

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 115 (2023)
Heft: 4

Artikel: Grundwasser und Wasserbau : Ergebnisse einer Analyse von Wasserbauprojekten in der Schweiz
Autor: Blanc, Théo / Brunner, Philip / Hunkeler, Daniel
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1050010>

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: 11.01.2026

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

Grundwasser und Wasserbau – Ergebnisse einer Analyse von Wasserbauprojekten in der Schweiz

Théo Blanc, Philip Brunner, Daniel Hunkeler, Clément Roques, Florian Kobierska, Ueli Schälchli, Annick Rast, Eric Di Gioia, Stephanie Zimmermann

Zusammenfassung

Wasserbauliche Massnahmen an Fließgewässern können sich in verschiedener Hinsicht auf die angrenzenden Grundwassersysteme auswirken. Diesbezüglich wurden in den letzten Jahren grosse Mengen an Informationen generiert. Ziel dieser Studie war es, diese Informationen aufzubereiten und auf dieser Basis die heutige Praxis bezüglich der Berücksichtigung von grundwasserrelevanten Aspekten in Wasserbauprojekten aufzuzeigen.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die Grundwasserthematik heutzutage in den meisten Wasserbauprojekten der Schweiz berücksichtigt wird und umfassende hydrogeologische Begleituntersuchungen durchgeführt werden, vor allem in Situationen, wo Nutzungen oder belastete Standorte von den wasserbaulichen Massnahmen betroffen sind. Während der Fluss-Grundwasser-Interaktionstyp meist unter Berücksichtigung räumlicher und zeitlicher Aspekte bestimmt wird, werden sedimentologische Faktoren, insbesondere die Kolmation der Gewässersohle, seltener thematisiert. Auswirkungen auf die Grundwasser-Quantität werden meist anhand von kontinuierlichen Messungen des Wasserstands untersucht. Auswirkungen auf die Grundwasser-Qualität werden dagegen nicht systematisch berücksichtigt. Numerische Grundwassermodelle werden im Rahmen von Wasserbauprojekten relativ häufig erstellt, vor allem bei Projekten mit grossen erwarteten Auswirkungen auf das Grundwasser.

Die Studie wurde als Teil eines angewandten Forschungsprojekts durchgeführt, welches als Ziel hat, eine Toolbox zu einem methodischen Vorgehen bezüglich der Thematik Grundwasser bei Wasserbauprojekten zu entwickeln.

Résumé

Les mesures d'aménagement hydraulique appliquées aux cours d'eau peuvent avoir des conséquences diverses sur les systèmes adjacents d'eaux souterraines. De nombreuses informations ont été générées à ce sujet au cours des dernières années. L'objectif de cette étude était de traiter ces informations et de montrer sur cette base la pratique actuelle en matière de prise en compte des aspects liés aux eaux souterraines dans les projets d'aménagement de cours d'eau.

Les résultats de cette étude ont montré que la thématique des eaux souterraines est désormais prise en compte dans la plupart des projets d'aménagement de cours d'eau en Suisse et que des études d'accompagnement hydrogéologiques approfondies sont réalisées, notamment dans les situations où des utilisations ou des sites pollués sont concernés par les mesures d'aménagement de cours d'eau. Alors que le type d'interaction rivière-eau souterraine est généralement déterminé en tenant compte des aspects spatiaux et temporels, les facteurs sédimentologiques, notamment le colmatage du lit du cours d'eau, sont plus rarement abordés. Les effets sur la quantité des eaux souterraines sont généralement étudiés à l'aide de mesures continues du niveau d'eau. En revanche, les effets sur la qualité des eaux souterraines ne sont pas systématiquement pris en compte. Les modèles numériques des eaux souterraines sont relativement fréquents dans le cadre de projets d'aménagement de cours d'eau, en particulier pour les projets dont les effets attendus sur les eaux souterraines sont importants.

L'étude a été réalisée dans le cadre d'un projet de recherche appliquée dans le but de développer une boîte à outils pour une approche méthodologique de la thématique des eaux souterraines dans les projets d'aménagement hydraulique.

1. Einführung

In der Schweiz wurden in den letzten Jahren im Rahmen zahlreicher Wasserbauprojekte grosse Mengen an Informationen generiert und Erfahrungen gesammelt. Dabei wurden auch Wissensdefizite erkannt, vor allem an der Schnittstelle Fließgewässer und Grundwasser. Zudem wurde der Bedarf formuliert, die bisher gewonnenen Erfahrungen strukturiert für zukünftige Projekte nutzbar zu machen. Eine erste Synthese von 12 Wasserbauprojekten (CSD Ingénieurs SA, 2019) zeigte, dass die Grundwasserthematik oft in einer sehr unterschiedlichen Art und Weise und ohne erkennbare Systematik in die Wasserbauprojekte miteinbezogen wurde.

Im Rahmen dieser Studie wurden 34 Wasserbauprojekte in der Schweiz systematisch aufbereitet und analysiert mit dem Ziel, einen breiten Überblick über die heutige Praxis in Bezug auf die Thematik Grundwasser bei Wasserbauprojekten zu bekommen. Die Auswahl der Projekte erfolgte in Zusammenarbeit mit der Begleitgruppe des Projekts, welche aus Vertretern des BAFU, aus Kantonen und Ingenieurbüros bestand. Interviews mit Fachpersonen aus den Bereichen Wasserbau und Grundwasser komplettierten die Auswertungen. Die Ergebnisse dieser Arbeiten sind in diesem Beitrag zusammengefasst. Allgemeine Grundlagen zu Fluss-Grundwasser-Interaktionen sind in Brunner et al., 2023 zu finden.

Diese Studie ist eingebettet in ein angewandtes Forschungsprojekt im Bereich Hydrogeologie, in dem für die Praxis ein methodisches Vorgehen in Form einer Toolbox entwickelt wird, mit deren Hilfe der Einfluss von Wasserbauprojekten auf das Grundwasser systematisch ermittelt werden kann. Um ein solches Instrument zielgerichtet entwickeln zu können, war es notwendig, vorab den Stand in der heutigen Praxis zu analysieren.

Der Artikel ist folgendermassen aufgebaut: Nach einer kurzen Beschreibung

der Methodik werden in *Kapitel 3* die wichtigsten Ergebnisse der Projektanalyse präsentiert. In einem ersten Schritt werden die wasserbaulichen Massnahmentypen der einzelnen Wasserbauprojekte aufgezeigt. Die anschliessende Analyse – auf Ebene des Gesamtprojekts und nicht einzelner wasserbaulicher Massnahmen – deckt die wichtigsten Etappen eines Wasserbauprojekts ab, welche in Bezug auf die Hydrogeologie relevant sind. Dies beinhaltet die Bestimmung des Fluss-Grundwasser-Interaktionstyps, die durchgeführten hydrogeologischen und sedimentologischen Untersuchungen, die Anwendung numerischer Grundwassermodelle, eine Vorhersage der Auswirkungen der Wasserbauprojekte auf das Grundwasser und das durchgeführte Grundwasser-Monitoring. Ergebnisse aus den Interviews sind in die jeweiligen Abschnitte integriert. Abschliessend werden die Resultate diskutiert und die wichtigsten Schlussfolgerungen gezogen.

2. Methodik

Die Projekte umfassten unterschiedliche wasserbauliche Massnahmen an 24 Fließgewässern unterschiedlicher Grösse und Abflussregimen in 16 Kantonen (*Bild 1*). Zwölf Wasserbauprojekte waren zum Zeitpunkt der Analyse (2022) in der Planungsphase, vier in der Bauphase und 18 bereits abgeschlossen.

Die Projektanalyse beinhaltete eine detaillierte Durchsicht der Projektdokumentation und eine fachliche Beurteilung der angewendeten Untersuchungsmethoden einschliesslich der Auswertung und Interpretation der erhobenen Daten in Bezug auf die Thematik Grundwasser.

Die Ziele der Analyse waren:

- die relevanten hydrogeologischen Prozesse, einschliesslich der vorherrschenden Fluss-Grundwasser-Interaktionstypen und der Eigenschaften der Gewässersohle (Korngrössen, Kolmation) zu identifizieren;
- aufzuzeigen, inwieweit die möglichen Auswirkungen der Wasserbauprojekte auf das Grundwasservorkommen einschliesslich der Sedimentdynamik vorausgesagt wurden und zu beurteilen, ob diese auf einem angemessenen konzeptionellen Verständnis der hydrogeologischen und sedimentologischen Prozesse basierten;
- die Monitoring-Strategien zusammenzustellen und aufzuzeigen, inwieweit in den Wasserbauprojekten die Grundwasser-Quantität und -Qualität berücksichtigt wurde;
- allgemeine Schlussfolgerungen und Empfehlungen zu formulieren.

Die für die Projektanalyse zur Verfügung stehenden Dokumente waren je nach Projekt sehr unterschiedlich. Typischerweise lagen mehrere technische Berichte der unterschiedlichen Projektphasen vor (z. B. Machbarkeitsstudien, technische und hydrogeologische Fachberichte). Sofern vorhanden, wurden auch Zeitungsartikel, Sitzungsprotokolle und öffentliche Erklärungen in die Analyse miteinbezogen.

Um die Projekte miteinander vergleichen und statistisch auswerten zu können, wurde eine standardisierte Terminologie für die einzelnen Fragestellungen definiert. Diese wurden für jedes Wasserbauprojekt getrennt in einem Excel-Formular beantwortet. Für die Auswertung wurde ein spe-

zieller Algorithmus in Python unter der webbasierten Computing-Plattform Jupyter Notebook (6.4.5) entwickelt. Der Algorithmus extrahierte automatisch alle notwendigen Informationen aus den Formularen, um damit die gewünschten Tabellen und interaktiven Diagramme zur Visualisierung der Ergebnisse zu erstellen.

Für die Interviews wurden insgesamt sieben Fachexperten mit langjähriger Erfahrung in den Bereichen Wasserbau (4) und Hydrogeologie (3) befragt. Die Experten hatten Erfahrungen mit Wasserbauprojekten in den Kantonen Wallis, Zürich, Bern und dem Alpenrhein-Projekt (Rhesi). Das Ziel der Befragungen war, Erfahrungen aus der Praxis zum Umgang mit der Thematik Grundwasser bei Wasserbauprojekten abzuholen und so komplementär zu Informationen zu gelangen, welche in der Regel nicht in Berichten dokumentiert werden. Wie bei der Projektanalyse lag der Fokus dieser Interviews auf den grundwasserrelevanten Aspekten in Wasserbauprojekten.

3. Ergebnisse der Projektanalyse

3.1 Wasserbauliche Massnahmentypen und Nutzungen im Projektgebiet

Die 34 Wasserbauprojekte setzten sich insgesamt aus ca. 15 verschiedenen wasserbaulichen Massnahmentypen zusammen, wobei über die Hälfte der Projekte aus einer Kombination von zwei bis vier verschiedenen Massnahmentypen bestand. Unter den häufigsten Massnahmentypen sind eine Verbreiterung der Gewässersohle (in über 75 Prozent der Fälle), das Erstellen oder der Ersatz eines Uferschutzes oder einer Sohlenverbauung und eine Aufwertung der Ufer zu nennen (*Bild 2*).

In über 50 Prozent der Projektgebiete befanden sich Trinkwasserfassungen. Andere Infrastruktur inklusiv Gebäude waren in über 40 Prozent und belastete Standorte in über 30 Prozent der Projektgebiete vorhanden. Mögliche Auswirkungen auf Landwirtschaft oder grundwasserabhängige Ökosysteme wurden nur selten erwähnt. Für etwa 20 Prozent der Projekte waren in den Unterlagen keine Angaben zu den vorhandenen Nutzungen in den Projektgebieten zu finden.

3.2 Standortcharakterisierung

3.2.1 Fluss-Grundwasser-Interaktionstypen

Der Fluss-Grundwasser-Interaktionstyp wurde in 29 von 34 Wasserbauprojekten thematisiert. In knapp der Hälfte der Wasserbauprojekte wurden Flussabschnitte

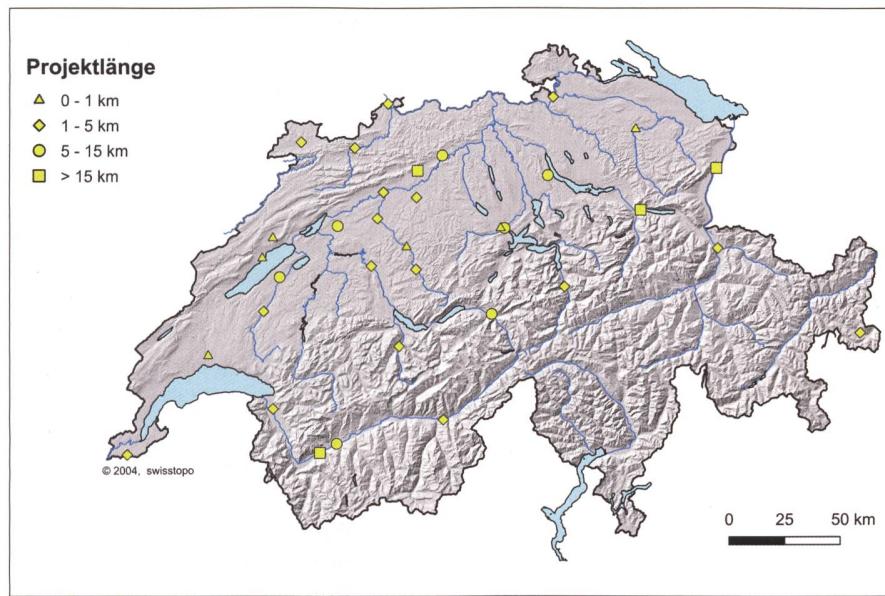


Bild 1: Lage und Länge der analysierten Wasserbauprojekte.

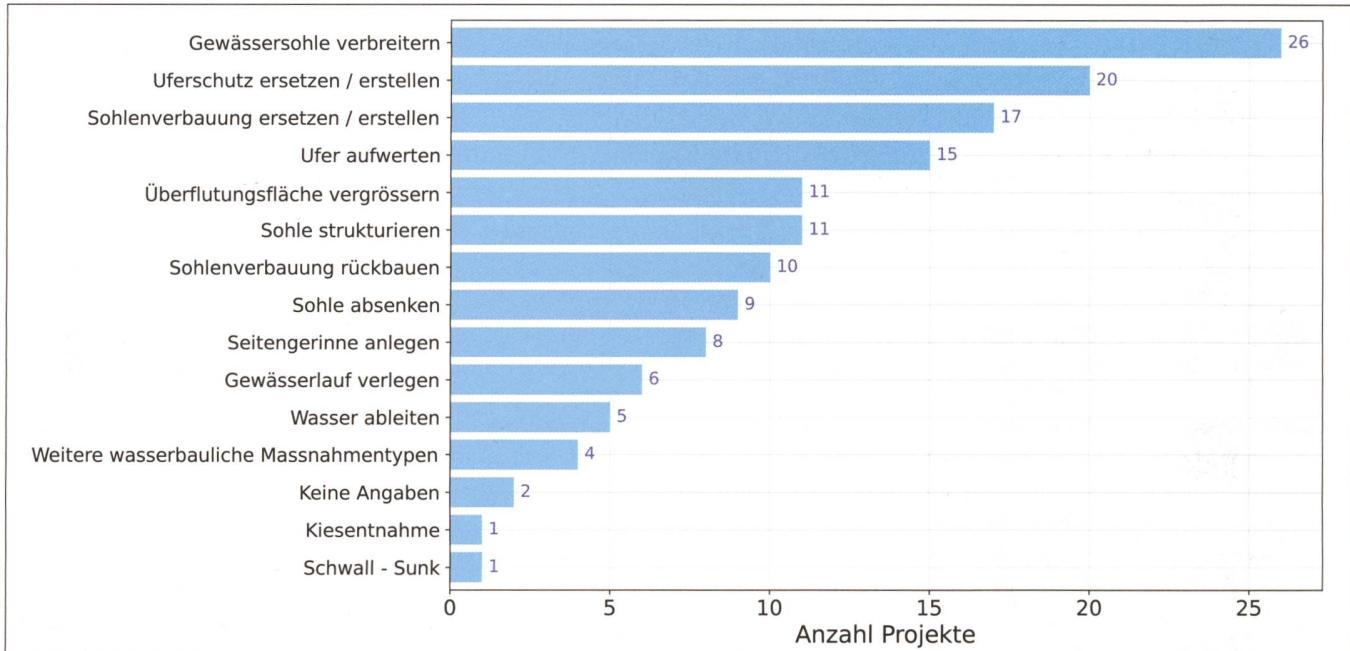


Bild 2: Häufigkeit (Anzahl) von wasserbaulichen Massnahmentypen in den untersuchten Projekten. Unter «Weitere wasserbauliche Massnahmen» sind z. B. Entlastungskorridore, das Offenlegen von Bächen oder die Förderung einer Auenvegetation zusammengefasst.

mit sowohl infiltrierenden als auch exfiltrierenden Verhältnissen angegeben, für rund ein Viertel nur infiltrierende und für rund 10 Prozent nur exfiltrierende Verhältnisse (Bild 3).

Von den 24 Projekten mit infiltrierenden Verhältnissen (entweder über die gesamte Länge oder abschnittsweise) wurde in elf Projekten erwähnt, dass ein Teil des Flussabschnitts perkolativ infiltrierend sein könnte. Dies wurde in der Regel mit einer grossen Differenz zwischen dem Fluss- und dem Grundwasserstand be-

gründet. Die zeitliche Veränderung des Interaktionstyps (aufgrund von saisonalen oder kurzfristigen Schwankungen der Wasserstände) wurde in zwei Drittel der Projekte untersucht und etwa gleich oft als entweder konstant oder variabel angegeben.

Auch in den Interviews wurde angegeben, dass die unterschiedlichen Fluss-Grundwasser-Interaktionstypen einschliesslich perkolativer Verhältnisse und deren potentiellen Auswirkungen auf das Grundwasser in der Fachwelt bekannt seien.

Die Bestimmung der Fluss-Grundwasser-Interaktionstypen erfolgte meist anhand von hydraulischen Gradienten, welche vorwiegend aus Wasserstandsberechnungen im Fließgewässer (vereinzelt auch Wasserstandsmessungen) und Wasserstandsmessungen im Grundwasser ermittelt wurden (Bild 4). Häufig wurde der Interaktionstyp aus vorhandenen Berichten (welche nicht im Zusammenhang des Wasserbauprojekts erstellt wurden) entnommen oder es waren keine Angaben zur verwendeten Methode angegeben. In vier Fällen beruhte die Einschätzung auf einer Expertenmeinung oder auch auf Ergebnissen aus numerischen Modellen.

Selten wurden kontinuierliche Messungen der Wassertemperatur, der elektrischen Leitfähigkeit, Markierversuche oder stabile Isotopenmessungen zur Bestimmung der Fluss-Grundwasser-Interaktionstypen durchgeführt.

Neben den fünf Projekten, in denen der Interaktionstyp in den Berichten nicht erwähnt wurde, konnte in weiteren fünf Projekten der angegebene Interaktionstyp wegen fehlender Dokumentation nicht überprüft werden. Bei den verbleibenden Projekten erschien uns der angegebene Interaktionstyp in den meisten Fällen (22 von 24) plausibel. In einem Projekt wurde davon ausgegangen, dass keine Interaktion zwischen dem Fließgewässer und dem Grundwasser stattfindet. Aufgrund der vorhandenen Daten ist diese Situation allerdings eher als perkolativ einzuschätzen. In einem anderen Projekt wurde eine zeitlich stabi-

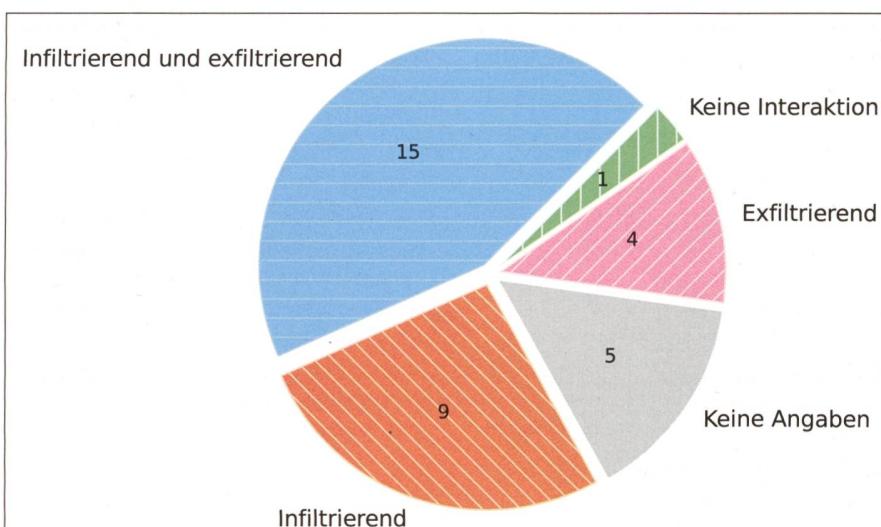


Bild 3: In den Berichten über die Wasserbauprojekte erwähnte Fluss-Grundwasser-Interaktionstypen. «Infiltrierend und exfiltrierend»: der Flussabschnitt weist sowohl infiltrierende als auch exfiltrierende Verhältnisse auf (räumlich und/oder zeitlich). Die Kategorie «Keine Angaben» umfasst Projekte, bei denen entweder keine Voruntersuchung durchgeführt oder kein Interaktionstyp erwähnt wurde. Die Zahlen repräsentieren die Anzahl der Projekte.

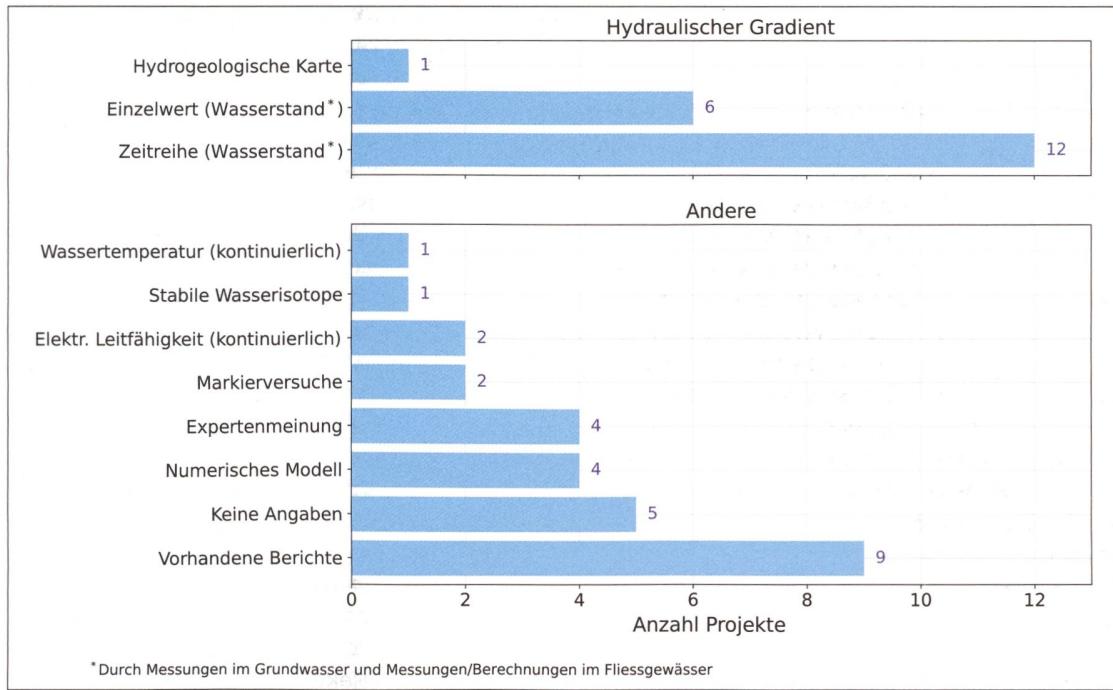


Bild 4: Angewandte Methoden zur Bestimmung des Fluss-Grundwasser-Interaktionstyps. Bei einigen Projekten wurde der Interaktionstyp durch eine Kombination von Methoden begründet.

le Exfiltration angenommen, während wir bei hohen Abflussmengen eine Infiltration durch die Flussdämme vermuteten.

3.2.2 Hydro(geo)logische Charakterisierung

Als hydro(geo)logische Charakterisierung werden einmalige Abklärungen oder Untersuchungen im Projektgebiet zu Beginn des Projekts betrachtet. Beispiele sind Untersuchungen der Geologie durch Bohrungen oder Bestimmung der Grundwasser-Fliessgeschwindigkeit durch Markierversuche. Die Abgrenzung zum Monitoring, also Messungen über einen längeren Zeitraum hinweg, um die Variabilität des hydrogeologischen Systems besser zu verstehen bzw. die Auswirkungen des Projekts zu überwachen, war in der Projektdokumentation nicht immer ersichtlich und konnte daher

auch in der Analyse nicht immer auseinandergehalten werden.

Eine hydro(geo)logische Charakterisierung des Projektgebiets erfolgte meist anhand der Geologie, der Geometrie und der Durchlässigkeit des Grundwasserleiters und der Grundwasser-Fliessrichtung (Bild 5).

Seltener wurden Konzeptmodelle erstellt, und ebenso wenig Grundwasser-Geschwindigkeiten oder Infiltrationsraten bestimmt. In einigen Projekten erfolgte eine Charakterisierung der Gewässersohle oder der Fluss-Morphologie und -Dynamik.

Obwohl die Hydrogeologie in 80 Prozent der Wasserbauprojekte thematisiert wurde, variierte die Art und der Umfang der hydrogeologischen Charakterisierung in den einzelnen Projekten stark, je nach Projektkomplexität. Die Charakterisierung erfolgte vor allem auf Basis von Informatio-

nen aus vorhandenen Berichten (welche nicht explizit Teil des Wasserbauprojekts waren), aus geologischen und hydrogeologischen Karten oder aus bestehenden Bohrprofilen. Zusätzliche Untersuchungen im Feld (wie z. B. Pump- oder Markierversuche oder geophysikalische Messungen) wurden zu Projektbeginn lediglich in fünf Projekten durchgeführt.

Auch die Interviewpartner gaben an, dass das Grundwasser bei Wasserbauprojekten generell untersucht würde und in der Regel immer hydrogeologische Voruntersuchungen durchgeführt würden. Das Ausmass der Untersuchungen hängt jedoch stark vom Projekt und dessen möglichen Auswirkungen auf das Grundwasser bzw. des Schadenspotenzials infolge von Veränderungen des Grundwasserstands ab. Auch die Projektleiter und die Vorgaben

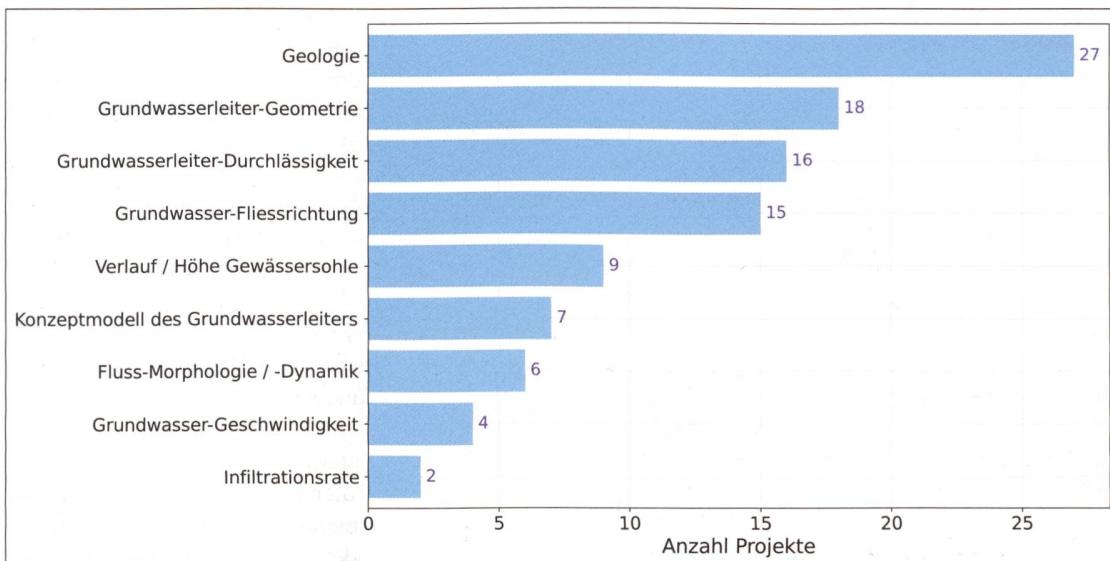


Bild 5: Art der hydro(geo)logischen Charakterisierung des Untersuchungsgebiets.

der Behörden hätten einen Einfluss darauf, welche Untersuchungen durchgeführt würden.

3.2.3 Sedimentologische Untersuchungen

Die sedimentologischen Auswertungen der untersuchten Projekte betreffen Angaben zum Sohlenmaterial, zur Kolmation und Dekolmation resp. zur Durchlässigkeit der Gewässersohle.

Die Zusammensetzung des Sohlenmaterials wird zur Dimensionierung des Wasserbauprojekts benötigt und ist zudem ein bedeutender Parameter der Fluss-Grundwasser-Interaktion. In fünf Projekten wurden Korngrößenverteilungen mit Bezug zu Siebanalysen angegeben. Bei anderen Projekten wurden die Korngrößen durch andere Methoden (z. B. Linienzählanalysen) bestimmt. Sowohl Methoden als auch Korngrößen waren nicht konsequent angegeben.

Aussagen über die Kolmation der Gewässersohle vor Baubeginn waren in den Fachberichten in etwa 55 Prozent der Projekte vorhanden. Bei den Projekten mit Angaben zur Kolmation wurde die Gewässersohle in etwa 35 Prozent der Fälle als stark und in knapp 50 Prozent als mässig kolmiert eingeschätzt (Bild 6).

Selten war eine geringe oder keine Kolmation angegeben. Es war nicht ersichtlich, weshalb in fast der Hälfte der Projekte die Kolmation nicht untersucht wurde.

Angaben zur Kolmation erfolgten mehrheitlich aufgrund der Einschätzung eines

Experten durch Untersuchung der Deckschicht (Verfüllung des Porenraums unter den Deckschichtkörnern (Schächl, Abegg + Hunzinger, 2002) oder Verfestigung resp. «Stiefelprobe». In zwei Projekten wurden Kolmationsberechnungen (nach Schächl, 1995) durchgeführt. In einem Drittel der Projekte wurde nicht erwähnt, auf welcher Basis die Einschätzung der Kolmation beruhte.

Die Häufigkeit des Auftretens einer Dekolmation durch Hochwasser ist ein massgebender Faktor zur Beurteilung der Durchlässigkeit der Gewässersohle. Nur für 20 Prozent der Standorte lagen Angaben zur Dekolmation vor. Bei den restlichen 80 Prozent wurde eine mögliche Dekolmation nicht thematisiert.

3.3 Numerische Modelle

Numerische Grundwassermodelle sind ein hilfreiches und anspruchsvolles Instrument, um hydrogeologische Prozesse wie Grundwasserströmungen oder Fluss-Grundwasser-Interaktionen zu konzeptualisieren und zu berechnen. In Wasserbauprojekten können Modelle beispielsweise dafür eingesetzt werden, um die Auswirkungen der wasserbaulichen Massnahmen auf das Grundwasser zu simulieren und verschiedene Szenarien in den verschiedenen Phasen des Projekts zu evaluieren. Dabei gibt es viele unterschiedliche Arten von numerischen Modellen. So können z. B. mit Hilfe von numerischen Oberflächenhydraulik-Modellen Flusswasserstände und Überflutungsflächen prognostiziert werden. Der Fokus lag hier jedoch auf dem Grundwas-

ser, weshalb in der Projektanalyse nur Modelle berücksichtigt wurden, welche die Grundwasserstände und -Strömungsverhältnisse im Modellgebiet berechnen. Dazu können Softwarepakete wie z. B. FeFlow oder MODFLOW verwendet werden.

Für mehr als ein Drittel der Wasserbauprojekte wurden numerische Grundwassermodelle erstellt. Alle Modelle wurden kalibriert. Eine Unsicherheitsanalyse bezüglich der kalibrierten Parameter und den darauf basierenden Voraussagen war dagegen nicht in der Dokumentation zu finden.

Die Modelle wurden dazu verwendet, die vorhandenen Daten zu interpretieren und den Einfluss des Wasserbauprojekts auf das Grundwasser zu simulieren. Daraus wurden Voraussagen bezüglich des Grundwasserstands und der Wasserbilanz des Grundwasserleiters abgeleitet.

Die Projektanalyse deutet darauf hin, dass bei Projekten mit mittleren bis hohen Risiken häufiger numerische Modellrechnungen durchgeführt wurden (Bild 7). Diese Aussage basiert jedoch auf einer geringen Datenlage. Ein Risiko wurde als mittel bzw. hoch eingestuft, wenn im Projektgebiet Nutzungen (wie z. B. Trinkwasserfassungen) oder Schadenspotenziale (wie z. B. belastete Standorte) vorhanden waren bzw. grosse Änderungen in den Austauschraten prognostiziert wurden.

Die Interviews bestätigen die Ergebnisse der Projektanalyse: Numerische Grundwasser-Modelle werden bei grösseren Wasserbauprojekten mit erwarteten Auswirkungen auf das Grundwasser fast immer,

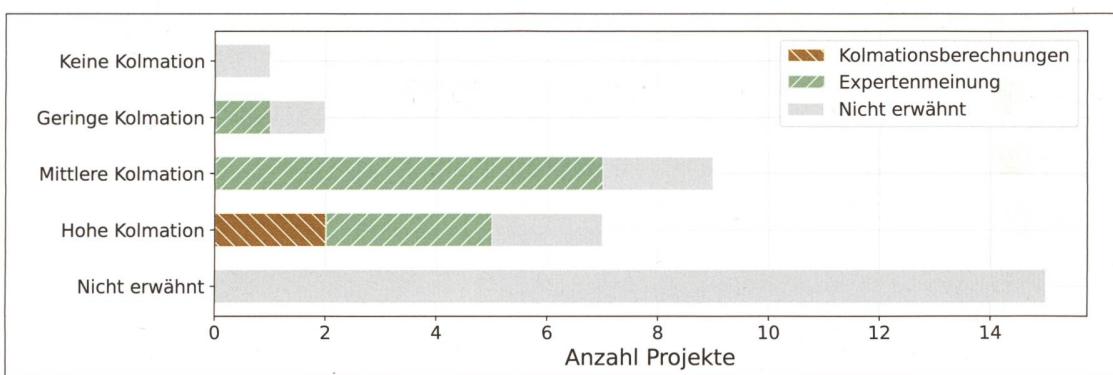


Bild 6: Einschätzung der Kolmation der Gewässersohle vor Baubeginn einschliesslich deren Beurteilungsmethode.

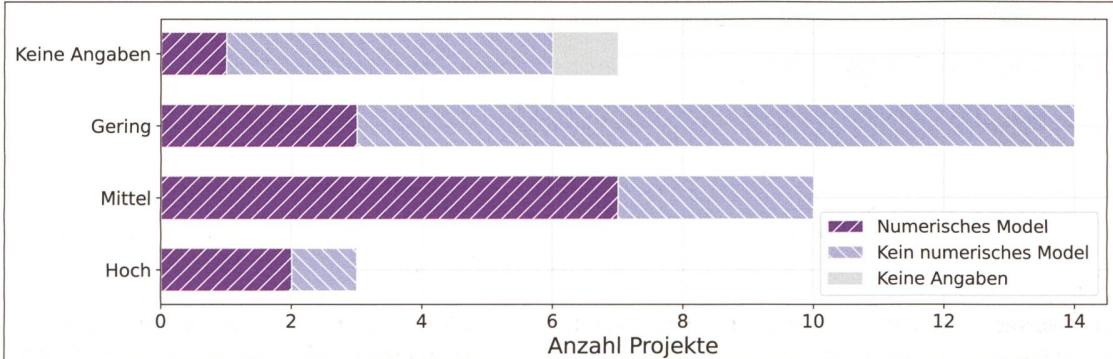


Bild 7: Erwartete Risiken der Wasserbauprojekte und Erstellung von numerischen Grundwassermodellen.

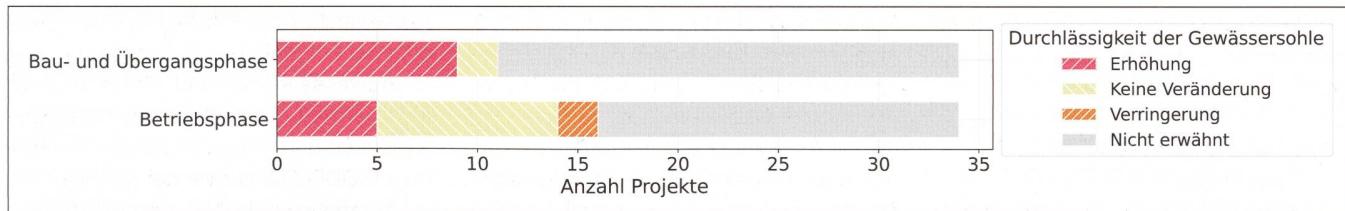


Bild 8: Erwartete Auswirkungen der wasserbaulichen Massnahmen auf die Durchlässigkeit der Gewässersohle während der Bau- und Übergangsphase (kurzfristig) und während der Betriebsphase (langfristig).

erstellt, bei kleineren Projekten hingegen eher selten, meist aus Gründen des hohen personellen und finanziellen Aufwands.

3.4 Prognose der Auswirkungen auf das Grundwasser

Auswirkungen von Wasserbauprojekten auf das Grundwasser hängen sowohl von den hydrogeologischen Rahmenbedingungen als auch von den wasserbaulichen Massnahmen ab. Letztere können den Wasserstand, die Breite des Flusses und die Durchlässigkeit bzw. hydraulische Leitfähigkeit der Gewässersohle beeinflussen und damit zu Veränderungen des Grundwasserstands und der Austauschraten zwischen Fließgewässer und Grundwasser führen (siehe Brunner et al., 2023). Zudem kann die Auswirkung eines Massnahmentyps in Abhängigkeit seiner Grösse stark variieren. Beispielsweise kann eine Verbreiterung der Gewässersohle von einem Bruchteil bis zu einem Vielfachen der aktuellen Sohlenbreite variieren. Entsprechend gross können die Unterschiede bezüglich deren Auswirkung auf die Fluss-Grundwasser-Interaktion so-

wohl in Bezug auf die Ausdehnung (Fläche) als auch auf das Ausmass sein.

Prognosen zu Veränderungen der Durchlässigkeit der Gewässersohle wurden in knapp einem Drittel der Projekte für die Bau- und Übergangsphase (kurzfristig) und in knapp der Hälfte der Projekte für die Betriebsphase (langfristig) aufgestellt (Bild 8). Bei der Mehrheit der Projekte wurde kurzfristig eine Zunahme, langfristig aber mehrheitlich keine signifikante Veränderung der Durchlässigkeit der Gewässersohle erwartet. Die Prognosen beruhen mehrheitlich auf der Einschätzung eines Experten und nur in Ausnahmefällen auf Grundlage von Kolmationsmodellen oder Schwebstoffanalysen im Fluss.

Häufiger wurden Prognosen zu Veränderungen der Austauschrate zwischen Fluss- und Grundwasser gemacht, nämlich in 55 Prozent der Projekte für die Bau- und Übergangsphase und in 70 Prozent der Projekte für die Betriebsphase (Bild 9). Den Erwartungen entsprechend, wurde während der Bau- und Übergangsphase öfters eine Zunahme der Infiltration (knapp

60 Prozent) als nach dem Erreichen eines stabilen Zustands nach Abschluss der Arbeiten prognostiziert (40 Prozent). Die Einschätzung erfolgte meist durch einen Experten oder auch mit Hilfe von numerischen Modellen. In nur je drei Projekten mit Angaben zur Austauschrate waren keine Informationen zur Methodik angegeben.

3.5 Monitoring und Interpretation der Daten

Aus den Interviews ging hervor, dass eine Monitoringstrategie häufig im Laufe des Projekts entwickelt wird, da man sich zuerst mit dem Standort, den vorhandenen hydrologischen und hydrogeologischen Bedingungen und dem bereits vorhandenen Datensatz vertraut machen müsse. Ausgearbeitet werde das Monitoring häufig auf Grundlage der vorhandenen Daten und der möglichen Auswirkungen auf das Grundwasser bzw. des Schadenpotenzials (Mobilisierung von Schadstoffen aus belasteten Standorten, Beeinträchtigung von Trinkwasserfassungen, Auenwäldern oder

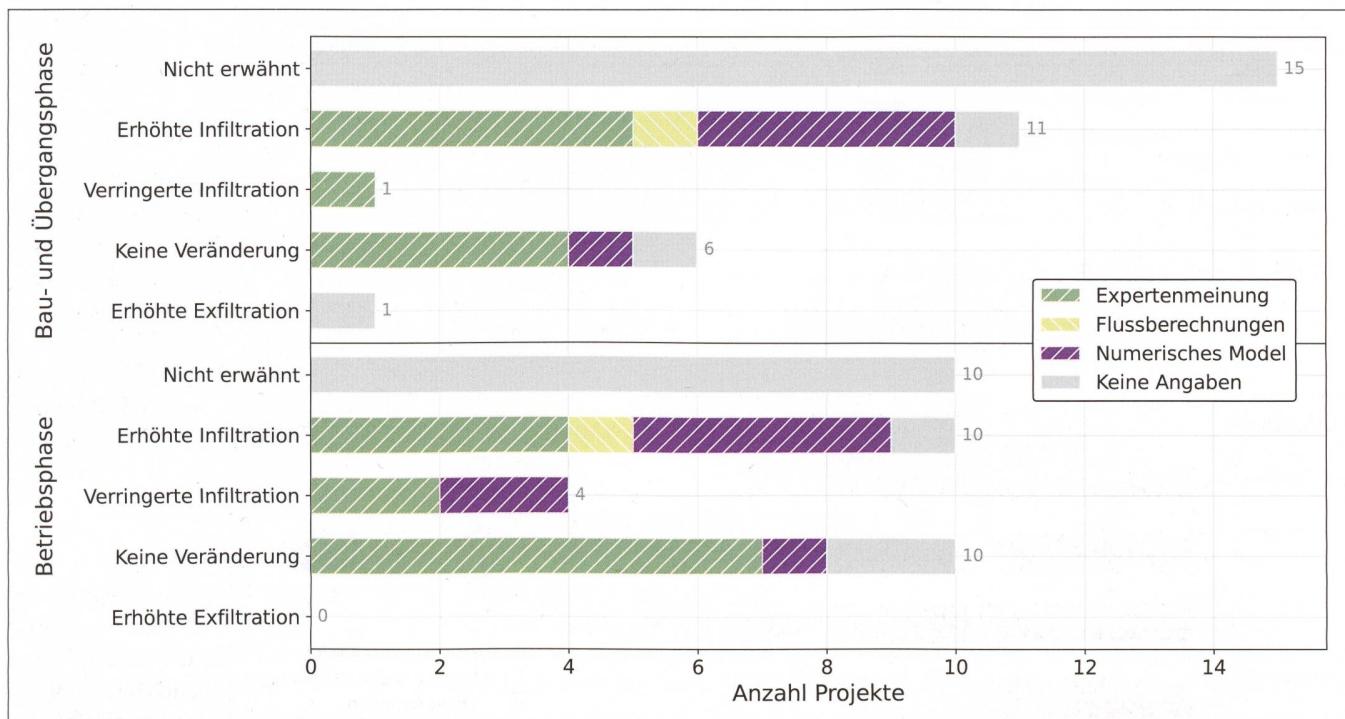


Bild 9: Angaben zu den erwarteten Auswirkungen der Wasserbauprojekte auf die Austauschraten zwischen Fluss- und Grundwasser während der Bau- und Übergangsphase und der Betriebsphase einschliesslich deren Beurteilungsmethode.

Feuchtgebieten, Vernässungs- oder Setzungsschäden etc.).

Bei der Durchführung eines Monitorings stehe laut den Interviewpartnern vor allem das Kosten-Nutzen-Verhältnis im Vordergrund. Ein Monitoring müsse einen Mehrwert für das Gesamtprojekt bringen, d.h. es müsse zielgerichtet erfolgen und die zuvor gestellten Fragen beantworten können. Generell würde die Grundwasser-Qualität in geringerem Umfang überwacht als die Grundwasser-Quantität, und hauptsächlich dann, wenn es in der Nähe des betreffenden Projekts Trinkwasserfassungen gebe.

Auch wurde angegeben, dass das Monitoring manchmal zu detailliert durchgeführt werde, so dass der Mehrwert im Verhältnis zum Aufwand klein sei oder das

generierte Wissen nicht in eine Form gebracht werde, die für Wasserbaufachleute verständlich sei.

3.5.1 Monitoring vor Baubeginn

Die Projektanalyse zeigte, dass vor Baubeginn in erster Linie der Abfluss oder der Wasserstand im Fluss und der Grundwasserstand systematisch erfasst werden (Bild 10). Auch die Wassertemperatur und die elektrische Leitfähigkeit wurden zumindest im Grundwasser in ca. einem Drittel der Projekte gemessen.

Hauptinhaltsstoffe wurden in 25 Prozent der Projekte analysiert, seltener wurde der pH-Wert oder der Sauerstoffgehalt ermittelt. Bezuglich der Mikrobiologie wurden teilweise Indikatorbakterien (20 Prozent) bestimmt, während die Messung der Ge-

samtzellzahl bislang noch kaum zum Einsatz kam.

Was das Monitoring von anorganischen und organischen Spurenstoffen vor Baubeginn anbelangt, wurden am häufigsten Schwermetalle, flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe (FHKW) und Pestizide (Wirkstoffe und Abbauprodukte) analysiert. In nur einem Projekt wurden Abwasserindikatoren (beispielsweise künstliche Süßstoffe) analysiert. Die Wahl der Messparameter wurde in der Regel in den Berichten nicht begründet. Eine breitere Palette an analysierten Substanzen diente meist als Beweissicherung an Standorten mit Trinkwasserfassungen oder Altlasten.

Die Spurenstoffe wurden meist nur im Grundwasser gemessen, um mögliche Veränderungen durch das Wasserbauprojekt

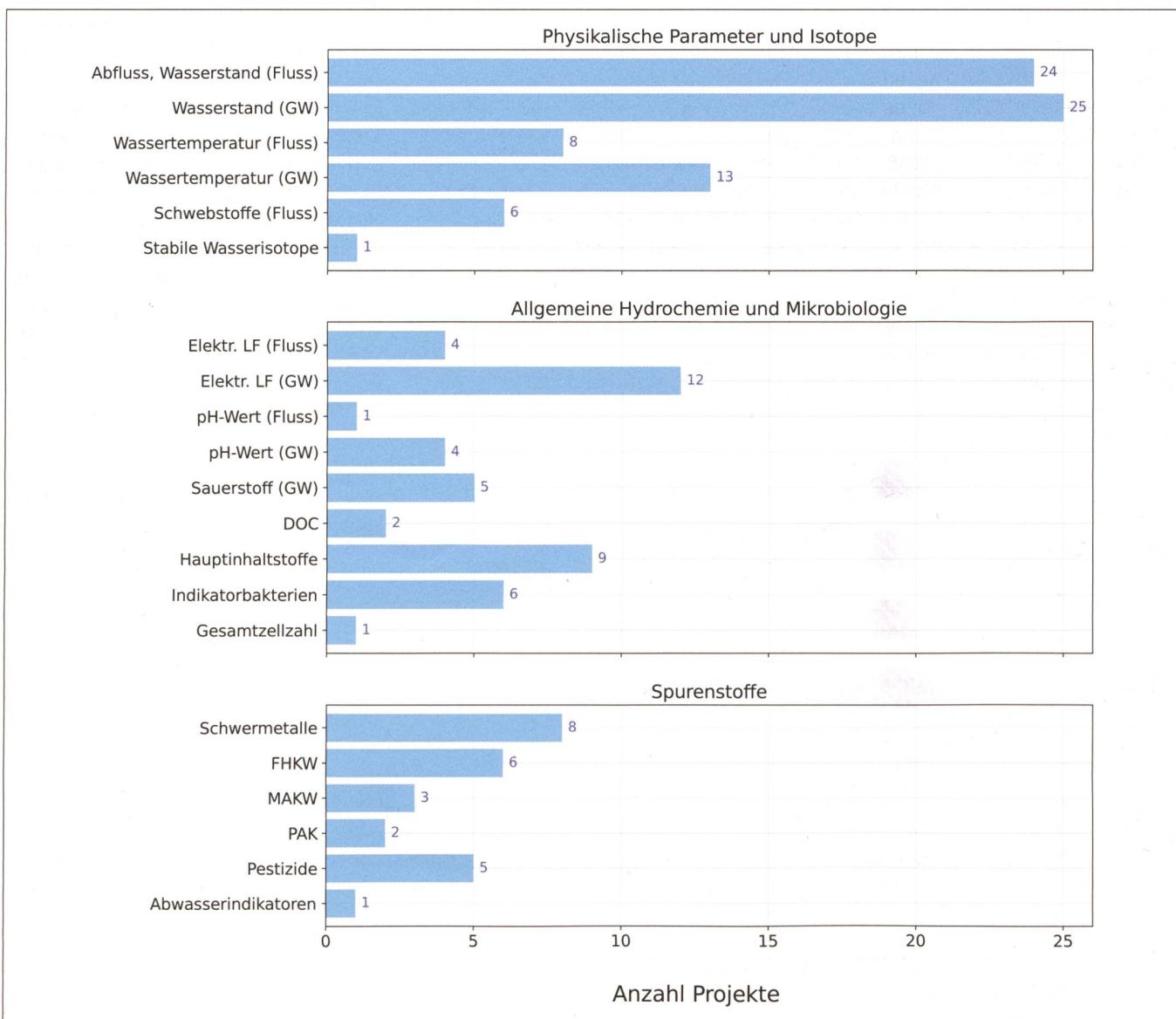


Bild 10: Monitoringparameter vor Baubeginn. GW: Grundwasser, elektr. LF: elektrische Leitfähigkeit, FHKW: flüchtige halogenierte Kohlenwasserstoffe, MAKW: Monozyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, PAK: Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, DOC: Gelöster organischer Kohlenstoff. Wenn möglich, wurde zwischen einer Erhebung der Parameter im Fluss und im Grundwasser (GW) unterschieden. Waren dazu keine Angaben vorhanden, so wurden die Messungen vor allem im Grundwasser und in einzelnen Fällen auch im Fließgewässer durchgeführt.

identifizieren zu können. Im Fliessgewässer wurden diese Stoffe nicht analysiert. In zwei Projekten wurden auch Spurenstoffe in den Sedimenten analysiert im Hinblick auf eine mögliche Mobilisierung der Stoffe durch das Projekt.

Die erhobenen Daten können direkt, das heisst ohne vertiefte Interpretationsansätze oder zusätzliche Modelle, verwendet werden. So kann beispielsweise ein direkter Vergleich von Zeitreihen von Grund- und Flusswasserständen Informationen über den Interaktionstyp liefern. Auch kann mit einem direkten Vergleich zwischen gemessenen Qualitätsparametern im Grund- und im Flusswasser grob abgeschätzt werden, wie sich Änderungen der Interaktion bzw. der Austauschraten möglicherweise auf die Wasserqualität auswirken können. Die erhobenen Daten können jedoch auch vertieft analysiert werden, was zu einem besseren Systemverständnis und somit zu einem deutlichen Mehrwert der erhobenen Daten führen kann. Dazu gibt es diverse Instrumente aus der Forschung und der Praxis wie z. B. *Radny et al., 2018, Rosenberry and LaBaugh, 2008; Weight, 2019*.

Die Projektanalyse zeigte, dass die erhobenen Daten in den verschiedenen Wasserbauprojekten meist nicht vertieft analysiert wurden. Eine Ausnahme sind die Wasserstands- und Abflussdaten, welche in einigen Projekten in vertiefte analytische oder numerische Berechnungen einflossen.

In gewissen Projekten wurden die elektrische Leitfähigkeit und die Hauptinhaltsstoffe zum Nachweis der Infiltration von Flusswasser verwendet und teils qualitative Aussagen zu Mischungsverhältnissen oder Aufenthaltszeiten gemacht. Eine quantitative Auswertung (z. B. durch die Dekonvolutionsmethode) erfolgte hingegen nicht. Spurenstoffe wurden hingegen nicht als Hinweis auf Fluss-Grundwasser-Interaktionen verwendet.

In 19 von den 25 Projekten, in denen der Grundwasserstand gemessen wurde, wurde dieser kontinuierlich gemessen (*Bild 11*). In einigen Projekten wurden diese mit manuellen Messungen in regelmässigen Zeitintervallen (z. B. monatlich) ergänzt. In drei Projekten wurde der Grundwasserstand nur gelegentlich bzw. selten (in der Regel ein- bis zweimal vor Beginn der Arbeiten) gemessen. Der Flusswasserstand wurde in 12 Projekten aus kontinuierlichen und in 2 Projekten aus manuell in regelmässigen Zeitintervallen gemessenen Abflussdaten berechnet. In je drei Projekten waren sowohl bei den Messungen im Grundwasser als auch im Fliessgewässer in der vorhandenen Projektdokumentation keine Angaben zur Messfrequenz vorhanden. Auch die Temperatur und die elektrische Leitfähigkeit wurden im Grundwasser meistens kontinuierlich gemessen.

Die Messdauer der Wasserstände betrug meist mehr als ein Jahr, in ca. einem

Drittel sogar mehr als fünf Jahre (*Bild 12*). Bei den Wasserstandsmessungen bzw. -berechnungen im Fluss war die Messdauer in 5 von 19 Projekten nicht angegeben.

Eine Analyse der räumlichen Auflösung der erhobenen Daten war nicht aussagekräftig, da sich die Projekte bezüglich Größe und Dynamik stark unterschieden. Deshalb wurde auf die Darstellung der Resultate verzichtet.

3.5.2 Monitoring während und nach den Bauarbeiten

Eine Analyse der Wasserbauprojekte zum Monitoring während und nach Abschluss der Bauarbeiten wurde nicht durchgeführt, da in den Berichten in der Regel dazu zu wenig Informationen vorhanden waren bzw. die entsprechenden Berichte nicht vorlagen.

Nach Angaben aus den Interviews findet während und nach Abschluss der Bauarbeiten meist ein Monitoring der Grundwasserstände statt. Insbesondere dann, wenn es in Flussnähe Trinkwasserfassungen gebe oder es im Monitoringkonzept vorgesehen war. Die Dauer des Monitorings variiere jedoch stark (zwischen 1 – 2, 2 – 3 und 5 – 10 Jahren) und richte sich danach, wie lange es dauert, bis sich der Grundwasserstand stabilisiert hat. Es gebe auch Projekte, in denen projektbezogene Messstellen in das kantonale Überwachungsnetz aufgenommen werden.

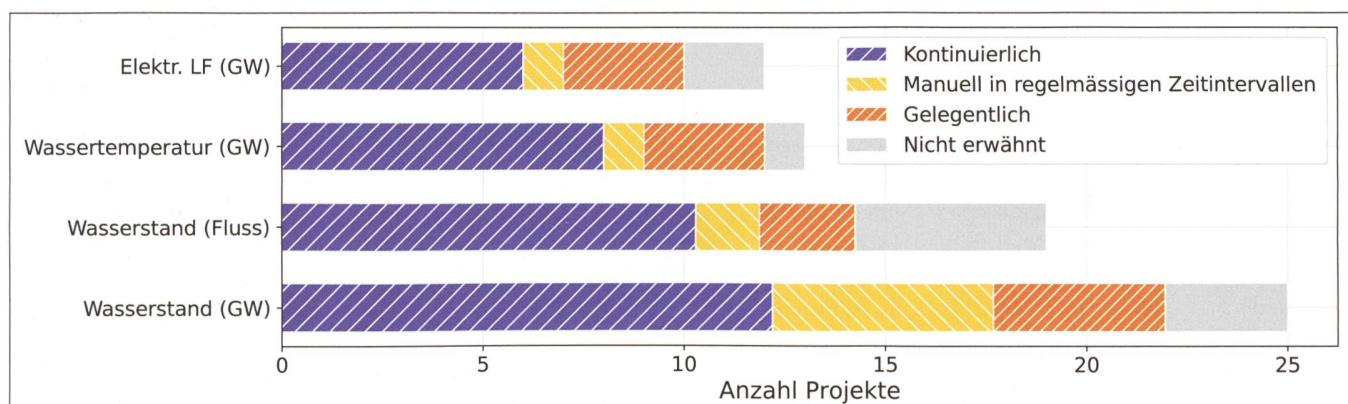


Bild 11: Monitoringfrequenz der elektrischen Leitfähigkeit (Elektr. LF) und der Wassertemperatur im Grundwasser (GW) und des Wasserstands im Fluss und im Grundwasser. Gelegentlich bedeutet, dass der Parameter in der Regel ein- bis zweimal vor Beginn der Arbeiten gemessen wurde. Projekte mit kontinuierlichen Messungen schliessen zum Teil manuelle Messungen in regelmässigen Abständen mit ein. Der Wasserstand im Fluss wurde in der Regel aus Abflussdaten berechnet.

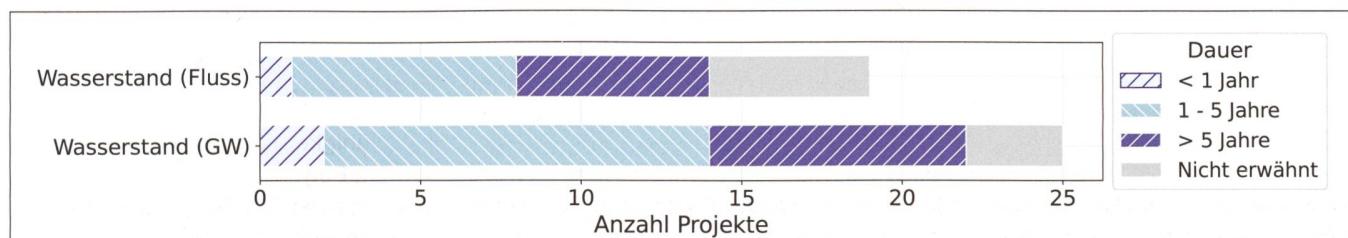


Bild 12: Messdauer von Wasserstandsmessungen im Fluss und im Grundwasser (GW).

4. Diskussion

4.1 Methodik

Das Ziel dieser Studie war es herauszufinden, wie und bis zu welchem Grad das Grundwasser in Wasserbauprojekten in der Schweiz in der heutigen Praxis berücksichtigt wird. Dazu wurden vorhandene Dokumentationen von 34 Wasserbauprojekten unterschiedlicher Grösse und Komplexität in verschiedenen hydrologischen und hydrogeologischen Bedingungen der Schweiz aufbereitet und analysiert. Die Analyse beinhaltete sowohl quantifizierbare Aspekte als auch eine kritische Hinterfragung der durchgeföhrten Arbeiten. Als quantifizierbare Aspekte sind die wasserbaulichen Massnahmentypen, die durchgeföhrten Untersuchungen zur Hydrogeologie und Sedimentologie und die Art des Monitorings zu nennen.

Die Ergebnisse der Projektanalyse können dabei durch folgende Tatsachen beeinflusst worden sein: (a) die Auswahl der Projekte beschränkte sich vor allem auf diejenigen mit vorhandener Dokumentation zu hydrogeologischen Untersuchungen, (b) es waren je nach Projekt nicht alle verfügbaren Unterlagen erhältlich, und (c) es ist davon auszugehen, dass die durchgeföhrten Arbeiten z. T. nicht vollständig dokumentiert sind, insbesondere wenn die Bauarbeiten noch nicht abgeschlossen waren.

So ist der Anteil an Wasserbauprojekten in der Schweiz, die das Grundwasser in irgendeiner Art und Weise berücksichtigen, mit 80 Prozent wahrscheinlich überschätzt und die Projekte mit Begleituntersuchungen nach Abschluss der Bauphase dagegen unterschätzt. Auch könnte jeweils der Anteil ohne Angaben («nicht erwähnt») zu hoch sein.

Da unabhängig von der Projektanalyse auch Interviews mit Wasserbau- oder Grundwasserspezialisten durchgeführt wurden, und die Aussagen sich oft mit den Ergebnissen der Projektanalyse deckten bzw. komplementär waren, ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse der Projektanalyse im Grossen und Ganzen die tatsächliche Situation in der Schweiz bezüglich der heutigen Praxis hydrogeologischer Begleituntersuchungen bei Wasserbauprojekten widerspiegeln. An dieser Stelle sei erwähnt, dass die in diesem Beitrag aufgeföhrten Ergebnisse der Interviews eine zusammenfassende Übersicht präsentieren, und nicht jede Aussage explizit beschrieben und berücksichtigt werden konnte.

4.2 Standortcharakterisierung

In den allermeisten Wasserbauprojekten erfolgte eine hydro(geo)logische Charakteri-

sierung des Projektgebiets und eine Bestimmung des Fluss-Grundwasser-Interaktionstyps. Dabei wurden sowohl räumliche als auch zeitliche Aspekte berücksichtigt. Die hydrogeologische Charakterisierung erfolgte – sofern dies beurteilt werden konnte – in der Regel dem Projekt angemessen und der identifizierte Fluss-Grundwasser-Interaktionstyp erschien uns meist plausibel. Häufig beruhten die Aussagen bezüglich Fluss-Grundwasser-Interaktionen auf kontinuierlichen Messungen der Wasserstände bzw. der Abflüsse, während das Potenzial an hydrochemischen Methoden, wie eine kontinuierliche Messung der elektrischen Leitfähigkeit oder die Analyse von Spurenstoffen, welche spezifisch in Fliessgewässern auftreten, wenig ausgeschöpft wurde. In 20 Prozent der Projekte fehlte eine Begründung des angegebenen Interaktionstyps, was viel erscheint, da dieser einer der wichtigsten Faktoren ist, um Auswirkungen von wasserbaulichen Massnahmen auf das Grundwasser prognostizieren zu können. Auch perkolative Verhältnisse wurden häufig identifiziert. Allerdings beruhte die Begründung in der Regel auf einer grossen Differenz zwischen dem Fluss- und dem Grundwasserstand und nicht auf anderen wichtigen Faktoren wie der Gewässerbreite, der Infiltrationsrate oder der hydraulischen Durchlässigkeit der Gewässersohle (Brunner et al., 2023). In diesem Zusammenhang muss jedoch betont werden, dass die Identifikation von perkolativen Verhältnissen im Feld schwierig ist. Dennoch ist eine detaillierte Untersuchung von perkolativen Verhältnissen wichtig, da Änderungen der Infiltrationsrate zu einem raschen und markanten Anstieg des Grundwasserstands führen können (Brunner et al., 2011). In den Interviews wurde ausserdem darauf hingewiesen, dass auch exfiltrierende Verhältnisse zu Problemen führen können. So kann eine verstärkte Exfiltration z. B. durch eine Sohlenabsenkung zu einer Abnahme des Grundwasserstands und zu Setzungen im Untergrund führen.

Während die Fluss-Grundwasser-Interaktion meist dokumentiert wurde, wurden Angaben zu sedimentologischen Faktoren, insbesondere der Kolmation der Gewässersohle seltener gemacht (in nur etwa der Hälfte der untersuchten Projekte). Diese Angaben beruhten in den meisten Fällen auf der Einschätzung eines Experten. Meistens fehlten auch Angaben zur Häufigkeit von Hochwasserereignissen, die zu einer Dekolmation der Gewässersohle führen resp. zum Abfluss, bei dem die Dekolmation der Sohle einsetzt. Auch in der For-

schung gibt es Wissenslücken zur Sedimentationsdynamik, vor allem bezüglich der zeitlichen und räumlichen Dynamik von Dekolmationsprozessen (Dubois und De Cesare, 2023). Dies gilt insbesondere für revitalisierte Fliessgewässer mit einer vielfältigen Morphologie und komplexer Dynamik.

4.3 Numerische Modelle

Gemäss den Interviewpartnern werden bei grossen Wasserbauprojekten mit erwarteten Auswirkungen auf das Grundwasser immer numerische Modelle erstellt, bei kleineren Projekten mit geringen Auswirkungen auf das Grundwasser hingegen seltener. Auch mangelndes Verständnis für die Anwendbarkeit bzw. den Mehrwert von numerischen Modellen in Wasserbauprojekten könnte dazu führen, dass kein Modell erstellt werde. Als die grössten Herausforderungen bei der Verwendung von numerischen Modellen wurden vor allem gute und zeitlich genügend hoch aufgelöste Grundlagendaten, die Kalibrierung des Modells und der Umgang mit den Unsicherheiten erwähnt. Auch wurde angesprochen, dass die Anforderungen an die Qualität der Modelle (konzeptionelles und numerisches Modell) nicht klar seien und festgelegt werden sollten. Die Ergebnisse einschliesslich der Unsicherheiten sollten für Laien verständlich präsentiert werden.

In einem Drittel der untersuchten Projekte wurden numerische Modelle erstellt. Die Modelle wurden dazu verwendet, um den Einfluss des Wasserbauprojekts auf die Grundwasser-Quantität zu simulieren, jedoch nicht, um Änderungen der Grundwasser-Qualität vorauszusagen. Das ist verständlich, da die Erstellung eines expliziten Transportmodells im Kontext von Fluss-Grundwasser-Interaktionen ein aktives Feld der Forschung mit vielen offenen Fragen ist.

In der Projektdokumentation fehlten wichtige Informationen über die Vorgehensweise bei der Erstellung der Modelle, z. B. über den Kalibriervorgang oder die Wahl der Randbedingungen. Ebenfalls weniger thematisiert wurde, anhand welcher Kriterien die räumliche und zeitliche Auflösung des Modells definiert wurden. Auch fehlten häufig Angaben bezüglich der Grundwasserneubildung. Ohne diese Angaben kann die Qualität der numerischen Modellierungen nicht überprüft werden. Wir erkennen jedoch an, dass diese Berichte nicht dazu gedacht sind, diese Art von Details zu liefern.

Unsicherheitsanalysen wurden nicht durchgeföhrte bzw. nicht dokumentiert. Hydrogeologische Modelle sind immer mit

Unsicherheiten verbunden, und es gibt diverse Ansätze, um diese zu quantifizieren, siehe z.B. Moeck *et al.*, 2022. Die Unsicherheit einer Modellvorhersage kann beispielsweise direkt aus den vorhandenen Daten der Kalibrierung berechnet werden. Solche Instrumente sind in Softwarelösungen wie FeFlow implementiert und können ohne grossen zusätzlichen Aufwand eingesetzt werden (Doherty, 2017). Es ist jedoch wahrscheinlich, dass solche Ansätze wenig bekannt sind und deshalb kaum benutzt werden.

In den Interviews wurde angegeben, dass die Erstellung von numerischen Modellierungen bei Wasserbauprojekten gefördert werden sollte, allerdings unter der Voraussetzung, dass Mindestanforderungen an die Qualität von konzeptionellen und numerischen Modellen zur Verfügung gestellt werden sollten. Auch wurde angefragt, dass Vorgaben bezüglich der Dokumentation der Modelle und der Unsicherheitsanalyse erarbeitet werden. Zudem sollten Kriterien festgelegt werden, bei welcher Art von Projekten und bei welchen Bedingungen es Sinn mache, ein numerisches Modell zu erstellen.

4.4 Prognosen zu Auswirkungen auf das Grundwasser

Vorhersagen zu Auswirkungen auf das Grundwasservorkommen nach Erreichen des Betriebszustands wurden in etwa 70 Prozent der Projekte gemacht. In 40 Prozent dieser Projekte wurde mit einer Zunahme der Infiltration gerechnet. Dies zeigt die Notwendigkeit, das Grundwasser rechtzeitig und explizit in Wasserbauprojekten zu berücksichtigen. Meistens nicht dokumentiert in den Berichten waren die unerwarteten Auswirkungen auf das Grundwasser, vor allem während der Bauarbeiten. Neben einem unerwartet starken Anstieg des Grundwasserstands durch eine rasche Zunahme der Infiltration während den Bauarbeiten wurde in den Interviews die Gefahr einer Kontamination der Dämme und der Grundwasserressource durch die Mobilisierung und/oder Freisetzung von Schadstoffen (auch durch das Betanken von Baumaschinen) genannt.

4.5 Monitoring und Interpretation der Daten

Mit Hilfe eines Monitorings können Auswirkungen auf das Grundwasservorkommen bzw. auf die Grundwasser-Quantität und -Qualität nachgewiesen werden. Dazu muss das Monitoring (a) auf die zu erwartenden Veränderungen ausgerichtet sein, (b) in Bezug auf die Projektdauer lan-

ge genug durchgeführt werden inklusive einer genügend langen Periode vor Baubeginn, und (c) räumlich ausreichend aufgelöst sein.

In den Projekten wurden mögliche Auswirkungen auf die Grundwasser-Quantität, insbesondere auf den Grundwasserstand im Monitoring meist berücksichtigt. Dazu wurden überwiegend kontinuierliche Daten erhoben, d.h. die zeitliche Auflösung ist an die häufig hohe zeitliche Variabilität der Fluss-Grundwasser-Interaktion angepasst. In wenigen Projekten war die Messdauer zu kurz, um saisonale Effekte zu identifizieren. Bei manuellen Messungen war die Messfrequenz oft nicht genügend hoch, um Auswirkungen einzelner hydrologischer Ereignisse erkennen zu können. Für Situationen, in denen die erwartenden Auswirkungen am grössten sind (Zunahme der hydraulischen Leitfähigkeit der Gewässersohle und Erhöhung des Flusswasserstands bei infiltrierenden Bedingungen), war die räumliche und zeitliche Auflösung sowie die Messdauer meist adäquat.

Auch andere Parameter, wie zum Beispiel die elektrische Leitfähigkeit und die Wassertemperatur, wurden im Grundwasser häufig kontinuierlich gemessen. Das Potenzial dieser Daten, z.B. den Anteil Flusswasser oder Fliesszeiten zu bestimmen, wurde häufig nicht ausgeschöpft.

Mögliche Auswirkungen des Wasserbauprojekts auf die Grundwasser-Qualität wurden weniger oft untersucht. Die Wahl der Messparameter, Messstandorte und Messfrequenzen war oft nicht begründet. Eine breitere Palette an analysierten Substanzen diente meist als Beweissicherung an Standorten mit Trinkwasserfassungen oder Altlasten. Es wurde selten thematisiert, dass Wasserbauprojekte auch positive Effekte auf die Grundwasser-Qualität haben können, wie z.B. eine Erhöhung des Sauerstoffgehalts oder die Abnahme von Schadstoffkonzentrationen durch Verdünnungseffekte bei Infiltration von geringer belastetem Flusswasser.

Gemäss den Interviewpartnern liegt der Mehrwert des Monitorings vor allem darin, unvorhergesehene Entwicklungen frühzeitig zu erkennen, damit das Projekt zeitig angepasst oder in Zusammenarbeit mit anderen Spezialisten neue Lösungen entwickelt werden können.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Analyse der Wasserbauprojekte und die Interviews haben klar gezeigt, dass die Bedeutung des Grundwassers bei Was-

serbauprojekten in den letzten Jahren stark zugenommen hat. Das Grundwasser wird in der heutigen Wasserbaupraxis der Schweiz berücksichtigt und in vielen Projekten umfassend untersucht. Verbesserungspotenzial besteht vor allem darin, bei den Untersuchungen systematischer vorzugehen und diese möglichst frühzeitig zu lancieren. Zu den einzelnen Begleituntersuchungen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Standortcharakterisierung

- Es wurde in fast allen Wasserbauprojekten erkannt, dass der Fluss-Grundwasser-Interaktionstyp eine wichtige Rolle zur Vorhersage von Auswirkungen auf das Grundwasservorkommen spielt. Sedimentologische Faktoren, insbesondere die Kolmation der Gewässersohle, wurden seltener thematisiert.
- Da die Fluss-Grundwasser-Interaktion sowohl von hydrogeologischen als auch von sedimentologischen Prozessen beeinflusst wird, ist eine gute und frühzeitige Zusammenarbeit von Hydrogeologen und Wasserbauern wichtig. Dies kann insbesondere helfen, Gefährdungsszenarien rechtzeitig zu identifizieren. Eine besonders schwierige Ausgangslage besteht bei infiltrierenden Verhältnissen, bei denen die Kolmation der Gewässersohle zu perkolativen Bedingungen führen kann (Brunner *et al.*, 2023).

Numerische Modelle

- Numerische Modelle wurden im Rahmen von Wasserbauprojekten relativ häufig erstellt, vor allem bei Projekten mit grossen erwarteten Auswirkungen auf das Grundwasser. Numerische Modelle werden also insbesondere dann eingesetzt, wenn ein Mehrwert daraus ersichtlich ist.
- Die Dokumentation der durchgeführten Modellarbeiten war heterogen und wies Lücken auf. Eine Möglichkeit einer verbesserten Dokumentation könnte z.B. durch ein allgemeines Pflichtenheft erreicht werden, welches aufzeigt, wie Modelle aufgebaut, dokumentiert und auf ihre Unsicherheiten hin überprüft werden sollten. Ein solches Pflichtenheft kann auch im Rahmen der Projektbearbeitung an die Herausforderungen und Ansprüche des Projekts angepasst und weiterentwickelt werden.

Prognosen der Auswirkungen auf das Grundwasser

- Die Auswirkungen von Wasserbauprojekten auf Trinkwasserfassungen, Infrastruktur und Altlasten wurden von Projektbeginn an systematisch berücksichtigt. Grundwasserabhängige Ökosysteme und landwirtschaftliche Kulturen oder das Grundwasser als eigenes System wurden hingegen seltener thematisiert.
- Bei der Analyse der Auswirkungen auf das Grundwasservorkommen sollten nicht nur die möglichen negativen Aspekte hervorgehoben, sondern auch die positiven Aspekte berücksichtigt werden. Beispielsweise kann eine verstärkte Infiltration die Grundwasser Verfügbarkeit in Trockenperioden erhöhen. Auch exfiltrierende Situationen können insbesondere bei Hitzeperioden zu kühleren Wassertemperaturen in Fliessgewässern führen, die insbesondere für Fische wichtig sind.

Monitoring und Interpretation der Daten

- Im Rahmen der Wasserbauprojekte wurde eine Vielzahl physikalischer und chemischer Daten erhoben. Es fällt jedoch auf, dass diese – bis auf die

Wasserstände – oft nicht gezielt erhoben oder ausgewertet wurden. Dabei ist eine gute Datengrundlage essentiell, sei es für die Abschätzung des Risikos, für die Erstellung von numerischen Modellen oder auch für die Entwicklung der Monitoring-Strategie.

Im Rahmen dieses Projekts wird für die Praxis ein methodisches Vorgehen in Form einer Toolbox entwickelt, mit deren Hilfe der Einfluss von Wasserbauprojekten auf das Grundwasser systematisch ermittelt werden kann. Dieses Instrument soll auch Planern von Wasserbauprojekten bei der Wahl geeigneter hydrogeologischer Begleituntersuchungen unterstützen und aufzeigen, zu welchem Zeitpunkt des Projekts welche Daten zu welchem Zweck erhoben werden sollten und wie diese interpretiert werden können. Dadurch können Projektmittel effizienter und gezielter eingesetzt und die Grundwasserthematik umfassend berücksichtigt werden. Das in der Toolbox beschriebene Vorgehen soll für die unterschiedlichen Fachrichtungen und Disziplinen, welche in Wasserbauprojekten involviert sind, nachvollziehbar sein. Eine solche Toolbox kann dazu beitragen, das gegen-

seitige Verständnis der verschiedenen Fachdisziplinen zu fördern und potenzielle Herausforderungen bezüglich des Grundwassers frühzeitig zu erkennen.

Dank

Wir bedanken uns herzlich bei den Interviewpartnern *Pierre Christe* (Kanton Wallis), *Roger Kolb* (Niederer + Pozzi Umwelt AG), *Rudolf Pesch* (Kanton Wallis), *Matthias Oplatka* (Kanton Zürich), *Rolf Tschumper* (Kanton Bern), *Bernhard Valenti* (Internationale Rheinregulierung) und *Jürg Wanner* (Kellerhals + Haefeli AG) für die ausführlichen, offenen und sehr wertvollen Antworten. Ohne diese hätten uns wichtige Informationen zu diesem Beitrag gefehlt.

Besten Dank an die Begleitgruppe dieses Projekts für die wertvolle Unterstützung insbesondere bei der Auswahl der Projekte, der Bereitstellung von Fachberichten und der Entwicklung der Toolbox. Ein grosses Dankeschön an alle, die uns Dokumentationen zu den Wasserbauprojekten zur Verfügung gestellt haben.

Schlussendlich bedanken wir uns beim Bundesamt für Umwelt (BAFU) für die Finanzierung dieses Projekts.

Quellen:

- Brunner, P., Cook, P. G., Simmons, C. T. (2011), Disconnected Surface Water and Groundwater: From Theory to Practice. *Groundwater*, 49, 460–467. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2010.00752.x>
- Brunner, P., Hunkeler, D., Schächlhi, U., Zimmermann, S. (2023), Grundlagen der Fluss-Grundwasser-Interaktionen. *Wasser Energie Luft* 2023, Heft 2, 109–116.
- CSD Ingénieurs SA (2019), Eaux souterraines et aménagements de cours d'eau, Synthèse des connaissances concernant l'impact des aménagements de cours d'eau sur les eaux souterraines. Interne Bericht BAFU.
- Doherty, J. (2017), PEST. Model-independent parameter estimation – User Manual parts I and II (7th Edition). Brisbane, Australia: Watermark Numerical Computing.
- Dubois, R., De Cesare, G. (2023). The clogging of riverbeds: A review of the physical processes. *Earth-Science Reviews*, Volume 239, 104374.
- Moeck, C., Schilling, O. S., Künze, R., Brunner, P., Schirmer, M. (2022). Grundwassermodellierung –

- Warum auch Modellunsicherheiten quantifiziert werden sollten. *Aqua & Gas*, 7, 27–33.
- Rosenberry, D. O., LaBaugh, J. W. (2008), Field techniques for estimating water fluxes between surface water and ground water: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 4–D2, 128 p.
- Radny, D., Schirmer, M., Guenat, C., Luster, J., Perona, P., Bayer, P., Stauffacher, M., Seidl, R., Hollender, J., Baumann, M., (2018). «Fluss-revitalisierungsforschung – Wissenschaftliche Erkenntnisse zweier Forschungsprojekte im Einzugsgebiet der Thur.» *Aqua & Gas*, 4, 30–38.
- Schächlhi, U. (1995). Basic Equations for Siltation of Riverbeds. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 121, No. 3.
- Schächlhi, Abegg + Hunzinger (2002). Kolmation. Methoden zur Erkennung und Bewertung. Im Auftrag der Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz EAWAG, Dübendorf.
- Weight, W. (2019), Practical Hydrogeology: Principles and Field Applications, 3rd Edition. Publisher: McGraw Hill.

Autorinnen und Autoren:

- Théo Blanc**, Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie (CHYN), Universität Neuenburg, Rue Emile-Argand 11, 2000 Neuchâtel. theo.blanc@unine.ch
- Philip Brunner**, Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie (CHYN)
- Daniel Hunkeler**, Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie (CHYN)
- Clément Roques**, Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie (CHYN)
- Florian Kobierska**, Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie (CHYN)
- Üeli Schächlhi**, Flussbau AG
- Annick Rast**, CSD Ingénieurs SA
- Eric Di Gioia**, CSD Ingénieurs SA
- Stephanie Zimmermann**, Bundesamt für Umwelt BAFU