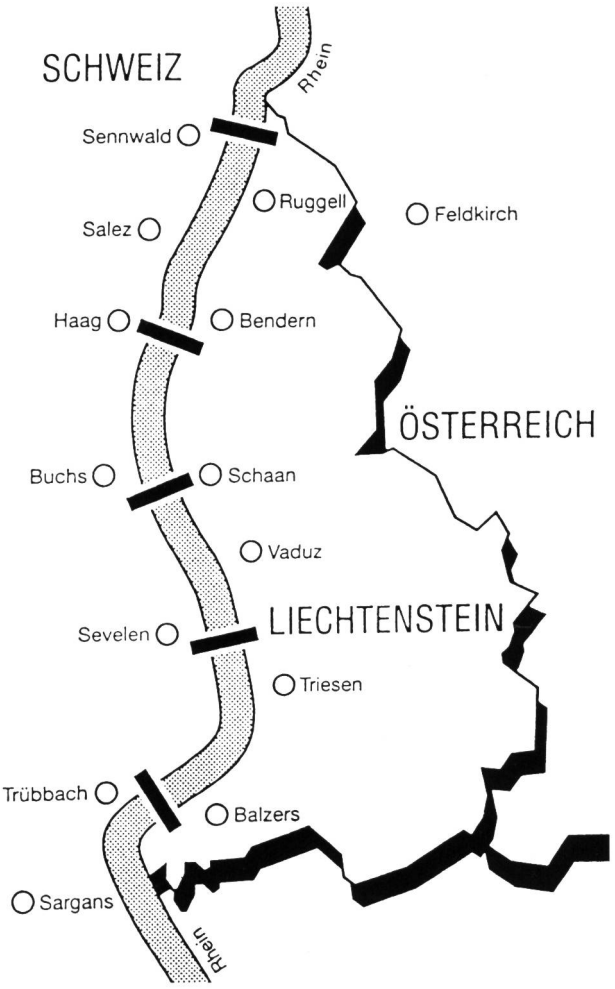


Bild 1. Übersicht über das Projektgebiet (Hauptbericht S. 15, Figur B 5).

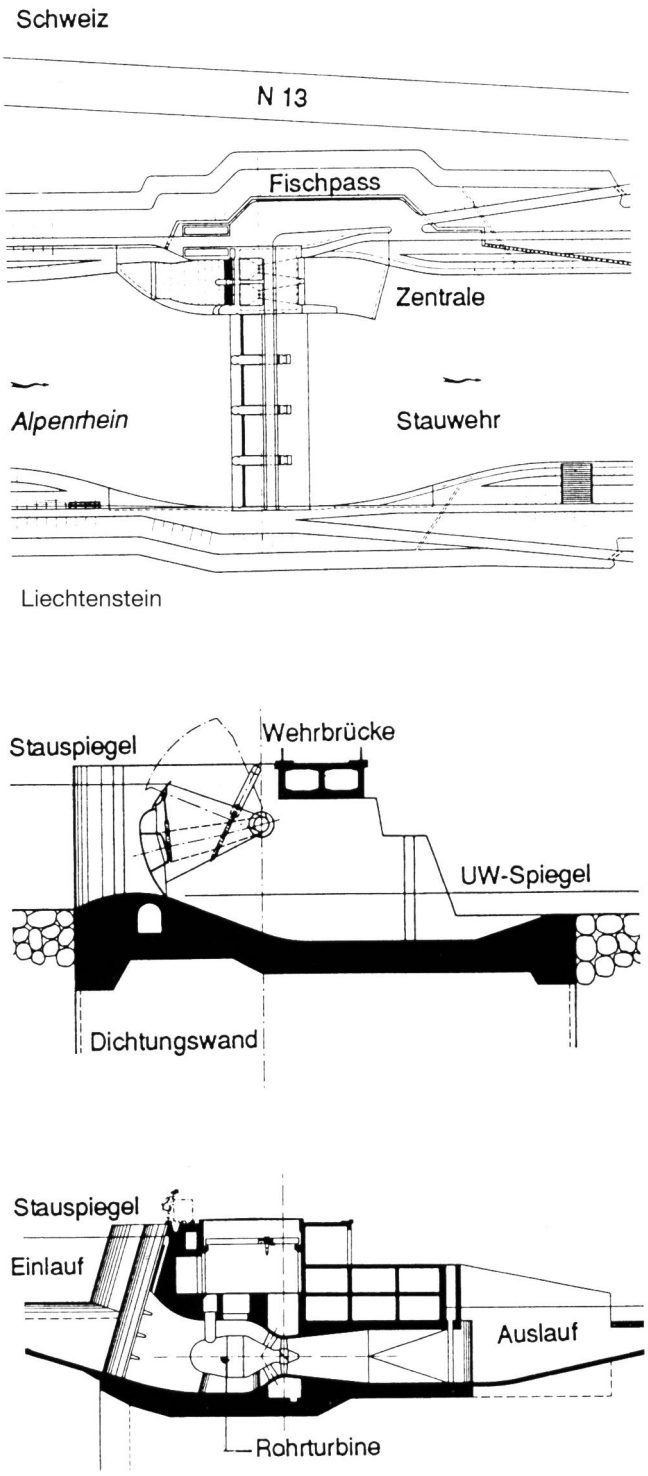


Bild 2. Situation und Schnitte einer Kraftwerkstufe (Verkleinerung Fig. B 8, Hauptbericht S. 22).

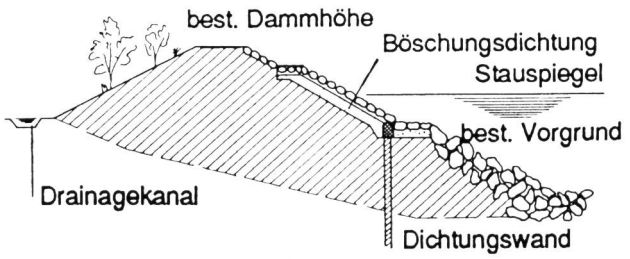


Bild 3. Dammquerschnitt (modifizierte Figur B 11, S. 30, Hauptbericht).

serspiegel verbunden. Auf Kiesbänken im Rheinbett abgetiefte Baggerlöcher bleiben bis deutlich unter dem Pegel der benachbarten Wasserrinne trocken; d.h. der Grundwasserspiegel ist nicht hydraulisch mit dem Rheinpegel verbunden, sondern liegt tiefer, z.T. unter der Flusssohle. Dies ist insbesondere der Fall im Abschnitt Haag/Bendern und oberhalb der Schwellen am Ellhorn und bei Buchs. Diese Sohlschwellen wurden 1971–1973 gebaut zur Stabilisierung der Flusssohle nach Einstellung der Baggerungen im Rheinbett. Mit den Baggerungen wurde – vor allem nach dem Hochwasser vom August 1954 – im Sinne des Hochwasserschutzes eine Kapazitätsvergrösserung des Abflussgerinnes bezweckt. Dies wurde vollumfänglich erreicht, indem heute bei Buchs der Rheinpegel für eine Abflussmenge von 2300 m^3/s (Katastrophenhochwasser vom September 1927) 3,7 m tiefer liegt als 1954. Mit den durch die Baggerungen gewollten, schliesslich aber grösser als geplant eingetretenen Sohlenabsenkungen ist auf der ganzen Projektstrecke der Rheinkraftwerke die für das Schotter-Grundwasservorkommen massgebende Grundwassererneuerung zufolge verminderter Rheininfiltration zurückgegangen und der Grundwasserspiegel im Infiltrationsbereich bis einige Meter abgesunken. Die Abnahme der Rheininfiltration ist auch dadurch bedingt, dass der Rheinpegel heute seltener bis auf die Höhe des über dem kolmatierten Sohlenbereich liegenden, besser durchlässigen Dammbereichs ansteigt.

Infolge der tieferen Lage des Grundwasserspiegels infiltrieren heute streckenweise auch die Binnenkanäle, welche grundsätzlich als Grundwasservorfluter wirken, ins Schottergrundwasser. So z.B. der Werdenberger Binnenkanal, der zwischen Sevelen und Buchs vom Infiltrat-Grundwasserstrom des Rheins hangwärts unterströmt wird. Der Liechtensteiner Binnenkanal wurde zwischen Balzers und Triesen zu hoch angelegt und war deshalb hier schon immer Infiltrant, wobei sich jedoch die Infiltration infolge des abgesunkenen Grundwasserspiegels verstärkt und ausgedehnt hat. Bei Ruggell wurde der Liechtensteiner Binnenkanal gegenüber dem Rhein sukzessive angehoben, um ihn mit einer Stufenmündung ausleiten zu können, welche ein Rückfluten des Rheins ins Binnenland bei Hochwasser verhindert. In diesem Bereich ist der Kanal mit Lehm abgedichtet und wirkt deshalb nicht als Infiltrant.

Grösserer Grundwasserzufluss aus Schuttfächern oder direkt aus dem Fels der Talflanken in die Schotter erfolgt dort, wo die Schuttfächer aus besser durchlässigem Kalkschutt bestehen oder durchlässige, geklüftete und verkarstete Felsformationen vorkommen: an der linken Talflanke zwischen dem Schollberg südlich Trübbach und Buchs/Werdenberg sowie von Sennwald bis zum Büchelberg; an der rechten Talflanke vom Ellhorn bis Balzers, nördlich Vaduz bis Schaan sowie entlang dem Schellenberg südlich Ruggell.

Der Zufluss aus den grossen «Rietgebieten» nördlich Buchs/Schaan ins Schottergrundwasser ist gering. Er hat aber infolge der Absenkung des Grundwasserspiegels in den Schottern zugenommen, vor allem dort, wo von Grundwasser-Pumpwerken in den Schottern beim Pumpbetrieb der Zufluss aus den «Rietgebieten» künstlich verstärkt wird.

Der Anteil der direkten Meteorwasserversickerung an der Grundwasserneubildung in den Schottern ist im Verhältnis zur Rheininfiltration wie auch zum Zufluss von den Talflanken klein.

Die aus der Infiltration des Rheins und der Binnenkanäle sowie aus dem Zufluss vom Talhang (Fels, Schuttfächer) und aus den «Rietgebieten» resultierenden generellen Strö-

mungsrichtungen des Grundwassers sind auf der hydrogeologischen Situationsskizze eingetragen. Sie dürfen nicht grundsätzlich den Fliessrichtungen gleichgesetzt werden, wie sie sich anhand der Lage der Grundwasseroberfläche ergeben. Zufolge der Schichtung der Schotter ist die horizontale Durchlässigkeit grösser als die vertikale Durchlässigkeit. Im Schotter-Grundwasserleiter bestehen deshalb tiefenabhängige, unterschiedliche piezometrische Niveaus, denen auch unterschiedliche Strömungsrichtungen zuzuordnen sind. Generell ergibt sich sowohl vom Rhein wie auch vom Talhang eine Strömung zu dazwischenliegenden «Vorflutrinnen». Diese werden an der Oberfläche in der Regel von einem Binnengewässer repräsentiert, können aber auch aus einer etwa in der Talrichtung verlaufenden Depression der Grundwasseroberfläche, d.h. einer unterirdischen Abflussrinne, bestehen. Bei geringer Infiltration des Rheins kann der Zustrom vom Talhang so stark sein, dass, wie bei Salez/Sennwald, eine «Vorflutrinne» nahe am Rhein besteht oder der Rhein selbst zum Vorfluter wird.

Im Bereich der beiden Sohlschwellen am Ellhorn und bei Buchs findet bei niederem bis mittlerem Rheinpegel ein kleinräumiges Umfliessen statt, indem das oberstrom der Schwelle infiltrierende Rheinwasser unterstom wieder zum Rhein zurückflutet. Nur bei Hochwasser infiltriert der Rhein auch flussabwärts der Schwellen.

Grundwasserqualität

Entsprechend dem allgemein hohen Karbonatanteil der Schotter weist das Grundwasser grundsätzlich eine mit der Verweildauer im Grundwasserleiter zunehmende Härte und einen abnehmenden Sauerstoffgehalt auf. Je höher dagegen der Anteil von Rheininfiltrat ist, um so niedriger ist die Härte und um so höher der Sauerstoffgehalt. Infiltratgrundwasser des Rheins hat Karbonathärten von 12 bis 15 frz.H° und eine Sauerstoffsättigung bis über 80%. Das rheinferne Grundwasser mit langer Verweildauer im Untergrund weist dagegen Karbonathärten bis über 30 frz.H° und eine Sauerstoffsättigung von 20 bis 40% auf. Geringe Härte (15 bis 20 frz.H°) und höhere Sauerstoffsättigung sind im Talrandbereich nur dort vorhanden, wo Schottergrundwasser oder Grundwasser in Schuttfächern direkt vom Zufluss aus verkarstetem Fels gespeist wird.

Die Nitrat-, Chlorid- und Ammoniumgehalte wie auch die Oxidierbarkeit liegen innerhalb der Normalwerte für Grundwasser im Rheintal und deutlich unter den Toleranzwerten gemäss dem Schweizerischen Lebensmittelbuch. In den Gebieten mit intensiver landwirtschaftlicher Nutzung ist im ganzen Rheintal ein langsam steigender Trend nachweisbar. Chlorid-, Nitrat- und Ammoniumgehalt sowie die Oxidierbarkeit des Grundwassers werden von der Landwirtschaft gesteuert und vom Rheininfiltrat, dank seinem geringeren Gehalt an diesen Stoffen, im Sinne einer Verdünnung günstig beeinflusst.

In tiefen Bohrungen lässt sich eine qualitative Schichtung des Grundwassers feststellen, indem in den höheren Schottern allgemein besser oxidierendes Grundwasser angetroffen wird als in tiefliegenden Schotterschichten. Dies gilt auch im rheinnahen Bereich, wo sich der Infiltrationsstrom vor allem auf die oberen 10 bis 15 m unter dem Grundwasserspiegel auswirkt, was sich mit Temperaturprofilen belegen lässt. Die tieferen Grundwasserschichten weisen praktisch keinen Jahresgang der Temperatur mehr auf und haben eine ziemlich konstante Temperatur von 10 bis 11°C. In der vom Rheininfiltrat dominierten, oberen Grundwasserschicht kommen dagegen Temperaturen von 4°C im Winter und bis 13°C im Sommer vor.

Bakteriologisch ist das Grundwasser in der Rheinebene grundsätzlich nicht zu beanstanden. Dies ist einerseits der Schutzwirkung des feinkörnigen Überschwemmungsmaterials, der Kolmatierungsschicht, welche die Schotter überdeckt, zuzuschreiben. Sie wirkt als Belebtschlammfilter. Zudem werden in der Kolmatierungsschicht u.a. auch Schwermetalle zurückgehalten. Andererseits kommt auch den Schottern und Schuttfächern eine gute Filterwirkung zu. Nächst dem Rhein und sogar nur wenige Meter unter der Rheinsohle kann bakteriologisch einwandfreies Grundwasser gewonnen werden.

Die Kolmation des Rheinbettes stellt einen natürlichen Langsam- und Belebtschlammfilter dar, welcher bewirkt, dass das infiltrierende Rheinwasser fast immer chemisch und bakteriologisch einwandfrei ist, d.h. Trinkwasserqualität aufweist. In der Kolmation werden auch Kohlenwasserstoffe, welche bei Mineralölunfällen in den Rhein gelangen können, zurückgehalten und bakteriell abgebaut. Im nur schwach kolmatierten Bereich ist das Schadstoff-Rückhalte- und -Abbauvermögen geringer. Bei Hochwasserabfluss, wenn im heutigen Abflussprofil der höhere, besser durchlässige Teil der Dämme bespült wird und die Infiltration zunimmt, ist die Möglichkeit eines Eintrags von Schadstoffen ins Grundwasser grösser. Dies konnte beim Hochwasserabfluss im Juni 1986 anhand durchgeführter Reihenuntersuchungen von Grundwasserproben auf Kohlenwasserstoffe im Infiltrationsbereich des Rheins nachgewiesen werden.

Grundwassernutzung

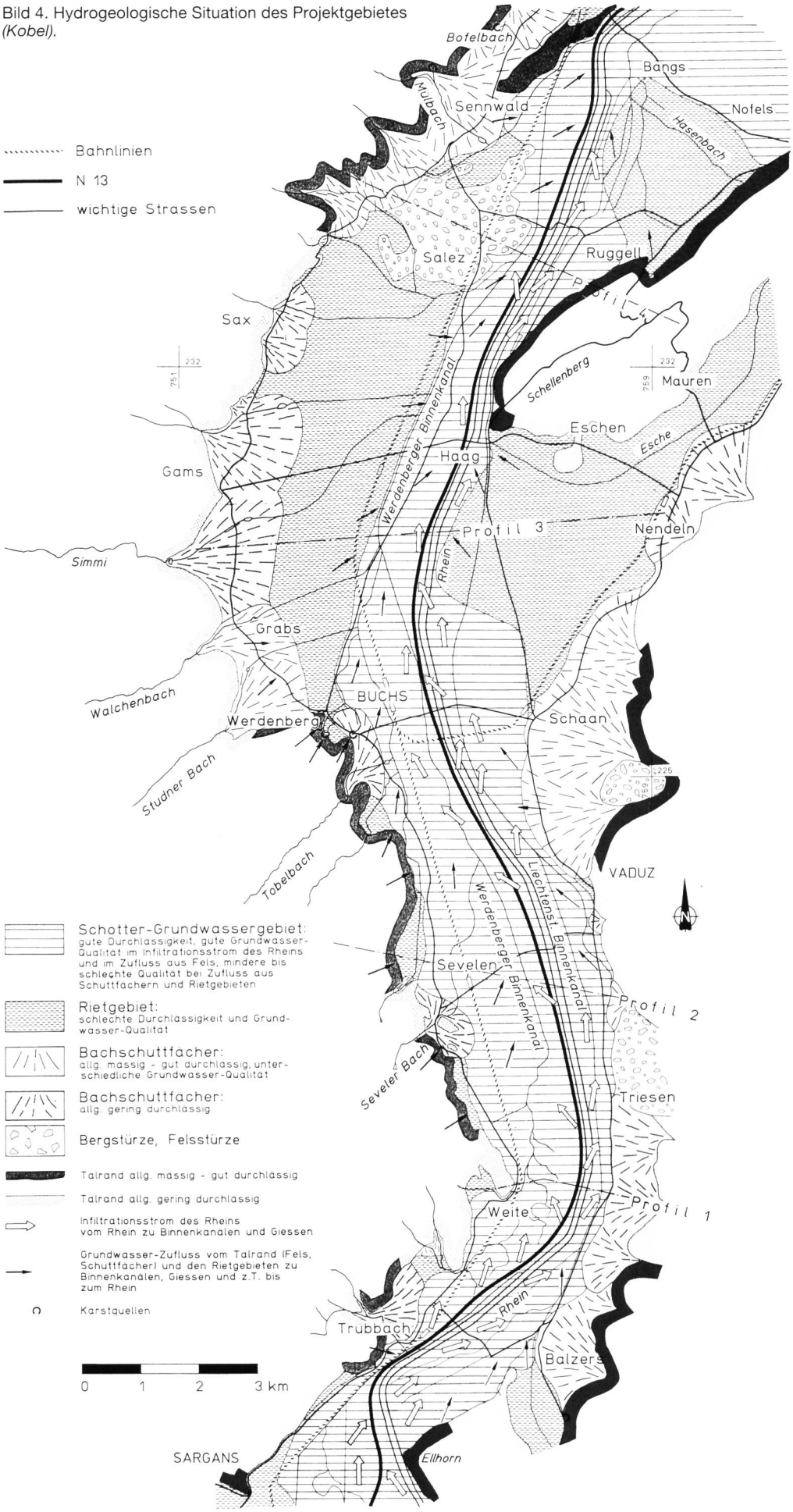
Das gesamte Grundwasservorkommen in den Schottern ist aus quantitativer Sicht zur Nutzung geeignet. Aus qualitativer Sicht ist Schottergrundwasser, das von sehr hartem, praktisch sauerstofffreiem und gelöstes Eisen enthaltendem Grundwasserzufluss aus «Rietgebieten» beeinflusst wird, für Trink- wie auch Brauchwasser nur bedingt geeignet. Es muss mit Quellwasser vom Talhang oder qualitativ besserem Infiltratgrundwasser gemischt oder belüftet und über eine Enteisenung geleitet werden. Diesbezüglich ungünstig liegen die Grundwasser-Pumpwerke talabwärts von Buchs/Schaan. Bei den Pumpwerken von Salez und Sennwald ist die chemische Beschaffenheit am ungünstigsten; bei denjenigen von Schaan/Unterau und Ruggell/Oberau wird sie dank der sich langsam hebenden Rheinsohle und zunehmendem Rheininfiltrat wieder besser. Auf ein geplantes Grundwasser-Pumpwerk südlich Haag in der Wiesenfurt musste verzichtet werden, weil sich während Langzeit-Pumpversuchen in einem Probebrunnen zeigte, das der Grundwasserchemismus ungünstig ist.

Während sich die Sohlenabsenkung des Rheins und die damit verbundene geringere Rheininfiltration deutlich günstig auf den Grundwasserchemismus ausgewirkt hat, ergab die Absenkung des Grundwasserspiegels bei älteren Pumpwerken, deren Brunnentiefe knapp bemessen oder für deren Saugpumpen die Ansaughöhe zu gross geworden war, Förderprobleme.

Die Talebene und die Dynamik des Rheins

Seit das Tal des Alpenrheins am Ende der letzten Eiszeit vom Gletscher freigegeben worden war, veränderte es sich ständig. Erst in jüngster Zeit hat der Mensch in diesen natürlichen Gestaltungsablauf eingegriffen – zur Sicherung von Leib und Gut, zur Gewinnung von überflutungssicherem Land für die Bewirtschaftung und für Siedlungen. Die grösste menschliche Reaktion auf die Dynamik des Rheins war die Errichtung der Hochwasserdämme. Das Hochwas-

Bild 4. Hydrogeologische Situation des Projektgebietes *(Kobel).*



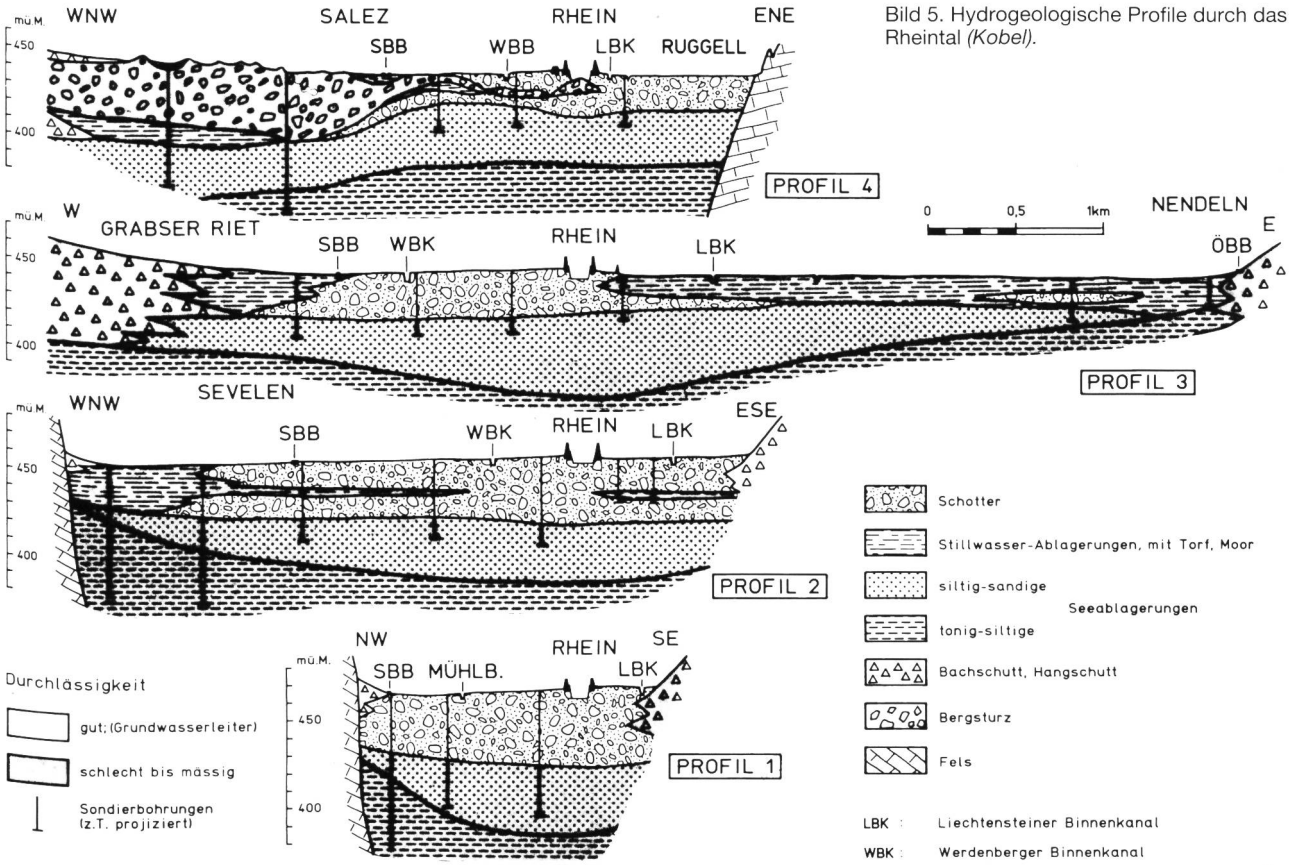


Bild 5. Hydrogeologische Profile durch das Rheintal *(Kobel)*.

ser vom September 1927 hat dieses dem wilden Rhein angelegte Korsett mit dem Dammbruch bei Buchs zum letztenmal gesprengt. Der Mensch hat darauf mit einer Erhöhung und Verstärkung der Schutzdämme reagiert. Sie haben dem Hochwasser vom August 1954 standgehalten, jedoch auch zur Einsicht geführt, dass ohne einen weiteren menschlichen Eingriff ein künftiges ausserordentliches Hochwasser verheerende Folgen für die mittlerweile immer stärker besiedelte Talebene haben könnte. Die weitere Reaktion des Menschen bestand in der Vertiefung des Rheinbettes mit Kiesbaggerungen zur Vergrösserung des Abflussvermögens. Diesem Eingriff hat der Rhein eine Eigendynamik entgegengesetzt, indem er sein Bett über das geplante Mass vertiefte. Dank dem vertieften und vergrösserten Abflussgerinne konnte das ausserordentliche Hochwasser vom Juli 1987 gefahrlos abgeführt werden.

Die Dammbauten und Gerinnekorrekturen am Rhein waren begleitet von Massnahmen im Hinterland, dem Bau der Binnenkanäle und den Meliorationen, welche wie die natürlichen Grundwasservorfluter, die Giessen, der Stabilisierung des Grundwasserspiegels dienten. Dabei ist zu bemerken, dass die Auengebiete mit hochliegender Schotterflur auch bei hohem Grundwasserstand nie versumpft waren, indem die hohe Durchlässigkeit der Schotter ein rasches Abfliessen des Grundwassers gewährleistete.

Mit dem Bau der geplanten Rheinkraftwerke würde der bedeutendste Einzeleingriff seit der Rheinkorrektion vorgenommen. Wird dieser am «Ist-Zustand» gemessen, massen wir uns einen grösseren Eingriff an als denjenigen eines Bauwerks, nämlich die Unterbrechung der aufgezeigten Dynamik, die auch ohne Rheinkraftwerke weitergeht. Die Sohle des Rheins, ihre Kolmation, der Geschiebetrieb und damit der Einfluss des Rheins auf das Grundwasser in den Schottern der Talebene werden sich weiterhin ändern. Wir können auf das Agieren des Flusses wie seit Beginn der flussbaulichen Tätigkeit im Rheintal reagieren: das Abflussgerinne verändern, weitere Sohlschwellen einbauen und damit die Grundwasserverhältnisse beeinflussen. Ein gleichbleibender Zustand wird nicht erreichbar sein.

Die Beurteilung des Einflusses der Rheinkraftwerke auf das Grundwasser kann deshalb nicht absolut, d.h. mit Bezug auf einen statischen Zustand erfolgen, sondern nur relativ mit Bezug auf den sogenannten Ist-Zustand. Dieser Ist-Zustand ist aber kein Zustand, sondern eine festgehaltene Momentaufnahme der fortschreitenden Entwicklung der massgebend von der Dynamik des Rheins gesteuerten Grundwasserverhältnisse. Deshalb sind bei der Beurteilung der mit den Kraftwerkstufen sich ergebenden Veränderungen auch die zeitlichen Veränderungen der Referenzannahme ohne Kraftwerkstufen zu berücksichtigen.

Der Einfluss der Rheinkraftwerke auf das Grundwasser

Inwiefern beeinflussen die Rheinkraftwerke die heutigen Grundwasserverhältnisse, d.h. den Ist-Zustand, wie er beschrieben worden ist, und damit die Grundwassernutzung, die Landwirtschaft und die noch bestehenden Auenwälder? Zur Beantwortung dieser Frage ist einerseits die quantitative Beeinflussung, d.h. die Veränderung der Rheininfiltration und damit des Grundwasserstandes und der Strömungsverhältnisse abzuklären. Andererseits ist die qualitative Beeinflussung des Grundwassers durch eine allfällige chemische Veränderung des infiltrierenden Rheinwassers zu beurteilen.

Die Beeinflussung der Infiltration hängt von der Veränderung der Durchlässigkeit bzw. der Kolmation des Rheinbettes und der Dämme in den Staustufen gegenüber dem heutigen Zustand des frei fliessenden Rheins ab. Die Infiltration fördernd sind bei der Stauhaltung der grössere hydrostatische Druck auf die Flusssohle und der Pegelstand im höheren, besser durchlässigen Dammbereich. Die Infil-

tration hemmend sind bei der Stauhaltung die Kolmation der Sohle und die aus Stabilitätsgründen notwendige Abdichtung der Dämme, insbesondere in deren oberem, besser durchlässigem Teil. Die Faktoren, welche die Infiltration fördern oder hemmen, können sich entweder gegenseitig neutralisieren, womit keine Veränderung eintreten würde, oder es können die fördernden oder die hemmenden Faktoren überwiegen. Im ersten Fall wird die Infiltration verstärkt, d.h. der Grundwasserspiegel in den Schottern beidseits des Rheins wird ansteigen. Im zweiten Fall wird die Infiltration vermindert, d.h. der Grundwasserspiegel wird absinken. Die Einflussfaktoren auf die Infiltration sind auch im Zeitablauf, mittelfristig und langfristig zu beurteilen.

Die Beeinflussung der chemischen Beschaffenheit des Infiltrats hängt vor allem von einer eventuellen Veränderung der Wasserbeschaffenheit im Stauraum und bei der Sohlpassage ab. Beim Durchfluss durch die Turbinen und im Auslaufschwall zum unterliegenden Stauraum sowie beim Überfall über das Wehr oder im Schwall durchs geöffnete Wehr wird das Wasser durchlüftet. Andererseits sind die Fliessgeschwindigkeiten in den Stauräumen bei geschlossenem Wehr gegenüber dem frei fliessenden Rhein stark reduziert. Beim Durchspülen der Stauräume mit geöffnetem Wehr können aus der Kolmation Stoffe (u.a. organisches Material) aufgeschwemmt werden, welche den Wasserchemismus beeinflussen.

Entwicklung Grundwasserhaushalt

Mittelfristig ist bei einer nur schwachen Kolmation des Rheinbetts im Bereich der Stauräume eine erhöhte Infiltration und damit ein Ansteigen des Grundwasserspiegels beidseits des Rheins zu erwarten. Auch in den Abschnitten, in welchen der grösste Grundwasseranstieg zu erwarten ist, von Trübbach/Balzers bis Sevelen/Vaduz und von nördlich Buchs/Schaan bis Sennwald/Ruggell, wird dieser höchstens die seit 1950 eingetretene Grundwasserabsenkung ausgleichen, grösstenteils aber deutlich geringer bleiben.

Für die Landwirtschaft wird damit der Grundwasseranstieg keine Probleme ergeben. Für die Naturlandschaft mit Giessen und ehemaligen Feuchtgebieten wie in der Wartau, wo möglicherweise rheinnahe Giessen wieder zu Grundwasservorflutern werden könnten, und im Naturschutzgebiet Wiesenfurt, südlich Haag, ist er zu begrüssen. Im Sarganser Becken und in der Rheinebene südlich Balzers dürften die Giessen auch mit dem erwarteten Grundwasseranstieg nicht reaktiviert werden. Auf deren bestehende (südlich Balzers) oder geplante (Sarganser Becken) künstliche Bewässerung kann somit nicht verzichtet werden, wenn sie als Wasserläufe erhalten bleiben sollen.

Für die Grundwassernutzung sind bei einem Grundwasseranstieg keine Nachteile zu erwarten. Solche können sich dagegen im Bereich neuerer, etwa nach 1970 erstellter und vor allem rheinseits der Binnenkanäle gelegener Überbauungen ergeben, wenn Untergeschosse, welche ins Grundwasser zu liegen kämen, nicht gegen Grundwasserandrang isoliert sind.

Im langfristigen Zeitraum ist von einer erheblichen Kolmation der Flusssohle mit einer Verringerung der Durchlässigkeit der Sohlpassage im eingestauten Bereich auszugehen. Die aus einer «äusseren Kolmation», d.h. Feinmaterialdepots über der Flusssohle, und einer «inneren Kolmation», d.h. Absatz von Feinmaterial im Schotter unter der Sohle, bestehende Kolmation wird auch bei Spülungen der Stauräume nur teilweise – insbesondere die «äussere Kolmation» – aufgerissen werden. Die Kolmation wird beschleunigt bei gleichzeitiger Ablagerung von Schwebstoffen und Geschiebetrieb, indem dabei das abgelagerte Feinmaterial verdichtet wird. Am geringsten dürfte im langfristigen Zeitraum die Veränderung der Rheininfiltration auf den freien Fliessstrecken zwischen dem Wehr der flussabwärts gelegenen Staustufe und der Stauwurzel der flussabwärts gelegenenen Stauhaltung ausfallen.

Trotz dieser langfristig eintretenden Sohlenkolmation ist infolge des erhöhten hydrostatischen Druckes auf die Sohlpassage noch abschnittsweise eine gegenüber dem Ist-Zustand erhöhte Infiltration mit entsprechendem Grundwasseranstieg anzunehmen, nämlich vom Ellhorn bis Weite, südlich Sevelen, resp. von Balzers bis Triesen, und im Abschnitt von Haag (Naturschutzgebiet Wiesenfurt) bis Salez resp. Bendern und auf etwa einen Kilometer Länge bei Buchs. Absenkungen von wenigen Dezimetern bis über einen Meter werden von Triesen/Weite bis südlich Buchs/Schaan, nördlich Buchs/Schaan und auch im Abschnitt Salez/Sennwald/Ruggell prognostiziert. Diese Absenkungen werden, auch wenn sie sich auf ausgedehntere als die prognostizierten Abschnitte erstrecken sollten, weder für die Landwirtschaft noch – bei ausreichend dimensionierten Grundwasserfassungen – für die Grundwassernutzung nachteilig sein, sofern im letzteren Falle die Qualität des geförderten Wassers nicht verschlechtert wird.

Schliesslich ist festzuhalten, dass mit den Rheinkraftwerken infolge des immer auf etwa gleicher Höhe liegenden Stauspiegels – abgesehen von den Tagen mit Spülung der Stauräume bei Hochwasser – die Grundwasserspiegel-Schwankungen gegenüber dem Ist-Zustand wie auch gegenüber einer Entwicklung ohne Rheinkraftwerke stark abnehmen werden. Das bedeutet, dass ausgeglichenere Grundwasserstände, unabhängig von den Jahreszeiten, Niederschlags- und Trockenperioden, zu erwarten sind. Dies wird insbesondere für die Grundwassernutzung von Vorteil sein.

Entwicklung Grundwasserqualität

Die Anhebung des Sauerstoffgehaltes bzw. der Sauerstoffsättigung im Schottergrundwasser durch Rheininfiltrat beruht darauf, dass das Wasser des Alpenrheins nahezu mit Sauerstoff gesättigt ist. Zudem weist der Rhein auf der ganzen Projektstrecke und in deren Oberlauf fast durchwegs die höchste Güteklasse I von Oberflächengewässern auf. Sauerstoffzehrungen in Stauräumen stark belasteter Flüsse, wie sie z.B. für die stark belastete Traun im Stauraum des Kraftwerks Marchtrenk (Oberösterreich) nachgewiesen sind, haben deshalb für Stauräume am Alpenrhein keine Gültigkeit. Die Untersuchungen im Stauraum des bestehenden Rheinkraftwerks Reichenau haben gezeigt, dass das Rheinwasser bei der Passage durch die schwach organisch belastete Kolmationsschicht einer nur geringen Sauerstoffzehrung unterliegt. Des weiteren darf aus den Untersuchungen beim Kraftwerk Reichenau gefolgert werden, dass sich der Rhein in den fünf Staustufen der Rheinkraftwerke Schweiz-Liechtenstein chemisch-physikalisch trotz der in Wehrnähe auf 0,1 m/s, d.h. um rund 90 %, verringerten mittleren Fliessgeschwindigkeit weiterhin wie ein Fliessgewässer und nicht wie ein stehendes Gewässer verhalten wird. Es findet keine Schichtung statt, und das Flusswasser hat über die ganze Stauhöhe die gleiche Temperatur und die gleiche chemische Zusammensetzung mit guter Durchlüftung bis zum Grund. Der Vergleich der Temperaturwerte aus dem Stauwurzelbereich mit denen aus der Stauraummitte zeigte beim Kraftwerk Reichenau, dass die Verminderung der Fliessgeschwindigkeit auch keine Erwärmung des Wassers im Stauraum zur Folge hat. Eine Eutrophierung des Wassers in den Stauhaltungen ist dank der

geringen Nährstoffzufuhr nicht zu befürchten, so dass kaum eine Sauerstoffzehrung durch aerobe Organismen erfolgen wird.

Es kann somit vorausgesetzt werden, dass das aus den Stauhaltungen ins Grundwasser infiltrierende Rheinwasser grundsätzlich von der gleichen Beschaffenheit sein wird wie das heutige Rheininfiltrat, dies besonders bezüglich der für die Grundwasserqualität massgebenden Härte und Sauerstoffsättigung. Die Grundwasserqualität wird deshalb auch bei der Verwirklichung der Rheinkraftwerke sowohl mittel- wie langfristig einzig von der Infiltrationsstärke des Rheins bestimmt, wie es schon heute der Fall ist. Eine Grundwasserabsenkung infolge verminderter Rheininfiltration erbringt eine verminderte Sauerstoffsättigung und eine Aufhärtung des Grundwassers; ein Grundwasseranstieg infolge erhöhter Infiltration eine Erhöhung der Sauerstoffsättigung und eine Härtereduktion.

Die Kolmation ist eine ausgezeichnete Filterschicht für den Rückhalt und Abbau anorganischer und organischer Schadstoffe, u.a. bei einer allfälligen unfallbedingten Verschmutzung des Rheins. Ist die Kolmation im kurz- bis mittelfristigen Zustand in den Stauräumen noch wenig entwickelt, kann das Gefährdungsrisiko des Grundwassers bei einer unfallbedingten Verschmutzung des Rheins temporär etwas erhöht sein. Im langfristigen Zustand ist dieses Risiko vor allem dank der inneren Kolmation kleiner als heute.

Ein infolge Grundwasseranstiegs geringerer Flurabstand des Grundwasserspiegels könnte einen erhöhten Eintrag von Düngestoffen und damit u.a. auch einen Eintrag von Fäkalbakterien ins Grundwasser zur Folge haben. Dies ist kein Problem der Rheinkraftwerke, sondern des Grundwasserschutzes. Dieser hat vor allem im Schutzareal zwischen Weite und Räfis-Burgerau, südlich Buchs, sowie im Bereich des liechtensteinischen Wasserschutzgebietes von Balzers bis Schaan und im Bereich der Schutzzonen um Grundwasser-Pumpwerke zu gewährleisten, dass die auferlegten Nutzungsbeschränkungen und Schutzmassnahmen eingehalten werden.

Die eventuelle Beeinträchtigung des Grundwassers durch Ausschwemmung von Schadstoffen aus Altdeponien, welche infolge Ansteigens des Grundwasserspiegels unter diesen eintauchen würden, ist ein spezielles Problem, das im Rahmen der Umweltverträglichkeit der zweiten Stufe detailliert abzuklären sein wird mit einem Massnahmenszenarium zur Verhinderung von Schadstoffausschwemmungen aus solchen Altlasten. Aufgrund durchgeführter Untersuchungen für das Amt für Gewässerschutz des Fürstentums Liechtenstein und die Gemeinde Schaan im direkten Grundwasser-Abströmbereich von Altdeponien südlich und nördlich der Strasse Buchs–Schaan konnten keine eindeutig als Verschmutzungsanzeiger dieser Deponien zu betrachtenden Inhaltsstoffe oder Stoffkonzentrationen im Grundwasser nachgewiesen werden. Für Altdeponien bei der Rheinbrücke Vaduz–Sevelen lässt das liechtensteinische Amt für Gewässerschutz zurzeit ähnliche Abklärungen wie die vorgenannten durchführen.

Die nutzbaren Grundwasservorkommen bis zum Bodensee

Der Geschiebetrieb im Rhein flussabwärts der Projektstrecke, d.h. auf der sogenannten internationalen Strecke von der Illmündung bis zum Bodensee, wird durch die fünf Stauhaltungen kaum verändert. Bereits heute wird kein Rheingeschiebe über die Illmündung hinaustransportiert. Die Geschiebefracht des Rheins zwischen der Illmündung und dem Bodensee besteht aus Material der Ill. Die Rheinkraftwerke verändern somit die Geschiebefracht im Rhein auf der unterliegenden Flussstrecke nicht.

Bei den Spülungen der Stauräume wird das Rheinwasser durch Aufschwemmen von im Schlamm gebundenem organischem Material kurzfristig belastet. Die Spülungen erfolgen bei ausgesprochenen Hochwasserabflüssen, d.h. im Sommer bis Frühherbst. In dieser Zeit wird der Sauerstoffgehalt des Rheins durch den Sauerstoffeintrag der Ill unterhalb von deren Mündung um bis zu 1 mg/l erhöht. Dadurch wird die im Rheinwasser infolge der Aufschwemmung von organischem Material bei den Spülungen kurzfristig erfolgende Sauerstoffzehrung wieder kompensiert. Zudem findet bei Hochwasserabfluss infolge der Durchmischung der stark bewegten, aufschäumenden Wasseroberfläche mit der Atmosphäre eine natürliche Belüftung statt, welche ihrerseits den Sauerstoffgehalt des Rheins erhöht. Das unterhalb der Stauhaltungen infiltrierende Rheinwasser wird somit auch während der Spülungen der Stauräume zur Sauerstoffanreicherung des Grundwassers beitragen. Die Schwebstofffracht des Rheins während der Spülungen, wenn das aus dem Alpengebiet zufliessende Hochwasser ohnehin eine erhöhte Schwebstofffracht aufweist, wird die Ganglinie des Schwebstofftransports Richtung Bodensee anhand der durchgeführten Modellversuche der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich über den Feststoffhaushalt kaum verändern.

Entwicklung ohne Rheinkraftwerke

Das heutige Längenprofil des Rheins ist im ganzen Projektabschnitt nicht stabil. Seit dem Ende der Kiesausbaggerungen im Dezember 1972 und dem Bau der Sohlschwellen am Ellhorn und bei Buchs zwischen 1971 und 1973 sind bis heute die folgenden Tendenzen der Sohlenänderung festgestellt worden: Von der Taminamündung bis zur Sohlschwelle am Ellhorn hob sich die Sohle im Mittel um 0,3 m/10 Jahre. Von der Schwelle am Ellhorn bis etwa zur Rheinbrücke Sevelen–Vaduz tiefte sich die Sohle um 0,35 m/10 Jahre ein; ab hier bis zur Sohlschwelle von Buchs trat wieder eine mittlere Sohlenhebung von rund 0,4 m/10 Jahre auf, von der Sohlschwelle bei Buchs bis zur Rheinbrücke Haag–Bendern nochmals eine mittlere Sohlenvertiefung von ca. 0,3 m/10 Jahre und schliesslich flussabwärts bis zur Illmündung, mit Gefällsbruch im Rhein ähnlich einer Sohlschwelle, eine mittlere Sohlenhebung von fast 0,6 m/10 Jahre. Oberhalb der Gefällsbrüche der Sohlschwellen findet eine Sohlenerhöhung, unterhalb eine Sohlenvertiefung statt. Die künftige Entwicklung des Rheinlängenprofils ohne Staustufen und ohne flussbauliche Korrekturen wird von der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich anhand von Experimentalversuchen über den Feststofftransport und die damit verbundenen Sohlenveränderungen wie folgt beurteilt: Von der Illmündung aufwärts wird sich die Sohlenerhöhung langfristig, d.h. etwa in den nächsten hundert Jahren, bis zur Schwelle Buchs rückschreitend ausgedehnt haben, indem das mitgeführte Geschiebe nicht über die Illmündung verfrachtet wird. Die Sohlenerhöhung im Abschnitt Buchs–Illmündung würde in hundert Jahren, bei einer gegenüber bisher geringeren Akkumulation, bis gegen 2,5 m betragen. Im Abschnitt zwischen dem Ellhorn und Buchs hängt die weitere Entwicklung der Flusssohle massgebend von der Geschiebezufuhr aus Graubünden ab. Beim realistischen Szenarium einer kleinen Geschiebezufuhr hält die Erosion flussabwärts der Ellhorn-Schwelle an, und der Schwellenabsturz würde in hundert Jahren bis auf

rund 6 m vergrössert. Nur bei erhöhter Geschiebezufuhr, was infolge der grossen Geschieberetensionen in Graubünden unwahrscheinlich ist, könnte, ausgehend von der Schwelle Buchs, eine bis zum Ellhorn reichende, rückschreitende Sohlenhebung stattfinden. Beim realistischen Szenarium mit geringem Geschiebeeintrag und einer Sohlenhebung nur von Sennwald bis südlich Buchs, d.h. bis inkl. der Anhebung oberstrom der Buchser Schwelle, wird sich ohne flussbauliche Korrektionen in den nächsten hundert Jahren ein Grundwasseranstieg nur im genannten Abschnitt einstellen und nur direkt beidseits des Rheins von Buchs bis nördlich Haag bis über einen Meter betragen. Vom Sarganser Becken bis südlich Buchs/Schaan ist generell eine Grundwasserabsenkung mit einem Maximum von rund einem Meter unterhalb der Ellhorn-Schwelle und bei Weite/Sevelen zu erwarten.

Eine langfristige Entwicklung ohne Rheinkraftwerke und ohne flussbauliche Korrektionen auf der Projektstrecke bzw. zwischen der Ellhorn-Schwelle und der Illmündung ist vor allem aus flussbaulicher Sicht, aber auch mit Blick auf die Grundwasserverhältnisse, nicht zu verantworten. Es kann weder die prognostizierte weitere Entwicklung der Sohlenhebung von Buchs/Schaan bis zur Illmündung in Kauf genommen werden, noch ist eine Vergrösserung des Absturzes der Ellhorn-Schwelle bis auf 6 m tolerierbar. Deshalb müssen vom Ellhorn bis zur Illschwelle flussbauliche Korrektionen projektiert und ausgeführt werden. Zwischen dem Ellhorn und Buchs/Schaan muss die weitere Tiefenerosion, insbesondere zur Verhinderung einer die Stabilität gefährdenden Unterspülung der Hochwasserdämme, mit dem Einbau zusätzlicher Sohlschwellen gestoppt werden. Von Buchs/Schaan bis zur Illmündung ist zur Sicherung des Abflussvermögens die Sohlenhebung zu begrenzen. Das Zulassen einer Sohlenlage, wie sie bis in die 40er Jahre bestanden hat und wie sie gemäss der Prognose in weniger als hundert Jahren ohne Gegenmassnahmen wieder erreicht würde, d.h. eine Verminderung der Abflusskapazität auf einen Wert, der knapp demjenigen von 1927 (Hochwasser mit Dammbruch bei der Eisenbahnbrücke Buchs–Schaan) entsprechen würde, kann nicht hingenommen werden.

Gemäss den vorangehenden Ausführungen ist zu folgern, dass zum Vergleich der Entwicklung mit und ohne Rheinkraftwerke die langfristigen Auswirkungen der Rheinkraftwerke den langfristigen Auswirkungen der notwendigen flussbaulichen Korrektionen – insbesondere auch bezüglich der Grundwasserverhältnisse – gegenüberzustellen sind. Da jedoch zurzeit noch kein Projekt für flussbauliche Korrektionen vorliegt, sind auch dessen Auswirkungen auf die Grundwasserverhältnisse nicht bekannt. Somit ist ein Vergleich derselben mit den Auswirkungen der Rheinkraftwerke nicht möglich.

Zusammenfassende Beurteilung

Wahrscheinlichkeit der prognostizierten Entwicklung

Die Prognosen über die Entwicklung der Grundwasserverhältnisse mit und ohne Rheinkraftwerke wurden anhand von numerischen Simulationsmodellen, von experimentellen kleinmassstäblichen Versuchsmodellen und von Referenzuntersuchungen am Rheinkraftwerk Reichenau gestellt.

Die Güte der numerischen Modellierung hängt im vorliegenden Falle ab von der Richtigkeit und Zuverlässigkeit der Eingabewerte, der Modellauslegung (finites Netz) und vom Genügen des verwendeten Modells für die gestellten Anforderungen. Sowohl bei den Eingabewerten wie auch bei der Wahl des Modells und dessen Auslegung mussten vom Projektbearbeiter Vereinfachungen gemacht sowie gewisse Unzulänglichkeiten bei der Dateneingabe und Auswertung hingenommen werden, was praktisch bei allen numerischen Modellierungen unvermeidbar ist. Sie sind aber für den Kenner des Gebietes offensichtlich und in ihrer Relevanz abschätzbar. Die Aussagekraft der Ergebnisse kann deshalb relativiert und bezüglich ihrer Plausibilität beurteilt werden.

Die an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) an der ETH Zürich durchgeführten Experimentalversuche konnten anhand der langjährigen Erfahrungen mit der Dynamik grosser Alpenflüsse, im speziellen des Alpenrheins, ausgelegt werden. Ihre Resultate haben demnach eine hohe Plausibilität.

Referenzbeispiele haben einerseits den Vorteil, dass sie im Massstab 1:1 konkrete und sich meist über eine grössere Zeitdauer erstreckende Beobachtungs- und Messwerte liefern. Ihr Nachteil liegt andererseits darin begründet, dass es sich um Analoga und nicht um identische Abbilder des zu lösenden Problems handelt.

Werden die Resultate und Folgerungen der numerischen Simulationen, der Experimentalversuche an Modellen und der Referenzbeispiele mit den bisherigen Entwicklungen des Rheins, seiner Beziehung zum Grundwasser und den daraus abzuleitenden Extrapolationen der künftigen Entwicklung verglichen, so darf den im Rahmen des Umweltverträglichkeitsberichtes der Stufe 1 erarbeiteten Grundlagen eine ausreichende allgemeine Zutreffenswahrscheinlichkeit zuerkannt werden. Sie werden als geeignete Basis für die Detailabklärungen beurteilt, welche im Rahmen des Umweltverträglichkeitsberichtes der Stufe 2 zur Erlangung der Baubewilligung auszuarbeiten sein werden.

Korrekturmöglichkeiten bei ungünstiger Beeinflussung

Im Umweltverträglichkeitsbericht der Stufe 1 wird starkes Gewicht auf die Beherrschung der mittelfristigen Entwicklung mit erhöhter Infiltration und Ansteigen des Grundwasserspiegels gelegt. Luftseits der Dämme sind neue Drainagegerinne zur Brechung des Grundwasseraufstaus vorgesehen. Sie sind bezüglich ihrer Dimensionierung, der Lage und der Ergänzung im Bedarfsfalle im Rahmen des Umweltverträglichkeitsberichtes der Stufe 2 im einzelnen auszuarbeiten.

Das anhand der bisherigen Untersuchungen anzunehmende Ansteigen des Grundwasserspiegels in der Schotterflur wird zu Grundwasserständen führen, welche höchstens denjenigen entsprechen, die bis nach Mitte dieses Jahrhunderts unter den damaligen natürlichen Bedingungen bestanden haben und die heute noch oft als Idealfall angesehen werden. Die landwirtschaftliche Nutzung in der Schotterebene beidseits des Rheins war vom damaligen Grundwasserstand nicht benachteiligt. Versumpfungen in der Schotterebene waren nicht bekannt, die Giessen als natürliche Grundwasservorfluter führten das zufliessende Grundwasser ab. Sie können diese Funktion auch heute wieder übernehmen. Für die bestehenden Grundwasser-Pumpwerke und die Grundwassernutzung allgemein bietet ein höherer Grundwasserspiegel keine Probleme, sofern dem Grundwasserschutz bzw. den für die Gewässerschutzbereiche, Schutzareale und Schutzzonen geltenden Nutzungsbeschränkungen und Schutzmassnahmen nachgelebt wird. Probleme können sich bei einem stärkeren Grundwasseranstieg bei neueren Überbauungen, deren

Untergeschosse und Grundwasserabdichtungen auf den heutigen tiefen Grundwasserstand ausgerichtet sind, sowie bei Altdeponien ergeben, die mit ihrer Basis unter den Grundwasserspiegel zu liegen kämen. Es besteht ein Handlungsbedarf zur Trockenhaltung von Gebäuden und zur Verhinderung von Schadstoffausschwemmungen aus Deponien ins Grundwasser. Die dazu notwendigen Massnahmen sind im Rahmen des Umweltverträglichkeitsberichtes Stufe 2 auszuarbeiten.

Die grundsätzlichen Probleme liegen nach unserer Ansicht nicht beim Grundwasseranstieg, sondern bei Grundwasserabsenkungen. Es betrifft dies vor allem die Kraftwerkstufen Buchs/Schaan und Sevelen/Triesen. Hier besteht ein Handlungsbedarf für Korrekturmassnahmen, mit denen die Grundwasserabsenkung infolge verminderter Rheininfiltration reduziert werden kann, z.B. mit einer Verminderung der Kolmation in den Stauräumen oder mit künstlichen Anreicherungsanlagen.

Die Kolmation, besonders die innere, ist einerseits notwendig für die einwandfreie Filtrierung bei der Passage von Rheinwasser ins Grundwasser. Sie garantiert, dass das Rheininfiltrat nach der Sohlpassage bereits Trinkwasserqualität hat. Wo heute die Kolmation ungenügend entwickelt ist oder bei einer Sohlenaufarbeitung (Geschiebetrieb) auch die innere Kolmation von Zeit zu Zeit aufgerissen wird, kann es insbesondere bei unfallbedingter Belastung des Rheinwassers zu einem Durchbruch von Schadstoffen ins Grundwasser kommen. Andererseits muss aber das Ausmass der Kolmation zur Gewährleistung einer genügenden Infiltration beherrschbar und steuerbar sein.

Indem die Rheinkraftwerke in Etappen mit einem noch nicht festgelegten resp. wählbaren zeitlichen Unterbruch zwischen der Erstellung der einzelnen Stufen verwirklicht werden, dient insbesondere die erste Stufe als Versuchsstufe zum Vergleich der eintretenden mit den prognostizierten Auswirkungen. An den Resultaten, welche mit einem umfassenden Mess- und Kontrollprogramm in der Staustufe und im beidseitigen Grundwasservorkommen zu gewinnen und laufend zu verarbeiten sind, muss die kalkulierte Entwicklung geeicht und für die weiteren Staustufen adaptiert werden. Zugleich sind die erforderlichen Steuerungsmassnahmen der Kolmation bei der Kontrollstufe vorzunehmen und für die weiteren Stufen festzulegen. Desgleichen ist die Qualität des Rheinwassers im Stauraum und flussabwärts sowie des Grundwassers intensiv zu kontrollieren.

Das skizzierte Mess- und Kontrollinventar ist im Rahmen des Umweltverträglichkeitsberichtes der Stufe 2 auszuarbeiten. Diese hat auch eine verfeinerte numerische Simulation der Beziehungen zwischen den Staustufen und dem Grundwasserverhalten, insbesondere für die erste zu erstellende Stufe, und Massnahmen zur Steuerung der Kolmation sowie von Möglichkeiten zur Grundwasseranreicherung zu beinhalten. Letztere sind ins Bauprojekt aufzunehmen.

Beim aufgezeigten Vorgehen darf den Rheinkraftwerken eine bestmögliche Steuerung des Zusammenwirkens zwischen den Staustufen und dem Grundwasserverhalten zuerkannt werden; eine Steuerungsmöglichkeit, wie sie weder bei den bisherigen flussbaulichen Massnahmen (z.B. Errichtung der Sohlschwellen am Ellhorn und bei Buchs) bestanden hat noch bei künftig ohne Rheinkraftwerke notwendig werdenden Bauten im Rhein (zusätzliche Sohlschwellen zwischen dem Ellhorn und Buchs, Sohlenstabilisierung zwischen Buchs und der Illmündung) vorausgesetzt werden kann.

Folgerungen

Die geplanten Kraftwerkstufen haben der Verknüpfung mit der Natur- und Kulturlandschaft der Rheinebene und ihren bestehenden Nutzungen, insbesondere der Grundwasserbewirtschaftung für den heutigen und zukünftigen Bedarf an Trink- und Brauchwasser, gerecht zu werden.

Der Rhein und das mit diesem verbundene Grundwasser repräsentieren das Zusammenwirken einer natürlichen Entwicklung und von Reaktionen des Menschen darauf. Man hat sich bewusst zu sein, dass dieser Prozess weitergehen wird. Der «Ist-Zustand» ist gleich einem Standbild im Ablauf eines Films. Die Grundwasserfrage stellt sich darin mit und ohne Rheinkraftwerke. Diese sind aber die volkswirtschaftlich sinnvolle Antwort auf die Grundwasserfrage. Mit den Rheinkraftwerken Schweiz-Liechtenstein wird nicht nur elektrische Energie erzeugt, sondern es kann auch die Beziehung zwischen dem Rhein und dem Grundwasserverhalten bestmöglich gesteuert werden.

Literatur, unveröffentlichte Berichte und Gutachten

Begert, A., 1985: Untersuchungen über die Sedimentations- und Sauerstoffverhältnisse im Stauraum des Kraftwerkes Marchtrenk, Oberösterreich – «Österr. Wasserwirtschaft», Heft 9/10, Jhg. 37, Wien, September/Oktober 1985.

Büro für Technische Geologie AG: Grundwasseruntersuchungen im Rheintal zwischen Bad Ragaz und Sennwald – unveröffentl. Gutachten im Auftrag des Baudepartements des Kantons St. Gallen, Februar 1982.

Dr. M. Kobel, Büro für Technische Geologie: Chemische Grundwasseruntersuchung in der Rheinebene zwischen Bad Ragaz und Au, Grundwasserhochstand Mai/Juni 1986 – unveröffentl. Gutachten im Auftrag des Baudepartements des Kantons St. Gallen, Oktober 1987.

EAWAG, Dübendorf: Fürstentum Liechtenstein, die Grundwasserverhältnisse im Rheintal 1968, 1. Ergänzungsbericht Dezember 1977 – unveröffentl. Gutachten im Auftrag des Amtes für Gewässerschutz des Fürstentums Liechtenstein.

Jäckli, H. u.a., 1993: Hydrogeologische Karte der Schweiz 1:100000, Blatt Toggenburg, – Schweiz. Geotechn. Kommission.

Kobel, M., Hantke, R., 1979: Zur Hydrogeologie des Rheintals von Sargans bis zum Bodensee, Exkursion E am 19. April 1779. – In: Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., NF61, S 79–86, Stuttgart 1979.

Kobel, M., 1990: Die hydrogeologischen Verhältnisse in der Talebene des Werdenbergs – In: Werdenberger Jahrbuch, 3. Jhg. 1990, Buchs Druck und Verlag, Buchs SG.

Kobel, M., Fussenegger, B., 1992: Grundwasser und Trinkwasser im Rheintal – In: Int. Rheinregulierung 1892 – 1992, Der Alpenrhein und seine Regulierung, Buchs Druck und Verlag, Buchs SG.

Konzessionsprojekt 1979/80 mit Ergänzungen 1991 – Nordostschweiz. Kraftwerke AG, Liechtensteinische Kraftwerke, Motor Columbus AG

Studienkonsortium Rheinkraftwerke Schweiz-Liechtenstein: Rheinkraftwerke Schweiz-Liechtenstein, Umweltverträglichkeitsbericht zum Konzessionsprojekt 1979/80 mit Ergänzungen 1991; – Holinger, 1991.

Weber, E. u.a., 1978: Der Grundwasserstrom des Alpenrheins – «wasser, energie, luft», Heft 5, Mai 1978.

Adresse des Verfassers: *Max Kobel*, Dr. phil., Geologe SIA, Dr. M. Kobel und Partner AG, Büro für technische Geologie, Grossfeldstrasse 74, CH-7320 Sargans.