# Hydroelektrische Potenziale im Bergbau und der Einfluss von Planungsparametern auf die technische und wirtschaftliche Umsetzung von Wasserkraftanlagen in Hartgesteinsbergwerken

---

# Hydroelectric potentials in mining and the influence of mine planning parameters on the technical and economical implementation of hydropower in hard-rock mining

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktors der Ingenieurwissenschaften**

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

**Yannick Feldmann, M. Sc. RWTH**

**Berichter**: Univ.-Prof. Dr. Bernd Lottermoser
Univ.-Prof. Dr. mont. Nikolaus August Sifferlinger

Tag der mündlichen Prüfung: 10.12.2025

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

# Vorwort

Was als Neugier für die Rohstoffgewinnung begann, wurzelte in meiner Heimat, wo der Bergbau über Generationen den Alltag geprägt hat. Schon früh entstand so ein Interesse an den technischen und gesellschaftlichen Fragestellungen rund um die Gewinnung mineralischer Rohstoffe. Die Entscheidung, *Rohstoffingenieurwesen* an der RWTH Aachen University zu studieren, war rückblickend eine der besten meines Lebens. Mit dem anschließenden Masterstudium im Rahmen des *European Mining Course* öffnete sich mir eine Welt voller spannender Herausforderungen und internationaler Perspektiven im Bereich des Bergbaus. Diese Zeit legte nicht nur das fachliche Fundament für meine Promotion, sondern prägte mich auch persönlich.

Die vorliegende Dissertation entstand zu großen Teilen während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und später als Oberingenieur am Institute of Mineral Resources Engineering (MRE) der RWTH Aachen University. In dieser Zeit hatte ich das Privileg, viele Facetten des Bergbaus, aber auch zahlreiche spannende Menschen kennenzulernen.

Mein besonderer Dank gilt *Professor Bernd Lottermoser* für seine wertvolle Betreuung, seine inspirierende wissenschaftliche Führung und die vielen Impulse, die mir halfen, meine Forschung in die richtige Richtung zu lenken. Ebenso danke ich *Professor Nikolaus Sifferlinger* für seine Rolle als Zweitgutachter, für seine konstruktiven Ratschläge sowie für die vielen Gespräche, in denen neben dem Fachlichen auch der Mensch im Mittelpunkt stand.

Ein herzlicher Dank geht an meine Kollegen am MRE. Die herzliche Zusammenarbeit, der fachliche Austausch und viele gemeinsame Diskussionen haben diese Zeit nicht nur inhaltlich bereichert, sondern auch zu bleibenden Freundschaften geführt. Für diese großartige Zeit möchte ich mich insbesondere bei *Johannes E.*, *Johannes S.*, *Julian*, *Max*, *Nina*, *Shima* und *Theo* bedanken.

Ebenso danke ich allen, die in unterschiedlichster Weise zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben, sei es als studentische Hilfskräfte, Projektpartner oder als Wegbegleiter innerhalb und außerhalb der Wissenschaft. Ein besonderer Dank gilt auch meinen Freunden aus dem Studium, mit denen ich unvergessliche Erfahrungen teilen durfte, insbesondere *Sebastian*, *Max*, *Fabian* und *Christoph*.

Besonders danke ich *Marlene* für ihre unermüdliche Motivation, ihr offenes Ohr und den beständigen Zuspruch, gerade in herausfordernden Phasen. Deine Unterstützung hat einen großen Unterschied gemacht.

Mein tiefster Dank gilt meiner Familie, vor allem meinen Eltern. Ihre bedingungslose Unterstützung, ihr Vertrauen und ihre Ermutigung in allen Lebenslagen haben mir über all die Jahre hinweg den Rücken gestärkt und diese Arbeit überhaupt erst ermöglicht.

Dieses Vorwort ist Ausdruck meiner aufrichtigen Dankbarkeit gegenüber allen, die mich auf dem Weg zu dieser Dissertation begleitet und unterstützt haben. Die vergangenen Jahre waren geprägt von Herausforderungen, aber auch von persönlichem Wachstum und tiefer Erfüllung. Allen, die dazu beigetragen haben, diesen Meilenstein zu erreichen, gilt mein herzlicher Dank.

Aachen, August 2025

# Beiträge Dritter

Yannick Feldmann ist der Hauptautor dieser Dissertation und hat die Konzeption, die Methodik, die Untersuchung, die formale Analyse, die Validierung, die Visualisierung, den ursprünglichen Entwurf sowie das abschließende Lektorat durchgeführt und trägt somit die Gesamtverantwortung. Dennoch wäre diese Arbeit ohne die Unterstützung und Mitwirkung zahlreicher Beteiligter nicht möglich gewesen:

- *Bernd Georg Lottermoser*, Erstprüfer und Betreuer dieser Arbeit, leistete durch wertvolle Ratschläge und kritisches Feedback zum Aufbau, zu den Methoden und zum Entwurf der Monografie einen wesentlichen Beitrag zur Qualität der Forschung.
- *Nikolaus August Sifferlinger*, Zweitprüfer und Betreuer, trug durch seine Ratschläge sowie seine stete Bereitschaft zu fachlichen Diskussionen maßgeblich zur Relevanz dieser Arbeit bei.
- *Alexander Hennig und Rudolf Suppes* initiierten federführend das Smart$H_2$OEnergy-Projekt (Förderkennzeichen 033R206A) und lieferten damit die Grundlage für die Idee, Wasser im Bergbau energetisch zu nutzen, sowie die Möglichkeit, dieses Thema im Rahmen der dreijährigen Projektförderung vom BMBF wissenschaftlich bearbeiten zu können.
- *Gerrit Blauermel, Thomas Hillig, Moritz Roth, Bertalan Alapfy, und Lorenz Wiesmeier* haben als Projektpartner zum Erfolg des Smart$H_2$OEnergy-Projekts beigetragen. Mit vielen fachlichen und inhaltlichen Diskussionen unterstützten sie die Konkretisierung der Dissertation.
- *Easy Hydro Ltd.*, insbesondere *Daniele Novara* und *Miguel Crespo Chacon,* ermöglichte mit der Bereitstellung von Daten für die Fallstudie in Kapitel 6 eine fundierte wirtschaftliche und technische Betrachtung.
- Verschiedene Abschlussarbeiten haben angrenzende Themen zum Smart$H_2$OEnergy-Projekt und/oder der Dissertation bearbeitet. *Till Gutmann* recherchierte Planungsparameter für den peruanischen Bergbau. *Jean-Martin Knöpke* entwickelte ein Wasserbilanzmodell eines Kupferbergwerks. *Patrick Lischka* quantifizierte Volumenströme in der mineralischen Aufbereitung von Kupfer und leitete daraus vereinfachte hydroelektrische Potenziale ab. *Lisa Kamp* erarbeitete eine Methodik zur Evaluierung von Fluidströmen im Bergbau. *Marvin Tiedge* quantifizierte den auf Laugungshalden gesammelten Niederschlag und ermittelte ein hydroelektrisches Potenzial für eine Fallstudie. *Haoxuan Yuan* entwickelte eine Lebenszyklusanalyse eines Kleinwasserkraftwerks im peruanischen Bergbau.
- *Percy Linares Lopez*, *Daniel Kieburg und Clara Kowollik* unterstützten als studentische Hilfskräfte die Arbeit am Smart$H_2$OEnergy-Projekt. *Niklas Bender* und *Selina Pelzer* wirkten als studentische Hilfskräfte bei der Erstellung von Skizzen und Recherchen zur Dissertation mit.
- *Johannes Sieger* und *Julian Lassen* haben durch ihre fundierten Kommentare und Anregungen maßgeblich zur Weiterentwicklung und Qualität der Arbeit beigetragen.

# Kurzfassung

Der internationale Bergbausektor liefert die mineralischen Rohstoffe, die als Grundlage für nahezu alle Industrie- und Konsumgüter dienen. Neben der Herausforderung, die stetig steigende Nachfrage zu decken, steht der Bergbau vor der Aufgabe, umweltverträglicher zu werden, insbesondere im Hinblick auf den hohen Energie- und Wasserverbrauch. Die Integration von Wasserkraft in bergbauliche Prozesse bietet hierbei einen Ansatz, den betrieblichen Energiebedarf zu senken und gleichzeitig dem eingesetzten Wasser einen zusätzlichen funktionalen Nutzen zu verleihen.

Die **Einleitung** dieser Arbeit definiert den fachlichen Rahmen durch die Verknüpfung der Themenbereiche Wasserkraft und Bergbau. Dabei werden drei zentrale Forschungslücken identifiziert: Erstens fehlt bislang eine systematische Erfassung und Bewertung hydroelektrischer Potenziale im Bergbau. Zweitens ist unklar, welchen Einfluss bergbauliche Planungsparameter auf das Entstehen und die Nutzbarkeit dieser Potenziale haben. Drittens sind die technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für die Nutzung von Fluiden mit Feststoffanteilen bisher kaum untersucht. Aus diesen Lücken leiten sich die drei zentralen Ziele der Dissertation ab. Grundlage ist die Forschungshypothese, dass in Bergwerken bislang unerschlossene, prozessbedingte hydroelektrische Potenziale bestehen, deren Erschließung sowohl technisch realisierbar als auch wirtschaftlich sinnvoll sein kann.

**Kapitel 2** legt die theoretischen Grundlagen der Arbeit dar. Es gibt zunächst einen Überblick über den internationalen Bergbau und dessen Prozesse, mit besonderem Fokus auf die Nutzung und das Management von Wasser. Die Rolle des Wassers im Bergbau, einschließlich seiner Bilanzierung, wird umfassend dargestellt. Der zweite Teil widmet sich den physikalischen und technischen Grundlagen der Wasserkraft: Es werden die Prinzipien der Energiegewinnung aus Wasser, die Funktionsweise von Wasserkraftanlagen sowie zentrale Aspekte ihrer Planung erläutert. Diese Grundlagen bilden das theoretische Fundament für die anschließende Untersuchung hydroelektrischer Potenziale im Bergbau.

**Kapitel 3** stellt den aktuellen Stand der Technik und Forschung dar, basierend auf einer systematischen Literaturrecherche. Dabei werden kommerziell verfügbare Wasserkraftanwendungen im Bergbau und verwandte Technologien beleuchtet. Während es in der Praxis vereinzelte Anwendungen gibt, wie beispielsweise die Kühlwassernutzung im südafrikanischen Steinkohlebergbau und drei aktive Anlagen der Firma Easy Hydro, ist das Thema in Wissenschaft und Forschung bislang kaum systematisch untersucht. Vorliegende Studien beschränken sich meist auf Kleinstwasserkraftanwendungen oder bleiben konzeptionell. In angrenzenden Industrien werden Durchstrom- und Pumpenturbinen erfolgreich in Wassernetzwerken eingesetzt, was auf ein Übertragungspotenzial für bergbauliche Anwendungen hinweist.

In **Kapitel 4** erfolgt eine systematische Identifikation der hydroelektrischen Potenziale im Bergbau. Dazu werden in einem iterativen Prozess 55 typische Fluidströme identifiziert. Mithilfe von Potenzialkriterien werden diejenigen Ströme ausgewählt, die potenziell für eine Wasserkraftnutzung geeignet sind. Die verbleibenden 23 Fluidströme werden in sieben Potenzialkategorien zusammengefasst: (1) Rohrleitungsabschnitte, (2) betriebliche Wassernetzwerke, (3) Materialtransporte in der Aufbereitung, (4) anlagenspezifische Potenziale, (5) hydraulische Materialtransporte, (6) betriebliche Wasserquellen und (7) Fallleitungen. Für jede Kategorie sind der zugrunde liegende bergbauliche Prozess, die Rahmenbedingungen, die potenzielle technische Umsetzung und die Ergebnisse einer SWOT-Analyse dokumentiert. Dieses Kapitel bildet die Grundlage für eine weitergehende Analyse der hydroelektrischen Potenziale im Bergbau und zeigt, wie diese hydroelektrischen Potenziale methodisch identifiziert, kategorisiert und bewertet werden können.

In **Kapitel 5** wird der Einfluss bergbaulicher Planungsparameter auf das hydroelektrische Potenzial analysiert. Die Untersuchung stützt sich auf drei wesentliche Planungskategorien, die die fluidführenden Prozesse im Bergbau umfassend abdecken: die Frischwasserversorgung, die Aufbereitungsanlagen sowie das Wassernetzwerk und die Rohrleitungen zum Transport von Aufbereitungsbergen. In einer detaillierten Analyse werden insgesamt 435 Planungsparameter in diesen Kategorien identifiziert: 126 Parameter zur Frischwasserversorgung, 173 Parameter zur Aufbereitungsanlage und zum Wassernetzwerk sowie 136 Parameter zum Bergeteich und der Rohrleitung für den Transport der Aufbereitungsberge. Dabei wird insbesondere untersucht, welche Parameter das hydroelektrische Potenzial direkt beeinflussen und ob sie für eine Optimierung beeinflussbar sind. Die Ergebnisse zeigen, welche Parameter für eine wirtschaftlich und technisch effiziente Nutzung des hydroelektrischen Potenzials gezielt angepasst werden können.

**Kapitel 6** präsentiert eine praxisnahe Fallstudie mit drei Szenarien, in der Daten eines realen Anwendungsfalls für ein Modell genutzt werden, um die wirtschaftliche und technische Machbarkeit hydroelektrischer Anlagen im Bergbau zu bewerten. Szenario A basiert auf einer Pumpenturbineninstallation in einer Rohrleitung für Laugungsflüssigkeit in einem Goldbergwerk und ermittelt einen maximalen Nettobarwert von 7,5 Mio. USD sowie Stromgestehungskosten von 0,028-0,224 USD/kWh. In Szenario B wird die Optimierung der in Kapitel 5 identifizierten Planungsparameter untersucht, wobei festgestellt wird, dass eine prozentuale Änderung der Dichte, Nettofallhöhe und Effizienz der Turbine jeweils einen Gegenwert von 75.882 USD pro Prozentpunkt hat. Eine Erhöhung des Volumenstroms führt zu einem Gegenwert von 21.413 USD bis 64.627 USD pro Prozentpunkt. Szenario C untersucht die Auswirkungen des Einsatzes von Aufbereitungsbergen anstelle der Laugungsflüssigkeit und zeigt, dass auch bei zusätzlichen Verlusten von 70 % und unveränderten Betriebskosten ein positiver NPV von 1,12 Mio. USD erreicht werden kann. Diese Szenarien veranschaulichen, dass die hydroelektrische Nutzung von Fluiden im Bergbau ein bedeutendes Potenzial zur Energieerzeugung bietet.

**Kapitel 7** diskutiert die zentralen Ergebnisse der Arbeit im Hinblick auf die Forschungsfragen und die zugrunde liegende Hypothese. Die systematische Identifikation und Kategorisierung hydroelektrischer Potenziale sowie die Analyse relevanter Planungsparameter bilden die Grundlage für eine energetische Nutzung von Fluidströmen im Bergbau. Die durchgeführte Fallstudie bestätigt darüber hinaus die technische und wirtschaftliche Machbarkeit entsprechender Anwendungen unter realistischen Bedingungen. Besonders deutlich wird, dass unkonventionelle Kleinwasserkraftanlagen, im Gegensatz zu konventionellen Wasserkraftwerken, aufgrund vergleichsweise geringer Investitionskosten und kürzerer Amortisationszeiten wirtschaftlich attraktiv sein können. Damit unterstreicht die Arbeit die Relevanz einer frühzeitigen und systematischen Erschließung hydroelektrischer Potenziale im Bergbau und liefert eine belastbare Grundlage für weiterführende Forschung und praktische Umsetzung.

**Kapitel 8** zieht ein Fazit zu den zentralen Erkenntnissen der Arbeit, formuliert übergeordnete Schlussfolgerungen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen. Die Ergebnisse zeigen, dass bislang ungenutzte hydroelektrische Potenziale im Bergbau existieren und systematisch identifiziert, bewertet und zum Teil auch optimiert werden können. Zahlreiche dieser Potenziale lassen sich mit bewährten Technologien, wie Pumpenturbinen, technisch umsetzen und wirtschaftlich betreiben. Daraus folgt die Empfehlung, dass Bergwerksbetreiber gezielt nach hydroelektrischen Potenzialen in ihren Anlagen suchen und deren Realisierbarkeit prüfen sollten. Auch die Nutzung feststoffhaltiger Suspensionen wie Aufbereitungsberge erscheint grundsätzlich möglich, da selbst bei hohen Verlusten ein wirtschaftlicher Betrieb denkbar ist. Langfristig bietet die systematische Nutzung hydroelektrischer Potenziale eine vielversprechende Perspektive, um Energieeffizienz, Ressourcennutzung und Nachhaltigkeit im Bergbau zu verbessern.

# Abstract

The international mining sector provides the mineral resources that serve as the foundation for nearly all industrial and consumer goods. In addition to the challenge of meeting steadily increasing demand, the industry faces the imperative of becoming more environmentally sustainable, particularly with regard to its high energy and water consumption. The integration of hydropower into mining operations presents a potential approach to reduce energy demand while simultaneously adding functional value to the water used on site.

The **introduction** of this thesis defines the research framework by linking the topics of hydropower and mining. Three central research gaps are identified: Firstly, a systematic assessment and categorization of hydroelectric potential in mining has so far been lacking. Secondly, it remains unclear how mine planning parameters influence the emergence and usability of such potentials. Thirdly, the technical and economic conditions for utilizing fluids with solid content have not been sufficiently investigated. These gaps form the basis for the three main objectives of the dissertation. The underlying research hypothesis states that mining operations contain process-related, previously untapped hydroelectric potentials, the exploitation of which can be both technically feasible and economically viable.

**Chapter 2** outlines the theoretical foundations of the work. It begins with an overview of international mining and its processes, with a special focus on water use and management. The role of water in mining, including its accounting and balancing, is presented in detail. The second part introduces the physical and technical principles of hydropower: the fundamentals of energy generation from water, the operation of hydropower plants, and key aspects of their design and planning. These fundamentals provide the theoretical basis for the subsequent analysis of hydroelectric potentials in mining.

**Chapter 3** presents the current state of research and technology, based on a systematic literature review. It examines commercially available hydropower applications in mining and related technologies. While a few practical examples exist, such as the use of cooling water in South African coal mines and three active installations by the company Easy Hydro, the topic has not yet been systematically explored in scientific research. Existing studies are often limited to micro-hydropower applications or remain conceptual. However, the use of inline turbines and pump-as-turbine systems in water distribution networks of other industries suggests potential for transfer to mining applications.

**Chapter 4** provides a systematic identification of hydroelectric potentials in mining. In an iterative process, 55 typical fluid streams are identified. Using defined criteria, those streams with hydropower potential are selected, resulting in 23 fluid streams grouped into seven potential categories: (1) sections of a pipeline, (2) operational water network, (3) slurry transport in mineral processing, (4) equipment-specific potentials, (5) hydraulic slurry transport, (6) operational water sources, and (7) pipelines in shafts. For each category, the underlying mining process, technical context, potential implementation approaches, and results of a SWOT analysis are documented. This chapter forms the methodological foundation for evaluating and categorizing hydroelectric potentials in mining.

**Chapter 5** analyzes the influence of mine planning parameters on the hydroelectric potential. The investigation is based on three key planning categories that encompass the main fluid-handling processes in mining: freshwater supply, processing plants and the water network, and pipelines for tailings transport. A total of 435 planning parameters are identified: 126 related to freshwater supply, 173 to the processing plant and water network, and 136 to the tailings pond and slurry pipelines. The analysis examines which of these parameters directly affect the hydroelectrical potential and whether they are adjustable to optimize energy yield. The results show which parameters can be specifically targeted to improve the technical and economic viability of hydropower use in mining.

**Chapter 6** presents a practical case study using three scenarios. Based on real-world data, a model is developed to assess the technical and economic feasibility of hydropower in mining. Scenario A analyzes a pump-as-a-turbine installation in a leaching pipeline at a gold mine, resulting in a net present value of up to USD 7.5 million and levelized cost of electricity between 0.028 and 0.224 USD/kWh. Scenario B investigates how selected planning parameters from Chapter 5 can be optimized. For example, a 1 % change in fluid density, net head, or turbine efficiency generates a benefit of USD 75,882. Increasing flow rate leads to a diminishing return, from USD 64,627 to USD 21,413 per percentage point. Scenario C assesses the substitution of leaching fluid with tailings slurry and shows that even with 70 % additional losses and unchanged operating costs, an NPV of USD 1.12 million remains achievable. These scenarios highlight the significant energy generation potential from fluid streams within a mine.

**Chapter 7** discusses the key findings of the thesis in relation to the research questions and the underlying hypothesis. The systematic identification and categorization of hydroelectric potentials, as well as the analysis of relevant planning parameters, form the basis for the energetic utilization of fluid streams in mining. Moreover, the case study confirms the technical and economic feasibility of such applications under realistic conditions. It becomes particularly evident that unconventional small-scale hydropower plants, in contrast to conventional hydropower stations, can be economically attractive due to comparatively low investment costs and shorter payback periods. The study thus emphasizes the importance of an early and systematic exploration of hydroelectric potentials in mining and provides a robust foundation for further research and practical implementation.

**Chapter 8** summarizes the key findings of this dissertation, draws overarching conclusions, and provides an outlook on future developments. The results demonstrate that previously untapped hydroelectric potentials exist in the mining sector and can be systematically identified, assessed, and in some cases optimized. Many of these potential solutions can be implemented using proven technologies, such as pump-as-turbines, and operated in an economical manner. This leads to the recommendation that mining operators should actively identify such potentials within their operations and assess their feasibility. The use of slurries, such as tailings, also appears to be technically and economically viable, even in the presence of significant energy losses. In the long term, the systematic utilization of hydroelectric potentials offers a promising opportunity to enhance energy efficiency, resource use, and sustainability in the mining industry.

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort ..... I
Beiträge Dritter ..... III
Kurzfassung ..... V
Abstract ..... VII
Abbildungsverzeichnis ..... XIII
Tabellenverzeichnis ..... XV
Liste der Abkürzungen, Symbole und SI-Einheiten ..... XIX

**1. Einleitung ..... 1**
1.1. Ausgangssituation ..... 1
1.2. Stand der Technik und Forschungslücke ..... 2
1.3. Forschungsprojekt Smart$H_2O$Energy ..... 5
1.4. Ziele und Forschungsfragen ..... 5
1.5. Methodik und Vorgehen ..... 7
1.6. Aufbau ..... 8
1.7. Signifikanz ..... 10

**2. Grundlagen der Wasserkraft und Wasser im Kontext des Bergbaus ..... 11**
2.1. Einleitung ..... 11
2.2. Gewinnung mineralischer Rohstoffe im Bergbau ..... 11
2.3. Planungsphasen von Bergbauprojekten ..... 13
2.4. Wasser im Kontext des Bergbaus ..... 14
2.4.1. Wassernutzung ..... 15
2.4.2. Wasserbilanzierung ..... 16
2.4.3. Wasserwirtschaft und Wassermanagement ..... 18
2.5. Grundlagen der Wasserkraft ..... 20
2.5.1. Theoretische und physikalische Grundlagen ..... 20
2.5.2. Wasserkraftanlagen und deren Aufbau ..... 23
2.5.3. Planung und Entwicklung von Wasserkraftanlagen ..... 26
2.6. Schlussfolgerungen ..... 29

**3. Abgrenzung bestehender Erkenntnisse und Forschungsansätze ..... 31**
3.1. Einleitung ..... 31
3.2. Methodik ..... 31
3.3. Ergebnisse der Literaturrecherche ..... 32
3.3.1. Kommerzielle Wasserkraftanwendungen im Bergbau ..... 32
3.3.2. Ansätze in Forschung und Wissenschaft zur Nutzung von Wasserkraft im Bergbau ..... 34
3.3.3. Nutzung unkonventioneller Wasserkraftpotenziale in anderen Bereichen ..... 36
3.4. Schlussfolgerungen ..... 40

**4. Identifikation und Bewertung hydroelektrischer Potenziale im Bergbau ..... 41**
4.1. Einleitung ..... 41
4.2. Methodik ..... 41
4.2.1. Identifikation und Bewertung hydroelektrischer Potenziale im Bergbau ..... 41
4.2.2. Betrachtungsrahmen und Abgrenzungen ..... 44
4.3. Analyse von Bergwerken hinsichtlich hydroelektrischer Potenziale ..... 45
4.3.1. Analyse der bergbaulichen Prozesse hinsichtlich ihrer Wassernutzung ..... 45
4.3.2. Identifizierung der Fluidströme in Bergwerken ..... 50
4.3.3. Auswahl der Fluidströme anhand von Potenzialkriterien ..... 51
4.3.4. Charakterisierung und Clusterung der identifizierten Fluidströme ..... 54
4.4. Hydroelektrische Potenziale im Bergbau ..... 58
4.4.1. Abschnitt einer Rohrleitung ..... 58
4.4.2. Betriebliches Wassernetzwerk ..... 61
4.4.3. Materialtransport in der mineralischen Aufbereitung ..... 63
4.4.4. Anlagenspezifische Potenziale ..... 68
4.4.5. Hydraulischer Materialtransport in Rohrleitung ..... 70
4.4.6. Betriebliche Wasserquellen ..... 73
4.4.7. Fallleitungen ..... 76
4.5. Schlussfolgerungen ..... 78

**5. Einfluss bergbaulicher Planungsparameter auf das hydroelektrische Potenzial ..... 81**
5.1. Einleitung ..... 81
5.2. Methodik ..... 81
5.2.1. Identifikation der bergbaulichen Planungsparameter ..... 82
5.2.2. Untersuchung des Einflusses der Planungsparameter auf das hydroelektrische Potenzial ..... 83
5.2.3. Beeinflussbarkeit und Optimierung der Planungsparameter ..... 83
5.2.4. Zuordnung der Potenzialkategorien zu den Planungskategorien ..... 84
5.2.5. Annahmen und Abgrenzungen ..... 85
5.3. Frischwasserversorgung und Abgabe von Brauchwasser ..... 86
5.3.1. Identifikation der bergbaulichen Planungsparameter ..... 87
5.3.2. Einfluss der Planungsparameter auf das hydroelektrische Potenzial der Potenzialszenarien ..... 88
5.3.3. Beeinflussbarkeit der Planungsparameter zur Optimierung des hydroelektrischen Potenzials ..... 89
5.4. Mineralische Aufbereitungsanlage ..... 92
5.4.1. Identifikation der bergbaulichen Planungsparameter ..... 92
5.4.2. Einfluss der Planungsparameter auf das hydroelektrische Potenzial der Potenzialszenarien ..... 96
5.4.3. Beeinflussbarkeit der Planungsparameter zur Optimierung des hydroelektrischen Potenzials ..... 99
5.5. Bergeteich und Rohrleitung für Aufbereitungsberge ..... 102
5.5.1. Identifikation der bergbaulichen Planungsparameter ..... 102
5.5.2. Einfluss der Planungsparameter auf das hydroelektrische Potenzial der Potenzialszenarien ..... 105
5.5.3. Beeinflussbarkeit der Planungsparameter zur Optimierung des hydroelektrischen Potenzials ..... 106
5.6. Schlussfolgerungen ..... 111

**6. Wirtschaftliche und technische Fallstudie einer Wasserkraftanlage im Bergbau ..... 113**
6.1. Einleitung ..... 113
6.2. Methodik ..... 113
6.2.1. Datensatz ..... 113
6.2.2. Grundlegende technische und wirtschaftliche Berechnungen ..... 116
6.2.3. Szenario A: Aufbau des Basisszenarios ..... 118

6.2.4. Szenario B: Untersuchung des Optimierungspotenzials ... 121
6.2.5. Szenario C: Energetische Nutzung von Fluidströmen für den hydraulischen Materialtransport ... 122
6.3. Ergebnisse und Auswertung der Fallstudie ... 124
6.3.1. Szenario A: Energieerzeugung in einer Druckrohrleitung für den Transport von Laugungsflüssigkeit in einem Goldbergwerk ... 124
6.3.2. Szenario B: Optimierung des hydroelektrischen Potenzials durch Anpassung der bergbaulichen Planungsparameter ... 128
6.3.3. Szenario C: Technische und wirtschaftliche Bedingungen für die Energieerzeugung im hydraulischen Feststofftransport ... 130
6.4. Schlussfolgerungen ... 134

**7. Diskussion ... 135**
7.1. Einleitung ... 135
7.2. Diskussion der Ergebnisse ... 135
7.2.1. Hydroelektrische Potenziale im Bergbau ... 135
7.2.2. Einfluss bergbaulicher Planungsparameter auf das hydroelektrische Potenzial ... 138
7.2.3. Fallstudie zur wirtschaftlichen und technischen Betrachtung einer Wasserkraftanlage im Bergbau ... 140
7.3. Implikationen und Empfehlungen ... 143
7.4. Forschungsbedarf ... 145

**8. Fazit ... 147**
8.1. Schlussfolgerungen ... 147
8.2. Ausblick ... 148

**Glossar ... 149**

**Literaturverzeichnis ... 153**

**Anhang ... 167**
Anhang 1: Suchbegriffe der Literaturrecherche ... 167
Anhang 2: Beschreibung der Fluidströme aus Adjazenzmatrix ... 169
Anhang 3: Liste der zusammengefassten Fluidströme in Bergwerken basierend auf Adjazenzmatrix ... 172
Anhang 4: Anhand der Potenzialkriterien ausgeschlossene Fluidströme ... 173
Anhang 5: Charakterisierte Fluidströme ... 174
Anhang 6: Liste aller Planungsparameter aus Kapitel 5.3. ... 180
Anhang 7: Liste aller Planungsparameter aus Kapitel 5.4. ... 183
Anhang 8: Liste aller Planungsparameter aus Kapitel 5.5. ... 188
Anhang 9: Parameter der Fallstudie ... 192
Anhang 10: Berechnungen der jährlichen Energieerzeugung ... 193
Anhang 11: Aufbau des NPV-Modells und numerische Daten ... 194
Anhang 12: Verzeichnis des elektronischen Anhangs ... 195

# Abbildungsverzeichnis


Abbildung 1-1: Methodischer Aufbau der Arbeit ..... 9

Abbildung 2-1: Prozesse eines typischen Erzbergwerks ..... 12

Abbildung 2-2: Projekt- und Planungsphasen eines Bergwerks mit implizierter Unsicherheit und kumulierten Investitionskosten ..... 13

Abbildung 2-3: Typische Wasserzuflüsse und -abflüsse in einem Bergwerk ..... 16

Abbildung 2-4: Vereinfachte Skizze des Wasserbilanzsystems eines Bergwerks ..... 17

Abbildung 2-5: Kategorisierung von Wasserkraftanlagen ..... 24

Abbildung 2-6: Aufbau einer Wasserkraftanlage ..... 25

Abbildung 2-7: Aufbau einer typischen Peltonturbine ..... 25

Abbildung 2-8: Funktionsweise einer Kreiselpumpe als Pumpe (links) und Pumpenturbine (rechts) ..... 26

Abbildung 2-9: Einsatzbereiche verschiedener Turbinentypen ..... 27

Abbildung 2-10: Projektphasen, Zeitplan und Kostenverlauf eines konventionellen Wasserkraftprojekts ..... 28

Abbildung 3-1: Vorgehen für die Literaturanalyse ..... 31

Abbildung 4-1: Aufbau der Methodik zur Identifikation und Bewertung von hydroelektrischen Potenzialen im Bergbau ..... 42

Abbildung 4-2: Theoretischer Aufbau einer Adjazenzmatrix (links) und Adaption zur Identifikation der Fluidströme (rechts) ..... 43

Abbildung 4-3: Räumliche Zusammenhänge auf einem Bergwerksgelände ..... 47

Abbildung 4-4: Konzeptionelle Darstellung der Wasserquellen, -ströme und -austritte in einem Bergwerk mit Flotation und Bergeteich ..... 48

Abbildung 4-5: Paarweise Überprüfung der Fluidströme zwischen den identifizierten Komponenten von dem Startpunkt (links) zum Zielpunkt (oben) mit einer Adjazenzmatrix ..... 50

Abbildung 4-6: Fließbild der anhand der Potenzialkriterien ausgewählten Fluidströme ..... 54

Abbildung 4-7: SWOT-Analyse der Potenzialkategorie „Abschnitt einer Rohrleitung“ ..... 60

Abbildung 4-8: SWOT-Analyse der Potenzialkategorie „Betriebliches Wassernetzwerk“ ..... 62

Abbildung 4-9: Vereinfachtes Fließbild der Fluidströme vom Bergwerk bis zur Flotation ..... 64

Abbildung 4-10: Systematik der Fluidströme zwischen Hydrozyklon und Kugelmühle ..... 65

Abbildung 4-11: Systematik der Fluidströme zwischen Hydrozyklon und Flotation ..... 65

Abbildung 4-12: Systematik des Fluidstroms zwischen Flotation und Eindicker ..... 66

Abbildung 4-13: SWOT-Analyse für Potenzialkategorie „Materialtransport in der mineralischen Aufbereitung“ ..... 67

Abbildung 4-14: Systematische Darstellung des Fluidstroms vom Eindicker zur Wasseraufbereitung oder Prozesswasserspeicher ..... 69

Abbildung 4-15: SWOT-Analyse der Potenzialkategorie „Anlagenspezifische Potenziale“ ..... 70

Abbildung 4-16: SWOT-Analyse der Potenzialkategorie „Hydraulischer Materialtransport in Rohrleitungen“ ..... 73

Abbildung 4-17: SWOT-Analyse der Potenzialkategorie „Betriebliche Wasserquellen“ ..... 75

Abbildung 4-18: SWOT-Analyse der Potenzialkategorie „Fallleitungen“ ..... 77

Abbildung 5-1: Methodisches Vorgehen für die Identifikation der bergbaulichen Planungsparameter und Untersuchung des Einflusses auf das hydroelektrische Potenzial ..... 81

Abbildung 5-2: Entscheidungsbaum zur Untersuchung der planerischen Beeinflussbarkeit ..... 84
Abbildung 6-1: Skizze der technischen Planung der zugrunde liegenden Studie ..... 115
Abbildung 6-2: Skizze der technischen Anlage und Komponenten ..... 115
Abbildung 6-3: Verfügbare Nettofallhöhe (m) in Abhängigkeit vom Volumenstrom ($m^3/s$) ..... 118
Abbildung 6-4: Entwicklung des Nettobarwerts, der kumulativen Stromerzeugung und des Cashflows über die Projektlaufzeit von 30 Jahren ..... 126
Abbildung 6-5: Sensitivität der prozentualen Änderung der Eingabeparameter auf den Nettobarwert ..... 127
Abbildung 6-6: Verlauf des Wertes einer 1-prozentigen Steigerung des Volumenstroms ..... 130
Abbildung 6-7: NPV-Wertsteigerung bei Änderung des Parameters um den angegebenen Wert ..... 131
Abbildung 6-8: Systemleistung [kW] abhängig von Dichte [$kg/m^3$] und Gesamtwirkungsgrad [%] ..... 132
Abbildung 6-9: NPV [Tausend USD] der Kombinationen aus Gesamtwirkungsgrad und OPEX für ein Fluid mit der Dichte 1.600 $kg/m^3$ ..... 133
Abbildung A-1: Jährliche Energieerzeugung in Abhängigkeit der durchschnittlichen Systemleistung und der Verfügbarkeit ..... 193

# Tabellenverzeichnis


Tabelle 2-1: Einflussparameter der Wasserbilanzierung im Bergbau ..... 18

Tabelle 2-2: Technische und ökonomische Parameter bei der Planung von PaTs in bestehenden Rohrleitungen ..... 28

Tabelle 3-1: Taxonomie von Literaturanalysen ..... 32

Tabelle 4-1: Betriebliche Aufgaben, Komponenten und Prozesse der mineralischen Rohstoffgewinnung ..... 49

Tabelle 4-2: Liste der bergbaulichen Komponenten für die Adjazenzmatrix ..... 50

Tabelle 4-3: Liste der anhand der Potenzialkriterien ausgeschlossenen Fluidströme ..... 53

Tabelle 4-4: Liste der anhand der Potenzialkriterien ausgewählten Fluidströme für die weitere Betrachtung in der Arbeit ..... 53

Tabelle 4-5: Abgrenzung der Potenzialkategorien und Zuordnung der Fluidströme ..... 57

Tabelle 4-6: Fluidströme in der Potenzialkategorie „Abschnitt einer Rohrleitung“ ..... 58

Tabelle 4-7: Fluidströme in der Potenzialkategorie „Betriebliches Wassernetzwerk“ ..... 61

Tabelle 4-8: Fluidströme in der Potenzialkategorie „Materialtransport in der mineralischen Aufbereitung“ ..... 63

Tabelle 4-9: Fluidströme in der Potenzialkategorie „Anlagenspezifische Potenziale“ ..... 68

Tabelle 4-10: Fluidstrom in der Potenzialkategorie „Hydraulischer Materialtransport in Rohrleitungen“ ..... 71

Tabelle 4-11: Fluidströme der Potenzialkategorie „Betriebliche Wasserquellen“ ..... 73

Tabelle 4-12: Fluidströme der Potenzialkategorie „Fallleitungen“ ..... 76

Tabelle 5-1: Auflistung der betrachteten bergbaulichen Planungskategorien und der zugehörigen Detailplanungskategorien ..... 83

Tabelle 5-2: Zuordnung der Planungs- und Potenzialkategorien ..... 85

Tabelle 5-3: Liste der zugeordneten Fluidströme zur Planungskategorie „Frischwasserversorgung und Abgabe von Brauchwasser“ ..... 86

Tabelle 5-4: Übersicht der verwendeten Quellen zur Identifikation der Planungsparameter ..... 88

Tabelle 5-5: Planungsparameter der Kategorie „Frischwasserversorgung und Wasserabgabe“ mit direktem Einfluss auf das hydroelektrische Potenzial ..... 89

Tabelle 5-6: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf den Volumenstrom zur Planungskategorie „Frischwasserversorgung und Abgabe von Brauchwasser“ ..... 90

Tabelle 5-7: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf die Fluideigenschaften zur Planungskategorie „Frischwasserversorgung und Abgabe von Brauchwasser“ ..... 90

Tabelle 5-8: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf die Fallhöhe und Entfernung zur Planungskategorie „Frischwasserversorgung und Abgabe von Brauchwasser“ ..... 90

Tabelle 5-9: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf die Verluste zur Planungskategorie „Frischwasserversorgung und Abgabe von Brauchwasser“ ..... 91

Tabelle 5-10: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf die Nutzbarkeit zur Planungskategorie „Frischwasserversorgung und Abgabe von Brauchwasser“ ..... 91

Tabelle 5-11: Liste der zugeordneten Fluidströme zur Planungskategorie „Mineralische Aufbereitungsanlage“ ..... 93

Tabelle 5-12: Übersicht der Quellen für die Identifikation der Planungsparameter für mineralische Aufbereitungsanlagen ..... 96
Tabelle 5-13: Planungsparameter der Kategorie „Mineralische Aufbereitungsanlage“ mit direktem Einfluss auf das hydroelektrische Potenzial ..... 97
Tabelle 5-14: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf den Volumenstrom zur Planungskategorie „Mineralische Aufbereitungsanlage“ ..... 99
Tabelle 5-15: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf die Fluideigenschaften zur Planungskategorie „Mineralische Aufbereitungsanlage“ ..... 100
Tabelle 5-16: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf die Fallhöhe und Entfernung zur Planungskategorie „Mineralische Aufbereitungsanlage“ ..... 100
Tabelle 5-17: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf die Verluste zur Planungskategorie „Mineralische Aufbereitungsanlage“ ..... 101
Tabelle 5-18: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf die Nutzbarkeit zur Planungskategorie „Mineralische Aufbereitungsanlage“ ..... 101
Tabelle 5-19: Quellen der Planungskategorie Bergeteich und Rohrleitung für Aufbereitungsberge ..... 105
Tabelle 5-20: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf den Volumenstrom zur Planungskategorie „Bergeteich und Rohrleitung für die Aufbereitungsberge“ ..... 106
Tabelle 5-21: Planungsparameter der Kategorie „Bergeteich und Rohrleitung für Aufbereitungsberge“ mit direktem Einfluss auf das hydroelektrische Potenzial ..... 107
Tabelle 5-22: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf die Fluideigenschaften zur Planungskategorie „Bergeteich und Rohrleitung für die Aufbereitungsberge“ ..... 108
Tabelle 5-23: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf die Fallhöhe und horizontale Entfernung zur Planungskategorie „Bergeteich und Rohrleitung für die Aufbereitungsberge“ ..... 108
Tabelle 5-24: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf die Verluste zur Planungskategorie „Bergeteich und Rohrleitung für die Aufbereitungsberge“ ..... 109
Tabelle 5-25: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf die Nutzbarkeit zur Planungskategorie „Bergeteich und Rohrleitung für die Aufbereitungsberge“ ..... 110
Tabelle 6-1: Kennzahlen der Wasserkraftanlagen von Easy Hydro im Bergbau ..... 114
Tabelle 6-2: Betriebspunkte (BP) der Fallstudie ..... 116
Tabelle 6-3: Eingabeparameter, Annahmen und in der Fallstudie zu berechnende Werte ..... 119
Tabelle 6-4: Werte der variablen und unveränderlichen Parameter für Szenario C ..... 123
Tabelle 6-5: Übersicht der gegebenen und berechneten Parameter der Fallstudie ..... 124
Tabelle 6-6: Eingabeparameter für das Finanzmodell ..... 125
Tabelle 6-7: Nettobarwert (NPV), Stromgestehungskosten (LCOE) und interner Zinsfuß (IRR) in Abhängigkeit von der jährlichen Stromproduktion ..... 126
Tabelle 6-8: Beeinflussbare Parameter nach eigener Analyse in Kapitel 5.3 ..... 128
Tabelle 6-9: Ergebnisse der 8 Szenarien mit Kombinationen aus Systemleistung, Kapital- und Betriebskosten, mit dem jeweiligen Nettobarwert, dem internen Zinsfuß und den Stromgestehungskosten ..... 133
Tabelle 7-1: Empfehlungen für Bergwerksbetreiber, Anlagenbauer im Bergbau und der Wasserkraft sowie Politik und Behörden ..... 144
Tabelle A-1: Suchbegriffe für die systematische Literaturrecherche ..... 167
Tabelle A-2: Beschreibung der identifizierten Fluidströme ..... 169
Tabelle A-3: Liste der zusammengefassten Fluidströme in Bergwerken ..... 172

Tabelle A-4: Charakterisierte Fluidströme ..... 174
Tabelle A-5: Liste aller Planungsparameter der Planungskategorie „Frischwasserversorgung und Abgabe von Brauchwasser“ ..... 180
Tabelle A-6: Liste aller Planungsparameter der Planungskategorie „Mineralische Aufbereitung“ ..... 183
Tabelle A-7: Liste aller Planungsparameter der Planungskategorie „Bergeteich und Rohrleitung für Aufbereitungsberge“ ..... 188
Tabelle A-8 : Parameter der Fallstudie ..... 192
Tabelle A-9: Aufbau des NPV-Modells für die Fallstudie ..... 194

# Liste der Abkürzungen, Symbole und SI-Einheiten

| Zeichen | Beschreibung |
|---|---|
| a | Jahr |
| A | Fläche in Quadratmeter ($m^2$) |
| AMD | Saure Grubenwässer (Acid Mine Drainage) |
| BEP | Effizientester Betriebspunkt (Best Efficiency Point) |
| BP | Betriebspunkt |
| bspw. | Beispielsweise |
| C | Kosten in USD |
| $C$ | Hazen-Williams Koeffizient |
| CAPEX | Kapitalkosten in USD |
| CF | Kapitalfluss (Cashflow) in USD |
| CFD | Computational Fluid Dynamics |
| $CO_2$ | Kohlenstoffdioxid |
| ct | US-Cent |
| d | Durchmesser in Meter (m) |
| $\varepsilon$ | Verlustbeiwert |
| E | Energieertrag in Kilowattstunden pro Jahr (kWh/a) |
| ESG | Umwelt, Soziales und Unternehmensführung (Environmental, Social and Governmental) |
| EU | Europäische Union |
| g | Gravitationskonstante 9,81 $m/s^2$ |
| GIS | Geoinformationssystem (Geographic Information System) |
| GW | Gigawatt |
| h | Höhe in Meter (m) |
| $H_{net}$ | Nettofallhöhe in Meter (m) |
| HPRT | Hydraulische Druckrückgewinnungsturbine (Hydraulic Pressure Recovery Turbine) |
| ICMM | International Council on Mining and Metals |
| IEA | International Energy Agency |
| IRR | Interner Zinsfuß (Internal Rate of Return) in Prozent (%) |
| kl | Kiloliter |
| kW | Kilowatt |
| kWh | Kilowattstunden |
| KWK | Kleinwasserkraftwerk |
| $\lambda$ | Rohrreibungszahl |
| l | Liter |
| LCOE | Stromgestehungskosten (Levelized Cost of Energy) in USD pro Megawattstunde (USD/MWh) |
| LOM | Laufzeit eines Bergwerks (Life of Mine) in Jahren (a) |
| m | Meter |
| $m^3$ | Kubikmeter |
| MCA | Minerals Council of Australia |
| Mio. | Millionen |

| Zeichen | Beschreibung |
|---|---|
| Mrd. | Milliarden |
| MW | Megawatt |
| n | Anzahl |
| $\eta$ | Wirkungsgrad |
| $\eta_T$ | Wirkungsgrad der Turbine |
| NPV | Nettobarwert (Net Present Value) in USD |
| OPEX | Betriebskosten in USD |
| $p$ | Druck in bar |
| $p_e$ | Verkaufs- bzw. Einkaufspreis der Energie in USD pro Kilowattstunde (USD/kWh) |
| P | Leistung in Watt (W) |
| $P_{theo}$ | Theoretische Turbinenleistung in Watt (W) |
| PaT | Pumpenturbine (Pump-as-a-Turbine) |
| PPA | Stromabnahmevertrag (Power Purchase Agreement) |
| Q | Volumenstrom in Kubikmeter pro Sekunde ($m^3/s$) |
| r | Diskontierungsrate in Prozent (%) |
| $R$ | Einsparungen in USD |
| $Re$ | Reynoldszahl |
| $\rho$ | Dichte in Kilogramm pro Kubikmeter ($kg/m^3$) |
| ROM | Gefördertes Erz (Run of Mine) |
| s | Sekunde |
| S | Gefälle der Rohrleitung in Meter pro Meter (m/m) |
| SAG | Semiautogenmühle (Semi-autogenic Grinding Mill) |
| SKW | Schwerlastkraftwagen |
| SLO | Soziale Betriebserlaubnis (Social License to Operate) |
| SMU | Kleinste abbaubare Planungseinheit eines Bergwerks (Smallest Mining Unit) |
| SWOT | Stärken, Schwächen, Chancen und Risiko (Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threads) |
| t | Zeit |
| TAL | Transalpine Pipeline |
| TDS | Gesamtgelöste Feststoffe (Total dissolved solids) |
| TSF | Bergeteich (Tailings Storage Facility) |
| TSS | Gesamte Schwebestoffe (Total suspended solids) |
| U | Umfang in Meter (m) |
| UK | Vereinigtes Königreich (United Kingdom) |
| UPHS | Untertägiges Pumpspeicherkraftwerk (Underground Pumped Hydropower Storage) |
| US | Vereinigte Staaten (United States) |
| USA | Vereinigte Staaten von Amerika (United States of America) |
| USD | US-Dollar |
| $v$ | Strömungsgeschwindigkeit in Meter pro Sekunde (m/s) |
| $\nu$ | Viskosität |
| W | Watt |
| wt% | Gewichtsprozent |
| z. B. | Zum Beispiel |

# 1. Einleitung

## 1.1. Ausgangssituation

Der weltweite Bergbausektor produziert die mineralischen Rohstoffe für nahezu alle Industrie- und Konsumgüter und steht damit am Anfang der Wertschöpfungskette vieler Produkte. Neben der Herausforderung, die stetig wachsende Nachfrage nach mineralischen Rohstoffen zu decken, muss der Bergbau zugleich umwelt- und sozialverträglicher werden. Bei den beiden großen gesellschaftlichen Themen unserer Zeit – Umwelt- und Klimaschutz – nimmt der Bergbau eine ambivalente Rolle ein: Einerseits trägt er durch erhebliche Eingriffe in die Natur zu den bestehenden Herausforderungen bei, andererseits besitzt die Branche das Potenzial, durch die gewonnenen Rohstoffe, innovative Ansätze und den Einsatz erneuerbarer Energien einen wesentlichen Beitrag zu deren Lösung zu leisten (Lee et al. 2023; Rudolph et al. 2021; Igogo et al. 2021).

Die durch den Bergbau verursachten Auswirkungen auf die Umwelt sind erheblich. Neben der offensichtlichen Veränderung der Landschaft durch bergbauliche Aktivitäten kann vor allem die Wassernutzung und der Energieverbrauch einen großen Einfluss auf die Natur haben (Singh und Singh 2016; Rankin 2011, S. 124). In ariden Regionen können Nutzungskonflikte entstehen, und Prozesswässer bergen bei unkontrolliertem Austreten die Gefahr einer Umweltkontamination. Die Wasserhaltung im Bergbau kann zudem die Grundwasserstrukturen der Umgebung negativ beeinflussen (Gunson et al. 2010). Wasser wird im bergbaulichen Betrieb für eine Vielzahl von Prozessen verwendet, vor allem aber für die mineralische Aufbereitung, den hydraulischen Transport von Abraum oder Konzentraten und die Staubunterdrückung. Die Menge des von Bergbaubetrieben weltweit entnommenen Wassers betrug 2010 etwa 20,1 Mio. m³ pro Tag (Adiansyah et al. 2016). Im Erzbergbau werden zwischen 1 und 3 m³ Wasser pro Tonne Erz benötigt (Gunson et al. 2012). Die weltweite Kupfergewinnung nutzt durchschnittlich 70,4 kl Wasser pro Tonne Kupfer, in Spitzenfällen bis zu 350 kl. Der Wasserbedarf wird dabei sowohl durch Oberflächenwasser als auch Grundwasser gedeckt (Northey et al. 2013). Zur Vermeidung ökologischer und sozialer Probleme konzentrieren sich aktuelle Bestrebungen von Bergwerken darauf, den Wasserbedarf zu reduzieren, eine ökologisch verträgliche Wasserquelle zu nutzen und unkontrollierte Wasseraustritte zu vermeiden. Innerhalb der Systemgrenzen eines Bergwerks steht prozesstechnisch und ökonomisch vor allem die Kostenreduzierung durch die Minderung von Wasser- und Energieverbrauch im Vordergrund (Gunson et al. 2010).

Bergwerke benötigen neben einer sicheren Wasserversorgung auch eine ausreichende und zuverlässige Energieversorgung, um einen sicheren und unterbrechungsfreien Betrieb zu gewährleisten (Nguyen et al. 2014). Die Gewinnung und Aufbereitung von mineralischen Rohstoffen bedarf viel Energie. Bergbauliche Aktivitäten, wie das Zerkleinern und der Transport von Erzen und Nebengestein, das Pumpen von Wasser und der Betrieb von Löse- und Ladegeräten, sind dabei besonders energieintensiv. Insgesamt trägt der Energieverbrauch des Bergbausektors etwa 11 % zum weltweiten Gesamtenergieverbrauch bei (Igogo et al. 2021). In der Vergangenheit wurde der Energiebedarf des Bergbaus überwiegend durch fossile Energieträger gedeckt. Neben fossilen Brennstoffen ist Strom der wichtigste Energieträger für den Bergbau. Da die Stromerzeugung ihrerseits zu einem erheblichen Teil auf fossilen Energieträgern basiert, sind die $CO_2$-Emissionen des Bergbausektors entsprechend hoch. Zur Reduzierung dieser Emissionen gibt es zwei Ansätze: Einerseits kann der Energieverbrauch durch Effizienzsteigerungen und Innovationen gesenkt werden, andererseits können erneuerbare Energien genutzt werden. Erst in den vergangenen zehn Jahren wurde im Bergbau zunehmend Strom aus erneuerbaren Energien eingesetzt, und Prozesse wurden verstärkt elektrifiziert, um den $CO_2$-Ausstoß zu verringern. Der Strom wird dabei meist aus externen Quellen bezogen und nicht direkt am Standort des Bergwerks erzeugt. Seit einigen Jahren treiben Bergwerke vereinzelt Projekte voran, bei denen betriebseigene Wind- und Solarparks finanziert und gebaut werden (Igogo et al. 2021; Abbaspour und Abbaspour 2022).

Wasserkraft zählt zu den ältesten Technologien zur Energieerzeugung und ist als erneuerbare Energie anerkannt (Niederhausen und Burkert 2014, S. 219, 224). Trotz der erfolgreichen historischen Beispiele findet die Nutzung von Wasserkraft im Bergbau gegenwärtig kaum noch Anwendung. Dies ist in der Regel auf praktische Gründe zurückzuführen, die den Einsatz konventioneller Wasserkraft zur Energieerzeugung in diesem Sektor verhindern. Wasserkraftwerke sind komplexe Anlagen mit spezifischen Anforderungen an Standort und Infrastruktur. Ihre Realisierung erfordert hohe Anfangsinvestitionen, die sich nur bei einer langen Betriebsdauer amortisieren, welche die Laufzeit eines Bergwerks häufig überschreitet. Daher erfolgt die aktive Nutzung konventioneller Wasserkraftpotenziale durch Bergwerke in der Praxis nur selten, obwohl das Potenzial zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen erheblich ist (Igogo et al. 2021; Müller 2009; Abbaspour und Abbaspour 2022).

Eine andere Möglichkeit zur Integration von Wasserkraft in Bergwerken besteht in der energetischen Nutzung innerbetrieblicher Wasser- und Fluidströme mittels Kleinwasserkraftwerken (KWK). Einige der bei der Rohstoffgewinnung anfallenden Fluidströme weisen unter bestimmten Bedingungen ein hydroelektrisches Potenzial auf, werden jedoch bisher nur in Einzelfällen energetisch genutzt. Die Nutzung von Wasserkraft nicht nur für, sondern direkt in den Prozessen des Bergbaus kann zur umweltverträglicheren und nachhaltigeren Rohstoffgewinnung beitragen. Dies kann den Energiebedarf eines Bergwerks senken und dem genutzten Wasser einen zusätzlichen Mehrwert verleihen.

## 1.2. Stand der Technik und Forschungslücke

Das Forschungsfeld der Wasserkraft im Bergbau, insbesondere unter Einbezug aller Fluide im Bergwerkssystem, ist weitgehend unerforscht. Es lassen sich Teilbereiche abgrenzen, zu denen es vereinzelte Studien, Veröffentlichungen oder Berichte gibt, die eine Schnittmenge zwischen den Themen *Bergbau* und *Wasserkraft* bilden. Hierzu zählen:

- historische Beispiele zur Nutzung von Wasserkraft im vorindustriellen Bergbau (Liessmann 2010),
- konventionelle Wasserkraftanlagen im direkten Umfeld von Bergwerken (Cornisch 2015; Bannister),
- Projekte in verschiedenen Stadien, die spezifische Fluide eines Bergwerks zur Energieerzeugung nutzen (Le Roux 2012; Chadwick 2018; Whillier 1977; Easy Hydro 2023a),
- sowie Wasserkraftanwendungen in bergbauähnlichen Umgebungen und Industrien (Crespo Chacón et al. 2020; Mühlmann et al. 2019; Jorge et al. 2021).

Im Gegensatz dazu sind bislang keine Studien, Berichte oder Veröffentlichungen bekannt, die das Wasserkraftpotenzial von Bergwerken systematisch beschreiben, bewerten oder analysieren. Konventionelle industrielle Lösungen zur Nutzung von Energie aus Fluiden im Bergbau existieren nicht, abgesehen von vereinzelten Spezialkonstruktionen, die jeweils als individuelle Projekte umgesetzt wurden.

**Historische und konventionelle Nutzung von Wasserkraft im Bergbau**

Die bekanntesten Beispiele zur historischen Nutzung von Wasserkraft im Bergbau stammen aus dem Oberharzer Bergbau. Bereits im 15. Jahrhundert erschlossen Bergleute dort das Wasserkraftpotenzial und nutzten es für den direkten Antrieb mechanischer Maschinen, insbesondere zur Wasserhaltung und Bewetterung im Gangerzbergbau auf Silber und Blei. Die sogenannte „Wasserkunst“ beruhte auf komplexen Stollen- und Holzsystemen, die Wasser gezielt zu hölzernen Wasserrädern leiteten. Elektrische Energie wurde dabei nicht erzeugt, die Wasserkraft diente ausschließlich dem mechanischen Antrieb. Erst mit Beginn der Industrialisierung ab etwa 1870 wurde die Wasserkunst schrittweise durch Dampfmaschinen und später elektrische Antriebe ersetzt. Ab dem späten 19. Jahrhundert fanden stillgelegte Schächte erstmals auch zur Stromerzeugung Verwendung (Liessmann 2010; Boeck 2017).

Bei konventionellen Wasserkraftanlagen im Umfeld von Bergwerken gibt es weltweit einige wenige Projekte. Diese betreffen konventionelle Wasserkraftwerke, die in natürlichen Fließgewässern installiert sind und das lokal vorhandene Wasserkraftpotenzial nutzen. Ein Beispiel hierfür ist ein Wasserkraftwerk in der Demokratischen Republik Kongo, das von Rangold Resources in einem lokalen Fluss gebaut wurde und sowohl die eigenen Bergwerke als auch umliegende Gemeinden versorgt (Cornisch 2015). In anderen Regionen weltweit wird zwar durch Wasserkraft erzeugte Energie im Bergbau genutzt, jedoch wurden diese Anlagen meist nicht primär für oder durch den Bergbau gebaut. Beispielsweise betreibt der Bergbaukonzern Vale in Kanada, Indonesien und Brasilien eigene konventionelle Wasserkraftwerke und hält Beteiligungen an weiteren Wasserkraftwerken, um die eigenen Betriebe vollständig bzw. teilweise mit Energie zu versorgen (Vale 2024).

**Forschungsprojekte und unkonventionelle Nutzung von Wasserkraft in Bergwerken**

Einige Studien und Projekte befassen sich mit der Nutzung von Wasserkraftpotenzialen in Bergwerken. Die Firma Easy Hydro hat in der irischen Tara Mine eine Pumpenturbine in eine Frischwasserfallleitung des untertägigen Bergwerks verbaut (Easy Hydro 2021). In zwei anderen Projekten nutzt die Firma Fluidströme von einer Filteranlage in einer mineralischen Aufbereitungsanlage beziehungsweise den Rückfluss einer Wasseraufbereitungsanlage (Easy Hydro 2023a). Tabrizia und Markoski (2021) berichten von einem Projekt in einem australischen Bergwerk, bei dem eine Pumpenturbine in eine Frischwasserleitung installiert wurde. Musa et al. (2022) untersuchen die technische und wirtschaftliche Machbarkeit eines Mikrowasserkraftwerks in einem philippinischen Bergwerk, das mit einer Cross-Flow-Turbine den Abwasserstrom nutzt. Es könnte eine Leistung von 75 kW für die Versorgung der Betriebsgebäude erzeugt werden. Antoine et al. (2020) beschreibt eine Fallstudie zu einem 87 kW Mikrowasserkraftwerk in Kamerun, das Flusswasser unter anderem zur Energieversorgung der Schürfstellen der umliegenden Kleinstbergwerke verwendet. Ein Bergwerk des chilenischen Staatskonzerns Codelco hatte den Bau einer Turbine für die Entwässerung des Bergeteiches ausgeschrieben, jedoch wurde kein Auftrag vergeben und das Projekt aus unbekannten Gründen nicht weiterverfolgt (bnamericas 2015). Im südafrikanischen Bergbau wird bereits seit den 1970er Jahren Energie aus Kühlwasser zurückgewonnen, welches in die bis zu 3.000 m tiefen Bergwerke geleitet wird (Whillier 1977; Le Roux 2012). Ein kanadisches Patent von Odegard (2009) schlägt die Nutzung von Ölsandschlämmen mit Feststoffturbinen zur Energierückgewinnung in Rohrleitungen vor. Li (2022) untersucht eine Vortex-Pumpe im Turbinenbetrieb mit verschiedenen Fluiden. Kaplunov et al. (2015) und Linkov et al. (2015) diskutieren die Energiegewinnung aus Fallleitungen für Versatzmaterial, jedoch ohne detaillierte Angaben. Knyazkin (2019) berichtet von Versuchen, Energie aus Grubenwässern zu gewinnen, jedoch ohne erfolgreiche Ergebnisse.

Pumpspeicherkraftwerke werden in der internationalen Forschung häufiger als Anwendungsfall für stillgelegte Bergwerke untersucht. Ein australisches Patent von Mukerji (2017) beschreibt ein Schlamm-Pumpspeicherkraftwerk, bei dem Feststoff/Wasser-Suspensionen Turbinen antreiben. Liu et al. (2022) untersuchen alte Kohletagebaue in China als Pumpspeicherkraftwerke, während Krassakis et al. (2023) und Schnepper et al. (2023) die Folgenutzung von Braunkohletagebauen in Europa im Rahmen des EU-Projekts ATLANTIS analysieren. Álvarez et al. (2021), Menéndez et al. (2017) und Menéndez et al. (2019) untersuchen die Nutzung eines untertägigen Kohlebergwerks in Spanien als Pumpspeicherkraftwerk, um die Schwankungen erneuerbarer Energien auszugleichen. Lyu et al. (2022) identifizieren sechs offene Fragen zur Nachnutzung von Kohlebergwerken als Pumpspeicherkraftwerke. Madlener und Specht (2020) sowie Grzegorz (2021) betrachten die technische und ökonomische Machbarkeit von untertägigen Pumpspeicherkraftwerken in deutschen und polnischen Steinkohlebergwerken.

**Wasserkraftanwendungen in bergbauähnlichen Industrien**

Neben den im Bergbau eingesetzten Turbinen gibt es verwandte Industrien, welche mit ähnlichen Herausforderungen konfrontiert sind. In der Schiffsabgasentschwefelung (Zhang et al. 2022) und einigen

chemischen Prozessen (Yang 2016) gibt es Konzepte potenzielle Energie aus spezifischen industriellen Fluidströmen hydroelektrisch zu nutzen. Crespo Chacón et al. (2020) und García Morillo et al. (2018) untersuchen Pumpenturbinen in landwirtschaftlichen Bewässerungssystemen in Spanien. Thurston und Plum (1991) prüfen die Gewinnung hydraulischer Energie aus geothermischen Wässern. Rossi et al. (2020) beschreiben eine Fallstudie zu hydraulischen Druckrückgewinnungsturbinen in Raffinerien. In der Transalpine Pipeline wird mit einer Francis-Turbine Energie gewonnen (Mühlmann et al. 2019). In Meerwasserentsalzungsanlagen gibt es verschiedene Konzepte für Energierückgewinnungssysteme, wie in Huang et al. (2020) beschrieben. Ma et al. (2017) und Zhou et al. (2015) untersuchen Turbinen in Kühlwasserkreisläufen. Micro-Hydro-Anwendungen in kleinen Fließgewässern werden von Scheaua (2017) und Agarwal (2012) untersucht. Teuteberg (2010) berichtet von einem Projekt zur Energiegewinnung in den Fluiden einer südafrikanischen Muschelfarm. Forschungen zur Energierückgewinnung in Frischwasserleitungen zeigen das Potenzial von Pumpenturbinen, wie in Studien von Marchis et al. (2014) und Carravetta et al. (2020), Carravetta et al. (2014) und Carravetta et al. (2022) dargestellt. Hannachi et al. (2021) und Itani et al. (2020) beschreiben unkonventionelle Turbinen in Wassernetzwerken. Kramer et al. (2018) und Monteiro et al. (2018) untersuchen die Effizienz und Wirtschaftlichkeit solcher Installationen. Chae et al. (2015) und Jorge et al. (2021) befassen sich mit der Energieerzeugung in Wasseraufbereitungsanlagen. Renzi et al. (2019) untersuchen Pumpenturbinen in Abwasserleitungen. Sinagra et al. (2022) vergleichen verschiedene Turbinenarten in Wasseraufbereitungsanlagen.

Der Großteil der Forschung im Bereich des Wassers und der Energie im Bergbau fokussiert sich auf Einsparungen des Energie- und Wasserverbrauchs und der Verbesserung der $CO_2$-Bilanzen. Die direkte Anwendung von Wasserkraft innerhalb der Rohstoffgewinnung bleibt hingegen weitgehend unerforscht. Kapitel 3 enthält eine vertiefte Literaturrecherche zu diesem Thema. Es zeigt sich, dass es bislang keine weit verbreiteten, kommerziellen Anwendungen zur Nutzung von Wasserkraft innerhalb bergbaulicher Betriebsstrukturen gibt und nur vereinzelt existieren individuelle Lösungen. Wasserkraftanwendungen in der Bergbauindustrie beschränken sich größtenteils auf konventionelle Wasserkraftwerke in der Nähe von Bergwerken oder auf die Nutzung natürlicher Oberflächengewässer in größerer Entfernung. Der Einsatz von verunreinigten Prozesswässern oder Schlämmen zur Energiegewinnung im Bergbau ist bislang weder bekannt noch kommerziell verfügbar. Obwohl die Forschung zu Pumpspeicherkraftwerken in bestehenden Bergwerksstrukturen fortgeschritten ist, wird diese Art der Wasserkraft in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet.

Die bestehenden Studien und Projekte unterstreichen die Relevanz und den Bedarf, Bergwerke hydroelektrisch zu erschließen. Gleichzeitig verdeutlichen sie jedoch auch, dass kein systematischer Ansatz zur Bewertung und Entwicklung des hydroelektrischen Potenzials von Bergwerken vorhanden ist. Daraus lassen sich folgende Forschungslücken ableiten:

(i) **Ganzheitliche Betrachtung der hydroelektrischen Potenziale in der Rohstoffgewinnung:** Es fehlt eine umfassende Analyse der Prozesse in der Rohstoffgewinnung im Hinblick auf ihre hydroelektrischen Potenziale. Eine übergreifende Betrachtung dieser Aspekte existiert bislang nicht.

(ii) **Einfluss betrieblicher Parameter auf das hydroelektrische Potenzial:** Die Individualität von Rohstoffgewinnungsbetrieben beruht auf unterschiedlichen beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Planungsparametern. Der Einfluss dieser betrieblichen Parameter auf die Optimierung des hydroelektrischen Potenzials eines Bergwerks ist bisher unbekannt.

(iii) **Hydroelektrische Nutzung anderer Fluide als Wasser:** Einige Fluidströme im Bergbau bestehen nicht aus Frischwasser, könnten aber aufgrund ihrer Menge und Eigenschaften für die Energieerzeugung interessant sein. Die technischen Voraussetzungen und der wirtschaftliche Spielraum hierfür sind bisher nicht bekannt oder bewertet worden.

## 1.3. Forschungsprojekt SmartH$_2$OEnergy

Vor dem Hintergrund der historischen Nutzung von Wasserkraft im Harzer Bergbau und des bislang nicht erschlossenen Forschungsfelds der Wasserkraft im Bergbau (vgl. erste Forschungslücke) startete 2019 das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte CLIENT II–Verbundvorhaben *SmartH$_2$OEnergy* (Förderkennzeichen 033R206). In diesem Verbundprojekt sollten Konzepte zur Nutzbarmachung des Wasserkraftpotenzials von peruanischen Rohstoffgewinnungsbetrieben entwickelt werden. Diese Konzepte sollten in Abhängigkeit von technischer Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit für verschiedene Anwendungsfälle erarbeitet und anhand eines Fallbeispiels validiert werden. Für die Umsetzung des Projekts wurde ein internationales Konsortium aus deutschen und peruanischen Partnern gebildet. Auf deutscher Seite arbeiteten das Institute of Mineral Resources Engineering der RWTH Aachen University als Koordinator, die TU München und THEnergy zusammen. In Peru war eine Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro Ergon Power S.A.C. und einem peruanischen Bergwerk geplant.

Die wesentlichen Ergebnisse des Verbundvorhabens umfassen die Ausarbeitung von Wasserkraftpotenzialen im peruanischen Bergbau. Hierfür wurden die lokalen Rahmenbedingungen analysiert, Szenarien für die Nutzung dieser Potenziale entwickelt und in einer theoretischen Fallstudie untersucht. Darüber hinaus wurden neuartige Wasserkraftturbinen für die im Bergbau vorherrschenden Fluide mittels CFD-Simulationen bewertet. Ergänzend wurde ein Modell zur Analyse der optimalen Integration einer Kleinwasserkraftanlage in das elektrische Betriebsnetz eines Bergwerks erstellt. Die Auswirkungen dieser Ergebnisse wurden abschließend durch ein Life-Cycle Assessment sowie ein Social and Environmental Impact Assessment bewertet (Feldmann 2023).

Diese umfassenden Arbeiten im SmartH$_2$OEnergy-Projekt bieten einen vielversprechenden Ansatz zur Nutzung von Wasserkraftpotenzialen in Bergwerken und bildeten die Grundlage für die Entwicklung des Themenfelds dieser Dissertation. Das Projekt lieferte wichtige Erkenntnisse zu Rahmenbedingungen, technischen Herausforderungen und wirtschaftlichen Aspekten, auf denen die vorliegende Arbeit aufbaut und die in dieser Dissertation methodisch vertieft und systematisch weiterentwickelt werden.

## 1.4. Ziele und Forschungsfragen

Die Charakteristika des Bergbaus und der vorhandenen Wasser- und Fluidströme in Bezug auf Menge, Verwendung und Bewegung deuten darauf hin, dass an bestimmten Stellen eines Bergwerks die potenzielle oder kinetische Energie der Fluide energetisch nutzbar ist. Die identifizierten Forschungslücken zeigen jedoch, dass bisher keine ganzheitliche Betrachtung des Wasserkraftpotenzials im Bergbau existiert. Es fehlen systematische Methoden zur qualitativen Identifizierung und quantitativen Abschätzung dieser Potenziale. Bergwerke werden nicht mit dem Ziel geplant, das maximale Wasserkraftpotenzial einzelner Volumenströme zu nutzen. Aufgrund der begrenzten Datenlage lässt sich aus der vorhandenen Literatur kein direktes Wasserkraftpotenzial für einzelne Volumenströme ableiten. Eine besondere Herausforderung liegt in der Vielfalt der Bergwerke und ihrer Prozesse sowie in den unterschiedlichen Eigenschaften der Prozesswässer an den verschiedenen Punkten der bergbaulichen Abläufe.

Ziel der Arbeit ist es, das hydroelektrische Potenzial im Bergbau wissenschaftlich zu erschließen. Die Dissertation fokussiert den internationalen Hartgesteinsbergbau, sowohl unter- als auch über Tage. Besonderes Augenmerk liegt auf wasserintensiven Prozessen im Bergbau, wobei nicht nur die reine Rohstoffgewinnung, sondern das gesamte System eines Bergwerks analysiert wird. Dies umfasst alle Prozesse, die Fluide nutzen, freisetzen oder in anderer Form einbinden. Das Ziel besteht darin, die hydroelektrischen Potenziale von Hartgesteinsbergwerken systematisch zu identifizieren und zu bewerten sowie die beeinflussenden Parameter zu ermitteln. Ergänzend wird eine Fallstudie durchgeführt, die die wirtschaftlichen und technischen Rahmenbedingungen eines möglichen Systems anhand einer

vergleichbaren Anwendung näher eingrenzt. Im Rahmen dieser Dissertation sollen daher folgende Ziele erreicht werden:

(i) **Qualitative Bewertung** und **quantitative Abschätzung** von methodisch identifizierten und definierten **hydroelektrischen Potenzialen** in Bergwerksstandorten.
(ii) Identifikation und Bewertung bergbaulicher **Planungsparameter** im Hinblick auf ihren **Einfluss**, ihre **Ausschlusswirkung** und ihre gezielte **Beeinflussbarkeit** zur Optimierung hydroelektrischer Potenziale.
(iii) Eine Abschätzung der **wirtschaftlichen und technischen Rahmenbedingungen,** die für den Einsatz von Turbinen zur Nutzung unkonventioneller hydroelektrischer Potenziale im Bergbau erforderlich ist.

Die Dissertation dient damit als Grundlage für zukünftige Forschungsvorhaben, die darauf abzielen, technische Lösungen zur Nutzung des Wasserkraftpotenzials in Bergwerken zu entwickeln. Sie richtet sich an (i) Bergwerke, die bisher ungenutzte hydroelektrische Potenziale erschließen wollen, (ii) Unternehmen, die Turbinen für diese Anwendung entwickeln und neue Märkte erschließen möchten, sowie (iii) Forschende, die weitere Erkenntnisse zur Nutzung von Prozesswässern zur Energiegewinnung gewinnen wollen. Aus den Zielen der Arbeit lässt sich folgende Hypothese ableiten:

***„In Bergwerken treten prozessbedingte, bislang unerschlossene hydroelektrische Potenziale auf, deren Erschließung technisch machbar und wirtschaftlich sinnvoll sein kann."***

Diese Hypothese basiert auf der Annahme, dass die spezifischen Eigenschaften und Abläufe im Bergbau zu einer signifikanten Menge an potenzieller und kinetischer Energie in den genutzten Fluiden führen. Die besonderen Eigenschaften sowie die Vielfalt der Bergwerke und ihrer individuellen Prozesse und Wassereigenschaften bieten dabei verschiedene Ansatzpunkte zur Energiegewinnung.

Um das hydroelektrische Potenzial von Bergwerken systematisch zu erschließen, wird das Hauptziel in Teilprobleme gegliedert, die jeweils durch eine Forschungsfrage adressiert werden. Diese Forschungsfragen sind den Kapiteln 4, 5 und 6 zugeordnet und so aufgebaut, dass sie von einer allgemeinen Betrachtung zu spezifischeren Aspekten überleiten. Folgende Forschungsfragen sollen in dieser Dissertation beantwortet werden:

(i) **Kapitel 4:** Welche hydroelektrischen Potenziale treten im Hartgesteinsbergbau auf und wie können diese systematisch identifiziert und bewertet werden?
(ii) **Kapitel 5:** Welche bergbaulichen Planungsparameter beeinflussen das hydroelektrische Potenzial von Bergwerken und wie können diese beeinflusst werden, um das Potenzial zu optimieren?
(iii) **Kapitel 6:** Unter welchen wirtschaftlichen und technischen Rahmenbedingungen können hydroelektrische Potenziale im Bergbau genutzt werden und wie können diese Potenziale optimiert werden?

Die Forschungsfragen dieser Arbeit sind klar voneinander abgegrenzt und folgen einem stringenten, logischen Aufbau. Durch ihre systematische Beantwortung werden zunächst die hydroelektrischen Potenziale detailliert identifiziert. Anschließend werden die relevanten bergbaulichen Einflussfaktoren analysiert und deren Auswirkungen auf das Potenzial herausgearbeitet. Abschließend werden die technischen und wirtschaftlichen Anforderungen an mögliche Technologien anhand einer Fallstudie skizziert, um konkrete Empfehlungen für die praktische Umsetzung zu erarbeiten.

## 1.5. Methodik und Vorgehen

Nachfolgend wird zunächst der Betrachtungsrahmen dieser Arbeit definiert, anschließend die allgemeine Methodik erläutert und darauf aufbauend für die drei Hauptkapitel das jeweilige methodische Vorgehen beschrieben.

In der vorliegenden Arbeit wird das hydroelektrische Potenzial von Bergwerken untersucht. Unter Bergwerken sind dabei Rohstoffgewinnungsbetriebe zu verstehen, die metallische Erze im Unter- oder Übertagebau aus Hartgestein gewinnen. Im Fokus stehen vor allem Buntmetallbergwerke, da diese aufgrund ihrer Abbau- und Aufbereitungsprozesse einen besonders hohen Wasserverbrauch aufweisen. Andere Arten des Bergbaus, wie etwa der Kohle- oder Salzbergbau, werden nicht näher betrachtet. Ein Bergwerk wird in dieser Arbeit als ein System verstanden, dessen Systemgrenzen alle Infrastrukturen umfassen, die unmittelbar für den Betrieb notwendig sind. Bei den betrachteten Fluiden handelt es sich sowohl um Frischwasser als auch um Prozesswasser und Schlämme.

Die Auswahl einer geeigneten Methodik zur Erreichung des Forschungsziels dieser Arbeit berücksichtigt mehrere Kriterien, darunter die Anwendbarkeit auf den Untersuchungsgegenstand, die Art und Verfügbarkeit der Daten sowie die Charakteristika und Ziele des Forschungsvorhabens. Die Anforderungen an wissenschaftliche Arbeiten lassen sich nach dem Ordnungsschema von Anderson et al. (2001) den Dimensionen theoretische und methodische Strenge (Rigour) sowie praktische Relevanz (Relevance) zuordnen. Die vorliegende Arbeit ist demnach der Kategorie „theoretisch fundierte und pragmatische Wissenschaft“ (Pragmatic Science) zuzuordnen, wobei die Forschungsfragen aus praktischen Problemstellungen abgeleitet sind.

Die Untersuchung konzentriert sich auf die Entwicklung hydroelektrischer Potenziale in Bergwerken. Es handelt sich hierbei um eine deskriptive und induktive logische Herausforderung, da zwei fachfremde Disziplinen, Bergbau und Wasserkraft, kombiniert werden, ohne dass ein etabliertes und umfassendes Forschungsfeld in der Literatur vorhanden ist. Die verfügbaren Daten für diese Aufgabe sind überwiegend literaturbasiert, unvollständig und nicht spezifisch für die Fragestellung erhoben worden.

Um dieser komplexen Thematik gerecht zu werden, folgt die Arbeit einem kombinierten methodischen Ansatz, der sowohl induktive als auch deduktive Elemente integriert. Zunächst werden Hypothesen auf Basis verfügbarer, literaturbasierter und somit stichprobenartiger Daten abgeleitet. Diese Hypothesen werden von der Einzelbetrachtung ausgehend verallgemeinert. Im deduktiven Teil wird ein Modell entwickelt, das die Ergebnisse analytisch evaluiert, projiziert und validiert. Dieses Modell basiert auf einer Fallstudie, deren spezifische Gegebenheiten abstrahiert werden, um allgemeingültige Aussagen zu ermöglichen (Ulrich und Hill 1976, S. 347). Im Detail gliedert sich das methodische Vorgehen entsprechend der Hauptkapitel in drei Teile:

Im **ersten Hauptkapitel** „Identifikation und Bewertung hydroelektrischer Potenziale im Bergbau“ (vgl. Kapitel 4) werden zunächst Stellen in Bergwerken identifiziert, an denen hydroelektrische Potenziale vorhanden sein können. Hierfür werden die notwendigen Bedingungen aus der Wasserkraft abgeleitet und mit den Gegebenheiten im Bergbau abgeglichen. Die Auswertung basiert auf literaturbasierten und theoretischen Herleitungen. Potenzialkriterien werden definiert, mit deren Hilfe Fluidströme von Bergwerken auf hydroelektrische Potenziale untersucht und bewertet werden. Die identifizierten Potenzialstellen werden anschließend als Potenzialkategorien zusammengefasst und abgegrenzt, um weitere Details auszuarbeiten, Anwendungsgrenzen zu definieren und die Ergebnisse für den weiteren Verlauf der Arbeit nutzbar zu machen. Die Detailausarbeitung erfolgt anhand klar festgelegter Kriterien, welche die Bedingungen und Annahmen jeder Potenzialkategorie präzise beschreiben. Abschließend werden die Potenzialszenarien mithilfe einer SWOT-Analyse hinsichtlich ihrer Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken bewertet.

Das **zweite Hauptkapitel** „Einfluss bergbaulicher Planungsparameter auf das hydroelektrische Potenzial“ (vgl. Kapitel 5) untersucht den Einfluss bergbaulicher Planungsparameter auf die zuvor identifizierten Potenzialkategorien. Für die Kategorien werden systematisch die bergmännischen Planungsparameter ermittelt, die einen direkten Einfluss ausüben. Da die hydroelektrischen Potenziale abhängig von der Auslegung technischer Anlagen sind, können diese durch planerische Anpassungen gezielt verändert werden. Daher wird untersucht, ob eine Veränderung des jeweiligen Parameters das hydroelektrische Potenzial beeinflusst und inwiefern diese Anpassung eine Vergrößerung, Verkleinerung, Ermöglichung oder Verhinderung des Potenzials bewirken kann.

Im **dritten Hauptkapitel** „Wirtschaftliche und technische Fallstudie einer Wasserkraftanlage im Bergbau“ (vgl. Kapitel 6) wird anhand einer Fallstudie eine Abschätzung der wirtschaftlich und technisch notwendigen Rahmenbedingungen für die Nutzung hydroelektrischer Potenziale erarbeitet. Hierzu werden relevante Daten aus einer realen Fallstudie einer Pumpenturbine in einer Laugungsrohrleitung eines Bergwerks verwendet. Diese Daten werden auf ein in Kapitel 4 entwickeltes Potenzialszenario übertragen sowie mit den in Kapitel 5 analysierten Planungsparametern untersucht. Mithilfe von Sensitivitätsanalysen wird ein Modell entwickelt, welches die technisch und wirtschaftlich erforderlichen Parameter und Rahmenbedingungen eingrenzt, die eine technische Lösung zur Nutzung hydroelektrischer Potenziale im Bergbau erfüllen müsste.

Der theoretische Ansatz dieser Arbeit gegenüber einer rein praktischen Fallstudie ermöglicht eine Verallgemeinerung der Ergebnisse und damit eine spätere Abstraktion sowie eine breitere Anwendbarkeit. Zudem wird auf diese Weise ein umfassender Überblick über die möglichen Wasserkraftpotenziale im Bergbau gewährleistet. Die Struktur der Arbeit und der methodische Zusammenhang der Kapitelinhalte sind in Abbildung 1-1 schematisch dargestellt.

## 1.6. Aufbau

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in drei Hauptkapitel, denen ein Grundlagenteil sowie ein Kapitel mit einer ausführlichen Literaturrecherche vorangestellt sind. Den Hauptkapiteln folgen eine Diskussion und ein abschließendes Fazit.

In den **theoretischen Grundlagen** werden die Hintergründe der Wasserkraft und des Bergbaus erläutert, um die relevanten Voraussetzungen und Prinzipien aus beiden Bereichen darzustellen. Es werden Theorien und Methoden zur Bilanzierung von Wasser, zur Berechnung von Wasserkraftpotenzialen sowie zur technischen Nutzung solcher Potenziale dargelegt.

Die **Literaturrecherche** zeigt bisherige Ansätze zur Nutzung von Wasser und anderen Fluiden zur Energieerzeugung im Kontext des Bergbaus und stellt deren Stand und Umfang systematisch dar.

Im **ersten Hauptkapitel** „Identifikation und Bewertung hydroelektrischer Potenziale im Bergbau“ werden die hydroelektrischen Potenziale von Hartgesteinsbergwerken systematisch erarbeitet. Dafür werden Potenzialkriterien definiert, und aus Wasserbilanzen werden mögliche Betriebspunkte zur Nutzung der hydroelektrischen Potenziale identifiziert. Anhand dieser Kriterien werden die Betriebspunkte bewertet, sodass klar abgegrenzte Potenzialkategorien entstehen. Diese werden abschließend mithilfe einer SWOT-Analyse hinsichtlich ihrer Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken untersucht.

Das **zweite Hauptkapitel** „Einfluss bergbaulicher Planungsparameter auf das hydroelektrische Potenzial“ vertieft die Analyse der entwickelten Szenarien für die hydroelektrischen Potenziale. Für die Szenarien werden die relevanten bergbaulichen Einflussfaktoren und Planungsparameter systematisch untersucht. Daraus ergeben sich Rückschlüsse, wie gezielte Optimierungen dazu beitragen können, die Potenziale in Bergwerken zu vergrößern oder gezielt nutzbar zu machen. Da kein Bergwerk dem anderen gleicht, werden die Szenarien durch die detaillierte Analyse der jeweiligen Parameter weiter präzisiert und greifbar gemacht.

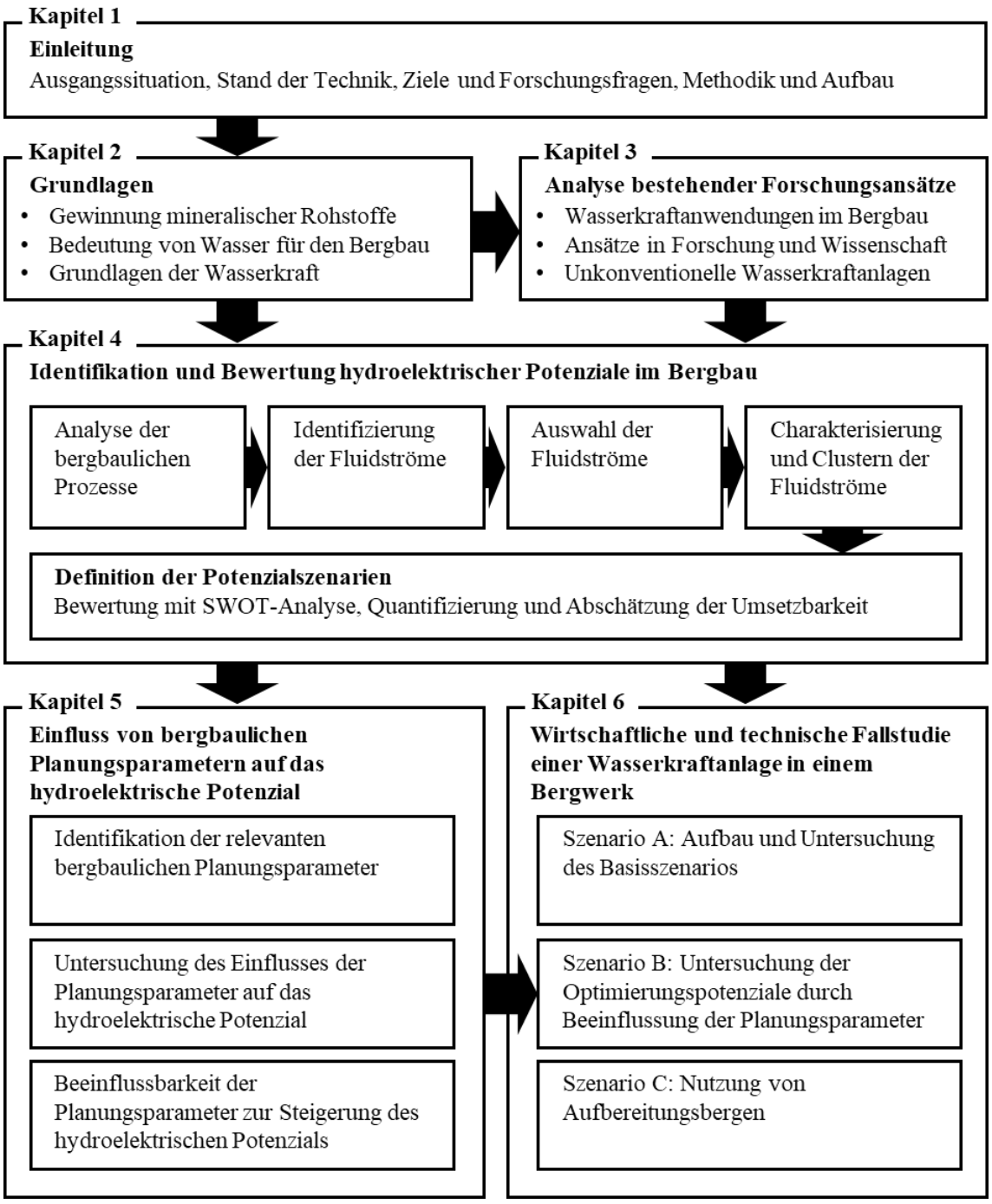



*Abbildung 1-1: Methodischer Aufbau der Arbeit, eigene Darstellung*

Im **dritten Hauptkapitel** „Wirtschaftliche und technische Fallstudie einer Wasserkraftanlage im Bergbau“ wird eine Fallstudie zum Einsatz von Turbinen zur Nutzung hydroelektrischer Potenziale im Bergbau entwickelt. Die Fallstudie betrachtet drei Szenarien: Im ersten wird die Wirtschaftlichkeit der Anlage analysiert, das zweite Szenario untersucht potenzielle Optimierungen, und im dritten Szenario wird ermittelt, welche wirtschaftlichen und technischen Parameter eine Turbine erfüllen muss, damit sich ihr Einsatz wirtschaftlich lohnt und auch andere Fluide als Wasser genutzt werden können.

In der **Diskussion** werden die Ergebnisse dieser Arbeit kritisch reflektiert. Das Vorgehen und die Resultate der jeweiligen Kapitel werden im Detail betrachtet und mögliche Schwächen sowie Chancen herausgearbeitet. Auf diese Weise werden die Qualität und Aussagekraft der Ergebnisse beurteilt und notwendiger weiterer Forschungsbedarf für die Zukunft aufgezeigt. Die Arbeit schließt mit einem Fazit ab, in dem die wichtigsten Schlussfolgerungen und Ergebnisse prägnant dargestellt werden.

## 1.7. Signifikanz

Keine zwei Lagerstätten sind identisch, daher gleicht auch kein Bergwerk dem anderen. Aus diesem Grund ist es schwierig, allgemeingültige Aussagen über das hydroelektrische Potenzial von Bergwerken zu treffen. Diese Arbeit widmet sich daher systematisch der Frage, wie die Wasserkraftpotenziale in tausenden einzigartigen Bergwerken analysiert werden können, ohne für jedes einzelne eine aufwendige Fallstudie erstellen zu müssen.

Der menschengemachte Klimawandel, das gestiegene Bewusstsein für Umwelt und Nachhaltigkeit sowie der wachsende Bedarf an mineralischen Rohstoffen unterstreichen die Bedeutung des Bergbaus. Obwohl der Bergbau eine unverzichtbare Industrie darstellt, hat er erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt. Es liegt daher in der Verantwortung dieser Branche, kontinuierlich an der Reduzierung ihrer ökologischen Auswirkungen zu arbeiten. Die Möglichkeit, die im Bergbau genutzten Fluidströme energetisch zu nutzen, greift dieses Ziel direkt auf: Dem eingesetzten Wasser kann ein zusätzlicher Wert verliehen werden, während gleichzeitig der Energiebedarf des Bergwerks gesenkt wird.

Die Entwicklung realistischer und umsetzbarer Konzepte zur Nutzung hydroelektrischer Potenziale im Bergbau bildet die Grundlage für zukünftige technische Fortschritte und praktische Anwendungen. Mit einem klaren Fokus auf die technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen legt die Fallstudie dieser Arbeit hierfür den Grundstein.

Darüber hinaus leistet die Arbeit einen wichtigen Beitrag zur wissenschaftlichen Weiterentwicklung des Themenfelds. Sie etabliert einen systematischen Ansatz zur Identifikation und Bewertung hydroelektrischer Potenziale, der bisher fehlte. Dieser Ansatz ist nicht nur auf einzelne Standorte beschränkt, sondern kann international angewendet und an unterschiedliche geologische, geografische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen angepasst werden. Damit bietet die Arbeit ein Modell, das die Lücke zwischen theoretischen Ansätzen und praktischen Anwendungen schließt.

Auch gesellschaftlich eröffnen sich neue Perspektiven: Die Nutzung bislang ungenutzter hydroelektrischer Potenziale kann nicht nur die Nachhaltigkeit von Bergwerken erhöhen, sondern auch zur lokalen Energieversorgung beitragen und die öffentliche Akzeptanz des Bergbaus stärken. Zudem liefert die Arbeit Impulse für Technologieunternehmen und Turbinenhersteller, die neue Anwendungen für Feststoffturbinen und ähnliche Technologien entwickeln möchten. Sie legt somit den Grundstein für weitere Innovationen und langfristige Fortschritte im Bereich nachhaltiger Bergbautechnologien.

# 2. Grundlagen der Wasserkraft und Wasser im Kontext des Bergbaus

## 2.1. Einleitung

Bereits früh wurde die Energie des Wassers im Oberharzer Bergbau genutzt, mit der Industrialisierung und dem Übergang zu Dampf- und später elektrischen Maschinen verlor die direkte Nutzung von Wasserkraft im Bergbau jedoch an Bedeutung. Gleichzeitig stieg der Wasserverbrauch im Bergbau erheblich an und die Wasserkraft hat sich parallel zu einem eigenständigen Sektor mit großtechnischen Anlagen entwickelt. Heute gelten Bergbau und Wasserkraft als weitgehend getrennte Disziplinen.

Ziel des zweiten Kapitels dieser Arbeit ist es, die Grundlagen der Wasserkraft und die Rolle von Wasser im Kontext des Bergbaus darzulegen. In Kapitel 2.2 wird dafür zuerst die Gewinnung mineralischer Rohstoffe im internationalen Bergbau behandelt, bevor Kapitel 2.3 die Planungsphasen von Bergwerken darlegt und Kapitel 2.4 die Rolle von Wasser im modernen Bergbau beschreibt. Kapitel 2.5. erläutert die technischen und physikalischen Grundlagen der Wasserkraft sowie den Aufbau und die Planung von Wasserkraftanlagen, bevor in Kapitel 2.6 eine Schlussfolgerung zu den Grundlagen gezogen wird.

## 2.2. Gewinnung mineralischer Rohstoffe im Bergbau

Die Bergbauindustrie, gekennzeichnet durch die Aktivitäten Exploration, Gewinnung, Aufbereitung, Verarbeitung und Veredelung, stellt eine wesentliche Rohstoffquelle für zahlreiche Industriezweige dar. Prognosen gehen davon aus, dass die Nachfrage nach Rohstoffen perspektivisch weiter steigen wird, da die Weltbevölkerung wächst und viele Volkswirtschaften mit niedrigem Einkommen einen Entwicklungsprozess durchlaufen (Igogo et al. 2021).

Primäre mineralische Rohstoffe werden in der Regel in über- oder untertägigen Bergwerken gewonnen. Die Wahl der Abbaumethode richtet sich nach den spezifischen Charakteristika der Lagerstätte und wird von aktuellen Anforderungen hinsichtlich Sicherheit, Technologie, Umwelteinwirkungen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen bestimmt. Beim Tagebau werden oberflächennahe Lagerstätten abgebaut, die meist homogen sind und in engem Zusammenhang mit dem umgebenden Nebengestein stehen. Diese Methode macht weltweit etwa 80 % der Festgesteinsbergwerke aus. Ein wesentliches Merkmal ist, dass das Deckgebirge über dem Wertmineral entfernt werden muss. Tagebaue sind durch das Abraumverhältnis gekennzeichnet, das häufig zwischen 1 und 4 liegt (Rankin 2011, S. 131).

Im Gegensatz dazu erfolgt der Abbau beim untertägigen Bergbau in unterirdischen Grubenräumen. Diese Methode eignet sich besonders für tief liegende Lagerstätten, wobei Teufen von mehreren tausend Metern erreicht werden können. Ein wesentlicher Vorteil gegenüber dem übertägigen Bergbau besteht darin, dass deutlich weniger Abraum bewegt werden muss; das Abraumverhältnis liegt meist unter 1 und insbesondere bei metallischen Erzen oft zwischen 0,05 und 0,3 (Rankin 2011, S. 131).

Abbildung 2-1 zeigt das prozesstechnische Fließbild eines typischen Erzbergwerks. Im unter- oder übertägigen Bergwerk wird das Erz durch Sprengungen aus dem Gebirgsverbund gelöst und mit SKWs oder anderen Transportmitteln zum Vorbrecher transportiert. Anschließend wird das Erz zerkleinert und das Wertmineral wird mithilfe von Flotation oder anderen Sortierverfahren vom tauben Gestein getrennt. Das taube Gestein wird als Suspension in den Bergeteich geleitet, während das Erzkonzentrat getrocknet und als finales Produkt vom Bergwerksgelände abtransportiert wird.

Neben seiner wirtschaftlichen Bedeutung zählt der Bergbau zu den energieintensivsten Industrien weltweit und stellt einen signifikanten Faktor im globalen Energieverbrauch dar. Die wachsende Nachfrage

nach Rohstoffen in Kombination mit sinkenden Erzgehalten wird den Energiebedarf des Bergbausektors weiter steigen lassen. Ein wesentlicher Treiber ist die zunehmende Komplexität bei der Erschließung von Lagerstätten, da hochwertige und leicht zugängliche Vorkommen weitgehend erschöpft sind. In der Folge muss für die Gewinnung jeder Tonne Rohstoff mehr Energie aufgewendet werden, um tieferliegende oder weniger konzentrierte Lagerstätten zu erschließen. Aramendia et al. (2023) schätzen den Anteil des Bergbaus am globalen Endenergieverbrauch für die Gewinnung und Aufbereitung mineralischer Rohstoffe (exklusive fossile Energierohstoffe und die metallurgische Weiterverarbeitung) auf 1,7 % und prognostizieren bis 2060 eine Steigerung dieses Anteils um das Zwei- bis Achtfache. Dies stellt die Branche vor erhebliche Herausforderungen, insbesondere hinsichtlich der Reduzierung von Emissionen und der Notwendigkeit, effizientere Technologien und Prozesse zu entwickeln (Norgate und Haque 2010; Igogo et al. 2021).

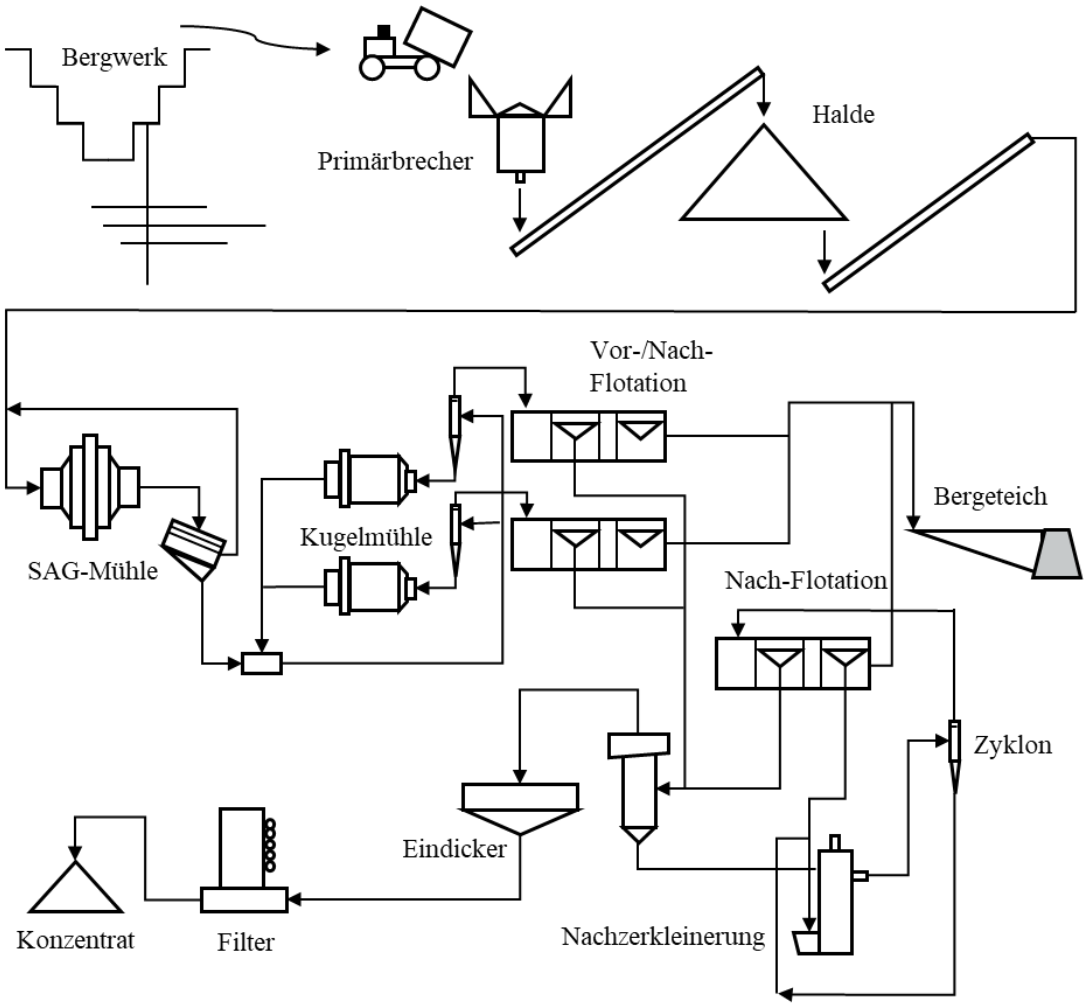



*Abbildung 2-1: Prozesse eines typischen Erzbergwerks, eigene Darstellung nach Gunson (2013)*

Grundsätzlich kann der Bergbau auf verschiedene Methoden zur Senkung des Energiebedarfs und zur Verringerung von Treibhausgasemissionen zurückgreifen. Eine verstärkte Nutzung erneuerbarer Energien kann dazu beitragen, die prognostizierten Auswirkungen des steigenden Energiebedarfs abzumildern. Dazu zählen unter anderem die Energierückgewinnung, der Einsatz erneuerbarer Energiequellen und die $CO_2$-Speicherung. Zwischen 2015 und 2019 ist die Kapazität installierter erneuerbarer Energien im Bergbau von 600 MW auf 5 GW gestiegen. Einem weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien stehen jedoch verschiedene Herausforderungen entgegen. Bergwerke werden rund um die Uhr betrieben und weisen spezifische Lastprofile auf. Zudem sind die Unternehmen häufig an langfristige und wenig flexible Versorgungsverträge gebunden. Hinzu kommen räumliche Einschränkungen sowie politische und regulatorische Hürden in bestimmten Regionen (Igogo et al. 2021).

## 2.3. Planungsphasen von Bergbauprojekten

Ein Bergbauprojekt durchläuft mehrere Phasen, beginnend mit einer ersten Vorstudie über die volle Produktionsaufnahme bis hin zur Rekultivierung nach dem aktiven Betrieb. Die Planungsphase gliedert sich typischerweise in drei aufeinanderfolgende Schritte: die Vorstudie (*Scoping Study*), die vorläufige Machbarkeitsstudie (*Pre-Feasibility Study*) und die vollständige Machbarkeitsstudie (*Feasibility Study*). Diese Phasen haben den größten Einfluss auf die Auslegung und Planung eines Bergwerks (Hartman und Mutmansky 2002).

Die Planung in den einzelnen Phasen umfasst eine Vielzahl miteinander verknüpfter Disziplinen mit dem übergeordneten Ziel, eine Lagerstätte unter Berücksichtigung von Sicherheit, Effizienz und Profitabilität abzubauen. Die Komplexität der Planung wird maßgeblich durch spezifische Risiken und Unsicherheiten bestimmt. Häufig bestehen zahlreiche Planungsziele mit unterschiedlichen Prioritäten, die potenzielle Zielkonflikte aufweisen können. Bergbauprojekte erfordern erhebliche finanzielle Investitionen, lange bevor in der aktiven Betriebsphase Gewinne erzielt werden. Dies verdeutlicht die zentrale Bedeutung einer sorgfältigen, mehrstufigen Planung, um Unsicherheiten zu minimieren und die Zielerreichung in den verschiedenen Phasen sicherzustellen. Mit fortschreitender Zeit nehmen sowohl die Ungenauigkeit als auch das Planungsrisiko ab, während gleichzeitig die Kosten und die Kapitalbindung steigen (vgl. Abbildung 2-2) (Hustrulid et al. 2013; Bise 2003; Roumpos und Papacosta 2013).

Die initiale Vorstudie beinhaltet eine konzeptionelle Bewertung einer potenziellen Lagerstätte mit dem Ziel, die grundlegenden Rahmenbedingungen für eine Investition in ein neues Bergbauprojekt zu bestimmen. Fällt die Bewertung positiv aus, folgt eine vorläufige Machbarkeitsstudie, die die technischen, finanziellen und kritischen Aspekte des Projekts genauer eingrenzt und dessen Rentabilität analysiert. Auf Grundlage der Ergebnisse wird entschieden, ob eine detaillierte Machbarkeitsstudie durchgeführt wird. Diese bildet die Basis für die endgültige Investitionsentscheidung zur Entwicklung des Bergbauprojekts. Die Machbarkeitsstudie umfasst mehrere abschließende technische, sozioökologische und wirtschaftliche Untersuchungen. Sie liefert fundierte Informationen über die Lagerstätte, legt eine geeignete Abbaumethode fest, definiert die erforderlichen Bergbau- und Hilfseinrichtungen sowie die notwendige Infrastruktur und ermöglicht eine präzise Prognose der Gesamtbetriebskosten (Hustrulid et al. 2013, S. 11; Lowrie 2002).

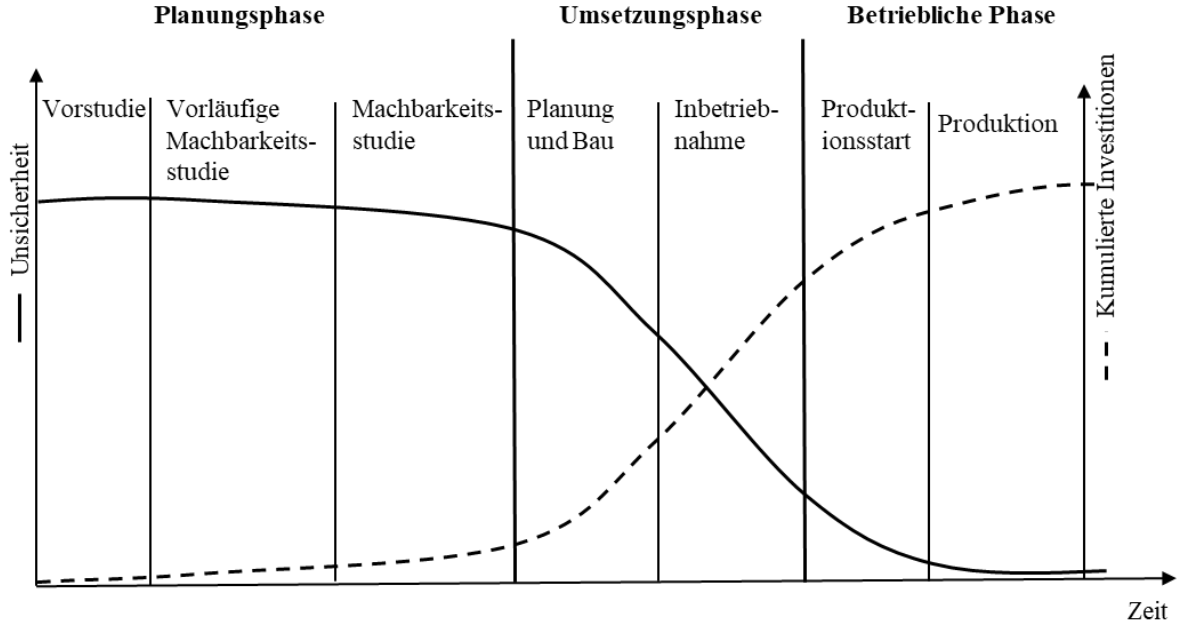



*Abbildung 2-2: Projekt- und Planungsphasen eines Bergwerks mit implizierter Unsicherheit und kumulierten Investitionskosten, eigene Darstellung nach Hustrulid et al. (2013)*

Auf Grundlage der Lagerstättenmodellierung werden die Reserven geschätzt und das Abraumvolumen quantifiziert. Darauf basierend werden wirtschaftliche Überlegungen für das jeweilige Projekt abgeleitet. Diese Parameter sowie weitere standortspezifische Faktoren, darunter Klima, Genehmigungen, Topografie und Geologie, beeinflussen maßgeblich die grundlegende Auslegung des Bergwerks, den Produktionsplan und die Anforderungen an die Betriebsmittel. Für eine detaillierte Planung sind zudem weitere Disziplinen von Bedeutung, darunter die Versorgungseinrichtungen, die allgemeine Infrastruktur, die mineralische Aufbereitungsanlage, die Deponierung von Nebengestein sowie das Management der Aufbereitungsberge (Larsen et al. 2016). Ein zentraler Aspekt der verschiedenen Studien ist die präzise Ermittlung der Kosten. Dabei werden sowohl die operativen Kosten als auch die erforderlichen Kapitalinvestitionen berechnet, um die wirtschaftliche Machbarkeit des Vorhabens zu bewerten. Zu diesem Zweck werden die ökonomischen Parameter aus den jeweiligen Planungsentscheidungen und -faktoren abgeleitet und zusammengeführt (Hustrulid et al. 2013, S. 14).

## 2.4. Wasser im Kontext des Bergbaus

Das Wasser sei „Freund und Feind des Bergmanns“, heißt es. Dringt es in die Grube ein, muss es gehoben werden, fließt es unkontrolliert, wird es schnell gefährlich. Jahrhundertelang war die Wasserkraft aber auch die wichtigste Energiequelle im Bergbau und trieb direkt Maschinen an, vor allem zur Wasserhaltung. Heute ist Wasser für zahlreiche Prozesse im Bergbau unverzichtbar, zugleich birgt seine Nutzung und Beeinflussung erhebliche Risiken.

Ein Bergwerk ist integraler Bestandteil eines Wassereinzugsgebiets, das sämtliche Wasserkreisläufe wie Oberflächengewässer und Grundwasser umfasst. Das Wasser innerhalb dieses Systems weist typische hydrologische Eigenschaften auf: Es fließt, verdunstet, versickert und sammelt sich auf den vom Bergbau genutzten Flächen. Bergwerke sind auf lokale Wasserressourcen angewiesen und entnehmen die benötigten Mengen entweder direkt aus natürlichen Quellen wie Bächen, Flüssen und Seen oder indirekt aus errichteten Dämmen oder bestehenden Wasserversorgungssystemen (Northey et al. 2015; Northey et al. 2017).

Die Ressource Wasser spielt für die Bergbauindustrie eine zentrale Rolle und ist eine der wesentlichen Einflussgrößen bei der Realisierung von Bergbauprojekten. Bergwerke verbrauchen große Wassermengen und erzeugen gleichzeitig erhebliche Mengen an Abwasser (Punkkinen et al. 2016, S. 14). Der Bergbau kann regional sowohl der größte Wasserverbraucher als auch ein bedeutender Wasserversorger sein. In der Regel errichten Bergwerke eigene Infrastrukturen für die Wasserversorgung. Für die Genehmigung neuer Bergwerke müssen strenge nationale Vorschriften zur Wasserentnahme eingehalten und deren Einhaltung durch Umweltverträglichkeitsprüfungen nachgewiesen werden (Younger et al. 2002).

Im Bergbau tritt Wasser in unterschiedlichen Arten und Qualitäten auf. Nach Lottermoser (2010, S. 9) lassen sich folgende Kategorien unterscheiden:

- Grubenwasser,
- gehobenes Grubenwasser,
- gehobenes saures Grubenwasser,
- bergbaulich kontaminiertes Wasser,
- Prozesswasser,
- Sickerwasser, und
- Abwasser.

Die Relevanz von Wasser im Bergbau hängt maßgeblich von dessen Nutzung und Aufkommen im globalen Kontext ab. Bergbau findet in allen klimatischen Regionen statt, von den Trockengebieten Australiens über tropische Gebiete bis hin zu subarktischen Regionen wie Kanada und Finnland. Das örtliche

Klima und die Hydrologie bestimmen die Anforderungen an die Infrastruktur der Bergwerke und haben erheblichen Einfluss auf die Art der wasserbezogenen Risiken, denen die Bergwerke sowie die umliegenden Gemeinden, Ökosysteme und Industrien ausgesetzt sind (Northey et al. 2016, S. 1099).

Der Abbau mineralischer Rohstoffe hat direkte Auswirkungen auf die natürlichen Grundwasserressourcen. Wenn Grundwasser in einen Tagebau oder ein untertägiges Bergwerk eintritt, muss das Grubengebäude entwässert werden, um die Grubenbaue offen zu halten, eine Flutung zu verhindern und die Stabilität des Bodens sicherzustellen (Lottermoser 2010, S. 119). Ständiges Abpumpen senkt jedoch den Grundwasserspiegel, trocknet nahe gelegene Grundwasserleiter aus und beeinflusst unbeabsichtigt die Oberflächengewässer und die lokale Ökologie rund um den Bergwerksstandort (Jain et al. 2016, S. 95).

Einerseits muss die Bergbauindustrie wasserbezogene Risiken bewältigen, die unter anderem mit Wasserknappheit, Überschwemmungen, Verschmutzung und Konflikten in den Gemeinden verbunden sind. Andererseits ist der Bergbau aufgrund der großen Wassermengen, die verbraucht und abgeleitet werden, ein wichtiger Investor in die Wasserinfrastruktur und deren Betreiber. Die effiziente Erfüllung dieser wasserwirtschaftlichen Aufgaben erfordert ein gutes Verständnis der Zusammenhänge zwischen den Optionen der Wasserbewirtschaftung und ihren wirtschaftlichen Kosten und Nutzen (Ossa-Moreno et al. 2018, S. 368).

Der Einfluss des Bergbaus auf die Ressource Wasser sowie der Umgang mit ihr werden im Folgenden detailliert betrachtet. Dazu werden der Wasserverbrauch und die Wassernutzung in der Rohstoffgewinnung erläutert, die Grundlagen zur Bilanzierung vom Wasserverbrauch im Bergbau dargelegt sowie moderne Ansätze der Wasserwirtschaft und des Wassermanagements erläutert.

### *2.4.1. Wassernutzung*

Im Bergbau und bei der mineralischen Aufbereitung werden in allen Phasen und für zahlreiche Tätigkeiten große Mengen an Wasser entnommen, verbraucht und abgeleitet. Der Wasserbedarf und die Wassernutzung unterscheiden sich je nach Phase erheblich. Während der Explorationsphase wird eine vorübergehende Wasserversorgung für die Explorationsbohrungen benötigt. In der Betriebsphase ist ein umfassendes Wassermanagementsystem erforderlich, das die mineralische Aufbereitung, den hydraulischen Feststofftransport, die Entwässerung, die Staubunterdrückung sowie sanitäre Zwecke abdeckt. In der Nachbergbauphase sind Konzepte für die Wasserhaltung in stillgelegten Grubenbauen oder das kontrollierte Fluten dieser Bereiche notwendig (ICMM 2012; Jain et al. 2016, S. 92; Punkkinen et al. 2016).

Der Bergbau ist auf große Mengen Wasser angewiesen, um Erze in handelbare mineralische Rohstoffe zu verarbeiten. Das Wasser kann dabei entweder chemisch verändert, verbraucht oder in physikalischen Prozessen eingesetzt werden. In physikalischen Prozessen wird die chemische Struktur des Wassers zwar nicht verändert, es kann jedoch durch Kontamination verunreinigt werden. Mithilfe von Energieeinsatz kann das Wasser in Quantität und Qualität wiederaufbereitet werden. Ein Großteil des Wassers lässt sich durch vergleichsweise einfache physikalische Verfahren wie Filtration und Eindickung zurückgewinnen (Rankin 2011, S. 231).

Die wasserintensivsten Prozesse in einem Bergwerk sind nach Younger et al. (2002) und Price (2009):

- Der hydraulische Transport von Erz, Abraum und Konzentraten in Form von Schlämmen und Suspensionen,
- die Sortierung von Mineralen durch chemische Prozesse,
- das Kühlen von Anlagen,
- die Staubunterdrückung in Tagebauen, sowie
- sanitäre Zwecke, Waschanlagen und sonstige Nebenprozesse.

Abbildung 2-3 zeigt typische Wasserzuflüsse und -abflüsse der wasserintensiven bergbaulichen Prozesse. Nach Gunson (2013, S. 28) verbraucht die Aufbereitungsanlage in der Regel den größten Teil des Wassers, während der Bergeteich den größten Wasserverlust aufweist. In der Gewinnung wird Wasser meist nur in vergleichsweise geringen Mengen eingesetzt; die weitaus größeren Wassermengen werden in der mineralischen Aufbereitung benötigt.

Der Gesamtwasserbedarf hängt maßgeblich vom jeweiligen Aufbereitungsverfahren ab, das sich grob in Trocken- und Nassaufbereitungsverfahren unterteilen lässt. Zu den Trockenaufbereitungsverfahren zählen beispielsweise Luftzyklone oder Magnetabscheider. Die Nassaufbereitung umfasst Verfahren wie Flotation, Laugung und Schwerkraftabscheidung. Nassaufbereitungsverfahren sind in der Regel vorteilhaft, da sie ein höheres Ausbringen und höhere Durchsatzraten ermöglichen, den Transport von Material als Suspension erleichtern und die chemischen Eigenschaften der Minerale gezielt genutzt werden können (Younger et al. 2002).

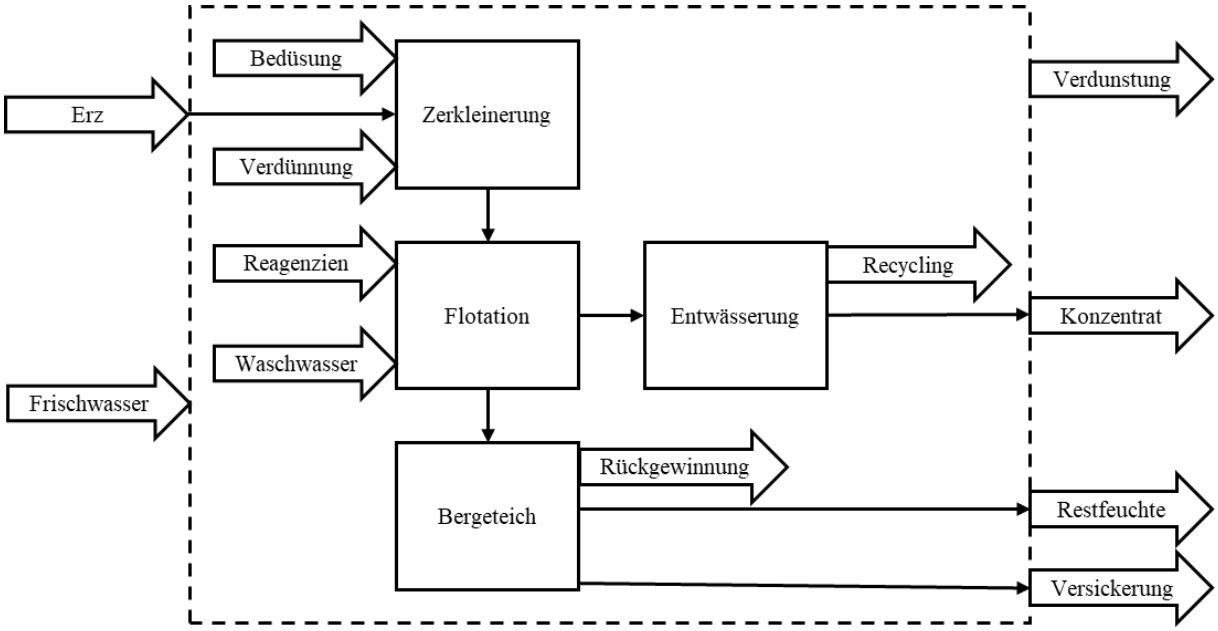



*Abbildung 2-3: Typische Wasserzuflüsse und -abflüsse in einem Bergwerk, eigene Darstellung nach Gunson (2013, S. 168)*

Die erforderliche Wassermenge von Aufbereitungsanlagen hängt von der Menge des verarbeiteten Materials sowie von der angestrebten Feststoffdichte in den einzelnen Prozessschritten ab. Der größte Teil des Wassers verlässt die Aufbereitungsanlage über die Feuchtigkeit bzw. den Wasseranteil in den Aufbereitungsbergen und im Konzentrat. Der Anteil des durch Verdunstung, Versickerung, Abfluss oder physikalische Mitnahme verlorenen Wassers, der nicht direkt wiederverwendet werden kann, ist maßgeblich von der Art der Lagerung der Aufbereitungsberge abhängig. Werden die Berge in Dammstrukturen gelagert, kann eine nasse Schicht zur Abdeckung erforderlich sein, um Verwitterungsprozesse zu reduzieren (Solgi 2017).

### *2.4.2. Wasserbilanzierung*

Durch den Bergbausektor werden im jeweiligen Einflussbereich viele Arten von Wasser genutzt. Diese müssen gezielt verwaltet werden, um sicherzustellen, dass auf dem Bergwerksgelände jederzeit eine ausreichende Wassermenge zur Verfügung steht. Dies erfordert eine präzise Erfassung und Bilanzierung aller auf dem Betriebsgelände entnommenen, intern genutzten, verbrauchten und eingeleiteten Wassermengen (Punkkinen et al. 2016, S. 22; Northey et al. 2019).

Das *Minerals Industry Water Accounting Framework* vom Minerals Council of Australia (MCA) (2022) stellt Unternehmen eine Richtlinie zur Verfügung, um den Wasserverbrauch und die Wassernutzung

systematisch zu bilanzieren. Nach dieser Richtlinie bezeichnet Wasserbilanzierung einen Ansatz zur konsistenten und strukturierten Identifizierung und Quantifizierung sowie zum Verständnis und zur transparenten Kommunikation von Wasserinteraktionen. Eine Wasserbilanz enthält alle Wasserquellen, -speicher und -senken und summiert diese auf. Abbildung 2-4 stellt vereinfacht ein Wasserbilanzsystem eines Bergwerks dar.

In der Praxis stellt sich die Erstellung einer Wasserbilanz komplex dar, da Wasserentnahme, Nutzung und Abwasservolumen von Bergwerk zu Bergwerk stark variieren. Diese Unterschiede ergeben sich aus einer Vielzahl variabler Faktoren, welche in Tabelle 2-1 nach Jain et al. (2016, S. 109) aufgeführt sind. Daher erfordert die individuelle Wassernutzung jedes Bergwerks die Erstellung einer standortspezifischen Wasserbilanz (Janowicz 2011).

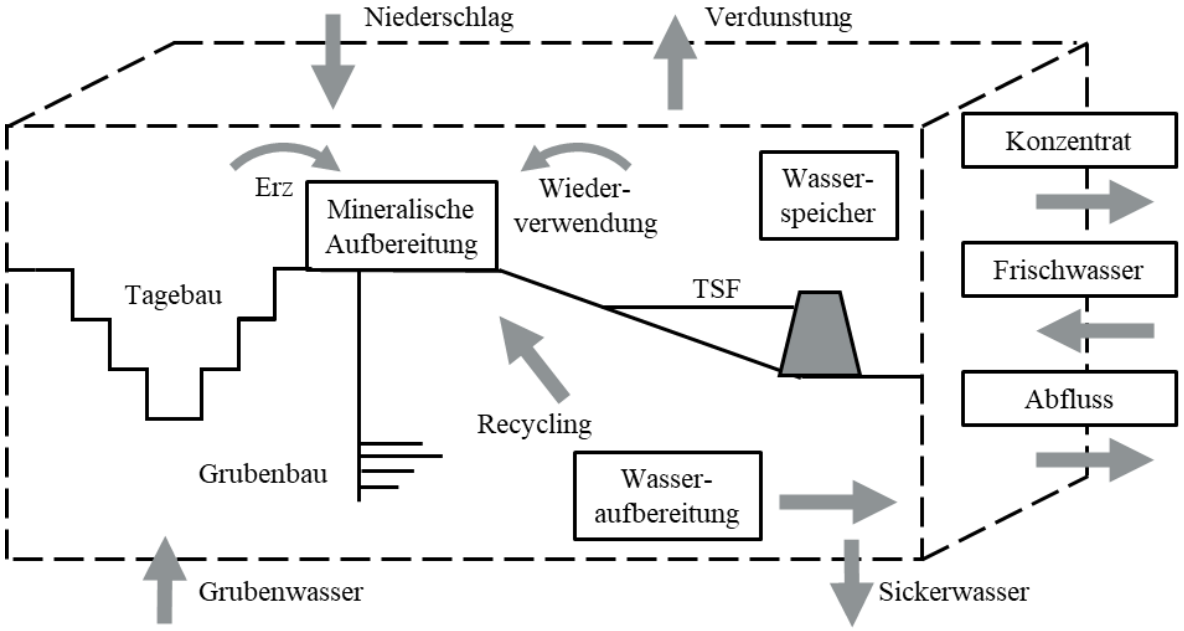



*Abbildung 2-4: Vereinfachte Skizze des Wasserbilanzsystems eines Bergwerks mit den Bilanzgrenzen (gestrichelte Linien) und Wasserbewegungen (Pfeile), eigene Darstellung nach Gunson (2013)*

Die Wasserbilanz eines Bergwerks kann positiv oder negativ ausfallen. Bergwerke mit einer positiven Wasserbilanz verfügen über einen Wasserüberschuss und müssen überschüssiges Wasser aktiv in die Umwelt einleiten. Bergwerke mit einer negativen Wasserbilanz benötigen eine kontinuierliche externe Wasserzufuhr. Je nach Jahreszeit, Witterungsbedingungen und Wassermanagementmethoden kann die Wasserbilanz eines Bergwerks zwischen positiv und negativ schwanken (Punkkinen et al. 2016, S. 14).

Bergwerke können Wasser aus verschiedenen Quellen beziehen; diese werden in der Wasserbilanz als Wasserzuflüsse oder Wasseraufnahmen bezeichnet. Die meisten Bergwerke beziehen Frischwasser direkt aus Flüssen, Bächen, Seen oder von kommerziellen Wasserversorgern. Die Wassermengen in den genannten Oberflächengewässern hängen vom Niederschlag ab, sodass die Verfügbarkeit je nach Jahreszeit und Region stark schwanken kann. Niederschlag kann ebenfalls eine Wasserquelle für Bergwerke darstellen, wenn er gesammelt und gespeichert wird (Dunne 2012, S. 2).

Eine weitere Quelle für Frischwasser ist das Grundwasser. Dieses wird meist direkt aus Grundwasserleitern über Bohrungen oder Brunnen gefördert. Bei der Entnahme von Wasser aus Grundwasserleitern muss jedoch besonders auf mögliche negative Auswirkungen auf die Hydrogeologie geachtet werden, die durch übermäßige Wasserentnahme entstehen können (Dunne 2012, S. 3). Gehobenes Grubenwasser kann ebenfalls als Brauchwasser genutzt und somit als Zufluss in der Wasserbilanz berücksichtigt werden. Hierbei ist die Wasserqualität entscheidend, da organische Verunreinigungen, gelöste Minerale und der pH-Wert die angestrebte Nutzung, etwa in der Aufbereitung oder Flotation, beeinträchtigen können

(Gunson 2013, S. 30). Zusätzlich zu Grubenwasser können unter bestimmten Bedingungen auch andere Wasserquellen wie Abwasser oder Meereswasser genutzt werden (ICMM 2012, S. 7)

*Tabelle 2-1: Einflussparameter der Wasserbilanzierung im Bergbau, nach Jain et al. (2016, S. 109)*

| **Faktor** | **Unterfaktor** |
|---|---|
| Bergbaulicher Prozess | Erztonnage |
| | Frischwasserbedarf |
| | Bedarf an Wasseraufbereitung, -recycling und -rückgewinnung |
| | Wasserverbrauch der mineralischen Aufbereitung |
| | Reststoffe und deren Wassergehalt |
| | Kapazität der Wasserspeicherung |
| Physikalisch | Oberflächenversiegelung |
| | Wasserwirtschaftliche Infrastruktur |
| | Pumpenkapazität |
| Klimatisch | Temperatur |
| | Niederschlag |
| | Verdunstung |
| | Feuchtigkeit |
| Hydrogeologisch | Eigenschaften des Oberflächenwasser |
| | Wasserstände, Oberflächen und Volumen |
| | Fließgeschwindigkeit, Fließrichtung und Grundwassererneuerung |
| Geochemisch | Boden-, Mineral- und Gesteinsarten |
| | Chemie der Entwässerung |

In der Wasserbilanz eines Bergwerks treten neben den Wasserzuflüssen verschiedene natürliche und geplante Wasserverluste auf. Dazu zählt unter anderem das kontrollierte Ableiten von überschüssigem Wasser (Gunson 2013, S. 12). Wasser, das aus dem Bergwerk abgeleitet wird, muss zuvor behandelt werden, um gesetzliche Anforderungen zu erfüllen und das Risiko einer Schädigung der aufnehmenden Umwelt zu minimieren (ICMM 2012, S. 8).

Neben den geplanten und überwachten Wassereinleitungen in die Umwelt gibt es unbeabsichtigte, aber erwartete Wasserabflüsse in Form von Infiltration, Versickerung und Leckagen auf dem gesamten Bergwerksgelände. Insbesondere in Bergeteichen, Laugungshalden und Abraumhalden, in denen die Konzentration von Schadstoffen, chemischen Reagenzien und das Potenzial für saure Grubenwässer (AMD) hoch ist, kann der Kontakt mit Wasser die Bioverfügbarkeit von Schadstoffen erhöhen. Dies kann im Falle unbeabsichtigter Wassereinleitungen oder von Versickerungen zu erheblichen Umweltschäden führen (ICMM 2012, S. 8; Lottermoser 2010, S. 123).

Verdunstung stellt einen weiteren Wasserverlust dar und tritt in allen offenen Wasserspeichern auf dem Bergwerksgelände sowie während der Aufbereitung auf (Gunson 2013). Besonders Bergeteiche und Laugungshalden sind aufgrund ihrer großen, exponierten Oberflächen anfällig für Verdunstung und werden daher als bedeutende Wassersenken innerhalb der Wasserbilanz betrachtet (Darling 2011, S. 656; Jain et al. 2016, S. 240).

### *2.4.3. Wasserwirtschaft und Wassermanagement*

Das Wassermanagement und die Wasserwirtschaft im Bergbau umfassen die Planung, Implementierung und Überwachung aller Maßnahmen, die den Umgang mit Wasser in Bergwerksbetrieben betreffen. Dies schließt die Steuerung und Kontrolle von Grund- und Oberflächenwasser, die Aufbereitung und Wiederverwendung von Prozesswasser sowie Maßnahmen zur Vermeidung der Verschmutzung von Wasserressourcen ein. Durch ein zielgerichtetes Wassermanagement können Überschwemmungen und

Bodeninstabilitäten verhindert, der Wasserverbrauch minimiert und Umweltbelastungen reduziert werden (Punkkinen et al. 2016; Janowicz 2011).

Das *Water Stewardship Maturity Framework* vom International Council on Mining and Minerals (ICMM) (2023) unterstreicht die Wichtigkeit eines systematischen Wassermanagements im Bergbausektor und stellt praxisorientierte Ansätze bereit, die auf unterschiedlichen organisatorischen Ebenen von Bergbauunternehmen angewendet werden können. Aufbauend auf etablierten und erprobten Konzepten unterstützt das Framework die Entwicklung standortspezifischer Wassermanagementansätze und fördert das Verständnis von Wasser als geteilte Ressource mit strategischer Relevanz für den Geschäftsbetrieb, das lokale Einzugsgebiet und relevante Stakeholder. Darüber hinaus verankert es wasserbezogene Fragestellungen in übergeordneten Themenfeldern wie der Resilienz gegen klimatische Veränderungen, soziale und kulturelle Aspekte sowie operative Exzellenz und trägt dazu bei, den steigenden gesellschaftlichen Erwartungen an eine verantwortungsvolle Rohstoffgewinnung gerecht zu werden.

Das Wassermanagement eines Bergwerks ist standortspezifisch. Standorte mit einer negativen Wasserbilanz verfügen in der Regel über eine komplexere Wasserinfrastruktur zur Speicherung von Wasser und ein hohes Maß an Wasserrecycling. In Gebieten mit positiver Wasserbilanz sind aufwendige Strategien wie Wasserrecycling oder Meerwasserentsalzung meist nicht erforderlich (Gunson et al. 2012).

Die wichtigsten Aspekte der Wasserwirtschaft im Bergbau sind nach Northey et al. (2016):

- Sicherstellung einer ausreichenden Wassermenge für die Bergbauprozesse,
- Sicherstellung der ausreichenden Kapazität und Infrastruktur (Teiche, Reservoire und TSF), um die erwarteten Wassermengen zu bewältigen,
- Steuerung der Menge und chemischen Qualität des freigesetzten Grubenwassers, um mögliche Auswirkungen auf die Umwelt zu minimieren,
- Identifizierung und Umsetzung geeigneter Minderungsmaßnahmen.

Die wachsende Nachfrage nach mineralischen Rohstoffen und gleichzeitig sinkende Erzgehalte, die eine intensivere Aufbereitung erfordern, deuten neben einem erhöhten Energiebedarf auch auf einen weiter steigenden Wasserbedarf im Bergbau hin (Mudd 2008; Aramendia et al. 2023). Die Sicherstellung einer nachhaltigen Nutzung der Wasserressourcen ist daher eine der zentralen Aufgaben des Wassermanagements im Bergbau. Die Herausforderung besteht darin, Wasserverluste so weit wie möglich zu reduzieren, die Entnahme von Frischwasser zu minimieren und die Rückführung sowie Wiederverwendung von Wasser innerhalb des Bergwerks zu maximieren. Ein wichtiger Ansatz ist dabei die Kreislaufführung des Wassers, also die direkte Nutzung von Wasser aus einem Prozess für einen nachfolgenden Verbraucher ohne vorherige Aufbereitung (Gunson 2013, S. 53).

Maßnahmen zur Verringerung des Wasserverbrauchs lassen sich in die drei Prinzipien der Abfallbewirtschaftungshierarchie einordnen: Reduzieren, Wiederverwenden und Recyceln. Gunson (2013, S. 47) definiert diese Begriffe im Kontext des Bergbaus wie folgt:

- **Reduzierung:** Minimierung der gesamten Wassermenge, die an einem Standort benötigt wird, einschließlich Frischwasser und Brauchwasser,
- **Wiederverwendung:** Einsatz von Wasser aus einem Verbraucher direkt in einem anderen, ohne Zwischenschritte der Aufbereitung,
- **Recycling:** Behandlung des Wassers, bevor es erneut den Verbrauchern zugeführt wird.

Die Maßnahmen zur Reduktion des Wasserverbrauchs konzentrieren sich meist auf die größten Wasserverluste. Insbesondere der Bergeteich und die Eigenschaften der Aufbereitungsberge bieten Potenzial zur Einsparung, ebenso wie die Vermeidung offener Nassflächen, um Verdunstungsverluste zu minimieren (Gunson 2013, S. 49). Maßnahmen zur Wiederverwendung von Wasser umfassen nach Gunson (2013, S. 53) das Auffangen und Wiederverwenden von Oberflächenabflusswasser, Wasser aus der

Wasserhaltung und Brauchwasser. Maßnahmen zum Recycling von Wasser beziehen sich nach Gunson (2013, S. 57) auf die Wiederverwendung von Wasser aus dem Bergeteich, dem Überlauf von Absetzbecken, Konzentrat- oder Eindickern sowie potenziellen Grubenwässern.

Das Wassermanagement in Bergwerken wird durch Infrastrukturen wie Becken und Teiche unterstützt, die zur Speicherung von Rohwasser, aufbereitetem Prozesswasser, Sickerwasser und Niederschlagswasser dienen. Die Auslegung dieser Speicher richtet sich nach den lokalen Wetterbedingungen, insbesondere Niederschlagsmengen und Verdunstungsraten (Younger et al. 2002).

## 2.5. Grundlagen der Wasserkraft

Wasserkraft zählt zu den ältesten und am weitesten verbreiteten erneuerbaren Energiequellen und wird seit über 2000 Jahren genutzt. Seit dem späten 19. Jahrhundert spielt Wasserkraft eine zentrale Rolle in der Stromerzeugung und trug zwischen 1970 und 2015 mit 20,3 % bzw. 15,4 % zur weltweiten Stromproduktion bei. Auch wenn ihr Anteil an der globalen Energieerzeugung in den letzten Jahrzehnten gesunken ist, stieg die absolute Produktionskapazität bis 2021 auf 1.340 GW an (Breeze 2018; IEA 2024).

Wasserkraftwerke nutzen die potenzielle und/oder kinetische Energie des Wassers. Die Nutzung des Wasserkraftpotenzials bedeutet die Umwandlung der im Wasser enthaltenen Energie in mechanische Arbeit. Dabei wird entweder die örtlich konzentrierte Fallhöhe ausgenutzt, oder die Bewegungsenergie des Wassers direkt umgewandelt (Giesecke et al. 2014, S. 28). Abhängig von der erzeugten elektrischen Leistung und den Standortbedingungen existieren verschiedene Arten von Wasserkraftwerken. Diese unterscheiden sich in ihrer Funktionsweise, ihrem Beitrag zur Stromerzeugung und in ihren ökologischen und sozialen Auswirkungen (Egré und Milewski 2002, S. 1226).

Wasserkraft zeichnet sich aufgrund geringer Reibungsverluste in Einlaufrohren und Turbinen durch eine hohe Effizienz aus. Moderne Wasserturbinen können über 90 % der potenziellen Energie des Wassers in nutzbare Energie umwandeln, während konventionelle fossile Kraftwerke nur Wirkungsgrade von etwa 50 % erreichen. Wasserkraftprojekte sind zudem unabhängig von Brennstoffen und damit nicht von Preis- und Versorgungsschwankungen betroffen, wie sie bei fossilen Energieträgern auftreten. Generell zeichnen sich Wasserkraftwerke durch niedrige Betriebskosten und lange Laufzeiten von 40 bis 50 Jahren aus (Dursun und Gokcol 2011).

Im Folgenden werden die theoretischen und physikalischen Grundlagen der Wasserkraft erläutert. Anschließend wird der Aufbau von Wasserkraftanlagen dargestellt. Abschließend wird beschrieben, wie Wasserkraftprojekte entwickelt werden und welche Faktoren dabei berücksichtigt werden müssen.

### *2.5.1. Theoretische und physikalische Grundlagen*

Wasser enthält aufgrund seiner Masse und Bewegung Energie, die in mechanische Arbeit umgewandelt werden kann. Dabei werden zwei Energieformen genutzt: potenzielle Energie, die sich aus der Höhenlage des Wassers ergibt, und kinetische Energie, die durch dessen Bewegung entsteht. Beide Formen lassen sich mithilfe von Turbinen in mechanische Energie und anschließend durch Generatoren in elektrische Energie umwandeln (Giesecke et al. 2014, S. 28).

Für die Bewertung von Wasserkraftprojekten ist eine klare Unterscheidung der Potenzialarten erforderlich. Nach Dhaubanjar et al. (2021) werden vier Potenzialbegriffe unterschieden:

- Theoretisches Potenzial
- Technisches Potenzial
- Wirtschaftliches Potenzial
- Nachhaltig nutzbares Potenzial.

Das theoretische Potenzial, auch als Brutto-, Voll- oder theoretisches Gesamtpotenzial bezeichnet, beschreibt die Energie, die theoretisch innerhalb der natürlichen Gegebenheiten eines Gebiets gewonnen werden kann. Dabei werden keine Randbedingungen berücksichtigt, d.h. Fallhöhe und Fließgeschwindigkeit werden als vollständig nutzbar angenommen. Die tatsächliche Ausschöpfung dieses Potenzials wird jedoch durch den Stand der Technik in der Wasserkraftnutzung begrenzt. Das technische Potenzial beschreibt daher das theoretische Potenzial, das mit den vorhandenen ingenieurtechnischen Mitteln tatsächlich realisierbar ist. Da nur ein Teil dieses technischen Potenzials wirtschaftlich umsetzbar ist, spricht man vom wirtschaftlichen Potenzial. Diese Definitionen werden um das Konzept des nachhaltig nutzbaren Potenzials erweitert, welches Faktoren der Nachhaltigkeit einbezieht und das wirtschaftliche Potenzial auf ökologisch und sozial verträgliche Dimensionen beschränkt (Dhaubanjar et al. 2021, S. 4). Das hydroelektrische Potenzial beschreibt dabei jenen Teil des Wasserkraftpotenzials, der durch Umwandlung in elektrische Energie tatsächlich nutzbar ist. Es konstituiert eine Teilmenge des Wasserkraftpotenzials und kann durch die oben beschriebenen Potenziale spezifiziert werden (Heimerl 2013, S. 114).

Die Literatur zu den Grundlagen der Wasserkraft verwendet teils unterschiedliche Formelzeichen und Begriffe, auch wenn die Berechnungen weitgehend übereinstimmen. Um in dieser Arbeit eine konsistente Terminologie zu gewährleisten, wird die Nomenklatur nach Kaltschmitt et al. (2020) verwendet. Das Sammelwerk *Erneuerbare Energien* von Kaltschmitt et al. (2020) bietet eine umfassende Darstellung der Grundlagen der Wasserkraft. Insbesondere der Beitrag von Aufleger et al. (2020, S. 583–684) liefert eine umfassende Darstellung der physikalischen, technischen und wirtschaftlichen Grundlagen der Wasserkraftnutzung und dient als zentrale Referenz für diese Arbeit.

Um die verschiedenen Potenziale bestimmen zu können, müssen zuerst die physikalischen Hintergründe der Wasserkraft hergeleitet werden. Nach Aufleger et al. (2020, S. 585) setzt sich die theoretische Wasserkraftleistung $P_{Wa,th}$ an einem bestimmten Standort aus der theoretischen potenziellen Leistung $P_{Wa,pot,th}$, der theoretischen kinetischen Leistung $P_{Wa,kin,th}$ und der theoretischen Druckleistung $P_{Wa,p,th}$ zwischen dem Ober- und Unterwasser zusammen:

$$P_{Wa,th} = P_{Wa,pot,th} + P_{Wa,kin,th} + P_{Wa,p,th} \tag{2-1}$$

Die theoretische potenzielle Wasserkraftleistung $P_{Wa,pot,th}$ kann abhängig von der Dichte des Wassers $\rho_{Wa}$, dem Volumenstrom $\dot{q}_{Wa}$ und der Differenz zwischen der geodätischen Höhe des Ober- und Unterwassers $h$ berechnet werden:

$$P_{Wa,pot,th} = \dot{q}_{Wa} * \rho_{Wa} * g * (h_{OW} - h_{UW}) \tag{2-2}$$

Strömendes Wasser kann zusätzlich zu der potenziellen Energie eine kinetische Energie enthalten. Wird diese Energie genutzt, verlangsamt sich die Strömungsgeschwindigkeit durch die Energieentnahme und die theoretisch nutzbare kinetische Leistung lässt sich mit der Differenz der Strömungsgeschwindigkeit $v$ im Ober- und Unterwasser berechnen:

$$P_{Wa,kin,th} = \frac{1}{2} * \dot{q}_{Wa} * \rho_{Wa} * ({v^2}_{Wa,OW} - {v^2}_{Wa,UW}) \tag{2-3}$$

Als dritte Komponente der theoretischen Wasserkraftleistung berücksichtigt die theoretische Druckleistung eine Druckdifferenz zwischen dem Ober- und Unterwasser:

$$P_{Wa,p,th} = \dot{q}_{Wa} * (p_{UW} - p_{OW}) \tag{2-4}$$

Die nutzbare Fallhöhe $h_{nutz}$ ist die standortspezifische Kenngröße und kann anhand der geodätischen Höhe des Oberwassers $h_{Ow}$ und Unterwassers $h_{Uw}$, dem Umgebungsdruck des Oberwassers $p_{Ow}$ und Unterwassers $p_{Uw}$, der Dichte des Wassers $\rho_{Wa}$, der Gravitationskonstanten $g$ und der quadratischen Geschwindigkeit des Oberwassers ${v^2}_{Wa,Ow}$ und Unterwassers ${v^2}_{Wa,Uw}$ berechnet werden:

$$h_{nutz} = (h_{Ow} - h_{Uw}) + \frac{p_{Ow} - p_{Uw}}{\rho_{Wa} * g} + \frac{{v^2}_{Wa,Ow} - {v^2}_{Wa,Uw}}{2 * g} \tag{2-5}$$

Die nutzbare Fallhöhe ist die Differenz zwischen dem Energieniveau des Ober- und Unterwassers, welche durch einen Energiewandler genutzt werden kann und die Verluste durch Strömungswiderstände berücksichtigt. Damit lässt sich nach Aufleger et al. (2020, S. 586) die theoretische Leistung einer Wasserkraftanlage $P_{WKW,th}$ an einem spezifischen Standort mit der Dichte des Wassers $\rho_{Wa}$, dem nutzbaren Volumenstrom $\dot{q}_{Wa}$, der Gravitationskonstanten $g$ und der nutzbaren Fallhöhe $h_{nutz}$ berechnen:

$$P_{WKW,th} = \rho_{Wa} * g * h_{nutz} * \dot{q}_{Wa} \tag{2-6}$$

Wasserkraftanlagen können an verschiedenen Punkten und durch verschiedene Umstände Verluste erzeugen. Im Einlaufbauwerk, welches das Oberwasser mit dem Turbinenzulauf verbindet, sind meistens Rechen oder andere Strukturen installiert, welche grobes Treibgut und Sedimente fernhalten sollen. Dadurch findet teilweise eine Umwandlung potenzieller Energie des Oberwassers in kinetische Energie statt. Außerdem kann es zu Druckverlusten durch Strömungswiderstände kommen. Jeder Strömungswiderstand erzeugt einen Druckverlust $\Delta p$, welcher von der Strömungsgeschwindigkeit ${v^2}_{Wa}$ des Wassers abhängig ist:

$$\Delta p = \varepsilon * \frac{1}{2} * \rho_{Wa} * {v^2}_{Wa} \tag{2-7}$$

Die Verluste am Einlaufbauwerk können durch den Verlustbeiwert $\varepsilon_{EB}$ beschrieben werden. Über die Druckrohrleitung wird das Wasser vom Einlaufbauwerk zur Turbine geleitet. Im Triebwasser findet dabei eine Umwandlung von potenzieller Energie in kinetische Energie und Druckenergie statt. Durch die Rohrreibung verringert sich die theoretisch nutzbare Energie weiter. Der Verlustbeiwert der Rohrleitung $\varepsilon_{RL}$ setzt sich aus der Rohrreibungszahl $\lambda$ der verbauten Rohrleitung, der Länge der Leitung $l$ und dem hydraulischen Durchmesser $d_h$ der Leitung zusammen:

$$\varepsilon_{RL} = \lambda * \frac{l}{d_h} \tag{2-8}$$

Die Länge der Rohrleitungen ist in den meisten Fällen standortspezifisch, wohingegen eine Anpassung des Durchmessers möglich ist. Ein größerer Durchmesser führt in der Regel zu geringeren Reibungsverlusten und die nutzbare Leistung nimmt dadurch zu. Ein größerer Rohrdurchmesser führt jedoch auch zu höheren Kosten, so dass in der Realität immer eine Abwägung mit ökonomischem Fokus durchgeführt wird. Der hydraulische Durchmesser entspricht bei kreisförmigen Rohrleitungsquerschnitten genau dem Rohrdurchmesser d, und lässt sich für andere Querschnitte mit der Querschnittsfläche und dem Umfang berechnen:

$$d_h = \frac{4A}{U} \tag{2-9}$$

Die Rohrreibungszahl $\lambda$ ist abhängig von der Reynolds-Zahl $Re_{dh}$ der Rohrströmung, der Oberflächenrauigkeit der Rohrleitung und dem hydraulischen Durchmesser $d_h$ sowie der Geschwindigkeit $v_{Wa}$ und

Viskosität $\nu_{Wa}$ des Triebwassers. Die Reynolds-Zahl beschreibt das Verhältnis der Trägheitskräfte zu den Zähigkeitskräften am jeweiligen Strömungsteil und erlaubt daher Aussagen, ob eine Strömung laminar (< kritische Reynoldszahl) oder turbulent (> kritische Reynoldszahl) ist. Bei Wasserströmungen in einem glatten Rohr ist die kritische Reynoldszahl ca. 2.300, wobei eine empirische Ermittlung notwendig ist.

$$Re_{dh} = \frac{v_{Wa} * d_h}{\nu_{Wa}} \tag{2-10}$$

Die Reynolds-Zahl und die Rohrreibungszahl hängen direkt voneinander ab. Je größer die Reynolds-Zahl wird, desto turbulenter wird die Strömung. Die Beschaffenheit der Rohrwand und die Rauigkeit dieser hat einen direkten Einfluss auf die Rohrreibungszahl. Die Rohrreibungszahl wird damit bei zunehmender Rauheit ebenfalls größer und erhöht damit den Strömungswiderstand und die Druckverluste (Aufleger et al. 2020, 589 f.).

Befinden sich in der Rohrleitung noch andere Bauteile wie Krümmer, Abzweigungen, Vereinigungen, Schieber oder Ventile, erhöhen diese zusätzlich den Druckverlust. Den Einbauten liegen Druckverlustbeiwerte zugrunde, welche von der Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit abhängen. Die Verluste sind bei einer gegebenen Rohrleitung proportional zum Quadrat der Fließgeschwindigkeit und damit abflussabhängig (Aufleger et al. 2020, S. 590).

Neben den Verlusten im Einlaufbauwerk treten außerdem Verluste in der Turbine auf. Die Turbine wandelt Druckenergie in mechanische bzw. kinetische Energie an der Turbinenwelle um. Der Turbinenwirkungsgrad $\eta_{Turbine}$ wird nach Aufleger et al. (2020, S. 591) berücksichtigt, wenn die die mechanische Leistung $P_{Turbine}$ an der Turbinenwelle mit der im Wasser gespeicherten Leistung $P_{Wa}$ berechnet wird:

$$P_{Turbine} = \eta_{Turbine} * P_{Wa} \tag{2-11}$$

Die gespeicherte Leistung im Treibwasser $P_{Wa}$ direkt vor der Turbine lässt sich nach Aufleger et al. (2020, S. 591) mit dem Volumenstrom des Wassers $\dot{q}_{Wa}$ und dem vorhandenen Wasserdruck $p_a$ berechnen:

$$P_{Wa} = \dot{q}_{Wa} * p_a \tag{2-12}$$

Nach Aufleger et al. (2020, S. 591) berechnet sich der vorhandene Wasserdruck $p_a$ an der Stelle aus der nutzbaren Fallhöhe $h_{nutz}$ vor der Turbine:

$$p_a = \rho_{Wa} * g * h_{nutz} \tag{2-13}$$

Der jeweils vorhandene Wasserdruck vor der Turbine kann nicht vollständig in Energie umgewandelt werden, da in den nachgeschalteten Komponenten noch Verluste auftreten können und ein statischer Gegendruck vorhanden ist. In der Turbine wird zusätzlich zwischen volumetrischen Verlusten, Strömungsverlusten und Lagerverlusten unterschieden. Dies resultiert in einer verminderten Leistung an der Turbinenwelle im Vergleich zur tatsächlich nutzbaren Leistung des Wassers (Aufleger et al. 2020, S. 591).

### *2.5.2. Wasserkraftanlagen und deren Aufbau*

Wasserkraftanlagen nutzen das hydroelektrische Potenzial eines Standorts, um elektrische Energie von wenigen Watt bis hin zu mehreren Gigawatt zu erzeugen. Große Anlagen stauen das Gewässer mithilfe eines Staubauwerks und bilden so ein Wasserreservoir. Innerhalb des Damms wird das Wasser über

Kanäle zu Turbinen geleitet und anschließend wieder in den ursprünglichen Wasserlauf zurückgeführt. Eine alternative Methode für kleinere Anlagen ist das Ableiten von Wasser aus einem Gewässer und dessen Umleitung durch eine Turbine in sogenannten Laufwasserkraftwerken (Pandey und Karki 2016, S. 19). Auch die Energie des Wassers in kommunalen Wasserversorgungs- oder Transportleitungen kann in Nebenbetriebsanlagen zur Stromerzeugung genutzt werden (Itani et al. 2020; Ma et al. 2018).

Eine Übersicht über die verschiedenen Typen von Wasserkraftanlagen ist in Abbildung 2-5 dargestellt. Wasserkraftanlagen lassen sich nach der Fallhöhe in Nieder-, Mittel- und Hochdruckanlagen sowie nach unterschiedlichen Bauformen klassifizieren.

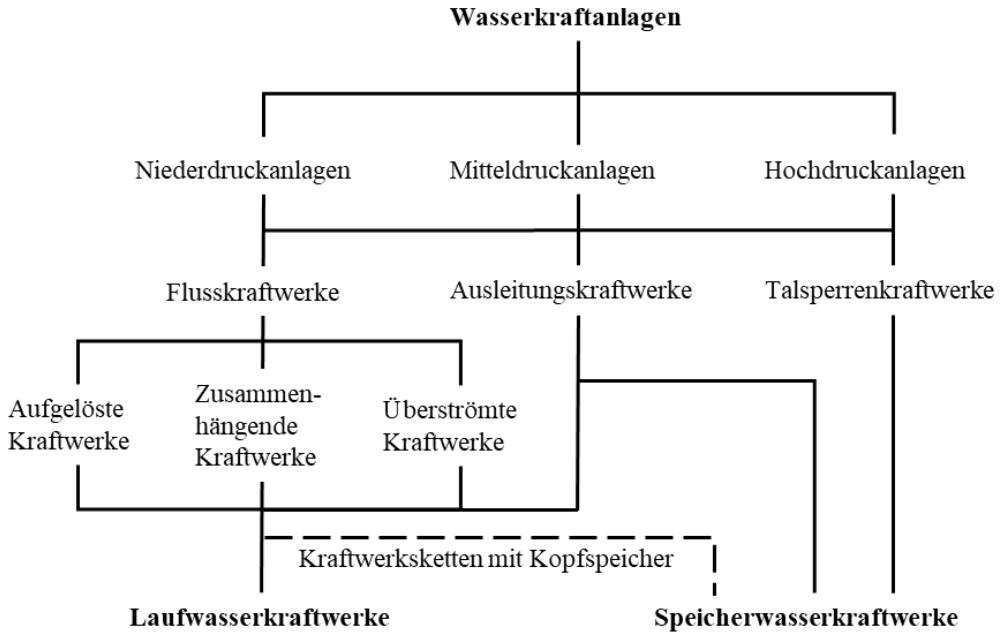



*Abbildung 2-5: Kategorisierung von Wasserkraftanlagen, eigene Darstellung nach Aufleger et al. (2020, S. 594)*

**Aufbau einer konventionellen Wasserkraftanlage**

Wasserkraftanlagen bestehen aus mehreren zentralen Komponenten, deren Ausführung je nach Standort und technischen Anforderungen variieren kann. Die meisten Wasserkraftwerke folgen jedoch einem ähnlichen Grundprinzip, wie in Abbildung 2-6 dargestellt: Wasser wird über ein Einlaufbauwerk aus dem Oberwasser aufgenommen und durch Druckrohre zur Turbine im Krafthaus geleitet. Nach der Turbine wird das Wasser über ein Saugrohr kontrolliert ins Unterwasser abgeführt. Die Turbine ist über ein Getriebe mit einem Generator verbunden, der die mechanische Rotationsenergie der Turbine in elektrische Energie umwandelt. Je nach Anlagentyp und Komplexität können weitere Komponenten wie Schaltanlagen oder Steuerungssysteme hinzukommen (Aufleger et al. 2020, S. 593).

**Nebenbetriebsanlagen**

Nebenbetriebsanlagen sind kleine Wasserkraftanlagen, mit denen in bestehenden Systemen, z. B. Wasserversorgungssysteme, integriert werden, um vorhandenen Überdruck zur Energiegewinnung zu nutzen. In Fallleitungen oder anderen unter Druck stehenden Leitungen können Turbinen oder rückwärts betriebene Pumpen installiert werden, um überschüssige Energie zurückzugewinnen. Der Vorteil solcher Anlagen liegt in der einfachen Installation, da lediglich eine Turbine in ein bestehendes System eingebaut werden muss (Aufleger et al. 2020, S. 603).

**Konventionelle und unkonventionelle Turbinentypen für den Einsatz im Bergbau**

In konventionellen Wasserkraftwerken werden abhängig von Volumenstrom und Fallhöhe meist Pelton-, Francis- oder Kaplanturbinen eingesetzt. Der Bergbau stellt jedoch ein bisher unkonventionelles

Anwendungsfeld dar, sodass auch alternative Turbinentypen in Betracht gezogen werden müssen. Die bisherigen Beispiele für Wasserkraftanwendungen im Bergbau (vgl. Kapitel 3.3) deuten darauf hin, dass insbesondere Pelton- und Pumpenturbinen für den Einsatz im Bergbau geeignet sind.

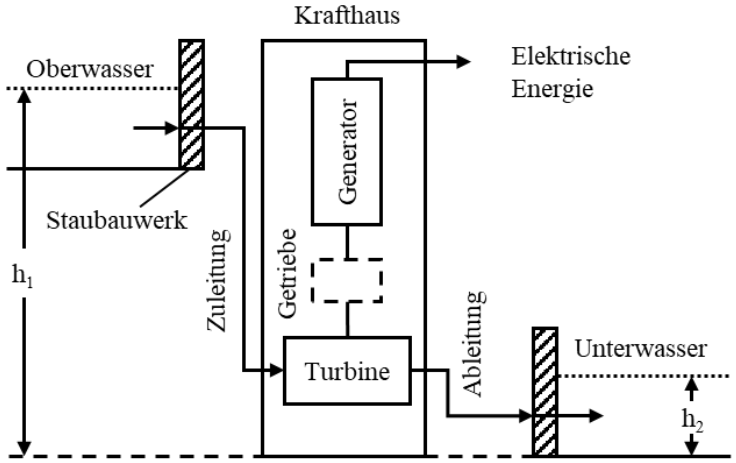



*Abbildung 2-6: Aufbau einer Wasserkraftanlage, eigene Darstellung nach Aufleger et al. (2020, S. 593)*

Die Peltonturbine eignet sich besonders für Druckrohrleitungen mit hohem Druck und vergleichsweise geringen Volumenströmen, auch in unkonventionellen Anwendungen. Sie besteht aus einem Peltonrad, das durch gezielt ausgerichtete Wasserstrahlen angetrieben wird, und kann in bestehende Rohrleitungen integriert werden. Nach dem Durchströmen des Peltonrads fällt das Wasser in den Ablauf und weist keine nennenswerte Druckenergie mehr auf, sondern lediglich eine geringe Restgeschwindigkeit. Der Aufbau einer klassischen Peltonturbine ist in Abbildung 2-7 dargestellt (Aufleger et al. 2020, S. 639 ff.).

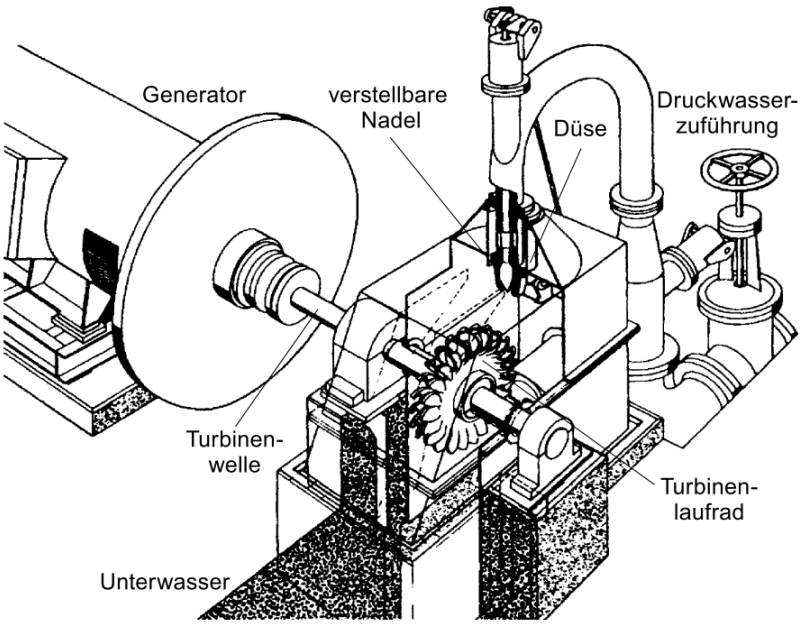



*Abbildung 2-7: Aufbau einer typischen Peltonturbine (Aufleger et al. 2020, S. 641)*

Die Pumpenturbine (eng. Pump-as-Turbine (PaT)) basiert auf dem Prinzip einer herkömmlichen Kreiselpumpe, die in umgekehrter Richtung betrieben wird. Abbildung 2-8 zeigt die Systematik einer Kreiselpumpe und einer Pumpturbine: Im Pumpbetrieb wird der Pumpe mechanische Energie zugeführt, um das Medium zu fördern. Im Turbinenbetrieb hingegen treibt das Medium den Rotor an und erzeugt mechanische Energie. Diese Technologie gilt als kostengünstig, da sie auf standardisierten Kreiselpumpen basiert. Pumpturbinen werden häufig in kleinen Wasserkraftanlagen eingesetzt, da sie mit geringeren

Investitionskosten eine gute Energieausbeute erzielen. Im Gegensatz zur Peltonturbine verfügt das Wasser am Austritt der Pumpturbine zudem über einen Restdruck, was in industriellen Anwendungen zur Energierückgewinnung erforderlich sein kann (Kougias et al. 2019; Giesecke et al. 2014, S. 586).

Beide Turbinenarten können direkt als Rohrleitungsturbine (In-Pipe-Turbine) installiert werden. Diese Bauweise spart Platz und eignet sich besonders für Anwendungen, in denen eine klassische Wasserkraftanlage mit offenem Krafthaus aus Platz- oder Kostengründen nicht realisierbar ist, etwa in bestehenden Wassernetzwerken oder Rohrleitungen (Alawadhi et al. 2023). Die Rohrleitungsturbine ist im deutschen nicht mit der Rohrturbine zu verwechseln, bei welcher es sich um eine vertikale verbaute Kaplanturbine handelt (Aufleger et al. 2020, S. 629).

Giesecke et al. (2014, S. 133) vergleichen eine Pumpenturbine und eine Peltonturbine in der Anwendung als Hochdruck-Trinkwasserkraftwerk. Im Vergleich ist die PaT mit etwa 40–50 % der Kosten deutlich günstiger als die Pelton-Turbine. Allerdings lässt sich der Durchfluss einer PaT nicht regulieren und ist meist konstant; auch der Wirkungsgrad liegt mit 60–85 % unter dem der Pelton-Turbine (85–92 %).

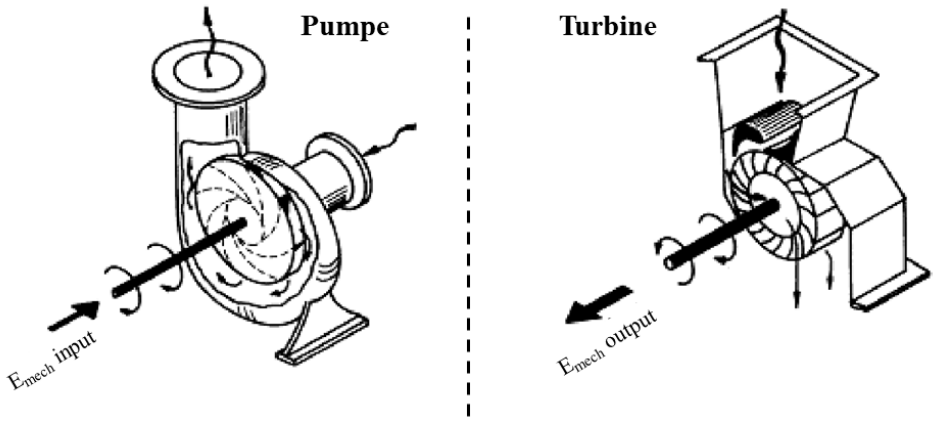



*Abbildung 2-8: Funktionsweise einer Kreiselpumpe als Pumpe (links) und Pumpenturbine (rechts) (Jemal und Haile 2019)*

Pumpenturbinen sind aus mehreren Gründen eine sinnvolle Wahl für den Einsatz im Bergbau. Sie sind als Standardpumpen durch Massenproduktion kostengünstig, ihr Einsatz in unkonventionellen Anwendungen ist erprobt. Die Turbinen sind kurzfristig lieferbar, Ersatzteile leicht verfügbar, und die Kosten betragen nur ein Fünftel bis ein Zehntel der konventionellen Turbinen. Besonders für Kleinwasserkraftwerke bieten sie Vorteile durch ihre kompakte Bauweise und einfache Wartung. Nachteile der PaT sind die geringere Spitzeneffizienz, die eingeschränkte Verfügbarkeit von Leistungsdaten, Unsicherheiten bei der Auslegung und Planung aufgrund begrenzter Erfahrung sowie der Bedarf an zugehöriger Steuertechnik (Kougias et al. 2019, S. 12; Rossi et al. 2020).

### *2.5.3. Planung und Entwicklung von Wasserkraftanlagen*

Die Planung und Auslegung einer Wasserkraftanlage folgt einem ähnlichen Ansatz wie die Planung eines Bergwerkprojekts: Es werden mehrere Studien mit zunehmendem Detaillierungsgrad durchgeführt, um technische, ökologische und finanzielle Kriterien zu bewerten. Ziel ist es, die Energieerzeugung zu maximieren und gleichzeitig Kosten und Risiken zu minimieren.

Ein zentrales Element der Planung ist die Auswahl eines geeigneten Turbinentyps, der auf die spezifischen Fallhöhen- und Durchflussparameter abgestimmt ist, um das Potenzial bestmöglich auszuschöpfen. Anwendungsbereich-Diagramme, wie in Abbildung 2-9 dargestellt, unterstützen dabei, geeignete Turbinentypen für bestimmte Einsatzbereiche zu identifizieren (Williamson et al. 2014).

Neben den standortspezifischen Bedingungen wie Fallhöhe und Durchfluss müssen bei der Auswahl der Turbine weitere Parameter berücksichtigt werden. Dazu gehören die mögliche Drehzahl des

Turbinentyps, die Kosten, die Systemgröße sowie Kriterien wie Umweltaspekte, behördliche Auflagen und Wartungsfreundlichkeit (Leyland 2014, S. 73; Williamson et al. 2014).

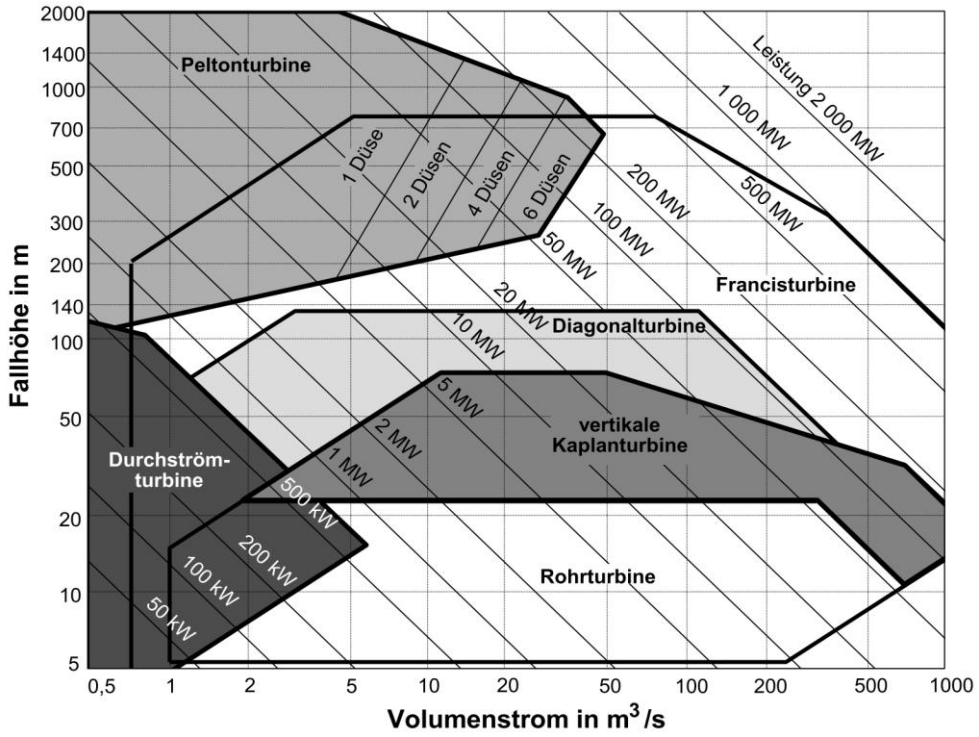



*Abbildung 2-9: Einsatzbereiche verschiedener Turbinentypen (Aufleger et al. 2020, S. 625)*

Die Planung einer konventionellen Wasserkraftanlage beginnt mit einer Potenzialstudie, in der das insgesamt nutzbare Wasserkraftpotenzial ermittelt und geeignete Standorte identifiziert werden. Es folgt eine Projektvorstudie, die kritische Punkte aufzeigt und eine erste wirtschaftliche Bewertung ermöglicht. In der anschließenden Projektstudie wird geprüft, ob das Vorhaben technisch und wirtschaftlich realisierbar ist. Bei positivem Ergebnis folgen das Genehmigungsverfahren sowie Ausschreibung und Vergabe der Bauaufträge. Da Wasserkraftanlagen selten standardisiert sind, werden im Verlauf der Studien häufig Modellversuche durchgeführt oder mathematisch-numerische Modelle genutzt. Die Inbetriebnahme erfolgt über Probebetriebe, bei denen alle Komponenten und Systeme auf ihre Funktion geprüft werden (Giesecke et al. 2014, S. 43 ff.). Abbildung 2-10 stellt für die verschiedenen Projektphasen die Genauigkeit, Beeinflussbarkeit und den Verlauf der Kosten dar.

Kleinwasserkraftanlagen folgen im Wesentlichen denselben Entwurfs- und Konstruktionsprinzipien wie mittlere oder große Wasserkraftwerke. Allerdings sind die Ausführungsdetails oft weniger komplex. Durch geringere Anforderungen an die Konstruktionselemente und ein niedrigeres Sicherheitsrisiko ergeben sich Vereinfachungen. Auch der Aufwand für Voruntersuchungen, insbesondere im maschinellen Bereich, wird der Anlagengröße angepasst. Die Wirtschaftlichkeitsprüfung spielt eine zentrale Rolle, da bei meist privat finanzierten Projekten die Gewinnmaximierung häufig stärker im Vordergrund steht als die reine Energieerzeugung (Giesecke et al. 2014, S. 129).

Kleinwasserkraftanlagen in bestehenden Rohrleitungen mit PaTs unterscheiden sich in der Planung teilweise von konventionellen Wasserkraftwerken. Bei der Auswahl einer geeigneten PaT stehen nach Novara und McNabola (2021) die in Tabelle 2-2 aufgeführten technischen und ökonomischen Parameter im Fokus.

Zur Unterstützung der Planung von KWK mit PaTs haben Novara und McNabola (2018) eine Software entwickelt, die zunächst den optimalen Betriebspunkt (Best Efficiency Point, BEP) berechnet. Anschließend ermöglicht die Software die Abschätzung von Kosten und Wirkungsgrad der ausgewählten PaT.

Darauf aufbauend werden die vollständige Betriebscharakteristik ermittelt, die jährliche Energieerzeugung berechnet und die Amortisationszeit der Anlage prognostiziert. Diese Funktionen bieten eine fundierte Entscheidungsgrundlage für die Auswahl einer geeigneten PaT.

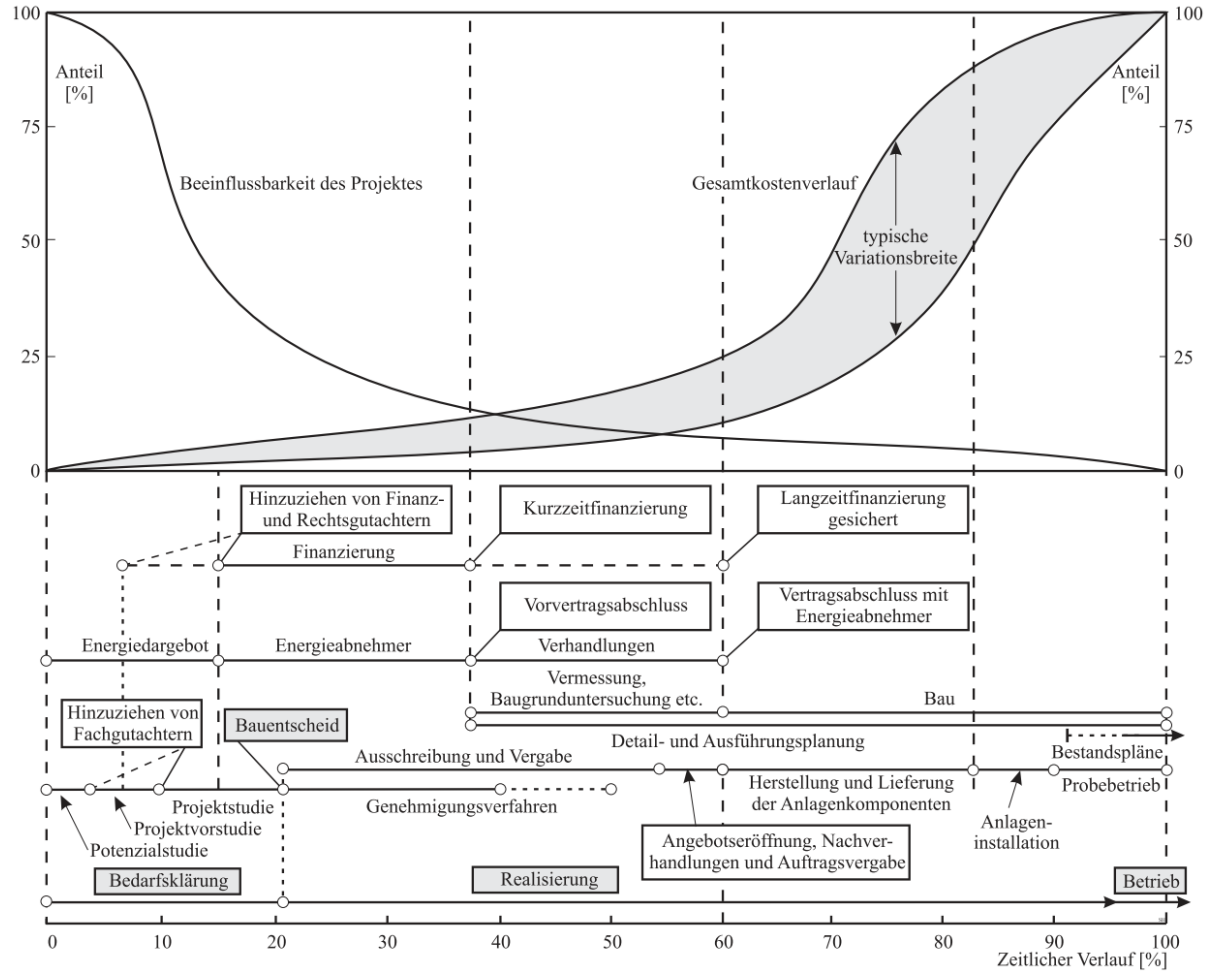



*Abbildung 2-10: Projektphasen, Zeitplan und Kostenverlauf eines konventionellen Wasserkraftprojekts (Giesecke et al. 2014, S. 43)*

Morabito und Hendrick (2019) beschreiben ausführlich, wie die optimale PaT anhand technischer Einsatzparameter wie Fallhöhe, Durchfluss, Drehzahl und Wirkungsgrad ausgewählt wird. Dieser Auswahlprozess erfolgt schrittweise über ein Trial-and-Error-Verfahren mit insgesamt sieben Schritten, bis die am besten geeignete Turbine ermittelt ist.

Amelio et al. (2020) geben in einem umfassenden Review einen Überblick über verschiedene Methoden zur Auswahl der passenden PaT. Ausgangspunkt sind dabei die Herstellerangaben der Pumpenlieferanten, aus denen mithilfe von Korrekturfaktoren und Modellen die charakteristischen Daten für den Turbinenbetrieb abgeleitet werden können.

*Tabelle 2-2: Technische und ökonomische Parameter bei der Planung von PaTs in bestehenden Rohrleitungen, nach Novara und McNabola (2021)*

| **Technische Parameter** | **Ökonomische Parameter** |
|---|---|
| • Maximierung der Energieerzeugung | • Minimierung der Investitionskosten |
| • Maximierung der Leistungsabgabe | • Minimierung der Wartungskosten |
| • Sicherstellung des benötigten Durchflusses und Drucks | • Minimierung der Amortisationszeit |
| • Funktionsfähigkeit unter wechselnden Betriebsbedingungen | |
| • Einhaltung der gegebenen Platzbeschränkungen | |

## 2.6. Schlussfolgerungen

Die theoretischen Grundlagen aus den Bereichen Bergbau und Wasserkraft bilden das Fundament dieser Arbeit. Die Gewinnung mineralischer Rohstoffe ist von globaler Relevanz, da sie essenzielle Materialien für Industrie und Gesellschaft bereitstellt, deren Nachfrage in Zukunft weiter zunehmen wird. Gleichzeitig sind mit dem Bergbau erhebliche Umweltauswirkungen verbunden, insbesondere durch den intensiven Wasserverbrauch. Wasser wird in zahlreichen Prozessen eingesetzt und tritt in unterschiedlichsten Formen und Qualitäten auf. Vor allem die wasserintensiven Aufbereitungsprozesse erfordern ein gezieltes und kontrolliertes Wassermanagement, für das internationale Richtlinien zur Bilanzierung und Steuerung der Wasserflüsse existieren.

Im Bergbau gilt Wasser traditionell als „Freund und Feind des Bergmanns“: Einerseits ist es unverzichtbar für den Betrieb, andererseits birgt es erhebliche technische Risiken, etwa durch unkontrollierten Zutritt oder unzureichende Ableitung. Früher war die Nutzung von Wasserkraft in einigen Bergbauregionen eine zentrale Energiequelle. Heute hingegen werden Bergwerke in erster Linie unter dem Gesichtspunkt eines möglichst geringen Wasserverbrauchs geplant und nicht mit dem Ziel, das darin enthaltene hydroelektrische Potenzial energetisch zu nutzen. Ein methodischer Rahmen zur systematischen Identifikation und Bewertung hydroelektrischer Potenziale in betrieblichen Fluidströmen fehlt bislang, was die Notwendigkeit einer strukturierten Analyse in Kapitel 4.3 begründet.

Wasserkraftanlagen nutzen potenzielle oder kinetische Energie und sind in verschiedenen Bauarten verfügbar, um an unterschiedliche hydrologische Gegebenheiten angepasst zu werden. Die Fluidströme im Bergbau deuten auf ein bisher ungenutztes Potenzial für Kleinwasserkraftanlagen in industriellen Anwendungen hin. Insbesondere Pumpenturbinen erweisen sich als vielversprechende Technologie: Sie sind durch ihre Massenproduktion kostengünstig, kurzfristig verfügbar, wartungsarm und lassen sich durch ihre kompakte Bauweise gut in bestehende Anlagen integrieren. Ihre Nutzung in unkonventionellen Anwendungen ist zudem vielfach erprobt. Allerdings existieren bislang weder etablierte Grundlagenwerke noch verbreitete Anwendungen zur direkten Integration von Wasserkraftanlagen in bergbauliche Strukturen. Kapitel 3.3.3 widmet sich daher bisherigen Ansätzen und praktischen Beispielen in anderen Industrien, die auf ihre Übertragbarkeit und Anwendbarkeit im Bergbau untersucht werden.

# 3. Abgrenzung bestehender Erkenntnisse und Forschungsansätze

## 3.1. Einleitung

Ziel des dritten Kapitels dieser Arbeit ist es, durch eine umfassende Analyse der relevanten Forschungsliteratur die bestehenden Erkenntnisse und Forschungsansätze von Wasserkraftanwendungen im Bergbau abzugrenzen, als auch angrenzende relevante Inhalte zu identifizieren. In diesem Zusammenhang erfolgt eine erste Überprüfung der Hypothese, dass ungenutzte Wasserkraftpotenziale im Bergbau existieren (vgl. Kapitel 1.4). Nach der Darstellung des methodischen Vorgehens bei der Literaturrecherche in Kapitel 3.2 werden die Ergebnisse in Kapitel 3.3 präsentiert und abschließend in Kapitel 3.4 Schlussfolgerungen für die weitere Arbeit abgeleitet.

## 3.2. Methodik

Im Folgenden wird eine Literaturanalyse als qualitative Forschungsmethode vorgestellt, mit dem Ziel, möglichst alle relevanten Arbeiten im vorliegenden Forschungsfeld zu erfassen. Das methodische Vorgehen der Literaturanalyse orientiert sich an den fünf Phasen von Brocke et al. (2009) und ist in Abbildung 3-1 dargestellt. Der thematische Fokus der Recherche liegt auf der Nutzung hydroelektrischer Potenziale im Bergbau sowie auf unkonventionellen hydroelektrischen Potenzialen in anderen Industrien. Es wurden Beiträge in Sammelbänden, Studien, Monografien, Zeitschriftenartikel und Veröffentlichungen in Zeitungen und digitalen Medien sowie Informationen von wissenschaftlichen Institutionen und Unternehmen im Internet herangezogen. Um auch technische Entwicklungen früherer Jahrzehnte zu berücksichtigen, wurden ältere Quellen ab einem bestimmten Jahr nicht grundsätzlich ausgeschlossen.

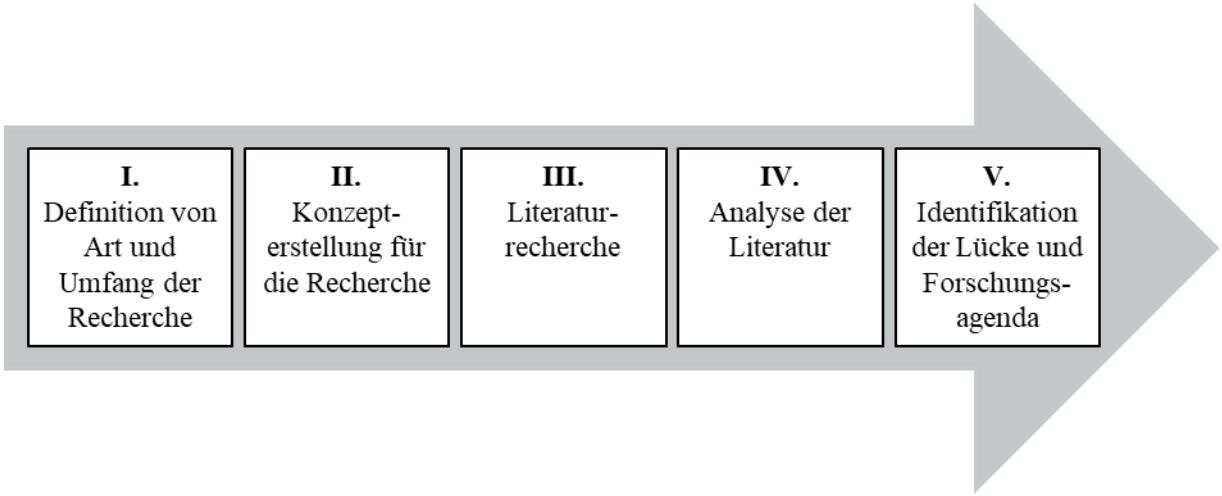



*Abbildung 3-1: Vorgehen für die Literaturanalyse, eigene Darstellung nach Brocke et al. (2009)*

In der **ersten Phase** wurden die Art und der Umfang der Recherche festgelegt. Die Taxonomie von Cooper (1988) wurde hierbei als Grundlage verwendet, um eine Struktur für die Recherche und Analyse zu entwickeln (vgl. Tabelle 3-1). Aufgrund des ingenieurtechnischen Hintergrunds und der Notwendigkeit, technische Lösungen theoretisch zu entwickeln, richtet sich der Fokus auf Forschungsergebnisse und deren praktische Anwendung. Das Ziel besteht darin, die technische Integration und Nutzbarmachung zu untersuchen und die Herausforderungen bei der Entwicklung und Implementierung technischer Lösungen zu identifizieren. Die Literaturanalyse ist konzeptionell organisiert und richtet sich an ein Fachpublikum sowie an Praktiker, die die Ergebnisse anwenden können. Der Rahmen der Analyse ist vollständig und selektiv als auch grundlegend, da nach einer vollständigen Suche eine gezielte Auswahl der wesentlichen Informationen erfolgte.

In der **zweiten Phase** wurde das Recherchekonzept aus einem Überblick über die Quellenlage durch Sichtung bereits bekannter Quellen und Beispiele aus der Praxis erstellt. Aus diesen Publikationen wurden Umfang und Grenzen der Recherche abgeleitet und auf die Schnittmenge der Themenfelder Wasserkraft und Bergbau sowie angrenzende Industrien mit ähnlichen Anwendungen eingegrenzt.

*Tabelle 3-1: Taxonomie von Literaturanalysen, gewählte Ausprägung fett dargestellt, eigene Darstellung nach Cooper (1988)*

| Fokus | Ziel | Organisation | Zielgruppe | Rahmen |
|---|---|---|---|---|
| **Ergebnis** | **Integration** | historisch | **Fachpublikum** | vollständig |
| Methoden | Kritik | **konzeptionell** | Allgemein Wissenschaftler | **vollständig und selektiv** |
| Theorien | **Herausforderung** | methodisch | **Praxis** | repräsentativ |
| **Anwendungen** | | | Öffentlichkeit | **grundlegend** |

In der **dritten Phase** wurde die Recherche auf die Datenbanken „Scopus“, „Web of Science“ und „Google Scholar“ ausgeweitet. Mit Hilfe einer systematisch erstellten Suchwortliste sowie einer gezielten Vorwärts- und Rückwärtssuche, u.a. mit dem Tool „Connected Papers“, wurde das Thema umfassend erfasst. Eine detaillierte Auflistung aller Suchbegriffe findet sich in Anhang 1. Die Suchbegriffe wurden sowohl in deutscher als auch in englischer Übersetzung verwendet und Quellen in beiden Sprachen berücksichtigt. Die identifizierte Literatur wurde durch eine sorgfältige Sichtung von Titeln, Abstracts und Schlagwörtern aussortiert, um nur relevante Quellen zu erhalten.

In der **vierten Phase** wurden die ausgewählten Quellen einer detaillierten Analyse unterzogen. Dabei wurde bewertet, welche der Quellen inhaltlich relevant sind, um die wissenschaftliche Fragestellung fundiert zu beantworten. Aus diesen Quellen wurde die Gliederung der Ergebnisse in drei Teile wie folgt abgeleitet: Im ersten Teil werden Beispiele aus der Praxis der Wasserkraftnutzung im Bergbau dargestellt. Im zweiten Teil werden Ansätze aus Wissenschaft und Forschung beleuchtet und im dritten Teil werden Anwendungsfälle aus verwandten Industrien betrachtet.

In der letzten, der **fünften Phase** wurden die Ergebnisse der Literaturanalyse auf den folgenden Seiten dokumentiert. Aus diesen wurde außerdem die Forschungslücke abgeleitet und Schlussfolgerungen für die vorliegende Arbeit gezogen.

## 3.3. Ergebnisse der Literaturrecherche

Die Ergebnisse der Literaturanalyse sollen den aktuellen Stand der Technik und Forschung zur Nutzung von hydroelektrischen Potenzialen im Bergbau darstellen. Dazu wurde die vorhandene Literatur nach der vorgestellten Methodik analysiert und strukturiert. Auf den folgenden Seiten werden die folgenden Themenbereiche dargestellt:

(i) Beispiele und Anwendungen kommerziell verfügbarer Wasserkraftanlagen für den Bergbau,
(ii) Ansätze und Konzepte aus der Wissenschaft und Forschung zur Nutzung von Wasserkraft im Bergbau,
(iii) Wasserkraftanwendungen in ähnlichen Industrien oder unter ähnlichen Umständen.

### *3.3.1. Kommerzielle Wasserkraftanwendungen im Bergbau*

Die kommerziell verfügbaren Wasserkraftanwendungen im Bergbau lassen sich in zwei Kategorien einteilen: Zum einen können konventionelle Kraftwerke von Bergwerken gebaut oder genutzt werden, zum anderen gibt es spezifische Anwendungen für einzelne Bergwerke, in denen ein bestimmtes Potenzial genutzt wird.

**Konventionelle Wasserkraftanlagen im Bergbau**

Energieversorgungssysteme für Bergwerke, die Wasserkraftanlagen zur Stromerzeugung nutzen, sind in der Regel als Hybridsysteme ausgelegt. Rio Tinto beispielsweise deckt 57 % seines Strombedarfs für die Aluminiumproduktion aus eigenen Wasserkraftwerken. In Québec betreibt das Unternehmen sechs große Wasserkraftwerke mit einer Leistung zwischen 205 MW und 896 MW, welche zu niedrigen Produktionskosten beitragen. Der Standort Kemano in British Columbia, der die größte Hochdruck-Wasserkraftanlage Nordamerikas beherbergt, hat dadurch die niedrigsten Produktionskosten zur Herstellung von Aluminium im Konzern (Rio Tinto 2017). Das Unternehmen Buenaventura hat zur Versorgung der eigenen Standorte in Peru ein Wasserkraftwerk mit einer Leistung von rund 100 MW gebaut (Israel und Herrera 2020). Cornisch (2015) beschreibt, dass es in der Demokratischen Republik Kongo einige Projekte zum Bau von konventionellen Wasserkraftwerken an Flüssen zur Versorgung der lokalen Bergbauindustrie gibt. Das Unternehmen Invanhoe Mines betreibt ein konventionelles Wasserkraftwerk an einem natürlichen Fluss in der Nähe. Das Kraftwerk wurde bereits 1930 erbaut und 2016 erneuert und versorgt das nahe gelegene Kupferbergwerk Kamoa des Unternehmens und speist Strom in das nationale Stromnetz ein (Ivanhoe Mines 2016). Rangold Resources hat drei Wasserkraftwerke gebaut, um die Kimbali Goldmine und die umliegenden Gemeinden zu versorgen. Das erste Kraftwerk, Nzoro II, wurde im Dezember 2014 fertiggestellt. 2017 folgte die Inbetriebnahme des Kraftwerks Ambarau. Die Fertigstellung der letzten Anlage war für Mitte 2018 geplant. Das Kraftwerk Nzoro II verfügt über vier Francis-Turbinen mit einer Leistung von je 6,5 MW. Daraus ergibt sich eine Gesamtleistung von 25 MW bei einem Durchfluss von 44 $m^3/s$. Die beiden anderen Anlagen bestehen aus je zwei Kaplanturbinen mit einer Leistung von 5,5 MW. Bei den Kraftwerken handelt es sich um konventionelle Wasserkraftwerke an Flüssen mit Staustufen. Haupttreiber und Abnehmer der erzeugten Energie sind die umliegenden Bergwerke, wobei das jeweilige Wasserkraftpotenzial nicht durch den Bergbau bedingt ist (Bannister; Cornisch 2015; Rangold Respurces 2017, S. 14, S. 72, S. 75).

Für den Bau und Betrieb von konventionellen Wasserkraftwerken im direkten Umfeld von Bergwerken gibt es verschiedene, aus der Energieversorgerindustrie bekannte, Modelle. In den meisten Fällen werden solche Kraftwerke von Energieunternehmen gebaut und betrieben und nicht von den jeweiligen Bergwerksbetreiber. Das Bergwerk und der Betreiber vereinbaren einen Stromabnahmevertrag, auch als Power Purchase Agreement (PPA) bekannt. Dieser regelt die Lieferung von elektrischer Energie an das Bergwerk über einen bestimmten Zeitraum zu vorher festgelegten Konditionen. Dieses Modell ermöglicht Unternehmen den Zugang zu erneuerbarer Energie, ohne eigene Kraftwerke bauen und betreiben zu müssen. Gleichzeitig bietet es den externen Betreibern eine stabile Einnahmequelle über das PPA (Ghosh Banerjee et al. 2014, S. 43 ff.; Maennling und Toledano 2018, S. 27).

**Spezifische und unkonventionelle Wasserkraftanlagen in Bergwerken**

Im untertägigen Bergbau in Südafrika muss bei Teufen von bis zu 3000 m Kühlwasser in das Bergwerk eingeleitet werden, um die Arbeitsbereiche zu klimatisieren. Typische Bergwerke mit großer Teufe zirkulieren etwa 15-40 Mio. l Kühlwasser pro Tag. Dieses wird gravimetrisch gefördert und der sich aufbauende Druck wird über Druckreduzierventile abgeleitet. Anschließend muss das erwärmte Wasser wieder aus dem Bergwerk gepumpt werden, was bis zu 14 % des Energiebedarfs der Bergwerke ausmacht (Le Roux 2012). Bereits Whillier (1977) postulierte die Möglichkeit der Energierückgewinnung aus dem in der Fallleitung transportierten Wasser. In einigen südafrikanischen Bergwerken wird der Druck in den Fallleitungen energetisch genutzt, anstelle ihn mit Druckreduzierventilen abzubauen. Dabei kommen drei Technologien zum Einsatz: PaT, Dreikammer-Rohraufgeber und Pelton-Turbine. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Eigenschaften werden die Technologien in Kombination genutzt. Auf einer höheren Sohle ohne aktiven Abbau wird ein Dreikammer-Rohraufgeber oder eine Pelton-Turbine installiert. Von dort wird das Wasser auf Sohlen mit aktiver Produktion geleitet, wo wiederum eine PaT installiert ist. Diese Kombination ist notwendig, da Pelton-Turbine und Dreikammer-Rohraufgeber im

Vergleich zu einer PaT keinen Druck am Systemausgang bieten (Le Roux 2012). Die Turbinen in den Fallleitungen für Kühlwasser sorgen außerdem für geringere Reibungsverluste und können den hohen Energiebedarf des Kühlwasserkreislaufs teilweise kompensieren. Technische Lösungen für den Anwendungsfall sind seit den 1970er Jahren kommerziell verfügbar (z. B. ANDRITZ (2015)), so dass in Südafrika seit 1978 über 50 Pelton-Turbinen in die Fallleitungen mit mehr als 80 MW installiert wurden (Karanitsch 2017; Le Roux 2012).

Page et al. (2013) legt in seinem Artikel dar, wie zwei Turgo-Turbinen in einer Wasseraufbereitung für saure Grubenwässer in einem amerikanischen Kohlebergwerk mit einer Leistung von jeweils 20 kW installiert sind. Die Anlage ist seit 2001 in Betrieb und hilft dabei die Kosten für die Wasseraufbereitung zu verringern. Chadwick (2018) berichtet in seinem Internetbeitrag von einer kommerziell verfügbaren Turgo-Turbine, welche im Bergbau in gravimetrisch betriebenen Rohrleitungen eingesetzt werden kann. Diese Turbine soll in der Lage sein auch Berge und andere Feststoff-Suspensionen energetisch nutzen zu können. Demnach hat die Firma Gilkes Hydro 2016 eine Ausschreibung von AngloGold Ashanti gewonnen, um eine Turgo-Turbine mit einer Leistung von 150 kW in einem Bergwerk in Mali zu installieren. In der untersuchten Literatur findet sich kein weiterer Hinweis auf einen erfolgreichen Einsatz dieser Technologie im Bergbau.

Easy Hydro ist als Unternehmen auf die Entwicklung und Implementierung kleiner, modularer Wasserkraftlösungen spezialisiert. In Bergwerken nutzt Easy Hydro Pumpenturbinen, um bestehende Wassersysteme, wie Fallleitungen oder Überläufe, zur Energieerzeugung zu verwenden. In der Tara Mine in Irland wurde beispielsweise eine Wasserkraftlösung erfolgreich implementiert, die mit einer Fallhöhe von 210 m und einem Volumenstrom von 15-22 l/s Leistung in Höhe von 30 kW bereitstellt. In England in einem untertägigen Zinkbergwerk ist am Auslauf einer Wasseraufbereitung eine PaT installiert. Diese erzeugt mit 44 m Fallhöhe und einem Volumenstrom von 75-289 l/s eine Leistung von 88 kW. In Italien wurde eine Turbine an dem Überlauf von einem Eindicker installiert. Mit einer Fallhöhe von 11 m und einem Volumenstrom von 140-190 l/s wird so 11 kW erzeugt (Easy Hydro 2023a, 2021).

### *3.3.2. Ansätze in Forschung und Wissenschaft zur Nutzung von Wasserkraft im Bergbau*

Nur vereinzelte Studien und Forschungsarbeiten untersuchen explizit die Nutzung und Entwicklung von Wasserkraftpotenzialen in Bergwerken. Die Arbeiten unterteilen sich dabei in konventionelle Kleinwasserkraftwerke im Umfeld von Bergwerken, den Einsatz von Pumpenturbinen, unkonventionelle Wasserkraftanwendungen mit Bezug zum Bergbau und Pumpspeicherkraftwerke.

**Kleinwasserkraftwerke**

Musa et al. (2022) beschreibt eine Fallstudie für ein Mikrowasserkraftwerk für ein Bergwerk in den Philippinen. In der Studie wird die technische als auch die wirtschaftliche Machbarkeit untersucht. Es soll mit einer Cross-Flow-Turbine die potenzielle Energie von Niederschlags- und Grundwasser genutzt werden, welches bisher aus dem über- und untertägigen Bergwerk direkt über einen betonierten Kanal in die Vorflut eingeleitet wird. Die erzeugte Energie soll für die Versorgung der betriebseigenen Sozialgebäude und Unterkünften genutzt werden und diese damit zum Teil versorgen. Die Anlage soll eine Leistung von 75 kW erzeugen bei einer Fallhöhe von 17 m und wäre in dem betonierten Kanal installiert.

Antoine et al. (2020) beschreibt eine Fallstudie zu einem Mikrowasserkraftwerk in einer netzfernen Region mit semi-mechanisiertem Kleinbergbau in alluvialen Goldlagerstätten in Kamerun. Die Studie zeigt, dass an dem Standort ein Mikrowasserkraftwerk mit einer Leistung von 87 kW in einem Fluss installiert werden kann, welches eine Cross-Flow-Turbine nutzt. Die in der Studie identifizierte Stelle für das Kraftwerk ist nicht direkt an einem der Schürfpunkte gelegen. Das Kraftwerk steht nur indirekt mit dem Bergbau in Verbindung, da es die Dörfer der Arbeiter versorgen soll, und das Flusswasser nutzt, in dem teilweise der Goldabbau stattfindet.

**Pumpenturbinen**

Die Nutzung von Pumpen im generativen Betrieb wurden schon häufiger im Kontext mit Bergbau angewendet oder untersucht. In einem Blogbeitrag stellen Tabrizia und Markoski (2021) die Idee vor, in den Frischwasserfallleitungen Australischer Bergwerke Pumpenturbinen zu installieren, um das hydroelektrische Potenzial nutzen zu können. Die Idee ähnelt der Umsetzung im südafrikanischen Bergbau. Neben der Nutzung von Frischwasser oder Brauchwasser gibt es Artikel und Veröffentlichungen zum Einsatz von Pumpenturbinen oder Feststoffturbinen, um Schlämme energetisch zu nutzen. Ein Patent von Odegard (2009) beschriebt eine Feststoffturbine zur energetischen Nutzung von Ölschlämmen im kanadischen Bergbau. Laut dem Patent sollen vorhandene Pumpen im generativen Betrieb als Turbine genutzt werden, die in Rohrleitungen mit einem hydroelektrischen Potenzial installiert sind. Das System wurde vor allem zur Steuerung der Durchflussmenge entwickelt, die Energierückgewinnung ist als positiver Nebeneffekt aufgeführt. Genaue Angaben über die technische Umsetzung oder die Funktionsfähigkeit werden nicht gemacht.

**Unkonventionelle Wasserkraftanwendungen**

Kaplunov et al. (2015) hat die Idee diskutiert, aus Fallleitungen für Versatzmaterial Energie zu gewinnen. Das Konzept ist jedoch nicht detailliert beschrieben, weder Turbinentyp, Potenzial oder Betriebsmodi werden angegeben. Linkov et al. (2015) stellt im selben Jahr eine ähnliche Idee vor und berichtet sogar von Laborversuchen, jedoch nicht von den Ergebnissen und der Machbarkeit. Bei der Turbine handelt es sich um ein Schaufelrad, ähnlich wie ein Wasserrad. In einem Abstract einer russischen Tagung berichtet Knyazkin (2019, S. 263) von theoretischen und praktischen Versuchen, aus Grubenwässern Energie zu erzeugen. Die Versuche mit einer angepassten Turbine waren nicht erfolgreich, Details zum Versuchsaufbau und der Fallstudie sind nicht enthalten. In bnamericas (2015) ist ein Online-Zeitungsartikel über Codelcos Ausschreibung für ein kleines Wasserkraftwerk veröffentlicht, welches das den Zufluss zu den Bergeteichen nutzen soll. Laut Angaben der Firma wurde das Vorhaben aufgrund der Situation am Strommarkt auf unbestimmte Zeit pausiert.

Im Forschungsprojekt Smart$H_2$OEnergy (Feldmann 2023) wurden unter der Leitung der RWTH Aachen University in Zusammenarbeit mit der TU München und THEnergy innovative Konzepte zur Nutzbarmachung von hydroelektrischen Potenzialen im peruanischen Bergbau entwickelt. Diese Konzepte wurden anhand von sieben theoretischen Szenarien beschrieben und umfassten die Nutzung natürlicher Oberflächengewässer in der Umgebung von Bergwerken, die Frischwasserversorgung, die Integration in Aufbereitungsanlagen, den hydraulischen Transport von Aufbereitungsbergen, die Nutzung von Grubenwässern sowie Fallleitungen innerhalb der Bergwerke. Darüber hinaus wurden CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics) durchgeführt, um die Effizienz neuartiger Turbinen zu untersuchen, die potenziell auch für den Einsatz in Suspensionen des Bergbaus geeignet sind. Diese umfassende Analyse bietet einen vielversprechenden Ansatz, um das Energiepotenzial in Bergwerken nachhaltig zu nutzen und bildet außerdem den Anstoß dieser Dissertation.

**Pumpspeicherkraftwerke**

Pumpspeicherkraftwerke werden in der internationalen Forschung häufiger als Anwendungsfall für stillgelegte Bergwerke untersucht. Liu et al. (2022) beschreibt die Möglichkeit alte Kohletagebaue in China als Pumpspeicherkraftwerken zu nutzen und so die Energiewende zu unterstützen. In der Studie wird untersucht, inwiefern die Nutzung des Tagebaus Fushun als Unterbecken mit sich ändernden Wasserständen die Gebirgsmechanik und Böschungsstabilität beeinflusst. Krassakis et al. (2023) und Schnepper et al. (2023) legen dar, wie in dem EU Projekt ATLANTIS die Folgenutzung von Braunkohle-tagebauen in Europa als hybrides Pumpspeicherkraftwerk funktionieren kann. Hierfür werden generische Parameterstudien und GIS-Analysen durchgeführt, um die Eignung zu ermitteln.

Der Bau untertägiger Pumpspeicherkraftwerke (im Englischen: *Underground pumped hydroelectric energy storage systems* (UPHS)) in alten Bergwerken wird in einigen Studien untersucht. Álvarez et al. (2021) und Menéndez et al. (2017) untersuchen die Möglichkeit ein ehemaliges, untertägiges Kohlebergwerk in Asturias, Spanien als Pumpspeicherkraftwerk zu nutzen, um die Schwankungen der erneuerbaren Energien auszugleichen. Menéndez et al. (2019) untersuchen die Standfestigkeit des Gebirges eines als UPHS genutztem stillgelegtem Bergwerk. Lyu et al. (2022) beschäftigt sich ebenfalls mit der der Nachnutzung untertägiger Kohlebergwerke als Pumpspeicherkraftwerk. Es werden in diesem Zusammenhang sechs offene, wissenschaftliche Fragestellungen identifiziert, diese sind die Notwendigkeit für ein Evaluierungsmodell für die Standortauswahl, die Behandlung von Grubenwässern mit komplexen Zusammensetzungen, Klärung des Evolutionsmechanismus des Grundwasserspeicherkoeffizienten, Bewertung der Stabilität von Speicherbecken, der Betriebsmodus der Pumpspeicherkraftwerke und die Integration der Pumpspeicherkraftwerke ins nationale Stromnetz. Madlener und Specht (2020) untersuchen in ihrem Artikel die technische und ökonomische Machbarkeit von UPHS in stillgelegten, deutschen Steinkohlebergwerken. Grzegorz (2021) betrachtet die Machbarkeit der Installation eines UPHS in polnischen gefluteten Steinkohlebergwerken. Ein Patent aus Australien von Mukerji (2017) stellt ein Suspensions- bzw. Schlamm-Pumpspeicherkraftwerk vor. Hier soll eine Feststoff/Wasser-Suspension anstelle von reinem Wasser eine Turbine antreiben. So soll die höhere Dichte von Schlämmen energetisch genutzt werden. Das Patent formuliert jedoch nur die Grundidee und keine genaue technische Umsetzung.

### *3.3.3. Nutzung unkonventioneller Wasserkraftpotenziale in anderen Bereichen*

Neben Turbinenarten und -technologien, welche bereits im Bergbau eingesetzt oder beurteilt wurden und vereinzelten Beispielen der hydroelektrischen Energienutzung im Bergbau, gibt es einige verwandte Industrien oder Anwendungen, die dem Bergbau und seinen Herausforderungen in einzelnen Aspekten ähneln. In zahlreichen industriellen Anwendungen spielt Wasser eine ähnlich wichtige Rolle wie im Bergbau, insbesondere in Bezug auf die Versorgung, den Transport und die Aufbereitung. In chemischen Prozessen, Raffinerien und Kühlkreisläufen wird Wasser ebenfalls für Kühl- und Verarbeitungszwecke genutzt und primär durch Rohrleitungen befördert (Minerals Council of Australia 2022; Rossi et al. 2020; Rother 2016; Rankin 2011). Der Transport von Materialien und Feststoffen im Bergbau ähnelt dem Rohrleitungstransport von Öl oder Wasser in anderen Industrien, wobei Wasser als Trägermedium dient. Frischwasserleitungen und Bewässerungssysteme in der Landwirtschaft weisen Parallelen zu Wassernetzwerken in Bergwerken auf. Zudem ist die Aufbereitung von Wasser und Abwasser in beiden Bereichen essenziell. Die vorhandenen Ansätze und Studien werden im Folgenden vorgestellt und behandeln Systeme und Wasserkraftanlagen in folgenden Bereichen:

- Industrieanlagen für chemische Prozesse, Raffinerien, Kühlkreisläufe, Entschwefelungsanlagen auf Schiffen, Meerwasserentsalzungsanlagen,
- Unter Druck stehende geothermale Wässer,
- Material- und Feststofftransport,
- Rohrleitungstransport von Wasser oder Öl,
- Frischwasserleitungen und Wassernetzwerke, Bewässerungssysteme in der Agrarwirtschaft,
- Wasseraufbereitungsanlagen und Abwasserwirtschaft, und
- Wasserkraft in kleinen Fließgewässern.

**Wasserkraftanlagen in anderen Industrien**

In Rossi et al. (2020) wird eine Fallstudie beschrieben, in der eine mehrstufige zentrifugale hydraulische Maschine (eng.: Hydraulic Pressure Recovery Turbine, HPRT) in einer Raffinerie eingesetzt wird um den Druck eines Fluids in einem Prozess zu reduzieren. Die HPRT werden anstelle von Druckminderungsventilen verbaut. Die Studie berechnet den optimalen Betriebspunkt, Effizienz und ökonomische

Werte. Yang (2016) stellt die Möglichkeit vor mit einer Turbine hohe Drücke in chemischen Prozessen energetisch zu nutzen. Die Druckschwankungen sollen mit einem speziellen Getriebe angepasst werden. Li (2022) hat eine Vortex-Pumpe im Turbinenbetrieb untersucht und dafür Wasser sowie fünf Schmieröle als Fluide genutzt. Li vergleicht CFD-Simulationen mit Laborversuchen und ermittelt so Korrekturfaktoren und den Einfluss von Fluiden mit höherer Viskosität.

Ma et al. (2017) entwickelt in seiner Arbeit ein Simulationsmodell, um die Implementation einer Turbine in einem Kühlwasserkreislauf zu bewerten. In Kühlwasserkreisläufen werden große Mengen Energie benötigt, um Kühlwasser zu Kühlern in einer gewissen Höhe zu pumpen. Das Kühlwasser enthält eine potenzielle Energie, welche wieder zu Druck wird, wenn das Kühlwasser zurückfließt. Der Einsatz von Wasserkraftturbinen könnte diese Energie nutzen und so Energie zurückgewinnen. Die Studie zeigt ein Energieeinsparungspotenzial von 28-32 %. In einer weiteren Studie beschreibt Zhou et al. (2015) die Auslegung einer Francis-Turbine zum Direktantrieb des Rotors im Kühlturm mit dem überschüssigen Druck im Kühlwasser.

Bei der Entschwefelung von Schiffsabgasen kommen spezielle Entschwefelungstürme zum Einsatz. In diesem System wird Brauchwasser nach dem Reinigungsprozess zurück ins Meer geleitet, wobei es eine Fallhöhe überwindet. Diese potenzielle Energie könnte mit Turbinen zur Erzeugung von Strom hydroelektrisch genutzt werden (Zhang et al. 2022).

Entsalzungsanlagen nutzen häufig Systeme zur Rückgewinnung von Energie in dem Entsalzungsprozess. Bei der Osmose werden entsalztes Wasser und eine salzige Sole von einer Osmose-Membran getrennt. Die Sole steht dabei unter Druck, wird diese abgelassen, kann die Energie durch unterschiedliche Technologien genutzt werden. Hierfür gibt es unterschiedliche Ansätze, Huang et al. (2020) beschreibt in seinem Review den Einsatz von Pumpturbinen, Druckwandler, Energierückgewinnungssysteme mit Kolben, eine Art Turbolader sowie Peltonturbinen. Die Anlagen werden meistens nicht zur Stromerzeugung, sondern unterstützend als Direktantrieb der Pumpen zur Erzeugung des Drucks für den Osmoseprozess genutzt. Beispiele dieser Anlagen in wissenschaftlichen Beiträgen gibt es in Guirguis (2011), Mansour et al. (2020; Qi et al.), Schneider (2005) and Wang et al. (2022).

Teuteberg (2010) legt in seinem Projektbericht die Entwicklung eines Kleinstwasserkraftwerks dar, welches mit einer Pumpenturbine in einer südafrikanischen Muschelfarm Energie erzeugen soll. Die Pumpenturbine ist dabei in der Rohrleitung zur Rückführung des Wassers ins Meer installiert und soll direkt die Pumpe zum Wieder befüllen des Reservoirs antreiben.

Eine Studie aus 1991 von Thurston und Plum untersucht und beurteilt die Möglichkeit aus unter Druck stehenden, geothermalen Wässern Energie mit einer Peltonturbine zu erzeugen. Die Lösung wird als Ergänzung zur sonstigen Nutzung der geothermalen Lagerstätten gesehen und könnte nicht alleinstehend ökonomisch betrieben werden.

**Energierückgewinnung im Material- und Feststofftransport**

In einigen Veröffentlichungen werden auch die Möglichkeiten untersucht, aus Material- oder Feststofftransport Energie zu erzeugen bzw. zurückzugewinnen. Zum Beispiel können in Schwerkraftsystemen für den Materialtransport Bremsmechanismen oder Energierückgewinnungssysteme integriert werden, die die kinetische Energie in elektrische Energie umwandeln. Kawalec und Król (2021) untersuchen die Möglichkeit der Nutzung eines abwärts laufenden Gurtförderers für Abraum in einem übertägigen Bergwerk zur Energierückgewinnung. Schüttgüter, die kontinuierlich auf Gurtförderern transportiert werden, können aufgrund ihrer Bewegung und des Massenstroms ein erhebliches Energiepotenzial aufweisen. An Übergabestellen, an denen das Material Fallhöhen überwindet, steigt die kinetische Energie des Gutes weiter an. Prenner (2015) stellt ein System vor, welches diese Energie durch spezielle Feststoffturbinen teilweise zurückgewinnen kann und in das Fördersystem zurückspeist. Dieser Ansatz bietet Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung und Energierückgewinnung in Förderprozessen.

**Energieerzeugung in Rohrleitungen für den Transport von Öl**

In der Transalpine Pipeline (TAL) von Trieste in Italien nach Österreich ist einer Energierückgewinnungsstation installiert, da in dem Abschnitt der Rohrleitung auf österreichischer Seite ein erhebliches hydraulisches Potenzial entsteht. An der Station Taimeralm wird mit einer Francis-Turbine die sich auf einer Strecke von 7 km aufbauende potenzielle Energie genutzt um jährlich etwa 11,5 GWh zu erzeugen (Mühlmann et al. 2019). Rother (2016) stellt in seinem Konferenzbeitrag zwei ähnliche Fallstudien vor, in denen Energie aus einer Rohölrohrleitung erzeugt wird. Dabei wird die besondere Wichtigkeit herausgestellt, dass keine operativen Einschränkungen bei dem Betrieb der Rohrleitung auftreten dürfen.

**Energierückgewinnung in Wassernetzwerken**

Ein weiterer Anwendungsfall für die Energierückgewinnung aus Fluiden sind Frischwassersysteme und -leitungen, zu dem es einige Forschungsarbeiten gibt. Viele dieser Forschungsarbeiten untersuchen das energetische Potenzial bestimmter Wassernetzwerke oder die eingesetzte Turbine. Marchis et al. (2014) veröffentlicht eine Studie mit einem dynamischen Modell um den Einfluss von Pumpenturbinen auf Wasserversorgungsnetzwerke zu ermitteln. In der Studie werden verschiedene Einbaupunkte von Pumpenturbinen ermittelt und verglichen, die höchste Effizienz wird in der Hauptleitung erreicht, allerdings verbunden mit einem hohen Aufwand und Wartungskosten. Wirtschaftlich können diese am besten am Versorgungsknotenpunkt eingebaut werden. Carravetta et al. (2014) stellt die Möglichkeit vor, Pumpenturbinen anstelle von Druckminderungsventilen in Wasserversorgungsnetzwerken einzusetzen, so könne überschüssiger Druck in Energie gewandelt werden. Als Herausforderung werden vor allem die wechselnden Betriebsbedingungen identifiziert, so dass der Pumpenturbine eine Steuereinheit hinzugefügt werden muss. Carravetta et al. (2022) untersucht einen neuartigen Ansatz für die Rückgewinnung überschüssiger Energie mit einer Pumpenturbine in Randbereichen eines Wasserversorgungsnetzwerkes in der Normandie. Die Herausforderungen der Anlage sind der begrenzte Bauraum und schwankende Durchflussmengen. Der Laborversuch zeigt eine geringe Effizienz von lediglich 16 %, diese wird aber bei einer besseren Maschinenauswahl bei bis zu 40 % erwartet. Es wird darauf hingewiesen, dass Pumpenturbinen im Vergleich zu anderen Energieerzeugungsanlagen deutlich kostengünstiger sind. Hannachi et al. (2021) beschreibt die Auslegung und das Design einer Durchströmturbine für ein Druckregelsystem in einem Wassernetzwerk als Alternative zu herkömmlichen Pumpenturbinen. Der Turbinentyp habe einige Vorteile gegenüber Pumpenturbinen und die simulationsbasierte Entwicklung wird im Detail beschrieben.

Eine theoretische Fallstudie aus Saudi Arabien von Itani et al. (2020) kommt zu dem Ergebnis, dass Turbinen in einer Frischwasserrohrleitung an Punkten mit Druckspitzen installiert werden können, an denen ansonsten Druckminderungsventile installiert sind. Die Rohrleitung hat eine Länge von 200 km und ein Höhenprofil zwischen 1.350 m und 2.450 m. Die Studie kommt außerdem zu dem Ergebnis, dass es ökonomisch machbar und sinnvoll ist, konventionelle Wasserkraftturbinen einzusetzen, was den Ergebnissen von Studien zu Bewässerungsanlagen entgegensteht. Der Unterschied wird darin begründet, dass Wasserversorgungsrohrleitungen über große Distanzen einen kontinuierlichen Durchfluss haben und somit die Turbinen besser abgestimmt werden können.

Kramer et al. (2018) untersuchen im Labor- und Feldeinsatz eine Pumpenturbine in einem Wassernetzwerk mit einer Leistung von 15 kW. In der Studie wird die Wirtschaftlichkeit unter deutschen Bedingungen mit der NPV-Methode dargelegt. Monteiro et al. (2018) legt in der Studie zu Pumpenturbinen in einem portugiesischem Wasserversorgungsnetz dar, wie der optimale Einbauort gewählt und die zu erwartende Energie abgeschätzt werden kann, wenn der Volumenstrom starken saisonalen Schwankungen unterliegt. Außerdem wird die Option vorgestellt durch parallel geschaltete Pumpenturbinen eine größere Bandbreite an Volumenströmen abdecken zu können. Eine Studie von Rodríguez-Pérez et al. (2021) untersucht die Machbarkeit der Installation von Turbinen oder Pumpenturbinen in einem Wassernetzwerk in Spanien. Genauer wird betrachtet, welche Effizienz die Turbinen erreichen, wie hoch die

benötigte hydraulische Kapazität ist, wo die optimalen Installationspunkte liegen, und wie viel Elektrizität erzeugt werden kann. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass sich eine Installation der Turbinen in dem spezifischen Fall ökonomisch nicht lohnt. Rossi et al. (2016) untersucht in der Studie den Einsatz einer Pumpenturbine und den optimalen Betriebspunkt sowohl im Betrieb als Pumpe als auch als Turbine. Auch in dieser Studie wird die Machbarkeit untersucht eine Pumpenturbine in einem Wasserverteilungsnetzwerk zu installieren. Sinagra et al. (2017) stellt die Möglichkeit vor eine Durchströmturbine als Druckregelelement und gleichzeitig zur Energieerzeugung in ein Wasserversorgungsnetz zu installieren. Als Vorteil der Technologie wird der positive Druck am Auslass genannt. Die Studie von Spedaletti et al. (2021) beschäftigt sich mit der Herausforderung die genauen Volumenströme hervorzusagen und die entsprechende Technologie darauf anzupassen. Außerdem werden die Installation von zwei Pumpenturbinen technisch und wirtschaftlich betrachtet.

Andere Studien betrachten die Rückgewinnung aus Bewässerungssystemen in der Landwirtschaft. Crespo Chacón et al. (2020) legt dar, dass Pumpenturbinen aktuell am häufigsten für Mikro-Hydro-Anwendungen genutzt werden, da sie sehr wartungsarm sind. Jedoch sind die geringen Spitzeneffizienzen ein Nachteil. In der Studie werden 9 Fallstudien in einem Bewässerungssystem in Spanien betrachtet und die optimalen Betriebspunkte und Auslegung ermittelt. Eine andere Studie von García Morillo et al. (2018) untersucht für ein anderes Bewässerungssystem in Spanien die optimalen Installationspunkte für Pumpenturbinen um Energie zurückzugewinnen. In Pérez-Sánchez et al. (2016) wird ein Simulationsmodell vorgestellt, welches die rückgewinnbare Energie in Bewässerungssystemen ermitteln soll.

**Energieerzeugung in Wasseraufbereitungsanlagen und Abwasserwirtschaft**

Es gibt einige Studien zur Energieerzeugung bzw. -rückgewinnung in Wasseraufbereitungsanlagen für Abwasser oder kontaminiertes Grundwasser. Chae et al. (2015) untersuchte ein KWK mit einer Turbine für variablen Durchfluss für städtische Wasseraufbereitungsanlagen. In diesem Versuch kam eine Semi-Kaplan Turbine mit anpassbaren Turbinenblättern zum Einsatz, welche die schwankenden Volumenströme mit hoher Effizienz umsetzen kann. Bei einer Nettofallhöhe von 4,3 m und einem Volumenstrom von 0,35 $m^3/s$ erzeugt die Turbine so in einem Jahr bis zu 68 MWh. Jorge et al. (2021) untersuchen die Energiebilanz in einem Abwassersystem mit Energierückgewinnung in Portugal. Die Studie fokussiert die Wirtschaftlichkeit und Energiebilanzierung, weniger die technische Auslegung der Turbine. Es wird angenommen, dass eine invertierte Archimedische Schraubenturbine eingesetzt wird, die ein Spektrum an Volumenströmen bedienen kann. In Renzi et al. (2019) wird die Installation einer axialen Pumpenturbine in einer Abwasserleitung untersucht. Die Pumpenturbine soll in einer Ölraffinerie installiert werden, die Auslegung wird mit CFD-Simulationen durchgeführt. Die Installation einer solchen Turbine würde sich bereits nach knapp zwei Jahren rentieren und es würde eine hydraulische Effizienz von 79 % erreicht werden bei einem Volumenstrom von 0,083 $m^3/s$ und einer Fallhöhe von 3,6 m.

Titus und Ayalur (2019) beschreiben den Einbau einer Rohrturbine hinter einem Tank mit aufbereitetem Abwasser mit einer Fallhöhe von 14 m und Durchflussrate von 9 l/s, welche damit bis zu 212 W erzeugt. Die Turbine nutzt dabei die kinetische Energie des Wassers in Form eines Wasserrades. Auch wenn die Größenordnung der Anwendung keine Parallelen zum Bergbau zulässt, ist die Nutzung der kinetischen Energie eine interessante Perspektive.

Carravetta et al. (2014) stellen die Möglichkeit vor mit Pumpenturbinen aus Abwasserleitungen Energie zu erzeugen. Sinagra et al. (2022) vergleicht den Einsatz von Kaplan-, Cross-Flow-Turbine sowie Hydrostratic-Pressure-Machine in Wasseraufbereitungsanlagen. Normalerweise würde in den Einsatzbedingungen mit einer geringen Fallhöhe eine Kaplanturbine ausgewählt werden. Es wird jedoch argumentiert, dass die Cross-Flow-Turbine eine gute Alternative darstellen kann, da diese simpel konstruiert ist und dabei eine gute Effizienz aufweist und klein ist. Bei sehr geringen Fallhöhen kann jedoch die Kaplanturbine weiterhin Vorteile aufweisen, da das ausströmende Medium noch unter Druck steht.

**Unkonventionelle Wasserkraftanlagen in Fließgewässern**

Die Nutzung kleiner Fließgewässer ist ein weiterer Ansatz. Scheaua (2017) beschreibt die Möglichkeit mit einer Wasserkraftschnecke in Fließgewässern mit geringen Volumenströmen und Höhendifferenzen Energie zu erzeugen. Agarwal (2012) beschreibt in seinem Review Artikel den Einsatz von Pumpenturbinen in kleinen Fließgewässern an abgelegenen Orten und weist auf die ökonomischen Vorteile im Vergleich zu herkömmlichen Turbinen hin. Hierfür sind laut dem Autor weitere Untersuchungen und Experimente vonnöten. Bereits 1996 hat Williams die Möglichkeit beschrieben Pumpenturbinen für Kleinstwasserkraftwerke zu nutzen und so von den geringen Kosten durch die Massenproduktion von Pumpen im Vergleich zu Turbinen zu profitieren.

## 3.4. Schlussfolgerungen

Die untersuchte Literatur zeigt, dass Wasserkraftpotenziale im Bergbau bisher nur in Ausnahmefällen genutzt werden. Dies ist auf drei zentrale Punkte zurückzuführen:

(i) Die Wasserkraftpotenziale im Bergbau sind bisher nicht strukturiert erfasst. Obwohl der weltweite Bergbausektor enorme Mengen an Wasser umsetzt und nutzt, gibt es in der Forschungslandschaft bisher vornehmlich Bestrebungen den Wasserbedarf zu reduzieren und überhaupt zu quantifizieren und bilanzieren. Es ist bisher keine kommerziell verbreitete Anwendung von Wasserkraft in betriebszugehöriger Infrastruktur von Bergwerken bekannt.

(ii) Bisherige Ansätze zur Nutzung hydroelektrischer Potenziale im Bergbau sind Einzelfälle und nicht ohne Weiteres übertragbar. Es handelt sich um Spezialanwendungen für einzelne, meist einzigartige Anwendungsfälle. Die technische Umsetzung erfolgt dabei parallel zu Lösungen aus anderen Industrien und ist nicht ohne größeren Aufwand auf eine Vielzahl an anderen Bergwerken übertragbar.

(iii) Die volumenmäßig größten Fluidströme in Bergwerken sind feststoffbeladene Wässer und Schlämme. Zur energetischen Nutzung dieser existiert bisher keine kommerziell verfügbare Technologie und müsste folglich entwickelt werden.

Die bisherige Nutzung von Wasserkraft im Bergbau beschränkt sich größtenteils auf konventionelle Wasserkraftwerke, die entweder im Umfeld von Bergwerken errichtet sind oder direkt von diesen finanziert werden. Ein weiterer Ansatz sind Fallleitungen, bei denen große Fallhöhen im Bergbau genutzt werden, um Energie zu erzeugen. Die wenigen Forschungsarbeiten zur Nutzung von unkonventionellen Wasserkraftpotenzialen im Bergbau untersuchen Einzelfälle und betrachten das hydroelektrische Potenzial in Bergwerken nicht ganzheitlich.

In verwandten Industrien existieren zahlreiche Ansätze, die auf eine übertragbare Nutzung von Wasserkraft im Bergbau hinweisen. Diese Anwendungen decken ein breites Spektrum an Fallhöhen und Volumenströmen ab und beziehen teilweise auch andere Fluide als reines Wasser ein. Häufig kommen dabei Pumpenturbinen zum Einsatz, da sie kostengünstig, wartungsarm und in vielfältigen Konfigurationen verfügbar sind. Die Konzepte zeigen in vielen Fällen eine hohe technische Anschlussfähigkeit an bergbauliche Systeme, was das Potenzial für eine effiziente Energiegewinnung unterstreicht. Gleichwohl ist die technische Machbarkeit im jeweiligen Anwendungskontext individuell zu prüfen. Die vorhandene Literatur legt jedoch nahe, dass mit entsprechender Anpassung eine Integration dieser Technologien in den Bergbau grundsätzlich möglich ist.

Für die Nutzung von feststoffbeladenen Wässern gibt es bereits einige theoretische Ansätze, jedoch existieren bislang keine marktreifen oder kommerziell verfügbaren Lösungen. Die Weiterentwicklung in diesem Bereich wird entscheidend sein, um das volle hydroelektrische Potenzial im Bergbau auszuschöpfen.

# 4. Identifikation und Bewertung hydroelektrischer Potenziale im Bergbau

## 4.1. Einleitung

Die in Kapitel 2 dargestellten Grundlagen zu Wasserkraft und Wasser im Bergbau sowie die Literaturrecherche zur Abgrenzung des bestehenden Forschungsstandes in Kapitel 3 stützen die Hypothese, dass bislang ungenutzte hydroelektrische Potenziale im Bergbau existieren. Die Literaturrecherche zeigt auch, dass diese Potenziale bisher nicht beschrieben, definiert oder gar konventionell erschlossen sind. Einzelne Beispiele zur energetischen Nutzung von Fluidströmen weisen jedoch auf die grundsätzliche Machbarkeit hin und untermauern die Notwendigkeit einer methodischen Identifikation und Abgrenzung der hydroelektrischen Potenziale im Bergbau. Kapitel 4 widmet sich dieser Forschungslücke und zielt darauf ab, das erste in Kapitel 1.4 definierte Ziel dieser Arbeit zu erreichen:

**„Qualitative Bewertung und quantitative Abschätzung von methodisch identifizierten und definierten hydroelektrischen Potenzialen in Bergwerksstandorten“**

Zu diesem Zweck wird in Kapitel 4.2 zunächst die Methodik erläutert, mit der Szenarien zur energetischen Nutzung von Fluidströmen in Bergwerken entwickelt werden. In Kapitel 4.3 erfolgt die systematische Identifikation relevanter Fluidströme mit potenzieller energetischer Nutzbarkeit. Auf dieser Grundlage werden in Kapitel 4.4 die Potenzialszenarien abgeleitet, beschrieben und bewertet.

## 4.2. Methodik

Die nachfolgend beschriebene Methodik dient der systematischen Entwicklung, Definition und Bewertung von Szenarien zur Nutzung hydroelektrischer Potenziale im Bergbau und adressiert damit die erste Forschungsfrage dieser Arbeit (vgl. Kapitel 1.4):

**„Welche hydroelektrischen Potenziale treten im Hartgestein-Bergbau auf und wie können diese systematisch ermittelt und bewertet werden?“**

### *4.2.1. Identifikation und Bewertung hydroelektrischer Potenziale im Bergbau*

Das methodische Vorgehen zur Identifikation hydroelektrischer Potenziale im Bergbau umfasst vier aufeinander aufbauende Schritte, die den Phasen der Analyse, Auswahl und Ableitung von Potenzialszenarien zugeordnet sind. Das strukturierte Vorgehen ist in Abbildung 4-1 dargestellt.

Grundlage der Potenzialanalyse ist die Kenntnis der im Bergbau auftretenden Fluidströme. In **Schritt I** werden hierzu die relevanten Prozesse und Anlagenteile hinsichtlich ihrer wasserbezogenen Funktionen untersucht. Auf dieser Basis erfolgt in **Schritt II** die Ableitung und systematische Erfassung der potenziellen Fluidströme. Im anschließenden **Schritt III** werden diese anhand definierter Kriterien auf ihre hydroelektrische Nutzbarkeit hin bewertet und geeignete Fluidströme ausgewählt. **Schritt IV** umfasst die detaillierte Charakterisierung und Clusterung der ausgewählten Fluidströme, um daraus Potenzialszenarien abzuleiten. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte des methodischen Vorgehens im Detail erläutert.

**Schritt I: Analyse der bergbaulichen Prozesse hinsichtlich ihrer Wassernutzung**

Zur Identifikation von hydroelektrischen Potenzialen im Bergbau müssen die typischen Fluidströme bekannt sein. Dies erfordert eine Analyse der Prozesse und Komponenten von Bergwerken hinsichtlich ihrer Relevanz für das Wassersystem und den daraus resultierenden Fluidströmen. Ziel ist es, jene

Abschnitte der Infrastruktur zu identifizieren, die unmittelbar zur Entstehung oder Führung von Fluidströmen beitragen.

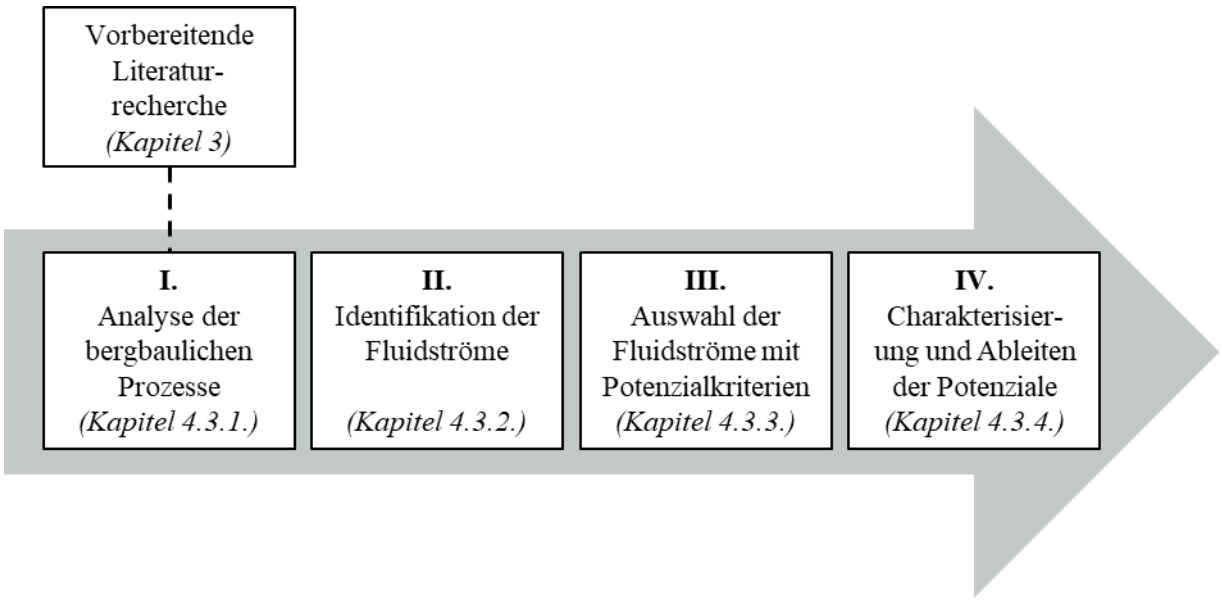



*Abbildung 4-1: Aufbau der Methodik zur Identifikation und Bewertung von hydroelektrischen Potenzialen im Bergbau, eigene Darstellung*

Für ein spezifisches Bergwerk lassen sich die Fluidströme und damit die hydroelektrischen Potenziale anhand einer konkreten Fallstudie ermitteln. Die allgemeine Datenlage zum Wasserverbrauch und der Wassernutzung im Bergbau ist aber limitiert, wie Ossa-Moreno et al. (2018, S. 368) detailliert beschreibt. Da nur wenige Bergwerke ihre Daten zur Wassernutzung transparent und in einem ausreichenden Detailgrad veröffentlichen, ist es nicht möglich aus einer ausreichend großen Menge an Einzelfällen generelle Aussagen abzuleiten.

Da diese Arbeit die hydroelektrischen Potenziale der Bergbauindustrie insgesamt untersucht, ist eine breiter angelegte, literaturbasierte Herangehensweise erforderlich. Grundlage hierfür ist die Auswertung und Zusammenführung öffentlich verfügbarer Datenquellen, die Informationen zum Wasserverbrauch, zu wasserführenden Prozessen sowie zur Struktur interner Wassernetzwerke liefern. Die Analyse basiert auf Arbeiten von Janowicz (2011), dem Minerals Council of Australia (2022), Price (2009), Thomas und Cowper (2017) und Gunson (2013). Berücksichtigt werden insbesondere:

- Wasserbilanzen,
- Statistiken zum Wasserverbrauch im Bergbau,
- Prozessdiagramme und technische Zeichnungen,
- Leitfäden zur Bilanzierung der Wassernutzung, und
- Wissenschaftliche Arbeiten zur Quantifizierung des Wasserverbrauchs von Bergwerken.

Das Ergebnis von Schritt I ist eine strukturierte Übersicht bergbaulicher Komponenten und Systeme mit Relevanz für das betriebliche Wassermanagement. Erfasst werden sowohl Wasserquellen und -abflüsse als auch Anlagen und Prozesse, die Wasser verwenden, leiten oder verbrauchen.

**Schritt II: Identifikation der Fluidströme in Bergwerken anhand einer Adjazenzmatrix**

Fluidströme treten immer zwischen zwei Punkten auf, im Kontext dieser Arbeit werden die Komponenten aus Schritt I als mögliche Start- und Zielpunkte von Fluidströmen im Bergwerkssystem angesehen. Um eine umfassende Übersicht möglicher Fluidströme im Bergbau zu erstellen, ist es erforderlich, die

verfahrenstechnischen Verbindungen zwischen den einzelnen Komponenten und Prozessen systematisch zu analysieren.

Die Struktur dieser Verbindungen wird mithilfe einer Adjazenzmatrix dokumentiert, einem Konzept aus der Graphentheorie. Die Matrix dient der Erfassung von Knotenpaaren, die über eine gerichtete Kante miteinander verbunden sind. Dabei repräsentiert jeder Knoten eine spezifische Komponente des Wassersystems. Die Matrix besitzt die Dimension $n \times n$, wobei $n$ der Anzahl der betrachteten Knoten entspricht. Eintragungen erfolgen binär: Eine 1 im Feld $(i, j)$ kennzeichnet eine gerichtete Verbindung vom $i$-ten zum $j$-ten Knoten, eine 0 steht für das Fehlen einer solchen Verbindung (vgl. Abbildung 4-2 links) (Teschl und Teschl 2006, S. 387–389).

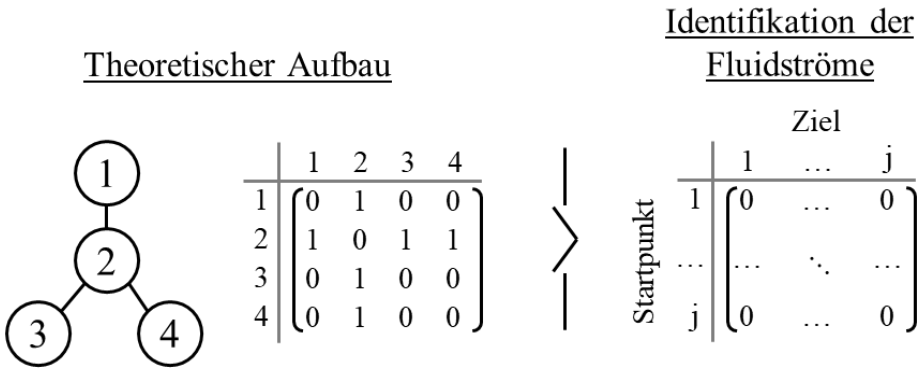



*Abbildung 4-2: Theoretischer Aufbau einer Adjazenzmatrix (links) und Adaption zur Identifikation der Fluidströme (rechts)*

Übertragen auf den Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit bedeutet dies, dass die zuvor identifizierten bergbaulichen Komponenten als Knoten im System betrachtet werden. Die Kanten zwischen zwei Knoten repräsentieren mögliche Fluidströme. Tritt ein Fluidstrom von Komponenten $i$ zu Komponente $j$ auf, enthält das zugehörige Feld in der Adjazenzmatrix den Wert 1. Ist ein solcher Fluidstrom nicht vorhanden, wird der Wert 0 eingetragen. Die in Abbildung 4-2 (rechts) dargestellte Adjazenzmatrix bildet somit sämtliche potenziellen Fluidströme zwischen den relevanten Systemkomponenten eines Bergwerks ab. Auf diese Weise kann eine möglichst vollständige Liste der im Bergbau auftretenden Fluidströme erstellt werden.

**Schritt III: Auswahl der identifizierten Fluidströme anhand von Potenzialkriterien**

Aus den in Schritt II identifizierten Fluidströmen im Bergbau werden im nächsten Schritt potenziell hydroelektrisch nutzbare Ströme ausgewählt. Grundlage hierfür ist die Prüfung anhand definierter Potenzialkriterien:

(i) Definiertheit des Fluidstroms
(ii) Erreichbarkeit und Kontrollierbarkeit des Fluidstroms
(iii) Signifikanz des Volumenstroms
(iv) Potenzialmöglichkeit

Die Herleitung dieser Potenzialkriterien erfolgt in Kapitel 4.3.3 und ermöglicht eine nachvollziehbare Bewertung der einzelnen Systempunkte. Da keine konkreten Einzelanlagen untersucht werden, handelt es sich um eine qualitative Bewertung. Ziel ist es, die Fluidströme zu identifizieren, die ein technisch nutzbares hydroelektrisches Potenzial aufweisen und deren Charakteristika spezifisch für den bergbaulichen Kontext sind. Fluidströme, die diese Anforderungen nicht erfüllen, werden aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Die verbleibenden Fluidströme bilden die Grundlage für die Szenarien in Schritt IV.

**Schritt IV: Ableiten der Szenarien zur Nutzung hydroelektrischer Potenziale im Bergbau**

Im letzten Schritt werden aus den als geeignet bewerteten Fluidströmen konkrete Potenzialszenarien abgeleitet. Dazu werden die Fluidströme zunächst anhand der folgenden Eigenschaften charakterisiert:

- Zweck und Grund des Fluidstroms
- Technische Umsetzung des Fluidstroms
- Hydroelektrisches Potenzialszenario
- Einzigartigkeit oder Ähnlichkeit des Fluidstroms zu anderen
- Neuartigkeit des Potenzialszenarios
- Quantitative Abschätzung des Volumenstroms

Fluidströme, die sich in Art, Umfang und technischer Umsetzung ähneln, werden anschließend zusammengefasst und systematisch abgegrenzt. Auf dieser Grundlage entstehen definierte Potenzialszenarien, die im weiteren Verlauf detailliert ausgearbeitet werden. Dies umfasst die Beschreibung der jeweils potenzialbedingenden Umstände, der möglichen technischen Umsetzungen und des verursachenden bergbaulichen Prozesses.

Zur abschließenden Bewertung erfolgt für jedes Potenzialszenario eine SWOT-Analyse, in der Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken systematisch gegenübergestellt werden. Die Ergebnisse dieser Analyse bilden die Grundlage für fundierte Empfehlungen zur praktischen Umsetzung.

### *4.2.2. Betrachtungsrahmen und Abgrenzungen*

Da sich die Arbeit thematisch an der Schnittstelle zweier weitläufiger Disziplinen, dem Bergbau und der Wasserkraft, bewegt, sind klare Abgrenzungen des Betrachtungsrahmens notwendig, um belastbare und genaue Ergebnisse zu gewährleisten. Explizit bedeutet dies, dass die betrachteten Bergwerke, Rohstoffe und Fluide sowie das hydroelektrische Potenzial im Folgenden genauer abgegrenzt werden müssen.

**Bergbau, Bergwerk und Rohstoffe**

In der Arbeit und diesem Kapitel werden ausschließlich Bergwerke mit aktiver Produktion betrachtet, die metallische Rohstoffe aus Hartgestein mit konventionellen Verfahren gewinnen und aufbereiten. Es werden sowohl über- als auch untertägige Bergwerke berücksichtigt. Eisenerz- und Bauxitbergwerke sowie Bergwerke zur Gewinnung von Energierohstoffen wie Kohle oder Ölsanden sind von der Betrachtung ausgeschlossen. Betriebe der Steine- und Erdenindustrie und Rohstoffgewinnungsbetriebe, die unkonventionelle Verfahren wie In-situ-Laugung, schneidende Gewinnung, Sägen o.Ä. einsetzen, sind ebenfalls von der Betrachtung ausgeschlossen.

Das Bergwerk als Standort und Betriebsgelände dient zur Abgrenzung des Betrachtungsrahmens, sodass sämtliche innerbetriebliche Prozesse und Systeme Berücksichtigung finden. Dies bedeutet, dass neben der Gewinnung auch die mineralische Aufbereitung des abgebauten Rohstoffs mit einbezogen wird, aber nur bis zu dem Punkt, an dem das Produkt das Bergwerksgelände verlässt und weiteren Verarbeitungsschritten später in der Wertschöpfungskette zugeführt wird. Die Verhüttung wird nicht mehr betrachtet, da diese nicht bergwerksspezifisch ist. Es werden alle Prozesse und Fluide betrachtet, welche direkt durch ein Bergwerk beeinflusst, genutzt oder freigesetzt werden. Dies schließt somit alle Prozesse ein, welche direkt auf dem Betriebsgelände stattfinden, aber auch z. B. Rohrleitungen, welche Frischwasser zum Bergwerk leiten oder Brauchwasser ableiten. Nicht betrachtet werden hingegen natürliche Fließgewässer oder Oberflächenwässer, auch wenn diese auf bzw. durch das Betriebsgelände fließen, da diese nicht durch den Bergbau entstehen bzw. nutzbar gemacht werden. Diese Abgrenzung deckt sich mit dem *Water Acounting Framework,* welches unter anderem vom Minerals Council of Australia

verwendet wird und als Industriestandard hinsichtlich der Wasserbilanzierung im Bergbau angesehen werden kann (vgl. Minerals Council of Australia 2022, S. 15).

**Berücksichtige Wässer und Fluide**

Im Gegensatz zu konventionellen Wasserkraftanlagen, welche sich auf die Nutzung von Wasser und Oberflächengewässern beschränken, soll im Rahmen der Identifikation von hydroelektrischen Potenzialen im Bergbau ein umfassenderer Ansatz verfolgt werden, welcher alle in einem Bergwerk vorkommenden Fluide einbezieht. Hierzu gehören Frischwasser, Prozesswasser, Grundwasser, Niederschlag, aber auch Suspensionen, Schlämme oder Chemikalien wie Treibstoffe.

Einschränkungen gibt es hinsichtlich der Eigenschaften der Fluide. Es werden nur Fluide betrachtet, die fließfähig sind, genauer müssen die Fluide hydraulisch transportierbar sein und ohne externe Energie fließen können. Suspensionen und Schlämme sollen nur so weit betrachtet werden, wie sie in dem jeweiligen Zustand durch Rohre hydraulisch transportierbar sind. Im bergbaulichen Kontext können auch Feststoffe fließen, diese werden jedoch von der Betrachtung ausgeschlossen. Generell sollen zudem nur Wasser und Fluide betrachtet werden, welche technisch erreichbar und nutzbar sind. Dies bedeutet, dass zum Beispiel Grundwasserleiter ausgeschlossen werden. Erst wenn das Grundwasser als Grubenwasser in das Bergwerk eintritt, oder es durch die Wasserhaltung gehoben wird, kommt es für die Betrachtung in Frage. Es werden folglich nur Fluide betrachtet, welche aktiv beeinflusst werden können.

In Abgrenzung zu bergbaulichen Wasserbilanzen ist die Unterscheidung zwischen Frisch-, Prozess- und Recyclingwasser für den jeweiligen Volumenstrom irrelevant. Die Wasserqualität, wie sie beispielsweise vom Minerals Council of Australia (2022, S. 22) definiert wird, findet keine Berücksichtigung.

**Wasserkraft und hydroelektrisches Potenzial**

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Untersuchung des hydroelektrischen Potenzials von Bergwerken. Als hydroelektrisches Potenzial wird, wie in Kapitel 2.5.1 beschrieben, das elektrisch nutzbare, theoretische Wasserkraftpotenzial verstanden. Es werden ausschließlich mögliche Kleinwasserkraftanlagen betrachtet, der Fokus liegt dabei auf der Anwendung in industriellen Infrastrukturen. Pumpspeicherkraftwerke werden nicht in die Analyse einbezogen. Es werden ausdrücklich auch noch nicht marktreife, konzeptionelle und unkonventionelle Technologien zur Nutzung kleinerer oder feststoffbelasteter Fluide betrachtet.

## 4.3. Analyse von Bergwerken hinsichtlich hydroelektrischer Potenziale

In den folgenden Unterkapiteln werden die im Bergbau auftretenden Fluidströme anhand der zuvor beschriebenen Methodik identifiziert, charakterisiert und anschließend hinsichtlich des hydroelektrischen Potenzials bewertet. Die daraus resultierenden hydroelektrischen Potenziale im Bergbau werden in Kapitel 4.4 systematisch aufbereitet und im Detail dargestellt.

### *4.3.1. Analyse der bergbaulichen Prozesse hinsichtlich ihrer Wassernutzung*

In diesem ersten methodischen Schritt werden die bergbaulichen Prozesse im Hinblick auf ihre wasserbezogenen Funktionen analysiert. Ziel ist es, eine strukturierte Liste relevanter Komponenten zu erstellen, die in Schritt II als Knoten in der Adjazenzmatrix verwendet werden.

Fluidströme im Bergbau können im Wesentlichen auf drei verschiedene Arten auftreten:

(i) Kontrollierte Fluidströme zur Versorgung von Prozessen mit Fluid oder Wasser im Rahmen des betrieblichen Wassermanagements,
(ii) Fluidströme innerhalb oder als Teil eines Prozesses, oder
(iii) unkontrollierte Fluidströme ohne eindeutigen Start- oder Zielpunkt.

Bei kontrollierten Fluidströmen (i) gibt es einen eindeutigen Start- und Zielpunkt. Diese Punkte sind betriebliche Komponenten, die Teil des betrieblichen Wassermanagements oder eines Prozesses im Bergwerk sein können. Fluidströme innerhalb eines Prozesses (ii) haben ebenfalls einen eindeutigen Start- und Zielpunkt, können aber z. B. auch Teil eines Kreislaufs sein. Diese Fluidströme können auch verfahrenstechnische Aufgaben erfüllen, wie z. B. den hydraulischen Transport eines Feststoffes als Suspension. Unkontrollierte Fluidströme (iii) haben keinen eindeutigen Start- oder Zielpunkt (z. B. Niederschlag oder Versickerung) und können daher nur teilweise durch aktives Wassermanagement kontrolliert werden. Daher ist es für die Identifizierung der bergbaulichen Fluidströme von entscheidender Bedeutung, die betrieblichen Komponenten und Prozesse als Start- und Zielpunkte zu identifizieren.

Der Prozess der Gewinnung und Aufbereitung mineralischer Rohstoffe gliedert sich in die fünf Schritte Lösen, Laden, Zerkleinern, Klassieren und Sortieren. Der Prozess startet mit dem Lösen des Erzes aus dem Gebirgsverbund sowie dem Laden des gelösten Erzes mit einem Ladegerät auf ein Transportmittel. In der Folge wird das Erz mit dem Transportmittel zum Vorbrecher transportiert. Im Anschluss erfolgt eine weitere Zerkleinerung des Erzes mittels Brech- und Mahlstufen, gefolgt von einer Klassierung. Im Rahmen eines Trennverfahrens erfolgt eine Sortierung des zerkleinerten Erzes, wobei eine Trennung in ein Konzentrat und einen Bergeanteil erfolgt. Das Konzentrat, welches das angereicherte Wertmineral enthält, stellt das finale Produkt eines Bergwerks dar und wird folglich vom Bergwerksgelände transportiert. Das Bergematerial muss langzeitsicher gelagert werden, wobei je nach Zustand eine Lagerung in einem Bergeteich oder auf einer Halde erfolgt (Jain et al. 2016, S. 12).

Die genannten Prozessschritte sind räumlich auf dem Betriebsgelände verteilt und bestehen aus verschiedenen technischen Komponenten, wie in Abbildung 4-3 dargestellt. Dazu zählen das Bergwerk selbst, die Aufbereitungsanlage, der Bergeteich sowie ergänzende Betriebseinrichtungen wie Halden, Sedimentationsbecken und Wasserspeicher.

Anhand des Beispiels von Janowicz (2011, S. 7) lassen sich schematische Flussdiagramme erstellen, welche die Wasserbewegungen zwischen diesen Komponenten darstellen. Ein solches Diagramm ist in Abbildung 4-4 für ein Bergwerk mit Flotation als Aufbereitungsmethode dargestellt. Die Komponenten dienen jeweils als Wasserquelle oder -ziel. Diese Modelle enthalten stark vereinfacht die einzelnen Wasserbewegungen, wobei jedoch keine vollständige Darstellung aller Fluidströme erfolgt.

Die Aufbereitungsanlage hat einen maßgeblichen Einfluss auf den Wasserverbrauch des gesamten Bergwerks (Punkkinen et al. 2016, S. 22). Aufgrund ihrer zentralen Rolle im internen Wassernetzwerk kann sie nicht als zusammenfassende Komponente betrachtet werden. Die Beschreibung einer sulfidischen Kupferaufbereitungsanlage durch Brantes A. und Olivares (2008, S. 18) verdeutlicht die strukturelle und prozesstechnische Komplexität solcher Anlagen. Weder die schematische Darstellung von Janowicz (2011, S. 7) noch die Systematisierung des Minerals Council of Australia (2022) bieten den notwendigen Detailgrad, um verlässliche Aussagen zu den auftretenden Fluidströmen ableiten zu können. Aus diesem Grund ist eine differenzierte Betrachtung der folgenden Teilanlagen innerhalb der Aufbereitung erforderlich:

- Brechstufen bzw. Brecherkreislauf
- Mahlstufen bzw. Mahlkreislauf
- Nass-Klassifizierer (Hydrozyklone, Spiralabscheider)
- Nass-Abscheider (Flotationsanlagen)
- Entwässerungs- und Filteranlagen

Detailliertere Informationen zur Struktur und Auslegung der Wasserführungen innerhalb dieser Teilanlagen lassen sich aus herstellerseitigen Dokumentationen gewinnen, etwa von Metso Corporation (2018). Dort werden verschiedene Konfigurationen von Brech- und Mahlkreisläufen sowie Flotationsanlagen beschrieben (vgl. Metso Corporation 2018, 3:4, 3:27, 5:8). Für die Betrachtung der Fluidströme

ist es dabei unerheblich, ob es sich um ein- oder mehrstufiger Brecher- und Mahlkreisläufe handelt, da die grundsätzlichen Strukturen gleichbleiben. Brech- und Mahlkreisläufe besitzen stets eine Materialzufuhr, eine Rückführung und einen Ausgangsstrom. Im Mahlkreislauf wird das Feststoff-Wasser-Gemisch durch Wasserzugabe in eine pumpfähige Suspension überführt, die denselben hydraulischen Kreislauf durchläuft, unabhängig vom Detailgrad der Auslegung. Auch bei Flotationsanlagen lassen sich die Ströme verlässlich in Zulauf, Berge- und Produktstrom gliedern, unabhängig von der Anzahl der Rückführungen oder Reinigungsstufen. Entscheidend ist daher die qualitative Kenntnis der Strömungsverbindungen zwischen den einzelnen Teilanlagen.

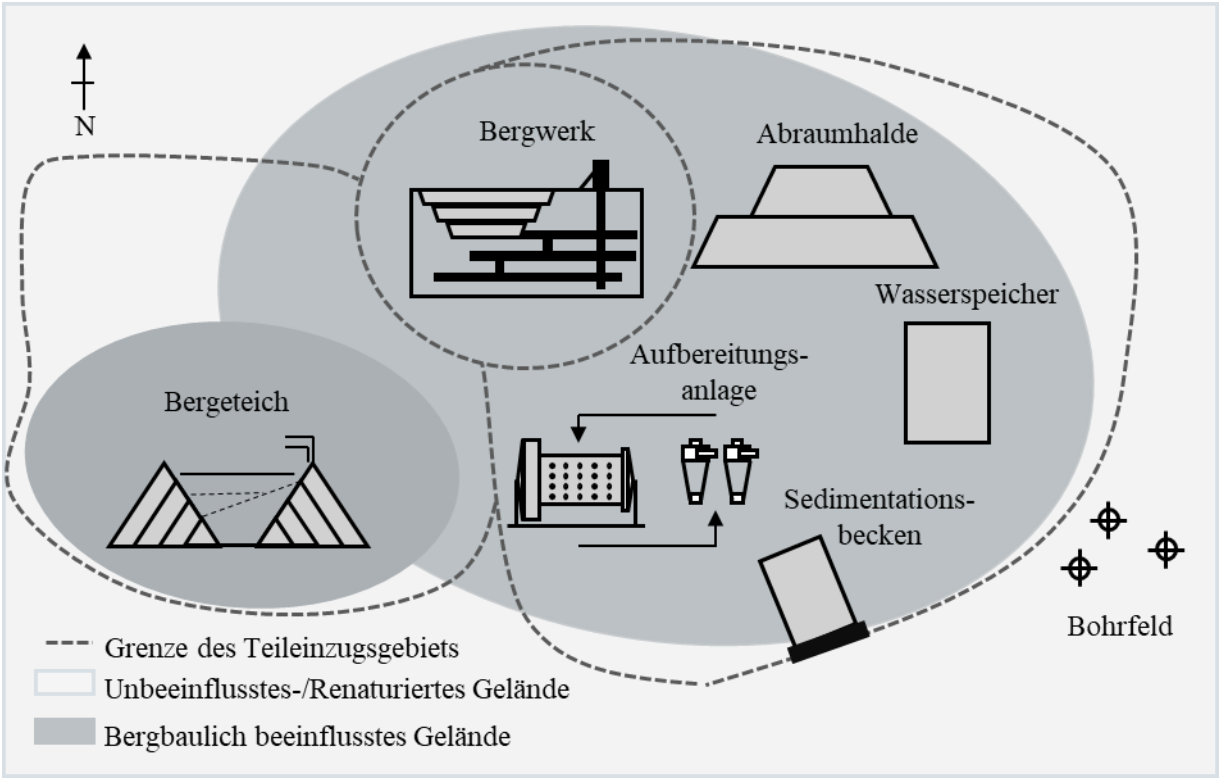



*Abbildung 4-3: Räumliche Zusammenhänge auf einem Bergwerksgelände, angelehnt an Minerals Council of Australia (2022, S. 13)*

Neben den technischen Komponenten des internen Wassernetzwerks existieren im Bergbau verschiedene Wasserquellen sowie potenzielle Wassersenken, die bei der Analyse der Fluidströme berücksichtigt werden müssen. Die Vielzahl möglicher Quellen und Senken lässt sich, in Anlehnung an das Water Accounting Framework (vgl. Minerals Council of Australia (2022, S. 16)), in drei grundlegende Kategorien unterteilen: Grundwasser, Niederschlag und Dritte.

*Grundwasser* umfasst bei dieser Betrachtung sowohl anfallendes Grubenwasser als auch durch Brunnen gehobenes Wasser. *Niederschlag* ist jegliches Wasser, das auf dem Betriebsgelände niedergeht und somit eventuell aufgefangen wird oder natürlich abfließt. *Dritte* umfasst die Versorgung des Bergwerks aus externen Quellen, das Wasser wird dabei via Rohrleitung zum Bergwerk transportiert.

Gewisse Wasserquellen und -senken haben nur einen Einfluss auf die Verluste bzw. die genaue Wasserbilanz eines Bergwerks, stellen aber keinen kontrollierbaren Fluidstrom dar. Aus diesem Grund werden die folgenden Komponenten von Wasserbilanzen nicht in die Betrachtung aufgenommen:

- Verdunstung und Sickerwasser,
- Restfeuchte und Prozessverluste,
- Unkontrolliertes Einleiten von Wasser in Oberflächenwasser und Meereswasser, sowie
- Aquiferrückfluss.

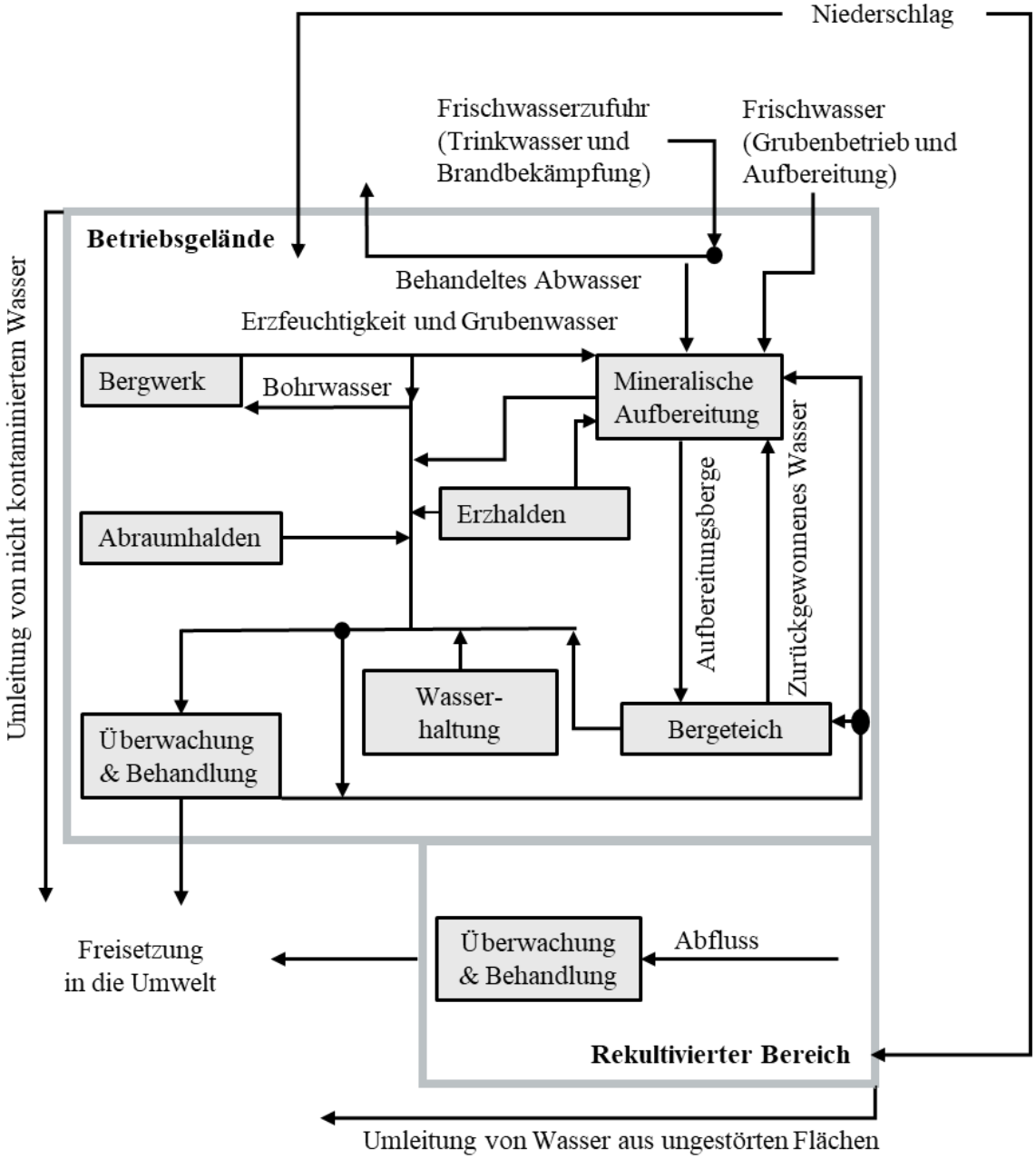



*Abbildung 4-4: Konzeptionelle Darstellung der Wasserquellen, -ströme und -austritte in einem Bergwerk mit Flotation und Bergeteich, angelehnt an Janowicz (2011, S. 7)*

Tabelle 4-1 fasst die oben gesammelten und erarbeiteten betrieblichen Aufgaben, Komponenten und Prozesse zusammen. Die Aufteilung ist angelehnt an das Vorgehen von Minerals Council of Australia (2022, S. 24), eine Aufgabe ist hier eine Gruppe an operativen Prozessen innerhalb des Betriebsgeländes. Nach dem MCA können einzelne Aufgaben keine Wasserspeicher sein, sie können nur Wasser nutzen. Demnach wäre das Wassermanagement kein bergbaulicher Prozess oder Aufgabe, sondern eine Wasserquelle. Entgegen dem Vorgehen vom Minerals Council of Australia wird das Wassermanagement als betriebliche Aufgabe aufgenommen. Die Gesamtheit der gelisteten Komponenten ist somit eine Aufstellung verschiedener Optionen und muss kein in sich schlüssiges System ergeben. Die Beispiele der Komponenten werden dafür mit denen aus Price (2009, 7-2), Janowicz (2011), Punkkinen et al. (2016), Brantes A. und Olivares (2008), Metso Corporation (2018) und Gunson (2013) ergänzt.

*Tabelle 4-1: Betriebliche Aufgaben, Komponenten und Prozesse der mineralischen Rohstoffgewinnung, eigene Darstellung, in Anlehnung an Minerals Council of Australia (2022)*

| **Betriebliche Aufgabe** | **Mögliche Komponenten** | **Prozesse** |
|---|---|---|
| Abbau/<br>Bergbau/<br>Gewinnung | Tagebau<br>Bergwerk | Schneidende Gewinnung<br>Bohren<br>Sprengen<br>Laden<br>Transportieren |
| Erzaufbereitung/<br>Mineralische Aufbereitung | Aufbereitungsanlage<br>Brechkreislauf<br>Mahlkreislauf<br>Nass-Klassifizierung<br>Nass-Abscheider<br>Entwässerung<br>Laugungshalden/-Anlagen<br>Bunker | Brechen<br>Mahlen<br>Klassieren<br>Sortieren<br>Agglomeration<br>Eindicken |
| Reststoff- und<br>Abraummanagement | Bergeteich (TSF)<br>Abraumhalden<br>Abgeworfene Grubenräume/<br>-bereiche | Einbringen von Versatz<br>Entwicklung Bergeteich<br>Einlagern von Aufbereitungsbergen |
| Wassermanagement | Wasseraufbereitungsanlage<br>Prozesswasserspeicher<br>Frischwasserspeicher<br>Wassernetzwerk/-leitungen<br>Dämme und Becken<br>Gräben<br>Rohrleitungen | Wasserhaltung<br>Wassermanagement<br>Versorgung von Prozessen<br>Ableiten von Brauchwasser |
| Verwaltung und Sanitäranlagen | Bürogebäude<br>Unterbringung<br>Umkleiden/Kaue<br>Sanitäranlagen<br>Sonstige Gebäude | Administration und Verwaltung<br>Verpflegung Mitarbeiter<br>Trinkwasserversorgung |
| Sonstiges | Straßen und Wege<br>Lagerflächen<br>Waschanlagen<br>Ver- und Beladungseinrichtung<br>Entstaubungsanlage<br>Anlagen zur Staubniederschlagung | Energieerzeugung und -versorgung<br>Bauwesen<br>Wäschen<br>Bewässerung von Fahrwegen<br>Bewässerung von Bunkern und Halden |

Die in Tabelle 4-1 enthaltene, umfassende Auflistung der Komponenten und Prozesse im Bergbau verdeutlicht, dass die bergbaulichen Komponenten eine unterschiedliche Wichtigkeit für das Wassernetzwerk und die Ausprägung der innerbetrieblichen Fluidströme aufweisen. Um die Relevanz der Auflistung zu erhöhen und nur die relevanten Komponenten zu enthalten, welche die wasserintensiven und zentralen Prozesse eines Bergwerks abdecken, ist eine Zusammenfassung der Auflistung erforderlich. Darüber hinaus werden den Komponenten die ausgewählten betrieblichen Wasserquellen und -abflüsse hinzugefügt, sodass im weiteren Verlauf die in Tabelle 4-2 aufgeführten Komponenten und Prozesse für die Betrachtung und Untersuchung berücksichtigt werden.

*Tabelle 4-2: Liste der bergbaulichen Komponenten für die Adjazenzmatrix, eigene Darstellung*

| Kategorie | Komponente | Prozesse |
|---|---|---|
| Quelle und Senke | Grundwasser<br>Niederschlag<br>Dritte | Wasserentnahme<br>Wasserabgabe |
| Bergbau/Gewinnung | Bergwerk (unter- und über Tage) | Lösen<br>Laden<br>Transportieren |
| Wassermanagement | Frischwasserspeicher<br>Prozesswasserspeicher<br>Wasseraufbereitung | Wasserversorgung<br>Aufbereitung von Wasser<br>Wassermanagement |
| Mineralische Aufbereitung | Brech- und Mahlkreislauf<br>Nassklassierung/Flotation<br>Entwässerung<br>Laugungsanlage/-Halde | Zerkleinern<br>Klassieren<br>Sortieren<br>Trocknen |
| Reststoffmanagement | Bergeteich/TSF | Transportieren<br>Lagern |
| Sonstige | Büros und sonstige Anlagen<br>Chemikalien-, Treibstofftanks | Administration<br>Hilfsprozesse |

### *4.3.2. Identifizierung der Fluidströme in Bergwerken*

Zur Identifizierung möglichst aller Fluidströme im Bergbau wird paarweise für jede der in Kapitel 4.3.1 identifizierten Komponenten kontrolliert, zu welcher anderen Komponente diese einen Fluidstrom abgeben kann. Das Resultat ist in einer Adjazenzmatrix in Abbildung 4-5 dargestellt.

| | Grundwasser | Niederschlag | Dritte | Bergwerk | Frischwasserspeicher | Prozesswasserspeicher | Wasseraufbereitung | Brech- und Mahlkreislauf | Nassklassierung/Flotation | Entwässerung | Bergeteich/TSF | Laugungsanlage/-halde | Büros und Sonstige | Chemikalien- und Treibstofftanks |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Grundwasser | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Niederschlag | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| Dritte | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Bergwerk | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Frischwasserspeicher | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| Prozesswasserspeicher | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Wasseraufbereitung | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Brech- und Mahlkreislauf | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Nassklassierung/Flotation | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Entwässerung | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| Bergeteich/TSF | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Laugungsanlage/-halde | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| Büros und Sonstige | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Chemikalien- und Treibstofftanks | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |

*Abbildung 4-5: Paarweise Überprüfung der Fluidströme zwischen den identifizierten Komponenten von dem Startpunkt (links) zum Zielpunkt (oben) mit einer Adjazenzmatrix, eigene Darstellung*

In der Adjazenzmatrix sind die Wasserquellen als Startpunkte in den Zeilen und die potenziellen Zielkomponenten in den Spalten aufgeführt. Am Beispiel der Wasseraufbereitung kann ein Fluidstrom etwa

zu externen Dritten, zum Frischwasserspeicher oder zum Prozesswasserspeicher führen. Durch diese systematische Betrachtung lassen sich insgesamt 55 unterschiedliche Fluidströme identifizieren. Die jeweiligen Fluidströme sind durch eindeutige Start- und Zielpunkte charakterisiert und können in typischen Bergwerken auftreten, wobei jedoch nicht alle in jedem Bergwerk präsent sein müssen.

Einige Fluidströme können aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften anhand der Eingrenzungen in Kapitel 4.2.2 von der Betrachtung ausgeschlossen werden. Die dafür erforderliche eindeutige Beschreibung der einzelnen Ströme ist in Anhang 2 dokumentiert. Andere Fluidströme weisen hinsichtlich Funktion, Verlauf und Systemintegration erhebliche Ähnlichkeiten auf und können daher wie folgt zusammengefasst werden:

**Grundwasser:** Die Fluidströme „Grundwasser - Frischwasserspeicher“, „Grundwasser - Prozesswasserspeicher“ und „Grundwasser - Wasseraufbereitung“ werden zusammengefasst. Es handelt sich jeweils um gehobenes Grundwasser bzw. Wasser aus der Wasserhaltung, das den Prozessen im Bergwerk zugeführt wird. Das Ziel wird in Abhängigkeit von der Qualität und der späteren Nutzung gewählt. Der Ursprung und die Behandlung der Fluidströme unterscheiden sich jedoch nicht. Anders verhält es sich mit dem Fluidstrom „Grundwasser - Dritte“, da hier das Wasser direkt an Dritte abgegeben werden kann, z. B. wenn der Brunnen außerhalb des Betriebsgeländes liegt.

**Niederschlag:** Die Fluidströme „Niederschlag - Frischwasserspeicher, Prozesswasserspeicher, Wasseraufbereitung und TSF“ werden zusammengefasst, da es sich jeweils um den Zufluss des Niederschlags in den jeweiligen Speicher handelt. Der Inhalt des jeweiligen Wasserspeichers ist für die Betrachtung der Fluidflüsse im Gegensatz zur Betrachtung der Wasserbilanzen nicht relevant. Der Niederschlag auf die Laugungsanlage wird hingegen gesondert betrachtet, da hier das Wasser großflächig gezielt gesammelt und abgeleitet werden kann.

**Frisch- und Prozesswasserspeicher:** Die Fluidströme vom Frischwasserspeicher und vom Prozesswasserspeicher zum Bergwerk, zum Brech- und Mahlkreislauf, zur Flotation und zur Laugungsanlage werden jeweils zusammengefasst. Von welchem der beiden Speicher das Wasser jeweils zum Bestimmungsort geleitet wird, unterscheidet den Fluidstrom kaum, die Art des Fluidstroms bleibt nahezu gleich.

**Prozesswasserspeicher und Wasseraufbereitung:** Einige Komponenten führen überschüssiges Wasser in den Prozesswasserspeicher oder in die Wasseraufbereitung zurück. Die Ursache und das Prinzip der Fluidströme sind gleich, so dass die Fluidströme der Komponenten Brech- und Mahlkreislauf, Flotation, Entwässerung, TSF und Laugungsanlage jeweils zum Prozesswasserspeicher bzw. zur Wasseraufbereitung zusammengefasst und nicht getrennt betrachtet werden.

**Chemikalien-/Treibstofftanks:** Die Versorgung der Prozesse mit Chemikalien in der Flotation oder Laugung und das Leitungssystem der Chemikalien untereinander sind ähnliche Fluidströme. Es wird nicht zwischen den einzelnen Chemikalien und Prozessen unterschieden, folglich werden diese zusammengefasst.

Aus diesen Zusammenfassungen kann eine Liste von 33 Fluidströmen abgeleitet werden. Die Liste repräsentiert die möglichen Fluidströme zwischen verschiedenen Anlagen und Komponenten im Bergbau und ist in Anhang 3 dargestellt.

### *4.3.3. Auswahl der Fluidströme anhand von Potenzialkriterien*

Die in Kapitel 4.3.2 identifizierten und zusammengefassten Fluidströme werden im Folgenden anhand von Potenzialkriterien bewertet und daraufhin überprüft, ob sie ein Wasserkraftpotenzial aufweisen können. Dafür werden zuerst an den folgenden Beispielen die Potenzialkriterien abgeleitet.

**Grundwasser → Dritte (Nr. 2)**: Um Grundwasser an Dritte abzugeben, muss es zunächst mittels Brunnen gehoben und über Leitungen abgeleitet werden. Die Lage der Brunnen, deren Zusammenführung und die Fördertiefe können stark variieren. Während in der eigentlichen Förderphase kein hydroelektrisches Potenzial entsteht, da das Wasser entgegen der Schwerkraft gepumpt wird, kann beim anschließenden Ableiten, abhängig von der Topografie, durchaus ein hydroelektrisches Potenzial vorliegen. Dieses ist jedoch auf spezifische Leitungsabschnitte beschränkt und vergleichbar mit anderen in dieser Arbeit betrachteten Fluidströmen. Die Existenz von Pumpen stellt daher kein generelles Ausschlusskriterium dar, da Abschnitte eines Fluidstroms durchaus energetisch nutzbar sein können.

Schlussfolgerung: Jeder Fluidstrom muss auf die Möglichkeit geprüft werden, ob entlang seines Verlaufs ein hydroelektrisches Potenzial, beispielsweise durch Fallhöhen oder Druckunterschiede, nutzbar ist.

**Niederschlag → Grundwasser (Nr. 4)**: Niederschlag, der auf unversiegelte Flächen eines Bergwerksgeländes fällt, versickert größtenteils und gelangt ins Grundwasser oder sammelt sich in Oberflächengewässern. Diese Fluidströme sind nicht eindeutig definierbar, da kein klarer Start- und Endpunkt vorhanden ist, was die technische Nutzbarkeit erschwert.

Schlussfolgerung: Fluidströme müssen auf eindeutige Start- und Endpunkte überprüft werden, um ihre Erreichbarkeit und technische Nutzbarkeit sicherzustellen.

**Prozesswasserspeicher → Flotation & Flotation → Prozesswasserspeicher (Nr. 12 & 20)**: Die relative Orientierung der Anlagen spielt eine entscheidende Rolle für das hydroelektrische Potenzial. In diesem Fall fließt Prozesswasser sowohl vom Speicher zur Flotation als auch umgekehrt. Je nach Anordnung der Anlagen kann nur einer der beiden Fluidströme eine Fallhöhe und damit ein hydroelektrisches Potenzial aufweisen. Da es sich bei dieser Betrachtung um eine Auflistung möglicher Fluidströme handelt, muss für beide Fluidströme die Möglichkeit einer potenziellen Fallhöhe angenommen werden.

Schlussfolgerung: Ob ein Fluidstrom ein hydroelektrisches Potenzial beinhalten kann, hängt oft von der Orientierung des Start- und Zielpunktes zueinander ab. Kann eine nutzbare Fallhöhe durch die Orientierung entstehen, muss die Möglichkeit eines Potenzials in Betracht gezogen werden.

**Chemikalien, Treibstoffe etc. → Wasseraufbereitung (Nr. 33)**: Die in der Wasseraufbereitung eingesetzten Chemikalien sind oft hochkonzentriert, sodass nur geringe, pulsierende Volumenströme im ml/s-Bereich zu erwarten sind.

Schlussfolgerung: Der Volumenstrom eines Fluidstroms ist zu überprüfen, um sicherzustellen, dass er groß genug ist, um energetisch nutzbar zu sein. Bei Verwendung von Pumpturbinen muss der Volumenstrom angelehnt an Easy Hydro (2023a) mindestens 15 l/s betragen.

Zur Bewertung der Fluidströme hinsichtlich ihres hydroelektrischen Potenzials können aus den dargestellten Beispielen vier Potenzialkriterien abgeleitet werden. Diese Potenzialkriterien müssen erfüllt sein, damit in einem Fluidstrom ein hydroelektrisches Potenzial vorhanden sein kann und dieser für die weitere Betrachtung in Frage kommt. Die Potenzialkriterien sind wie folgt definiert:

(i) **Definiertheit des Fluidstroms**: Der Fluidstrom muss einen eindeutigen Start- und Endpunkt besitzen. Sind diese Punkte nicht klar definiert, ist der Fluidstrom unvorhersehbar und nicht zuverlässig steuerbar, was eine effiziente Energieerzeugung unmöglich macht.

(ii) **Erreichbarkeit und Kontrollierbarkeit des Fluidstroms**: Der Fluidstrom muss zugänglich und technisch nutzbar und manipulierbar sein. Wenn der Fluidstrom durch natürliche oder technische Barrieren wie Gestein oder bauliche Anlagen blockiert wird, ist die Installation technischer Anlagen zur Energiegewinnung nicht möglich.

(iii) **Signifikanz des Volumenstroms**: Der Volumenstrom muss ausreichend groß sein, um ein relevantes hydroelektrisches Potenzial beinhalten zu können. Kleine Volumenströme unter

15 l/s sind wirtschaftlich nicht sinnvoll, da der Aufwand für die Energiegewinnung im Vergleich zum Ertrag zu hoch wäre.

(iv) **Potenzialmöglichkeit**: Im Verlauf des Fluidstroms muss die Möglichkeit eines hydroelektrischen Potenzials vorhanden sein. Das hydroelektrische Potenzial kann sowohl durch eine potenzielle Fallhöhe, als auch durch Druck oder kinetische Energie entstehen.

Um die für die Wasserkraftnutzung im Bergbau geeigneten Fluidströme zu ermitteln, werden die 33 Fluidströme aus Anhang 3 anhand der Potenzialkriterien bewertet. Dabei werden die zehn in Tabelle 4-3 gelisteten Fluidströme von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. In der letzten Spalte sind jeweils die ausschließenden Potenzialkriterien gelistet, eine ausführliche Begründung findet sich in Anhang 4.

*Tabelle 4-3: Liste der anhand der Potenzialkriterien ausgeschlossenen Fluidströme, eigene Darstellung Die Ausschließenden Kriterien beziehen sich auf die nummerierten Potenzialkriterien aus Kapitel 4.3.3: (i) Definiertheit des Fluidstroms, (ii) Erreichbarkeit und Kontrollierbarkeit des Fluidstroms und (iii) Signifikanz des Fluidstroms*

| Startpunkt | Endpunkt | Ausschließendes Kriterium |
|---|---|---|
| Grundwasser | Bergwerk | (i), (ii) |
| Niederschlag | Grundwasser | (i), (ii) |
| Niederschlag | Bergwerk | (i) |
| Niederschlag | Frisch-/Prozesswasserspeicher, Wasseraufbereitung, TSF | (i), (iii) |
| Niederschlag | Laugungsanlage | (i) |
| Niederschlag | Sonstige Anlagen | (i), (iii) |
| Brech- und Mahlkreislauf | Prozesswasserspeicher, Wasseraufbereitung | (iii) |
| Flotation | Prozesswasserspeicher, Wasseraufbereitung | (iii) |
| Bergeteich/TSF | Grundwasser | (i), (ii) |
| Chemikalien | Wasseraufbereitung, Flotation, Laugungsanlage | (iii) |

Durch Ausschließen der zehn Fluidströme ergibt sich eine Liste mit 23 Fluidströmen, die zur weiteren Betrachtung ausgewählt sind und in Tabelle 4-4 dargestellt ist. Jeder identifizierte Fluidstrom kann ein hydroelektrisches Potenzial beinhalten. Die Fluidströme haben einen eindeutigen Start- und Endpunkt und weisen typischerweise einen signifikanten Volumenstrom auf. Außerdem sind die Fluidströme erreichbar und kontrollierbar.

*Tabelle 4-4: Liste der anhand der Potenzialkriterien ausgewählten Fluidströme für die weitere Betrachtung in der Arbeit, eigene Darstellung*

| # | Startpunkt des Fluidstroms | Endpunkt des Fluidstroms |
|---|---|---|
| 1 | Grundwasser | Dritte |
| 2 | Grundwasser | Frisch- und Prozesswasserspeicher, Wasseraufbereitung |
| 3 | Dritte | Frischwasserspeicher |
| 4 | Bergwerk | Prozesswasserspeicher |
| 5 | Frischwasserspeicher, Prozesswasserspeicher | Bergwerk |
| 6 | Frischwasserspeicher, Prozesswasserspeicher | Brech- und Mahlkreislauf, Flotation, Laugungsanlage |
| 7 | Frischwasserspeicher | Sonstige Anlagen |
| 8 | Prozesswasserspeicher | Wasseraufbereitung |
| 9 | Wasseraufbereitung | Dritte |
| 10 | Wasseraufbereitung | Frischwasserspeicher |
| 11 | Brech- und Mahlkreislauf | Brech- und Mahlkreislauf |

*Tabelle 4-4: Fortsetzung*

| # | Startpunkt des Fluidstroms | Endpunkt des Fluidstroms |
|---|---|---|
| 12 | Brech- und Mahlkreislauf | Flotation |
| 13 | Flotation | Brech- und Mahlkreislauf |
| 14 | Flotation | Flotation |
| 15 | Flotation | Entwässerung |
| 16 | Entwässerung | Prozesswasserspeicher, Wasseraufbereitung |
| 17 | Entwässerung | TSF, Sonstige Anlagen |
| 18 | TSF | Prozesswasserspeicher, Wasseraufbereitung |
| 19 | Laugungsanlage | Prozesswasserspeicher, Wasseraufbereitung |
| 20 | Laugungsanlage | Laugungsanlage |
| 21 | Laugungsanlage | Sonstige Anlagen |
| 22 | Sonstige Anlagen | Wasseraufbereitung |
| 23 | Chemikalien, Treibstoffe etc. | Bergwerk |

Die ausgewählten Fluidströme sind in dem Fließbild in Abbildung 4-6 dargestellt. Das Fließbild zeigt vereinfacht den Produktstrom vom Abbau des Erzes im Bergwerk durch die Aufbereitungsanlage sowie die prozesstechnischen Zusammenhänge der Fluidströme und Komponenten eines Bergwerks.

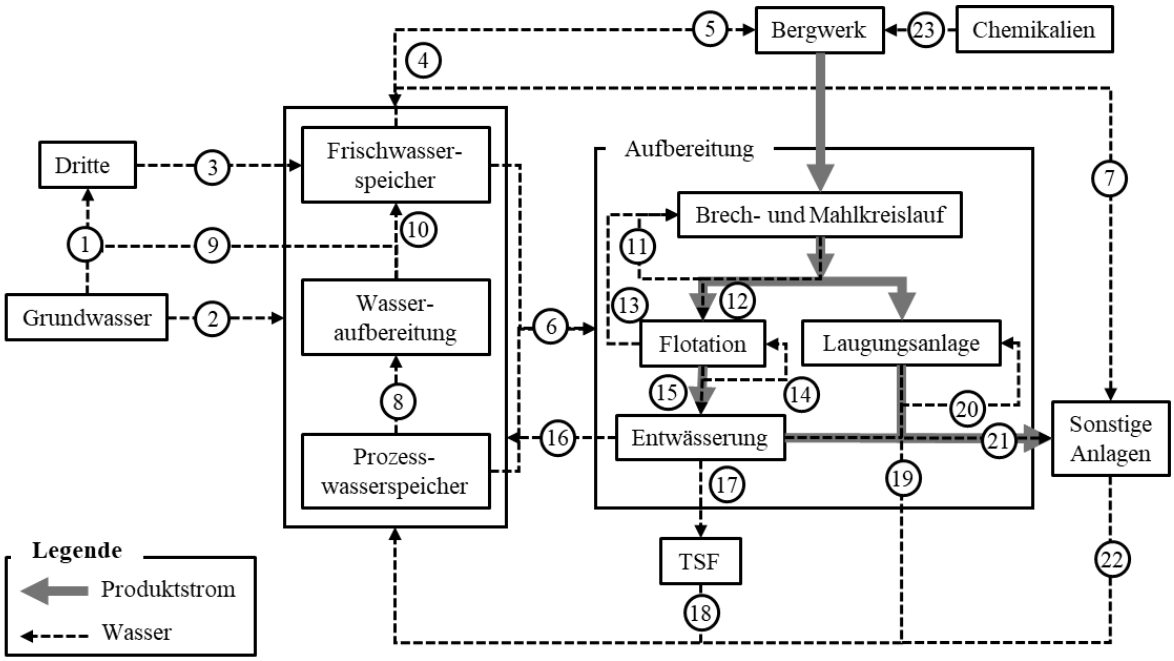



*Abbildung 4-6: Fließbild der anhand der Potenzialkriterien ausgewählten Fluidströme, eigene Darstellung*

### *4.3.4. Charakterisierung und Clusterung der identifizierten Fluidströme*

Im Folgenden werden die in Tabelle 4-4 aufgeführten 23 identifizierten Fluidströme charakterisiert. Dadurch kann das hydroelektrische Potenzial in Art und Umfang abgeschätzt werden. Die Charakterisierung ermöglicht außerdem eine Clusterung der Fluidströme in verschiedene Potenzialszenarien.

**Charakterisierung der Fluidströme**

Für die Bewertung des Potenzials sind insbesondere die Nettofallhöhe und der Volumenstrom ausschlaggebend (vgl. Formel (2-6)). Zusätzlich ist die Gleichmäßigkeit des Volumenstroms entscheidend, und wie einzigartig der Fluidstrom ist, damit abgeschätzt werden kann, wie häufig ein mögliches Potenzial auftreten kann. Dazu werden die folgenden Eigenschaften im Detail charakterisiert und beschrieben:

- **Zweck bzw. Ursache des Fluidstroms**: Der Zweck beschreibt die funktionale Rolle des Fluidstroms im Bergbaubetrieb. Er kann entweder Teil eines Prozesses sein, wie z. B. das Kühlen von Maschinen, das Fördern von Wasser zur Laugungsanlage oder die Ableitung von Abwässern, oder er dient der Versorgung von Anlagen mit Wasser oder Chemikalien. Der Zweck beeinflusst, wie der Fluidstrom genutzt und gesteuert wird und in welcher Form er für hydroelektrische Potenziale relevant sein kann.
- **Technische Umsetzung des Fluidstroms**: Die technische Umsetzung umfasst die spezifischen technischen Aspekte des Fluidstroms, wie z. B. die Art des Fluids (Wasser, Chemikalien, Suspension), die Entfernung, die der Fluidstrom zurücklegt, und die Art der Leitung, durch die er fließt (Rohre, Kanäle). Auch die Fallhöhe und die Gleichmäßigkeit des Fluidstroms sind wesentliche Parameter.
- **Hydroelektrisches Potenzialszenario**: Diese Eigenschaft beschreibt, wie das hydroelektrische Potenzial entstehen kann und welche Annahmen und Bedingungen dafür erfüllt sein müssen. Dabei wird analysiert, ob eine ausreichende Fallhöhe vorliegen kann, ob das Fluid regelmäßig und in ausreichender Menge fließt und ob die technischen Bedingungen es ermöglichen, das Potenzial effizient zu nutzen.
- **Einzigartigkeit des Fluidstroms**: Die Einzigartigkeit beschreibt, ob der betrachtete Fluidstrom einzigartig in einem Bergwerk ist, oder ob Parallelen zu anderen Fluidströmen in Bergwerken vorhanden sind. Einzigartige Fluidströme können spezielle Anforderungen oder Chancen für die Energieerzeugung bieten, während ähnliche Fluidströme auf vorhandene Lösungsansätze zurückgreifen können, was die Umsetzung erleichtert.
- **Neuartigkeit des Potenzialszenarios**: Mit der Neuartigkeit wird überprüft, ob der betrachtete Fluidstrom in der wissenschaftlichen Literatur oder in der Praxis bereits als hydroelektrisches Potenzial identifiziert ist. Neuartige Szenarien könnten bisher ungenutzte Potenziale erschließen, während bereits bekannte Potenziale auf bewährte Methoden und Technologien zurückgreifen können, auch aus verwandten Industrien und Forschungsbereichen (vgl. Kapitel 3).
- **Quantitative Abschätzung des Volumenstroms**: Eine quantitative Analyse des Volumenstroms ist entscheidend, um das hydroelektrische Potenzial abzuschätzen. Nur signifikante Volumenströme bieten das Potenzial, relevante Mengen an Energie zu erzeugen.

Zur Quantifizierung der Fluidströme wird die Arbeit von Gunson (2013) herangezogen, in welcher ein fiktives Kupferbergwerk mit einer Tagesförderung von 50.000 t sulfidischem Kupfererz und einem Kupfergehalt von 0,5 % beschrieben wird. Das von Gunson skizzierte Modellbergwerk dient dieser Arbeit als Normierungsgrundlage zur weiterführenden, spezifischeren Quantifizierung der Fluidströme zwischen den einzelnen Prozessen an einem typischen Bergwerksstandort. Die von Gunson eindeutig quantifizierten Fluidvolumenströme zwischen einzelnen Prozessen werden übernommen. Die Quantifizierung der nicht von Gunson aufgeschlüsselten Fluidströme erfolgt aus zusätzlichen Literaturquellen oder Berechnungen. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der Werte werden die Angaben aus den zusätzlichen Quellen auf die Tagesförderung von 50.000 t Kupfererz normiert.

Eine detaillierte Auflistung der charakterisierten Fluidströme ist in Anhang 5 zu finden. Die Charakterisierung zeigt, dass sich die Fluidströme in gewissen Eigenschaften ähneln, in anderen jedoch unterscheiden. Zudem sind verschiedene Muster zu erkennen, wo und wie die hydroelektrischen Potenziale auftreten können. Folglich existieren:

- Potenziale, die immer auftreten, wenn der jeweilige Fluidstrom vorhanden ist (z. B. Fallleitung ins untertägige Bergwerk)
- Potenziale, die nur unter bestimmten Bedingungen auftreten (z. B. Gefälle in der Leitung oder Niederschlag)
- Potenziale, die nicht exklusiv im Bergbau auftreten (z. B. Frischwasserrohrleitungen)

Darüber hinaus weisen die Fluidcharakteristika und Leitungen zum Teil signifikante Unterschiede auf. Es lassen sich folgende Typen von Fluidcharakteristika und Rohrleitungen unterscheiden:

- Industrielle Rohrleitungssysteme für das interne Wassernetzwerk, welche nicht exklusiv für den Bergbau sind
- Industrielle Rohrleitungssysteme mit Wasser, in denen der Leitungsverlauf und das Potenzial durch den Bergbau bedingt sind
- Freispiegelleitungen und Kanäle oder Rinnen
- Fluidströme, die nicht zwingend Wasser sind und einzigartig durch den Bergbau bedingt sind

Bei der Eigenschaft *Einzigartigkeit des Fluidstroms* lässt sich erkennen, dass der Bergbau einige einzigartige Fluidströme bedingt, die so in keiner anderen Anwendung oder Industrie normalerweise vorkommen. Einige andere Fluidströme sind jedoch nicht spezifisch einzigartig im Bergbau, weshalb leicht Parallelen zur Nutzung in anderen Bereichen gezogen werden können.

**Clustern der Potenzialmöglichkeiten**

Da die identifizierten und charakterisierten Fluidströme sich teilweise ähneln, aber nicht gleich sind, werden sie im nächsten Schritt geclustert. Die Clusterung ermöglicht es, Fluidströme über verschiedene Bergwerke hinweg besser zu vergleichen und erleichtert die gezielte Entwicklung von Technologien zur hydroelektrischen Nutzung. Als Ergebnis lassen sich die charakterisierten Fluidströme jeweils einer der folgenden Potenzialkategorien zuordnen:

1. **Abschnitt einer Rohrleitung:** Das Potenzial kann in einem Abschnitt einer Rohrleitung auftreten, je nach Verlauf der Leitung.
2. **Betriebliches Wassernetzwerk:** Das Potenzial kann im innerbetrieblichen Frisch- und Prozesswassernetzwerk bei entsprechender Orientierung der Anlagen zueinander auftreten.
3. **Materialtransport in der Aufbereitung:** Das Potenzial kann durch den prozessbedingten hydraulischen Materialtransport als Suspension zwischen Prozessen der mineralischen Aufbereitung auftreten.
4. **Anlagenspezifische Potenziale:** Das Potenzial kann in oder an einzelnen Anlagen entstehen.
5. **Hydraulischer Materialtransport durch Rohrleitungen:** Das Potenzial kann durch den hydraulischen Materialtransport über größere Strecken und Höhendifferenzen auftreten (Aufbereitungsberge, Versatz, Erzkonzentrat etc.).
6. **Betriebliche Wasserquellen:** Das Potenzial kann durch Wasserquellen auf dem Betriebsgelände auftreten.
7. **Fallleitungen:** Das Potenzial tritt in Fallleitungen oder anderen sehr steilen Rohrleitungen auf.

Die Potenzialkategorie drückt dabei aus, wodurch ein jeweiliges hydroelektrisches Potenzial bedingt ist, und hat eindeutige Charakteristika des jeweiligen Fluidstroms und der Leitung. Die Fluidstromcharakteristika umfassen den zu erwartenden Volumenstrom, die Fluideigenschaften und die Gleichmäßigkeit des Fluidstroms. Die Charakteristika der Leitung umfassen die Art der Leitung, die zu erwartende oder mögliche Fallhöhe sowie horizontale Entfernung. Tabelle 4-5 grenzt die sieben Potenzialkategorien hinsichtlich der Leitungs- und Fluidstromcharakteristika und Potenzialbedingungen eindeutig voneinander ab und ordnet die 23 identifizierten Fluidströme den Potenzialkategorien zu.

Einen Sonderfall bei der Betrachtung nehmen dabei die Fluidströme F10, F11, F12 und F13 ein, da sie in zwei Potenzialkategorien eingeordnet werden können. Dies liegt nicht daran, dass der jeweilige Fluidstrom in beide Kategorien fallen kann, sondern daran, dass der Fluidstrom in der Realität aus vielen verschiedenen Maschinen und Komponenten bestehen kann. Daher können zusätzlich zum betrachteten Materialtransport noch Potenziale auftreten, die durch die jeweilige Anlage bedingt sind.

*Tabelle 4-5: Abgrenzung der Potenzialkategorien und Zuordnung der Fluidströme, eigene Darstellung*

| Potenzialkategorie | Fluidstrom Charakteristika | Charakteristika der Leitung | Potenzialbedingung | Fluidströme |
|---|---|---|---|---|
| 1. Abschnitt einer Rohrleitung | - gleichmäßig<br>- (annähernd) Frischwasser<br>- großer Volumenstrom | - große Entfernung möglich<br>- große Fallhöhe möglich<br>- Oft Druckrohrleitung, selten Kanal | - Leitungsverlauf muss in Abschnitten signifikante Nettofallhöhe aufweisen | F1 Grundwasser – Dritte<br>F3 Dritte – Frischwasserspeicher<br>F9 Wasseraufbereitung – Dritte |
| 2. Betriebliches Wassernetzwerk | - gleichmäßig<br>- Frischwasser oder Prozesswasser<br>- kleine bis mittlere Volumenströme | - wenige 10 bis 100 m Länge<br>- geringe Fallhöhen oder Höhenunterschiede <20 m<br>- Druckrohrleitungen | - Orientierung der Anlagen zueinander muss Höhenunterschied und Potenzial bedingen | F2 Grundwasser – Frisch-/Prozesswasserspeicher<br>F6 Frisch-/Prozesswasserspeicher –Mahlkreislauf<br>F8 Prozesswasserspeicher – Wasseraufbereitung<br>F10 Wasseraufbereitung – Frischwasserspeicher<br>F16 Entwässerung – Prozesswasserspeicher<br>F18 TSF – Prozesswasserspeicher<br>F20 Laugungsanlage – Laugungsanlage<br>F21 Laugungsanlage – Sonstige Anlagen<br>F22 Sonstige Anlagen – Wasseraufbereitung |
| 3. Materialtransport in der mineralischen Aufbereitung | - gleichmäßig oder pulsierend<br>- fließfähige Suspension mit hohem Feststoffanteil<br>- mittlerer bis großer Volumenstrom | - kurze Entfernung, meist <50 m<br>- geringe Fallhöhen <10 m<br>- Rinne, Rohrleitung oder selten Druckrohrleitung | - Orientierung der Anlagen zueinander muss Höhenunterschied und Potenzial bedingen | F11 Brech-/Mahlkreislauf - Brech-/Mahlkreislauf<br>F12 Brech-/Mahlkreislauf - Flotation<br>F13 Flotation - Brech-/Mahlkreislauf<br>F14 Flotation – Flotation<br>F15 Flotation – Entwässerung |
| 4. Anlagenspezifisch | - gleichmäßig oder pulsierend<br>- Prozess- oder Frischwasser<br>- kleiner bis mittlerer Volumenstrom | - minimale Entfernung, wenige Meter<br>- geringe Fallhöhe, meist <10 m<br>- Druckrohr, Fallleitung oder Überlauf | - Anlage muss betriebsbedingt Fluidstrom mit Druck oder kinetischer Energie erzeugen | F10 Wasseraufbereitung – Frischwasserspeicher<br>F11 Brech-/Mahlkreislauf - Brech-/Mahlkreislauf<br>F12 Brech-/Mahlkreislauf - Flotation<br>F13 Flotation - Brech-/Mahlkreislauf<br>F16 Entwässerung – Prozesswasserspeicher |
| 5. Hydraulischer Materialtransport in Rohrleitung | - gleichmäßig<br>- fließ- oder pumpfähige Suspension mit hohem Feststoffanteil<br>- großer Volumenstrom | - große Entfernung >100 m<br>- große Fallhöhe möglich >100 m<br>- Oft Druckrohrleitung, selten Kanal oder Freispiegel | - Leitungsverlauf muss Nettofallhöhe aufweisen | F17 Entwässerung – TSF, Sonstige Anlagen |
| 6. Betriebliche Wasserquellen | - ungleichmäßig, zufällig<br>- (annähernd) Frischwasser<br>- kleiner bis mittlerer Volumenstrom | - kurze bis mittlere Entfernung <500 m<br>- geringe bis mittlere Fallhöhe möglich<br>- Rohrleitung oder Kanal | - Wasser muss an einer Stelle mit potenzieller Fallhöhe auftreten | F4 Bergwerk – Prozesswasserspeicher<br>F19 Laugungsanlage – Prozesswasserspeicher |
| 7. Fallleitungen | - (annähernd) Frischwasser<br>- kleine Volumenströme | - kurze Entfernung <50 m<br>- große Fallhöhe möglich >200 m | - signifikanter Volumenstrom und Fallhöhe | F5 Frisch-/Prozesswasserspeicher – Bergwerk<br>F23 Chemikalien – Bergwerk |

## 4.4. Hydroelektrische Potenziale im Bergbau

Aus den in Unterkapitel 4.3 eindeutig identifizierten, ausgewählten und charakterisierten Fluidströmen lassen sich die hydroelektrischen Potenziale von Bergwerken ableiten. Aufbauend auf der Clusterung der Fluidströme in Kapitel 4.3.4 werden die hydroelektrischen Potenziale in Bergwerken in die folgenden Potenzialkategorien unterteilt:

1. Abschnitt einer Rohrleitung
2. Betriebliches Wassernetzwerk
3. Materialtransport in der mineralischen Aufbereitung
4. Anlagenspezifische Potenziale
5. Hydraulischer Materialtransport in Rohrleitungen
6. Betriebliche Wasserquellen
7. Fallleitungen

Damit ein Fluidstrom ein relevantes hydroelektrisches Potenzial beinhalten kann, müssen jeweils einige spezifische Bedingungen erfüllt sein. Diese werden im Folgenden zusammen mit der genauen Abgrenzung, Beschreibung und einem Ansatz zur technischen Nutzung des jeweiligen Potenzials beschrieben.

### *4.4.1. Abschnitt einer Rohrleitung*

Die hydroelektrischen Potenziale der Potenzialkategorie *Abschnitt einer Rohrleitung* können im Verlauf einer größeren und längeren Rohrleitung durch Höhenunterschiede in der Topografie auftreten. Diese Arten von Rohrleitungen kommen zum Beispiel in der Frischwasserversorgung des Bergwerks und bei der Abgabe von Wasser vom Bergwerk vor. Die Betrachtungsgrenzen liegen beim Startpunkt der jeweiligen Rohrleitung bis zum Endpunkt, und können damit die Grenzen des Bergwerks überschreiten. Es ist sogar wahrscheinlich, dass vor allem bei Rohrleitungen, welche die Grenzen des Bergwerks überschreiten, ein hydroelektrisches Potenzial auftritt. Von den identifizierten Fluidströmen können die folgenden Fluidströme (vgl. Tabelle 4-6) dem Potenzialszenario zugeordnet werden:

*Tabelle 4-6: Fluidströme in der Potenzialkategorie „Abschnitt einer Rohrleitung“, eigene Darstellung*

| Fluidstrom | Startpunkt | Endpunkt |
|---|---|---|
| F1 | Grundwasser | Dritte |
| F3 | Dritte | Frischwasserspeicher |
| F9 | Wasseraufbereitung | Dritte |

**Verursachender Prozess oder Anlage**

Das Potenzial wird durch die Fluidströme bedingt, welche die Wasserversorgung des Bergwerks darstellen, beziehungsweise überschüssiges Wasser vom Bergwerk kontrolliert ableiten. Die verursachenden Prozesse sind daher die Frischwasserversorgung, Wasserhaltung sowie Wasserentsorgung. Die Größe, der im jeweiligen Prozess auftretenden Fluidströme, kann stark variieren und hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Hier sind vor allem die geografische Lage, die hydrogeologischen Gegebenheiten, der Wasserverbrauch und das Wassermanagement des Bergwerks entscheidend (Rankin 2011, S. 213 ff.).

Bei dem betrachteten Fluid handelt es sich um Wasser, welches entweder aufbereitet wurde (F9), oder Grundwasser (F1) bzw. Wasser aus einer natürlichen Quelle (F3). Der Ursprung des externen Wassers ist entweder eine natürliche Quelle, wie Grundwasser oder Oberflächenwässer, oder eine industrielle Anlage der kommunalen Wasserversorgung. Das Ziel des Wassers ist entweder ein externer Abnehmer (F1, F9) oder das Bergwerk in Form eines Wasserspeichers (F3).

Die Rohrleitungen sind große Frischwasserrohrleitungen. Die Größe dieser Leitungen ist abhängig von dem maximal zu erwartenden Volumenstrom. Die Rohrleitungen können außerdem mit Pump- und Drosselstationen betrieben werden. Die Rohrleitungen verlaufen meist über mehrere hundert Meter oder sogar mehrere Kilometer. Ihle und Kracht (2018) führt einige besonders lange Frischwasserrohrleitungen auf mit Längen bis zu 320 km und Volumenströmen bis zu 2,5 m³/s.

**Potenzialbedingende Umstände**

In den Rohrleitungen ist Wasser mit Frischwasserqualität oder nahezu Frischwasserqualität zu erwarten, da es sich nicht um Prozesswasser handelt und höchstens in kleinem Maße Verunreinigungen aufweist. Die Quantität des Wassers variiert je nach Wasserbedarf des Standortes und dem Wasseraufkommen und kann durchaus im Bereich von mehreren m³/s liegen. Meistens ist eine einzelne Rohrleitung mit einem konstanten Volumenstrom vorhanden (Ihle und Kracht 2018).

Die benötigte Menge an Frischwasser eines Bergwerks ist annähernd proportional zur Produktion des Betriebs. Für die Wasserversorgung an Dritte hängt der Volumenstrom von den geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten ab und kann ebenfalls mehrere m³/s erreichen. Die Fallhöhe des Wassers ist abhängig vom Verlauf der Rohrleitung und kann mehrere hundert Meter betragen, aber auch auf wenige Meter, keine Fallhöhe oder eine negative Fallhöhe beschränkt sein (Rankin 2011, S. 213 ff.).

Um das hydroelektrische Potenzial der Fluidströme nutzen zu können, muss ein Höhenunterschied in einem Abschnitt der Rohrleitung vorhanden sein, durch den ein signifikanter, überschüssiger Druck auftritt. Dieser überschüssige Druck wird normalerweise mit einem Drosselventil entspannt, Beispiele verwandter Anwendungen (vgl. Kapitel 3) zeigen jedoch, dass dieser Druck hydroelektrisch genutzt werden kann. Im Speziellen weisen Anwendungsfälle in Wasserversorgungsnetzwerken ähnliche Charakteristika auf. Indikatoren für das energetische Potenzial sind ein langer Rohrleitungsverlauf über unebenes Gelände mit Drosselstationen, große Wassermengen und ein Bergwerk, das tiefer liegt als der Bezugspunkt.

**Technische Umsetzung des Potenzials**

Das betrachtete Potenzialszenario ähnelt dem kommerziellen, aber nicht konventionellen, Ansatz zur Energieerzeugung in (über-) regionalen Wasserversorgungsrohrleitungen. Das energetische Potenzial sollte sich daher ebenfalls durch den Einsatz von geeigneten Turbinen an den Stellen mit überschüssigem Druck nutzen lassen. Die Implementierung solcher Technologien zur Energiegewinnung hätte keine signifikanten Auswirkungen auf den laufenden Betrieb der Wasserversorgung, lediglich kleinere Anpassungen könnten erforderlich sein, um beispielsweise einen kontinuierlichen Durchfluss sicherzustellen, oder Wartungen unterbrechungsfrei durchführen zu können.

**SWOT-Bewertung**

Die Bewertung der Potenzialkategorie *Abschnitt einer Rohrleitung* im Folgenden zeigt deutlich Vor- und Nachteile einer möglichen technischen Umsetzung in Bergwerken auf. In der SWOT-Analyse werden qualitative Begriffe wie gut, groß oder leicht verwendet. Diese stellen keine normierten oder quantitativ definierten Kategorien dar, sondern dienen der qualitativen, ordinalen Einordnung und dem relativen Vergleich der untersuchten Szenarien. Eine explizite quantitative Definition erfolgt bewusst nicht, da die Randbedingungen im Bergbau stark standortabhängig sind und eine allgemeingültige Normierung nicht zielführend wäre. Eine Zusammenfassung der SWOT-Analyse ist in Abbildung 4-7 dargestellt.

Zu den **Stärken** dieses Potenzialszenarios zählt ein großer, kontinuierlicher Volumenstrom, der gut für eine effiziente Energieerzeugung genutzt werden kann. Die erzeugte Energie läge damit im Grundlastbereich und könnte kontinuierlich zur Verfügung stehen. Die großen Rohrleitungen sind außerdem in vielen Fällen gut ausgebaut und leicht zugänglich, was die Installation und Wartung einer Turbine erleichtert. An Standorten mit geeigneter Topografie können zudem sehr große Fallhöhen erreicht werden,

die das hydroelektrische Potenzial deutlich erhöhen. Bewährte Technologien wie Pumpen- oder Peltonturbinen sind für diese Anwendungen technisch nutzbar und bereits gut erprobt. Da es sich bei dem Wasser um (nahezu) Frischwasser handelt, lässt sich das Potenzial mit konventioneller Wasserkrafttechnik gut umsetzen.

**Stärken**

- Große Volumenströme
- Gut ausgebaute Rohrleitungen
- Gleichmäßiger Volumenstrom
- Leichter Zugang zur Rohrleitung
- Große Fallhöhen möglich
- Technologie erprobt
- (Nahezu) Frischwasserqualität
- Kontinuierliche Energieerzeugung im Grundlastbereich

**Schwächen**

- Fallhöhe abhängig vom Rohrleitungsverlauf und Topografie
- Volumenstrom abhängig von Wasserbedarf des Bergwerks

**Chancen**

- Beständigkeit der Leitung
- Ersetzen von Drosselventilen
- Positiv für soziale Akzeptanz, wenn Turbine außerhalb des Betriebsgeländes liegt und Energie abgegeben wird

**Risiken**

- Zielkonflikt: Reduzierung des Frischwasserbedarfs vs. möglichst großer Volumenstrom für hydroelektrisches Potenzial
- Störungen können Wasserversorgung beeinträchtigen
- Turbine möglicherweise außerhalb des Betriebsgeländes

*Abbildung 4-7: SWOT-Analyse der Potenzialkategorie „Abschnitt einer Rohrleitung“, eigene Darstellung*

Die **Schwächen** dieses Potenzialszenarios liegen in der Abhängigkeit von externen Faktoren bezüglich der Fallhöhe und des Volumenstroms. Die mögliche Fallhöhe ist dabei maßgeblich von der Topografie abhängig. Der Volumenstrom richtet sich nach dem Wasserbedarf des Bergwerks, weshalb Schwankungen im Wassereinsatz die Energieerzeugung beeinflussen könnten.

Die **Chancen** dieses Ansatzes liegen in der Beständigkeit der Rohrleitung, die eine langfristige Nutzung ermöglicht und bereits in der Planungsphase eines Bergwerks berücksichtigt werden kann. Technische Einrichtungen zur Druckreduzierung, wie Drosselventile, könnten durch die Installation von Turbinen ersetzt werden, was einen zusätzlichen wirtschaftlichen Vorteil bietet. Zudem könnte die überschüssige Energie zur Versorgung umliegender Gemeinden beitragen und so die soziale Akzeptanz des Bergwerks verbessern. Ein weiterer Vorteil wäre die Möglichkeit, die erzeugte Energie zur Substitution der benötigten Pumpenergie zu nutzen, was die Kosten der Wasserversorgung im Bergwerk deutlich senken könnte.

**Risiken** bei der Umsetzung des Potenzialszenarios bestehen durch einen möglichen Zielkonflikt zwischen der Nutzung des Wasserkraftpotenzials und dem Wasserbedarf des Bergwerks. Bergwerke versuchen im Normalfall den Frischwasserbedarf durch Eigennutzung von gehobenem Grundwasser, hohe Recyclingquoten und wasserarme Technologien zu minimieren. Für ein größtmögliches Wasserkraftpotenzial wären jedoch große Volumenströme erforderlich. Technische Probleme an der Turbine könnten zudem die unterbrechungsfreie Wasserversorgung des Bergwerks gefährden. Befindet sich die Turbine außerhalb des Bergwerksgeländes, könnten außerdem Risiken durch Vandalismus oder eingeschränkte Zugänglichkeit auftreten.

### *4.4.2. Betriebliches Wassernetzwerk*

Der Potenzialkategorie *Betriebliches Wassernetzwerk* können zahlenmäßig die meisten der in Kapitel 4.3 identifizierten Fluidströme zugeordnet werden und die Fluidströme befinden sich alle ausschließlich auf dem Betriebsgelände. Es handelt sich dabei um Potenziale, die in den Leitungen der innerbetrieblichen Wasserversorgung auftreten können. Der Unterschied zu der Potenzialkategorie *Abschnitt einer Rohrleitung* liegt dabei in der geringeren Entfernung und oft geringeren Volumenströmen. Die Nutzung der Höhe einzelner Anlagen des Wassernetzwerks wird in der Potenzialkategorie *Anlagenspezifische Potenziale* betrachtet. Der Potenzialkategorie *betriebliches Wassernetzwerk* können die in Tabelle 4-7 dargestellten Fluidströme zugeordnet werden:

*Tabelle 4-7: Fluidströme in der Potenzialkategorie „Betriebliches Wassernetzwerk", eigene Darstellung*

| Fluidstrom | Startpunkt | Endpunkt |
|---|---|---|
| F2 | Grundwasser | Frisch-/Prozesswasserspeicher und Wasseraufbereitung |
| F6 | Frisch-/Prozesswasserspeicher | Brech-/Mahlkreislauf |
| F7 | Frischwasserspeicher | Sonstige Anlagen |
| F8 | Prozesswasserspeicher | Wasseraufbereitung |
| F10 | Wasseraufbereitung | Frischwasserspeicher |
| F16 | Entwässerung | Prozesswasserspeicher und Wasseraufbereitung |
| F18 | TSF | Prozesswasserspeicher und Wasseraufbereitung |
| F20 | Laugungsanlage | Laugungsanlage |
| F21 | Laugungsanlage | Sonstige Anlagen |
| F22 | Sonstige Anlagen | Wasseraufbereitung |

**Verursachender Prozess oder Anlage**

Die Fluidströme im innerbetrieblichen Wassernetzwerk eines Bergwerks werden primär durch den generellen Wasserbedarf der einzelnen Prozesse verursacht. Das Potenzial wird nicht durch den jeweiligen Prozess verursacht, sondern von der Wasserversorgung des Prozesses. Diese Fluidströme sind als Teil des betrieblichen Wassermanagements essenziell, um sicherzustellen, dass den jeweiligen Prozessen zu jeder Zeit die benötigte Menge Wasser zur Verfügung steht. Ursprung dieser Fluidströme ist meist ein Becken oder Speicher, aus dem Wasser abgeleitet, oder mittels einer Pumpe entnommen wird. Das Wasser wird von dort zu den verschiedenen Anlagen und Prozessen geleitet, wobei auch Zwischenspeicher integriert sein können. Das für die Prozesse bereitgestellte Fluid kann Frischwasser, Brauchwasser oder Prozesswasser sein, die Fließeigenschaften ähneln denen von Frischwasser, obwohl sie eventuell chemische Verunreinigungen enthalten können. Das Wasser wird über Rohrleitungen mit kleinerem Durchmesser über Strecken von wenigen Metern bis zu mehreren hundert Metern befördert.

Als Beispiel für die Größe möglicher Volumenströme in dieser Potenzialkategorie kann die Entwässerung der Aufbereitungsberge herangezogen werden. Dabei fallen erhebliche Mengen Wasser an, die über das betriebliche Wassernetzwerk dem Prozesswasserspeicher oder der Wasseraufbereitung zugeführt werden (Fluidstrom 16). An dem Beispiel des 50.000 t/d Kupferbergwerks von Gunson (2013) fallen bei dem Prozess etwa 0,94 m³/s Prozesswasser an.

**Potenzialbedingende Umstände**

Ein hydroelektrisches Potenzial im betrieblichen Wassernetzwerk entsteht, wenn in einem Fluidstrom ein überschüssiger Druck vorliegt. Dieser kann entweder durch eine nicht optimale Auslegung, etwa den Einsatz überdimensionierter Pumpen, oder durch den spezifischen Leitungsverlauf verursacht werden. Letzterer hängt maßgeblich von der Anordnung der bergbaulichen Anlagen zueinander sowie von den topografischen Gegebenheiten ab. Die Gestaltung innerbetrieblicher Wassernetzwerke ist in

Bergwerken stark standortspezifisch, sodass sich das hydroelektrische Potenzial insbesondere aus den relativen Höhenlagen der einzelnen Anlagenteile ergibt. Häufig enthalten diese Netzwerke geschlossene Kreisläufe zur Wiederverwendung von Wasser. Ist in einem solchen Kreislauf zwischen Anfangs- und Endpunkt ein Höhenunterschied vorhanden, kann eine nutzbare Fallhöhe entstehen.

Eindeutige Indikatoren für das Vorhandensein eines nutzbaren hydroelektrischen Potenzials sind Druckventile, das Fehlen oder Vorhandensein von nur kleinen Pumpen, und signifikante Höhenunterschiede innerhalb des Wassernetzwerks. Die Quantität der verfügbaren Wassermengen für die Energiegewinnung in den einzelnen Rohrleitungen liegt typischerweise deutlich unter 1 m³/s, kann sich jedoch bei größeren Bergwerken an Sammelpunkten zu größeren Mengen summieren. Der jeweilige Volumenstrom kann je nach Fluidstrom und Bergwerk stark variieren.

**Technische Umsetzung des Potenzials**

Das Potenzialszenario ähnelt den Bedingungen von Wasserkraftanwendungen in anderen Industrieanlagen oder kommunalen Wassernetzwerken (vgl. Kapitel 3.3.3). Die Potenziale sollten sich daher ebenfalls mit Rohrturbinen oder Pumpenturbinen nutzen lassen. Obwohl diese Technologien kommerziell verfügbar und in der Praxis erprobt sind, handelt es sich um nicht konventionelle Lösungen.

Die energetische Nutzung von Potenzialen im betrieblichen Wassernetzwerk hat voraussichtlich nur geringe bis keine Einwirkungen auf den laufenden Bergwerksbetrieb, da vor allem Pumpenturbinen robust und wartungsarm sind. Die Funktionsfähigkeit des Wassermanagements wird nicht beeinträchtigt, und es sind wenige technische Probleme zu erwarten.

**SWOT-Bewertung**

Die Potenzialkategorie *Betriebliches Wassernetzwerk* weist klare Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken auf. In der SWOT-Analyse werden qualitative Begriffe wie gut oder groß verwendet. Diese stellen keine normierten oder quantitativ definierten Kategorien dar, sondern dienen der qualitativen, ordinalen Einordnung und dem relativen Vergleich der untersuchten Szenarien. Eine explizite quantitative Definition erfolgt bewusst nicht, da die Randbedingungen im Bergbau stark standortabhängig sind und eine allgemeingültige Normierung nicht zielführend wäre. Die Zusammenfassung der SWOT-Analyse ist in Abbildung 4-8 dargestellt.

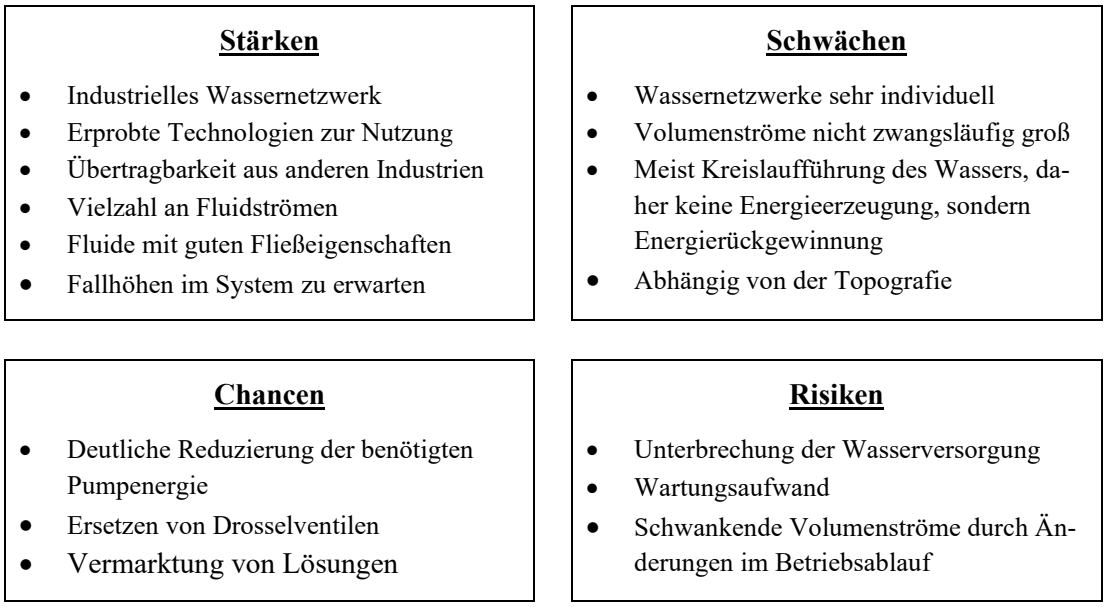



*Abbildung 4-8: SWOT-Analyse der Potenzialkategorie „Betriebliches Wassernetzwerk", eigene Darstellung*

Zu den **Stärken** gehört, dass das Wassernetzwerk bereits definiert ist und die Fluidströme innerbetrieblich bekannt und kontrolliert werden. Für die Nutzung hydroelektrischer Potenziale in solchen

Netzwerken gibt es bereits etablierte Lösungen, und viele Veröffentlichungen bieten wertvolle Erkenntnisse. Die Vielzahl an Fluidströmen und die Kreislaufführung innerhalb des Netzwerks erhöhen die Wahrscheinlichkeit, dass einige dieser Ströme ein ausreichend hohes hydroelektrisches Potenzial besitzen. Zudem handelt es sich in der Regel um Frischwasser oder nur leicht verunreinigte Wässer, was gute Fließeigenschaften bedingt und die Anwendung gängiger Technologien erleichtert.

Zu den **Schwächen** zählt die individuelle Gestaltung jedes Wassernetzwerks, was zu einem erhöhten Entwicklungsaufwand für spezifische Lösungen führt. Außerdem sind die Volumenströme teilweise nicht sehr groß, was eine energetische Nutzung unwirtschaftlich machen kann. Das hydroelektrische Potenzial hängt zudem stark von der Topografie ab, nur wenn Höhenunterschiede im Gelände genutzt werden, kommen sehr hohe Fallhöhen zustande. Aufgrund der Kreislaufführung handelt es sich außerdem in den meisten Fällen um Energierückgewinnung und nicht um die Erzeugung neuer Energie.

Die **Chancen** umfassen die Möglichkeit, die benötigte Pumpenergie im Wassernetzwerk erheblich zu reduzieren, indem überschüssige Energie zurückgewonnen wird. Zudem könnten Drosselventile durch die Nutzung dieser Energie ersetzt werden, was betriebliche Vorteile bietet. Bei einer vorteilhaften Topografie können außerdem große Fallhöhen erreicht werden.

Die **Risiken** betreffen vor allem die Ausfallgefahr einzelner Leitungen bei technischen Problemen und den unklaren Wartungsaufwand. Mögliche Schwankungen oder ungleichmäßige Fluidströme können außerdem die Energieerzeugung beeinträchtigen.

### *4.4.3. Materialtransport in der mineralischen Aufbereitung*

Die Potenzialkategorie *Materialtransport in der mineralischen Aufbereitung* umfasst Fluidströme, die in der mineralischen Aufbereitung von der ersten Brechstufe bis zum Eindicker auftreten, und primär zum Materialtransport genutzt werden. Die Potenzialkategorie umfasst damit die in Tabelle 4-8 aufgelisteten Fluidströme. Der Transport von Material über größere Distanzen, wie etwa zum Bergeteich oder des Erzkonzentrats zu einem Hafen, wird in der Potenzialkategorie *Hydraulischer Materialtransport in Rohrleitungen* betrachtet.

*Tabelle 4-8: Fluidströme in der Potenzialkategorie „Materialtransport in der mineralischen Aufbereitung“, eigene Darstellung*

| Fluidstrom | Startpunkt | Endpunkt |
|---|---|---|
| F11 | Brech-/Mahlkreislauf | Brech-/Mahlkreislauf |
| F12 | Brech-/Mahlkreislauf | Flotation |
| F13 | Flotation | Brech-/Mahlkreislauf |
| F14 | Flotation | Flotation |
| F15 | Flotation | Entwässerung |

**Verursachender Prozess/Anlage**

Die Fluidströme dieser Potenzialkategorie werden durch den Materialtransport zwischen Prozessen bedingt. Diese Fluidströme treten vor allem zwischen den Brech- und Mahlstufen, der Mühle und Flotation, in der Rezirkulation sowie von der Flotation zum Eindicker auf. Die spezifische Auslegung der Aufbereitungsanlage und Aufbereitungsprozesse hängt dabei stark von der Lagerstätte, der verarbeiteten Tonnage und der Mineralogie des geförderten Erzes ab (Concha A. 2014, S. 373). Die Größe der Volumenströme ist meist proportional zur Tonnage des verarbeiteten Erzes. Das Fluid in diesen Prozessen hat einen hohen Feststoffanteil und dadurch eine höhere Dichte, bleibt jedoch pump- und fließfähig (Gunson et al. 2010).

Abbildung 4-9 stellt ein Prozessschema einer mineralischen Aufbereitung eines Kupferbergwerks am Beispiel von Gunson (2013) dar. In dem Modell von Gunson (2013) sind die Fluidströme in der

mineralischen Aufbereitung mit Brech-, Mahl- und Flotationsstufen aufschlüsselt. An diesem lassen sich anhand der Massenströme drei für hydroelektrische Potenziale relevante Teilsysteme ableiten (vgl. Abbildung 4-9), die mit den in Kapitel 4.3 identifizierten Fluidströmen übereinstimmen. Diese Teilsysteme sind der Materialstrom vom Hydrozyklon zur Vor- oder Nachflotation (Fluidstrom 12), Mühle zum Hydrozyklon bzw. Hydrozyklon zur Mühle (Fluidstrom 11) und Flotation zum Eindicker (Fluidstrom 15). Im Folgenden werden die Teilsysteme 1 bis 3 detailliert beschrieben, um daran die Potenziale zu quantifizieren.

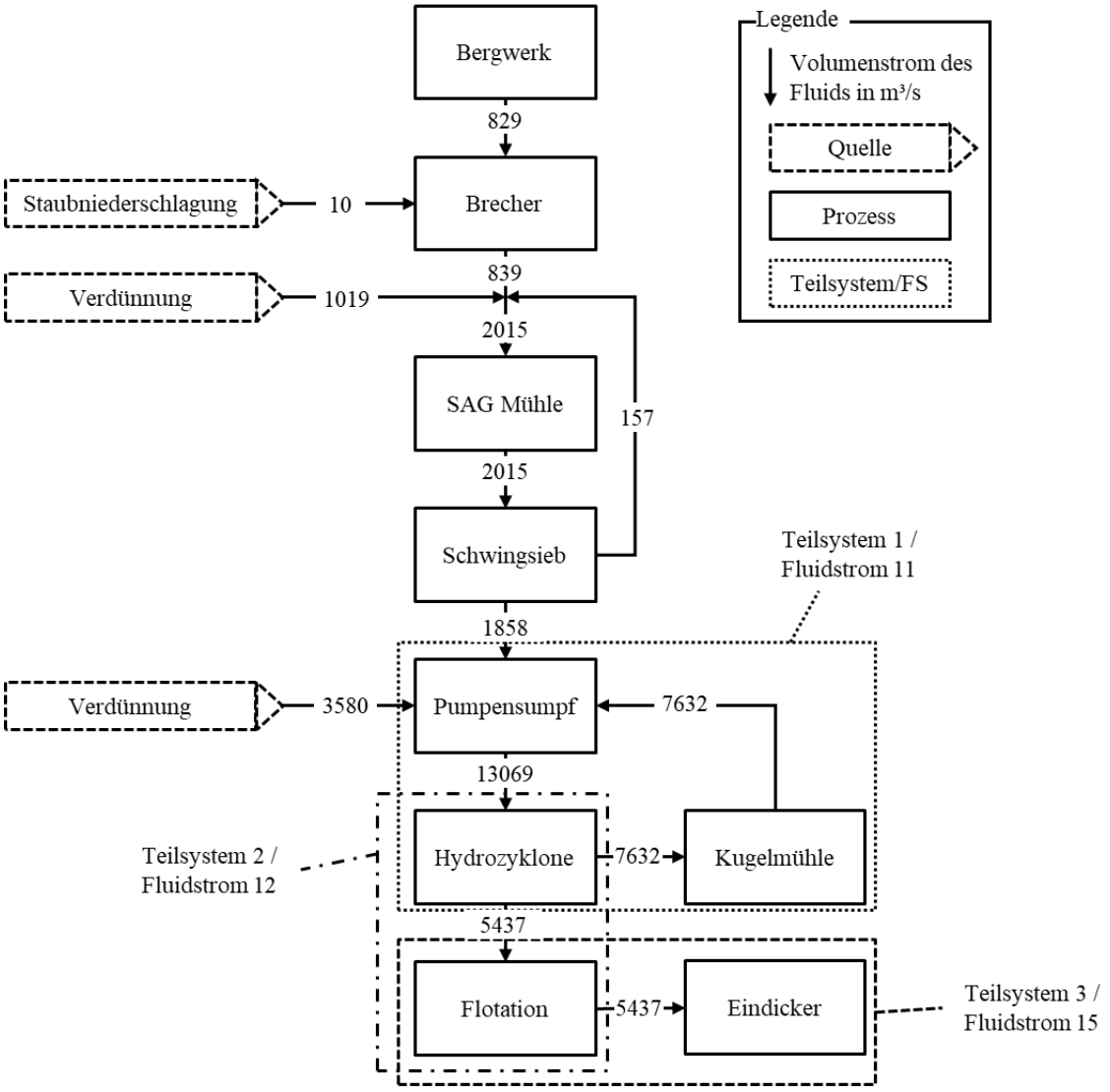



*Abbildung 4-9: Vereinfachtes Fließbild der Fluidströme vom Bergwerk bis zur Flotation, eigene Darstellung nach Gunson (2013)*

Teilsystem 1: Hydrozyklon zur Kugelmühle oder Kugelmühle zum Hydrozyklon

Das zerkleinerte Mahlgut wird aus einem Pumpensumpf als Suspension zu einem Hydrozyklon geleitet, um dort nach Korngröße klassiert zu werden. Ein Teil des Massenstroms wird im Hydrozyklon als Überkorn klassiert und zurück zur Mühle geführt, um es erneut zu zerkleinern. In dem Fallbeispiel ist ein Volumenstrom von ca. 2,21 m³/s zu erwarten, bei einer Fallhöhe die stark von der Anordnung der Anlagen zueinander abhängig ist (Gunson 2013). Da der größte Massenstrom in Fließrichtung der Prozesskette von der Zerkleinerung über die Klassierung zur Sortierung auftritt, werden auch die Anlagen so angeordnet sein, dass der Hauptteil des Fluids abwärts von Anlage zu Anlage fließen kann. Meistens wird dieses Teilsystem also ein hydroelektrisches Potenzial in Fließrichtung Hydrozyklon zu Kugelmühle enthalten. Abbildung 4-10 stellt das Teilsystem schematisch dar.

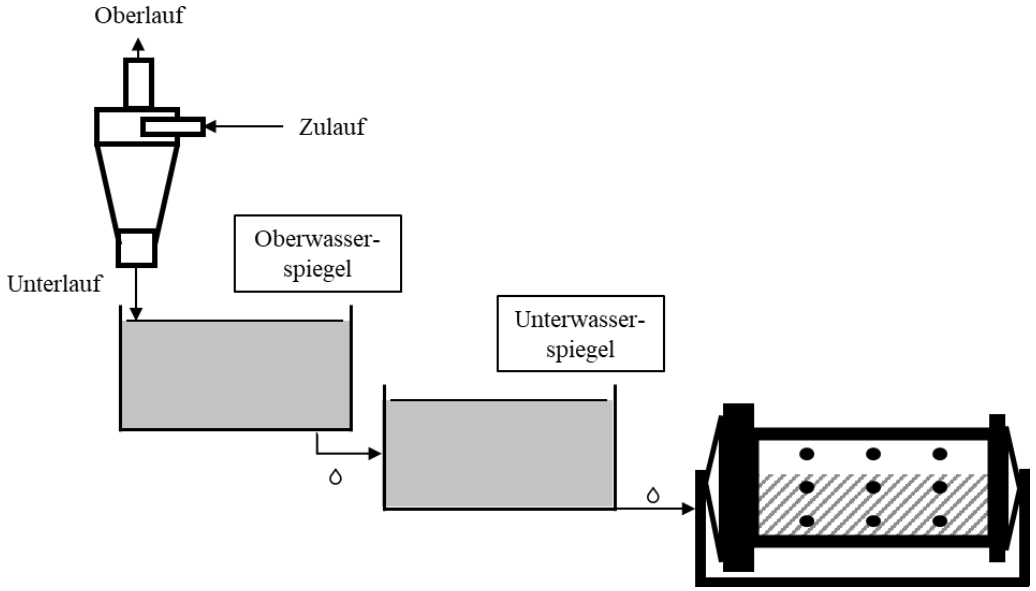



*Abbildung 4-10: Systematik der Fluidströme zwischen Hydrozyklon und Kugelmühle (Teilsystem 1), eigene Darstellung*

Teilsystem 2: Materialstrom vom Hydrozyklon zur Vor- oder Nachflotation

Die Fraktion der Erzsuspension mit der gewünschten Korngrößenverteilung wird vom Unterlauf des Hydrozyklon zu der Flotation transportiert. In der Regel entspricht dieser Fluidstrom im laufenden Betrieb der gesamten Erztonnage des Bergwerks. Die Bauhöhen von Hydrozyklonen und Flotationszellen liegen bei etwa 2-3 m bzw. 6-8 m, je nach Anordnung der Anlagen zueinander kann daher von einer Fallhöhe von 0-10 m ausgegangen werden (Metso Corporation 2018). Im Beispiel des 50.000 t/d Kupferbergwerks würde der Volumenstrom in etwa 1,5 m³/s entsprechen bei einem Feststoffanteil von 31 wt% (Gunson 2013). Abbildung 4-11 stellt das Teilsystem schematisch dar.

Unter idealen Bedingungen mit Frischwasser und nach Formel (2-6) würde sich mit einer Fallhöhe von 2 m (Oberlauf Hydrozyklon) bei dem gegebenen Volumenstrom eine Leistung von 38 kW ergeben. Unter realen Bedingungen mit einer Suspension mit 31 wt% Feststoffanteil und Bauteilen in der Rohrleitung, welche die Verlusthöhe vergrößern, ist jedoch fraglich, ob abzüglich der Verluste ein nutzbares hydroelektrisches Potenzial bestehen bleibt.

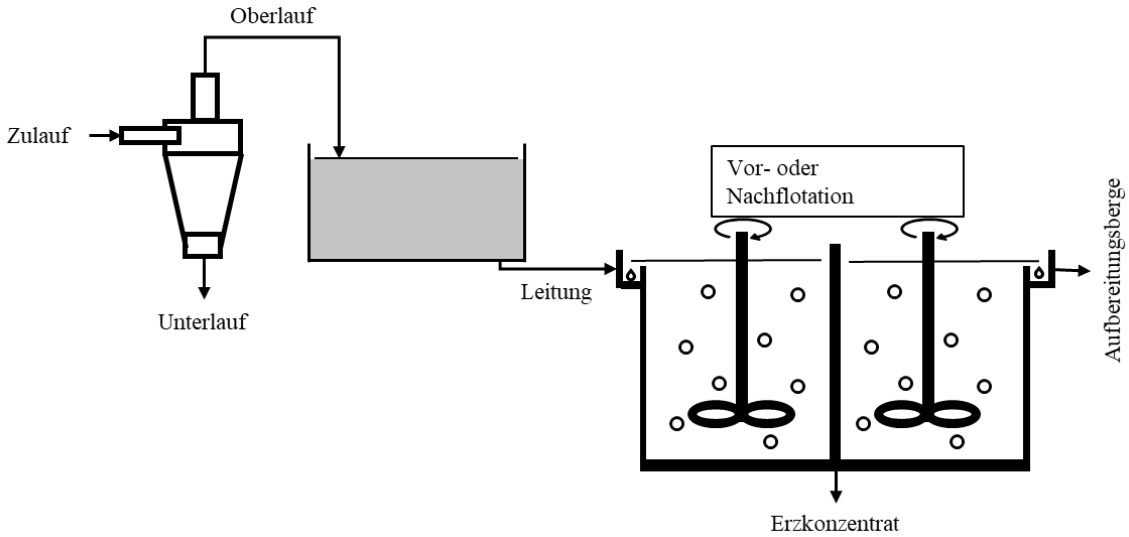



*Abbildung 4-11: Systematik der Fluidströme zwischen Hydrozyklon und Flotation (Teilsystem 2), eigene Darstellung*

Teilsystem 3: Fluidstrom der Abgänge von Vor- und Nachflotation

In diesem Teilsystem fließen die Abgänge der Flotation getrennt als Aufbereitungsberge und Konzentrat jeweils zu einem Eindicker. Im Verhältnis der beiden Volumenströme wird bei Lagerstätten mit geringen Erzgehalten der Volumenstrom der Aufbereitungsberge immer wesentlich größer sein. Im Beispiel des 50.000 t/d Kupferbergwerks sind die Aufbereitungsabgänge mit einem Volumenstrom von 1.5 m³/s signifikant größer. Grundsätzlich werden die Anlagen wieder so zueinander angeordnet sein, dass der Volumenstrom hydraulisch fließt, um die Pumpenenergie zu verringern. Die Entfernung der Anlagen kann dabei deutlich größer sein als zwischen den anderen Anlagen, da die Eindicker meistens nicht mehr in der Halle der Aufbereitungsanlage, sondern außerhalb platziert sind. So können aber möglicherweise Höhenunterschiede in der Topografie zusätzlich genutzt werden. Abbildung 4-12 stellt das Teilsystem schematisch dar.

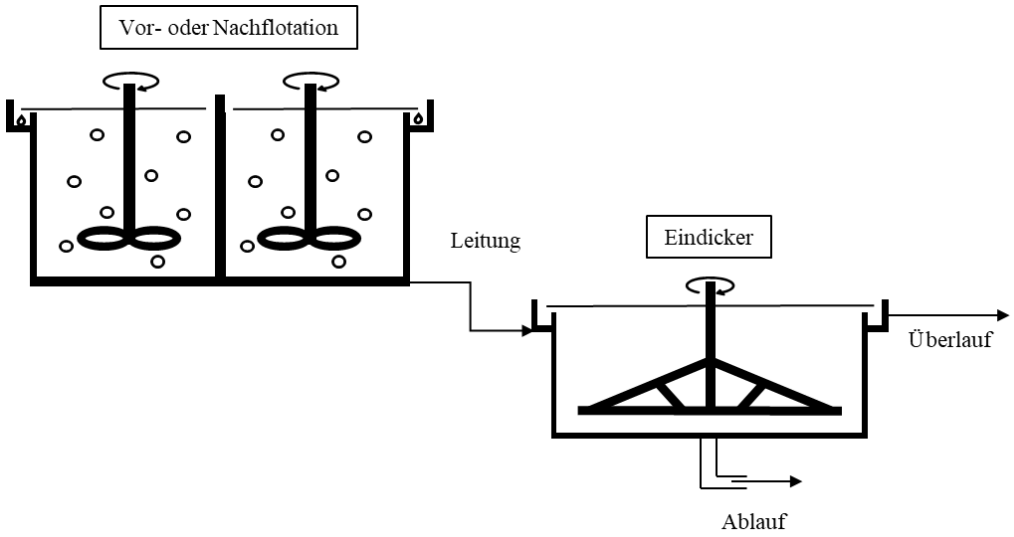



*Abbildung 4-12: Systematik des Fluidstroms zwischen Flotation und Eindicker (Teilsystem 3), eigene Darstellung*

Unter idealen Bedingungen würde das Fluid bei einem Volumenstrom von 1.5 m³/s und einer potenziellen Fallhöhe von 5 m eine Leistung von 91 kW erzeugen. In der Realität wird diese jedoch deutlich geringer ausfallen aufgrund der großen Reibungsverluste.

**Potenzialbedingende Umstände**

Die Wasserkraftpotenziale in der mineralischen Aufbereitung im Bergbau entstehen durch den Materialtransport über die Höhenunterschiede zwischen den verschiedenen Anlagen. Wenn die Suspension aufgrund eines solchen Höhenunterschieds von selbst fließt oder fällt, kann ein signifikantes energetisches Potenzial vorhanden sein. Indikatoren für das Vorhandensein dieser Potenziale sind unter anderem Drosselventile, die zur Regulierung des Drucks eingesetzt werden, sowie Reduzierstufen, die zur Verringerung der kinetischen Energie dienen. Selbst fließende Ströme ohne zusätzliche Pumpen weisen darauf hin, dass überschüssige Energie vorhanden ist, die zur Energiegewinnung genutzt werden könnte. Die Potenziale können bei gleichem Volumenstrom in der Theorie aufgrund der höheren Dichte deutlich größer als bei Frischwasser sein, in der Praxis werden jedoch auch größere Verluste bei der Umwandlung der Energie auftreten.

**Technische Umsetzung des Potenzials**

Die konventionelle Nutzung von Fluiden mit hohem Feststoffanteil in der mineralischen Aufbereitung im Bergbau ist bisher nicht bekannt. Allerdings könnten Feststoffturbinen oder Ölsandturbinen auf eine mögliche Nutzbarkeit dieser Fluide hinweisen (Prenner 2015; Odegard 2009). Die technische Umsetzung und Machbarkeit einer solchen Nutzung ist daher bisher unklar. Grundsätzlich sind die Fluide aber

Pump- und Fließfähig, die Schlammpumpen könnten analog zu anderen Pumpenturbinen in der Lage sein aus den fließenden Schlämmen Energie zu erzeugen (Concha A. 2014).

Ein wesentliches Hindernis für die Nutzung der Wasserkraftpotenziale stellt die möglicherweise hohe Abrasivität des Fluids dar, welche zu einem erhöhten Verschleiß der verwendeten Turbinen führen könnte. Ein kontinuierlicher Betrieb der Systeme ist eine Grundvoraussetzung für den Einsatz im laufenden Betrieb der Aufbereitungsanlage. Für etwaige Wartungsarbeiten und Störungen, welche eine Stilllegung der Anlage erforderlich machen, wäre daher die Installation eines Bypass-Systems unabdingbar. Diese Potenzialkategorie impliziert im Vergleich zu den anderen Kategorien die größte technische Unsicherheit bezüglich der Machbarkeit. Es ist fraglich, ob die großen Volumenströme mit erhöhter Dichte ausreichen, um die Nachteile der schlechteren Fließeigenschaften und des Verschleißes auszugleichen.

**SWOT-Bewertung**

Die Potenzialkategorie *Materialtransport in der mineralischen Aufbereitung* weist verschiedene Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken auf. In der SWOT-Analyse werden qualitative Begriffe wie groß, gering oder hoch verwendet. Diese stellen keine normierten oder quantitativ definierten Kategorien dar, sondern dienen der qualitativen, ordinalen Einordnung und dem relativen Vergleich der untersuchten Szenarien. Eine explizite quantitative Definition erfolgt bewusst nicht, da die Randbedingungen im Bergbau stark standortabhängig sind und eine allgemeingültige Normierung nicht zielführend wäre. Abbildung 4-13 stellt die Ergebnisse der SWOT-Analyse als Übersicht dar.

| **Stärken** | **Schwächen** |
|---|---|
| • Große Volumenströme<br>• Kontinuierliche Fluidströme<br>• In industrieller Anlage direkt bei großen Energieverbrauchern<br>• Fallhöhen können bis zu 10 m bei geringen horizontalen Entfernungen erreichen | • Unbekannte technische Machbarkeit bei der Nutzung von Suspensionen<br>• Unterschiedlichste Fluideigenschaften<br>• Hoher Verschleiß wahrscheinlich<br>• Keine Erfahrungswerte<br>• Hoher initialer Forschungsbedarf |
| **Chancen** | **Risiken** |
| • Dichte könnte Potenzial erhöhen<br>• Nutzen von kinetischer Energie<br>• Ersetzen von Anlagen zum Abführen kinetischer Energie<br>• Reduzierung des Energieverbrauchs der Anlage | • Ausfallzeiten der Aufbereitungsanlage bei technischen Störungen<br>• Hohe Wartungs- und Betriebskosten<br>• Hohe Kosten für Forschung und Entwicklung mit unklaren Erfolgschancen |

*Abbildung 4-13: SWOT-Analyse für Potenzialkategorie „Materialtransport in der mineralischen Aufbereitung“, eigene Darstellung*

Zu den **Stärken** gehören die sehr großen Volumenströme, da das gesamte abgebaute Erz im Bergwerk den Volumenstrom in der Aufbereitungsanlage bestimmt. Die Fluidströme sind zudem kontinuierlich und befinden sich direkt in der Nähe großer elektrischer Verbraucher, wie Mühlen und Brechern. In großen Anlagen können die Fallhöhen außerdem bis zu 10 Meter erreichen, was das hydroelektrische Potenzial weiter steigert.

Die **Schwächen** dieser Potenzialkategorie liegen in der unbekannten technischen Machbarkeit. Es ist derzeit unklar, ob und mit welchem Wirkungsgrad diese Potenziale genutzt werden können. Die Fluideigenschaften sind zudem sehr unterschiedlich und variieren auch zwischen den verschiedenen Anlagen. Aufgrund des hohen Feststoffanteils im Fluid ist außerdem mit einem erheblichen Verschleiß in den Turbinen zu rechnen. Da es bisher weder in der Forschung noch in der Industrie Erfahrungswerte gibt, die hydroelektrische Nutzung solcher Fluide zu realisieren, besteht ein hoher Entwicklungsaufwand und Forschungsbedarf.

Zu den **Chancen** gehört, dass die höhere Dichte des Fluids das hydroelektrische Potenzial steigern könnte. Zudem könnte es möglich sein, kinetische Energie im Fluid zu nutzen und so Anlagen zu ersetzen, die diese Energie derzeit ungenutzt abführen. Eine erfolgreiche Lösung könnte den Energieverbrauch der mineralischen Aufbereitung erheblich senken und weltweit einen großen Einfluss auf die Effizienz in der Bergbauindustrie haben.

Die **Risiken** umfassen technische Störungen und mögliche Ausfallzeiten, die zu hohen Wartungs- und Betriebskosten führen könnten. Zudem ist ungewiss, ob die Technologie funktionieren kann, was zusätzlichen Forschungsaufwand erfordert, ohne garantierten Erfolg.

### *4.4.4. Anlagenspezifische Potenziale*

*Die anlagenspezifischen Potenziale* entstehen direkt an den Anlagen, welche typischerweise im Bergbau installiert und genutzt werden. Unter einer Anlage wird eine prozesstechnische Einheit verstanden, also beispielsweise ein Eindicker, eine Flotationsbank oder ein Tank. Es handelt sich um Potenziale, die aufgrund der Auslegung direkt an oder in der Anlage auftreten. Nicht in diese Potenzialkategorie fallen Potenziale in Leitungen zwischen zwei Anlagen (vgl. *Betriebliches Wassernetzwerk*) oder Potenziale durch den hydraulischen Materialtransport (vgl. *Materialtransport in der mineralischen Aufbereitung*). Der Potenzialkategorie können die in Tabelle 4-9 aufgelisteten Fluidströme zugeordnet werden.

*Tabelle 4-9: Fluidströme in der Potenzialkategorie „Anlagenspezifische Potenziale“, eigene Darstellung*

| Fluidstrom | Startpunkt | Endpunkt |
|---|---|---|
| F10 | Wasseraufbereitung | Frischwasserspeicher |
| F11 | Brech-/Mahlkreislauf | Brech-/Mahlkreislauf |
| F12 | Brech-/Mahlkreislauf | Flotation |
| F13 | Flotation | Brech-/Mahlkreislauf |
| F16 | Entwässerung | Prozesswasserspeicher und Wasseraufbereitung |

**Verursachender Prozess/Anlage**

Die hydroelektrischen Potenziale an Anlagen im Bergbau sind unterschiedlich und hängen von den jeweiligen Prozessen ab. Tendenziell finden sich solche Potenziale eher bei Anlagen mit hohem Fluiddurchsatz. Beispiele hierfür sind der Eindicker am Ende der mineralischen Aufbereitung und Wasseraufbereitungsanlagen. Ein wesentliches Merkmal dieser Potenziale ist, dass die Fallhöhe direkt an der bzw. durch die Anlage auftritt. Entweder fließt das Fluid von einem höheren Punkt durch einen Überlauf ab und das Potenzial kann in einer außerhalb liegenden Druckrohrleitung auftreten, oder die Höhe des Oberwassers erzeugt ein Potenzial durch einen Auslauf im unteren Teil der Anlage. Damit das Fluid genutzt werden kann, sollte es eine gute Fließfähigkeit aufweisen, wie dies bei Frischwasser oder Prozesswasser der Fall ist.

**Potenzialbedingende Umstände**

Das anlagenspezifische Wasserkraftpotenzial im Bergbau wird maßgeblich durch die Konstruktion der jeweiligen Anlage bestimmt. Entscheidend ist, dass die Anlage ein Fluid in ausreichender Menge und

Höhe bzw. Druck abgibt, um dieses energetisch nutzen zu können. Die Volumenströme sind dabei meist proportional zum Durchsatz der mineralischen Aufbereitungsanlage bzw. des Prozesses oder der Anlage. In der Praxis betragen die Fallhöhen meist nicht mehr als 10 m, was in etwa der maximalen Anlagenhöhe entspricht (Metso Corporation 2018). Indikatoren für das Vorhandensein eines Potenzials zur Energie-gewinnung sind ein kontinuierlicher Fluidstrom, der an einer erhöhten Stelle der Anlage austritt, oder ein Fluidstrom, der ohne den Einsatz einer Pumpe fließt.

Die energetischen Potenziale in diesen Szenarien sind verhältnismäßig klein und liegen im Bereich kleiner Wasserkraftanlagen. Trotz ihrer geringen Größe könnten diese Potenziale durch geeignete technische Maßnahmen, wie zum Beispiel die Installation von Pumpenturbinen, genutzt werden, um zusätzliche Energie zu gewinnen und die Effizienz der Anlage zu erhöhen.

**Technische Umsetzung des Potenzials**

Die anlagenspezifischen Wasserkraftpotenziale ähneln den kommerziellen, aber nicht konventionellen Lösungen, wie sie beispielsweise von der Firma Easy Hydro angeboten werden. Aufgrund der kleinen Potenziale sind kostengünstige Lösungen, wie der Einsatz von Pumpenturbinen, besonders geeignet.

Easy Hydro hat in Italien an dem Überlauf eines Eindickers eine Pumpenturbine installiert. Mit einer Fallhöhe von 8-10 m und einem Volumenstrom von 0,14-0,19 m³/s wird eine Leistung von 11 kW erzeugt (Easy Hydro 2023a). Die Umsetzung eines solchen Systems ist zwar nicht konventionell, aber ohne größeren Entwicklungsaufwand darstellbar. Da kaum Feststoffanteil in dem Fluid vorhanden ist, sind keine großen Verluste zu erwarten.

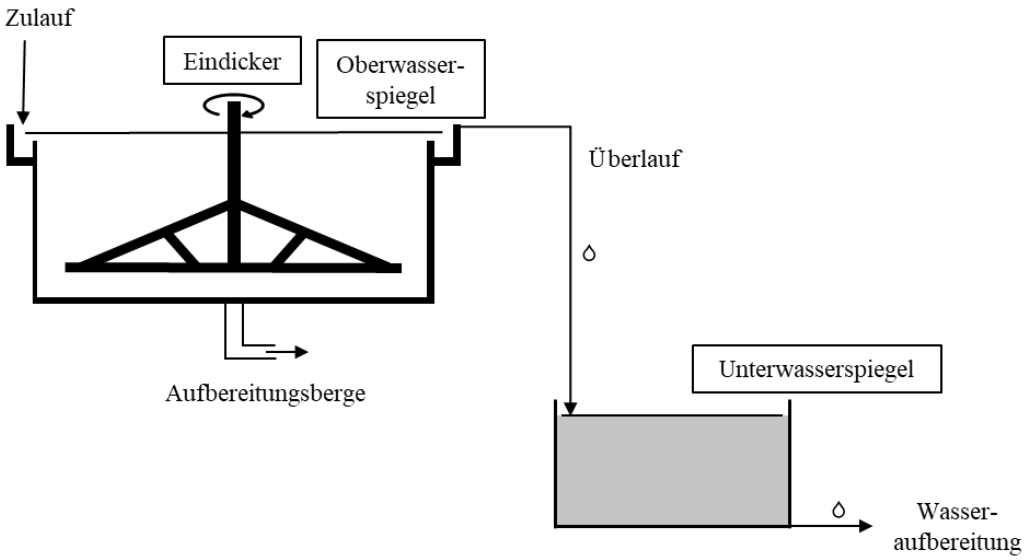



*Abbildung 4-14: Systematische Darstellung des Fluidstroms vom Eindicker zur Wasseraufbereitung oder Prozesswasserspeicher, eigene Darstellung*

Abbildung 4-11 skizziert den Fluidstrom an einem Eindicker. Wenn das Modell eines 50.000 t/d Kupferbergwerks von Gunson (2013) herangezogen wird, kann ein Volumenstrom von 0,93 m³/s auftreten mit einer Fallhöhe am Eindicker von etwa 6 m. Dies würde ein hydroelektrisches Potenzial von 55,23 kW ergeben.

Diese Ansätze sind unkonventionell und erfordern vermutlich eine individuelle Auslegung, um den spezifischen Anforderungen und Bedingungen der jeweiligen Prozessanlage gerecht zu werden. Trotz der geringen Potenziale können solche maßgeschneiderten Lösungen dennoch einen wertvollen Beitrag zur Energieeffizienz und Nachhaltigkeit im Bergbau leisten.

**SWOT-Bewertung**

Die Potenzialkategorie *Anlagenspezifische Potenziale* weist verschiedene Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken auf. In der SWOT-Analyse werden qualitative Begriffe wie simpel, klein oder gering verwendet. Diese stellen keine normierten oder quantitativ definierten Kategorien dar, sondern dienen der qualitativen, ordinalen Einordnung und dem relativen Vergleich der untersuchten Szenarien. Eine explizite quantitative Definition erfolgt bewusst nicht, da die Randbedingungen im Bergbau stark standortabhängig sind und eine allgemeingültige Normierung nicht zielführend wäre. Abbildung 4-15 stellt die Ergebnisse der SWOT-Analyse zusammengefasst dar.

Zu den **Stärken** zählt, dass vereinzelte Anwendungen dieser Art technisch erprobt sind und bereits wirtschaftlich betrieben werden. Die Installation einer Pumpenturbine an geeigneten Stellen ist unkompliziert, da sie weitgehend auf Standardkomponenten basiert, was die Kosten erheblich reduziert. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten zur Nutzung kleinerer Potenziale, da diese nur von den spezifischen Anlagen und nicht von externen Faktoren wie der Topografie abhängig sind.

| **Stärken** | **Schwächen** |
|---|---|
| • Technisch erprobt und machbar<br>• Simple Installation<br>• Kostengünstig<br>• Vielzahl an Möglichkeiten<br>• Abhängig von technischer Anlage, nicht von externen Faktoren | • Kleinere Volumenströme<br>• Geringe Fallhöhen<br>• Kleines Potenzial im kW-Bereich |
| **Chancen** | **Risiken** |
| • Skalierbarkeit<br>• Übertragbarkeit | • Wartungs- und Betriebskosten<br>• Wirtschaftliche Machbarkeit |

*Abbildung 4-15: SWOT-Analyse der Potenzialkategorie „Anlagenspezifische Potenziale“, eigene Darstellung*

Die **Schwächen** dieser Potenzialkategorie liegen in den begrenzten Volumenströmen und Fallhöhen, die genutzt werden können. Bislang konnte nur ein geringes hydroelektrisches Potenzial von etwa 11 kW in einer realen Anwendung erschlossen werden (Easy Hydro 2023a).

Die **Chancen** dieser Potenzialkategorie sind vielversprechend, da die Systeme skalierbar und übertragbar sind. Solche Lösungen könnten in vielen Bergwerken implementiert werden, was die Anwendbarkeit stark erhöht. Darüber hinaus könnte eine Installation direkt durch die Anlagenhersteller erfolgen, was den Implementierungsprozess erleichtern würde.

Die **Risiken** liegen vor allem in erhöhten Wartungs- und Betriebskosten durch die zusätzlichen technischen Komponenten, welche die Wirtschaftlichkeit des Betriebs gefährden können. Stehen diese Kosten in keinem angemessenen Verhältnis zu den Erträgen, wird der Betrieb solcher Anlagen unwirtschaftlich.

### *4.4.5. Hydraulischer Materialtransport in Rohrleitung*

Die Potenzialkategorie *Hydraulischer Materialtransport in Rohrleitungen* umfasst den hydraulischen Transport von Feststoffen über größere Entfernungen. Diese Art des Transports kann für verschiedene Materialien im Bergbau angewendet werden, die häufigsten sind dabei der Transport von Aufbereitungsbergen, Versatzmaterial oder auch seltener der Transport von Erzkonzentrat. In der Analyse der Fluidströme in Bergwerken lässt sich der Fluidstrom 17 identifizieren (vgl. Tabelle 4-10).

*Tabelle 4-10: Fluidstrom in der Potenzialkategorie „Hydraulischer Materialtransport in Rohrleitungen“, eigene Darstellung*

| Fluidstrom | Startpunkt | Endpunkt |
|---|---|---|
| F17 | Entwässerung | TSF, Sonstige Anlagen |

Fluidstrom 17 beschreibt zusammengefasst die Szenarien für den hydraulischen Transport von Aufbereitungsbergen und Erzkonzentraten, da diese sich stark ähneln. Der Transport von Versatzmaterial in ein untertägiges Bergwerk weist ähnliche Fluideigenschaften und Anlagen auf, der Leitungsverlauf als Fallleitung unterscheidet sich jedoch deutlich.

**Verursachender Prozess/Anlage**

Als Produkt der mineralischen Aufbereitung treten für gewöhnlich zwei Stoffströme auf: Das Erzkonzentrat und die Aufbereitungsberge. Beide Stoffströme treten typischerweise in Form einer feinkörnigen Sediment-Wasser-Suspension auf, wobei die physikalischen Eigenschaften je nach abgebautem Erz und den spezifischen Verarbeitungsstufen variieren. Die Aufbereitungsberge werden im letzten Prozessschritt in der Aufbereitungsanlage in einem Eindicker entwässert und so der Feststoffanteil gezielt erhöht. Da die vollständige Trocknung der Aufbereitungsberge meist wirtschaftlich nicht gerechtfertigt ist, werden diese als Suspension über Rohrleitungen entweder durch Schwerkraft oder mit Unterstützung von Pumpen in Bergeteiche eingeleitet und dort gelagert. Die Länge solcher Rohrleitungen hängt von der Lage des Bergeteichs ab und kann daher von ca. 100 m bis zu 40-50 km variieren (Thomas und Cowper 2017).

Bergeteiche werden aus verschiedenen Gründen häufig tiefer angelegt als das Bergwerk und die Aufbereitungsanlage. Ein wichtiger Aspekt ist die Sicherheit: Im Falle eines Unfalls oder Dammbruchs soll verhindert werden, dass die fließfähigen Sedimente die umliegende Infrastruktur beschädigen. Zudem wird durch die tiefergelegene Position die Schwerkraft für den Transport des Fluids genutzt. Dies erleichtert den Fluss der Materialien und reduziert den Energieaufwand für den Transport innerhalb des Bergwerks, oder erzeugt überschüssige Energie (Vick 1990; Mudd 2008). Da Aufbereitungsberge den größten Volumenstrom darstellen und in verflüssigter Form vorliegen, kann der hydraulische Transport ein erhebliches hydroelektrisches Potenzial beinhalten. Alleine in Peru wurden im Rahmen des Smart$H_2O$Energy Projekts über 20 Transportleitungen für Aufbereitungsberge identifiziert, die eine signifikante Höhendifferenz und Gefälle aufweisen (Feldmann 2023).

Der zweite Massenstrom, der aus der mineralischen Aufbereitung entsteht, ist das angereicherte Erzkonzentrat. Das Erzkonzentrat hat einen geringeren Volumenstrom und ist das verkaufsfähige Produkt des jeweiligen Bergwerks. In der Regel wird das Konzentrat entwässert und getrocknet und als Schüttgut mit wenig Restfeuchte im Bergwerk verladen. In selteneren Fällen wird Erzkonzentrat hydraulisch über Rohrleitungen vom Bergwerk zum Abnehmer oder der Verladestelle transportiert. Diese Rohrleitungen können als kontinuierliche Transportsysteme verstanden werden und erstrecken sich oft über mehrere Kilometer, wobei sie Höhendifferenzen von mehreren hundert bis über 1.000 m überbrücken. Beispiele für solche aktiven Rohrleitungen gibt es in Peru (Antamina) und Papua-Neuguinea (Deng et al. 2019). Auch in Chile gibt es drei Beispiele für den Transport von Erzkonzentrat via Rohrleitung auf einer Länge von bis zu 150 km und einer Höhendifferenz von 2.000 m (Brantes A. und Olivares 2008, S. 20). In den Rohrleitungen sind Drosselstationen installiert, um den Druck zu regulieren. Diese weisen auf überschüssigen Druck hin, welcher möglicherweise hydroelektrisch nutzbar ist.

Der Transport von Versatzmaterial in untertägige Bergwerke erfolgt häufig hydraulisch, wobei es sich meistens um paströsen Versatz handelt. Für den Transport wird die große Fallhöhe des fließ- bzw. pumpfähigen Versatzes bei gleichzeitig geringer horizontaler Ausdehnung genutzt. Als Fluid wird eine Mischung aus Bergeanteil und Zement verwendet. Das Versatzgemisch wird so aufbereitet, dass es fließ-

bzw. pumpfähig ist. Im Vergleich zu Aufbereitungsbergen weist pastöser Versatz häufig schlechtere Fließeigenschaften auf (Eriksson und Nystrom 2018).

**Potenzialbedingende Umstände**

Die potenzialbedingenden Umstände in diesem Szenario umfassen mehrere wesentliche Faktoren, so ist ein signifikanter Höhenunterschied zwischen der Aufbereitungsanlage und dem Zielort (Bergeteich bzw. Verladepunkt des Erzkonzentrat) eine notwendige Voraussetzung für das Vorhandensein von hydroelektrischem Potenzial. Außerdem müssen große Volumenströme vorhanden sein, wie es vor allem bei den Aufbereitungsbergen der Fall ist. Nach Concha A. (2014, S. 374) ist ein gravimetrischer hydraulischer Materialtransport ab einem Gefälle von 1,5 m je 100 m möglich.

Obwohl die Fließfähigkeit von Aufbereitungsbergen aufgrund des hohen Feststoffanteils oft schlechter als die von Wasser ist, handelt es sich um fließfähiges und pumpbares Material. Die Pump- und Fließfähigkeit sind bei der Auslegung der Anlagen jedoch nicht die primären Kriterien; vielmehr wird darauf geachtet, möglichst wenig Wasser zu verwenden. Ein Potenzial zur Energiegewinnung besteht, wenn das Fluid ohne den Einsatz externer Energie fließt und dabei überschüssige Energie enthalten ist.

**Technische Umsetzung des Potenzials**

Bisher sind keine kommerziellen Anwendungen zur energetischen Nutzung von Aufbereitungsbergen oder Erzkonzentrat im Bergbau bekannt. Ein Patent aus Kanada von Odegard (2009) zur Energiegewinnung aus Ölsanden weist zwar auf die grundsätzliche Machbarkeit hin, ein erfolgreicher Nachweis unter realen Betriebsbedingungen steht jedoch aus.

Für eine wirtschaftlich und technisch sinnvolle Nutzung dieser Feststoffsuspensionen ist eine verschleißfeste Technologie erforderlich, die große Volumenströme mit abrasiven Partikeln effizient verarbeiten kann. Der Einsatz von Pumpenturbinen in anderen Industriezweigen legt nahe, dass diese auch für den Betrieb mit bergbaulichen Schlämmen geeignet sein könnten. Da solche Turbinen zum Pumpen dieser Medien verwendet werden, erscheint auch ihr Einsatz im generatorischen Betrieb möglich. Aufgrund der schlechteren Fließeigenschaften im Vergleich zu Wasser ist mit erhöhten Verlusten zu rechnen, welche durch die höhere Dichte der Suspensionen teilweise kompensiert werden könnten. Alternative Turbinentypen, wie z. B. Crossflow-Turbinen, können auch in Betracht kommen.

**SWOT-Bewertung**

Die Potenzialkategorie *Hydraulischer Materialtransport in Rohrleitungen* bietet eine Reihe von Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken, welche in Abbildung 4-16 zusammengefasst sind. In der SWOT-Analyse werden qualitative Begriffe wie groß, komplex oder hoch verwendet. Diese stellen keine normierten oder quantitativ definierten Kategorien dar, sondern dienen der qualitativen, ordinalen Einordnung und dem relativen Vergleich der untersuchten Szenarien. Eine explizite quantitative Definition erfolgt bewusst nicht, da die Randbedingungen im Bergbau stark standortabhängig sind und eine allgemeingültige Normierung nicht zielführend wäre.

Zu den **Stärken** dieser Potenzialkategorie zählt, dass bei der Förderung von Aufbereitungsbergen zum Bergeteich sehr große Volumenströme auftreten, die zudem kontinuierlich fließen. Die möglichen Fallhöhen sind beträchtlich und reichen von mehreren hundert Metern bis zu tausende Meter, etwa bis zum Bergeteich oder sogar bis zum Hafen oder Verladepunkt.

Eine wesentliche **Schwäche** dieser Potenzialkategorie liegt in der bislang unbekannten technischen Machbarkeit, was einen großen anfänglichen Entwicklungsaufwand erforderlich macht. Zudem beeinträchtigen die Feststoffanteile im Fluid die Fließeigenschaften, was die nutzbare Nettofallhöhe verringern kann. Das System insgesamt ist hydraulisch komplex und könnte technische Herausforderungen mit sich bringen.

| Stärken | Schwächen |
|---|---|
| • Sehr große Volumenströme<br>• Kontinuierliche Volumenströme<br>• Große Fallhöhen zwischen Aufbereitungsanlage und Bergeteich/Hafen | • Technische Machbarkeit unbekannt<br>• Fließeigenschaften der Schlämme erhöhen Verluste<br>• Komplexe hydraulische Eigenschaften<br>• Entwicklungsaufwand notwendig |
| **Chancen** | **Risiken** |
| • Ersetzen von Drosselventilen<br>• Großes Energiepotenzial durch große Volumenströme und Fallhöhen<br>• Skalier- und Übertragbarkeit bei technischer Machbarkeit | • Hohe Wartungs- und Betriebskosten<br>• Verschleiß<br>• Wartungsaufwand<br>• Betriebsstörungen |

*Abbildung 4-16: SWOT-Analyse der Potenzialkategorie „Hydraulischer Materialtransport in Rohrleitungen“*

Auf der **Chancenseite** steht das enorme Energiepotenzial, das durch die Kombination aus großen Volumenströmen und Fallhöhen entsteht. Sollte die technische Machbarkeit erreicht werden, wäre eine weltweit skalierbare Nutzung möglich. Zudem könnte überschüssige Energie, die derzeit durch Drosselklappen abgeleitet wird, effizienter genutzt werden.

Die **Risiken** umfassen hohe Wartungs- und Betriebskosten, insbesondere durch den erhöhten Verschleiß, der durch die Feststoffanteile im Fluid entsteht. Zusätzlich könnten Betriebsstörungen durch die Einführung einer zusätzlichen Turbine auftreten, was den Betrieb des Systems beeinträchtigen könnte.

### *4.4.6. Betriebliche Wasserquellen*

Die Potenzialkategorie der *betrieblichen Wasserquellen* umfasst die hydroelektrischen Potenziale, welche aufgrund von betrieblichen Wasserquellen auftreten. An verschiedenen Punkten in einem Bergwerk können Wasserquellen vorkommen, vor allem sind hier das Grundwasser in Form von Grubenwasser und gesammelter Niederschlag, z. B. auf großen versiegelten Flächen wie einer Laugungshalde, zu nennen. Die Fluidströme 4 und 19 lassen sich der Potenzialkategorie zuordnen (vgl. Tabelle 4-11).

*Tabelle 4-11: Fluidströme der Potenzialkategorie „Betriebliche Wasserquellen“, eigene Darstellung*

| Fluidstrom | Startpunkt | Endpunkt |
|---|---|---|
| F4 | Bergwerk | Prozesswasserspeicher |
| F19 | Laugungsanlage | Frisch-Prozesswasserspeicher, Wasseraufbereitung |

Da Bergwerke sehr individuell ausgelegt sind, können durchaus auch andere oder weitere betriebsinterne Wasserquellen auftreten. Sickerwasser oder Ähnliches, zum Beispiel aus dem Bergeteich, ist nicht als betriebsinterne Wasserquelle anzusehen, da das Wasser bereits vorher im Wassersystem des Bergwerks war. Im Folgenden wird das Potenzialszenario beispielhaft an den Quellen Grubenwasser und Laugungshalde beschrieben.

**Verursachender Prozess/Anlage**

Die Grundidee dieser Potenzialkategorie ist es, ein Fluid, welches an einer Stelle mit potenzieller Energie auftritt, energetisch zu nutzen, während es seinem Bestimmungsort zugeführt wird. Im Folgenden wird anhand von zwei konkreten Beispielen, Niederschlag auf einer Laugungshalde und Grubenwasser, die Potenzialkategorie erläutert.

Laugungshalde

Wenn Niederschlag auf eine Laugungshalde fällt, kann dieser gesammelt und gezielt abgeleitet werden und über eine Rohrleitung einem tiefer gelegenen Wasserspeicher zugeführt werden. Auf diese Weise könnte das abgeleitete Wasser mit einer in der Rohrleitung installierten Turbine energetisch genutzt werden. Der Ursprung des Wassers ist Niederschlag, welcher durch die Laugungshalde gesammelt und einem Sammelpunkt zugeführt wird. Vom Sammelpunkt aus kann das Niederschlagswasser einem Verbraucher oder einem Wasserspeicher zugeführt werden. Ein hydroelektrisches Potenzial tritt bei einem entsprechendem Leitungsverlauf auf. Am Beispiel der peruanischen Bergwerke konnte so eine Turbinenleistung zwischen 15 kW und 70 kW ermittelt werden, die je nach jährlichem Niederschlag 129.000-487.256 kWh Energie erzeugen könnte. Dafür wurden im Smart$H_2O$Energy Projekt von 153 ausgewerteten Bergwerken 20 identifiziert, die Halden zum Laugen verwenden (Feldmann 2023).

Grubenwasser

Für den Fall von Fluidstrom 4 kann das Grubenwasser unter bestimmten Umständen energetisch genutzt werden. Dies ist möglich, wenn das Grubenwasser entweder an einen tiefergelegenen Punkt abgeleitet werden kann, wie es bei einem auf einem Berg gelegenen Bergwerk der Fall wäre, oder wenn in einem Abschnitt der Leitung ein energetisches Potenzial genutzt werden kann. Der Zutritt des Grubenwassers hängt von der Hydrogeologie ab und besteht entweder aus Grundwasser aus Aquiferen (Hartgestein) oder Grundwasserleitern (Lockergestein). Der Zutritt des Grubenwassers muss kontrolliert werden, und bei einem Übermaß an Grubenwasser muss dieses über die Wasserhaltung kontrolliert abgeleitet oder gehoben werden. Die Wasserhaltung kann auf verschiedene Weisen durchgeführt erfolgen, beispielsweise durch Sümpfen oder Entwässerungsstollen. Entscheidend für das energetische Potenzial ist der Leitungsverlauf und generellen Bedingungen der Rohrleitung (Darling 2011).

**Potenzialbedingende Umstände**

Laugungshalde

Damit der Niederschlag auf einer Laugungshalde gesammelt werden kann, muss diese konstruktionsbedingt abgedeckt sein. Die Quantität des nutzbaren Wassers hängt von der abgedeckten Fläche der Laugungshalden sowie anderen versiegelten Flächen und dem auftretenden Niederschlag ab. Dadurch entstehen ungleichmäßige Volumenströme, die entweder durch Speicher homogenisiert werden müssen, oder sich nur temporär nutzen lassen. Die Fallhöhe des Wassers ist abhängig von der Lage der Halde und dem Verbraucher bzw. dem Ziel der Rohrleitung. Im Gelände kann die Fallhöhe unter passenden Umständen groß sein, und mehrere zehn bis hunderte Meter betragen. Indikatoren für ein hohes energetisches Potenzial können ein regenreiches Klima, erhebliche Höhenunterschiede im Gelände sowie eine größere Infrastruktur zum Sammeln und Ableiten der Niederschlagswässer sein.

Grubenwasser

Die Quantität des auftretenden Grubenwassers ist sehr individuell und kann von wenigen Litern pro Minute bis hin zu einigen Kubikmetern pro Minute reichen. Eine natürliche Fallhöhe ist normalerweise nicht vorhanden, da das Grubenwasser in der Regel gehoben werden muss. Unter besonderen Umständen kann jedoch unter Tage oder im Bergwerk eine Fallhöhe vorhanden sein. Alternativ kann der Leitungsverlauf eine Fallhöhe ermöglichen, wie beispielsweise durch einen Entwässerungsstollen oder einen Abschnitt der Leitung außerhalb des Bergwerks. Das energetische Potenzial des Grubenwassers hängt somit vom Leitungsverlauf ab. Nur wenn in der Leitung ein Druck durch eine Fallhöhe entsteht, kann ein energetisches Potenzial genutzt werden. Ein Indikator dafür ist das Ableiten des Grubenwassers ohne den Einsatz von Pumpen oder zusätzlicher Energie.

**Technische Umsetzung des Potenzials**

Zur Nutzung beider Potenziale sollte der Einsatz von Rohr- oder Pumpenturbinen technisch möglich sein. Somit kann die bestehende Infrastruktur genutzt werden und es können konventionelle, günstige Turbinen verbaut werden. Die Turbinen müssen an geeigneten Stellen installiert werden, um das Potenzial nutzen zu können. Bei richtiger Installation wird die Turbine voraussichtlich keinen nennenswerten Einfluss auf den laufenden Betrieb haben, da sie den Fluss des Wassers nicht signifikant behindert und keine zusätzlichen Belastungen für die bestehende Infrastruktur erzeugt.

**SWOT-Bewertung**

Die Potenzialkategorie *Betriebliche Wasserquellen* bietet verschiedene Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken. In der SWOT-Analyse werden qualitative Begriffe wie groß verwendet. Diese stellen keine normierten oder quantitativ definierten Kategorien dar, sondern dienen der qualitativen, ordinalen Einordnung und dem relativen Vergleich der untersuchten Szenarien. Eine explizite quantitative Definition erfolgt bewusst nicht, da die Randbedingungen im Bergbau stark standortabhängig sind und eine allgemeingültige Normierung nicht zielführend wäre. Eine Zusammenfassung der Analyse zeigt Abbildung 4-17.

Zu den **Stärken** zählt, dass die technische Umsetzung von hydroelektrischen Potenzialen mit Pumpenturbinen unkompliziert und technisch erprobt ist. Die Anwendungen sind vergleichbar mit bekannten Lösungen in Wassernetzwerken. Zudem können bei geeigneten Bedingungen, wie z. B. starken Regenfällen, große Volumenströme auftreten. Im Gegensatz zu anderen Ansätzen handelt es sich hier um tatsächliche Energieerzeugung und nicht nur um Energierückgewinnung, da das Wasser erst direkt auf dem Betriebsgelände anfällt.

| **Stärken** | **Schwächen** |
|---|---|
| • Umsetzung mit Pumpenturbinen<br>• Vergleichbar mit Anwendungen in Wassernetzwerken<br>• Große Volumenströme möglich, z. B. bei Regenfällen | • Potenzial abhängig von betrieblichen Gegebenheiten<br>• Fallhöhe abhängig von Topografie<br>• Volumenstrom abhängig von Geologie oder Niederschlag<br>• Schwankungen im Volumenstrom (saisonal oder ereignisbasiert) |
| **Chancen** | **Risiken** |
| • Großes Potenzial im Einzelfall | • Wartungsaufwand |

*Abbildung 4-17: SWOT-Analyse der Potenzialkategorie „Betriebliche Wasserquellen“, eigene Darstellung*

**Schwächen** dieser Potenzialkategorie bestehen darin, dass die betrieblichen Gegebenheiten die Nutzung einschränken können. Beispielsweise muss die Anordnung der Anlagen zueinander passen, und der Volumenstrom muss entweder durch die lokale Geologie oder durch ausreichende Niederschläge gegeben sein. Der Volumenstrom wird zudem unregelmäßiger sein als bei anderen Lösungen, da er ereignisbasiert oder saisonal auftreten kann. Die **Chancen** liegen darin, dass im Einzelfall sehr große Energiepotenziale vorhanden sein könnten, insbesondere wenn natürliche Wasserquellen auf dem Betriebsgelände genutzt werden können. Die **Risiken** umfassen den erhöhten Wartungsaufwand durch die zusätzliche Technik, die zur Nutzung der Wasserkraftpotenziale installiert wird.

### *4.4.7. Fallleitungen*

Die Potenzialkategorie *Fallleitungen* umfasst die Potenziale, welche durch Fallleitungen entstehen. Hier sind vor allem die Fluidströme 5 und 22 relevant (vgl. Tabelle 4-12). Beide Fluidströme sind außergewöhnlich und kommen in dieser Form üblicherweise nicht in anderen Industrien vor.

*Tabelle 4-12: Fluidströme der Potenzialkategorie „Fallleitungen", eigene Darstellung*

| Fluidstrom | Startpunkt | Endpunkt |
|---|---|---|
| F5 | Frisch-/Prozesswasserspeicher | Bergwerk |
| F22 | Chemikalien | Bergwerk |

Beide Potenziale sind in der technischen Umsetzung ähnlich, unterscheiden sich aber in dem Fluid und den dadurch bedingten Arten der Umsetzung. Im Folgenden wird dazu unter *Fallleitung Wasser* und *Fallleitung Chemikalie* unterschieden, um die beiden Potenziale getrennt betrachten zu können.

**Verursachender Prozess/Anlage**

Fallleitung Wasser

Fluidstrom 5 beschreibt die Versorgung von Prozessen, welche im Bergwerk stattfinden, mit Prozess- oder Frischwasser. Die Betrachtungsgrenzen für dieses Szenario liegen bei der Quelle des Wassers, also dem Prozess- oder Frischwasserspeicher, und beim Verbraucher unter Tage bzw. im Bergwerk. Das Wasser wird in untertägigen Bergwerken über eine Fallleitung in einem Schacht nach unter Tage geleitet oder über Rohrleitungen in einer Rampe oder Wendel. Im übertägigen Bergbau wird das Wasser über eine steile Rohrleitung auf die jeweilige Sohle oder eine Verteilerstation geleitet.

Fallleitung Chemikalie

Der Fluidstrom 22 einer Fallleitung für Chemikalien kann unter bestimmten Umständen in Bergwerken auftreten. Der Fluidstrom wäre nur relevant und interessant, wenn größere Mengen Chemikalien wie Treibstoffe per Fallleitung oder Rohrleitung in das Bergwerk transportiert werden. Die Chemikalie müsste gut fließfähig sein und dürfte keine Gefahr darstellen, oder sie müsste unter großem Druck irgendwo entspannt werden, wobei eine Turbine zur Energiegewinnung eingesetzt werden könnte. Der Fluidstrom versorgt einen betriebsbedingten Prozess mit der benötigten Chemikalie. Die Umsetzung erfolgt in der Regel in einer geeigneten Leitung, um die Sicherheit und Effizienz des Transports zu gewährleisten.

**Potenzialbedingende Umstände**

Fallleitung Wasser

Die potenzialbedingenden Umstände für eine Fallleitung von Wasser hängen von verschiedenen Faktoren ab. Die Quantität des Wassers ist abhängig von der Größe des Bergwerks, dem Gewinnungsprozess und der benötigten Staubunterdrückung. Üblicherweise handelt es sich um mehrere Liter pro Sekunde, jedoch im Normalfall deutlich unter 1 m³ pro Minute (Gunson 2013). Die Fallhöhe kann in sehr tiefen Bergwerken mehrere hundert Meter bis zu einem Kilometer betragen, mindestens jedoch 20-30 m. Ein Indikator für ein solches Potenzial ist eine Frischwasserfallleitung mit kontinuierlichem Durchfluss und möglicherweise installierten Drosselstationen zur Druckregulierung.

Fallleitung Chemikalien

Die potenzialbedingenden Umstände für eine Fallleitung von Chemikalien sind maßgeblich vom verbrauchenden Prozess abhängig. Bei Treibstoffen richtet sich die benötigte Menge z. B. nach der Größe der Flotte. Ähnlich wie bei einer Frischwasserfallleitung können auch hier größere Mengen durch die Fallhöhe energetisch genutzt werden. Die Fallhöhe kann dabei mehrere hundert Meter bis hin zu einem Kilometer betragen, mindestens jedoch 20-30 m. Weitere Parameter wie die Notwendigkeit einer

kontinuierlichen Zufuhr und die mögliche Installation von Drosselstationen zur Druckregulierung sind vergleichbar mit denen einer Frischwasserfallleitung.

**Technische Umsetzung des Potenzials**

Fallleitung Wasser

Die technische Nutzung des energetischen Potenzials von Wasserfallleitungen erfolgt bereits konventionell, vor allem im südafrikanischen Bergbau (vgl. Kapitel 3.3.1). Ein weiteres Beispiel ist Tara Mine von Boliden in Irland, wo das Unternehmen Easy Hydro ähnliche Systeme implementiert hat. Diese Umsetzung lässt sich effektiv mit einer Pumpenturbine realisieren. Solche Turbinen sind konventionell verfügbar und werden bereits von verschiedenen Firmen angeboten. Die Installation einer Rohrturbine hat kaum negative Einwirkungen auf den laufenden Betrieb; im Gegenteil, sie kann sogar positive Effekte haben, da andere wartungsintensive Bauteile wie Drosselventile nicht mehr notwendig sind. Die Anwendung von Easy Hydro in Irland erzeugt bei einer Fallhöhe von 210 m und einem Volumenstrom von 15-22 l/s eine Leistung von 30 kW (Easy Hydro 2021).

Fallleitung Chemikalie

Die technische Umsetzung einer Fallleitung für Chemikalien ist bislang in der kommerziellen Praxis nicht bekannt. Dennoch sollte dieses Szenario ähnlich wie bei Wasser nutzbar sein, sofern eine geeignete Turbine das Fluid verarbeiten kann und keine Gefahr entsteht. Bei der Umsetzung ist besondere Vorsicht geboten, da Chemikalien brennbar, explosiv oder korrosiv sein können. Daher müssen entsprechende Sicherheitsvorkehrungen getroffen und Materialien verwendet werden, die den chemischen Eigenschaften der transportierten Stoffe standhalten.

**SWOT-Bewertung**

Die Potenzialkategorie *Fallleitungen* bietet eine Reihe von Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken. In der SWOT-Analyse werden qualitative Begriffe wie groß, klein, gut oder hoch verwendet. Diese stellen keine normierten oder quantitativ definierten Kategorien dar, sondern dienen der qualitativen, ordinalen Einordnung und dem relativen Vergleich der untersuchten Szenarien. Eine explizite quantitative Definition erfolgt bewusst nicht, da die Randbedingungen im Bergbau stark standortabhängig sind und eine allgemeingültige Normierung nicht zielführend wäre. Abbildung 4-18 zeigt eine Übersicht der Ergebnisse der SWOT-Analyse.

| **Stärken** | **Schwächen** |
|---|---|
| • Sehr große Fallhöhe<br>• Vertikaler Leitungsverlauf möglich<br>• Erprobte Technologie | • Kleinere Volumenströme |
| **Chancen** | **Risiken** |
| • Große Energie-/ Einsparpotenziale bei Betrachtung des Wasserkreislaufs<br>• Gute Übertragbarkeit<br>• Ersetzen von Drosselventilen | • Höherer Wartungsaufwand<br>• Betriebs- und Wartungskosten |

*Abbildung 4-18: SWOT-Analyse der Potenzialkategorie „Fallleitungen", eigene Darstellung*

Zu den **Stärken** zählt die Möglichkeit, sehr große Fallhöhen mit nahezu vertikalem Verlauf zu nutzen. Die technische Umsetzung ist durch den Einsatz von Pumpenturbinen oder Peltonturbinen erprobt und

daher machbar. Diese Technologien sind für solche Anwendungen bereits etabliert und können zuverlässig eingesetzt werden.

Zu den **Schwächen** gehört, dass die Volumenströme in der Regel klein sind. Zudem muss das genutzte Wasser in einigen Anwendungen, wie beispielsweise der Kühlwasserversorgung in südafrikanischen Bergwerken, nach dem Gebrauch wieder nach über Tage gepumpt werden. In diesen Fällen handelt es sich daher lediglich um Energierückgewinnung und nicht um tatsächliche Energieerzeugung.

Die **Chancen** dieser Kategorie liegen in der Möglichkeit, weltweit übertragbare Energiepotenziale zu erschließen, insbesondere in Bergwerken mit ähnlichen Fallleitungen. Eine gute Übertragbarkeit der Technologie bietet somit großes Potenzial. Zudem können durch den Einsatz von Turbinen Drosselventile oder ähnliche Anlagen, die bislang überschüssige Energie abführen, ersetzt werden.

Die **Risiken** umfassen den Wartungsaufwand, der durch die Installation der Turbinen entsteht. Dies kann zu steigenden Wartungs- und Betriebskosten führen und den wirtschaftlichen Nutzen reduzieren.

## 4.5. Schlussfolgerungen

Die Analyse der bergbaulichen Prozesse und Komponenten zeigt, dass sich Fluidströme identifizieren lassen, die ein hydroelektrisches Potenzial aufweisen. Damit beantwortet das vorangegangene Kapitel 4 die erste Forschungsfrage dieser Arbeit:

**„Welche hydroelektrischen Potenziale treten im Hartgesteinsbergbau auf und wie können diese systematisch identifiziert und bewertet werden?“**

Die hydroelektrischen Potenziale lassen sich systematisch anhand von Potenzialkriterien ableiten und unterscheiden sich vor allem hinsichtlich der Volumenströme, Fallhöhen und der Fluidcharakteristika. Die Potenziale basieren auf technischen Prozessen innerhalb eines Bergwerks, die einen spezifischen und typischen Fluidstrom verursachen. Durch die paarweise Überprüfung der Fluidströme zwischen den verschiedenen Komponenten eines Bergwerks können die typischen Fluidströme identifiziert werden. Indem die Fluidströme quantifiziert und charakterisiert werden, können anhand von definierten Potenzialkriterien die Fluidströme mit der Möglichkeit eines hydroelektrischen Potenzials ausgewählt werden. Anschließend lassen sich die Fluidströme anhand der spezifischen Charakteristika zusammenfassen und in sieben Potenzialkategorien unterteilen:

1. Abschnitt einer Rohrleitung
2. Betriebliches Wassernetzwerk
3. Materialtransport in der mineralischen Aufbereitung
4. Anlagenspezifische Potenziale
5. Hydraulischer Materialtransport in Rohrleitungen
6. Betriebliche Wasserquellen
7. Fallleitungen

Das hydroelektrische Potenzial in den betrachteten Kategorien hängt vor allem von der Größe des verursachenden Volumenstroms ab, der in etwa proportional zur Größe eines Bergwerks ist. Große Erzbergwerke mit hohem Wasserumsatz in der mineralischen Aufbereitung können aufgrund der großen Volumenströme ein signifikantes hydroelektrisches Potenzial aufweisen. Sowohl die Volumenströme als auch der Energieverbrauch eines Bergwerks korrelieren mit dessen Größe und Tonnage. Daher besteht auch eine Korrelation zwischen dem hydroelektrischen Potenzial und dem Energieverbrauch eines Bergwerks.

Neben dem Volumenstrom ist vor allem die Fallhöhe entscheidend für das hydroelektrische Potenzial. Da die Höhenunterschiede zwischen Anlagen und Punkten auf dem Bergwerksgelände im Gegensatz

zum Volumenstrom nicht direkt von der Bergwerksgröße abhängen, können vereinzelt außergewöhnlich hohe hydroelektrische Potenziale auftreten.

Die sieben Potenzialkategorien unterscheiden sich stark in der möglichen technischen Nutzung. Dies liegt vornehmlich an den unterschiedlichen zugrunde liegenden Prozessen sowie an den potenzialbedingenden Umständen. Die SWOT-Analysen der Potenzialkategorien zeigen, dass Potenziale in einem Abschnitt einer Rohrleitung oder im betrieblichen Wassernetzwerk mit erprobten Technologien genutzt werden können und ein geringes Risiko aufweisen. Für andere Potenzialkategorien hingegen, wie dem hydraulischen Materialtransport in der Aufbereitung oder in Rohrleitungen für den Transport von Aufbereitungsbergen, existieren bisher keine technischen Lösungen zur Nutzung der Potenziale. Dementsprechend haben diese Kategorien aufgrund der großen Volumenströme zwar große Chancen, aber auch ein hohes technologisches Risiko.

Kapitel 4 liefert insgesamt drei zentrale Erkenntnisse:

(i) Im Bergbau können hydroelektrische Potenziale auftreten, welche durch bergbauliche Prozesse, Anlagen oder Komponenten verursacht werden.
(ii) Die hydroelektrischen Potenziale können systematisch identifiziert werden und sind an typischen Stellen zu erwarten. Die Potenziale lassen sich daher in Potenzialkategorien zusammenfassen, welche spezifische Charakteristika aufweisen.
(iii) Für die Potenzialkategorien können Faktoren und Bedingungen bestimmt werden, die eine Nutzung der jeweiligen Potenziale ermöglichen.

Unklar bleibt hingegen die spezifische wirtschaftliche und technische Machbarkeit sowie die Rolle konkreter bergbaulicher Planungsparameter bei der Ermittlung und Nutzung dieser Potenziale. Zudem zeigt sich, dass die Potenzialkategorien nicht direkt mit den üblichen Planungskategorien im Bergbau übereinstimmen.

# 5. Einfluss bergbaulicher Planungsparameter auf das hydroelektrische Potenzial

## 5.1. Einleitung

Die Planung und der Betrieb von Bergwerken basieren auf einer Vielzahl von Parametern. Einige dieser Parameter sind frei wählbar, während andere durch externe Rahmenbedingungen vorgegeben sind. Die in Kapitel 4 identifizierten hydroelektrischen Potenziale sind maßgeblich von diesen Gegebenheiten abhängig. Eine gezielte Optimierung bestimmter Planungsparameter könnte das hydroelektrische Potenzial signifikant erhöhen.

Ziel dieses Kapitels ist es, jene bergbaulichen Planungsparameter systematisch zu identifizieren, die einen signifikanten Einfluss auf die hydroelektrischen Potenziale haben. Dabei wird detailliert analysiert, auf welche Weise und in welchem Umfang diese Parameter wirken. Abschließend wird untersucht, ob und in welchem Maße die Planungsparameter gezielt beeinflusst werden können, um die hydroelektrischen Potenziale zu erhöhen.

Durch die Verknüpfung der Planungsphasen mit den hydroelektrischen Potenzialen entsteht ein Rahmen, der nicht nur theoretische Möglichkeiten, sondern auch die praktische Umsetzbarkeit in einem realen Bergwerksbetrieb berücksichtigt. Dies eröffnet neue Perspektiven, wie Bergwerke neben der Rohstoffgewinnung zusätzlich Energie erzeugen können.

## 5.2. Methodik

Das methodische Vorgehen dient der Identifikation bergbaulicher Planungsparameter sowie der Untersuchung ihres Einflusses auf die hydroelektrischen Potenziale. Ziel der Methodik ist es, die zweite Forschungsfrage dieser Arbeit zu beantworten (vgl. Kapitel 1.4):

**„Welche bergbaulichen Planungsparameter beeinflussen das hydroelektrische Potenzial von Bergwerken und wie können diese beeinflusst werden, um das Potenzial zu optimieren?“**

Die Methodik umfasst drei Schritte (vgl. Abbildung 5-1) und basiert auf den Erkenntnissen aus den Grundlagen in Kapitel 2 und der Literaturrecherche in Kapitel 3. Dabei stehen insbesondere die in Kapitel 4.4 entwickelten Potenzialkategorien und die zugehörigen Betriebseinheiten im Fokus.

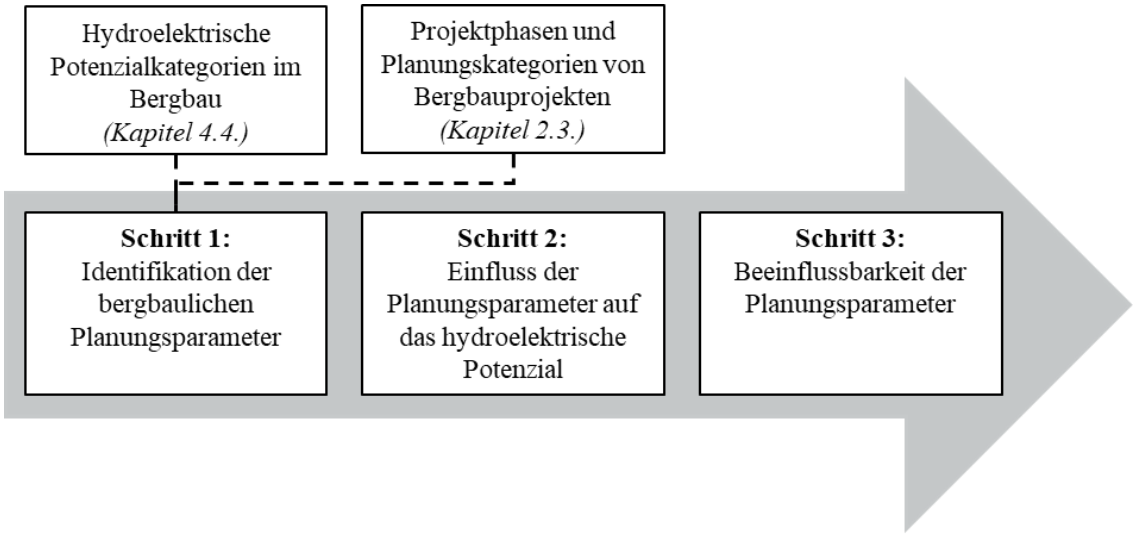



*Abbildung 5-1: Methodisches Vorgehen für die Identifikation der bergbaulichen Planungsparameter und Untersuchung des Einflusses auf das hydroelektrische Potenzial, eigene Darstellung*

Da die identifizierten Potenzialkategorien nicht strikt an den Komponenten und Prozessen einzelner Betriebseinheiten ausgerichtet sind, werden die Planungsparameter anhand konventioneller bergbaulicher Planungskategorien ermittelt und anschließend den Potenzialkategorien zugeordnet. Sobald für jede Planungskategorie die entsprechenden bergbaulichen Planungsparameter vorliegen, wird ihr Einfluss anhand der Parameter in der Formel 2-6 zur Berechnung des hydroelektrischen Potenzials analysiert.

Das methodische Vorgehen zur Identifikation von bergbaulichen Planungsparametern und zur Untersuchung ihres Einflusses auf das hydroelektrische Potenzial gliedert sich in drei Schritte:

(i) **Identifikation der bergbaulichen Planungsparameter**: Die relevanten Planungsparameter werden durch eine umfassende Recherche in einschlägigen Quellen identifiziert und den spezifischen Planungskategorien zugeordnet. In Kapitel 5.2.5 werden gezielte Abgrenzungen vorgenommen, um ausschließlich jene Komponenten, Teilsysteme und Projektphasen eines Bergwerks zu betrachten, die einen direkten Einfluss auf die Potenzialkategorien haben.

(ii) **Untersuchung des Einflusses auf das hydroelektrische Potenzial**: Im zweiten Schritt wird untersucht, inwiefern die identifizierten Planungsparameter die hydroelektrischen Potenziale beeinflussen. Dabei wird analysiert, ob sie die Eigenschaften des Volumenstroms hinsichtlich der Menge und Fließeigenschaften, die Fallhöhe oder die Effizienz der jeweiligen Potenzialkategorie verändern können. Zudem wird berücksichtigt, ob der Einfluss direkt oder indirekt ist.

(iii) **Beeinflussbarkeit der Planungsparameter:** Abschließend wird geprüft, ob und in welchem Umfang die jeweiligen Planungsparameter gezielt verändert werden können, um das hydroelektrische Potenzial zu optimieren. Dabei wird auch analysiert, welche Faktoren einer Optimierung entgegenstehen, um real anwendbare Empfehlungen geben zu können. Zusätzlich wird bewertet, ob einzelne Planungsparameter unter bestimmten Bedingungen die Nutzung hydroelektrischer Potenziale ausschließen können.

### *5.2.1. Identifikation der bergbaulichen Planungsparameter*

Im ersten Schritt werden die relevanten Planungsparameter durch eine umfassende Literaturrecherche in Fachliteratur aus Wissenschaft und Industrie identifiziert. Dazu werden Grundlagenwerke, wissenschaftliche Veröffentlichungen, Konferenzbeiträge sowie technische Kommentare herangezogen. Die Recherche erfolgt unter Berücksichtigung der Ein- und Abgrenzungen aus Kapitel 5.2.5 und orientiert sich an den für die Potenzialkategorien relevanten Komponenten eines Rohstoffgewinnungsbetriebs:

- Infrastruktur zur Frischwasserversorgung und Entsorgung
- Aufbereitungsanlage und Wassernetzwerk
- Bergeteich und zugehörige Infrastruktur

Diese Komponenten werden im Rahmen der Untersuchung detailliert analysiert, wobei der Schwerpunkt auf den konventionellen Planungs- und Gestaltungsansätzen im Bergbau liegt. Hierfür werden spezifische Planungskategorien definiert, die den Planungs- und Gestaltungsprozess der untersuchten Szenarien maßgeblich beeinflussen. Für jede dieser Kategorien wird anschließend der entsprechende konventionelle Planungs- und Gestaltungsansatz anhand der verfügbaren Literatur beschrieben. Dabei werden generische Planungs- und Gestaltungsparameter identifiziert und den jeweiligen Planungskategorien zugeordnet. Die Parameter werden für die in Tabelle 5-1 dargestellten Bergwerkskomponenten sowie deren Detailplanungskategorien erarbeitet.

In den Kapiteln zu den einzelnen Planungskategorien werden die zentral verwendeten Referenzen kurz vorgestellt und erläutert. Zudem werden alle relevanten Quellen für die jeweilige Planungs-kategorie

und deren Unterkategorien in einer Übersichtstabelle zusammengefasst. Die identifizierten Planungsparameter werden den entsprechenden Kategorien und Unterkategorien systematisch in einer Liste zugeordnet.

*Tabelle 5-1: Auflistung der betrachteten bergbaulichen Planungskategorien und der zugehörigen Detailplanungskategorien, eigene Darstellung*

| **Planungskategorie** | **Detailplanungskategorie** |
|---|---|
| Frischwasserversorgung und Abwasserentsorgung | Genehmigungen zur Wasserentnahme und -abgabe |
| | Verlauf der Rohrleitung |
| | Auslegung der Rohrleitung |
| Aufbereitungsanlage und betriebliches Wassernetzwerk | Standortauswahl |
| | Metallurgie |
| | Abbaumethode |
| | Auslegung der Aufbereitungsanlage |
| | Auslegung der Rohrleitungen in der Aufbereitungsanlage |
| Bergeteich und Rohrleitung für Aufbereitungsberge | Standortauswahl |
| | Auslegung des Bergeteichs |
| | Bearbeitung der Aufbereitungsberge |
| | Auslegung der Rohrleitung |

### *5.2.2. Untersuchung des Einflusses der Planungsparameter auf das hydroelektrische Potenzial*

Die identifizierten Planungsparameter der jeweiligen Planungskategorien werden hinsichtlich ihres Einflusses auf das hydroelektrische Potenzial analysiert. Dabei ist zu beachten, dass nicht alle Parameter gleichermaßen relevant sind und sich nicht alle Parameter monetär oder technisch quantifizieren lassen, was eine differenzierte Betrachtung erforderlich macht. In vielen Fällen fungieren die nicht-monetären Parameter als Screening-Kriterien, die den Planungs- und Auslegungsprozess eines Bergwerks, und damit das hydroelektrische Potenzial, maßgeblich beeinflussen können (Boom et al. 2015, S. 71).

Der Einfluss auf das hydroelektrische Potenzial kann in unterschiedlichen Dimensionen auftreten. Für ein hydroelektrisches Potenzial sind nach Kapitel 2.5.1 und Formel 2-6 vor allem der Volumenstrom und die Fallhöhe entscheidend. Soll das Potenzial genutzt werden, müssen zudem die auftretenden Verluste durch Reibung, installierte Apparaturen und Fluideigenschaften berücksichtigt werden. Daher werden die Planungsparameter hinsichtlich ihres Einflusses auf folgende Eigenschaften analysiert:

- Volumenstrom
- Fließeigenschaften des Fluids
- Fallhöhe und/oder horizontale Entfernung
- Verlusthöhen bzw. Verluste
- Technische Nutzbarkeit des Potenzials

Anhand dieser Eigenschaften wird untersucht, ob ein Planungsparameter einen direkten oder indirekten Einfluss auf das hydroelektrische Potenzial hat. Eine Änderung eines direkten Parameters führt unmittelbar zu einer Veränderung des Potenzials oder seiner Rahmenbedingungen. Indirekte Parameter hingegen beeinflussen das Potenzial lediglich über die konventionelle Bergwerksplanung und werden daher nicht weiter betrachtet.

### *5.2.3. Beeinflussbarkeit und Optimierung der Planungsparameter*

Die Planung eines Bergwerks umfasst eine Vielzahl ineinandergreifender Planungsschritte, die sowohl aufeinander aufbauen als auch teilweise iterativ bestimmt werden müssen (vgl. Kapitel 2.3). Dieser Prozess ist komplex, da oft widersprüchliche Ziele abgewogen und möglichst effizient miteinander in

Einklang gebracht werden müssen (Bullock 2018). Bisher werden hydroelektrische Potenziale nicht als eigenständiges Planungsziel berücksichtigt (vgl. Kapitel 3). Sollte es jedoch in die Bergwerksplanung integriert werden, ist zu untersuchen, wie dieses Potenzial optimiert werden kann und welche Faktoren einer Umsetzung entgegenstehen.

Aufbauend auf den identifizierten Planungsparametern, die das hydroelektrische Potenzial beeinflussen, wird analysiert, welche dieser Parameter hinsichtlich des hydroelektrischen Potenzials aktiv beeinflusst und optimiert werden können. Dabei wird für jede Eigenschaft des hydroelektrischen Potenzials geprüft, ob und wie eine Anpassung der relevanten Planungsparameter möglich ist. Die einzelnen Eigenschaften des Potenzials (vgl. Formel (2-2)) können wie folgt optimiert werden:

| | |
|---|---|
| **Volumenstrom:** | Eine Erhöhung des Volumenstroms erhöht das hydroelektrische Potenzial linear. |
| **Fluideigenschaften:** | Die Fluideigenschaften beeinflussen direkt die Fließeigenschaften. Optimierte Fließeigenschaften reduzieren Verluste und steigern somit das nutzbare Potenzial. |
| **Fallhöhe und horizontale Entfernung:** | Eine Erhöhung der Nettofallhöhe vergrößert linear das hydroelektrische Potenzial. Eine Verringerung der horizontalen Entfernung erhöht wiederum die Nettofallhöhe, indem durch eine kürzere Leitung geringere Reibungsverluste auftreten. |
| **Verluste:** | Durch eine Verringerung der im Fluid und Rohrleitung auftretenden Verluste, erhöht sich das nutzbare hydroelektrische Potenzial. |

Anschließend wird geprüft, ob eine planerische Beeinflussung der relevanten Parameter möglich ist. Falls dies der Fall ist, werden geeignete Anpassungsmaßnahmen beschrieben. Falls nicht, werden die limitierenden Faktoren erläutert (vgl. Abbildung 5-2).

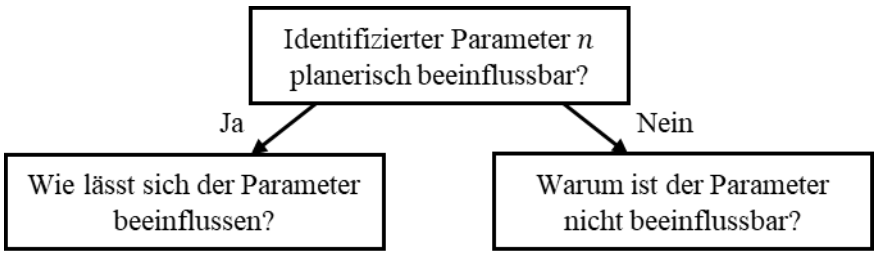



*Abbildung 5-2: Entscheidungsbaum zur Untersuchung der planerischen Beeinflussbarkeit, eigene Darstellung*

Die Nutzbarkeit als Eigenschaft nimmt einen besonderen Stellenwert ein. Die Untersuchung, ob ein bergbaulicher Planungsparameter die Nutzbarkeit von hydroelektrischen Potenzialen beeinflusst, dient dazu, Ausschlusskriterien zu identifizieren. Dabei wird geprüft, ob spezifische Parameter zwar einen direkten Einfluss auf das hydroelektrische Potenzial aufweisen, jedoch unter bestimmten Umständen ein Potenzial ausschließen. Dazu gehören Parameter, die sich auf alle Variablen der Leistungsformel auswirken oder die einen begrenzenden Einfluss auf die wichtigsten Variablen Fallhöhe und Volumenstrom haben, so dass kein hydroelektrisches Potenzial vorhanden ist.

### *5.2.4. Zuordnung der Potenzialkategorien zu den Planungskategorien*

In Kapitel 4.4 werden Potenzialkategorien basierend auf den im Bergbau auftretenden Fluidströmen definiert. Diese Kategorien sind jedoch nicht direkt einzelnen Komponenten eines Bergwerks zuzuordnen. Stattdessen enthalten sie mehrere Fluidströme, die in der Bergwerksplanung eine unterschiedliche

Bedeutung haben und in verschiedenen Bergwerkskomponenten vorkommen können. Das bedeutet, dass konventionelle Planungsparameter für einzelne Bergwerksbereiche (z. B. Tagebauauslegung, Aufbereitungsanlage, Bergeteich) nicht direkt mit den Potenzialkategorien übereinstimmen.

Um eine ganzheitliche Bewertung der konventionellen Bergwerksplanung für verschiedene Szenarien zu ermöglichen, wird bei der Auswahl der Planungsgegenstände darauf geachtet, dass gesamte Planungsdisziplinen (z. B. Aufbereitungsanlage) und nicht nur einzelne Prozesse (z. B. Flotation) berücksichtigt werden. Dadurch entsteht ein Planungsrahmen, der eine integrative Betrachtung der Szenarien ermöglicht. Es werden daher Planungsparameter aus den folgenden Planungskategorien verwendet:

- Infrastruktur für Frisch- und Abwasser
- Mineralische Aufbereitung inklusive Wassernetzwerk
- Management der Aufbereitungsberge

Die Potenzialkategorien aus Kapitel 4.4 lassen sich wie folgt den drei Planungskategorien zuordnen. Die Kategorie „Abschnitt einer Rohrleitung“ (vgl. Kapitel 4.4.1) wird von der Planung zur *Infrastruktur für Frisch- und Abwasser* abgedeckt. Die Potenzialkategorie „Betriebliches Wassernetzwerk“ (vgl. Kapitel 4.4.2) wird je nach Fluidstrom entweder von der *Infrastruktur für Frisch- und Abwasser* oder durch das *Wassernetzwerk in der mineralischen Aufbereitung* abgedeckt. Die Auslegung großer Teile des betrieblichen Wassernetzwerks ähnelt der Planung des Rohrleitungssystems in einzelnen Produktionsanlagen, welche in der Planungskategorie für das Wassernetzwerk in der mineralischen Aufbereitung analysiert wird. Die Potenzialkategorie „Materialtransport in der mineralischen Aufbereitung“ (vgl. Kapitel 4.4.3) wird in der Planungskategorie zur *mineralischen Aufbereitungsanlage* berücksichtigt, genauso wie etwaige „Anlagenspezifische Potenziale“ (vgl. Kapitel 4.4.4). Die Potenzialkategorie „Hydraulischer Materialtransport in Rohrleitungen“ (vgl. Kapitel 4.4.5) wird mit der Planungskategorie *Management der Aufbereitungsberge* abgedeckt. Die Potenzialkategorie „Betriebliche Wasserquellen“ wird nicht getrennt betrachtet, da diese lediglich von externen Faktoren abhängig ist. Die Umsetzung der Potenziale in den Planungskategorien ähnelt der zum Wassernetzwerk oder zur Frischwasserversorgung, da der Verlauf der Rohrleitung entscheidend ist. Die Potenzialkategorie „Fallleitungen und Sonstige“ wird nicht eigenständig betrachtet, da zum einen die Fluidströme sehr spezifisch sind und zum anderen bereits eine kommerzielle Umsetzung möglich ist. Der Verlauf der Fallleitungen und die Eigenschaften sind weitestgehend durch die betrieblichen Anforderungen bestimmt und daher nicht beeinflussbar. Eine Übersicht der oben beschriebenen Zuordnung ist in Tabelle 5-2 dargestellt.

*Tabelle 5-2: Zuordnung der Planungs- und Potenzialkategorien, eigene Darstellung*

| Potenzialkategorie | Zugeordnete Planungskategorie |
|---|---|
| 1. Abschnitt einer Rohrleitung | Infrastruktur für Frisch- und Abwasser |
| 2. Betriebliches Wassernetzwerk | Infrastruktur für Frisch- und Abwasser, oder Mineralische Aufbereitungsanlage inkl. Wassernetzwerk |
| 3. Materialtransport in der mineralischen Aufbereitung | Mineralische Aufbereitungsanlage inkl. Wassernetzwerk |
| 4. Anlagenspezifische Potenziale | Mineralische Aufbereitungsanlage inkl. Wassernetzwerk |
| 5. Hydraulischer Materialtransport in Rohrleitungen | Management der Aufbereitungsberge |
| 6. Betriebliche Wasserquellen | *-in diesem Kapitel nicht betrachtet-* |
| 7. Fallleitungen | *-in diesem Kapitel nicht betrachtet-* |

### *5.2.5. Annahmen und Abgrenzungen*

Die Untersuchung der bergbaulichen Planungsparameter in diesem Kapitel erfordert die Berücksichtigung bestimmter Annahmen und Abgrenzungen. Der Fokus liegt auf Fluidströmen und den damit verbundenen Wasserkraftpotenzialen. Daher werden die Planungsparameter ausschließlich im Hinblick auf

ihren Einfluss auf Prozesswasser und andere Wasserressourcen analysiert. Um die Untersuchung zielgerichtet durchzuführen, werden folgende Parameter von der Betrachtung **ausgeschlossen**:

- **Ökonomische Parameter**: Wirtschaftliche Aspekte wie Steuerstrategien, Marktbedingungen oder Finanzierungsentscheidungen werden nicht thematisiert, da der Fokus auf dem technischen Potenzial und den zugehörigen Planungsparametern liegt. Zwar sind das Investitionsklima und die Marktlage des jeweiligen Rohstoffs entscheidend für die generelle Planung eines Bergwerks, jedoch stehen sie nicht im direkten Zusammenhang mit den technischen Planungsparametern dieser Untersuchung.
- **Rechtliche Parameter**: Die Planung eines Bergwerks unterliegt zahlreichen gesetzlichen und regulatorischen Vorgaben, die sich regional stark unterscheiden. Dazu zählen beispielsweise Eigentumsfragen, die Genehmigung von Technologien oder die Einhaltung behördlicher Vorschriften. Diese rechtlichen Rahmenbedingungen sind für die Realisierung eines Bergbauprojekts von Bedeutung, hängen jedoch nicht direkt von technischen Parametern ab. In dieser Untersuchung werden sie daher nicht im Detail betrachtet, sondern unter dem Begriff „Genehmigungen“ zusammengefasst.
- **Kurzfristige Planung**: Die in Kapitel 4.4 definierten Potenzialkategorien basieren auf langfristigen Planungsprozessen und sind nicht unmittelbar von kurzfristigen Abbauentscheidungen abhängig, vielmehr sind die Potenziale von der initialen Planung des Bergwerks abhängig. Aus diesem Grund werden die Phasen nach der Machbarkeitsstudie (vgl. Abbildung 2-2) nicht berücksichtigt. In dieser Arbeit sollen daher nur die Planungs- und Auslegungsparameter aus den Phasen Vorstudie, vorläufige Machbarkeitsstudie und Machbarkeitsstudie betrachtet werden.

Um den Untersuchungsrahmen weiter einzugrenzen, werden zudem folgende **Annahmen** getroffen:

- **Bekannte Lagerstätte**: Es wird angenommen, dass die Lagerstätte und ihr Ort bekannt sind. Die betrachteten Planungsparameter beeinflussen weder die Wirtschaftlichkeit noch die Größe der Lagerstätte. Die Planung bezieht sich ausschließlich auf die Infrastruktur und die technische Gestaltung auf Basis dieser gegebenen Standortbedingungen.
- **Vorliegende Investitionsentscheidung**: Die grundsätzliche Investitionsentscheidung für das Bergbauprojekt ist bereits getroffen. Die Analyse konzentriert sich daher auf die technischen Planungsparameter der notwendigen Infrastruktur und untersucht nicht mehr die generelle Machbarkeit des Projekts.

## 5.3. Frischwasserversorgung und Abgabe von Brauchwasser

Die Planungskategorie *Frischwasserversorgung und Abgabe von Brauchwasser* umfasst bergbaulichen Komponenten, die der hydroelektrischen Potenzialkategorie „Abschnitt einer Rohrleitung“ zugeordnet werden können (vgl. Kapitel 4.4.1). Diese Potenziale entstehen entlang größerer und längerer Rohrleitungen durch natürliche Höhendifferenzen im Gelände. Solche Rohrleitungen finden sich beispielsweise in der Frischwasserversorgung eines Bergwerks oder bei der Ableitung von Brauchwasser aus dem Bergwerk. Von den in Kapitel 4 identifizierten Fluidströmen können die in Tabelle 5-3 aufgeführten Fluidströme der Planungskategorie zugeordnet werden:

*Tabelle 5-3: Liste der zugeordneten Fluidströme zur Planungskategorie „Frischwasserversorgung und Abgabe von Brauchwasser“, eigene Darstellung*

| Fluidstrom | Startpunkt | Endpunkt | Potenzialkategorie |
|---|---|---|---|
| F1 | Grundwasser | Dritte | Abschnitt einer Rohrleitung |
| F3 | Dritte | Frischwasserspeicher | Abschnitt einer Rohrleitung |
| F9 | Wasseraufbereitung | Dritte | Abschnitt einer Rohrleitung |

### *5.3.1. Identifikation der bergbaulichen Planungsparameter*

Die Planung von Wasserleitungen für die Frischwasserversorgung und Abgabe von Brauchwasser in Bergbauprojekten wird durch geografische Gegebenheiten, rechtliche Anforderungen und wasserwirtschaftliche Bedürfnisse bestimmt. Genehmigungen spielen eine zentrale Rolle, insbesondere bei der Auswahl von Entnahme- und Einleitstellen. Diese Vorgaben bestimmen den anschließenden Leitungsverlauf zur Verbindung der Wasserquellen mit dem Bergbaustandort.

Die Planung umfasst drei wesentliche Aspekte: die rechtlichen Auflagen, den Rohrleitungsverlauf und die technische Auslegung der Leitungen. Während Thomashausen et al. (2016; Thomashausen et al.) die rechtlichen Rahmenbedingungen und daraus hervorgehenden relevanten Planungsparameter darlegen, befassen sich Swamee und Sharma (2008, S. 6) sowie Stephenson (1989, S. 205) detailliert mit der Planung des Leitungsverlaufs und der Auslegung der Rohrleitung.

**Genehmigung zur Wasserentnahme**

Die Entnahme von Wasser im Bergbau erfordert in der Regel eine behördliche Lizenz, die die zulässigen Wassermengen regelt. Für den Antrag müssen Unternehmen umfassende Informationen bereitstellen, darunter Angaben zu Wasserressourcen, Umweltzertifikaten, Wasserbedarf und Landnutzungsrechten. Die Genehmigung gilt meist für die gesamte Betriebsdauer des Bergwerks, kann jedoch bei Bedarf angepasst werden. Eine frühzeitige Kommunikation mit lokalen Interessengruppen ist essenziell, um Konflikte zu vermeiden und das Genehmigungsverfahren zu beschleunigen (Thomashausen et al. 2018).

**Genehmigung zur Abwasserableitung**

Für die Abwasserableitung ist eine separate Genehmigung erforderlich, um Umweltverschmutzung zu verhindern. Diese Genehmigung legt den Einleitort fest und enthält strenge Überwachungs- und Berichtspflichten. Ihre Gültigkeit basiert auf einer Umweltverträglichkeitsprüfung und beträgt in der Regel zwei bis sechs Jahre. Eine Verlängerung muss rechtzeitig vor Ablauf beantragt werden (Bebbington und Williams 2008; Thomashausen et al. 2018).

**Leitungsverlauf für Wasserleitungen**

Nach Erhalt der Genehmigungen erfolgt die detaillierte Routenplanung anhand von Luftaufnahmen und topografischen Karten. Ziel ist es, die kostengünstigste und technisch sinnvollste Route zu bestimmen, die gleichzeitig rechtliche und umweltbezogene Anforderungen erfüllt. In bestimmten Abschnitten müssen Anpassungen vorgenommen werden, um Umweltbelastungen zu minimieren (Stephenson 1989, S. 205; Swamee und Sharma 2008, S. 6; Menon 2011, S. 62).

**Technische Auslegung der Wasserleitungen**

Die genaue Auslegung der Leitungen stellt sicher, dass die benötigte Wassermenge mit ausreichendem Druck zum Zielort gelangt. Wesentliche Einflussfaktoren sind die Eigenschaften des Fluids, der Durchmesser der Rohrleitung und die Materialauswahl. Ein Abwägen zwischen Wirtschaftlichkeit und technischer Machbarkeit ist entscheidend für eine langlebige und effiziente Lösung. Die Rohrmaterialien müssen robust, korrosionsbeständig und für die örtlichen Bedingungen geeignet sein (Swamee und Sharma 2008, S. 105; Stephenson 1989, S. 16; Menon 2011, S. 178)

Tabelle 5-4 gibt einen Überblick über die verwendeten Quellen zur Identifikation der Planungsparameter für die Frischwasserversorgung und Abgabe von Brauchwasser in Bergwerken. Die Quellen sind den jeweiligen Planungsaspekten zugeordnet.

Aus den Quellen lassen sich insgesamt 126 Planungsparameter ableiten, welche in Anhang 6 aufgelistet sind. Von diesen entfallen 59 auf den Verlauf der Rohrleitung, 26 auf die Auslegung der Rohrleitung, 29 auf die Genehmigung für die Abgabe von Wasser und 12 auf die Genehmigung zur Wasserentnahme.

*Tabelle 5-4: Übersicht der verwendeten Quellen zur Identifikation der Planungsparameter, eigene Darstellung*

| Kategorie | Quellen |
|---|---|
| Genehmigung Wasserversorgung | Thomashausen et al. (2016)<br>Thomashausen et al. (2018) |
| Genehmigung Wasserabgabe | Bebbington und Williams (2008)<br>Thomashausen et al. (2016) |
| Rohrleitungsverlauf | Stephenson (1989, S. 205)<br>Swamee und Sharma (2008, S. 6)<br>Menon (2011, S. 47, S. 62) |
| Rohrleitungsauslegung | Swamee und Sharma (2008, S. 104 f.)<br>Stephenson (1989, S. 16)<br>Menon (2011, S. 178)<br>Mays (2010, S. 16) |

### *5.3.2. Einfluss der Planungsparameter auf das hydroelektrische Potenzial der Potenzialszenarien*

Die Planungskategorie *Frischwasserversorgung und Abgabe von Brauchwasser* umfasst insbesondere die Potenzialkategorie „Abschnitt einer Rohrleitung“. Im Rahmen dieser Planungskategorie werden insgesamt 126 Planungsparameter für die Frischwasserversorgung und die Abgabe von Brauchwasser identifiziert. Davon haben 22 Parameter einen direkten Einfluss auf das mögliche hydroelektrische Potenzial in Abschnitten einer Rohrleitung.

Die Parameter aus den Unterkategorien zur Genehmigung der Wasserentnahme und -abgabe haben größtenteils keinen direkten Einfluss auf das hydroelektrische Potenzial. Lediglich zwei Parameter, nämlich die genehmigte Entnahmemenge und die benötigte Einleitungsmenge, beeinflussen den Volumenstrom.

Auch hinsichtlich der Parameter für den Verlauf der Rohrleitung haben nur sechs von 59 Parametern einen direkten Einfluss auf das hydroelektrische Potenzial. Besonders entscheidend sind jedoch die Topografie und die Höhenlage der Rohrleitung, da sie die Fallhöhe und damit die Nutzbarkeit des Potenzials bestimmen. Weitere relevante Parameter sind Genehmigungen für die Rohrleitung, ihre Länge, die horizontale Entfernung des Bergwerks sowie der Höhenunterschied im Vergleich zum Bergwerksstandort, da sie die Nettofallhöhe und die Rohrleitungslänge beeinflussen.

Die meisten relevanten Parameter finden sich in der Auslegung der Rohrleitung: 13 von 26 Parametern haben hier einen direkten Einfluss auf das hydroelektrische Potenzial. Die benötigte Kapazität und der Spitzenwertfaktor bestimmen den Volumenstrom. Strömungseigenschaften und Fluiddichte beeinflussen die Fluideigenschaften, während der Höhenverlauf der Rohrleitung die Fallhöhe bestimmt. Eine Vielzahl bauteil- und bauartbedingter Eigenschaften der Rohrleitung, wie die Rohrreibung, der am Ende der Rohrleitung erforderliche Druck, der Durchmesser, die Armaturen, die Rauigkeit, die Korrosionsbeständigkeit der Rohre sowie die Verbindungsstücke und Ventile, beeinflussen mögliche Verluste.

Betrachtet man den Einfluss auf die Dimensionen des hydroelektrischen Potenzials, wird die Nutzbarkeit maßgeblich durch den Spitzenwertfaktor, den maximal zulässigen Druck sowie die Genehmigung der Rohrleitung bestimmt. Ein weiterer wichtiger Parameter ist die vorherrschende Topografie, die Fallhöhen im Verlauf der Rohrleitung zwingend zulassen muss. Die Verluste in der Rohrleitung werden hauptsächlich von den Parametern zur Auslegung der Rohrleitung beeinflusst. Die mögliche Nettofallhöhe wird im Wesentlichen durch die Parameter zum Rohrleitungsverlauf beeinflusst. Der Volumenstrom hängt einerseits stark von der Genehmigung und andererseits von der erforderlichen Kapazität des Bergwerks ab.

Tabelle 5-5 listet die Planungsparameter, welche einen direkten Einfluss auf das hydroelektrische Potenzial in Abschnitten von Rohrleitungen zur Versorgung und Abgabe von Wasser in Bergwerken haben. Eine Markierung mit „x“ kennzeichnet einen direkten Einfluss des Planungsparameters auf die Dimension des hydroelektrischen Potenzials.

*Tabelle 5-5: Planungsparameter der Kategorie „Frischwasserversorgung und Wasserabgabe“ mit direktem Einfluss auf das hydroelektrische Potenzial, eigene Darstellung. x = direkter Einfluss des Planungsparameters auf die Dimension des hydroelektrischen Potenzials*

| Kategorie | Planungsparameter | Volumenstrom | Fluideigenschaften | Fallhöhe & Entfernung | Verluste | Nutzbarkeit |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Genehmigung Wasserentnahme | Menge des zugeteilten Wassers | x | | | | x |
| Genehmigung Wasserabgabe | Benötigte Einleitungsmenge | x | | | | x |
| Rohrleitungsverlauf | Topografie | | | x | | x |
| | Höhenlage | | | x | | |
| | Genehmigungen | | | | | x |
| | Länge der Rohrleitung | | | x | | |
| | Horizontale Entfernung zum Bergwerk | | | x | | |
| | Höhenänderung zum Bergwerk | | | x | | |
| Auslegung der Rohrleitung | Benötigte Kapazität | x | | | | |
| | Reibungswiderstand der Rohrleitung | | | | x | |
| | Höhenlage der Rohrleitung | | | x | | |
| | Maximal zulässige Druckhöhe | | | | | x |
| | Förderdruck am Endpunkt | | | | x | |
| | Größe und Durchmesser der Rohrleitung | | | | x | |
| | Rohrleitungsarmaturen | | | | x | |
| | Korrosionsbeständigkeit und Rohrrauigkeit | | | | x | |
| | Strömungseigenschaften | | x | | x | |
| | Dichte der Flüssigkeit | | x | | | |
| | Spitzenwertfaktor | x | | | | x |
| | Entlüftungsventile | | | | x | |
| | Verbindung von Rohrleitungen | | | | x | |

### *5.3.3. Beeinflussbarkeit der Planungsparameter zur Optimierung des hydroelektrischen Potenzials*

Die Planungskategorie *Frischwasserversorgung und Abgabe von Brauchwasser* ist weitgehend unabhängig von den direkten Prozessen des Bergwerks und der mineralischen Aufbereitung. Die festgelegten Planungsparameter dienen in erster Linie der funktionalen Gestaltung der Rohrleitungen und sind daher überwiegend reaktiv ausgelegt. Im weiteren Verlauf wird für jede der Einflussdimensionen analysiert, ob und inwieweit die direkt beeinflussbaren Planungsparameter angepasst werden können, um das hydroelektrische Potenzial zu maximieren.

### Volumenstrom

*Tabelle 5-6: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf den Volumenstrom zur Planungskategorie „Frischwasserversorgung und Abgabe von Brauchwasser“*

| Beeinflussbare Planungsparameter | Nicht beeinflussbare Planungsparameter |
|---|---|
| • Spitzenwertfaktor | • Benötigte Kapazität<br>• Menge des zugeteilten Wassers<br>• Benötigte Einleitmenge |

Der Volumenstrom der Frischwasserversorgung und Abgabe von Brauchwasser hängt maßgeblich von der benötigten Wassermenge und der verfügbaren Kapazität ab. Die maximale Frischwassermenge wird durch Genehmigungen begrenzt, während der Volumenstrom für die Brauchwasserabgabe von der technischen Auslegung des Bergwerks und dem tatsächlichen Verbrauch bestimmt wird. Zusätzlich beeinflusst der Spitzenwertfaktor die Volumenströme, wobei eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Volumenstroms anzustreben ist. Dies kann durch operative Steuerung sowie durch ausreichende Speicherkapazitäten erreicht werden.

Die erforderliche Kapazität an Frischwasser kann nicht gezielt zur Erhöhung des hydroelektrischen Potenzials angepasst werden, da sie primär von technischen Entscheidungen wie der Wahl der Abbau- und Aufbereitungsmethode sowie den Eigenschaften der Lagerstätte abhängt. Auch die Genehmigungen für Wasserentnahme und -abgabe sind direkt an den Bedarf und die Kapazität des Bergwerks gekoppelt und können nicht unabhängig optimiert werden. Zudem unterliegen sie den Vorgaben externer Stellen, wie lokalen Behörden und gesetzlichen Bestimmungen.

Insgesamt kann der Volumenstrom nicht zur Optimierung des hydroelektrischen Potenzials angepasst werden. Da er maßgeblich von den technischen Planungsentscheidungen des Bergwerks abhängt, stellt er keine zentrale Stellgröße dar, um das hydroelektrische Potenzial signifikant zu verbessern.

### Fluideigenschaften

*Tabelle 5-7: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf die Fluideigenschaften zur Planungskategorie „Frischwasserversorgung und Abgabe von Brauchwasser“*

| Beeinflussbare Planungsparameter | Nicht beeinflussbare Planungsparameter |
|---|---|
| • - | • Strömungseigenschaften<br>• Dichte der Flüssigkeit |

Die Fluideigenschaften sind entscheidend für die Auslegung von Rohrleitungen und werden durch die Strömungseigenschaften sowie die Dichte der Flüssigkeit bestimmt. Da es sich hierbei um Frisch- und Brauchwasser handelt, entsprechen die Fluideigenschaften weitgehend denen von reinem Frischwasser. Aufgrund dieser Ähnlichkeit besteht kaum Potenzial für eine Optimierung, sodass eine gezielte Anpassung weder möglich noch sinnvoll ist.

### Fallhöhe und horizontale Entfernung

*Tabelle 5-8: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf die Fallhöhe und Entfernung zur Planungskategorie „Frischwasserversorgung und Abgabe von Brauchwasser“*

| Beeinflussbare Planungsparameter | Nicht beeinflussbare Planungsparameter |
|---|---|
| • Länge der Rohrleitung<br>• Horizontale Entfernung Bergwerk<br>• Höhenänderung in Bezug auf Bergwerk und Wasserentnahmestelle<br>• Höhenlage der Rohrleitung | • Topografie<br>• Höhenlage |

Die Fallhöhe und die horizontale Entfernung einer Rohrleitung werden maßgeblich durch verschiedene Planungsparameter beeinflusst. Dazu zählen insbesondere die Topografie, die Höhenlage der Rohrleitung, die Entfernung des Bergwerks zur Entnahmestelle, die Länge der Rohrleitung sowie die relative Höhenänderung zwischen Entnahmestelle und Bergwerk. Diese Parameter hängen direkt von der geographischen Lage des Bergwerks und der Entnahmestelle sowie von der örtlichen Topografie ab.

Der Standort des Bergwerks ist weitgehend durch die Lage der Lagerstätte vorgegeben, nur die Infrastruktur kann in geringem Maße frei angeordnet werden. Der Entnahmepunkt des Wassers hingegen lässt sich stärker beeinflussen und proaktiv wählen. Der genaue Zielpunkt auf dem Bergwerksgelände, an dem das Wasser ankommt, ist im Vergleich zur Entnahmestelle weniger entscheidend, auch wenn er innerhalb eines gewissen Radius um das Bergwerk frei gewählt werden kann und in der Regel von der Standortwahl der Aufbereitungsanlage abhängt.

Das hydroelektrische Potenzial lässt sich optimieren, indem der Entnahmepunkt möglichst hoch und gleichzeitig relativ nah am Bergwerk gewählt wird. Dabei sind jedoch die topografischen Gegebenheiten zu berücksichtigen, die nicht verändert werden können.

### Verluste

*Tabelle 5-9: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf die Verluste zur Planungskategorie „Frischwasserversorgung und Abgabe von Brauchwasser“*

| Beeinflussbare Planungsparameter | Nicht beeinflussbare Planungsparameter |
|---|---|
| • Entlüftungsventile<br>• Verbindungen der Rohrleitungen<br>• Förderdruck am Endpunkt<br>• Größe und Durchmesser der Rohrleitung<br>• Rohrleitungsarmaturen<br>• Korrosionsbeständigkeit und Rohrrauigkeit | • Reibungswiderstand der Rohrleitung<br>• Strömungseigenschaften |

Die Verluste hängen primär von der Auslegung der Rohrleitung ab und werden durch die Bauart sowie durch technische Entscheidungen beeinflusst. Diese Entscheidungen wiederum sind direkt von den Anforderungen abhängig, die an die Rohrleitung gestellt werden. Zu den technisch beeinflussbaren Faktoren gehören unter anderem der Druck am Ende der Leitung, die Größe und der Durchmesser der Rohre, die Auswahl und Platzierung von Armaturen, die Rauigkeit und Korrosionsbeständigkeit des Rohrmaterials sowie die Installation von Entlüftungsventilen und Verbindungen.

Obwohl die Komponenten und Parameter grundsätzlich so ausgelegt werden, dass der Widerstand in der Rohrleitung möglichst gering ist, ist es wichtig sicherzustellen, dass alle Bauteile optimal gewählt sind, um die Verluste so weit wie möglich zu minimieren. Dabei sind die Parameter in der Regel reaktiv auf die betrieblichen Anforderungen der Rohrleitung ausgelegt, was bedeutet, dass sie primär an die spezifischen Betriebsbedingungen angepasst werden, anstatt im Vorfeld optimiert zu werden.

### Nutzbarkeit

*Tabelle 5-10: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf die Nutzbarkeit zur Planungskategorie „Frischwasserversorgung und Abgabe von Brauchwasser“*

| Beeinflussbare Planungsparameter | Nicht beeinflussbare Planungsparameter |
|---|---|
| • Benötigte Einleitungsmenge<br>• Genehmigungen<br>• Maximal zulässige Druckhöhe<br>• Spitzenwertfaktor | • Menge des zugeteilten Wassers<br>• Topografie |

Die Parameter, welche die Nutzbarkeit des hydroelektrischen Potenzials in Rohrleitungsabschnitten beeinflussen, können in bestimmten Fällen auch als Ausschlusskriterien fungieren. Die Nutzbarkeit wird insbesondere durch die genehmigte Wasserentnahmemenge und die zulässigen Abgabemengen bestimmt, aber auch durch die Topografie sowie die Genehmigungslage des Rohrleitungssystems. Weitere relevante Einflussgrößen sind der maximal zulässige Druck in der Rohrleitung und der Spitzenwertfaktor.

Wenn die genehmigte Wassermenge zu gering ist, lohnt sich eine hydroelektrische Nutzung nicht, da der Volumenstrom für eine effektive Energieerzeugung nicht ausreicht. Ebenso ist die Nutzung nicht sinnvoll, wenn die Topografie keine nennenswerten Höhenunterschiede zwischen der Entnahmestelle und dem Bergwerk oder entlang der Rohrleitung bietet. Da die Topografie nicht veränderbar ist, handelt es sich um einen nicht-beeinflussbaren Faktor.

Die Genehmigungen zur Wasserentnahme und -abgabe sind nur begrenzt beeinflussbar. Zwar kann durch frühzeitige Kommunikation mit den zuständigen Behörden und durch eine sorgfältige technische Planung der Genehmigungsprozess positiv beeinflusst werden, die endgültige Entscheidung liegt jedoch bei externen Stellen. Ist die im Betrieb benötigte oder abzugebende Wassermenge aufgrund hoher Rückführungs- und Recyclingraten sehr gering, ist auch das hydroelektrische Potenzial entsprechend niedrig und häufig vernachlässigbar.

Ein weiteres Ausschlusskriterium liegt vor, wenn keine Genehmigung zur Einleitung von Abwasser in die Umwelt vorliegt. In solchen Fällen darf kein Abwasser abgegeben werden, wodurch nur wenig Frischwasser benötigt wird. Auch ungünstige topografische Bedingungen, wie eine flache Geländestruktur oder ein Gefälle in entgegengesetzter Richtung, schließen eine Nutzung des hydroelektrischen Potenzials aus. Insbesondere, wenn das Wasser über ebene Strecken oder sogar auf ein höheres Niveau gepumpt werden muss, ist die Betrachtung eines hydroelektrischen Szenarios nicht zielführend, da kein relevantes Potenzial vorhanden oder nutzbar ist.

## 5.4. Mineralische Aufbereitungsanlage

Die Planungskategorie *Mineralische Aufbereitungsanlage* umfasst bergbauliche Komponenten, die den Potenzialkategorien „Betriebliches Wassernetzwerk“ (vgl. Kapitel 4.4.2), „Materialtransport in der mineralischen Aufbereitung“ (vgl. Kapitel 4.4.3) und Anlagenspezifische Potenziale“ (vgl. Kapitel 4.4.4) zugeordnet sind. Die Potenzialkategorie „Betriebliches Wassernetzwerk“ können die meisten der identifizierten Fluidströme zugeordnet werden. Es handelt sich dabei um Potenziale, die in den innerbetrieblichen Wasserversorgungsleitungen auftreten können. Die Potenzialkategorie des „Materialtransports in der mineralischen Aufbereitung“ umfasst die Fluidströme in der mineralischen Aufbereitungsanlage, welche zum Materialtransport genutzt werden. Die Potenzialkategorie umfasst damit alle Fluidströme, die innerhalb der mineralischen Aufbereitung auftreten, von der ersten Brechstufe bis zum Eindicker. Die „Anlagenspezifischen Potenziale“ sind typisch für Anlagen, die im Bergbau installiert und genutzt werden. Als Anlage wird eine prozesstechnische Einheit verstanden, also beispielsweise der Eindicker, die Flotationsbank oder ein Tank. Dabei handelt es sich um die Potenziale, die direkt an der Anlage auftreten, aufgrund der Auslegung der jeweiligen Anlage. Die Planungskategorie *Mineralische Aufbereitungsanlage* ist somit relevant für die in Tabelle 5-11 dargestellten Fluidströme.

### *5.4.1. Identifikation der bergbaulichen Planungsparameter*

Die Planung und Auslegung einer mineralischen Aufbereitungsanlage ist ein iterativer Prozess, der sich über die gesamte Planungsphase eines Bergbauprojekts erstreckt und eine enge Abstimmung zwischen den Disziplinen für Bergbauplanung, Geologie und Metallurgie erfordert. Eine sorgfältige Planung und Gestaltung der Aufbereitungsanlage ist entscheidend für die Rentabilität des Bergwerks, da bis zu 80 % der Investitionskosten eines Greenfield-Projekts auf die Aufbereitungsanlage und die Prozessinfra-

struktur entfallen (Hustrulid et al. 2013). Larsen et al. (2016) hebt die Bedeutung der Aufbereitungsanlage im Rahmen der Gesamtplanung eines Rohstoffgewinnungsbetriebs sowie die erforderlichen technischen Grundlagen hervor.

Aufgrund der Komplexität der Planung konzentriert sich diese Arbeit auf Aspekte, die für die Wassernutzung relevant sind. Die Planungsparameter werden dabei in folgenden Bereichen analysiert:

- Standortauswahl
- Metallurgie
- Rohstoffgewinnung
- Auslegung der Aufbereitungsanlage
- Rohrleitungen in der Aufbereitungsanlage

*Tabelle 5-11: Liste der zugeordneten Fluidströme zur Planungskategorie „Mineralische Aufbereitungsanlage“*

| Fluidstrom | Startpunkt | Endpunkt | Potenzialkategorie |
|---|---|---|---|
| F2 | Grundwasser | Frisch-/Prozesswasserspeicher und Wasseraufbereitung | Betriebliches Wassernetzwerk |
| F6 | Frisch-/Prozesswasserspeicher | Brech-/Mahlkreislauf | Betriebliches Wassernetzwerk |
| F7 | Frischwasserspeicher | Sonstige Anlagen | Betriebliches Wassernetzwerk |
| F8 | Prozesswasserspeicher | Wasseraufbereitung | Betriebliches Wassernetzwerk |
| F10 | Wasseraufbereitung | Frischwasserspeicher | Betriebliches Wassernetzwerk, Anlagenspezifische Potenziale |
| F11 | Brech-/Mahlkreislauf | Brech-/Mahlkreislauf | Materialtransport in der mineralischen Aufbereitung, Anlagenspezifische Potenziale |
| F12 | Brech-Mahlkreislauf | Flotation | Materialtransport in der mineralischen Aufbereitung, Anlagenspezifische Potenziale |
| F13 | Flotation | Brech-/Mahlkreislauf | Materialtransport in der mineralischen Aufbereitung, Anlagenspezifische Potenziale |
| F14 | Flotation | Flotation | Materialtransport in der mineralischen Aufbereitung |
| F15 | Flotation | Entwässerung | Materialtransport in der mineralischen Aufbereitung |
| F16 | Entwässerung | Prozesswasserspeicher und Wasseraufbereitung | Betriebliches Wassernetzwerk, Anlagenspezifische Potenziale |
| F18 | TSF | Prozesswasserspeicher und Wasseraufbereitung | Betriebliches Wassernetzwerk |
| F20 | Laugungsanlage | Laugungsanlage | Betriebliches Wassernetzwerk |
| F21 | Sonstige Anlagen | Wasseraufbereitung | Betriebliches Wassernetzwerk |

Zum Aufbau und zur Funktionsweise mineralischer Aufbereitungsanlagen existieren zahlreiche Grundlagenwerke. Zu den wichtigsten zählen Wills (2016), Darling (2011), Gupta und Yan (2016), Mular et al. (2002) sowie industrielle Veröffentlichungen, etwa von Metso Corporation (2018). Diese Werke vermitteln umfassendes Wissen über Prozesse, Maschinen, Praxisbeispiele und Planungskonzepte im Bereich der mineralischen Aufbereitung. Ergänzend zu diesen Sammelwerken werden für die Recherche der Planungsparameter auch wissenschaftliche Veröffentlichungen zu spezifischen Teilaspekten herangezogen.

**Standortauswahl**

Die entscheidenden Parameter für die Standortauswahl der Aufbereitungsanlagen werden umfassend in der Fachliteratur beschrieben, unter anderem bei Mular et al. (2002, S. 1359), Safari et al. (2012), Rahmani et al. (2013), Bakhtavar und Lotfian (2017), Kazemi et al. (2020) und Bejari et al. (2017).

Die Wahl eines geeigneten Standorts für eine Aufbereitungsanlage ist ein komplexer Entscheidungsprozess, der zahlreiche Kriterien gleichzeitig berücksichtigen muss – darunter finanzielle, geografische, technische, politische und umweltbezogene Aspekte. Die Standortwahl hat direkten Einfluss auf die Auslegung der Anlage und damit auf die Wirtschaftlichkeit und den langfristigen Erfolg des gesamten Bergbauprojekts. Eine ungünstige Standortentscheidung kann zu erhöhten Betriebskosten und eingeschränkter Produktivität führen (Safari et al. 2012; Bejari et al. 2017).

Zu den zentralen technischen Faktoren zählt die Untergrundbeschaffenheit des Standorts. Auch die Topografie spielt eine entscheidende Rolle, da unebenes Gelände die Baukosten erhöhen kann, jedoch in bestimmten Fällen durch natürliche Höhenunterschiede für den gravimetrischen Transport innerhalb der Anlage von Vorteil sein kann (Mular et al. 2002, S. 1359; Hartman 1992, S. 495; Yarar und Dogan 1987, S. 252; Boom et al. 2015).

Die vorhandene Infrastruktur, insbesondere Verkehrsanbindung, Energieversorgung und Wasserzugang, ist ein weiterer entscheidender Faktor. Die Nähe zum aktiven Abbaubetrieb ist dabei sorgfältig abzuwägen, da einerseits Transportwege kurz gehalten werden sollten, andererseits darf die Lage der Anlage den aktiven Abbau nicht behindern oder Erweiterungen blockieren. Eine zuverlässige Versorgung mit Energie sowie mit Wasser ist zwingend erforderlich (Hartman 1992, S. 495; Boom et al. 2015, S. 213; Rahmani et al. 2013).

Rechtliche, politische und umweltbezogene Rahmenbedingungen beeinflussen die Standortwahl ebenfalls maßgeblich. Dazu zählen nationale und regionale Bergbaugesetze, Landnutzungsrechte, Umweltauflagen, Ressourcenmanagement sowie steuerliche und finanzielle Verpflichtungen. Umweltvorgaben, insbesondere in Form von Umweltverträglichkeitsprüfungen, sowie Nachhaltigkeitsstandards müssen bereits im Planungsprozess berücksichtigt und eingehalten werden (Dunne 2019, S. 200; Bullock 2018, S. 271; Hartman 1992, S. 503).

**Metallurgie**

Die Auslegung der Prozesse und Systeme mineralischer Aufbereitungsanlagen basiert auf metallurgischen Tests. Ein umfassendes Verständnis der Eigenschaften des Erzes ist dabei entscheidend, um sowohl ein optimales Ausbringen als auch die gewünschte Produktqualität zu erreichen. Von besonderer Bedeutung sind dabei die chemische und mineralogische Zusammensetzung sowie die physikalischen Eigenschaften des Erzes, da sie die Auswahl und Effizienz der Trenn- und Aufbereitungsprozesse maßgeblich beeinflussen (Malhotra et al. 2009; Bullock 2018, S. 179). Der Einfluss der metallurgischen und mineralogischen Untersuchungen auf die Auslegung und Planung der Aufbereitungsanlage wird im Detail in Mular et al. (2002) beschrieben.

Metallurgische Untersuchungen werden während aller Phasen eines Bergbauprojekts durchgeführt, von der geologischen Exploration bis zur Stilllegung. Sie decken die vier zentralen Verarbeitungsschritte ab: Zerkleinerung, Trennung, Aufbereitung und Entwässerung. Dabei werden zentrale Planungsparameter wie Ausbringen, Erzgehalt, Zerkleinerungseigenschaften, Sieblinien sowie weitere chemische und physikalische Kenngrößen ermittelt, um die Auslegung und den laufenden Betrieb der Anlage fundiert zu steuern (Dunne 2019, S. 19; Whincup 2010; King 2001).

**Rohstoffgewinnung**

Die mineralische Aufbereitung hängt stark von den Rahmenbedingungen des Bergwerks ab, die hauptsächlich durch die Lagerstätte bestimmt werden. Zu diesen Kriterien zählen die gewählte Abbaumethode, die eingesetzten Betriebsmittel sowie die Laufzeit des Bergwerks und die geplante Produktion. Diese Parameter bilden die Grundlage für technische Einschränkungen und Vorgaben bei der Auslegung der Aufbereitungsanlage (Bozorgebrahimi et al. 2003; Bullock 2018, S. 179).

Die Tonnage bei untertägigen Bergwerken ist häufig wesentlich niedriger als bei einem Tagebau, was die Kapazität der Aufbereitungsanlage direkt beeinflusst. Größere Betriebsmittel im Tagebau führen zu geringerer Selektivität, wodurch der Aufbereitungsaufwand steigt und eine erhöhte Flexibilität der Aufbereitungsprozesse erforderlich wird (Bozorgebrahimi et al. 2003). Die Aufbereitungsanlage muss zudem so ausgelegt sein, dass die Kapazität in einem gewissen Rahmen an den kurz- und langfristigen Produktionsplan angepasst werden kann. Um die Wirtschaftlichkeit während der gesamten Laufzeit des Bergwerks zu sichern, muss die Anlage auf Änderungen in den Erzeigenschaften und Produktionsprognosen anpassbar sein, was in manchen Fällen eine Erweiterung oder eine vorübergehende Stilllegung der Produktion erfordern kann (Dunne 2019, S. 342).

**Auslegung der Aufbereitungsanlage**

Die Auslegung einer mineralischen Aufbereitungsanlage basiert im Wesentlichen auf der Interpretation metallurgischer Testarbeiten für das spezifische Erzvorkommen (Mular et al. 2002). Darüber hinaus beeinflussen die Standortwahl und die Betriebsplanung maßgeblich den konzeptionellen Entwurf der Anlage. Für die Erstellung des endgültigen Prozessfließbildes und der detaillierten Auslegung der Betriebseinheiten sind produktbezogene Daten von Anlagenherstellern sowie technische Standards erforderlich.

Ein zentrales Element der Anlagenplanung ist die räumliche Anordnung der Hauptkomponenten und die Planung ihrer baulichen Umsetzung. Dabei ist eine ausreichende Flexibilität sicherzustellen, um die Ausrüstungen in funktionale Prozessbereiche zu gruppieren und gleichzeitig die topografischen und infrastrukturellen Gegebenheiten des Standorts zu berücksichtigen. Zu diesem Schritt gehört auch die Planung von Gebäuden, Fundamenten und Tragstrukturen für die Maschinen und Anlagenkomponenten. Im Anschluss erfolgt die Planung der technischen Versorgungs- und Betriebssysteme, die einen sicheren und wirtschaftlichen Materialfluss gewährleisten. Dazu zählen unter anderem Systeme für Prozesswasser, Stromversorgung, Zuführ- und Fördereinrichtungen, Kommunikationsnetze, Druck- und Messluft sowie Staubsammel- und Absauganlagen. Yarar und Dogan (1987) geben hierzu eine umfassende Beschreibung der Aufbauprinzipien und Planungsansätze mineralischer Aufbereitungsanlagen.

Zusätzlich werden unterstützende Einrichtungen wie Labore zur Prozesskontrolle, Wartungswerkstätten und Bedienerschutzräume eingeplant. Auch Wartungsplattformen und Kontrollstände werden vorgesehen, um den Betrieb effizient und sicher gestalten zu können. Abschließend wird die Anlage mit sicherheitstechnischen Maßnahmen ausgestattet, darunter Brandschutzsysteme und Erste-Hilfe-Stationen (Bausbacher und Hunt 1993, S. 5).

**Rohrleitungssysteme in der Aufbereitungsanlage**

Die Wasserinfrastruktur innerhalb der Aufbereitungsanlage spielt eine zentrale Rolle für das hydroelektrische Potenzial, weshalb die Auslegung der Rohrleitungen besonders relevant ist. Die Führung und Gestaltung der Rohrleitungen stellt einen wesentlichen Kostenfaktor dar und muss eine Vielzahl von Aspekten berücksichtigen, darunter Wartungsfreundlichkeit, baulicher Aufbau, Erweiterbarkeit sowie die Einhaltung von Sicherheitsanforderungen und technischen Normen (Bausbacher und Hunt 1993, S. 261).

Das Rohrleitungsmaterial und der Rohrdurchmesser werden entsprechend den Eigenschaften des zu transportierenden Fluids, dem erwarteten Druck sowie den Umgebungsbedingungen ausgewählt. Neben technischen Anforderungen spielen auch wirtschaftliche Überlegungen und normative Vorgaben eine wichtige Rolle. Grundsätzlich sollten Rohrleitungen, Versorgungsleitungen und Kabel in erhöhten, horizontal verlaufenden Rohrbrücken geführt werden. Diese Anordnung erleichtert die Planung in Bereichen mit vielen Anschlusspunkten und reduziert die Kosten für zusätzliche Stützelemente (Moran 2016, S. 483–498; Bausbacher und Hunt 1993).

Eine Übersicht über die für die einzelnen Planungskategorien verwendeten Quellen ist in Tabelle 5-12 dargestellt. Auf Basis dieser Quellen konnten insgesamt 173 Planungsparameter für die Auslegung der mineralischen Aufbereitungsanlage identifiziert werden. Davon entfallen 77 Parameter auf die Standortwahl, 36 auf die prozesstechnische Planung der Anlage, 30 auf die Auslegung der Rohrleitungen innerhalb der Aufbereitungsanlage, 19 auf metallurgische Eigenschaften und 11 auf den Abbau des jeweiligen Rohstoffs. Eine Auflistung aller identifizierten Parameter befindet sich im Anhang 7.

*Tabelle 5-12: Übersicht der Quellen für die Identifikation der Planungsparameter für mineralische Aufbereitungsanlagen, eigene Darstellung*

| **Kategorie** | **Quellen** | |
|---|---|---|
| Allgemein | Bakhtavar und Lotfian (2017) | Larsen et al. (2016) |
| | Bejari et al. (2017) | Mular et al. (2002) |
| | Hartman (1992) | Rahmani et al. (2013) |
| | Kazemi et al. (2020), | Safari et al. (2012) |
| Standortauswahl | Bejari et al. (2017) | Mular et al. (2002, S. 1359) |
| | Boom et al. (2015, S. 41, 71, 155, 213) | Rahmani et al. (2013) |
| | Bullock (2018, S. 271) | Rodrigue (2020) |
| | Darling (2011, S. 304) | Safari et al. (2012) |
| | Dunne (2019, S. 200) | Wills (2016, S. 24) |
| | Hartman (1992, S. 495, 503) | Yarar und Dogan (1987, S. 252) |
| | Jeswiet und Szekeres (2016) | |
| Metallurgie | Bullock (2018, S. 179, 182) | Malhotra et al. (2009) |
| | Dunne (2019, S. 19) | Whincup (2010) |
| Rohstoffgewinnung | Bozorgebrahimi et al. (2003) | Dunne (2019, S. 342) |
| | Bullock (2018, S. 179) | |
| Auslegung der Aufbereitungsanlage | Bausbacher und Hunt (1993, S. 5) | Yarar und Dogan (1987, S. 253) |
| | Mular et al. (2002, S. 2166, 2355) | |
| Rohrleitungen in der Aufbereitungsanlage | Bausbacher und Hunt (1993, S. 261) | Moran (2016, S. 483-498) |

### *5.4.2. Einfluss der Planungsparameter auf das hydroelektrische Potenzial der Potenzialszenarien*

Innerhalb der Planungskategorie *Mineralische Aufbereitung* haben 39 von den insgesamt 173 Planungsparametern einen Einfluss auf hydroelektrische Potenziale im betrieblichen Wassernetzwerk, der mineralischen Aufbereitungsanlage und an den Anlagen. Tabelle 5-13 zeigt alle Parameter und kennzeichnet deren Einfluss auf die jeweilige Dimension mit einem „x“.

**Standortauswahl**

Im Rahmen der Standortauswahl beeinflussen 7 von 77 Parametern das hydroelektrische Potenzial. Die Fallhöhe sowie die horizontale Entfernung werden maßgeblich durch die Topografie, die Höhenlage, die Nähe zur Lagerstätte sowie den Höhenunterschied zum Bergwerk bestimmt. Die Möglichkeit der Erweiterung der Aufbereitungsanlage ist von entscheidender Bedeutung für die technische Nutzbarkeit eines hydroelektrischen Potenzials.

**Metallurgie**

Von den metallurgischen Planungsparametern haben lediglich 4 von insgesamt 19 Parametern einen direkten Einfluss auf das hydroelektrische Potenzial. Der jeweilige abgebaute Rohstoff beeinflusst den Volumenstrom, die Fluideigenschaften sowie die Nutzbarkeit der Fluidströme. Die Abrasivität, Dichte des Erzes und Benetzbarkeit der Oberfläche bestimmen die resultierenden Fluideigenschaften.

**Auslegung Aufbereitung**

Bei der Auslegung der Aufbereitung beeinflussen 10 von insgesamt 36 Parametern das hydroelektrische Potenzial. Primär sind die Entfernung sowie die Fallhöhe entscheidend, zudem die Nutzbarkeit der Fluidströme, welche maßgeblich durch die Anordnung der Anlagen zueinander, Höhenunterschiede der Anlagen, Größe der Anlagen, den Abstand zwischen den Anlagen, die Leitungsführung sowie verschiedene notwendige weitere Gebäude beeinflusst wird. Der Volumenstrom unterliegt dem Einfluss der Prozessabläufe sowie weiterer Gebäude. Die Nutzbarkeit ist insbesondere von der Verfügbarkeit der Anlage sowie den Anforderungen an die Wartung abhängig.

*Tabelle 5-13: Planungsparameter der Kategorie „Mineralische Aufbereitungsanlage“ mit direktem Einfluss auf das hydroelektrische Potenzial, eigene Darstellung*
*x = direkter Einfluss des Planungsparameters auf die Dimension des hydroelektrischen Potenzials*

| Kategorie | Planungsparameter | Volumenstrom | Fluideigenschaften | Fallhöhe & Entfernung | Verluste | Nutzbarkeit |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Standortauswahl | Topografie | | | x | | |
| | Höhenlage | | | x | | |
| | Nähe zur Lagerstätte und dem Bergwerk | | | x | | |
| | Horizontale Entfernung zum Grubengelände | | | x | | |
| | Höhenunterschied zum Bergwerk | | | x | | |
| | Erweiterbarkeit | | | | | x |
| | Höhe | | | x | | |
| Metallurgie | Rohstoff | x | x | | | x |
| | Abrasivität | | x | | | x |
| | Spezifisches Gewicht des Erzes | | x | | | |
| | Benetzbarkeit der Oberfläche | | x | | | |
| Rohstoffgewinnung | Jährliche Produktionsrate | x | | | | |
| | Tägliche Produktionsrate | x | | | | |
| Auslegung der Aufbereitungsanlage | Verfügbarkeit der Anlage | | | | | x |
| | Prozessabläufe und Materialströme | x | | | | x |
| | Anordnung der Prozessschritte | | | x | | x |
| | Höhenunterschiede der Anlagen | | | x | | |
| | Größe der Ausrüstung | | | x | | |
| | Abstand zwischen den Ausrüstungen | | | x | | |
| | Materialtransportsystem | | | | | x |
| | Leitungsführung | | | x | | |
| | Anforderungen an die Wartung | | | | | x |
| | Sonstige Gebäude | x | | x | | |

*Tabelle 5-13: Fortsetzung.*

| Kategorie | Planungsparameter | Volumenstrom | Fluideigenschaften | Fallhöhe & Entfernung | Verluste | Nutzbarkeit |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Auslegung Rohrleitungsnetzwerk | Wasserbedarf der Anlage | x | | | | |
| | Reibungswiderstand der Rohrleitung | | | | x | |
| | Höhenlage der Rohrleitung | | | x | | |
| | Maximal zulässige Druckhöhe | | | x | | x |
| | Vorgeschriebene Mindestdruckhöhe | | | | | x |
| | Spitzenwertfaktor | | | | | x |
| | Größe und Durchmesser der Rohrleitung | | | | x | x |
| | Rohrleitungsarmaturen | | | | x | |
| | Korrosionsbeständigkeit und Rohrrauigkeit | | | | x | x |
| | Strömungseigenschaften | x | x | | | x |
| | Dichte der Flüssigkeit | | x | | | |
| | Verlässlichkeit | | | | | x |
| | Betriebs- und Wartungsanforderungen | | | | | x |
| | Entlüftungsventile | | | | x | |
| | Rohrbögen | | | | x | |
| | Verbindung von Rohrleitungen | | | | x | |

**Rohstoffgewinnung**

Im Bereich der Rohstoffgewinnung beeinflussen 2 von 11 Parametern direkt das hydroelektrische Potenzial. Die jährliche sowie die tägliche Produktion beeinflussen den auftretenden Volumenstrom. Sie sind direkt linear zu dem benötigten Durchsatz der Aufbereitungsanlage und damit auch zu den Volumenströmen in der Aufbereitungsanlage.

**Auslegung Rohrleitungen**

Bei der Auslegung der Rohrleitung beeinflussen 16 von 30 Parametern direkt das hydroelektrische Potenzial. Der jeweilige Volumenstrom wird maßgeblich durch den Wasserbedarf der einzelnen Anlagen bestimmt. Eine Vielzahl von Faktoren, darunter Rohrreibung, Größe und Durchmesser der Rohre, Rohrleitungsarmaturen, Korrosionsbeständigkeit und Rohrrauigkeit sowie Rohrbögen und Verbindungsstücke, übt einen maßgeblichen Einfluss auf die Druckverluste im Rohrleitungssystem aus. Die Fluideigenschaften werden maßgeblich von den Strömungseigenschaften sowie der Dichte des Fluids geprägt. Die Nettofallhöhen und horizontalen Abstände werden durch die Höhenlage der Rohrleitungen sowie die maximale Druckhöhe bestimmt. Zudem ist die Nutzbarkeit der Fluidströme von den Betriebsbedingungen abhängig, wobei insbesondere die Anforderungen an Wartung, Spitzenwertfaktor und Verlässlichkeit zu berücksichtigen sind.

### *5.4.3. Beeinflussbarkeit der Planungsparameter zur Optimierung des hydroelektrischen Potenzials*

Die Planungskategorie *Mineralische Aufbereitungsanlage* stellt einen zentralen Bestandteil des Bergbaukomplexes dar. Eine gute Planung und eine optimale Funktion während des aktiven Betriebs sind entscheidend für einen erfolgreichen Betrieb des Bergwerks. Aufgrund der Wichtigkeit der Aufbereitungsanlage im Gesamtkontext wird eine Beeinflussung und Optimierung der Planungsparameter hinsichtlich des hydroelektrischen Potenzials nur eingeschränkt erfolgen können.

**Volumenstrom**

*Tabelle 5-14: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf den Volumenstrom zur Planungskategorie „Mineralische Aufbereitungsanlage“*

| Beeinflussbare Planungsparameter | Nicht beeinflussbare Planungsparameter |
|---|---|
| • Prozessabläufe und innerbetriebliche Materialströme<br>• Sonstige Gebäude<br>• Strömungseigenschaften | • Rohstoff<br>• Jährliche und tägliche Produktionsrate<br>• Wasserbedarf der Anlage |

Der Volumenstrom von Fluiden in der mineralischen Aufbereitung ist vom abgebauten Rohstoff abhängig, da dieser die möglichen Aufbereitungsmethoden bestimmt und der Erzgehalt den Aufwand in der Aufbereitung maßgeblich beeinflusst. Der Rohstoff selbst kann dabei nicht verändert werden. Die Abbauplanung des Bergwerks, ein komplexer und iterativer Prozess, legt die Tonnage fest, die wiederum die Auslegung der Aufbereitungsanlage und den Wasserbedarf bestimmt. Im laufenden Betrieb wird angestrebt, die Tonnage konstant zu halten, um die Aufbereitungsanlage möglichst effizient auszulasten. Eine Erhöhung der Tonnage, um das hydroelektrische Potenzial zu steigern, ist jedoch nicht realistisch. Der Wasserbedarf und die damit verbundenen Volumenströme hängen von zentralen Planungselementen des Bergwerks ab. Im Normalfall wird versucht den Wasserbedarf zu senken, daher ist es nicht sinnvoll den Wasserbedarf künstlich zu erhöhen, um das hydroelektrische Potenzial zu optimieren.

Das Wasser, das verwendet wird, kann aber die einzelnen Volumenströme beeinflussen. Die Strömungseigenschaften in der Aufbereitungsanlage können jeweils durch den Wasseranteil angepasst werden. So lässt sich durch einen höheren Wasseranteil beispielsweise die Strömungsdynamik verbessern, was auch bei bereits bestehenden Anlagen möglich ist. Durch die Auslegung der Prozessabläufe und innerbetrieblichen Materialströme sind die einzelnen Volumenströme bei der Auslegung der Anlage beeinflussbar, insbesondere durch Rezirkulation und die Wasserbilanz der Anlage. Diese Faktoren ermöglichen es, die relevanten Fluidströme innerhalb gewisser Grenzen direkt zu steuern.

Die Planung der sonstigen Gebäude erfolgt nachrangig, basierend auf den Anforderungen des Bergwerks und der Aufbereitungsanlage. Vor allem die Wasseraufbereitung, welche unter diese Kategorie fällt, beeinflusst das Wassernetzwerk und damit die Fluidströme und den Volumenstrom direkt. Diese Gebäude müssen ihren technischen Zweck erfüllen und haben eine geringere Bedeutung für die Effizienz des Prozesses an sich, weshalb sie tendenziell anpassbar sind.

Insgesamt spielt das hydroelektrische Potenzial eine nachgeordnete Rolle in den Planungsparametern der mineralischen Aufbereitung, vor allem wenn es um die Wassermenge und Fluidströme geht. Eine Optimierung des hydroelektrischen Potenzials durch eine Vergrößerung der Volumenströme steht dem generellen Bestreben nach einem geringeren Wasserverbrauch entgegen.

**Fluideigenschaften**

Bei der Konzeption einer Aufbereitungsanlage spielen die Eigenschaften des Erzes eine zentrale Rolle. Insbesondere das spezifische Gewicht, die Abrasivität sowie die Benetzbarkeit der Oberfläche sind entscheidende Parameter. Diese Merkmale sind jedoch nicht beeinflussbar, da sie durch die geologischen

Eigenschaften der Lagerstätte vorgegeben sind. Daher muss die Auslegung der Anlage so erfolgen, dass unter den gegebenen Bedingungen ein effizienter und stabiler Betrieb gewährleistet ist.

*Tabelle 5-15: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf die Fluideigenschaften zur Planungskategorie „Mineralische Aufbereitungsanlage“*

| Beeinflussbare Planungsparameter | Nicht beeinflussbare Planungsparameter |
|---|---|
| • Strömungseigenschaften<br>• Dichte der Flüssigkeit | • Rohstoff<br>• Spezifische Gewicht des Erzes<br>• Abrasivität<br>• Benetzbarkeit der Oberfläche |

Demgegenüber können die Strömungseigenschaften sowie die Dichte der Flüssigkeit im Prozess angepasst und folglich beeinflusst werden. Diese Faktoren sind insbesondere im Hinblick auf die spätere Nutzung hydroelektrischer Potenziale von großer Bedeutung. Technische Maßnahmen wie eine Erhöhung des Wasseranteils können genutzt werden, um die Strömungsbedingungen gezielt zu verbessern.

Das primäre Planungsziel in diesem Kontext besteht jedoch darin, einen effizienten und störungsfreien Anlagenbetrieb sicherzustellen. Die Optimierung des hydroelektrischen Potenzials bleibt dabei ein nachgelagertes Ziel, da Eingriffe in die Fluideigenschaften auch unerwünschte Auswirkungen auf die Prozessstabilität haben können. Der konkrete Nutzen entsprechender Maßnahmen muss daher im Einzelfall geprüft und bewertet werden; pauschale Aussagen sind an dieser Stelle nicht möglich.

### Fallhöhe und Entfernung

*Tabelle 5-16: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf die Fallhöhe und Entfernung zur Planungskategorie „Mineralische Aufbereitungsanlage“*

| Beeinflussbare Planungsparameter | Nicht beeinflussbare Planungsparameter |
|---|---|
| • Höhenlage<br>• Nähe zur Lagerstätte und zum Bergwerk<br>• Horiz. Entfernung zum Grubengelände<br>• Höhenunterschied zum Bergwerk<br>• Anordnung der Prozessschritte<br>• Höhenunterschiede der Anlagen<br>• Größe der Anlagen<br>• Abstand zwischen den Anlagen<br>• Leitungsführung, Höhe der Rohrleitung<br>• Maximal zulässige Druckhöhe | • Topografie |

Hinsichtlich der Fallhöhe und Entfernung ist die Topografie der einzige Parameter, der nicht direkt beeinflusst werden kann. Dennoch lässt sich das Gelände durch eine gezielte Wahl und Anpassung anderer Planungsparameter sinnvoll nutzen. Die Ausrichtung der Aufbereitungsanlage in Relation zum Bergwerk ist dabei von zentraler Bedeutung, da sie die Entfernung, den Höhenunterschied und die Möglichkeit zur Nutzung topografischer Gegebenheiten direkt beeinflusst.

Einen noch stärkeren Einfluss auf das hydroelektrische Potenzial, insbesondere in den Potenzialkategorien „Materialtransport in der mineralischen Aufbereitung“ und „anlagenspezifische Potenziale“, haben Parameter wie die Anordnung, Größe und Abstände der Anlagen sowie die Führung der Rohrleitungen. In begrenztem Umfang ist eine Optimierung der Fallhöhen möglich, etwa durch eine kaskadenartige Anordnung von Anlagen entlang eines Hangs, wodurch sich Höhenunterschiede im Bereich weniger Meter realisieren lassen. Eine gezielte Vergrößerung der Fallhöhe über etwa zehn Meter hinaus ist in der Praxis selten vorgesehen, da die meisten Anlagen in einer gemeinsamen Halle untergebracht sind und größere Höhendifferenzen Ausnahmen darstellen.

Die Optimierung der hydroelektrischen Potenziale entspricht im Wesentlichen der Optimierung eines möglichst energieeffizienten Materialflusses. Diese Synergie ist positiv zu bewerten, da die Ziele der hydroelektrischen Optimierung keine anderen Planungsziele beeinträchtigen. Dennoch sollte stets darauf geachtet werden, dass die energetische Optimierung des primären Materialstroms im Vordergrund steht. Aufgrund der Vielzahl interner Kreisläufe wäre es nicht zielführend, kleinere Fluidströme zu optimieren, wenn dadurch größere Ströme benachteiligt würden. In einem solchen Fall könnte der Gesamtenergieverbrauch sogar steigen.

### Verluste

*Tabelle 5-17: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf die Verluste zur Planungskategorie „Mineralische Aufbereitungsanlage“*

| Beeinflussbare Planungsparameter | Nicht beeinflussbare Planungsparameter |
|---|---|
| • Reibungswiderstand der Rohrleitung<br>• Größe und Durchmesser der Rohrleitung<br>• Rohrleitungsarmaturen<br>• Korrosionsbeständigkeit und Rohrrauhigkeit<br>• Rohrbögen<br>• Verbindung von Rohrleitungen | • - |

Alle Parameter, die die Verluste in einem Rohrleitungssystem beeinflussen, sind planerisch beeinflussbar und lassen sich durch gezielte Maßnahmen optimieren. Die Verluste resultieren primär aus dem Rohrleitungsbau und können sowohl im Rahmen von Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten als auch bei der Planung neuer Anlagen berücksichtigt und reduziert werden.

Ziel der Planung von Rohrleitungssystemen ist die bestmögliche wirtschaftliche Lösung unter Berücksichtigung von Energieeffizienz und Langlebigkeit. Eine Optimierung mit Fokus auf Energieeffizienz deckt sich dabei in weiten Teilen mit den Anforderungen zur Maximierung des hydroelektrischen Potenzials. Bei der gezielten Optimierung des hydroelektrischen Potenzials ist jedoch darauf zu achten, dass die Maßnahmen wirtschaftlich tragfähig bleiben und keinen unverhältnismäßigen Wartungsaufwand verursachen. Zudem muss sichergestellt sein, dass der technische Zweck der Anlage jederzeit erfüllt bleibt, um die Funktionalität und Effizienz des Gesamtsystems nicht zu beeinträchtigen.

### Nutzbarkeit

*Tabelle 5-18: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf die Nutzbarkeit zur Planungskategorie „Mineralische Aufbereitungsanlage“*

| Beeinflussbare Planungsparameter | Nicht beeinflussbare Planungsparameter |
|---|---|
| • Verfügbarkeit der Anlage<br>• Erweiterbarkeit<br>• Maximal zulässige Druckhöhe<br>• Vorgeschriebene Mindestdruckhöhe<br>• Prozessabläufe und innerbetriebliche Materialströme<br>• Anordnung der einzelnen Verarbeitungsschritte<br>• Materialtransportsystem<br>• Anforderungen an die Wartung<br>• Größe und Durchmesser der Rohrleitung<br>• Korrosionsbeständigkeit und Rohrrauigkeit<br>• Strömungseigenschaften<br>• Verlässlichkeit<br>• Betriebsbedingungen und Wartungsanforderungen | • Rohstoff<br>• Abrasivität |

Die Nutzbarkeit eines hydroelektrischen Potenzials in einer mineralischen Aufbereitungsanlage hängt von zahlreichen Parametern ab. In der Planungskategorie der *mineralischen Aufbereitung* und den damit verbundenen Potenzialkategorien ist es schwierig, allgemeingültige Aussagen zu treffen, ob und wann ein hydroelektrisches Potenzial sinnvoll nutzbar ist. Häufig sind individuelle Entscheidungen und spezifische Untersuchungen dafür erforderlich. Dennoch lassen sich einige grundsätzliche Überlegungen zur Beeinflussbarkeit der Nutzbarkeit durch bergbauliche Planungsparameter ableiten.

Einige Planungsparameter sind von grundlegender Bedeutung für die Nutzbarkeit des Potenzials. Der abzubauende Rohstoff ist der entscheidende Faktor für alle nachfolgenden Planungs- und Konstruktionsentscheidungen. Wenn das Erz z. B. keine Aufbereitung, eine trockene Aufbereitungsmethode oder Laugung erfordert, sind hydroelektrische Potenziale in den Potenzialkategorien unwahrscheinlich. Wenn Anlagen mit hohem Wasserdurchsatz, wie Flotation, Eindicker oder Wasserrückgewinnung vorhanden sind, ist ein Potenzial wahrscheinlicher und damit auch die Nutzbarkeit hydroelektrischer Potenziale. Auch Erzeigenschaften, die nicht beeinflussbar sind, können die Nutzbarkeit z. B. durch übermäßigen Verschleiß einschränken.

Für die Nutzbarkeit hydroelektrischer Potenziale in der mineralischen Aufbereitung und den damit verbundenen Fluidströmen ist die Auslegung der Anlage von zentraler Bedeutung. Hierbei ist zu beachten, dass ein energiearmer Materialtransport oft mit der Optimierung hydroelektrischer Potenziale übereinstimmt. Dieser Aspekt ist besonders relevant für die Prozessabläufe und verfahrenstechnischen Anforderungen. Sie bestimmen, welche Anlagen benötigt werden und wie diese zueinander angeordnet werden. Zudem legen die Verfahrensspezifikationen die Reihenfolge der Anlagen fest, was Auswirkungen auf die Planung der internen Rohrleitungen und die möglichen Fallhöhen zwischen den Anlagen hat. Auch die Größe der Anlagen beeinflusst das hydroelektrische Potenzial, insbesondere aufgrund des Volumenstroms. Der Wasserbedarf der einzelnen Anlagen hängt von ihrer Größe und Produktionskapazität ab, bei kleineren Anlagen wird entsprechend weniger Wasser benötigt, was die Nutzbarkeit von möglichen Potenzialen einschränken kann.

Aufbereitungsanlagen sind normalerweise so konstruiert, dass sie möglichst wartungsarm und kontinuierlich die angestrebte Tonnage verarbeiten können. Wenn die Nutzung eines hydroelektrischen Potenzials diesen Zielen entgegensteht, ist das Potenzial nicht nutzbar. Wenn die technischen Parameter einer Anlage die Nutzung von hydroelektrischen Potenzialen nicht zulassen, ist eine nachträgliche Anpassung der Anlage nicht sinnvoll möglich. Die Berücksichtigung solcher Parameter ist bei einer Neuplanung möglich, während bei bestehenden Anlagen eine Beeinflussung nur in geringem Maße möglich ist und die Parameter weitgehend festgelegt sind.

## 5.5. Bergeteich und Rohrleitung für Aufbereitungsberge

Die Planungskategorie *Bergeteich und Rohrleitung für Aufbereitungsberge* entspricht der Potenzialkategorie „Hydraulischer Materialtransport in Rohrleitung“ und umfasst den hydraulischen Transport von Feststoffen über größere Distanzen. Diese Art des Transports kann für verschiedene Materialien im Bergbau angewendet werden, die häufigsten sind dabei der Transport von Aufbereitungsbergen, Versatzmaterial oder auch seltener der Transport von Erzkonzentrat. Der Potenzialkategorie liegt der Fluidstrom *F17 Entwässerung – TSF, Sonstige Anlagen* (vgl. 4.4.5) zugrunde und beschreibt zusammengefasst die Szenarien für den hydraulischen Transport von Aufbereitungsbergen und Erzkonzentraten.

### *5.5.1. Identifikation der bergbaulichen Planungsparameter*

Für den Umgang mit bergbaulichen Reststoffen, insbesondere den Aufbereitungsbergen, steht eine Vielzahl grundlegender Fachliteratur zur Verfügung. Umfassende Darstellungen finden sich in Sammelwerken wie Darling (2011), Mular et al. (2002) sowie in spezialisierten Monografien wie Vick (1990). Diese Werke behandeln die Standortwahl und Auslegung von Bergeteichen ebenso wie die physikalische und

chemische Charakterisierung der Aufbereitungsberge. Für die technische Planung von Transportrohrleitungen sind darüber hinaus spezialisierte Werke wie Jacobs (1991), Concha A. (2014) und Chapman et al. (2009) relevant. Insbesondere Concha A. (2014) liefert detaillierte technische Grundlagen für den hydraulischen Feststofftransport, während Bentiol und Navarro (2009) Hinweise zur Auslegung entsprechender Rohrleitungssysteme geben.

Die Planung von Bergeteichen stellt eine interdisziplinäre Herausforderung dar, die fundierte Kenntnisse aus dem Bergbau, der Geotechnik, dem Umweltschutz sowie der regulatorischen Rahmenbedingungen erfordert. Während die Standortwahl früher häufig vorwiegend wirtschaftlich, etwa basierend auf der Nähe zur Aufbereitungsanlage, getroffen wurde, stehen heute technische Standards, Umweltanforderungen und soziale Aspekte im Vordergrund. Diese Entwicklung ist insbesondere auf die großflächige Landinanspruchnahme, die potenzielle Toxizität der Abfälle sowie das Risiko von Dammbrüchen zurückzuführen. Eine sichere und dauerhafte Verwahrung der Berge über den gesamten Lebenszyklus des Bergbauprojekts ist daher von zentraler Bedeutung zur Risikominimierung (Darling 2011, S. 645; Caldwell und Robertson 1983).

Die konkrete Ausgestaltung eines Bergeteichs ist stets standortspezifisch und hängt von zahlreichen Einflussfaktoren ab. Neben der Zusammensetzung der Berge spielen insbesondere klimatische, geologische und topografische Gegebenheiten eine wesentliche Rolle. Diese Parameter können mitunter in Zielkonflikte geraten, müssen aber im Rahmen der Planung gleichermaßen berücksichtigt werden. Im Rahmen der Standortauswahl für einen Bergeteich sind vier Hauptkategorien zu berücksichtigen: Standortwahl, Standortvorbereitung und -design, physikalische Aufbereitung der Berge sowie chemische Eigenschaften der Berge (Roberson 1982).

**Standortauswahl**

Die Standortwahl für einen Bergeteich erfolgt typischerweise in zwei Phasen: Zunächst wird eine vorläufige Bewertung der Region durchgeführt, um potenziell geeignete Standorte zu identifizieren. Daran schließt sich eine detaillierte Untersuchung und Bewertung dieser Standorte an. Zu den wichtigsten Standortfaktoren zählen hydrometeorologische Bedingungen, lokale hydrologische Verhältnisse, bestehende Landnutzungen, topografische Gegebenheiten sowie geologische und seismische Risiken (Vick 1990; Mudd 2008).

Nach der regionalen Vorauswahl werden die verbliebenen Standorte anhand definierter Ausschlusskriterien und gewichteter Parameter bewertet. Standorte mit ungünstigen Eigenschaften werden ausgeschlossen, während geeignete Optionen für vertiefende Untersuchungen vorgesehen sind. Für diese Standorte werden verschiedene Konstruktionsarten und Auslegungsvarianten des Bergeteichs geprüft und im Rahmen einer Fehler- und Risikoanalyse miteinander verglichen, um ungeeignete Lösungen frühzeitig auszuschließen (Caldwell und Robertson 1983; Darling 2011; Vick 1990).

Das endgültige Design eines Bergeteichs umfasst sämtliche funktionalen Elemente für das Management der Aufbereitungsberge. Dazu gehören Rückhaltebauwerke, Entwässerungssysteme und Überwachungseinrichtungen. Diese Komponenten stehen in wechselseitiger Abhängigkeit und müssen im Gesamtkonzept aufeinander abgestimmt werden (Vick 1990; Mular et al. 2002, S. 1836).

**Physikalische und chemische Bearbeitung der Berge**

Die erwartete Produktionsrate der Aufbereitungsberge sowie die geplante Laufzeit des Bergwerks sind zentrale Parameter, die die Dimensionierung und Kapazität eines Bergeteichs maßgeblich bestimmen. Darüber hinaus hat die chemische Zusammensetzung des abgebauten Erzes erheblichen Einfluss auf die Auslegung des Bergeteichs, insbesondere im Hinblick auf potenzielle Gefährdungen durch die abgelagerten Rückstände. Diese chemischen und physikalischen Eigenschaften wirken sich nicht nur auf die Standortwahl aus, sondern beeinflussen auch die Auslegung von Abdecksystemen, Überwachungseinrichtungen und Maßnahmen zur Kontrolle von Sickerwässern (Vick 1990, S. 35).

Die physikalischen Eigenschaften des Erzes, etwa dessen Härte, bestimmen die Eigenschaften der Aufbereitungsberge in Bezug auf Plastizität und Sedimentationsverhalten. Für die Auslegung des Bergeteichs ist daher die Bestimmung eines geeigneten Wasser-Feststoff-Verhältnisses entscheidend, in dem die Schlämme sicher und effizient deponiert werden können. Auch die Auswahl einer geeigneten Ablagerungsstrategie hängt maßgeblich von diesen Eigenschaften ab. Die umfassende Charakterisierung der chemischen und physikalischen Eigenschaften der Aufbereitungsberge bildet somit die Grundlage für alle nachfolgenden Planungsentscheidungen im Design des Bergeteichs (Vick 1990).

**Auslegung der Rohrleitung zum Transport der Aufbereitungsberge**

Derzeit kommen in der Bergbauindustrie überwiegend Rohrleitungen oder offene Kanäle zum Einsatz, um Aufbereitungsberge in Form von Suspensionen hydraulisch von der Aufbereitungsanlage zum Bergeteich zu transportieren. Die Planung und Auslegung solcher Transportleitungen erfolgt in einem eigenständigen Prozess, der zwar unabhängig von der Auslegung der Aufbereitungsanlage und des Bergeteichs ist, jedoch stark von deren Eigenschaften beeinflusst wird. Insbesondere die Materialeigenschaften der Berge, die geforderte Durchsatzrate sowie Lage und Entfernung zwischen Aufbereitungsanlage und TSF bestimmen maßgeblich das Leitungsdesign. Typischerweise besteht ein Rohrleitungssystem für den Feststofftransport aus mehreren funktionalen Komponenten: der Aufbereitungsanlage als Einspeisepunkt, einer Trägerflüssigkeit, einer Hauptleitung mit integrierten Pumpstationen, Ventilstationen, Energiedissipationssystemen, Steuerungseinrichtungen sowie der Endeinleitung in den Bergeteich (Jacobs 1991; Mular et al. 2002, S. 1425; Chapman et al. 2009).

Grundlage für die Auslegung der Rohrleitung sind die physikalischen strömungsmechanischen Eigenschaften der zu transportierenden Suspension. Auf Basis dieser Parameter und der erforderlichen Förderkapazität wird der Rohrdurchmesser iterativ bestimmt, um die Reibungsverluste innerhalb vertretbarer Grenzen zu halten. Ob zusätzliche Pumpen erforderlich sind, hängt insbesondere von der Fließgeschwindigkeit, der Sedimentationsneigung und dem Reibungsverhalten der Zweiphasenströmung ab (Concha A. 2014).

Ein zentraler Faktor für die Pumpenwahl ist der Höhenunterschied sowie die Transportdistanz zwischen Aufbereitungsanlage und Bergeteich. Diese beeinflussen nicht nur die Auslegung der Pumpentechnik, sondern auch die Routenplanung der Rohrleitung. Ähnlich wie bei Frischwasserleitungen müssen dabei umweltbezogene, topografische, regulatorische und geologische Rahmenbedingungen berücksichtigt werden (Mular et al. 2002, S. 1433). In der Praxis stellt die Topografie meist den wichtigsten Auswahlfaktor dar, da sie direkten Einfluss auf Druckverluste, erforderliche Pumpenleistung und Wartungsfreundlichkeit hat. Angestrebt werden möglichst kurze Leitungswege, geringe Steigungen und gleichmäßige Höhenverläufe (Bentiol und Navarro 2009). Falls das Gelände stark variiert, kann auch ein teilweiser vertikaler Transport der Suspension eine praktikable Lösung darstellen (Jacobs 1991).

Tabelle 5-19 gibt eine Übersicht über die verwendeten Quellen, die zur Identifikation relevanter Planungsparameter für die Planungskategorie *Bergeteich und Rohrleitung für Aufbereitungsberge* herangezogen werden. Für die Planung des Bergeteichs und der zugehörigen Infrastruktur, vor allem der Rohrleitung zum Transport der Aufbereitungsberge, konnten insgesamt 136 Parameter identifiziert werden. Hiervon entfallen 65 auf die Standortauswahl des Bergeteichs, 25 auf die Auslegung des Bergeteichs, 17 auf die Bearbeitung der Berge und 29 auf die Auslegung der Rohrleitung. Die Parameter können der Tabelle im Anhang 8 entnommen werden.

*Tabelle 5-19: Quellen der Planungskategorie Bergeteich und Rohrleitung für Aufbereitungsberge, eigene Darstellung*

| Planungskategorie | Quellen | |
|---|---|---|
| Allgemein | Caldwell und Robertson (1983)<br>Darling (2011, S. 645) | Golestanifar und Aghajani Bazzazi (2010)<br>Vick (1990) |
| Standortauswahl | Caldwell und Robertson (1983)<br>Darling (2011, S. 477, 646)<br>Roberson (1982)<br>Mudd (2008) | Mular et al. (2002, S. 1810)<br>Shelbourn (2010)<br>Vick (1990, S. 129) |
| Auslegung des Bergeteichs | Lottermoser (2010, S. 224)<br>Mular et al. (2002, S. 1836) | Vick (1990, S. 172, 309) |
| Physikalische und chemische Bearbeitung der Berge | Vick (1990, S. 35) | |
| Auslegung der Rohrleitung | Bentiol und Navarro (2009)<br>Chapman et al. (2009)<br>Concha A. (2014) | Jacobs (1991, S. 3, 20)<br>Mular et al. (2002, S. 1425, 1433) |

### *5.5.2. Einfluss der Planungsparameter auf das hydroelektrische Potenzial der Potenzialszenarien*

Innerhalb der Planungskategorie *Bergeteich und Rohrleitung für Aufbereitungsberge* haben 33 von insgesamt 136 identifizierten Planungsparametern einen direkten Einfluss auf das hydroelektrische Potenzial. Der größte Anteil dieser Parameter, sowohl relativ als auch absolut, entfällt auf die Auslegung der Rohrleitung.

**Standortauswahl**

Von 65 Parametern, die der Standortwahl zugeordnet sind, haben vier einen direkten Einfluss auf das hydroelektrische Potenzial. Die Wahl des Standortes des Bergeteichs spielt in der konventionellen Bergbauplanung eine entscheidende Rolle. Die Höhenlage, die horizontale Entfernung zum Bergwerk sowie die Topografie sind maßgeblich für die Ermittlung des hydroelektrischen Potenzials. Viele der für die Standortauswahl relevanten Parameter, insbesondere Genehmigungen, Umweltaspekte und Sicherheitsanforderungen, haben lediglich einen indirekten Einfluss auf das Potenzial, da sie meist als ausschließende Faktoren den Standort eingrenzen. Gleichzeitig sind die vier identifizierten Planungsparameter von entscheidender Bedeutung für die Nutzbarkeit der Rohrleitung.

**Auslegung des Bergeteichs**

Im Rahmen der Auslegung des Bergeteichs hat lediglich einer von insgesamt 25 Parametern Einfluss auf das hydroelektrische Potenzial. Die Produktionsrate der Aufbereitungsberge stellt dabei einen wesentlichen Faktor dar, da sie den auftretenden Volumenstrom direkt bestimmt. Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Volumenstrom und hydroelektrischem Potenzial, wobei ein höherer Volumenstrom zu einem höheren Potenzial führt.

**Eigenschaften der Berge**

Bei den Eigenschaften der Berge haben acht von 17 Parametern einen direkten Einfluss auf das hydroelektrische Potenzial, indem diese stark die Fluideigenschaften beeinflussen. Die Mineralogie des abgebauten Rohstoffs beeinflusst grundlegend die Art des Bergematerials und somit auch physikalische Eigenschaften wie die Dichte im festen und flüssigen Zustand sowie die Partikelgröße und -verteilung. Die Fließeigenschaften haben einen direkten Einfluss auf die Nutzbarkeit des Potenzials und die zu erwartenden Verluste.

**Auslegung der Rohrleitung**

In der Auslegung der Rohrleitung haben 20 von 29 Parametern einen direkten Einfluss auf das hydroelektrische Potenzial, was die besondere Relevanz unterstreicht. Die Auslegung der Rohrleitung ist direkt abhängig von der Menge an produzierten Aufbereitungsbergen und hat dadurch einen direkten Einfluss auf den Volumenstrom. Der Verlauf der Rohrleitung sowie die Höhenlage sind von entscheidender Bedeutung für die horizontale Entfernung und die Nettofallhöhe, wodurch wiederum die Verluste und die Nutzbarkeit beeinflusst werden. Die Fließeigenschaften sowie die Dichte des Fluids wirken sich auf dessen Eigenschaften aus. Der Druck am Endpunkt, die Betriebsgeschwindigkeit, die Größe und der Durchmesser der Rohre, die Verbindungselemente, der Spitzenwertfaktor sowie die Drosselstationen beeinflussen insbesondere die Verluste. Die Auslegung der Rohrleitung hat dadurch einen direkten und großen Einfluss auf das hydroelektrische Potenzial.

Tabelle 5-21 stellt den Einfluss der einzelnen Planungsparameter auf die verschiedenen Dimensionen des hydroelektrischen Potenzials anhand eines „x“ dar. Dabei nimmt die Abraumproduktionsrate eine zentrale Rolle bezüglich des aufkommenden Volumenstroms ein. Die realisierbare Fallhöhe ist vor allem von dem Verlauf der Rohrleitung und der Topografie abhängig. Fast alle der Planungsparameter haben einen Einfluss auf die Nutzbarkeit des hydroelektrischen Potenzials.

### *5.5.3. Beeinflussbarkeit der Planungsparameter zur Optimierung des hydroelektrischen Potenzials*

Die Planungskategorie *Bergeteich und Rohrleitung für Aufbereitungsberge* ist ein eigenständiger Bereich innerhalb der Gesamtplanung eines Bergwerks. Die vorgesehene Infrastruktur muss höchsten Sicherheitsanforderungen entsprechen und gleichzeitig einen zuverlässigen sowie wirtschaftlichen Betrieb ermöglichen. Da viele der in der Planung getroffenen Entscheidungen langfristige Auswirkungen haben, kann eine gezielte Beeinflussung und Optimierung der relevanten Planungsparameter im Hinblick auf das hydroelektrische Potenzial in der Regel nur in der frühen Planungsphase erfolgen. Während des laufenden Betriebs sind entsprechende Anpassungen meist nur eingeschränkt möglich.

**Volumenstrom**

*Tabelle 5-20: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf den Volumenstrom zur Planungskategorie „Bergeteich und Rohrleitung für die Aufbereitungsberge“*

| Beeinflussbare Planungsparameter | Nicht beeinflussbare Planungsparameter |
|---|---|
| • - | • Rate der Abraumproduktion (Auslegung Bergeteich)<br>• Berge-Produktion (Auslegung Rohrleitung) |

Sowohl die Abbaurate als auch der Volumenstrom der Aufbereitungsberge sind zentrale Planungsparameter in der Bergwerksplanung und hängen unmittelbar mit der wirtschaftlichen und technischen Auslegung des Bergwerks zusammen. Der Volumenstrom ist dabei linear von der Abbaurate abhängig, was bedeutet, dass eine höhere Abbaurate einen proportional höheren Volumenstrom erfordert. In diesem Zusammenhang spielt das hydroelektrische Potenzial eine untergeordnete Rolle. Eine gezielte Optimierung erscheint daher wenig sinnvoll, da andere Planungsziele im Vordergrund stehen. Dennoch ist die Wahl dieser Parameter maßgeblich für die Auslegung der Rohrleitungen, was wiederum direkte Auswirkungen auf das mögliche hydroelektrische Potenzial hat. Da die entsprechenden Festlegungen jedoch zu einem früheren Zeitpunkt in der Planung getroffen werden, reagiert die Rohrleitungsplanung auf diese Vorgaben, ohne sie aktiv beeinflussen zu können.

*Tabelle 5-21: Planungsparameter der Kategorie „Bergeteich und Rohrleitung für Aufbereitungsberge“ mit direktem Einfluss auf das hydroelektrische Potenzial, eigene Darstellung.*
*x = direkter Einfluss des Parameters auf die Dimension des hydroelektrischen Potenzials*

| Kategorie | Planungsparameter | Volumenstrom | Fluideigenschaften | Fallhöhe & Entfernung | Verluste | Nutzbarkeit |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Standortauswahl | Höhenlage | | | x | | |
| | Horizontale Entfernung des Bergwerks | | | x | | x |
| | Entfernung und Höhenunterschied zum Bergwerk | | | x | | x |
| | Topografie | | | x | | x |
| Auslegung Bergeteich | Abraumproduktionsrate | x | | | | x |
| Eigenschaften der Berge | Rohstoff | | x | | | x |
| | Art des Bergematerials | | x | | | x |
| | Plastizität | | x | | x | x |
| | Feste Dichte | | x | | | |
| | Flüssige Dichte | | x | | | |
| | Rheologisches Verhalten | | x | | x | x |
| | Partikelgröße | | x | | | x |
| | Verteilung der Partikelgröße | | x | | | x |
| Auslegung Rohrleitung | Berge-Produktion (Rohrleitungs-Design) | x | | | | x |
| | Verlauf der Rohrleitung | | | x | x | x |
| | Reibungswiderstand der Rohrleitung | | | | x | x |
| | Höhenlage der Rohrleitung | | | x | | |
| | Maximal zulässige Druckhöhe | | | | | x |
| | Vorgeschriebene Mindestdruckhöhe | | | | | x |
| | Förderdruck am Endpunkt | | | | x | x |
| | Anforderungen an die Pumpe | | | | | x |
| | Betriebsgeschwindigkeit | | | | x | x |
| | Größe und Durchmesser der Rohre | | | | x | x |
| | Rohrverbindungen | | | | x | |
| | Korrosionsbeständigkeit und Rohrrauigkeit | | | | x | x |
| | Fließeigenschaften | | x | | x | x |
| | Dichte der Aufschlämmung | | x | | x | |
| | Spitzenwertfaktor | | | | x | x |
| | Verlässlichkeit | | | | | x |
| | Betriebsbedingungen und Wartung | | | | | x |
| | Drosselstationen für die Energieableitung | | | | x | x |
| | Verbindung von Rohrleitungen | | | | x | |
| | Technische Machbarkeit (Auslegung der Leitung) | | | | | x |

### Fluideigenschaften

*Tabelle 5-22: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf die Fluideigenschaften zur Planungskategorie „Bergeteich und Rohrleitung für die Aufbereitungsberge“*

| Beeinflussbare Planungsparameter | Nicht beeinflussbare Planungsparameter |
|---|---|
| • Art des Bergematerials<br>• Plastizität<br>• Flüssige Dichte<br>• Rheologisches Verhalten<br>• Partikelgröße<br>• Verteilung der Partikelgröße<br>• Fließeigenschaften<br>• Dichte der Aufschlämmung | • Rohstoff<br>• Feste Dichte |

Die Eigenschaften eines Fluids in einer Aufbereitungsanlage hängen unmittelbar vom abgebauten Rohstoff ab, der als Grundlage für das entstehende Fluid dient. Ebenso spielt die Art der spezifischen Verarbeitung und Aufbereitung eine entscheidende Rolle. Der Rohstoff bestimmt, welche Verfahren technisch notwendig oder möglich sind, und diese Verfahren wiederum prägen die Zusammensetzung und Eigenschaften des Fluids, insbesondere die Beschaffenheit des Bergematerials.

Der Rohstoff selbst sowie dessen Dichte sind geologisch festgelegt und daher nicht beeinflussbar. Andere fluidspezifische Eigenschaften lassen sich jedoch innerhalb bestimmter Grenzen anpassen. Solche Anpassungen erfolgen üblicherweise im Spannungsfeld zwischen Zielgrößen wie minimalem Wasserverbrauch, geringem Energieeinsatz, niedrigen Kosten und einer wartungsarmen Auslegung. Insbesondere der Wasseranteil beeinflusst zentrale Eigenschaften des Fluids wie Dichte und Fließverhalten. Ein höherer Wasseranteil verbessert in der Regel die Fließeigenschaften, führt aber gleichzeitig zu einem erhöhten Entwässerungsaufwand im Bergeteich. Daher muss im Einzelfall abgewogen werden, ob eine Anpassung der Fluideigenschaften im Sinne eines hydroelektrischen Potenzials technisch und wirtschaftlich sinnvoll ist.

Bei der Planung neuer Anlagen ist eine solche Optimierung grundsätzlich einfacher umsetzbar. In bestehenden Anlagen sind Anpassungen meist nur im begrenzten Umfang möglich, beispielsweise durch eine Veränderung des Wasseranteils um wenige Prozent.

### Fallhöhe und horizontale Entfernung

*Tabelle 5-23: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf die Fallhöhe und horizontale Entfernung zur Planungskategorie „Bergeteich und Rohrleitung für die Aufbereitungsberge“*

| Beeinflussbare Planungsparameter | Nicht beeinflussbare Planungsparameter |
|---|---|
| • Horizontale Entfernung zum Bergwerk<br>• Höhenunterschied zum Bergwerk<br>• Verlauf der Rohrleitung | • Höhenlage<br>• Topografie<br>• Höhenlage der Rohrleitung |

Die Standortauswahl für den Bergeteich und damit die Festlegung von Höhenlage, Entfernung zum Bergwerk und Höhenunterschied kann während der Planungsphase gezielt beeinflusst werden. Im Vordergrund stehen dabei in der Regel Sicherheitsanforderungen und eine wirtschaftlich sinnvolle Auslegung. Nach der Sicherstellung dieser Aspekte rückt häufig die Energieeffizienz des Transports in den Fokus. Dieser Aspekt überschneidet sich mit dem hydroelektrischen Potenzial und ermöglicht eine entsprechende Optimierung. Zwar sind Topografie und Höhenlage durch die natürlichen Gegebenheiten weitgehend festgelegt, doch der Verlauf der Rohrleitung kann so geplant werden, dass das Gelände

energetisch möglichst vorteilhaft genutzt wird. Eine nachträgliche Anpassung dieser Parameter ist allerdings in den meisten Fällen kaum noch möglich.

Das hydroelektrische Potenzial lässt sich grundsätzlich dann gut nutzen, wenn die Höhendifferenz zwischen Aufbereitungsanlage und Bergeteich möglichst groß ist, ohne dass die horizontale Entfernung übermäßig zunimmt. Da jedoch die örtlichen Bedingungen den Rahmen vorgeben, muss in jedem Einzelfall geprüft werden, ob eine entsprechende Optimierung technisch machbar und wirtschaftlich sinnvoll ist.

### Verluste

*Tabelle 5-24: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf die Verluste zur Planungskategorie „Bergeteich und Rohrleitung für die Aufbereitungsberge“*

| Beeinflussbare Planungsparameter | Nicht beeinflussbare Planungsparameter |
|---|---|
| • Plastizität<br>• Rheologisches Verhalten<br>• Verlauf der Rohrleitung<br>• Reibungswiderstand der Rohrleitung<br>• Betriebsgeschwindigkeit<br>• Größe und Durchmesser der Rohre<br>• Rohrverbindungen<br>• Korrosionsbeständigkeit & Rohrrauigkeit<br>• Fließeigenschaften<br>• Dichte der Aufschlämmung<br>• Spitzenwertfaktor<br>• Drosselstationen für die Energieableitung<br>• Verbindung von Rohrleitungen | • Förderdruck am Endpunkt |

Die Verluste innerhalb einer Rohrleitung werden wesentlich durch die Eigenschaften des transportierten Fluids bestimmt. Diese beeinflussen den Reibungswiderstand und damit den Energiebedarf für den Materialtransport. Auch die technische Auslegung sowie der Betrieb der Rohrleitung haben einen erheblichen Einfluss auf die entstehenden Verluste. Einzelne Parameter, wie etwa der erforderliche Förderdruck am Austrittspunkt, sind durch betriebliche oder prozesstechnische Vorgaben definiert und können nicht beliebig verändert werden.

Die Fließeigenschaften lassen sich innerhalb gewisser Grenzen beeinflussen, müssen jedoch im Gesamtkontext der Anlage sinnvoll abgestimmt sein. Ein erhöhter Wasseranteil verbessert in der Regel das Strömungsverhalten und reduziert die Druckverluste, geht jedoch mit einem höheren Wasserverbrauch einher. Zudem steigt der Energiebedarf für die Rückführung des Wassers nach der Entwässerung der Berge. In der Praxis wird der Wassergehalt daher häufig so eingestellt, dass ein gravimetrischer Transport möglich ist und gleichzeitig ein günstiger Betriebspunkt für die Entwässerung erreicht wird.

Die technische Auslegung der Rohrleitung orientiert sich in der Regel an den Kriterien der Betriebssicherheit, Wartungsfreundlichkeit und Energieeffizienz. Diese Planungsziele stehen in keinem Widerspruch zur Nutzung hydroelektrischer Potenziale. Im Gegenteil: Maßnahmen zur Reduktion von Verlusten, etwa durch Vermeidung unnötiger Biegungen, Reduzierung von Armaturen oder Auswahl eines geeigneten Rohrdurchmessers, tragen auch zur Effizienzsteigerung bei. Darüber hinaus wird angestrebt, den Betrieb möglichst gravimetrisch zu gestalten, um den Einsatz von Pumpen zu vermeiden.

Der Betrieb der Rohrleitung ist entscheidend im Hinblick auf Spitzenwertfaktoren, Sicherheitsanforderungen und Wartungsanforderungen. Hier kann im Rahmen der technischen Machbarkeit optimiert werden, um einen effizienten und energiearmen Materialtransport zu gewährleisten, beispielsweise durch einen gleichmäßigen Volumenstrom und eine sinnvolle Betriebsgeschwindigkeit. Während die Anlage

bereits in Betrieb ist, können hauptsächlich Betriebsparameter angepasst werden. Eine Anpassung der Fließeigenschaften ist ebenfalls möglich, jedoch mit größerem Aufwand und unter Berücksichtigung der komplexen Zusammenhänge mit den vorgelagerten Prozessen.

### Nutzbarkeit

*Tabelle 5-25: Liste der beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Parameter bezogen auf die Nutzbarkeit zur Planungskategorie „Bergeteich und Rohrleitung für die Aufbereitungsberge“*

| Beeinflussbare Planungsparameter | Nicht beeinflussbare Planungsparameter |
|---|---|
| • Horizontale Entfernung zum Bergwerk<br>• Höhenunterschied zum Bergwerk<br>• Art des Bergematerials<br>• Plastizität<br>• Flüssige Dichte<br>• Rheologisches Verhalten<br>• Partikelgröße<br>• Verteilung der Partikelgröße<br>• Verlauf der Rohrleitung<br>• Reibungswiderstand der Rohrleitung<br>• Anforderungen an die Pumpe<br>• Betriebsgeschwindigkeit<br>• Größe und Durchmesser der Rohre<br>• Rohrverbindungen<br>• Korrosionsbeständigkeit & Rohrrauigkeit<br>• Fließeigenschaften<br>• Dichte der Aufschlämmung<br>• Spitzenwertfaktor<br>• Verlässlichkeit<br>• Betriebsbedingungen und Wartung<br>• Drosselstationen für die Energieableitung<br>• Verbindung von Rohrleitungen<br>• Technische Machbarkeit | • Topografie<br>• Rate der Abraumproduktion<br>• Rohstoff<br>• Feste Dichte<br>• Berge-Produktion (Rohrleitungs-Design)<br>• Höhenlage der Rohrleitung<br>• Maximal zulässige Druckhöhe<br>• Vorgeschriebene Mindestdruckhöhe<br>• Förderdruck am Endpunkt |

Die Nutzbarkeit einer Rohrleitung für den Transport von Aufbereitungsbergen im Sinne einer hydroelektrischen Energienutzung hängt von zahlreichen bergbaulichen Planungsparametern ab. Diese Vielfalt an Einflussgrößen verdeutlicht die Komplexität einer solchen Nutzung. Im laufenden Betrieb müssten viele dieser Parameter optimal aufeinander abgestimmt sein, um das hydroelektrische Potenzial technisch und wirtschaftlich sinnvoll nutzen zu können.

Im Rahmen der Planung eines neuen Bergwerks oder einer neuen Rohrleitung bestehen deutlich größere Spielräume, um die Nutzbarkeit gezielt zu verbessern. Dennoch bleiben bestimmte standortspezifische Faktoren wie die Topografie, die Lage der Lagerstätte, der abgebaute Rohstoff, dessen Dichte sowie die Höhenlage unveränderbar. Auch zentrale Parameter der Rohstoffgewinnung, wie die Produktionsrate von Abraum und Aufbereitungsbergen, sind durch das Projekt festgelegt. Hinzu kommen technische Anforderungen an die Rohrleitung, beispielsweise hinsichtlich minimaler und maximaler Betriebsdrücke sowie des erforderlichen Drucks am Endpunkt.

Die Standortwahl kann durch die vertikale und horizontale Entfernung zwischen Bergwerk und Bergeteich das hydroelektrische Potenzial maßgeblich beeinflussen. Dieser Aspekt wird in der konventionellen Planung jedoch meist nachrangig betrachtet, da Sicherheitsanforderungen und Kosteneffizienz Vorrang haben. Fluideigenschaften lassen sich grundsätzlich prozesstechnisch beeinflussen, etwa durch Anpassungen des Wassergehalts. Dabei stehen jedoch stets die Prozessfunktionalität und wirtschaftliche

Effizienz im Vordergrund. In vielen Fällen überschneiden sich diese Anforderungen mit den Zielen einer energetisch optimierten Auslegung.

Die Planung der Rohrleitung zielt auf einen technisch zuverlässigen, energieeffizienten und wartungsarmen Betrieb ab. Auch diese Kriterien sind weitgehend deckungsgleich mit den Anforderungen an eine Nutzung hydroelektrischer Potenziale. Bei Neuanlagen lässt sich die Auslegung der Rohrleitung entsprechend anpassen. In bestehenden Systemen könnten in Einzelfällen vorhandene Druckreduktionssysteme wie Drosselklappen durch Turbinen ersetzt werden, um das vorhandene Potenzial zu nutzen.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Nutzbarkeit einer Rohrleitung für hydroelektrische Zwecke stark vom konkreten Planungsszenario abhängt. Viele Parameter sind prinzipiell beeinflussbar, doch ihre komplexen Wechselwirkungen erschweren eine pauschale Aussage. Eine fundierte Beurteilung ist daher stets im Einzelfall vorzunehmen.

## 5.6. Schlussfolgerungen

Kapitel 5 widmet sich der Untersuchung des Einflusses bergbaulicher Planungsparameter auf das hydroelektrische Potenzial und der Möglichkeiten zur Anpassung, um das Potenzial zu optimieren. Das Kapitel beantwortet damit gezielt die zweite Forschungsfrage:

**„Welche bergbaulichen Planungsparameter beeinflussen das hydroelektrische Potenzial von Bergwerken, und wie können diese optimiert werden?“**

Hierzu werden drei zentrale Planungskategorien analysiert, die den Großteil der Fluidströme aus Kapitel 4 abdecken und aufgrund ihrer Relevanz für die Fluidströme und das energetische Potenzial im Bergbau ausgewählt werden: 1. Frischwasserversorgung und Abgabe von Brauchwasser, 2. die mineralische Aufbereitungsanlage und das betriebliche Wassernetzwerk, sowie 3. der Bergeteich und die Rohrleitungen für Aufbereitungsberge.

Im ersten Schritt werden für jede Planungskategorie die aus Kapitel 4 abgeleiteten Fluidströme zugeordnet und die wesentlichen Planungsparameter aus der einschlägigen Literatur identifiziert. Die ermittelten Parameter werden daraufhin untersucht, wie sie das hydroelektrische Potenzial beeinflussen bezüglich der Fallhöhe, des Volumenstroms, der Verluste und der technischen Machbarkeit. Daraufhin wird analysiert, wie diese Parameter gezielt angepasst werden könnten, um das hydroelektrische Potenzial im Betrieb gezielt zu optimieren.

Insgesamt können 435 Planungsparameter identifiziert werden, von denen 94 einen direkten Einfluss auf das hydroelektrische Potenzial haben. Dies bietet zahlreiche Ansatzpunkte, um durch gezielte Optimierungen das hydroelektrische Potenzial zu erhöhen. Die Ergebnisse zeigen jedoch auch, dass viele Planungsparameter miteinander verknüpft sind und oft mehrere Einflussdimensionen betreffen, wodurch eine isolierte Betrachtung der einzelnen Parameter nur schwer darstellbar ist. Es wird deutlich, dass ein höheres Wasservolumen und eine größere Fallhöhe durchgängig zu einem höheren hydroelektrischen Potenzial führen. Da Bergwerke in der Regel bestrebt sind, den Wasserbedarf zu reduzieren, kann eine Optimierung des hydroelektrischen Potenzials in Richtung größerer Volumenströme zu Zielkonflikten führen und erscheint nicht sinnvoll.

Da der exakte Einfluss einzelner Parameter auf das hydroelektrische Potenzial stark von den spezifischen Bedingungen des jeweiligen Bergwerks abhängt, ist eine detaillierte Einzelfallstudie unerlässlich. Kapitel 6 bietet daher eine praxisorientierte Fallstudie, welche die wirtschaftlichen und technischen Auswirkungen der identifizierten Optimierungsmöglichkeiten in einem realistischen Szenario untersucht und so die theoretischen Überlegungen aus Kapitel 5 konkretisiert. Diese Fallstudie ist für die fundierte Bewertung der Machbarkeit und Rentabilität einer hydroelektrischen Nutzung im Bergbau von zentraler Bedeutung.

# 6. Wirtschaftliche und technische Fallstudie einer Wasserkraftanlage im Bergbau

## 6.1. Einleitung

Im folgenden Kapitel wird eine explorative Fallstudie aufgebaut, um die wirtschaftlichen und technischen Zusammenhänge zur Nutzung von hydroelektrischen Potenzialen im Bergbau zu untersuchen. Im Mittelpunkt stehen dabei neben der wirtschaftlichen Machbarkeit vor allem das Optimierungspotenzial sowie der mögliche Einsatz von Pumpenturbinen in Rohrleitungen für den hydraulischen Transport von Aufbereitungsbergen. Die Fallstudie basiert auf einem realen Anwendungsfall und gliedert sich in drei Teile. Im ersten Teil erfolgt die Aufbereitung der verfügbaren Daten und die Entwicklung eines Modells, das die technischen und wirtschaftlichen Zusammenhänge abbildet. Der zweite Teil analysiert das Optimierungspotenzial dieses Anwendungsfalls unter Berücksichtigung der in Kapitel 5 identifizierten Planungsparameter. Der dritte Teil untersucht in einer explorativen Fallstudie die Möglichkeit, andere Fluide als Wasser hydroelektrisch zu nutzen.

## 6.2. Methodik

Die Grundlage für die Fallstudie in Kapitel 6 ist ein Anwendungsbeispiel einer PaT in einem US-amerikanischen Goldbergwerk. Die Methodik zielt darauf ab, die dritte Forschungsfrage der Arbeit zu beantworten (vgl. Kapitel 1.4):

**„Unter welchen wirtschaftlichen und technischen Rahmenbedingungen können hydroelektrische Potenziale im Bergbau genutzt werden und wie können diese Potenziale optimiert werden?“**

Darüber hinaus verfolgt dieses Kapitel das dritte Ziel der Dissertation: die Ableitung wirtschaftlicher und technischer Rahmenbedingungen für die Nutzung unkonventioneller hydroelektrischer Potenziale im Bergbau. Die Fallstudie hat einen explorativen Charakter und wird in drei Szenarien unterteilt:

(i) **Szenario A – Basismodell:** In diesem Szenario wird ein Modell auf Grundlage der verfügbaren, teilweise unvollständigen Daten entwickelt. Es wird davon ausgegangen, dass der betrachtete Anwendungsfall technisch und wirtschaftlich umsetzbar ist. Zur Analyse werden verschiedene Betriebspunkte simuliert, um ein wirtschaftliches Modell zu erstellen, das den Einfluss unterschiedlicher Annahmen untersucht.

(ii) **Szenario B – Optimierungspotenzial:** In diesem Szenario wird der Einfluss veränderter technischer Parameter auf die Leistung und den langfristigen wirtschaftlichen Erfolg analysiert. Dabei werden die in Kapitel 5 identifizierten Planungsparameter und Optimierungsmöglichkeiten genutzt und jeweils die Auswirkung untersucht und quantifiziert.

(iii) **Szenario C – Hydraulischer Materialtransport:** In diesem Szenario wird untersucht, ob anstelle von Wasser auch andere Fluide wie beispielsweise Aufbereitungsberge hydroelektrisch genutzt werden können. Dabei wird eine grundsätzliche technische Machbarkeit unterstellt, ohne Faktoren wie Effizienz oder Standzeit zu kennen.

Im Folgenden wird zuerst der verwendete Datensatz beschrieben, dann die grundlegenden technischen und wirtschaftlichen Berechnungen dargelegt, und anschließend für jedes Szenario der Aufbau und das Vorgehen beschrieben.

### *6.2.1. Datensatz*

Die Datenbasis für die vorliegende Fallstudie stammt von der Firma Easy Hydro Ltd. und darf in anonymisierter Form für diese Forschungsarbeit verwendet werden. Easy Hydro ist ein auf unkonventio-

nelle Wasserkraftlösungen spezialisiertes Unternehmen mit über zehn Jahren Erfahrung. Die Firma wurde am Trinity College Dublin gegründet und bietet kompakte, modulare Wasserkraftwerke an, die auf standardisierten Komponenten basieren. Dadurch entfällt die Notwendigkeit individueller Turbinenkonstruktionen, was die Wirtschaftlichkeit erhöht und eine schnelle Installation sowie einfache Wartung ermöglicht. Easy Hydro hat bereits drei Anlagen erfolgreich im Bergbau installiert:

(i) Eine Pumpenturbine in einer Fallleitung eines untertägigen Zinkbergwerks in Irland.
(ii) Eine Pumpenturbine an dem Auslass der Wasseraufbereitung eines untertägigen Zinnbergwerks im Vereinigten Königreich.
(iii) Eine Pumpenturbine am Auslass eines Eindickers in der mineralischen Aufbereitung eines Bergwerks in Italien.

In Tabelle 6-1 sind die Kennzahlen der drei Anlagen aufgeführt. Die installierte Leistung der PaT liegt zwischen 11 und 88 kW bei einem Volumenstrom zwischen 15 und 190 l/s. Die Fallhöhe der drei Wasserkraftanlagen liegt zwischen 8 und 210 m.

*Tabelle 6-1: Kennzahlen der Wasserkraftanlagen von Easy Hydro im Bergbau, aus Easy Hydro 2023a*

| **Kategorie** | **Anlage 1** | **Anlage 2** | **Anlage 3** |
|---|---|---|---|
| **Land/Region** | Irland | UK | Italien |
| **Anwendung** | Frischwasser Fallleitung | Auslauf an Wasseraufbereitung | Auslauf eines Absetzbeckens |
| **Fallhöhe [m]** | 210 | 44 | 8-10 |
| **Volumenstrom [l/s]** | 15-22 | 75-289 | 140-190 |
| **Leistung** | 30 kW | 88 kW | 11 kW |

Aus diesen Projekten lassen sich mehrere Annahmen ableiten:

- Die installierten Anlagen sind der Kleinwasserkraft zuzuordnen.
- Ein wirtschaftlicher Betrieb ist auch bei geringen Leistungen unter 100 kW möglich.
- Fallhöhen < 10 m und Volumenströme < 50 l/s können energetisch genutzt werden.
- Pumpenturbinen eignen sich für Prozesswässer mit leichten Verunreinigungen und Sedimenten.
- Die modulare Bauweise ist skalierbar und auf verschiedene Anwendungen übertragbar.

Die Daten für diese Arbeit stammen aus einer technischen Machbarkeitsstudie zur Installation einer Pumpenturbine in einem Goldbergwerk. Es handelt sich um ein modernes, großtechnisches Goldbergwerk in den Vereinigten Staaten, das mit einem Laugungsverfahren arbeitet. Da die Daten der Machbarkeitsstudie nur in anonymisierter Form verwendet werden dürfen, können keine Details zum Namen, genauen Standort oder vollständigen Prozessablauf des betrachteten Bergwerks veröffentlicht werden. Aufgrund des Aufbaus der Fallstudien sind die exakten Details des Bergwerks unerheblich, da bereits in den Kapiteln 4 und 5 die Potenzialkategorien und Planungsparameter theoretisch und verallgemeinerbar hergeleitet werden. Vielmehr ist wichtig, dass die Daten einen spezifischen und realen Fall darstellen, für den auf Grundlage der gegebenen Informationen die technische und wirtschaftliche Machbarkeit angenommen werden kann.

Die betrachtete Anlage nutzt zwei parallel geschaltete Pumpenturbinen, die in eine Druckrohrleitung installiert sind. Zweck der Leitung ist der gravimetrische Transport der schwangeren Laugungsflüssigkeit vom Laugungsbecken an der Laugungshalde zur weiteren Verarbeitung in die Aufbereitungsanlage. Der betrachtete Fluidstrom entspricht der Kategorie des *betrieblichen Wassernetzwerks* und wird in Kapitel 4.4 durch den Fluidstrom *F21 Laugungsanlage – sonstige Anlagen* beschrieben.

In der Studie wird das hydroelektrische Potenzial durch die Nettofallhöhe und den zu erwartenden Volumenstrom berechnet. Darauf aufbauend wird die passende Turbinenkonfiguration ausgewählt und die zusätzlichen Komponenten werden ausgelegt. Der Aufbau der Wasserkraftanlage ist in Abbildung 6-1

skizziert, am unteren Ende der Druckrohrleitung ist ein Ventil installiert, um den Volumenstrom in beiden Pumpenturbinen zu steuern.

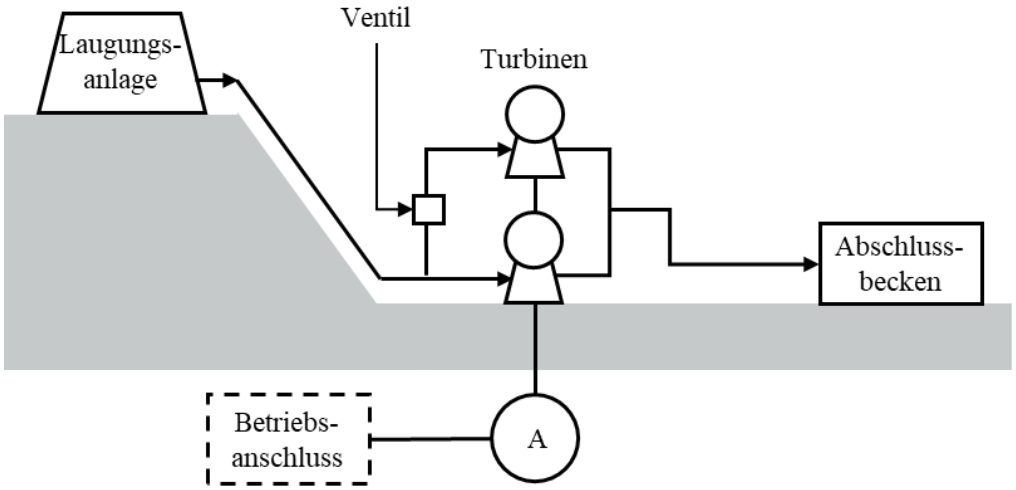



*Abbildung 6-1: Skizze der technischen Planung der zugrunde liegenden Studie, eigene Darstellung*

Die Rohrleitung hat eine Nettofallhöhe von maximal 174 m über eine Länge von 1432 m. Der Volumenstrom schwankt zwischen 536 und 858 l/s, abhängig vom Betriebszustand. Die Nettofallhöhe variiert in Abhängigkeit des Durchflusses zwischen 110 und 174 m und ist grafisch als $H_{net}(Q)$-Funktion dargestellt (vgl. Abbildung 6-3). Der Rohrdurchmesser lässt sich anhand der Dimensionierung der Ventile mit 24 Inch (ca. 61 cm) abschätzen.

Die beiden identischen Turbinen liefern je nach Volumenstrom eine kombinierte elektrische Leistung von 535 kW bei 536 l/s bis zu 916 kW bei 858 l/s. Durch den parallelen Betrieb der beiden PaT kann der schwankende Volumenstrom effizient genutzt werden. Zur Steuerung der Anlage ist ein Automatisierungssystem installiert, das Start und Stopp abhängig vom Volumenstrom regelt und dabei wichtige Betriebsdaten wie Druck und Energieerzeugung überwacht. Ein Sicherheitssystem schützt die Anlage vor Schäden bei Netzstörungen. Die Anlage umfasst außerdem Steuerungsventile vor den Turbinen und ein Ventil in der Bypassleitung sowie ein weiteres Sicherheitsdruckventil. Der Aufbau der Anlage ist in Abbildung 6-2 dargestellt. Die Komponenten in Kontakt mit der Laugungsflüssigkeit sind aus Material gefertigt, welches Cyanidlösungen widerstehen kann. Die Turbinen sind aus rostfreiem Stahl gefertigt.

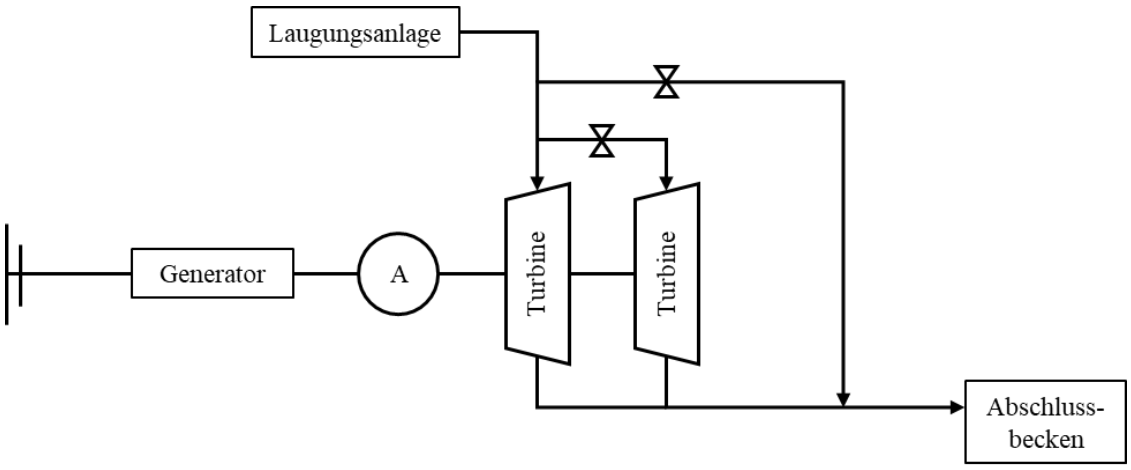



*Abbildung 6-2: Skizze der technischen Anlage und Komponenten, eigene Darstellung*

Die Investitionskosten der Anlage belaufen sich auf etwa 630.000 bis 750.000 USD. Die Spannbreite ergibt sich aus zwei unterschiedlichen Ausführungsoptionen sowie Preisunsicherheiten aufgrund von Inflation und Marktdynamik. Die Konstruktion und Inbetriebnahme kosten zusätzlich 31.000 bis 43.000

USD. Die erwartete Standzeit der Anlage beträgt nach Angaben von Easy Hydro mehr als 30 Jahre. Für Betrieb und Wartung müssen auf Literaturbasis eigene Annahmen getroffen werden.

Für die Anlage sind drei Betriebspunkte definiert, die abhängig vom Volumenstrom den jeweiligen Betriebsmodus und die Leistung des Systems angeben. Der Betriebsmodus unterscheidet sich dabei im Betrieb von nur einer oder beiden Turbinen, mit oder ohne Bypass. Die Daten der drei Betriebspunkte sind in Tabelle 6-2 gelistet.

Die Daten stellen einen realen, kommerziellen und funktionsfähigen Einsatz einer Pumpenturbine im Bergbau dar. Sie bilden die Grundlage für die in Szenario A entwickelte Fallstudie. Alle verwendbaren Parameter sind in Anhang 9 aufgeführt.

*Tabelle 6-2: Betriebspunkte (BP) der Fallstudie, eigene Darstellung*

| Parameter | Symbol | Einheit | BP1 | BP2 | BP3 |
|---|---|---|---|---|---|
| **Leistung gesamt** | $P_{Gesamt}$ | kW | 535 | 760 | 916 |
| **Leistung pro Turbine** | $P_{Turbine}$ | kW | 535 | 380 | 458 |
| **Turbinen aktiv** | - | # | 1 | 2 | 2 |
| **Teilw. Bypass** | - | - | ja | nein | nein |
| **Volumenstrom** | $Q_{Gesamt}$ | m³/s | 0,536 | 0,804 | 0,858 |

### *6.2.2. Grundlegende technische und wirtschaftliche Berechnungen*

Die Berechnungen der vorliegenden Fallstudie orientieren sich an den Ausführungen von Novara und McNabola (2021). Dies ist insofern relevant, als der Erstautor zugleich Geschäftsführer von Easy Hydro ist und die Daten der Fallstudie von Easy Hydro (2023b) auf diesen methodischen Grundlagen beruhen. Demnach wird zuerst der Volumenstrom betrachtet, der für das betrachtete System mit einer Bandbreite von 0,536 bis 0,858 m³/s angegeben ist. Die Bruttofallhöhe sowie die Druckverluste sind in den bereitgestellten Unterlagen nicht explizit ausgewiesen. Allerdings lässt sich die Nettofallhöhe in Abhängigkeit vom Volumenstrom dem bereitgestellten $H_{net}(Q)$-Diagramms (vgl. Abbildung 6-3) entnehmen. Diese Abhängigkeit wird anhand der Hazen-Williams-Gleichung ermittelt:

$$S = \frac{7.8828 * Q^{1,852}}{0,7385 * C^{1,852} * D^{4,8704}} \tag{6-1}$$

$S$ ist dabei das Gefälle der Rohrleitung (m/m), $Q$ ist der Volumenstrom (m³/s), $C$ ist der Hazen-Williams Koeffizient in Abhängigkeit der Rohrrauigkeit und $D$ (m) ist der Durchmesser der Rohrleitung. Mit der Nettofallhöhe $H_{net}$ (m) in Abhängigkeit zum Volumenstrom $Q$ (m³/s) kann die theoretische Turbinenleistung $P_{theo}$ (W) berechnet werden:

$$P_{theo} = \rho * g * H_{net} * Q \tag{6-2}$$

Wobei $\rho$ die Dichte des Fluids (kg/m³) und $g$ die Gravitationskonstante (m/s²) ist. Aus dem $H_{net}(Q)$-Diagramm (vgl. Abbildung 6-3) lässt sich mit einer linearen Regression die Nettofallhöhe zu jedem beliebigen Volumenstrom bestimmen. Die hydraulischen Verluste in der Zuleitung werden bereits durch die Verwendung von der Nettofallhöhe berücksichtigt. Soll die elektrische Leistung $P_{el}$ berechnet werden, muss der Wirkungsgrad der Turbine $\eta_T$ berücksichtigt werden:

$$P_{el} = P_{theo} * \eta_T \tag{6-3}$$

Mit der Betriebszeit $t$ (h) kann daraus die erzeugte Energie berechnet werden:

$$E = P_{el} * t \tag{6-4}$$

Der Erlös oder die Einsparungen $R$ (USD) können mit dem Verkaufs- bzw. Einkaufspreis der Energie $p_e$ (USD/kWh) berechnet werden:

$$R = E * p_e \tag{6-5}$$

In den Vereinigten Staaten, dem Standort der vorliegenden Fallstudie, unterscheiden sich Einkaufs- und Verkaufspreise für elektrische Energie in der Regel deutlich. Die Preisstruktur ist regional unterschiedlich und muss entsprechend berücksichtigt werden. Ob der erzeugte Strom in das öffentliche Netz eingespeist oder direkt im Betriebsnetz des Bergwerks verwendet wird, hängt von mehreren Faktoren ab. Ein entscheidender Aspekt ist der lokale Energiepreis. In vielen Regionen der USA liegt der durchschnittliche Einkaufspreis bei etwa 0,07 USD/kWh, während der erzielbare Verkaufspreis häufig nur bei rund 0,03 USD/kWh liegt (U.S. Energy Information Administration 2023). Daraus ergibt sich ein deutlicher wirtschaftlicher Anreiz für die Eigennutzung des erzeugten Stroms, sofern das interne Netz dazu geeignet ist.

Bei hohen erzeugten Leistungen und starker Fluktuation muss geprüft werden, ob das betriebsinterne Netz die zusätzliche Energie aufnehmen kann, ohne Instabilitäten zu verursachen. Solche Analysen lassen sich beispielsweise mit der Simulationssoftware „Pandapower“ durchführen, wie im Projekt Smart$H_2$OEnergy demonstriert wird (Feldmann 2023). Die Ergebnisse dieses Projekts zeigen, dass bei großen Bergwerksstandorten mit einer täglichen Verarbeitungsmenge von etwa 50.000 Tonnen Einspeisungen von bis zu 5 MW in das Betriebsnetz in der Regel problemlos möglich sind. Daher wird in der vorliegenden Fallstudie angenommen, dass sowohl die Netzeinspeisung als auch die Eigennutzung technisch realisierbar sind, solange die maximale Einspeiseleistung 5 MW nicht überschreitet.

Um die wirtschaftlichen Aspekte abschließend zu beurteilen, werden der Nettobarwert (NPV) und der interne Zinsfuß (IRR) berechnet. Der NPV berechnet sich mit dem Cashflow $CF_t$ im Jahr $t$, der Diskontierungsrate $r$ und der Anzahl an Jahren $n$ nach:

$$NPV = \sum_{t=0}^{n} \frac{CF_t}{(1+r)^t} \tag{6-6}$$

Der interne Zinsfuß $IRR$ ist die Rendite, bei dem der NPV aller Jahre genau 0 ist, und berechnet sich mit folgender Gleichung:

$$NPV = \sum_{t=0}^{n} \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} = 0 \tag{6-7}$$

Die Stromgestehungskosten (eng. Levelized Cost of Energy (LCOE)) geben die Kosten zur Erzeugung von Energie einer Energieerzeugungsanlage über deren Lebensdauer an. Die LCOE lassen sich mit folgender Formel berechnen:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^{n} \frac{C_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{n} \frac{E_t}{(1+r)^t}} \tag{6-8}$$

### *6.2.3. Szenario A: Aufbau des Basisszenarios*

Die Datengrundlage für das Basisszenario A basiert auf der zuvor beschriebenen Machbarkeitsstudie von Easy Hydro. Diese bestätigt die technische Machbarkeit des Einsatzes einer Pumpenturbine in einer Druckleitung zur Förderung von Laugungslösung in einem Goldbergwerk in Nevada, USA. Allerdings enthält die Studie keine vollständigen Angaben zu allen technischen Parametern, die für eine detaillierte Analyse erforderlich wären.

Zwar werden Informationen zum eingesetzten Equipment sowie beispielhafte Betriebspunkte mit zugehörigen Leistungswerten bereitgestellt, eine vollständige Dokumentation aller relevanten Größen und Berechnungsansätze liegt jedoch nicht vor. Aus diesem Grund müssen fehlende technische Parameter aus den vorhandenen Angaben abgeleitet werden. Die wirtschaftliche Bewertung erfolgt auf Grundlage ergänzender Annahmen und eigener Berechnungen.

Die Machbarkeitsstudie enthält ein Diagramm (vgl. Abbildung 6-3), das die Beziehung zwischen Nettofallhöhe und Volumenstrom grafisch darstellt. Die Nettofallhöhe berücksichtigt bereits auftretende Druckverluste und repräsentiert somit das technisch nutzbare Energiepotenzial. Da keine explizite Funktionsbeschreibung dieser Beziehung angegeben ist, erfolgt eine mathematische Annäherung durch eine Regressionsanalyse basierend auf den im Diagramm dargestellten Werten.

Aus dem $H_{net}(Q)$-Diagramm in Abbildung 6-3 lässt sich mit einer polynomialen Regression die Nettofallhöhe zu jedem Volumenstrom $Q$ zwischen dem angegebenen maximalen und minimalen Volumenstrom empirisch wie folgt bestimmen:

$$H_{net}(Q) = 16{,}555 * Q^2 - 1{,}75 * Q + 171{,}61 \tag{6-9}$$

Der Wirkungsgrad für die 3 Betriebspunkte wird berechnet, indem die theoretische Leistung mit der angegebenen Leistung im jeweiligen Betriebspunkt verglichen wird.

$$\eta = \frac{P_{elek}}{P_{theo}} = \frac{P_{elek}}{\rho * g * H_{net}(Q) * Q} \tag{6-10}$$

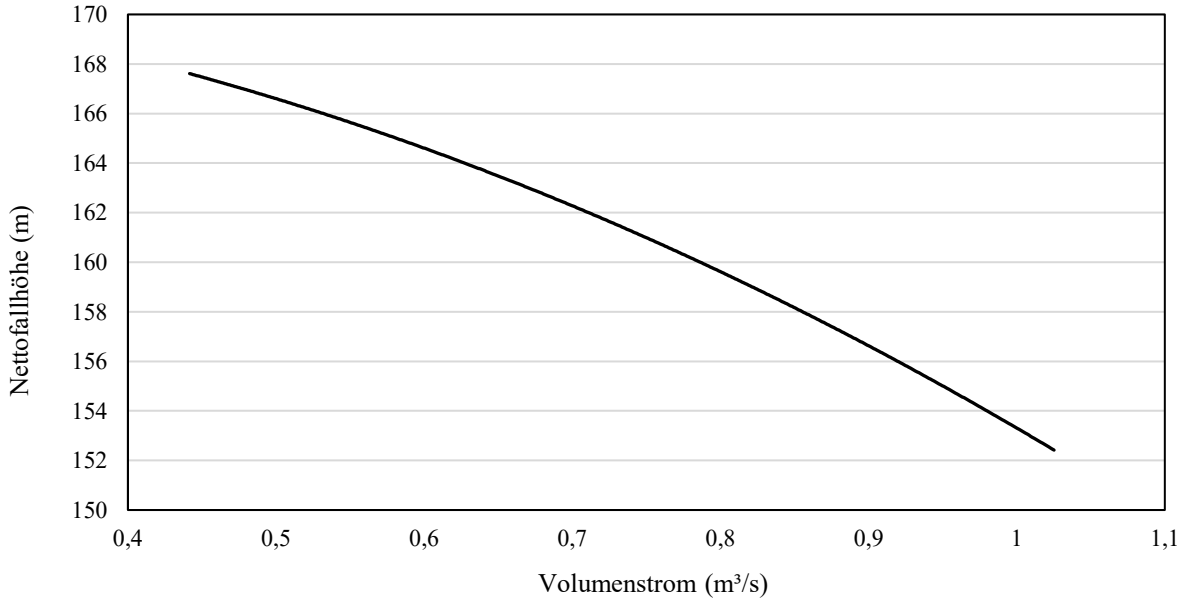



*Abbildung 6-3: Verfügbare Nettofallhöhe (m) in Abhängigkeit vom Volumenstrom (m³/s), eigene Darstellung nach Easy Hydro 2023b*

Die ökonomische Analyse der Fallstudie basiert auf einer Kostenabschätzung, die als verlässlich einzustufen ist. Dies liegt vor allem daran, dass vergleichbare Projekte bereits erfolgreich von Easy Hydro umgesetzt wurden und somit belastbare Erfahrungswerte vorliegen. Darüber hinaus kommen ausschließlich handelsübliche, marktverfügbare Komponenten zum Einsatz, die keiner individuellen Sonderanfertigung bedürfen. Dies erleichtert nicht nur die Planung, sondern erhöht auch die Prognosegenauigkeit hinsichtlich der Investitionskosten. Auf dieser Grundlage wird eine Berechnung des Investitionsszenarios durchgeführt. Die Wirtschaftlichkeit des Projekts hängt maßgeblich von der Anlagenverfügbarkeit, den jährlichen Betriebsstunden sowie dem Volumenstrom ab. Daher werden verschiedene Kombinationen dieser Parameter analysiert.

Im ersten Schritt erfolgt die Berechnung des potenziellen jährlichen Energieertrags in kWh. Dabei werden die bekannten Betriebspunkte zur Bestimmung der Systemleistung herangezogen und mit unterschiedlichen Verfügbarkeiten kombiniert. Die daraus resultierenden Energieerträge bilden die Grundlage für die nachgelagerte Wirtschaftlichkeitsbewertung, in der verschiedene Betriebsszenarien modelliert werden. Die ökonomische Analyse umfasst wesentliche Kennzahlen wie den Nettobarwert, den internen Zinsfuß sowie die Stromgestehungskosten. Abschließend wird das entwickelte NPV-Modell einer Sensitivitätsanalyse unterzogen, um die Robustheit der wirtschaftlichen Ergebnisse zu evaluieren und die Auswirkungen potenzieller Änderungen in den Annahmen zu quantifizieren. Die verwendeten Eingabeparameter, Annahmen und Ergebnisse der Fallstudie sind in Tabelle 6-3 zusammengefasst.

*Tabelle 6-3: Eingabeparameter, Annahmen und in der Fallstudie zu berechnende Werte, eigene Darstellung*

| **Eingabeparameter** | | **Einheit** | **Wert** |
|---|---|---|---|
| Technisch | Durchfluss | m³/s | 0,536-0,858 |
| | Nettofallhöhe | m | 110-174 |
| | Dichte des Fluids | kg/m³ | 1000 |
| | Länge der Rohrleitung | m | 1432 |
| | Systemleistung max. | kW | 916 |
| | Systemleistung min. | kW | 535 |
| | Standzeit Kraftwerk | a | 30 |
| Ökonomisch | Turbinen | USD | 280.000 |
| | Automatisierung | USD | 230.000 |
| | Rohrbau | USD | 240.000 |
| | Planung | USD | 43.000 |
| **Annahmen** | | **Einheit** | **Wert** |
| Technisch | Verfügbarkeit | % | < 98,6 |
| | Standzeit PaT | a | 15 |
| Ökonomisch | Strompreis | ct/kWh | 8,5 |
| | Diskontierungszinssatz | % | 7,5 |
| | Jährliche Inflationsrate | % | 2,1 |
| | Betriebskosten | % | 5 |
| | Wartungskosten | % | 10 |
| **Berechnungen** | | **Einheit** | **Formel** |
| Technisch | Jährlicher Energieertrag | kWh/a | (6-4) |
| | Wirkungsgrad | % | (6-10) |
| | Nettofallhöhe | m | (6-9) |
| Ökonomisch | Nettobarwert | USD | (6-6) |
| | Stromgestehungskosten | USD/kWh | (6-8) |
| | Interner Zinsfuß | % | (6-7) |

Im Rahmen der wirtschaftlichen Analyse ist es erforderlich, Annahmen zu fehlenden Daten zu treffen. Insbesondere betreffen diese die Betriebs- und Wartungskosten, die Inflation, den Diskontierungszinssatz, den Strompreis sowie die Einspeisevergütung.

Die zukünftige Entwicklung des Industriestrompreises ist stark vom Standort des betrachteten Goldbergwerks abhängig, für den der Bundesstaat Nevada angenommen wird. Nach Angaben der U.S. Energy Information Administration (EIA) lag der durchschnittliche Industriestrompreis in Nevada in den vergangenen Jahren zwischen 4,8 und 12,72 US-Cent pro Kilowattstunde. Diese Bandbreite resultiert aus Schwankungen bei den Erdgaspreisen sowie der zunehmenden Integration erneuerbarer Energien in den Energiemix. So stieg der Preis zwischen Dezember 2021 und September 2022 signifikant von 5,35 auf 11,28 ct/kWh (U.S. Energy Information Administration 2024).

Prognosen deuten darauf hin, dass sich der Preis langfristig in einem Bereich zwischen 8 und 9 ct/kWh stabilisieren könnte. Allerdings können externe Einflüsse wie geopolitische Spannungen oder extreme Wetterereignisse kurzfristig zu erheblichen Abweichungen führen (U.S. Energy Information Administration 2023). Für die Fallstudie wird ein durchschnittlicher Strompreis von 8,5 ct/kWh angenommen. Dieser Wert wird um einen moderaten jährlichen Anstieg in Höhe der erwarteten Inflationsrate ergänzt, um potenzielle Entwicklungen über den Betrachtungszeitraum realistisch abzubilden.

Im Bundesstaat Nevada existiert gegenwärtig keine spezifische Einspeisevergütung für Strom, der aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen wird. Projekte, die auf die Nutzung erneuerbarer Energiequellen abzielen, profitieren jedoch von Steuervorteilen, sodass insbesondere großangelegte Vorhaben von der Erzeugung oder Nutzung erneuerbarer Energie profitieren können (Nevadas Governors´s Office of Energy 2021). Der wirtschaftliche Wert erneuerbarer Energie wird daher anhand des geltenden Marktpreises ermittelt.

Für den verwendeten Diskontierungszinssatz werden Referenzwerte aus der Literatur herangezogen. Ovalle (2020) gibt für erneuerbare Energieprojekte in den Vereinigten Staaten einen Satz von 6,66 % an, für Bergbauprojekte 7,5 %. Da es sich bei der Fallstudie um eine Kombination aus beiden Bereichen sowie um eine vergleichsweise unkonventionelle Technologie handelt, wird konservativ der höhere Satz von 7,5 % verwendet. Die langfristige Inflationsrate in den USA beträgt laut statista (2024) etwa 2,1 %.

Weitere zentrale Annahmen betreffen die Lebensdauer und die Betriebskosten der Anlage. Laut Angaben von Easy Hydro liegt die Lebensdauer der Gesamtanlage bei mindestens 30 Jahren, was mit den Angaben von Girma (2016) übereinstimmt. Die Lebensdauer der Pumpenturbinen wird in Anlehnung an Kramer et al. (2018) mit 15 Jahren angenommen.

In der Literatur finden sich unterschiedliche Angaben zu Betriebs- und Wartungskosten von Wasserkraftanlagen mit Pumpenturbinen. Während Kramer et al. (2018) für kleinere Anlagen rund 600 € pro Jahr (12 Stunden pro Jahr mit je 50 € pro Stunde) angeben, liegen die Schätzwerte für größere Anlagen je nach Quelle zwischen 1-4 % nach Alawadhi et al. (2023) und bis zu 5 % Betriebskosten und 10 % Wartungskosten nach Motwani et al. (2013). In Anbetracht der technischen Komplexität sowie der bergbaulichen Umgebung werden für eine konservative Betrachtung die höchsten angegebenen Werte verwendet. Diese Einschätzung wird durch Novara und McNabola (2021) gestützt, die auf den höheren Steuerungsaufwand bei Pumpenturbinen hinweisen.

Zur Verfügbarkeit der Anlage liegen keine einheitlichen Angaben vor. Neben der technischen Verfügbarkeit der Turbinen ist auch die durch den bergbaulichen Produktionsprozess bedingte Verfügbarkeit des Volumenstroms zu berücksichtigen. Die theoretische Verfügbarkeit von Pumpenturbinen wird in der Literatur mit 98,6 % nach Nasir et al. (2023) bzw. 81,6 % bei Kramer et al. (2018). angegeben. Aufgrund dieser hohen Streuung und der projektspezifischen Rahmenbedingungen kann kein allgemeingültiger Wert angesetzt werden. Daher erfolgt die Bewertung im Rahmen mehrerer Betriebsszenarien mit unterschiedlichen Annahmen zur Verfügbarkeit.

Die getroffenen Annahmen sind insgesamt konservativ gewählt, um eine zu optimistische Abschätzung der Wirtschaftlichkeit zu vermeiden. Die anschließende Sensitivitätsanalyse ermöglicht eine detaillierte Bewertung der Auswirkungen einzelner Parameter und erhöht die Aussagekraft der ökonomischen Betrachtung.

### *6.2.4. Szenario B: Untersuchung des Optimierungspotenzials*

In der wissenschaftlichen Literatur finden sich zahlreiche Arbeiten zur optimalen Auswahl von Pumpenturbinen für Kleinwasserkraftwerke sowie zur Bestimmung des idealen Betriebspunkts (vgl. Amelio et al. (2020), Carravetta et al. (2018), Binama et al. (2017), Jemal und Haile (2019)). Die Fallstudie in Szenario B basiert auf der Annahme, dass sich für jeden spezifischen Anwendungsfall ein geeigneter Betriebspunkt sowie eine passende Pumpenturbinenlösung identifizieren lassen, die sich proportional zum Basisszenario A verhält.

Im Vergleich zu anderen Anwendungsfällen bietet der Bergbau den Vorteil, dass zentrale Parameter potenziell angepasst werden können. Dadurch ergibt sich ein signifikanter Einfluss auf das hydroelektrische Potenzial. Der Fokus der Untersuchung in Szenario B liegt daher nicht auf der Auswahl der Turbine, sondern auf der gezielten Veränderung bergbaulicher Planungsparameter zur Ausschöpfung von Optimierungspotenzialen. Ziel dieser Untersuchung ist es, die Plausibilität von Parameteränderungen zu evaluieren. Die untersuchten Planungsparameter wirken sich auf eine oder mehrere Dimensionen des hydroelektrischen Potenzials aus. Die Quantifizierung dieser Wirkung erlaubt die Ableitung ihres monetären Werts sowie die Bestimmung der maximal zulässigen Kosten für eine wirtschaftlich sinnvolle Umsetzung.

Szenario B untersucht auf dieser Grundlage den Einfluss ausgewählter Planungsparameter auf die Ergebnisse aus Szenario A. Der Fokus liegt dabei auf dem Optimierungspotenzial, das sich durch realisierbare Anpassungen ergeben kann. Die Untersuchung basiert auf einem Betriebsszenario, das von einer jährlichen Energieproduktion von 6.000.000 kWh ausgeht. Die durchschnittliche Systemleistung über das Jahr beträgt hierbei 805,80 kW, bei einer angenommenen Verfügbarkeit von 85 %.

Als Erstes werden die in Kapitel 5 identifizierten, für den Anwendungsfall relevanten Planungsparameter herangezogen. Diese betreffen insbesondere die Aufbereitungsanlage sowie das innerbetriebliche Wassernetzwerk, wie in Kapitel 5.3 erläutert. Ziel ist es zu untersuchen, welche technischen und wirtschaftlichen Größen durch die Veränderung dieser Parameter beeinflusst werden können. Zu berücksichtigen ist dabei, dass grundlegende infrastrukturelle Entscheidungen, etwa die räumliche Anordnung der Anlagen, aufgrund der bestehenden Rohrleitungsführung und installierten Systeme nicht mehr veränderbar sind. Die Untersuchung beschränkt sich daher auf Parameter, die innerhalb dieser Rahmenbedingungen angepasst werden können. Planungsparameter ohne direkten Einfluss auf die technischen oder wirtschaftlichen Aspekte der Fallstudie werden in dieser Analyse nicht weiter betrachtet. Die relevanten Parameter werden im Hinblick auf ihre jeweilige Beeinflussbarkeit dargestellt (vgl. Tabelle 6-8). Dabei wird beschrieben, ob und in welchem Ausmaß sie in der bereits bestehenden Anlage verändert werden können, um das hydroelektrische Potenzial zu steigern.

Die Auswertung von Szenario B ermöglicht Rückschlüsse über die Beeinflussbarkeit der einzelnen Parameter. Im Rahmen der Analyse erfolgt eine vollständige Kosten-Nutzen-Bewertung. Diese ermittelt den Einfluss von Parameterveränderungen auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems. Es wird untersucht, welche Bestandteile der technischen und wirtschaftlichen Berechnungen durch die jeweilige Parametervariation beeinflusst werden und wie sich diese Änderungen in den wirtschaftlichen Kennzahlen widerspiegeln. Die Bewertung basiert auf dem in Szenario A entwickelten NPV-Modell. Die daraus abgeleiteten Erkenntnisse dienen als Grundlage für fundierte Entscheidungen hinsichtlich potenzieller technischer und wirtschaftlicher Anpassungen.

### *6.2.5. Szenario C: Energetische Nutzung von Fluidströmen für den hydraulischen Materialtransport*

Im Szenario C dieser Fallstudie liegt der Fokus auf den wirtschaftlichen und technischen Rahmenbedingungen, die erfüllt sein müssen, um die Potenzialkategorie des *hydraulischen Materialtransports* erfolgreich umzusetzen. Die grundlegenden Bedingungen der Fallstudie bleiben dabei unverändert, jedoch wird als Fluid ein typisches Gemisch aus Aufbereitungsbergen angenommen, wie es im hydraulischen Feststofftransport üblich ist. Die Untersuchung analysiert die Auswirkungen dieses veränderten Fluids auf das Gesamtsystem. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage, wie sich wirtschaftliche Kennzahlen bei variablen Verlusten und unterschiedlichem Wirkungsgrad entwickeln. Ziel ist es, herauszufinden, unter welchen Bedingungen ein wirtschaftlich tragfähiger Einsatz möglich ist.

In der Praxis erfordert die technische Bewertung der Wechselwirkungen zwischen einem spezifischen Fluid und einer Turbine in der Regel eine numerische Strömungssimulation (CFD-Simulation), da die Fließeigenschaften erheblichen Einfluss auf den Betriebspunkt und die Verluste haben. In dieser Fallstudie wird ein vereinfachter Ansatz gewählt, bei dem die Fließeigenschaften entlang eines Kontinuums von Wasser bis nicht mehr pumpfähig angenommen werden, um den möglichen Einsatzbereich abzuleiten.

In der Literatur finden sich Hinweise darauf, dass die Nutzung von pumpfähigen Aufbereitungsbergen technisch möglich ist (Mukerji 2017; Mühlmann et al. 2019; Rother 2016; Li 2022; Kawalec und Król 2021; Odegard 2009; bnamericas 2015). Rossi et al. (2018) zeigen, dass sich der optimale Betriebspunkt von Pumpenturbinen bei erhöhter Viskosität in Richtung eines höheren Volumenstroms verschiebt. Es wird beobachtet, dass sich die Reibungsverluste bei höheren Viskositäten im Teillastbereich erhöhen, was zu einer Verringerung des Wirkungsgrades führt. Umgekehrt zeigen Versuche mit Glycerin zur Erhöhung der Viskosität, dass die Strömungsschmierung im optimalen Betriebspunkt und Überlastbereich zu einer Reduzierung der mechanischen Verluste und einer Effizienzsteigerung führen kann (Abazariyan et al. 2018). Asim et al. (2014) erläutern den Zusammenhang der benötigten Pumpenergie für den hydraulischen Transport von Aufbereitungsbergen. Demnach erhöht sich der Druckverlust bei Schlämmen im Vergleich zu Wasser. Der Druckverlust wiederum steht in direktem Zusammenhang mit der Nettofallhöhe. Folglich liegt die reale Nettofallhöhe beim gravimetrischen Transport von Aufbereitungsbergen unterhalb der maximalen Nettofallhöhe im Betrieb mit Wasser. Der konkrete Druckverlust hängt sowohl von den Eigenschaften des Fluids als auch von den Parametern der Rohrleitung ab. Dieser Druckverlust ist bei Aufbereitungsbergen, welche heterogene Zusammensetzungen haben, nur in komplexen Simulationen oder Laborversuchen für jeden Einzelfall zu ermitteln. Adiansyah et al. (2016) beschreiben die Fließeigenschaften von Aufbereitungsbergen und wovon diese abhängen. Nguyen und Boger (1998) listen beispielhafte Werte für die benötigte Pumpenergie zum Transport von Aufbereitungsbergen.

Szenario C verfolgt das Ziel, technisch und wirtschaftlich erforderliche Rahmenbedingungen für die Nutzung von hydroelektrischem Potenzial bei hydraulischem Feststofftransport zu ermitteln. Dabei werden sowohl Verschleißerscheinungen als auch potenzielle Wirkungsgradverluste in der Turbine berücksichtigt. Aufgrund der fluidabhängigen Eigenschaften ist eine exakte Bestimmung des Wirkungsgrads nicht möglich, weshalb für die Fallstudie angenommen wird, dass ein technischer Einsatz grundsätzlich realisierbar ist. Es ist jedoch unklar, welcher Wirkungsgrad erreichbar ist und wie sich reduzierte Effizienz sowie höhere Investitions- und Betriebskosten auf die Wirtschaftlichkeit auswirken. Daher soll untersucht werden, welche Mindestvoraussetzungen gegeben sein müssen.

Für die Analyse in Szenario C müssen einige Annahmen getroffen werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Standzeit der Pumpenturbinen im Vergleich zum Betrieb mit Wasser verkürzt ist. Es wird daher angenommen, dass die Turbinen nach 1 bis 15 Jahren ersetzt werden, die dafür notwendigen Investitionskosten werden über die Wartungskosten abgebildet. Außerdem wird angenommen, dass höhere

Kapitalkosten notwendig sind, da ein initialer Entwicklungsaufwand durch die neuartige Anwendung besteht. Generell wird davon ausgegangen, dass es sich um fließ- und pumpfähige Aufbereitungsberge handelt, welche mit einer Kreiselpumpe verarbeitet werden können. Außerdem wird davon ausgegangen, dass die Bedingung von Concha A. (2014, S. 374) erfüllt ist, wonach eine gravimetrische Förderung ab einer Fallhöhe von 1,5 m über eine Strecke von 100 m möglich ist.

Das Modell aus Basisszenario A wird für die Untersuchung entsprechend angepasst. Als Schnittstelle zwischen den technischen und wirtschaftlichen Berechnungen fungiert weiterhin die pro Jahr erzeugte Energie E, welche sich aus der Systemleistung P und der Verfügbarkeit berechnet. Zur Berechnung der Systemleistung wird der Volumenstrom Q gleichbleibend angenommen, die Dichte des Fluids, die Nettofallhöhe und der Turbinenwirkungsgrad sind jedoch veränderlich. Die Nettofallhöhe bildet die Druckverluste in der Rohrleitung vor der Turbine in einer Variable ab. Durch die Änderung des Fluids wird sich auch der Wirkungsgrad der Turbine verändern. Wie sich die Verluste relativ zueinander verhalten, ist ohne CFD-Simulation für den Einzelfall nicht zu bestimmen. Daher wird eine neue Variable für den Systemwirkungsgrad eingeführt, um die durch das Fluid bedingten Verluste zu berücksichtigen. Für die Berechnung der Systemleistung werden daher die Werte für den Betrieb mit Wasser der Nettofallhöhe von 159,9 m und 65 % Turbinenwirkungsgrad verwendet und zusätzlich die neue Variable $n_{Fluid}$ für die Systemverluste hinzugefügt:

$$P_{Sys} = g * H_{net}(Q) * Q * \rho * n_{Turbine} * n_{Fluid} \tag{6-11}$$

Die Dichte wird von 1.000 kg/m³ bis maximal 2.000 kg/m³ angenommen, um so Rückschlüsse für unterschiedliche Aufbereitungsberge zu ermöglichen. Die übrigen Parameter wie Rohrinnendurchmesser, Länge der Rohrleitung, Fallhöhe der Rohrleitung und Betriebsmodi werden gegenüber Szenario A nicht verändert. Als Ergebnis von Szenario C steht die Auswertung der Systemleistung in Abhängigkeit von den veränderlichen Parametern Nettofallhöhe, Dichte und Wirkungsgrad der Turbine.

Ausgehend von den veränderlichen technischen Parametern wird im wirtschaftlichen Teil des Modells die Auswirkung auf den Investitionsfall untersucht. Dafür werden grundlegende Parameter aus dem Szenario A übernommen, wie der Strompreis, der Diskontierungszinssatz und die Inflation. Die Betriebs-, Wartungs- und Investitionskosten werden hingegen variabel angenommen, um den Einsatz einer neuartigen Turbinenanwendung abzubilden. Die Investitionskosten berücksichtigen einen höheren Entwicklungsaufwand, aber auch eine aufwendigere und teurere Bauart der Turbine. Die Betriebs- und Wartungskosten bilden den erwarteten verstärkten Verschleiß ab, indem eine Summe von bis zu einer Turbine pro Jahr plus den initialen Wartungskosten als obere Grenze angenommen wird. Das wirtschaftliche Ergebnis umfasst den Nettobarwert, die Stromgestehungskosten sowie die maximal tolerierbaren Investitions- und Betriebskosten in Abhängigkeit von den technischen Parametern. Die Annahmen und Eingabeparameter für Szenario C sind in Tabelle 6-4 dargestellt.

*Tabelle 6-4: Werte der variablen und unveränderlichen Parameter für Szenario C, eigene Darstellung*

| **Parameter** | | **Einheit** | **Wert** |
|---|---|---|---|
| Veränderlich | Dichte Fluid | kg/m³ | 1.000-2.000 |
| | Nettofallhöhe | m | 160-0 |
| | Gesamtwirkungsgrad | % | 65-0 |
| | CAPEX | USD | 793.000-2.379.000 |
| | OPEX | USD | 118.950-911.950 |
| Unveränderlich | Volumenstrom Q | m³/s | 0,79 |
| | Länge der Rohrleitung | m | 1432 |
| | Durchmesser Rohrleitung | m | 0,61 |
| | Verfügbarkeit | % | 85 |

## 6.3. Ergebnisse und Auswertung der Fallstudie

Im folgenden Ergebniskapitel werden die detaillierten Analysen und Ergebnisse der drei Szenarien dargestellt, die oben in der Methodik beschrieben sind. Die Fallstudie in Szenario A dient als Ausgangspunkt für die Bewertung des Potenzials einer Wasserkraftanlage in einem Goldbergwerk unter realistischen technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Diese Ergebnisse bilden die Grundlage für weiterführende Untersuchungen in den Szenarien B und C, in denen das Optimierungspotenzial der technischen Parameter sowie die Machbarkeit neuartiger Anwendungen untersucht werden.

Durch die Kombination technischer Berechnungen mit ökonomischen Bewertungen wird analysiert, wie sich Veränderungen einzelner Parameter auf die Wasserkraftnutzung im Bergbau auswirken. Die Ergebnisse aller drei Szenarien ermöglichen eine umfassende Beurteilung der Potenziale, Einschränkungen und Chancen, die sich aus der Integration von Wasserkrafttechnologien in bergbauliche Prozesse ergeben.

### *6.3.1. Szenario A: Energieerzeugung in einer Druckrohrleitung für den Transport von Laugungsflüssigkeit in einem Goldbergwerk*

Die Analyse der realen Fallstudie im Basisszenario A bezieht sich auf eine Druckrohrleitung zur Förderung von Laugungsflüssigkeit in einem Goldbergwerk im US-Bundesstaat Nevada, in dem Gold im Laugungsverfahren gewonnen wird. Die zugrunde liegenden Daten sowie die Referenzen der beteiligten Firma belegen die grundsätzliche technische Machbarkeit des Einsatzes von Pumpenturbinen zur Rückgewinnung elektrischer Energie im Bergwerksbetrieb. Eine vollständige Bewertung erfordert jedoch die Überprüfung und Verifizierung der berechneten technischen Parameter.

Tabelle 6-5 zeigt eine Übersicht über die drei definierten Betriebspunkte mit den jeweils vorliegenden Werten sowie den daraus berechneten Kennzahlen. Der Volumenstrom pro Turbine für BP 1 ist durch den maximalen Volumenstrom der Turbine limitiert auf 0,48 m³/s. Für BP 2 und 3 ergibt sich der Volumenstrom pro Turbine jeweils aus der Hälfte des gesamten Volumenstroms. Basierend auf dem Rohrdurchmesser ergibt sich die Strömungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des jeweiligen Volumenstroms. Die Nettofallhöhe berechnet sich in Abhängigkeit vom Volumenstrom nach Formel 6-9. Die theoretische Leistung hängt direkt von der Nettofallhöhe ab und berechnet sich nach Formel 6-2. Der Wirkungsgrad berechnet sich aus dem Verhältnis der theoretischen und real erreichten Leistung nach Formel 6-3.

*Tabelle 6-5: Übersicht der gegebenen und berechneten Parameter der Fallstudie, eigene Darstellung*

| **Gegebene Parameter** | **Einheit** | **BP 1** | **BP 2** | **BP 3** |
|---|---|---|---|---|
| Leistung gesamt | kW | 535 | 760 | 916 |
| Leistung pro Turbine | kW | 535 | 380 | 458 |
| Turbinen aktiv | # | 1 | 2 | 2 |
| Teilw. Bypass | | ja | nein | nein |
| Volumenstrom gesamt | m³/s | 0,536 | 0,804 | 0,858 |
| **Berechnete Parameter** | | | | |
| Volumenstrom pro Turbine | m³/s | 0,48 | 0,402 | 0,429 |
| Strömungsgeschwindigkeit | m/s | 1,84 | 2,75 | 2,94 |
| Nettofallhöhe | m | 165,9 | 159,5 | 157,9 |
| Systemleistung theoretisch | kW | 781,3 | 1258,0 | 1329,2 |
| Wirkungsgrad | | 0,68 | 0,60 | 0,69 |

Berechnet man die theoretische Leistung auf Grundlage der vom Volumenstrom abhängigen Nettofallhöhe sowie des jeweiligen Volumenstroms, ergibt sich eine Abweichung zu den von Easy Hydro pro-

gnostizierten Leistungswerten. Diese Differenz lässt sich durch den unbekannten Wirkungsgrad der eingesetzten Turbinen erklären. Durch die Auswertung der drei definierten Betriebspunkte (BP) kann der Wirkungsgrad anhand des Verhältnisses von theoretischer und realer Leistung bestimmt werden und liegt im Bereich von 60-69 %. Der Wirkungsgrad stellt eine zentrale Kenngröße dar, da er auch für die Übertragung auf weitere Szenarien maßgeblich ist. Die Analyse zeigt, dass die höchste Effizienz im Bereich des maximalen Volumenstroms oder leicht darunter erreicht wird. Diese Effizienzwerte stimmen mit Angaben in der einschlägigen Literatur überein (Rossi et al. 2019) und bestätigen somit die Plausibilität der Fallstudie.

Die bereitgestellten Daten enthalten lediglich die Minimal- und Maximalwerte für den Volumenstrom sowie die zugehörige Systemleistung, jedoch keine Informationen zum Jahresmittelwert oder zur stundenweisen Verteilung des Betriebs. Auch die Verfügbarkeit der Anlage ist nicht spezifiziert. Um dennoch eine fundierte Abschätzung der potenziellen jährlichen Energieerzeugung zu ermöglichen, können mit einer Matrix die unterschiedlichen Kombinationen aus Volumenstrom, Systemleistung und Anlagenverfügbarkeit dargestellt werden. Die maximal erzielbare Energiemenge beträgt 8.024.160 kWh pro Jahr, basierend auf einer Systemleistung von 916 kW und einer theoretischen Anlagenverfügbarkeit von 100 %. Im entgegengesetzten Extremfall, bei einer Verfügbarkeit von 0 %, entfällt die Energieerzeugung vollständig. Eine Übersicht der berechneten Szenarien findet sich im Anhang 10.

Die jährlich erzeugte Energiemenge ist linear abhängig von der Nettofallhöhe, dem Wirkungsgrad der Turbine, der Anzahl der Betriebsstunden und der Anlagenverfügbarkeit. Da wiederum die Nettofallhöhe als auch der Wirkungsgrad vom Volumenstrom beeinflusst werden, ergibt sich insgesamt ein nichtlinearer Zusammenhang: Mit zunehmendem Volumenstrom steigt die Energieerzeugung zwar weiterhin an, jedoch in abnehmendem Maße, da sowohl die Nettofallhöhe als auch der Wirkungsgrad graduell sinken. Damit weist der Volumenstrom einen logarithmischen Einfluss auf die erzeugte Energie auf.

**Wirtschaftliche Betrachtung**

Die wirtschaftliche Bewertung von Basisszenario A erfolgt auf Grundlage eines Finanzmodells, das die in Kapitel 6.2.1 dargestellten Daten und Annahmen berücksichtigt. Das Modell berechnet den Nettobarwert, die Stromgestehungskosten und den internen Zinsfuß in Abhängigkeit von der technischen Leistung der Wasserkraftanlage sowie wirtschaftlichen Faktoren wie Strompreis, Diskontierungszinssatz und Inflation. Das Modell und die zugehörigen Berechnungen sind in Anhang 11 aufgeführt. Für das Modell werden die in Tabelle 6-6 dargestellten Eingabeparameter verwendet.

Tabelle 6-7 stellt den Nettobarwert, die Stromgestehungskosten und den internen Zins in Abhängigkeit von der jährlichen Stromproduktion dar. Die Werte sind in Schritten von jeweils 1.000.000 kWh bis zur maximalen Stromerzeugung von 8.000.000 kWh pro Jahr aufgeführt und berechnen sich nach Formel 6-6, 6-7 und 6-8. Die Analyse zeigt deutlich, wie stark die wirtschaftliche Tragfähigkeit der Anlage von der erzeugten Strommenge abhängt.

*Tabelle 6-6: Eingabeparameter für das Finanzmodell, eigene Darstellung*

| Parameter | Einheit | Wert |
|---|---|---|
| Strompreis | USD/kWh | 0,085 |
| Diskontierungszinssatz | % | 7,5 |
| Inflationsrate | % | 2,1 |
| Betriebskosten | USD | 118.950 |
| CAPEX | USD | 793.000 |

Aus den Ergebnissen lassen sich einige zentrale Aussagen zur Wirtschaftlichkeit von Szenario A ableiten. Ab einer jährlichen Stromproduktion von 2.094.716 kWh fällt der Nettobarwert positiv aus. Das bedeutet, dass die Einnahmen aus der Energieerzeugung über die gesamte Laufzeit des Projekts die

Investitions- und Betriebskosten übersteigen. Bei einer jährlichen Stromproduktion von 2.633.390,35 kWh entsprechen die Stromgestehungskosten exakt dem aktuellen Strompreis von 0,085 USD/kWh. In diesem Fall arbeitet die Anlage wirtschaftlich neutral. Der interne Zinsfuß liegt bei null Prozent, wenn die jährliche Stromproduktion 2.197.928,86 kWh erreicht. Dieser Wert markiert den Kipppunkt für die Rentabilität der Anlage.

*Tabelle 6-7: Nettobarwert (NPV), Stromgestehungskosten (LCOE) und interner Zinsfuß (IRR) in Abhängigkeit von der jährlichen Stromproduktion, eigene Darstellung*

| Energieproduktion [kWh/a] | NPV [$] | LCOE [$/kWh] | IRR [%] |
|---|---|---|---|
| 8.000.000 | 7.468.423,33 | 0,028 | 74,31% |
| 7.000.000 | 6.203.721,68 | 0,032 | 63,14% |
| 6.000.000 | 4.939.020,03 | 0,037 | 51,80% |
| 5.000.000 | 3.674.318,38 | 0,045 | 40,15% |
| 4.000.000 | 2.409.616,73 | 0,056 | 27,84% |
| 3.000.000 | 1.144.915,08 | 0,075 | 14,02% |
| 2.000.000 | -119.786,57 | 0,112 | -4,62% |
| 1.000.000 | -1.384.488,23 | 0,224 | - |
| 0 | -2.649.189,88 | - | - |

Für die weiteren Betrachtungen dient ein Betriebspunkt mit einer jährlichen Stromerzeugung von 6.000.000 kWh als Referenz. Dieser wird bei einer durchschnittlichen Systemleistung von 805 Kilowatt und einer Verfügbarkeit von 80 Prozent erreicht.

Abbildung 6-4 zeigt die mit Formel 6-6, 6-7 und 6-8 berechnete Entwicklung des kumulierten Nettobarwerts, des jährlichen Cashflows und der kumulierten Stromproduktion über die Laufzeit von 30 Jahren. Es zeigt sich, dass der NPV bereits ab dem dritten Betriebsjahr positiv ist. Bis zum fünfzehnten Jahr, in dem ein Austausch der Turbinen erfolgt, steigt der Nettobarwert auf rund 3,2 Mio. USD. Am Ende der Betriebsdauer im dreißigsten Jahr beträgt er etwa 4,9 Mio. USD. Die Zuwachsrate verlangsamt sich im Zeitverlauf, was auf den Effekt der Abzinsung zurückzuführen ist. Während der Nettobarwert im ersten Jahr noch um 373.730 USD steigt, beträgt der Anstieg im dreißigsten Jahr nur noch 83.841 USD.

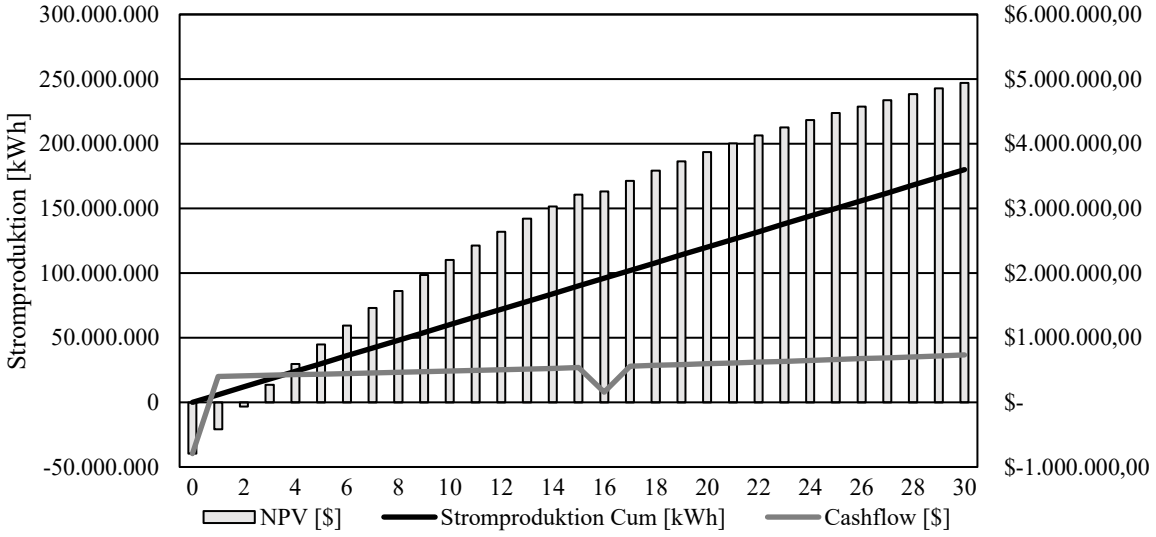



*Abbildung 6-4: Entwicklung des Nettobarwerts, der kumulativen Stromerzeugung und des Cashflows über die Projektlaufzeit von 30 Jahren, eigene Darstellung*

Der jährliche Cashflow nimmt kontinuierlich zu, da sowohl die Betriebskosten als auch die Einnahmen entsprechend der angenommenen Inflation ansteigen. Diese Ergebnisse zeigen, dass ein langfristig wirtschaftlich profitabler Betrieb der Wasserkraftanlage möglich ist.

Mit einer Sensitivitätsanalyse wird untersucht, wie sich wirtschaftliche Rahmenbedingungen auf die Rentabilität der Wasserkraftanlage auswirken. Dabei liegt die jährliche Energieproduktion bei 6.000.000 kWh, was einer Anlagenverfügbarkeit von 80 % und einer durchschnittlichen Systemleistung von 805,8 kW entspricht. Unter diesen Annahmen ergibt sich ein Nettobarwert von 4.939.020 USD, Stromgestehungskosten von 0,037 USD/kWh und ein interner Zinsfuß von 51,8 %.

Abbildung 6-5 zeigt die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse. Dabei werden die jährliche Energieproduktion, der Strompreis, die Inflationsrate, die Abzinsung durch den Diskontierungszinssatz, die laufenden Betriebskosten und die Investitionskosten jeweils in einem Bereich von 0 bis 200 % ihres ursprünglichen Werts variiert. Mit den variierten Werten wird dann jeweils nach Formel 6-6 der Nettobarwert berechnet. Die Analyse verdeutlicht, dass jede prozentuale Veränderung dieser Parameter einen direkten Einfluss auf den Nettobarwert der Wasserkraftanlage hat.

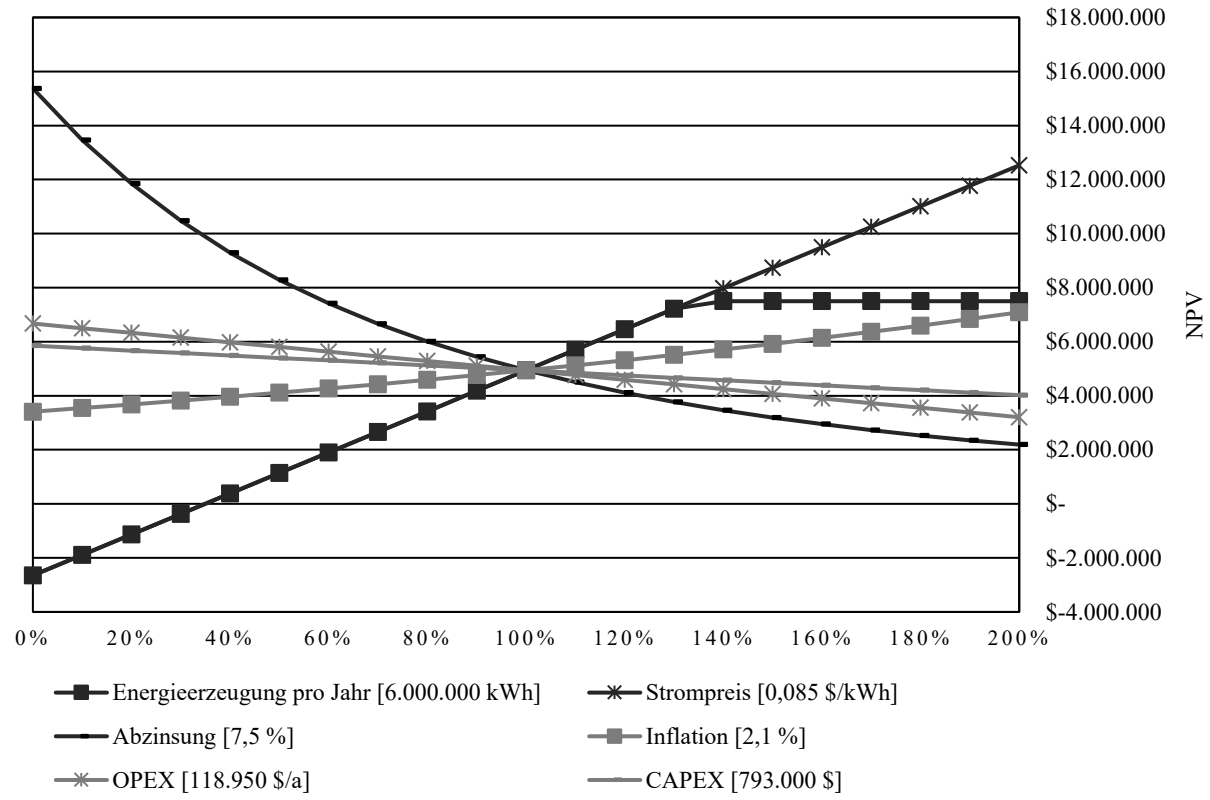



*Abbildung 6-5: Sensitivität der prozentualen Änderung der Eingabeparameter auf den Nettobarwert, eigene Darstellung*

Die Kapital- und Betriebskosten wirken sich am geringsten und auf lineare Weise auf den Nettobarwert aus. Eine Reduzierung der Kapitalkosten steigert den Nettobarwert auf maximal 5,8 Mio. USD, während eine Verdopplung ihn auf 4,0 Mio. USD senkt. Ähnlich verhält es sich bei den Betriebskosten. Eine Reduzierung führt zu einem Nettobarwert von 6,6 Mio. USD, während eine Verdopplung ihn auf 3,2 Mio. USD verringert.

Deutlich stärker wirkt sich die Inflationsrate aus, da sie sowohl die Betriebskosten als auch die Erlöse über den Strompreis beeinflusst. Eine Verdopplung der Inflationsrate auf 4,2 % erhöht den Nettobarwert auf 7,1 Mio. USD. Den größten positiven Einfluss hat jedoch der Diskontierungszinssatz. Sinkt er auf null Prozent, steigt der Nettobarwert auf 15,3 Mio. USD. Selbst bei einer Verdopplung auf 15 %

verbleibt der Nettobarwert bei 2,2 Mio. USD. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass vor allem die Abzinsung über den Diskontierungszinssatz und die Inflation eine zentrale Rolle für die Wirtschaftlichkeit spielen, während Investitions- und Betriebskosten einen geringeren Einfluss haben.

Die jährliche Stromproduktion und der Strompreis beeinflussen den Nettobarwert auf lineare Weise. Die technische Obergrenze der Stromproduktion liegt bei 8.024 MWh pro Jahr. Ein positiver Nettobarwert wird bereits bei einem Strompreis von 0,03 USD/kWh oder bei einer jährlichen Produktion von 2.094 MWh erreicht. Dieser lineare Zusammenhang ergibt sich aus der Berechnung der Erlöse über das Produkt aus Strommenge und Strompreis.

Insgesamt zeigt sich, dass das Investitionsvorhaben wirtschaftlich tragfähig ist. Ein positiver Nettobarwert wird schon bei einer jährlichen Energieerzeugung von 2.094 MWh erreicht. Diese Menge wird beispielsweise bei der höchsten Systemleistung von 916 kW bereits mit einer Verfügbarkeit von 25 % erreicht oder bei der geringsten Systemleistung von 535 kW mit 45 % Verfügbarkeit. Das Projekt erweist sich außerdem als robust gegenüber externen Einflüssen und Kostenänderungen, was das Risiko wirtschaftlicher Verluste deutlich reduziert.

### *6.3.2. Szenario B: Optimierung des hydroelektrischen Potenzials durch Anpassung der bergbaulichen Planungsparameter*

Szenario B analysiert gezielt den Einfluss bergbaulicher Planungsparameter auf das hydroelektrische Potenzial, das in Szenario A beschrieben wird. Grundlage dafür sind die Planungsparameter der Planungskategorie „Mineralische Aufbereitungsanlage und betriebliches Wassernetzwerk“, wie in Kapitel 5.4.3 dargelegt. Diese Parameter beeinflussen eine oder mehrere Dimensionen des Potenzials, etwa Volumenstrom, Fallhöhe oder Verluste. Tabelle 6-8 zeigt die technisch beeinflussbaren Parameter sowie deren mögliche Anpassungen zur Optimierung des Potenzials.

*Tabelle 6-8: Beeinflussbare Parameter nach eigener Analyse in Kapitel 5.3, eigene Darstellung*

| **Beeinflusste Dimension** | **Beeinflussbarer Parameter** | **Mögliche Änderung oder Beeinflussung** |
|---|---|---|
| Volumenstrom | Prozessabläufe und innerbetriebliche Materialströme<br>Strömungseigenschaften | Im vorliegenden Fall nicht möglich. |
| Fluideigenschaften | Strömungseigenschaften<br>Dichte der Flüssigkeit | Im vorliegenden Fall nicht möglich |
| Fallhöhe und Leitungslänge | Höhenlage<br>Nähe zur Lagerstätte und Bergwerk<br>Horiz. Entfernung zum Grubengelände<br>Höhenunterschied zum Bergwerk<br>Anordnung der Verarbeitungsschritte<br>Höhenunterschiede der Anlagen<br>Abstand zwischen den Anlagen<br>Leitungsführung, Höhe der Rohrleitung<br>Maximal zulässige Druckhöhe | Wahrscheinlich möglich, Fallhöhe zu vergrößern und Länge der Rohrleitung zu reduzieren. |
| Verluste | Reibungswiderstand der Rohrleitung<br>Größe und Durchmesser der Rohrleitung<br>Rohrleitungsarmaturen<br>Korrosionsbeständigkeit und Rohrrauigkeit<br>Rohrbögen<br>Verbindung von Rohrleitungen | Wahl eines optimalen Rohrdurchmessers<br>Optimierte Leitungsführung ohne unnötige Biegungen |

**Analyse der möglichen Änderungen der Planungsparameter**

Die Analyse von Szenario A verdeutlicht, dass eine Erhöhung des Volumenstroms und der Fallhöhe entscheidend zur Verbesserung des Potenzials beitragen kann, während Verluste und Leitungslängen möglichst geringgehalten werden sollten. Eine Steigerung der Dichte des Fluids könnte das hydroelektrische Potenzial zwar theoretisch erhöhen, führt jedoch gleichzeitig zu höheren Verlusten aufgrund schlechterer Strömungseigenschaften, insbesondere im Vergleich zu Frischwasser.

Die beiden Parameter zur Beeinflussung des Volumenstroms, *Prozessabläufe und innerbetriebliche Materialströme* sowie *Strömungseigenschaften*, lassen im konkreten Fall kaum realistische Optimierungsmöglichkeiten zu. Der Volumenstrom ergibt sich direkt aus dem Prozess, bei dem Laugungsflüssigkeit von der Laugungshalde zur Aufbereitungsanlage transportiert wird. Eine Veränderung dieser Prozesskette ist technisch nicht sinnvoll. Der Wasseranteil ist bereits auf ein Niveau eingestellt, das Frischwasser sehr nahekommt. Eine zusätzliche Verdünnung wäre aus prozesstechnischer Sicht kontraproduktiv. Dennoch wird der Volumenstrom weiterhin betrachtet, da er mit der Produktionskapazität des Bergwerks variiert und somit potenziell änderbar ist.

Die *Fluideigenschaften* ließen sich prinzipiell über eine Erhöhung der Dichte beeinflussen, etwa durch Aufkonzentration der Laugungslösung. Dies würde jedoch zu höheren Strömungsverlusten und einem niedrigeren Volumenstrom führen, wodurch die Gesamtleistung der Anlage sinkt. Dennoch wird der Einfluss der Dichte auf das hydroelektrische Potenzial weiter analysiert, insbesondere unter der Annahme, dass die Fluideigenschaften möglicherweise nicht korrekt als Frischwasser angenommen wurden.

Bezüglich *Fallhöhe* und *Leitungslänge* bestehen grundsätzlich Möglichkeiten zur Optimierung, da in einem Bergwerk die Fallhöhe zwischen zwei Prozessen meistens nicht optimal hinsichtlich des hydroelektrischen Potenzials ausgelegt wird. Eine Anpassung, beispielsweise durch Erhöhung des Startpunkts oder eine Verlagerung des Endpunkts auf eine tiefere Ebene, könnte die Fallhöhe erhöhen. Auch kürzere Leitungen können zur Reduktion der Reibungsverluste beitragen. Da keine konkreten Lagepläne vorliegen, lassen sich hierzu jedoch keine spezifischen Vorschläge ableiten. Im weiteren Verlauf wird daher die Nettofallhöhe als zusammenfassender Parameter für Fallhöhe und Leitungsverluste verwendet.

Hinsichtlich der *Verluste* lassen sich einige beeinflussbare Parameter optimieren, um die Nettofallhöhe zu verbessern. Höhere Strömungsgeschwindigkeiten führen zu stärkeren Druckverlusten, daher können größere Rohrdurchmesser eingesetzt werden, um diese zu senken. Auch eine möglichst verlustarme Leitungsführung mit wenigen Umlenkungen und Armaturen trägt dazu bei. Die Verluste in der Turbine hängen ebenfalls von Volumenstrom, Geschwindigkeit und Fluideigenschaften ab. Eine gut abgestimmte Turbinenauswahl kann die Effizienz erhöhen, weshalb dieser Aspekt im Modell durch einen angepassten Turbinenwirkungsgrad abgebildet wird.

**Untersuchung des Einflusses der Änderung auf die Fallstudie**

Verändern sich die technischen Eingabeparameter der Wasserkraftanlage, beeinflussen diese über Formel 6-2 den erzielbaren Erlös gemäß Formel 6-5 und somit auch den daraus resultierenden Nettobarwert nach Formel 6-6. Die Differenz des Nettobarwerts zwischen dem ursprünglichen und dem angepassten Betrieb beschreibt den wirtschaftlichen Effekt der jeweiligen Optimierung und kann sowohl absolut als auch relativ angegeben werden.

In der Untersuchung zeigt sich, dass Änderungen der Parameter Durchfluss, Nettofallhöhe, Dichte des Fluids und Wirkungsgrad der Turbine jeweils unterschiedliche Auswirkungen auf den Nettobarwert haben. Während sich Nettofallhöhe, Dichte und Wirkungsgrad linear auf den Nettobarwert auswirken, verhält sich der Einfluss des Durchflusses nichtlinear. Für jede Erhöhung um 1 % eines der drei linear wirkenden Parameter steigt der Nettobarwert um 75.882,10 USD. Das entspricht konkret einem Anstieg

der Nettofallhöhe um 1,6 m, einer Erhöhung der Dichte des Fluids um 10 kg/m³ oder einer Steigerung des Wirkungsgrads um 0,65 Prozentpunkte.

Der Durchfluss hingegen zeigt eine abnehmende Wirkung auf den Nettobarwert. Eine Steigerung um ein Prozent führt anfangs zu einer Erhöhung um 64.627 USD, nimmt jedoch mit zunehmendem Durchfluss ab. Bei einer Veränderung von 199 auf 200 Prozent beträgt der zusätzliche Nettobarwert nur noch 21.413 USD. Eine Erhöhung des Durchflusses um ein Prozent entspricht einer zusätzlichen Menge von 0,007904 m³/s beziehungsweise 7,9 l/s. Abbildung 6-6 stellt diese Entwicklung dar und zeigt die abnehmende Wirkung mit zunehmendem Durchfluss.

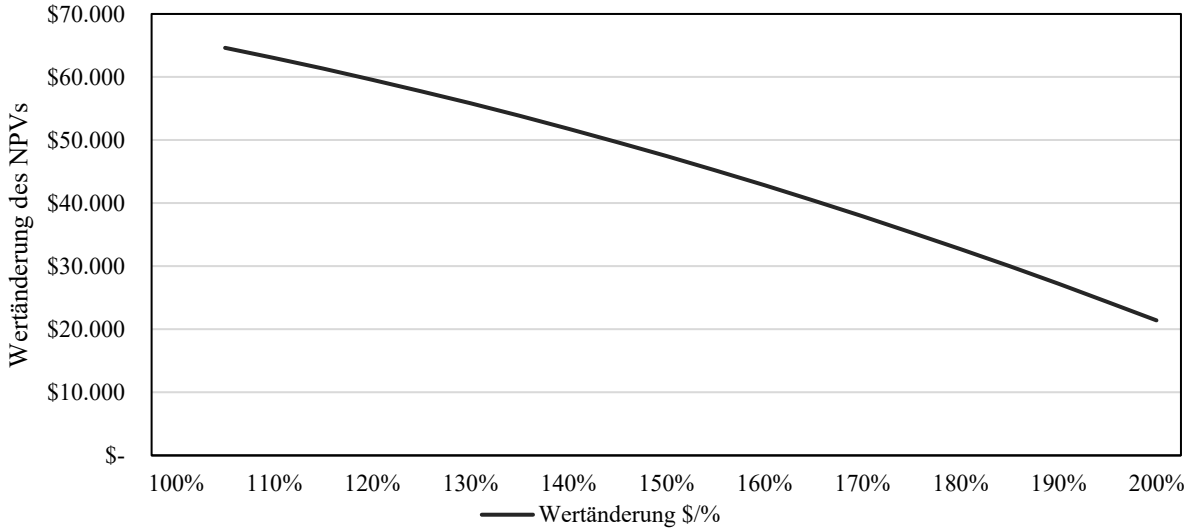



*Abbildung 6-6: Verlauf des Wertes einer 1-prozentigen Steigerung des Volumenstroms, eigene Darstellung*

Die Auswirkungen der einzelnen Parameteränderungen lassen sich dimensionieren, um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Ein Prozent des Nettobarwerts entspricht dabei zur Einordnung 49.390 USD. Eine Erhöhung der Nettofallhöhe um 1 m wirkt sich mit einem zusätzlichen Nettobarwert von 47.460,49 USD aus. Wird die Dichte des Fluids um 0,01 g/cm³ erhöht, steigt der Nettobarwert um 75.882 USD. Eine Verbesserung des Wirkungsgrads der Turbine um einen Prozentpunkt erhöht den Nettobarwert um 116.741 USD. Der Einfluss einer Erhöhung des Volumenstroms um 10 l/s variiert je nach Ausgangswert zwischen 27.105 USD und 81.806 USD. Die quantifizierten Änderungen und ihr relativer Einfluss auf den Nettobarwert sind in Abbildung 6-7 zusammengefasst und mit Formel 6-2, 6-5 und 6-6 nach dem eingangs beschriebenen Vorgehen berechnet.

### *6.3.3. Szenario C: Technische und wirtschaftliche Bedingungen für die Energieerzeugung im hydraulischen Feststofftransport*

Der optimale Betriebspunkt einer Pumpenturbine unterscheidet sich grundlegend von dem im herkömmlichen Pumpenbetrieb derselben Pumpe. Insbesondere wenn das Fluid eine höhere Viskosität als Wasser aufweist, lassen sich standardisierte Korrekturfaktoren nicht ohne Weiteres anwenden. Wie Rossi et al. (2018) betonen, muss für jedes Fluid der optimale Betriebspunkt der PaT individuell neu bestimmt werden. Dies stellt eine besondere Herausforderung dar, insbesondere bei Anwendungen im Bergbau, bei denen das zu fördernde Fluid oft von der Standarddichte und Viskosität von Wasser abweicht und nicht standardisiert ist. Deshalb ist es erforderlich zu prüfen, welche technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen erfüllt sein müssen, um die energetische Nutzung von Volumenströmen für den hydraulischen Feststofftransport in der Praxis nutzbar zu machen, ohne sich auf ein bestimmtes Fluid zu beschränken.

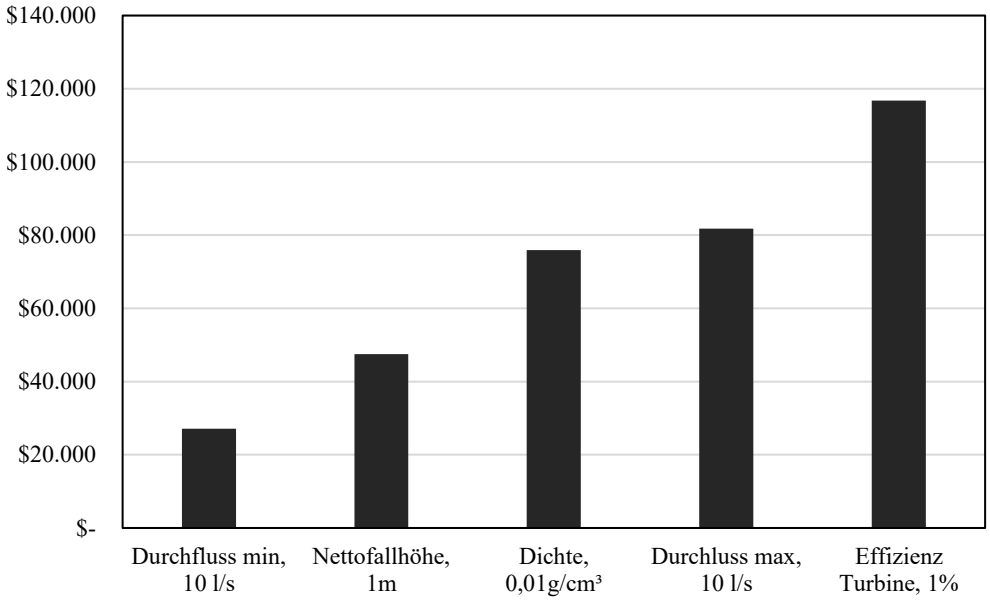



*Abbildung 6-7: NPV-Wertsteigerung bei Änderung des Parameters um den angegebenen Wert, eigene Darstellung*

Im ersten Schritt wird daher der Einfluss der Dichte des Fluids sowie des Wirkungsgrads auf die Systemleistung einer PaT untersucht. Es zeigt sich, dass eine höhere Dichte das Energiepotenzial linear erhöht, während ein sinkender Wirkungsgrad das Potenzial entsprechend reduziert. Innerhalb des betrachteten Bereichs mit einer Dichte von 1.000 kg/m³ bis 2.000 kg/m³ und einem Wirkungsgrad von 100 Prozent bis 0 Prozent, kann die Systemleistung bis zu 1.611,11 kW erreichen, was exakt dem Doppelten des Ausgangswerts von 805,51 kW entspricht. Sinkt der Gesamtwirkungsgrad hingegen auf null, reduziert sich die Systemleistung ebenfalls auf null. Diese Ergebnisse unterstreichen die entscheidende Bedeutung des Gesamtwirkungsgrads für die tatsächlich nutzbare Energie einer PaT bei unkonventionellen Fluidanwendungen.

Abbildung 6-8 zeigt die resultierende Systemleistung in Abhängigkeit von Dichte und Gesamtwirkungsgrad berechnet nach Formel 6-3. Der Farbverlauf kennzeichnet dabei die Systemleistung in kW vom niedrigsten Wert in Rot bis zum höchsten Wert in Grün. Es wird deutlich, dass das theoretische hydroelektrische Potenzial bei steigender Fluiddichte linear zunimmt, was die Möglichkeit eröffnet, Verluste im Vergleich zum Betrieb mit Wasser teilweise auszugleichen. Bei einer Dichte von 1.600 kg/m³ entspricht das Wasserkraftpotenzial dem Ausgangswert, sofern ein Gesamtwirkungsgrad von etwa 62,1 % erreicht wird. Erst wenn der Gesamtwirkungsgrad unter diesen Schwellenwert fällt, übersteigen die Verluste den potenziellen Gewinn durch die erhöhte Dichte, wodurch der Vorteil aufgehoben wird.

Unter Berücksichtigung der finanziellen Annahmen aus dem Basisszenario A ergibt sich eine erforderliche Systemleistung von mindestens 298,90 kW, um einen positiven Nettobarwert zu erreichen. Bei einer angenommenen Dichte von 1.600 kg/m³ kann dieses Ziel bereits bei einem Gesamtwirkungsgrad von 23,2 % erreicht werden. Dies zeigt, dass selbst bei geringen Wirkungsgraden die Nutzung von Fluiden mit höherer Dichte potenziell wirtschaftlich tragfähig ist.

| Gesamtwirkungsgrad [%] \ Dichte [kg/m³] | 1000 | 1100 | 1200 | 1300 | 1400 | 1500 | 1600 | 1700 | 1800 | 1900 | 2000 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 100 | 806 | 886 | 967 | 1.048 | 1.128 | 1.209 | 1.289 | 1.370 | 1.450 | 1.531 | 1.612 |
| 90 | 725 | 798 | 870 | 943 | 1.015 | 1.088 | 1.160 | 1.233 | 1.305 | 1.378 | 1.450 |
| 80 | 645 | 709 | 774 | 838 | 902 | 967 | 1.031 | 1.096 | 1.160 | 1.225 | 1.289 |
| 70 | 564 | 620 | 677 | 733 | 790 | 846 | 902 | 959 | 1.015 | 1.072 | 1.128 |
| 60 | 483 | 532 | 580 | 629 | 677 | 725 | 774 | 822 | 870 | 919 | 967 |
| 50 | 403 | 443 | 483 | 524 | 564 | 604 | 645 | 685 | 725 | 766 | 806 |
| 40 | 322 | 355 | 387 | 419 | 451 | 483 | 516 | 548 | 580 | 612 | 645 |
| 30 | 242 | 266 | 290 | 314 | 338 | 363 | 387 | 411 | 435 | 459 | 483 |
| 20 | 161 | 177 | 193 | 210 | 226 | 242 | 258 | 274 | 290 | 306 | 322 |
| 10 | 81 | 89 | 97 | 105 | 113 | 121 | 129 | 137 | 145 | 153 | 161 |
| 0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

| Legende: Systemleistung in kW | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| - | 200 | 400 | 600 | 800 | 1.000 | 1.200 | 1.400 | 1.612 |

*Abbildung 6-8: Systemleistung [kW] abhängig von Dichte [kg/m³] und Gesamtwirkungsgrad [%], eigene Darstellung*

Für die weiterführende Analyse wird von einem Fluid mit einer Dichte von 1.600 kg/m³ ausgegangen. Auf dieser Grundlage werden acht Szenarien definiert, die sich hinsichtlich der Systemleistung sowie der Kapital- und Betriebskosten unterscheiden. Für jedes dieser Szenarien werden der Nettobarwert, die Stromgestehungskosten und der interne Zinsfuß berechnet. Als Referenz dient Szenario 0, das die Annahmen des Basisszenarios A widerspiegelt. Die Szenarien 1 bis 8 unterscheiden sich in drei wesentlichen Parametern: Systemleistung, Betriebskosten und Kapitalkosten. Für jeden dieser Parameter werden zwei Ausprägungen angenommen, die miteinander kombiniert werden, um die Szenarien zu definieren.

**Systemleistung**:

- Ein Wert unterhalb des Ausgangswerts von 805,8 kW, der einem niedrigen Systemwirkungsgrad von 40 % entspricht und eine Leistung von 515,71 kW ergibt,
- sowie ein Wert oberhalb des Ausgangswerts, der bei einem Systemwirkungsgrad von 80 % eine Leistung von 1.031,43 kW erreicht. Diese Werte basieren auf den Ergebnissen aus Abbildung 6-8 und stellen realistische Optionen für unterschiedliche Wirkungsgrade dar.

**Kapitalkosten**:

- Zum einen wird der Ausgangswert von 793.000 USD angesetzt,
- andererseits ein Wert von 2.379.000 USD, der das Dreifache des Ausgangswerts beträgt und zusätzliche Ausgaben für Forschung, Entwicklung und technische Anpassungen abbildet.

**Betriebskosten**:

- Die Betriebskosten liegen im Ausgangswert bei 118.950 USD.
- Ein zweiter Wert von 475.800 USD berücksichtigt ein vierfach erhöhtes Kostenniveau, das durch stärkeren Verschleiß und aufwendigere Wartung entstehen kann.

Durch die Kombination dieser Werte entstehen insgesamt acht Szenarien, um den Einfluss der Parameter auf den wirtschaftlichen Erfolg der Wasserkraftanlage zu analysieren. Für jedes Szenario werden der Nettobarwert, die Stromgestehungskosten und der interne Zinsfuß berechnet (Formel 6-6, 6-7 und 6-8).

Tabelle 6-9 vergleicht die Ergebnisse der Szenarien 1 bis 8 und zeigt den Einfluss von Systemleistung, Betriebskosten und Kapitalkosten auf den Nettobarwert, die Stromgestehungskosten und den internen Zinsfuß. In allen Fällen mit einem Systemwirkungsgrad von 80 % bleibt die Anlage wirtschaftlich tragfähig, da der NPV positiv ausfällt. Besonders deutlich wird die Bedeutung der Betriebskosten: Hohe

Werte in diesem Bereich senken den NPV erheblich, was ihre zentrale Rolle für die Wirtschaftlichkeit unterstreicht. Kapitalkosten wirken sich ebenfalls negativ aus, jedoch kann dieser Effekt bei ausreichenden Einnahmen besser ausgeglichen werden.

In den Szenarien 5 und 7 wird deutlich, dass ein wirtschaftlicher Betrieb auch dann möglich bleibt, wenn die Verluste durch das Fluid deutlich höher ausfallen. Entscheidend ist, dass die Betriebskosten niedrig gehalten werden. Das zeigt, dass selbst bei ungünstigen Fließeigenschaften oder höherer Dichte eine rentable Nutzung denkbar ist, solange die laufenden Betriebskosten effizient gestaltet werden.

*Tabelle 6-9: Ergebnisse der 8 Szenarien mit Kombinationen aus Systemleistung, Kapital- und Betriebskosten, mit dem jeweiligen Nettobarwert, dem internen Zinsfuß und den Stromgestehungskosten, eigene Darstellung*

| Szenario | P [kW] | CAPEX [$] | OPEX [$] | NPV [$] | IRR [%] | LCOE [$/kWh] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **0** | 805,80 | 793.000,00 | 118.950,00 | 5.061.773,69 | 51,8 | 0,036 |
| **1** | 1.031,43 | 793.000,00 | 118.950,00 | 7.186.507,60 | 70,7 | 0,028 |
| **2** | 1.031,43 | 793.000,00 | 475.800,00 | 1.986.198,98 | 22,1 | 0,085 |
| **3** | 1.031,43 | 2.379.000,00 | 118.950,00 | 5.600.507,60 | 20,9 | 0,045 |
| **4** | 1.031,43 | 2.379.000,00 | 475.800,00 | 400.198,98 | -2,2 | 0,103 |
| **5** | 515,71 | 793.000,00 | 118.950,00 | 2.329.988,61 | 25,8 | 0,056 |
| **6** | 515,71 | 793.000,00 | 475.800,00 | - 2.870.320,01 | - | 0,170 |
| **7** | 515,71 | 2.379.000,00 | 118.950,00 | 743.988,61 | -0,2 | 0,091 |
| **8** | 515,71 | 2.379.000,00 | 475.800,00 | - 4.456.320,01 | - | 0,205 |

Abbildung 6-9 zeigt den resultierenden Nettobarwert berechnet nach Formel 6-6 in Abhängigkeit von verschiedenen Kombinationen aus Wirkungsgrad und Betriebskosten. Es ist erkennbar, dass ein wirtschaftlicher Betrieb bereits ab einem Systemwirkungsgrad von 30 % möglich ist. Das entspricht zusätzlichen Verlusten von 70 % gegenüber dem Referenzfall mit Wasser, vorausgesetzt die Betriebskosten bleiben unverändert. Steigen die laufenden Kosten auf das Doppelte, ist ein Wirkungsgrad von mindestens 42 % erforderlich, um einen Nettobarwert von über 1 Mio. USD zu erreichen. Bei einer Verdreifachung der Betriebskosten muss der Wirkungsgrad mindestens 57 % betragen, um eine wirtschaftlich tragfähige Nutzung weiterhin zu ermöglichen. Dies unterstreicht, wie entscheidend der Wirkungsgrad und die Betriebskosten für den langfristigen wirtschaftlichen Erfolg der Anlage sind.

**OPEX [118.950 $]**

| Gesamtwirkungsgrad [%] | 100% | 200% | 300% | 400% | 500% | 600% |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **100** | 9.615 | 7.881 | 6.148 | 4.414 | 2.681 | 948 |
| **90** | 8.401 | 6.667 | 4.934 | 3.200 | 1.467 | - 267 |
| **80** | 7.186 | 5.453 | 3.720 | 1.986 | 253 | - 1.481 |
| **70** | 5.972 | 4.239 | 2.505 | 772 | - 961 | - 2.695 |
| **60** | 4.758 | 3.025 | 1.291 | - 442 | - 2.175 | - 3.909 |
| **50** | 3.544 | 1.811 | 77 | - 1.656 | - 3.390 | - 5.123 |
| **40** | 2.330 | 597 | - 1.137 | - 2.870 | - 4.604 | - 6.337 |
| **30** | 1.116 | - 618 | - 2.351 | - 4.084 | - 5.818 | - 7.551 |
| **20** | - 98 | - 1.832 | - 3.565 | - 5.299 | - 7.032 | - 8.765 |
| **10** | - 1.312 | - 3.046 | - 4.779 | - 6.513 | - 8.246 | - 9.980 |
| **0** | - 2.526 | - 4.260 | - 5.993 | - 7.727 | - 9.460 | - 11.194 |

**Legende: Nettobarwert in Tausend USD**

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 9.615 | 5.000 | 0 | - 5.000 | - 11.194 |

*Abbildung 6-9: NPV [Tausend USD] der Kombinationen aus Gesamtwirkungsgrad und OPEX für ein Fluid mit der Dichte 1.600 kg/m³, eigene Darstellung*

## 6.4. Schlussfolgerungen

Kapitel 6 demonstriert anhand einer praxisnahen Fallstudie, dass der Einsatz von Pumpenturbinen in bergbaulichen Fluidströmen machbar und wirtschaftlich attraktiv ist. Das Basisszenario A, basierend auf Betriebsdaten einer Laugungsflüssigkeitsleitung in einem amerikanischen Goldbergwerk, ergibt bei konservativen Annahmen einen Nettobarwert von bis zu 7.470.000 USD sowie eine Jahresproduktion von bis zu 8.000.000 kWh/a und spezifischen Stromgestehungskosten zwischen 0,028 und 0,075 USD/kWh, also unter gängigen Marktpreisen.

Im Optimierungsszenario B wird gezeigt, dass gezielte Anpassungen einzelner Planungsparameter, etwa eine Erhöhung der Nettofallhöhe, den NPV um 20.000-75.000 USD je Prozent steigern können. Dies belegt den direkten, quantifizierbaren Nutzen einer frühzeitigen energetischen Optimierung in der Bergwerksplanung.

Das Szenario C untersucht die Nutzung von Aufbereitungsschlämmen mit höherer Dichte und schlechteren Fließeigenschaften als Wasser. Selbst bei zusätzlichen hydraulischen Verlusten von bis zu 70 % im Vergleich zum Betrieb mit Frischwasser und erhöhten Investitions- bzw. Betriebskosten bleibt ein positiver NPV erreichbar, da die höhere Dichte die Energieverluste teilweise kompensiert. Damit wird das grundsätzliche Potenzial von Fluidströmen für den hydraulischen Feststofftransport als Energiequelle untermauert, wenngleich hierfür noch Nachweise zur technischen Machbarkeit fehlen.

Damit beantwortet die Fallstudie die dritte Forschungsfrage:

**„Unter welchen wirtschaftlichen und technischen Rahmenbedingungen können hydroelektrische Potenziale im Bergbau genutzt werden und wie können diese Potenziale optimiert werden?“**

Zentrale Schlussfolgerungen der Fallstudie sind:

(i) Die Nutzung hydroelektrischer Potenziale im Bergbau kann wirtschaftlich sehr attraktiv sein und ermöglicht eine kosteneffiziente, nachhaltige Stromerzeugung direkt im Betrieb.

(ii) Die hydroelektrischen Potenziale lassen sich gezielt optimieren und steigern. Änderungen an spezifischen bergbaulichen Planungsparametern haben einen direkten und quantifizierbaren wirtschaftlichen Nutzen und ermöglichen die Maximierung des energetischen und wirtschaftlichen Potenzials.

(iii) Szenario C deutet darauf hin, dass auch unkonventionelle hydroelektrische Potenziale, z. B. Medien mit hohem Feststoffgehalt, wirtschaftlich nutzbar sein können, sofern geeignete Turbinentechnologien entwickelt werden. Dies legt nahe, dass eine wirtschaftliche und technische Machbarkeit auch unter anspruchsvolleren Bedingungen erreichbar ist.

Kapitel 6 zeigt somit, dass die energetische Nutzung betrieblicher Fluidströme im Bergbau ein realistisches und ökonomisch lohnenswertes Ziel darstellen kann.

# 7. Diskussion

## 7.1. Einleitung

Die folgende Diskussion beleuchtet die Aussagekraft, Grenzen und Anwendbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse, hinterfragt methodische Entscheidungen und stellt die Ergebnisse in einen übergeordneten wissenschaftlichen Kontext. Die zentralen Ergebnisse der Arbeit werden kritisch eingeordnet und im Hinblick auf die Forschungsziele sowie die Forschungsfragen diskutiert. Abschließend werden Implikationen für Akteure aus der Bergbau-, Energie- und Forschungslandschaft abgeleitet sowie ein Ausblick auf zukünftigen Forschungsbedarf gegeben.

## 7.2. Diskussion der Ergebnisse

In den folgenden Unterkapiteln werden die zentralen Ergebnisse der Hauptkapitel 4, 5 und 6 separat diskutiert. Dabei wird die in Kapitel 1.4 formulierte Forschungshypothese bestätigt:

**„In Bergwerken treten prozessbedingte, bislang unerschlossene hydroelektrische Potenziale auf, deren Erschließung technisch machbar und wirtschaftlich sinnvoll sein kann."**

Zu Beginn jedes Abschnitts erfolgt eine Einordnung des jeweiligen Themas und seiner Relevanz. Daraufhin wird der Stand von Forschung und Technik skizziert, bevor beurteilt wird, inwieweit das Ziel des Kapitels erreicht und die zugehörige Forschungsfrage beantwortet werden konnte (vgl. Kapitel 1.4). Abschließend wird bewertet, welchen Beitrag die jeweiligen Ergebnisse zur Schließung bestehender Wissenslücken leisten, wie sie das Forschungsfeld erweitern und welche Einschränkungen in der Methodik bei der Interpretation zu berücksichtigen sind.

### *7.2.1. Hydroelektrische Potenziale im Bergbau*

Der weltweite Bergbausektor produziert die mineralischen Rohstoffe, die als Grundlage für nahezu alle Industrie- und Konsumgüter dienen. Neben der Herausforderung, die stetig steigende Nachfrage zu decken, muss der Bergbau zugleich umweltverträglicher werden, insbesondere aufgrund des hohen Energie- und Wasserbedarfs (Adiansyah et al. 2016; Gunson et al. 2012; Igogo et al. 2021). Aktuelle Strategien und Entwicklungen im Bergbau zielen darauf ab, den Wasserbedarf zu minimieren und durch Elektrifizierung und die Nutzung erneuerbarer Energien die $CO_2$-Emissionen zu verringern (Gunson et al. 2010; Rodríguez et al. 2023; Igogo et al. 2021). Die innerbetriebliche Nutzung von Wasserkraft kann den betrieblichen Energiebedarf senken und dem genutzten Wasser einen Mehrwert verleihen.

Trotz der erfolgreichen historischen Beispiele findet Wasserkraft im heutigen Bergbau kaum noch Anwendung (Abbaspour und Abbaspour 2022). Innerbetriebliche Wasser- und Fluidströme werden bislang nur in Einzelfällen durch Kleinwasserkraftwerke energetisch genutzt (Easy Hydro 2023a; Page et al. 2013; Le Roux 2012). Bisherige Betrachtungen innerbetrieblicher Wassernetzwerke konzentrieren sich vor allem auf die Reduktion des Pumpenergiebedarfs (Gunson et al. 2010) oder die Erfassung und Bilanzierung des Wasserverbrauchs (Janowicz 2011; Punkkinen et al. 2016). Eine systematische Analyse der hydroelektrischen Potenziale in Bergwerken liegt bislang nicht vor.

Basierend auf dem Kontext von Wasser, Energie und Bergbau sowie den bekannten Projekten im Bereich der Wasserkraftnutzung im Bergbau und der daraus resultierenden Forschungslücke adressiert Kapitel 4 die folgende Forschungsfrage:

**„Welche hydroelektrischen Potenziale treten im Hartgestein-Bergbau auf und wie können diese systematisch ermittelt und bewertet werden?"**

Ziel des Kapitels ist es, hydroelektrische Potenziale nicht nur zu identifizieren, sondern auch hinsichtlich der Umsetzbarkeit zu bewerten. Das Ziel von Kapitel 4 ist daher wie folgt formuliert:

**„Qualitative Bewertung und quantitative Abschätzung von methodisch identifizierten und definierten hydroelektrischen Potenzialen in Bergwerksstandorten“**

Die Forschungsfrage kann eindeutig beantwortet werden. Die Anwendung einer strukturierten Methodik identifiziert sieben klar abgegrenzte Potenzialkategorien, die insgesamt 23 typische Fluidströme im Bergbau mit potenzieller energetischer Nutzbarkeit systematisch erfassen. Damit kann auch die Hypothese bestätigt werden, dass in Bergwerken bislang unerschlossene hydroelektrische Potenziale existieren, deren systematische Erfassung mit einem geeigneten Ansatz möglich ist.

Der gewählte methodische Rahmen erweist sich als geeignet, um das Ziel des Kapitels zu erreichen und ein übertragbares System zur Identifikation hydroelektrischer Potenziale zu entwickeln. Die Potenziale werden zuerst abgeleitet und anschließend qualitativ bewertet sowie quantitativ abgeschätzt.

Die zentralen Ergebnisse aus Kapitel 4 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

(i) Entwicklung einer systematischen Methode zur Identifikation hydroelektrischer Potenziale,
(ii) Ableitung und Definition von sieben typischen Potenzialkategorien,
(iii) Abschätzung der Umsetzbarkeit, des Potenzialumfangs und des technischen Aufwands je Kategorie.

Die Ergebnisse zeigen, dass in Bergwerken unter bestimmten Bedingungen vielfältige Fluidströme mit hydroelektrischem Potenzial auftreten. Diese Potenziale sind jedoch nicht universell nutzbar und erfordern stets eine standort- und betriebsspezifische Bewertung hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Machbarkeit. Zwischen den Potenzialkategorien bestehen deutliche Unterschiede: Fallleitungen und anlagenspezifische Potenziale können als etablierte Anwendungen angesehen werden, für sie existieren erprobte technische Lösungen (vgl. Easy Hydro (2023a) und Whillier (1977)). Abschnitte von Rohleitungen und betriebliche Wasserquellen lassen sich technisch mit Konzepten aus anderen Branchen vergleichen (vgl. Crespo Chacón et al. (2020), Jorge et al. (2021) und Carravetta et al. (2014)), wodurch ein Transfer entsprechender Technologien denkbar erscheint. Demgegenüber sind Anwendungen im Bereich des hydraulischen Feststofftransports bislang kaum erforscht, obwohl sie das größte theoretische Energiepotenzial aufweisen. Aufgrund hoher Feststoffkonzentrationen und unbekannten Fließeigenschaften bestehen erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der technischen Realisierbarkeit und potenzieller Verluste. In der Literatur finden sich zwar erste Hinweise auf mögliche Lösungsansätze, etwa in Form spezieller Feststoffturbinen für Schüttgüter (vgl. Prenner (2015)) oder patentierter Turbinenkonzepte für Ölsande (vgl. Odegard (2009)), ein technischer Nachweis unter realen Bedingungen liegt bislang jedoch nicht vor.

Bei der Bewertung der hydroelektrischen Potenziale ist die Unterscheidung zwischen tatsächlicher Energieerzeugung und Energierückgewinnung von zentraler Bedeutung. Nicht alle identifizierten Potenziale stellen im engeren Sinne neue Energiequellen dar, vielmehr handelt es sich in einigen Fällen um die Rückführung bereits eingespeister Energie, ähnlich wie bei Wasserversorgungsnetzwerken (vgl. Novara und McNabola (2021)). Dennoch ist dieser Beitrag für die Energiebilanz eines Bergwerks wesentlich, da durch die Rückgewinnung der externe Energiebedarf wirksam reduziert und die betriebliche Energieeffizienz erhöht werden kann.

Im Vergleich zur bestehenden Literatur liefert Kapitel 4 substanzielle neue Erkenntnisse über die energetische Nutzung von Fluidströmen im Bergbau. Bisherige Ansätze, etwa von Gunson (2013), Janowicz (2011) oder dem Minerals Council of Australia (2022), konzentrieren sich ausschließlich auf Wasserbilanzen zur Dokumentation des betrieblichen Wasserverbrauchs. Eine systematische Analyse mit Fokus auf hydroelektrische Nutzung blieb bislang aus. Die vorliegende Arbeit schließt diese Lücke, indem das

energetische Potenzial innerbetrieblicher Fluidströme erstmals strukturiert und systematisch untersucht wird.

Ein zentrales Ergebnis dieser Arbeit ist die Entwicklung klar definierter Potenzialkriterien, die eine systematische, nachvollziehbare und übertragbare Bewertung von Fluidströmen im Hinblick auf ihre hydroelektrische Nutzbarkeit ermöglichen. Diese Kriterien werden eigenständig unter Berücksichtigung der spezifischen Rahmenbedingungen des Bergbaus abgeleitet. Damit liegt erstmals eine generalisierbare Bewertungsgrundlage vor, die die Identifikation und Analyse hydroelektrischer Potenziale in bergbaulichen Systemen strukturiert unterstützt.

Im Gegensatz zu einzelnen dokumentierten Anwendungsfällen, wie der hydroelektrischen Nutzung von Kühlwasser im südafrikanischen Steinkohlebergbau seit den 1970er Jahren (Whillier 1977; Le Roux 2012), der Verwendung einer Turgo-Turbine zur Energiegewinnung bei der Aufbereitung saurer Grubenwässer (Page et al. 2013), oder dem Einsatz von PaTs in drei Bergwerken durch Easy Hydro (2023a), bietet diese Arbeit erstmals eine systematische, ganzheitliche Herleitung und Bewertung möglicher Einsatzfelder. Die genannten Beispiele zeigen zwar die technische Machbarkeit auf, liefern jedoch keine methodische Analyse der vorherrschenden Potenziale oder vergleichende Bewertung.

Die durchgeführte SWOT-Analyse ergänzt die rein technische Betrachtung um eine strukturierte Bewertung der Potenzialkategorien hinsichtlich ihrer Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken. Die näherungsweisen Berechnung einzelner Anwendung auf Basis literaturbasierter Volumenströme nach dem Modell von Gunson (2013) ermöglicht zudem eine erste quantitative Abschätzungen der Potenziale. Damit liefert Kapitel 4 eine deutlich fundiertere Analyse als bisherige Fallstudien, die sich meist auf eine deskriptive Darstellung einzelner Anwendungen beschränken (vgl. Antoine et al. (2020), Chadwick (2018), Le Roux (2012) und Grzegorz (2021)).

Trotz der systematischen Vorgehensweise weist Kapitel 4 methodische und inhaltliche Einschränkungen auf, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen. Die entwickelte Methodik zur Identifikation und Kategorisierung hydroelektrischer Potenziale basiert auf theoretischen Herleitungen und Literaturdaten. Da keine empirischen Fallbeispiele vorliegen, können folglich nicht in allen Fällen spezifische und standortbezogene Potenzial- und Ausschlusskriterien formuliert werden. Dies schränkt die Detailtiefe einzelner Bewertungen ein, erlaubt jedoch eine hohe Übertragbarkeit auf verschiedene Bergwerksstandorte. Der gewählte Ansatz der paarweisen Überprüfung zwischen 14 definierten Komponenten erweist sich dabei als geeignet, um ein möglichst vollständiges Bild potenzieller Fluidströme zu erhalten. Dies bestätigt sich durch eine Rückwärtskontrolle der bekannten Quellen und Beispiele.

Die Analyse konzentriert sich bewusst auf konventionelle Hartgesteinsbergwerke mit typischen Aufbereitungsverfahren wie Flotation oder Haldenlaugung. Um die Generalisierbarkeit zu gewährleisten, werden hydraulische Vereinfachungen vorgenommen, wodurch reale Standortfaktoren, etwa Druckverluste, genaue Volumenströme oder Leitungsverläufe, nicht berücksichtigt werden. Die Quantifizierungen basieren auf Angaben von Gunson (2013) und bieten eine vergleichbare, wenn auch modellhafte Grundlage. Weitere Fluidströme mit hydroelektrischem Potenzial könnten in der Realität bestehen, werden jedoch durch die gewählte Generalisierung nicht erfasst.

Insgesamt liefert Kapitel 4 eine belastbare, methodisch nachvollziehbare Grundlage zur systematischen Analyse hydroelektrischer Potenziale im Bergbau. Die Ergebnisse besitzen konzeptionellen Charakter und sind vorrangig als Ausgangspunkt für weiterführende empirische Forschung zu verstehen. Insbesondere die Validierung der Potenzialkategorien durch reale Messdaten stellt einen zentralen nächsten Schritt dar. Die Arbeit erweitert damit den bisherigen Forschungsstand um eine strukturierte Methodik zur energetischen Bewertung von Fluidströmen in Bergwerken.

### *7.2.2. Einfluss bergbaulicher Planungsparameter auf das hydroelektrische Potenzial*

Die Planung von Bergwerken ist ein komplexer, mehrstufiger und iterativer Prozess, der maßgeblich durch geologische, topografische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen geprägt ist. Jedes Bergwerk wird individuell und standortspezifisch konzipiert, wobei eine Vielzahl technischer, organisatorischer und regulatorischer Parameter zu berücksichtigen sind. Einige dieser Parameter lassen sich aktiv gestalten, während andere durch externe Gegebenheiten vorgegeben sind. Die in Kapitel 4 identifizierten hydroelektrischen Potenziale resultieren aus betrieblichen Fluidströmen und sind somit eng an die spezifische Auslegung und Planung des Bergwerks gekoppelt. Planungsentscheidungen beeinflussen daher nicht nur die Wirtschaftlichkeit und Effizienz des Betriebs, sondern auch, ob und in welchem Umfang energetisch nutzbare Fluidströme überhaupt entstehen. Bislang ist die Nutzung solcher Potenziale jedoch kein integraler Bestandteil konventioneller Planungsprozesse im Bergbau.

Zur Planung von Bergwerken existieren Fachliteratur und etablierte Grundlagenwerke (Hartman und Mutmansky 2002; Bise 2003; Roumpos und Papacosta 2013; Hustrulid et al. 2013). Einzelne Aspekte wasserführender Systeme, insbesondere zur Auslegung und Führung von Rohrleitungen, werden als Teil der Planung von Aufbereitungsanlagen behandelt (Bausbacher und Hunt 1993; Moran 2016). Diese konzentrieren sich allerdings vorrangig auf hydraulische Auslegungen oder die betriebswirtschaftliche Optimierung, etwa durch Minimierung der Pumpenergie. Eine gezielte Betrachtung im Hinblick auf die Gewinnung von Energie durch Wasserkraft findet dabei nicht statt.

Eine systematische Analyse bergbaulicher Planungsparameter im Kontext hydroelektrischer Potenziale liegt bisher nicht vor. Es ist bislang nicht untersucht, welche betrieblichen oder infrastrukturellen Parameter das nutzbare Wasserkraftpotenzial maßgeblich beeinflussen und wie diese im Rahmen der Planung gezielt angepasst werden können. Die energetische Nutzung innerbetrieblicher Fluidströme stellt somit ein bislang unbeachtetes, aber potenziell bedeutsames Planungsziel dar. Aus dieser Forschungslücke leitet sich die zweite Forschungsfrage dieser Arbeit ab:

**„Welche bergbaulichen Planungsparameter beeinflussen das hydroelektrische Potenzial von Bergwerken, und wie können diese optimiert werden?“**

Ziel von Kapitel 5 ist es, relevante Planungsparameter zu identifizieren und hinsichtlich ihres Einflusses auf hydroelektrische Potenziale zu analysieren. Dieses Ziel ist wie folgt formuliert:

**„Identifikation und Bewertung bergbaulicher Planungsparameter im Hinblick auf ihren Einfluss, ihre Ausschlusswirkung und ihre gezielte Beeinflussbarkeit zur Optimierung hydroelektrischer Potenziale.“**

Die Forschungsfrage kann umfassend beantwortet werden. In der vorliegenden Arbeit werden relevante bergbauliche Planungsparameter systematisch identifiziert, den drei zentralen Planungskategorien zugeordnet und hinsichtlich ihres Einflusses auf hydroelektrische Potenziale analysiert. Dabei wird für jeden Parameter bewertet, ob und in welchem Maß er im Planungsprozess gezielt beeinflussbar ist und welche Auswirkungen eine entsprechende Optimierung auf die Ausprägung des Potenzials haben kann. Insgesamt werden 435 Planungsparameter erfasst:

(i) 126 in der Kategorie Frischwasserversorgung,
(ii) 173 in der Aufbereitungsanlage und dem Wassernetzwerk,
(iii) 136 im Bereich Bergeteich und Rohrleitungen für Aufbereitungsberge.

Von diesen Parametern zeigen 94 einen direkten Einfluss auf das hydroelektrische Potenzial. Die große Anzahl unterstreicht die hohe Komplexität der Bergwerksplanung und belegt, dass energetisch nutzbare Fluidströme maßgeblich durch technische, infrastrukturelle und organisatorische Entscheidungen geprägt werden. Gleichzeitig wird deutlich, dass die Erzeugung hydroelektrischer Energie bisher kein

etabliertes Ziel in der bergbaulichen Planung darstellt, wodurch sich bislang ungenutzte Optimierungspotenziale ergeben.

Ein zentrales Ergebnis ist die Erarbeitung spezifischer Ausschlusskriterien: Für mehrere Planungsparameter wird nachgewiesen, dass sie bestimmte hydroelektrische Potenziale vollständig ausschließen können. Darüber hinaus wird für alle relevanten Parameter systematisch analysiert, welche Einflussdimensionen (Volumenstrom, Fallhöhe, Fluideigenschaften, Verluste und Nutzbarkeit) betroffen sind und in welchem Maß diese durch gezielte planerische Anpassungen verändert werden können. Dabei zeigt sich, dass insbesondere eine Erhöhung des Volumenstroms und der Fallhöhe grundsätzlich vorteilhaft ist, jedoch nur 26 der untersuchten Parameter direkten Einfluss auf diese Dimensionen nehmen können. Für die Planungskategorie der Rohrleitung für Aufbereitungsberge kann die Nutzbarkeit allein durch 26 Parameter beeinflusst werden. Verluste erweisen sich insgesamt als die am stärksten beeinflussbare Dimension, wobei das planerische Ziel ihrer Minimierung weitgehend mit bestehenden Planungspraktiken und -zielen übereinstimmt.

Die Analyse zeigt ebenfalls, dass viele Parameter interdependent sind und sich nicht isoliert optimieren lassen. Insbesondere Maßnahmen zur Erhöhung von Fallhöhen oder Volumenströmen stehen häufig im Zielkonflikt mit betrieblichen Anforderungen, wie etwa der Minimierung des Wasserverbrauchs. Dennoch können konkrete Ansatzpunkte identifiziert werden, mit denen sich das hydroelektrische Potenzial im Planungsprozess systematisch verbessern lässt, etwa durch topografische Anordnung, Leitungsauslegung oder Betriebsstrategien.

Damit wird das Ziel von Kapitel 5 erreicht: Die relevanten Planungsparameter werden identifiziert, in ihren Wirkzusammenhängen beschrieben und hinsichtlich ihrer Beeinflussbarkeit sowie ihrer Rolle als Ausschlussfaktoren systematisch bewertet. Die Ergebnisse liefern eine fundierte Grundlage für eine gezielte Integration hydroelektrischer Überlegungen in künftige Planungsprozesse von Bergwerken.

Im Vergleich zu bestehender Fachliteratur zur Planung von Bergwerken, die eine umfassende Darstellung technischer, organisatorischer und infrastruktureller Komponenten bietet, verknüpft die vorliegende Arbeit erstmals systematisch bergbauliche Planungsparameter mit hydroelektrischen Potenzialen. Insbesondere zur Auslegung und Führung wasserführender Systeme existieren etablierte Grundlagenwerke, etwa von Bausbacher und Hunt (1993) sowie Hartman und Mutmansky (2002). Diese Quellen konzentrieren sich jedoch überwiegend auf hydraulische Effizienz und die Reduktion von Pumpenergie, ohne eine energetische Nutzung im Sinne hydroelektrischer Potenziale zu berücksichtigen. Durch die strukturierte Erhebung und Kategorisierung von 435 Planungsparametern wird eine belastbare methodische Basis geschaffen, auf deren Grundlage sich der Einfluss einzelner Planungsentscheidungen auf die maßgeblichen Dimensionen des hydroelektrischen Potenzials systematisch bewerten lässt. Diese Herangehensweise stellt einen methodischen Fortschritt im bisherigen Forschungsfeld dar.

Während die Entwicklung hydroelektrischer Anwendungen im Bergbau bislang stets auf Einzelfallentscheidungen beruhte (vgl. Tabrizia und Markoski (2021), bnamericas (2015) oder Cornisch (2015)), bietet die aufbereitete Parameterliste nun erstmals die Möglichkeit, Planungsprozesse gezielt hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das hydroelektrische Potenzial zu analysieren und zu optimieren. Damit wird ein zentraler Schritt hin zur Integration von Wasserkraft in die frühzeitige Konzeption von Bergwerken geleistet.

Darüber hinaus wird gezeigt, dass eine sorgfältige Planung wasserführender Komponenten im Bergbau, analog zu etablierten Prinzipien der Wassernetzwerksplanung in Bergwerken (vgl. Bausbacher und Hunt (1993) sowie Hartman und Mutmansky (2002)), nicht nur zur Minimierung von Pumpenergien beiträgt, sondern auch das technische Potenzial zur Energierückgewinnung systematisch erhöhen kann. Die Arbeit erweitert damit die bisherige Sichtweise von hydraulisch optimierter Planung um die energetische

Perspektive und zeigt praxisrelevante Ansatzpunkte für eine ressourceneffizientere Auslegung bergbaulicher Infrastrukturen auf.

Die kritische Betrachtung der Ergebnisse beleuchtet einige methodische Einschränkungen und zeigt die praktische Relevanz der Ergebnisse. Die Analyse der Planungsparameter basiert auf einem literaturgestützten, übergreifenden Ansatz, der eine systematische und anwendungsübergreifende Betrachtung ermöglicht. Diese Methodik fördert die Generalisierbarkeit der Ergebnisse über spezifische Einzelfälle hinaus und unterstützt deren Übertragbarkeit auf verschiedene Bergwerksstandorte und -typen. Gleichzeitig führt die notwendige Abstraktion dazu, dass einzelne Parameter nicht in der Tiefe analysiert werden können.

Die Untersuchung der Beeinflussbarkeit einzelner Parameter liefert erste wertvolle Hinweise auf Optimierungspotenziale. Aufgrund der theoretischen Herleitung bleibt die Aussagekraft für die konkrete praktische Umsetzung jedoch eingeschränkt. Die entwickelten Ansätze sind primär als Impulse für weiterführende Forschung oder spezifische Anwendungsfälle zu verstehen, nicht jedoch als allgemeingültige Handlungsanleitungen.

Zur Sicherstellung einer handhabbaren Parametermenge werden bewusst Einschränkungen und Annahmen getroffen. Insbesondere genehmigungsrechtliche Rahmenbedingungen, die stark länderspezifisch ausfallen, werden nur begrenzt berücksichtigt. Dies erhöht zwar die internationale Übertragbarkeit der Ergebnisse, mindert jedoch zugleich die Detailtiefe für spezifische regionale Kontexte.

Die Analyse zeigt, dass zahlreiche Planungsparameter direkten Einfluss auf die Dimensionen des hydroelektrischen Potenzials haben (z. B. Volumenstrom, Fallhöhe). In mehreren Fällen ist eine gezielte Optimierung im Rahmen der Planungsprozesse grundsätzlich denkbar. Jedoch ist zu beachten, dass diese Parameter primär der funktionalen und wirtschaftlichen Zielerreichung des Bergbaus dienen. Eine Anpassung im Sinne einer Energieoptimierung kann daher nur dann erfolgen, wenn der ursprüngliche Zweck und die technische Funktionalität nicht beeinträchtigt werden. Optimierungen müssen stets in Einklang mit dem bergbaulichen Gesamtkonzept erfolgen.

### *7.2.3. Fallstudie zur wirtschaftlichen und technischen Betrachtung einer Wasserkraftanlage im Bergbau*

In den vorangegangenen Unterkapiteln 7.2.1 und 7.2.2 wird gezeigt, dass im Bergbau hydroelektrische Potenziale existieren können und deren Ausprägung maßgeblich von spezifischen Planungsparametern abhängt. Die Ergebnisse zeigen, dass durch geeignete Wasserkraftanwendungen ein Beitrag zur Energieerzeugung innerhalb bergbaulicher Prozesse geleistet werden kann. Dadurch lassen sich zwei der zentralen Herausforderungen des modernen Bergbaus adressieren: der hohe Energiebedarf und der erhebliche Wasserbedarf.

Die aktive Nutzung hydroelektrischer Potenziale innerhalb von Bergwerken ist bislang nur in wenigen Einzelfällen dokumentiert. Entsprechend gering ist die Anzahl systematisch ausgewerteter Fallstudien oder belastbarer Praxisbeispiele (vgl. Kapitel 3.3). Einige dokumentierte Anwendungen stammen aus dem südafrikanischen Steinkohlebergbau, wo bereits seit den 1970er Jahren Rückgewinnungssysteme zur Nutzung der Energie aus Kühlwasserkreisläufen eingesetzt werden (Whillier 1977; Le Roux 2012). Weitere Beispiele umfassen den Einsatz einer Turgo-Turbine zur energetischen Nutzung bei der Aufbereitung saurer Grubenwässer (Page et al. 2013) sowie den Betrieb von Pumpenturbinen in drei Anwendungsfällen, die durch das Unternehmen Easy Hydro (2023a) umgesetzt wurden. Aufgrund ihrer einfachen Wartung, geringen Investitionskosten und kurzen Lieferzeiten gelten PaTs grundsätzlich als geeignete Lösung für industrielle Wassersysteme. Darüber hinaus liegen bisher jedoch keine weiteren dokumentierten Einsatzbeispiele im Bergbau vor.

Trotz dieser Lücken ist in angrenzenden Industrien eine wachsende Zahl an Studien und Anwendungen zu beobachten, etwa in der kommunalen Wasserversorgung, der landwirtschaftlichen Bewässerung oder der industriellen Wasseraufbereitung. In diesen Sektoren werden Pumpenturbinen und Rohr-Turbinen zunehmend erfolgreich eingesetzt (Rossi et al. 2016; Rother 2016; Carravetta et al. 2014; Hannachi et al. 2021; Itani et al. 2020; Kramer et al. 2018; Monteiro et al. 2018; Rodríguez-Pérez et al. 2021; Crespo Chacón et al. 2020). Diese Anwendungen liefern wertvolle technische Anhaltspunkte und verdeutlichen, dass eine Übertragung entsprechender Systeme auf den Bergbau prinzipiell möglich erscheint.

Unkonventionelle Wasserkraftanlagen werden bereits in anderen industriellen Anwendungsfeldern untersucht, jedoch fehlt eine systematische Analyse im Kontext des Bergbaus. Daher ergibt sich für Kapitel 6 folgende Forschungsfrage:

**„Unter welchen wirtschaftlichen und technischen Rahmenbedingungen können hydroelektrische Potenziale im Bergbau genutzt werden und wie können diese Potenziale optimiert werden?“**

Ziel des sechsten Kapitels ist es, eine belastbare Abschätzung der wirtschaftlichen und technischen Voraussetzungen zu entwickeln, unter denen der Einsatz von Turbinen zur Nutzung unkonventioneller hydroelektrischer Potenziale im Bergbau realisierbar ist:

**„Eine Abschätzung der wirtschaftlichen und technischen Rahmenbedingungen, die für den Einsatz von Turbinen zur Nutzung unkonventioneller hydroelektrischer Potenziale im Bergbau erforderlich ist.“**

Die Forschungsfrage kann umfassend beantwortet werden. Im Rahmen der in drei Szenarien unterteilten Fallstudie werden die wirtschaftlichen und technischen Rahmenbedingungen analysiert, unter denen hydroelektrische Potenziale im Bergbau nutzbar sind.

**Szenario A** zeigt, dass ein spezifisches hydroelektrisches Potenzial unter realen Bedingungen wirtschaftlich genutzt werden kann. Selbst bei deutlich verschlechterten Bedingungen bleibt der Betrieb profitabel. Die Sensitivitätsanalyse ergibt, dass bereits ab etwa 25 % der maximalen Energieproduktion ein wirtschaftlicher Betrieb möglich ist. Der Nettobarwert bleibt auch bei steigenden Investitions- und Betriebskosten positiv und in einem wirtschaftlich attraktiven Bereich.

**Szenario B** untersucht gezielte Optimierungen relevanter Planungsparameter. Es kann gezeigt werden, dass bestimmte, modifizierbare Parameter das hydroelektrische Potenzial signifikant erhöhen und einen Mehrwert zwischen 20.000 USD und 75.882 USD pro Prozent Optimierung im NPV generieren. Die Analyse bietet eine Grundlage zur Aufstellung realer Kosten-Nutzen-Abwägungen im Rahmen der Projektentwicklung.

**Szenario C** demonstriert, dass auch bei der Nutzung unkonventioneller Medien wie Feststoffsuspensionen ein wirtschaftlicher Betrieb möglich sein kann. Trotz eines technischen Gesamtwirkungsgrads deutlich unterhalb konventioneller Wasserkraftanlagen mit zusätzlichen Verlusten von bis zu 70 % bleibt das theoretische Potenzial relevant und kann zu einem positiven Nettobarwert führen. Die Ergebnisse zeigen, dass eine energetische Nutzung auch außerhalb klassischer Wassereigenschaften denkbar ist. Das ermöglicht neue Ansätze bei der Planung von Rohrleitungen und Aufbereitungsanlagen.

Insgesamt zeigt die Fallstudie, dass die Nutzung hydroelektrischer Potenziale im Bergbau unter bestimmten technischen und wirtschaftlichen Voraussetzungen realisierbar und wirtschaftlich sinnvoll ist. Die vorgestellten Methoden liefern eine belastbare Entscheidungsgrundlage zur Bewertung und Optimierung solcher Anwendungen im industriellen Kontext und erfüllen damit das dritte Forschungsziel.

Die in Kapitel 6 erarbeiteten Ergebnisse erweitern den bisherigen Forschungsstand deutlich. Erstmals wird eine umfassende wirtschaftliche Fallstudie zur Nutzung von Wasserkraft im Bergbau durchgeführt, die neben der Wirtschaftlichkeitsbewertung auch Sensitivitätsanalysen umfasst. Bisherige Projekte oder Veröffentlichungen beschränkten sich meist auf konzeptionelle Darstellungen oder deskriptive

Einzelberichte, ohne eine belastbare wirtschaftliche Analyse vorzulegen (vgl. Cornisch (2015), Chadwick (2018), Le Roux (2012) oder Easy Hydro (2023a)). Auch die Betrachtung unkonventioneller Anlagen zur energetischen Nutzung von Feststoff- oder Schlammströmen stellt ein Novum im bergbaulichen Kontext dar. Zwar existieren entsprechende Ansätze in anderen Industriezweigen, doch lagen bisher keine anwendungsnahen Fallstudien für den Bergbau vor (vgl. Kawalec und Król (2021), Mühlmann et al. (2019), Rother (2016) oder Huang et al. (2020)).

Darüber hinaus können auf Basis der Fallstudien erstmals technische und wirtschaftliche Schwellenwerte abgeleitet werden, die für den erfolgreichen Einsatz hydroelektrischer Systeme im Bergbau erforderlich sind. Frühere Arbeiten beschränken sich auf grobe Ideen oder Konferenzbeiträge, ohne eine systematische Bewertung der realistischen Umsetzungsbedingungen (vgl. Kaplunov et al. (2015), Linkov et al. (2015) oder Knyazkin (2019)).

Ein zentrales Ergebnis betrifft die bislang vorgebrachte Annahme, dass sich Wasserkraftanlagen im Bergbau aufgrund der begrenzten Betriebsdauer nicht wirtschaftlich betreiben ließen (Abbaspour und Abbaspour 2022). Die vorliegende Arbeit zeigt, dass für Kleinwasserkraftwerke keine mehrjährigen Laufzeiten notwendig sind, um Kostendeckung und Wirtschaftlichkeit zu erreichen. Dieses Ergebnis relativiert ein wesentliches Argument aus der bisherigen Literatur, wonach sich hohe Anfangsinvestitionen in der Regel nur über lange Betriebszeiträume amortisieren lassen – eine Annahme, die auf Eigenheiten konventioneller Wasserkraftwerke basiert, jedoch für innerbetriebliche Anwendungen im Bergbau nicht in dieser Form zutrifft.

Die detaillierte Modellierung des Basisszenarios A bildet eine belastbare Grundlage für die anschließenden Szenarien B und C und ermöglicht fundierte Aussagen zur ökonomischen Realisierbarkeit von Wasserkraftanlagen in Bergwerken. Die kritische Reflexion der Ergebnisse aus Kapitel 6 zeigt dennoch methodische und inhaltliche Einschränkungen, die bei der Interpretation zu berücksichtigen sind.

Die hydraulischen Berechnungen im Basisszenario werden mit einer vereinfachten Nettofallhöhe durchgeführt, ohne konkrete Annahmen zur Strömungsgeschwindigkeit oder Rohrdimensionierung einzubeziehen. Abweichungen von diesen Parametern in realen Anlagen könnten die Energieausbeute beeinflussen und somit die prognostizierte Wirtschaftlichkeit verändern.

Langfristige Effekte, wie eine mögliche durch Verschleiß verursachte Veränderung des Anlagenwirkungsgrads über die Betriebsdauer hinweg, werden nicht berücksichtigt, obwohl diese für die Bewertung über längere Zeiträume relevant sein können. Ebenso werden staatliche Förderungen, Einspeisevergütungen oder alternative Finanzierungsmodelle bewusst nicht berücksichtigt. Diese Faktoren könnten in realen Projekten die Wirtschaftlichkeit weiter verbessern, bleiben in der vorliegenden Analyse jedoch unberücksichtigt.

Für hydroelektrische Potenziale auf Basis von Frischwasser oder vergleichbaren Fluiden lassen sich etablierte Modelle zur Abschätzung technischer Kennwerte heranziehen. Die Bewertung von Potenzialen mit feststoffhaltigen Fluiden hingegen ist methodisch anspruchsvoll, da bislang keine erfolgreichen technischen Umsetzungen bekannt sind. Szenario C zeigt, dass ein Betrieb solcher Systeme unter der Annahme eines Wirkungsgrads von mindestens 30 % gegenüber Frischwasser wirtschaftlich möglich wäre. Ob dieser Wert unter realen Bedingungen erreichbar ist, kann jedoch ohne experimentelle oder CFD-gestützte Untersuchungen nicht abschließend bewertet werden. Die Aussagekraft dieses Ergebnisses ist daher hypothetisch und hängt stark vom spezifischen Fluid ab.

Die Qualität der Fallstudie ist eng mit der Validität der verwendeten Daten verknüpft. Diese stammen von Easy Hydro, einem Unternehmen mit praktischer Erfahrung im Einsatz von Pumpenturbinen in Wassernetzwerken und Bergwerken. Aufgrund der gewerblichen Vertraulichkeit ist ein vollständiger Einblick in die Quelldaten nicht möglich, sodass für einige Parameter (z. B. Standort, Strompreise, Betriebskosten und Laufzeiten) sinnvolle und konservativ angesetzte Annahmen getroffen werden müssen.

Die wirtschaftlichen Berechnungen sind daher tendenziell zurückhaltend, was die Robustheit der Aussagen erhöht. Gleichzeitig werden die technischen Parameter mit hoher Genauigkeit ermittelt, wodurch die Fallstudie trotz der genannten Einschränkungen eine aussagekräftige und realitätsnahe Einschätzung zur wirtschaftlichen Nutzung unkonventioneller hydroelektrischer Potenziale im Bergbau ermöglicht.

## 7.3. Implikationen und Empfehlungen

Aus den Erkenntnissen dieser Arbeit ergeben sich zentrale Implikationen sowie konkrete Empfehlungen für verschiedene Stakeholder. Im Folgenden werden zunächst die wichtigsten Implikationen erläutert, bevor in Tabelle 7-1 spezifische Handlungsempfehlungen für die Stakeholder abgeleitet werden. Die folgenden Implikationen lassen sich aus den Ergebnissen ableiten:

- **Hydroelektrische Potenziale im Bergbau**: Die Ergebnisse legen dar, dass in Bergwerken unter bestimmten Bedingungen hydroelektrische Potenziale in unterschiedlichsten Fluidströmen auftreten können. Diese Potenziale lassen sich systematisch erfassen und können in sieben klar abgrenzbare Kategorien eingeordnet werden. Die entwickelte Methodik erlaubt eine nachvollziehbare und übertragbare Analyse betrieblicher Fluidströme auf ihre energetische Nutzbarkeit durch Bergwerksbetreiber oder Ingenieurbüros.
- **Technische Machbarkeit**: Die Ergebnisse zeigen, dass für mehrere Potenzialkategorien bereits erprobte technische Lösungen zur Verfügung stehen, etwa in Form von Pumpenturbinen für Fallleitungen und bestimmte Rohrleitungsabschnitte. Andere Anwendungsfälle, vor allem im Bereich des hydraulischen Feststofftransports, erfordern hingegen technologische Weiterentwicklungen oder zumindest den Nachweis der technischen Machbarkeit.
- **Wirtschaftliche Machbarkeit**: Die vorgestellte Fallstudie zeigt, dass ein wirtschaftlicher Betrieb von Wasserkraftanlagen im Bergbau möglich ist, selbst unter konservativen Annahmen. Daraus ergibt sich für Bergwerksbetreiber ein konkreter Anreiz, ihren Betrieb auf hydroelektrische Potenziale zu untersuchen und mögliche Energie- und Ertragspotenziale zu identifizieren.
- **Relevanz bergbaulicher Planungsparameter**: Die Analyse verdeutlicht, dass das Auftreten und die Nutzbarkeit hydroelektrischer Potenziale stark von der bergbaulichen Planung abhängen. Die frühzeitige Berücksichtigung hydroelektrischer Potenziale bei den relevanten Planungsparametern kann helfen, um energetisch nutzbare Fluidströme überhaupt entstehen zu lassen. Bereits kleine Anpassungen in der Auslegung relevanter Systeme können den späteren Energieertrag wesentlich beeinflussen.
- **Optimierungspotenziale**: Auch in bestehenden Betrieben bestehen Möglichkeiten zur Optimierung der vorherrschenden hydroelektrischen Potenziale. Durch die gezielte Anpassung oder Steuerung der relevanten technischen und organisatorischen Parameter lassen sich hydroelektrisch nutzbare Fluidströme erzeugen oder deren Potenzial steigern. Solche Maßnahmen sind in vielen Fällen deckungsgleich mit bestehenden Planungszielen und führen nicht zwingend zu Zielkonflikten, sondern ermöglichen Synergieeffekte.
- **Innovationsbedarf**: Technologischer Entwicklungsbedarf besteht insbesondere für die Nutzung von hydroelektrischen Potenzialen im Bereich des hydraulischen Feststofftransports. Die Modellrechnungen deuten auf ein hohes theoretisches Potenzial hin, doch fehlen bislang belastbare Nachweise zur technischen Umsetzbarkeit unter realen Bedingungen. Hier sind weiterführende Forschungs- und Entwicklungsprojekte erforderlich.
- **Nachhaltigkeit und Akzeptanz**: Die Nutzung hydroelektrischer Potenziale kann zur Reduktion von $CO_2$-Emissionen, zur Erhöhung der Energieautarkie und folglich zur Verbesserung der öffentlichen Wahrnehmung von Bergwerken beitragen. Damit eröffnet sich für Betreiber die Chance, ökologische Verantwortung sichtbar zu übernehmen und gleichzeitig wirtschaftlich zu profitieren.

Basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit lassen sich konkrete Empfehlungen für zentrale Stakeholdergruppen im Bergbau und Energiesektor ableiten (vgl. Tabelle 7-1). Sie betreffen insbesondere Bergwerksbetreiber, Anlagenhersteller im Bergbau und der Wasserkraftindustrie sowie die öffentliche Hand. Im Fokus stehen Maßnahmen zur Integration hydroelektrischer Potenziale, zur Förderung technischer Innovationen und zur Schaffung geeigneter regulatorischer und wirtschaftlicher Rahmenbedingungen.

*Tabelle 7-1: Empfehlungen für Bergwerksbetreiber, Anlagenbauer im Bergbau und der Wasserkraft sowie Politik und Behörden*

| **Stakeholder** | **Empfehlung** |
|---|---|
| Bergwerksbetreiber | • Systematische Erfassung und Bewertung hydroelektrischer Potenziale durch betriebliche Fluidströme an bestehenden und in Planung befindlichen Standorten<br>• Einbindung energie- und verfahrenstechnischer Expertise in interdisziplinäre Planungsteams zur frühzeitigen Identifikation, Bewertung und Optimierung energetisch nutzbarer hydroelektrischer Potenziale<br>• Wirtschaftlichkeitsanalyse identifizierter hydroelektrischer Potenziale unter realistischen Annahmen zu Investitions-, Betriebs- und Energiepreisen, um belastbare Entscheidungsgrundlagen für die Umsetzung zu schaffen<br>• Frühzeitige Integration hydroelektrischer Aspekte in Planungsprozesse, insbesondere bei der Auslegung wasserführender Systeme und bergbaulicher Infrastruktur<br>• Aktive Prüfung von Förderprogrammen und Finanzierungsmöglichkeiten sowie strategische Nutzung möglicher Projekte zur Stärkung der ESG-Positionierung und gesellschaftlichen Akzeptanz |
| Anlagenhersteller im Bergbau | • Berücksichtigung hydroelektrischer Aspekte bei der Planung und Auslegung von Aufbereitungsanlagen sowie wasserführenden Infrastrukturen wie Rohrleitungs- und Wassernetzwerken<br>• Anpassung und Weiterentwicklung technischer Komponenten (z. B. Leitungen, Armaturen, Pumpen) im Hinblick auf deren Eignung zur hydroelektrischen Nutzung<br>• Aufbau gezielter Kooperationen mit Turbinenherstellern und Wasserkraftexperten, um integrierte Systemlösungen für den Bergbau zu entwickeln<br>• Erweiterung des Produktportfolios um modulare Lösungen zur Energieerzeugung sowie Vermarktung entsprechender Systeme an Betreiber von Bergwerken und Industrieanlagen |
| Wasserkraftindustrie | • Anpassung und Übertragung bewährter Kleinwasserkrafttechnologien auf die spezifischen Anforderungen bergbaulicher Anwendungen, insbesondere in bestehende Wasser- und Aufbereitungssysteme<br>• Entwicklung neuer, modular einsetzbarer Systemlösungen für den Einsatz im Bergbau, mit Fokus auf Flexibilität, Wartungsfreundlichkeit und Integration in bestehende Infrastrukturen<br>• Forschung und Entwicklung spezialisierter Turbinentechnologien zur hydroelektrischen Nutzung von Suspensionen mit hohem Feststoffanteil<br>• Initiierung und Begleitung von Demonstrationsprojekten in industriellen Umgebungen, um die technische Machbarkeit aufzuzeigen und Vertrauen bei potenziellen Betreibern zu schaffen |
| Politik und Behörden | • Positive Berücksichtigung hydroelektrischer Potenziale in Planungs- und Genehmigungsverfahren, um einen Anreiz für die Erschließung dieser Potenziale zu erzeugen<br>• Anpassung und Erweiterung bestehender Förderprogramme, damit auch kleinere, dezentrale und unkonventionelle Wasserkraftanwendungen im Bergbau förderfähig sind, auch wenn diese primär der Energierückgewinnung dienen<br>• Entwicklung klarer rechtlicher Rahmenbedingungen für die Einspeisung oder Nutzung rückgewonnener oder erzeugter Energie sowie die Anerkennung entsprechender Maßnahmen im Kontext von Nachhaltigkeitszielen und $CO_2$-Bilanzierung<br>• Unterstützung von Demonstrations- und Pilotprojekten zur Risikoreduzierung und Technologiebewertung, um Innovationen gezielt in die Praxis zu überführen |

## 7.4. Forschungsbedarf

Die vorliegende Dissertation bietet eine fundierte Grundlage zur Erschließung hydroelektrischer Potenziale im Bergbau. Für die praktische Anwendung der Ergebnisse sind jedoch vertiefende wissenschaftliche Untersuchungen erforderlich. Die identifizierten Forschungsbedarfe lassen sich drei Themenfeldern zuordnen: der Validierung und Übertragbarkeit der Ergebnisse, der Technologieentwicklung zur Nutzung hydraulischer Feststofftransporte sowie angrenzenden Fragen zur betrieblichen und regulatorischen Integration.

**Validierung und Übertragbarkeit der Ergebnisse**

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass hydroelektrische Potenziale im Bergbau existieren, systematisch identifiziert werden können und sich in bestimmten Fällen bereits mit etablierten Technologien nutzen lassen. Für eine Übertragung in die Praxis und zur Weiterentwicklung des Forschungsstandes sind jedoch vertiefende Untersuchungen erforderlich:

- **Weiterentwicklung techno-ökonomischer Modelle:** Die bestehenden Berechnungsansätze sollten erweitert werden, um Wirkungsgrade, Lastprofile, Volumenströme und Kosten über unterschiedliche Betriebspunkte hinweg präziser und dynamischer abbilden zu können.
- **Quantifizierung der Potenzialkriterien:** Die entwickelten Bewertungskriterien sollten durch reale Betriebsdaten validiert und quantifiziert werden, um ihre Aussagekraft und Anwendbarkeit zu erhöhen.
- **Erhebung empirischer Betriebsdaten:** Es besteht ein erheblicher Bedarf an belastbaren Daten zu Volumenströmen, Fallhöhen und betrieblichen Kosten, um Annahmen zu überprüfen und die Potenzialkategorien realitätsnah zu validieren.
- **Analyse der Beeinflussbarkeit planerischer Parameter:** Anhand realer Projekte oder in Betrieb befindlicher Bergwerke sollte untersucht werden, in welchen Planungsphasen einzelne Parameter gezielt beeinflusst werden können und in welchem Umfang sich daraus Veränderungen des hydroelektrischen Potenzials ergeben.

**Nutzung von Fluidströmen für den hydraulischen Materialtransport**

Die Nutzung von Fluidströmen für den hydraulischen Transport von Feststoffen stellt eine vielversprechende, bislang jedoch unerschlossene Potenzialkategorie dar. Während im Bereich konventioneller Kleinwasserkraftwerke insbesondere die Anwendbarkeit von Pumpenturbinen erprobt ist, fehlt bislang ein praktischer Nachweis für deren Einsatz in feststoffhaltigen Fluiden. Um die technologische Umsetzbarkeit dieser Anwendung zu überprüfen, sind gezielte Forschungsvorhaben erforderlich:

- **Entwicklung robuster Turbinenkonzepte für Feststoffsuspensionen:** Für die energetische Nutzung hydraulischer Feststofftransporte besteht ein konkreter Forschungsbedarf an Turbinenlösungen. Neben der Untersuchung von Pumpenturbinen mit solchen Medien sollten auch alternative und unkonventionelle Turbinenkonzepte experimentell und theoretisch untersucht werden.
- **Analyse von Energieumwandlungsverlusten:** Die energetische Nutzung von Suspensionen ist mit zusätzlichen Verlusten behaftet, etwa durch Reibung, schlechtere Fließeigenschaften oder Verschleiß. Diese Verluste sollten quantifiziert und in technische sowie wirtschaftliche Bewertungen einbezogen werden.
- **Demonstrationsprojekte zur Validierung:** Um die technische Machbarkeit und den energetischen und wirtschaftlichen Nutzen unter realen Betriebsbedingungen zu prüfen, sind Demonstrationsanlagen im Labor und später in aktiven Bergwerken erforderlich.

**Angrenzende Forschungsthemen**

Durch die Schnittmenge der Bereiche Wasser, Energie und Bergbau berührt das untersuchte Themenfeld eine Reihe angrenzender Forschungsbereiche. Um die entwickelten Konzepte in die Praxis überführen zu können, sollten folgende Aspekte weiter untersucht werden:

- **Synergien mit betrieblichem Wassermanagement:** Die Wechselwirkungen zwischen Energieerzeugung und betrieblichem Wassermanagement sollten analysiert werden, einschließlich technischer Integration, organisatorischer Abläufe und wirtschaftlicher Zielkonflikte oder Potenziale.
- **Analyse regulatorischer und regionaler Unterschiede:** Die gesetzlichen, genehmigungsrechtlichen und förderpolitischen Rahmenbedingungen variieren erheblich zwischen Regionen und Ländern. Eine Erfassung der jeweils vorherrschenden Bedingungen ist erforderlich, um Hindernisse und Gestaltungsspielräume zu identifizieren.
- **Bewertung ökologischer und betrieblicher Implikationen:** Der Einfluss der energetischen Nutzung von innerbetrieblichen Fluidströmen auf Umwelt, Anlagensicherheit und Betrieb sollte untersucht werden. Außerdem ist zu untersuchen, ob durch eine gezielte energetische Nutzung dieser Fluidströme Umwelt- und Sicherheitsrisiken sogar verringert werden können.

# 8. Fazit

Die vorliegende Arbeit leistet einen grundlegenden Beitrag zur systematischen Erschließung hydroelektrischer Potenziale im Bergbau. In Kapitel 4 wird eine Methodik entwickelt, mit der sich energetisch nutzbare Fluidströme identifizieren, charakterisieren und bewerten lassen. Darauf aufbauend analysiert Kapitel 5 den Einfluss bergbaulicher Planungsparameter auf diese Potenziale und zeigt, wie diese gezielt optimiert werden können. Kapitel 6 bewertet anhand einer realitätsnahen Fallstudie die technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für den Einsatz von Wasserkraftanlagen in Bergwerken und verdeutlicht deren Potenzial in drei exemplarischen Szenarien.

Aus den Ergebnissen lassen sich drei zentrale Erkenntnisse ableiten: Erstens existieren im Bergbau bislang ungenutzte hydroelektrische Potenziale, die methodisch erfasst und bewertet werden können. Zweitens hängt deren Nutzbarkeit maßgeblich von spezifischen Planungsparametern ab, die zum Teil gezielt angepasst werden können. Drittens zeigt die wirtschaftliche Analyse, dass ein rentabler Betrieb unter realistischen Bedingungen möglich ist. Einen Sonderfall stellt das hydroelektrische Potenzial hydraulischer Feststofftransporte dar, welches aufgrund großer Volumenströme ein hohes theoretisches Potenzial aufweist, auch wenn hierfür bislang keine technische Umsetzung bekannt ist.

Die Untersuchung zeigt zugleich, dass das Thema bisher in Forschung und Praxis nur wenig Beachtung findet. Während die Potenziale für die Wasserkraftbranche bisher zu klein oder zu spezifisch erscheinen, fehlt im Bergbau häufig die Innovationskraft für Technologien außerhalb des Kerngeschäfts. Die vorliegenden Ergebnisse können helfen, diese Vorbehalte auf beiden Seiten abzubauen und die Grundlage für weitere Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zu schaffen. Langfristig eröffnen sie damit neue Perspektiven für eine nachhaltigere und energieeffizientere Rohstoffgewinnung.

## 8.1. Schlussfolgerungen

Zusammenfassend zeigt die Arbeit, dass bisher ungenutzte hydroelektrische Potenziale im Hartgesteinsbergbau auftreten und unter bestimmten Bedingungen genutzt werden können. Wasserkraftanwendungen im Bergbau können daher eine vielversprechende Möglichkeit für nachhaltige Energieerzeugung und Kostenreduktion darstellen. Die systematische Identifizierung und Bewertung der Potenzialkategorien zeigt, dass diese je nach Bergwerksgröße und Wasserumsatz signifikante energetische Potenziale bieten können. Die in Kapitel 4 herausgearbeiteten sieben Potenzialkategorien bieten dabei eine fundierte Grundlage, um hydroelektrische Potenziale gezielt zu identifizieren und zu nutzen.

Kapitel 5 vertieft diese Erkenntnisse durch die Analyse bergbaulicher Planungsparameter, die das hydroelektrische Potenzial beeinflussen können. Es wird deutlich, dass bestimmte Parameter wie die Fallhöhe und der Volumenstrom auf unterschiedliche Weise gezielt angepasst werden können, um das hydroelektrische Potenzial zu maximieren. Durch eine klare Zuordnung der Parameter zu den einzelnen Planungskategorien wird eine systematische Grundlage geschaffen, die bei zukünftigen Optimierungsprozessen als Orientierung dienen kann.

Kapitel 6 liefert mit der praxisorientierten Fallstudie konkrete Einblicke in die wirtschaftlichen und technischen Bedingungen, die erforderlich sind, um hydroelektrische Potenziale im Bergbau erfolgreich zu nutzen. Die Ergebnisse verdeutlichen außerdem, dass gezielte Optimierungen, wie eine Erhöhung der Fallhöhe oder des Volumenstroms, den wirtschaftlichen Wert der Anlagen signifikant steigern können. Auch die Nutzung von Fluidströme mit höherem Feststoffanteil für die Energieerzeugung erscheint machbar. Die Fallstudie zeigt, dass diese Anwendung unter realistischen Bedingungen rentabel sein kann, selbst bei höheren Energieverlusten und erhöhten Kapital- und Betriebskosten.

Daraus lassen sich drei zentrale Schlussfolgerungen ziehen:

(i) **Technisches und wirtschaftliches Potenzial**: Im Bergbau treten bisher ungenutzte hydroelektrische Potenziale auf, dessen Nutzung technisch machbar und wirtschaftlich sinnvoll sein kann. Für Bergwerksbetreiber ergibt sich somit eine Möglichkeit, einen Teil des Energiebedarfs ökologisch und ökonomisch vorteilhafte zu erzeugen.

(ii) **Optimierung durch Planungsparameter**: Durch gezielte Anpassungen an spezifischen bergbaulichen Planungsparametern kann das hydroelektrische Potenzial maximiert werden. Die quantifizierten wirtschaftlichen Vorteile zeigen, dass die Optimierung dieser Parameter ein effektiver Ansatz ist, um das energetische Potenzial im Betrieb voll auszuschöpfen.

(iii) **Nutzung von Fluidströmen für den hydraulischen Feststofftransport**: Die technische und wirtschaftliche Machbarkeit der Nutzung von Fluiden mit hohem Feststoffanteil, wie etwa Aufbereitungsbergen, stellt eine vielversprechende Perspektive dar. Auch bei zusätzlichen Verlusten, die sich durch schlechtere Fließeigenschaften ergeben, bleibt die Nutzung unter vermutlich erreichbaren Rahmenbedingungen wirtschaftlich attraktiv.

## 8.2. Ausblick

Die Nutzung hydroelektrischer Potenziale im Bergbau bietet eine bedeutende Perspektive für die innerbetriebliche Energieerzeugung und -rückgewinnung, dessen Relevanz in den kommenden Jahren noch weiter zunehmen wird. Angesichts des stetig steigenden Energiebedarfs und der damit verbundenen Herausforderungen gewinnen dezentrale, betriebseigene Energiequellen zunehmend an Attraktivität, insbesondere solche, die direkt in bestehende Prozesse integriert werden können. Die Möglichkeit, den Energieverbrauch durch Eigenproduktion zu senken, bietet Bergbauunternehmen Potenzial für langfristige Kostensenkungen und eine unabhängigere Energieversorgung. Aus ökologischer Perspektive sind die optimale Nutzung von Wasserressourcen und die Erhöhung der Energieeffizienz ein wesentlicher Bestandteil der aktuellen und zukünftigen Strategien im Bergbau. Die systematische Erschließung hydroelektrischer Potenziale kann hierzu einen wesentlichen Beitrag leisten, indem Wasser effizienter genutzt und gleichzeitig Energie erzeugt wird, die zur Senkung betrieblicher Emissionen beiträgt.

Um die Akzeptanz für die Nutzung hydroelektrischer Potenziale im Bergbau zu fördern, sollten zunächst bewährte und risikoarme Anwendungsfälle umgesetzt werden. Dies schafft Vertrauen in die Technologie und kann langfristig dem „Race-to-be-Second“ im Bergbau begegnen. Besonders Anwendungsfälle mit geringer technischer Komplexität, klaren wirtschaftlichen Vorteilen und niedrigem Betriebsrisiko bieten sich als Pilotprojekte an und können somit den Weg ebnen für eine breitere Akzeptanz und weitere Entwicklungen.

Für neuartige Anwendungsfälle, etwa die Nutzung von Aufbereitungsbergen, sind weitere technische Untersuchungen erforderlich. Modellrechnungen zeigen zwar ein erhebliches Potenzial, doch fehlen bislang belastbare Nachweise unter realen Bedingungen. Pilotprojekte, Labortests und die Entwicklung verschleißfester Turbinentechnologien sind daher essenziell, um auch komplexere Szenarien technisch und wirtschaftlich zu erschließen. Die in dieser Arbeit erarbeiteten Konzepte, Bewertungskriterien und Handlungsempfehlungen bieten hierfür eine fundierte Ausgangsbasis.

Langfristig bietet die Nutzung innerbetrieblicher hydroelektrischer Potenziale eine realistische Chance, den Bergbau nachhaltiger zu gestalten. Damit eröffnet sich für Forschung und Praxis ein bislang wenig betrachtetes, aber technisch wie wirtschaftlich vielversprechendes Handlungsfeld zur Steigerung der Energieeffizienz und Ressourcenschonung im Bergbau.

# Glossar

**Abzinsung:** Finanzmathematisches Verfahren zur Ermittlung des heutigen Werts (Barwerts) zukünftiger Zahlungen durch Anwendung eines Diskontierungszinssatzes.

**Abzinsungsfaktor:** Multiplikator zur Umrechnung eines zukünftigen Geldbetrags auf seinen heutigen Barwert. Abhängig von Zinssatz und Zeitdauer.

**Anlagenverfügbarkeit:** Kennzahl für den Anteil der Zeit, in der eine technische Anlage funktionsfähig und betriebsbereit ist.

**Aufbereitungsberge (eng. Tailings):** Feste, mineralische Rückstände aus der mechanischen oder physikalischen Aufbereitung von Erzen. Aufbereitungsberge weisen verschiedene physikalische und chemische Eigenschaften auf und werden meistens als Suspension zusammen mit Prozesswasser in Bergeteichen eingelagert (vgl. Lottermoser 2010, S. 206 ff.).

**Bergbau:** Technisch-wirtschaftliche Tätigkeit zur Gewinnung fester mineralischer Rohstoffe aus der Erdkruste. Im Kontext dieser Arbeit bezieht sich der Begriff auf den Hartgesteinsbergbau metallischer Rohstoffe, insbesondere auf die Förderung von Buntmetallen wie Kupfer, Zink oder Blei. Der Begriff umfasst alle Prozesse von der Erschließung über die Gewinnung bis zur Aufbereitung. Der zugehörige Bergbausektor schließt sämtliche betrieblichen, technischen und organisatorischen Einheiten sowie vor- und nachgelagerte Strukturen ein, die direkt oder indirekt an der Rohstoffgewinnung beteiligt sind (vgl. Neukirchen und Ries 2016, S. 25 ff.).

**Bergeteich:** Technische Einrichtung zur Ablagerung feinkörniger Rückstände, die bei der Aufbereitung von Erzen entstehen (vgl. *Aufbereitungsberge*). Bergeteiche dienen als Rückhalte- und Sedimentationsbecken und sind häufig Teil integrierter Wasser- und Stoffkreisläufe in metallischen Bergbaubetrieben (vgl. Lottermoser 2010, S. 210 ff.).

**Bergwerk:** Technische und organisatorische Einheit zur unter- oder übertägigen Gewinnung mineralischer Rohstoffe. In dieser Arbeit bezieht sich der Begriff auf Hartgesteinsbergwerke zur Gewinnung metallischer Erze. Zum Bergwerk zählen neben den Grubenbauen auch die zugehörige Infrastruktur, Energieversorgung und Verarbeitungseinrichtungen (vgl. Neukirchen und Ries 2016, S. 25 ff.).

**Bergwerksplanung:** Gesamtheit der planerischen Aktivitäten zur Entwicklung, Optimierung und Steuerung eines Bergwerksbetriebs unter technischen, wirtschaftlichen und rechtlichen Gesichtspunkten (vgl. Darling 2011, S. 341 ff.).

**Bergwerksstandort:** Geografische Lage eines Bergwerks, die maßgeblich Logistik, Infrastruktur, Energieversorgung und wirtschaftliche Rahmenbedingungen beeinflusst.

**Betriebspunkt:** Spezifische Kombination aus Druck und Volumenstrom, bei der eine Wasserkraftanlage betrieben wird.

**Brech- und Mahlkreislauf:** Verfahrenstechnische Einheit zur mechanischen Zerkleinerung von Hartgestein, bestehend aus mehreren Brechstufen (z. B. Primär- und Sekundärbrecher), Mühlen sowie Sortieraggregaten wie Hydrozyklonen.

**Diskontierungszinssatz:** Zinssatz, mit dem zukünftige Zahlungen auf ihren heutigen Wert abgezinst werden. Er spiegelt Opportunitätskosten des Kapitals sowie bestehende Risiken wider und dient zur Berechnung von Abzinsung und Abzinsungsfaktor.

**Dritte:** Sammelbegriff für Akteure, Einrichtungen oder Einflüsse außerhalb des Betriebsgeländes und des direkten Einflussbereichs eines Bergwerks.

**Druckverlust:** Abnahme des Drucks in strömenden Medien infolge von Reibung und Turbulenzen in Rohrleitungen und Bauteilen (vgl. Aufleger et al. 2020, S. 590).

**Eigennutzung:** Verbrauch oder Verwendung einer Ressource innerhalb des gleichen Standortes, an dem sie erzeugt wurde.

**Energieeffizienz:** Verhältnis von nutzbar verfügbarer Energie zur eingesetzten Energie in einem technischen System.

**Energieerzeugung:** Prozess der Umwandlung von Energiepotenzialen in nutzbare Energieformen wie elektrische Energie.

**Energierückgewinnung:** Technischer Prozess zur Rückführung zuvor eingespeister Energie aus einem System in nutzbarer Form.

**Fallhöhe:** Vertikale Distanz, über die Wasser in einem hydroelektrischen System strömt (vgl. Aufleger et al. 2020, S. 586).

**Feststoffanteil:** Massenanteil fester Partikel in einem Fluid, angegeben als Gewichtsprozent (wt%).

**Fluideigenschaften:** Physikalische Eigenschaften eines Fluids wie Dichte, Viskosität oder Temperatur, die das Strömungsverhalten und die Energieübertragung in hydraulischen Systemen beeinflussen.

**Fluidstrom:** Bewegung eines Fluids durch geschlossene Leitungen oder offene Systeme; charakterisiert durch Parameter wie Druck, Geschwindigkeit, Temperatur, Volumenstrom und Strömungsrichtung.

**Frischwasser:** Von außen zugeführtes Wasser zur Ergänzung des Wasserbedarfs in Bergwerken, das nicht mit bergbaulichen Stoffströmen in Kontakt stand und daher eine hohe Qualität hat (vgl. Minerals Council of Australia 2022, S. 20).

**Genehmigungen:** Im Kontext dieser Arbeit ein Sammelbegriff für gesetzliche, behördliche und planerische Vorgaben, die im Rahmen der Bergwerksplanung zu beachten sind.

**Grubenwasser:** Wasser, das in einem Bergwerk anfällt und Kontakt mit Grubenräumen hatte, häufig Grund- oder Regenwasser (vgl. Lottermoser 2010, S. 9.).

**Gesamtwirkungsgrad:** Produkt der Wirkungsgrade aller aufeinanderfolgenden Teilprozesse eines Systems. In dieser Arbeit umfasst der Gesamtwirkungsgrad den Turbinenwirkungsgrad $n_{Turbine}$ und einen zusätzlichen Wirkungsgrad für nicht-wasserbasierte Fluide $n_{Fluid}$.

**Höhenlage:** Geografische Höhe eines Punktes oder einer Anlage über dem Meeresspiegel.

**Hydraulischer Feststofftransport:** Technisches Verfahren zur Förderung von festen Stoffen (z. B. Aufbereitungsbergen, Versatzmaterial oder Erzkonzentrat) mittels Wasser oder Prozessflüssigkeiten durch Rohrleitungen oder Gräben. Im Bergbau ermöglicht diese Methode den Materialtransport über längere Strecken unter Nutzung natürlicher Gefälle oder Pumpensysteme (vgl. Concha A. 2014, S. 374, Miedema 2019, S. 383).

**Hydroelektrisches Potenzial:** Hydraulische Energie eines Fluids zwischen zwei Punkten mit unterschiedlichem Druck- oder Höhenniveau, die durch den vorhandenen Volumenstrom in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Es stellt eine technisch nutzbare Teilmenge des Wasserkraftpotenzials dar und berücksichtigt reale Energieverluste durch Reibung, Turbulenz und Umwandlungsprozesse (vgl. Heimerl 2013, S. 114). In dieser Arbeit beschreibt der Begriff die potenzielle Stromerzeugung aus Wasserkraft innerhalb bergbaulicher Wassersysteme.

**Kleinwasserkraftwerk:** Anlagen zur dezentralen Nutzung von Wasserkraft, typischerweise mit einer elektrischen Leistung unter 1 MW (vgl. Giesecke et al. 2014, S. 110). Im Bergbau eingesetzte Systeme zur Energieerzeugung lassen sich dieser Kategorie zuordnen.

**Konventionell:** Im technischen Kontext bezeichnet der Begriff etablierte, weit verbreitete oder standardisierte Verfahren und Technologien.

**Mineralische Aufbereitung:** Verfahrenstechnische Prozesse zur Trennung wertvoller Mineralphasen von taubem Gestein. Im metallischen Hartgesteinsbergbau umfasst dies in der Regel Zerkleinerung, Klassierung, Flotation, Dichtetrennung und Entwässerung. Im Rahmen dieser Arbeit schließt der Begriff auch den gesamten technischen Komplex eines Bergwerks ein, der der Aufbereitung dient – einschließlich zugehöriger Gebäude, Maschinen und wassertechnischer Systeme (vgl. Concha A. 2014, S. 2).

**Nettobarwert/Net Present Value (NPV):** Wirtschaftliche Kennzahl zur Bewertung von Investitionen. Sie gibt den heutigen Wert zukünftiger Zahlungsflüsse unter Berücksichtigung eines Diskontierungszinssatzes an. Ein positiver NPV deutet auf die Rentabilität eines Projekts hin.

**Nettofallhöhe:** Effektive Fallhöhe eines Wasserkörpers nach Abzug aller systembedingten Verluste, etwa durch Reibung, Turbulenzen oder Druckverluste. Sie beschreibt die tatsächlich nutzbare Höhendifferenz für die Energiegewinnung in einem hydroelektrischen System (vgl. Aufleger et al. 2020, S. 593).

**Planungsparameter, bergbauliche:** Einflussgrößen, Variablen und Faktoren, die bei der Planung und Entwicklung von Bergbauprojekten systematisch berücksichtigt werden müssen.

**Potenzial:** Fähigkeit eines physikalischen Systems, Energie freizusetzen (vgl. Kaltschmitt et al. 2020, S. 38). Im Kontext der Wasserkraft beschreibt das Energiepotenzial die theoretisch verfügbare Energie eines Wasserkörpers aufgrund seiner Höhenlage (Lageenergie) oder seines Druckniveaus (vgl. Aufleger et al. 2020, S. 672). Das hydroelektrische Potenzial stellt die technisch nutzbare Teilmenge dieses Potenzials dar (siehe *hydroelektrisches Potenzial*).

**Potenzialkategorie:** Klassifikation energetisch nutzbarer Fluidströme anhand gemeinsamer Eigenschaften wie Volumenstrom oder Fallhöhe. Eine Potenzialkategorie fasst mehrere Einzelströme zusammen, die technisch in vergleichbarer Weise zur Energiegewinnung genutzt werden können.

**Potenzialszenario:** Theoretische oder reale Situation innerhalb eines Bergwerks oder seiner Infrastruktur, in der ein hydroelektrisches Potenzial entsteht, das durch konventionelle oder unkonventionelle Technologien energetisch erschlossen werden kann.

**Prozesswasser:** Wasser, das innerhalb des Bergwerks gezielt für betriebliche Prozesse eingesetzt wird (vgl. Lottermoser 2010, S. 9).

**Pumpenturbine:** Reversibel arbeitende Kreiselpumpe, die sowohl als Turbine zur Stromerzeugung als auch als Pumpe eingesetzt werden kann. Pumpenturbinen eignen sich besonders für günstige Systeme mit wechselnden Betriebszuständen (vgl. Kapitel 2.5.2).

**Rheologie:** Wissenschaft von der Verformung und dem Fließverhalten von Materialien unter dem Einfluss äußerer Kräfte. Das rheologische Verhalten beschreibt, wie ein Material auf mechanische Beanspruchung reagiert, insbesondere in Bezug auf seine Fließ- und Verformungseigenschaften (vgl. Concha A. 2014, S. 341).

**Spitzenwertfaktor:** Verhältnis zwischen dem maximal auftretenden Volumenstrom und dem durchschnittlichen Volumenstrom innerhalb eines betrachteten Zeitraums.

**Stromgestehungskosten / Levelized Cost of Energy (LCOE):** Kennzahl zur Berechnung der durchschnittlichen Kosten je erzeugter Energieeinheit über die gesamte Lebensdauer eines Kraftwerks. Sie umfasst Investitions-, Betriebs-, Wartungs- und gegebenenfalls Rückbaukosten.

**Suspension:** Flüssig-fest-Gemisch, in dem feine Feststoffpartikel in einer Flüssigkeit verteilt sind. Im Bergbau treten Suspensionen beispielsweise in Aufbereitungsprozessen oder beim hydraulischen Feststofftransport auf.

**Systemwirkungsgrad:** Verhältnis der nutzbaren Ausgangsleistung zur zugeführten Eingangsleistung eines gesamten Systems. Er beschreibt die Effizienz der Energieumwandlung über alle Systemkomponenten hinweg.

**Unkonventionell:** Bezeichnung für Technologien oder Konzepte, die vom üblichen Stand der Technik abweichen.

**Volumenstrom:** Volumen eines Fluids, das pro Zeiteinheit durch einen definierten Querschnitt fließt, üblicherweise angegeben in $m^3/s$ oder l/s.

**Wasserbedarf:** Gesamte Menge an Wasser, die für den Betrieb eines Bergwerks benötigt wird (vgl. Gunson 2013, S. 12).

**Wasserkraft:** Nutzung der potenziellen und kinetischen Energie von Wasser zur Erzeugung mechanischer oder elektrischer Energie (vgl. Giesecke et al. 2014, S. 38).

**Wassernetzwerk:** System aus Rohrleitungen, Kanälen, Pumpen, Ventilen und Speicherkomponenten zur Versorgung, Rückführung und Ableitung von Wasser innerhalb eines Bergwerks.

**Wasserquelle:** Punkt innerhalb oder außerhalb des Bergwerks, an dem Wasser dem System zugeführt wird, etwa durch Frischwasserzufuhr, Grundwasser oder Oberflächenwasser (vgl. Gunson 2013, S. 12).

**Wassersenke:** Ort oder System, in das Wasser nach seiner Nutzung abgeleitet wird. Typische Senken sind Bergeteiche, Absetzbecken, externe Entwässerungsgräben oder Wasseraufbereitungsanlagen (vgl. Gunson 2013, S. 12).

**Wasserspeicher:** Technische Einrichtung zur temporären Speicherung von Wasser zur Pufferung von Bedarfsspitzen, zur Druckstabilisierung oder als Betriebsreserve (vgl. Gunson 2013, S. 12).

**Wirtschaftlichkeit:** Maß für die ökonomische Effizienz eines Systems, ausgedrückt durch Kennzahlen wie NPV, Amortisationsdauer oder Stromgestehungskosten.

**Wirkungsgrad:** Verhältnis von nutzbarer Ausgangsleistung zur zugeführten Eingangsleistung. Er beschreibt die Effizienz, mit der ein einzelner Prozess oder eine Komponente Energie umsetzt.

# Literaturverzeichnis


**Abazariyan S, Rafee R, Derakhshan S (2018)** Experimental study of viscosity effects on a pump as turbine performance. *Renewable Energy* 127:539–547. doi:10.1016/j.renene.2018.04.084

**Abbaspour H, Abbaspour F (2022**) Renewable energy systems in the mining industry: a literature review and research agenda. *International Journal of Renewable Energy Research* 12(1):569-580. doi:10.20508/ijrer.v12i1.12828.g8438

**Adiansyah JS, Rosano M, Vink S, Keir G, Stokes JR (2016)** Synergising water and energy requirements to improve sustainability performance in mine tailings management. *Journal of Cleaner Production* 133:5–17. doi:10.1016/j.jclepro.2016.05.100

**Agarwal T (2012)** Review of pump as turbine (PAT) for micro-hydropower. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 2(11):163–169

**Alawadhi G, Almehiri M, Sakhrieh A, Alshwawra A, Al Asfar J (2023)** Cost analysis of implementing in-pipe hydro turbine in the United Arab Emirates water network. *Sustainability* 15(1):651. doi:10.3390/su15010651

**Álvarez H, Domínguez G, Ordóñez A, Menéndez J, Álvarez R, Loredo J (2021)** Mine water for the generation and storage of renewable energy: a hybrid hydro-wind system. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18(13). doi:10.3390/ijerph18136758

**Amelio M, Barbarelli S, Schinello D (2020)** Review of methods used for selecting pumps as turbines (PATs) and predicting their characteristic curves. *Energies* 13(23):6341. doi:10.3390/en13236341

**Anderson N, Herriot P, Hodgkinson GP (2001)** The practitioner-researcher divide in Industrial, Work and Organizational (IWO) psychology: where are we now, and where do we go from here? *Journal of Occupational and Organizational Psychology* 74(4):391–411. doi:10.1348/096317901167451

**ANDRITZ Hydro (2015)** ANDRITZ pumps used as turbines. ACT/FPT series. https://www.andritz.com/resource/blob/34004/fd9cdefb249b7fa645228add62d9aa26/hy-andritz-pumps-as-turbines-en-data.pdf (Abruf am 2025-06-15)

**Antamina (2018)** Peruvian world class copper. 2018 Sustainability Report. https://www.antamina.com/sustainability-report-2018/ (Abruf am 2025-06-15)

**Antoine FN, Bertrand GTC, Bertrand KSE, Blanco CJC (2020)** Sustainable development around small scale mining areas by the development of micro hydro power: application cases in Cameroon. *Journal of Power and Energy Engineering* 8(3):36–48. doi:10.4236/jpee.2020.83003

**Aramendia E, Brockway PE, Taylor PG, Norman J (2023)** Global energy consumption of the mineral mining industry: exploring the historical perspective and future pathways to 2060. *Global Environmental Change* 83:102745. doi:10.1016/j.gloenvcha.2023.102745

**Asim T, Mishra R, Kollar LE, Pradhan SR (2014)** Optimal sizing and life-cycle cost modelling of pipelines transporting multi-sized solid–liquid mixtures. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 113:40–48. doi:10.1016/j.ijpvp.2013.11.003

**Aufleger M, Joos F, Jorde K, Kaltschmitt M, Rödl A, Schlüter M, Sens L (2020)** Stromerzeugung aus Wasserkraft. In: Kaltschmitt M, Streicher W, Wiese A (Hrsg) *Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 6., überarb. Auflage.* Springer, Berlin, S 583–684

**Bakhtavar E, Lotfian R (2017)** Applying an integrated fuzzy gray MCDM approach: a case study on mineral processing plant site selection. *International Journal of Mining and Geo-Engineering* 51(2):177–183. doi:10.22059/ijmge.2017.232091.594669

**Bannister D (2014)** Power play. Insight into Africa´s resources industry. https://www.miningdecisions.com/home/power-play-2/ (Abruf am 2025-06-15)

**Bausbacher E, Hunt RW (1993)** Process plant layout and piping design. PTR Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ

**Bebbington A, Williams M (2008)** Water and mining conflicts in Peru. *Mountain Research and Development* 28(3/4):190–195. doi:10.1659/mrd.1039

**Bejari H, Daya AA, Roudini A (2017)** Selection of chromite processing plant site using fuzzy analytic hierarchy process (FAHP). *Journal of Mining and Environment* 8(2):155–162. doi:10.22044/jme.2016.632

**Bentiol RG, Navarro LR (2009)** Slurry pipeline design approach. *Rio Pipeline Conference and Exposition 2009.* http://www.mcilvainecompany.com/Decision Tree/subscriber/Tree/Description-TextLi nks/SlurryPipelineDesignApproach.pdf, (Abruf am 2024-07-31)

**Binama M, Su WT, Li XB, Li FC, Wei XZ, An S (2017)** Investigation on pump as turbine (PAT) technical aspects for micro hydropower schemes: a state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79:148–179. doi:10.1016/j.rser.2017.04.071

**Bise CJ (2003)** Mining engineering analysis. 2. Auflage. Society for Mining Metallurgy and Exploration, Englewood, CO

**bnamericas (2015)** Codelco´s tailings energy tender moving forward. http://www.bnamericas.com/en/news/mining/codelcos-tailings-energy-tender-moving-forward (Abruf am 2025-06-15)

**Boeck H-J (2017)** Drei Beiträge über Wasserkraftnutzung und Wasserkraftmaschinen im Bergbau. *Dokumentationen zum sächsischen Bergbau, Erzbergbau(*3):2–70

**Boom R, Twigge-Molecey C, Wheeler F, Young J (2015)** Metallurgical plant design. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Montréal, QC

**Bozorgebrahimi E, Hall RA, Blackwell GH (2003)** Sizing equipment for open pit mining – a review of critical parameters. *Mining Technology* 112(3):171–179. doi:10.1179/037178403225003591

**Brantes A. R, Olivares G (2008)** Best practices and efficient use of water in the mining industry. Cochilco Comisión Chilena del Cobre, Santiago de Chile

**Breeze P (2018)** Hydropower turbines. In: Breeze P (Hrsg) *Hydropower.* Elsevier, Amsterdam, S 35–46. doi:10.1016/b978-0-12-812906-7.00004-1

**Brocke J** von, **Niehaves B, Riemer K, Simons A (2009)** Reconstructing the giant: on the importance of rigour in documenting the literature search process. *17th European Conference on Information Systems (ECIS), Verona, Italy*

**Bullock RL (2018)** Mineral property evaluation. Handbook for feasibility studies and due diligence. Society for Mining Metallurgy and Exploration, Englewood, CO

**Caldwell JA, Robertson AM (1983)** Selection of tailings impoundment sites. *Die Siviele Ingenieur in Suid-Afrika* Oktober 1983

**Carravetta A, Crespo Chacón M, Fecarotta O, McNabola A, Ramos HM (2020)** Energy harvesting in water supply systems. Chapter 13. In: *Sustainable Water Engineering.* Elsevier, Amsterdam, S 229–254

**Carravetta A, Del Giudice G, Fecarotta O, Morani MC, Ramos HM (2022)** A new low-cost technology based on pump as turbines for energy recovery in peripheral water networks branches. *Water* 14(10):1–14. doi:10.3390/w14101526

**Carravetta A, Fecarotta O, Del Giudice G, Ramos H (2014)** Energy recovery in water systems by PATs: a comparisons among the different installation schemes. *Procedia Engineering* 70:275–284. doi:10.1016/j.proeng.2014.02.031

**Carravetta A, Fecarotta O, Ramos HM (2018)** A new low-cost installation scheme of PATs for pico-hydropower to recover energy in residential areas. *Renewable Energy* 125:1003–1014. doi:10.1016/j.renene.2018.02.132

**Chadwick J (2018)** Power for mines. *International Mining.* https://www.gilkes.com/media/2257/power-of-mines-im.pdf (Abruf am 2025-06-15)

**Chae K-J, Kim I-S, Ren X, Cheon K-H (2015)** Reliable energy recovery in an existing municipal wastewater treatment plant with a flow-variable micro-hydropower system. *Energy Conversion and Management* 101:681–688. doi:10.1016/j.enconman.2015.06.016

**Chapman JP, Lima R, Pinto D, Vidal A (2009)** Slurry pipeline technology - an overview. *Rio Pipeline Conference and Exposition 2009.* https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21245421 (Abruf am 2024-07-31)

**Concha A. F (2014)** Transporting concentrates and tailings. In: Concha A. F (Hrsg) *Solid-Liquid Separation in the Mining Industry.* Springer International Publishing, Cham, S 373–429. doi:10.1007/978-3-319-02484-4_1

**Cooper HM (1988)** Organizing knowledge syntheses: a taxonomy of literature reviews. *Knowledge in Society* 1(1):104–126. doi:10.1007/BF03177550

**Cornisch L (2015)** DRC mining sector boosts local hydroelectric power supply. https://www.mining-review.com/top-stories/drc-mining-sector-boosts-local-hydroelectric-power-supply/ (Abruf am 2025-06-15)

**Crespo Chacón M, Rodríguez Díaz JA, García Morillo J, McNabola A (2020)** Hydropower energy recovery in irrigation networks: validation of a methodology for flow prediction and pump as turbine selection. *Renewable Energy* 147(4):1728–1738. doi:10.1016/j.renene.2019.09.119

**Darling P (2011)** SME mining engineering handbook. 3. Auflage. Society for Mining Metallurgy and Exploration, Englewood, CO

**Deng Q, Ingham PD, Nice R, Brett A (2019)** Ramu nickel cobalt project. Located in Madang province – Papua New Guinea. NI 43-101 Technical Report

**Dhaubanjar S, Lutz AF, Gernaat DEHJ, Nepal S, Smolenaars W, u. a. (2021)** A systematic framework for the assessment of sustainable hydropower potential in a river basin - the case of the upper Indus. *The Science of the Total Environment* 786:147142. doi:10.1016/j.sci-totenv.2021.147142.

**Dunne R (2012)** Water water everywhere and not a drop to drink, nor do I know its whereabouts. In: Drelich J (Hrsg) *Water in Mineral Processing. Proceedings of the First International Symposium.* Society for Mining Metallurgy and Exploration, Englewood, CO S 1–17

**Dunne RC (2019)** SME mineral processing & extractive metallurgy handbook. Society for Mining Metallurgy and Exploration, Englewood, CO

**Dursun B, Gokcol C (2011)** The role of hydroelectric power and contribution of small hydropower plants for sustainable development in Turkey. *Renewable Energy* 36(4):1227–1235. doi:10.1016/j.renene.2010.10.001

**Easy Hydro (2021)** Energy recovery from the water supply of Tara Mines. https://easyhydrosolutions.com/en/energy-recovery-from-the-water-supply-of-tara-mines/ (Abruf am 2025-06-15)

**Easy Hydro (2023a)** Easy Hydro portfolio 2023. https://easyhydrosolutions.com/en/energy-recovery-turbines-from-mines-old/ (Abruf am 2025-06-15)

**Easy Hydro (2023b)** Initial Hydropower potential assessment US mine. - Anonymisiert-

**Egré D, Milewski JC (2002)** The diversity of hydropower projects. *Energy Policy* 30(14):1225–1230. doi:10.1016/S0301-4215(02)00083-6

**Eriksson C, Nystrom A (2018)** Garpenberg Mine – 10 years of mining with paste backfill. In: *Proceedings of the 21st International Seminar on Paste and Thickened Tailings,* S 323–336. doi:10.36487/ACG_rep/1805_25_Eriksson

**Feldmann Y (2023)** CLIENT II - Verbundvorhaben: SmartH2OEnergy - Entwicklung von Konzepten zur Nutzbarmachung des hydroelektrischen Wasserkraftpotenzials von Rohstoffgewinnungsbetrieben. Abschlussbericht. doi: 10.2314/KXP:1876595493

**García Morillo J, McNabola A, Camacho E, Montesinos P, Rodríguez Díaz JA (2018)** Hydropower energy recovery in pressurized irrigation networks: a case study of an irrigation district in the south of Spain. *Agricultural Water Management* 204(2):17–27. doi:10.1016/j.agwat.2018.03.035

**Ghosh Banerjee S, Romo Z, McMahon G, Toledano P, Robinson P, Pérez Arroyo I (2014)** The power of the mine: a transformative opportunity for Sub-Saharan Africa. The World Bank, Washington, DC. doi:10.1596/978-1-4648-0292-8

**Giesecke J, Heimerl S, Mosonyi E (2014)** Wasserkraftanlagen. Planung, Bau und Betrieb. 6. überarb. und erw. Auflage. Springer Berlin Heidelberg, Berlin. doi:10.1007/978-3-642-53871-1

**Girma Z (2016)** Techno-economic feasibility of small scale hydropower in Ethiopia: the case of the Kulfo River, in southern Ethiopia. *Journal of Renewable Energy* 2016:1–12. doi:10.1155/2016/8037892

**Golestanifar M, Aghajani Bazzazi A (2010)** TISS: a decision framework for tailing impoundment site selection. *Environmental Earth Sciences* 61(7):1505–1513. doi:10.1007/s12665-010-0466-x

**Grzegorz P (2021)** Practical possibilities of pumped-storage power plants implementation in liquidated underground mines. *Journal of Power Technologies* 101(4):213–225. doi:10.22541/au.161282677.75843041/v2

**Guirguis M (2011)** Energy recovery devices in seawater reverse osmosis desalination plants with emphasis on efficiency and economical analysis of isobaric versus centrifugal devices. *USF Tampa Graduate Theses and Dissertations.* https://digitalcommons.usf.edu/etd/3135 (Abruf am 2025-06-15)

**Gunson AJ (2013)** Quantifying, reducing and improving mine water use. The Faculty of Graduate Studies, The University of British Coumbia, Vancouver, BC. doi:10.14288/1.0071942

**Gunson AJ, Klein B, Veiga M, Dunbar S (2010)** Reducing mine water network energy requirements. *Journal of Cleaner Production* 18(13):1328–1338. doi:10.1016/j.jclepro.2010.04.002

**Gunson AJ, Klein B, Veiga M, Dunbar S (2012)** Reducing mine water requirements. *Journal of Cleaner Production* 21(1):71–82. doi:10.1016/j.jclepro.2011.08.020

**Gupta A, Yan DS (2016)** Mineral processing design and operations. An introduction. 2. Auflage. Elsevier, Amsterdam

**Hannachi M, Ketata A, Sinagra M, Aricò C, Tucciarelli T, Driss Z (2021)** A novel pressure regulation system based on Banki hydro turbine for energy recovery under in-range and out-range discharge conditions. *Energy Conversion and Management* 243. doi:10.1016/j.enconman.2021.114417

**Hartman HL (Hrsg) (1992)** SME mining engineering handbook. 2. Auflage. Society for Mining Metallurgy and Exploration, Englewood, CO

**Hartman HL, Mutmansky JM (2002)** Introductory mining engineering. 2. Auflage. Wiley, Hoboken, NJ

**Heimerl S (2013)** Wasserkraftprojekte. Ausgewählte Beiträge aus der Fachzeitschrift WasserWirtschaft. Springer Vieweg, Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-658-00996-0

**Huang B, Pu K, Wu P, Wu D, Leng J (2020)** Design, selection and application of energy recovery device in seawater desalination: a review. *Energies* 13(16):4150. doi:10.3390/en13164150

**Hustrulid WA, Kuchta M, Martin RK (2013)** Open pit mine planning and design. 3. Auflage. CRC Press, Hoboken, NJ

**ICMM (2012)** Water management in mining: a selection of case studies. International Council on Mining and Metals, London

**ICMM (2023)** Water stewardship maturity framework. Understanding and advancing water stewardship practices in the mining and metals industry. International Council on Mining and Metals, London

**IEA (2024)** Electricity 2024. Analysis and forcast to 2026, Paris. https://www.iea.org/reports/electricity-2024 (Abruf am 2025-07-22)

**Igogo T, Awuah-Offei K, Newman A, Lowder T, Engel-Cox J (2021)** Integrating renewable energy into mining operations: opportunities, challenges, and enabling approaches. *Applied Energy* 300:117375. doi:10.1016/j.apenergy.2021.117375

**Ihle CF, Kracht W (2018)** The relevance of water recirculation in large scale mineral processing plants with a remote water supply. *Journal of Cleaner Production* 177:34–51. doi:10.1016/j.jclepro.2017.12.219

**Israel A, Herrera RJ (2020)** The governance of Peruvian energy transitions: path dependence, alternative ideas and change in national hydropower expansion. *Energy Research & Social Science* 69:101608. doi:10.1016/j.erss.2020.101608

**Itani Y, Soliman MR, Kahil M (2020)** Recovering energy by hydro-turbines application in water transmission pipelines: a case study west of Saudi Arabia. *Energy* 211(1):1–12. doi:10.1016/j.energy.2020.118613

**Ivanhoe Mines (2016)** Initiative launched by Ivanhoe Mines begins supplying electricity from the first of three hydropower plants being upgraded in the Democratic Republic of Congo to support mine development work at the Kamoa copper project. https://www.ivanhoemines.com/wp-content/uploads/2016-09-13_nr.pdf (Abruf am 2025-06-15)

**Jacobs BEA (1991)** Design of slurry transport systems. Elsevier Applied Science, London

**Jain R, Cui ZC, Domen J (2016)** Environmental impact of mining and mineral processing. Management, monitoring, and auditing strategies. Elsevier, Amsterdam. doi:10.1016/C2014-0-05174-X

**Janowicz JR (2011)** Guidance document on water and mass balance models for the mining industry, Whitehorse, YT. http://www.env.gov.yk.ca/publications-maps/documents/mine_water_balance.pdf (Abruf am 2025-06-15)

**Jemal AN, Haile MG (2019)** Comprehensive review of pump as turbine. *Renewable Energy and Sustainable Development* 5(2):68. doi:10.21622/resd.2019.05.2.068

**Jeswiet J, Szekeres A (2016)** Energy consumption in mining comminution. *Procedia CIRP* 48:140–145. doi:10.1016/j.procir.2016.03.250

**Jorge C, Almeida MdC, Covas D (2021)** Energy balance in wastewater systems with energy recovery: a Portuguese case study. *Infrastructures* 6(10):1–17. doi:10.3390/infrastructures6100141

**Kaltschmitt M, Streicher W, Wiese A (Hrsg) (2020)** Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. 6. überarb. Auflage. Springer, Berlin. doi:10.1007/978-3-662-61190-6

**Kaplunov DR, Ryl'nikova MV, Radchenko DN (2015)** Utilization of renewable energy sources in hard mineral mining. *Journal of Mining Science* 51(1):111–117. doi:10.1134/S1062739115010147

**Karanitsch W (2017)** Enlight the rainbow nation South Africa. https://www.andritz.com/resource/blob/237956/b51848a981c176291330ce780681736a/hydronews-africa-20-south-africa-data.pdf (Abruf am 2025-06-15)

**Kawalec W, Król R (2021)** Generating of electric energy by a declined overburden conveyor in a continuous surface mine. *Energies* 14(13):4030. doi:10.3390/en14134030

**Kazemi F, Bahrami A, Abdolahi Sharif J (2020)** Mineral processing plant site selection using integrated fuzzy cognitive map and fuzzy analytical hierarchy process approach: a case study of gilsonite mines in Iran. *Minerals Engineering* 147:106143. doi:10.1016/j.mineng.2019.106143

**King RP (2001)** Modeling and simulation of mineral processing systems. 1. Auflage. Butterworth-Heine-mann, Boston, MA.

**Knyazkin EA (2019)** Rationale for geoengineering system structure in view of in-mine electricity generation on the basis of process slurries. *X International Conference. Combined Geotechnology:*263–264. http://www.cgt.magtu.ru/downloads/results/2019-tezisi-en.pdf#page=67 (Abruf am 2025-06-16)

**Kougias I, Aggidis G, Avellan F, Deniz S, Lundin U, u. a. (2019)** Analysis of emerging technologies in the hydropower sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 113:109257. doi:10.1016/j.rser.2019.109257

**Kramer M, Terheiden K, Wieprecht S (2018)** Pumps as turbines for efficient energy recovery in water supply networks. *Renewable Energy* 122:17–25. doi:10.1016/j.renene.2018.01.053

**Krassakis P, Karavias A, Zygouri E, Roumpos C, Louloudis G, u. a. (2023)** GIS-based assessment of hybrid pumped hydro storage as a potential solution for the clean energy transition: the case of the Kardia lignite mine, Western Greece. *Sensors 2023* 23(2). doi:10.3390/s23020593

**Larsen D, Addison R, Kehmeier R, Swendseid T, Brown T, Uhrie J (2016)** Minimum engineering requirements for assessing mining projects. *Minerals & Metallurgical Processing* 33(4):214–225. doi:10.19150/mmp.6842

**Le Roux D (2012)** Energy recovery from incoming high pressure cold water in deep level mines. In: *2012 Proceedings of the 9th Industrial and Commercial Use of Energy Conference (ICUE 2012). Cape Town, WP, South Africa, 15 - 16 August 2012, Cape Peninsula University of Technology, Piscataway, NJ*

**Lee H, Calvin K, Dasgupta D, Krinner G, Mukherji A, u. a. (2023)** IPCC, 2023: climate change 2023: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva

**Leyland B (2014)** Small hydroelectric engineering practice. CRC Press, Boca Raton, FL. doi:10.1201/b16627

**Li W (2022)** Vortex pump as turbine for energy recovery in viscous fluid flows with reynolds number effect. *Journal of Fluids Engineering* 144(2):575. doi:10.1115/1.4051313

**Liessmann W (2010)** Historischer Bergbau im Harz. Kurzführer. Springer, Dordrecht

**Linkov SA, Olizarenko VV, Radionov AA, Sarapulov OA (2015)** Energy-efficient power supply system for mines. *Procedia Engineering* 129:63–68. doi:10.1016/j.proeng.2015.12.009

**Liu F, Yang K, Yang T, Gao Y, Li J, Liu Q, Fu Q (2022)** Pumped storage hydropower in an abandoned open-pit coal mine: slope stability analysis under different water levels. *Frontiers in Earth Science* 10:1–12. doi:10.3389/feart.2022.941119

**Lottermoser B (2010)** Mine wastes. Springer Berlin Heidelberg, Berlin. doi:10.1007/978-3-642-12419-8

**Lowrie RL (2002)** Mining reference handbook. Society for Mining Metallurgy and Exploration, Englewood, CO

**Lyu X, Zhang T, Yuan L, Yang K, Fang J, u. a. (2022)** Pumped storage hydropower in abandoned mine shafts: key concerns and research directions. *Sustainability* 14(23):1–14. doi:10.3390/su142316012

**Ma J, Wang Y, Feng X (2017)** Energy recovery in cooling water system by hydro turbines. *Energy* 139:329–340. doi:10.1016/j.energy.2017.07.166

**Ma T, Yang H, Guo X, Lou C, Shen Z, u. a. (2018)** Development of inline hydroelectric generation system from municipal water pipelines. *Energy* 144:535–548. doi:10.1016/j.energy.2017.11.113

**Madlener R, Specht JM (2020)** An exploratory economic analysis of underground pumped-storage hydro power plants in abandoned deep coal mines. *Energies* 13(21):1–22. doi:10.3390/en13215634

**Maennling N, Toledano P (2018)** The renewable power of the mine. Accelerating renewable energy integration. Report December 2018. Columbia Center on Sustainable Investment, New York, NY

**Malhotra D, Taylor PR, Spiller E, LeVier M (Hrsg) (2009)** Recent advances in mineral processing plant design. Society for Mining Metallurgy and Exploration, Englewood, CO

**Mansour TM, Ismail TM, Ramzy K, Abd El-Salam M (2020)** Energy recovery system in small reverse osmosis desalination plant: experimental and theoretical investigations. *Alexandria Engineering Journal* 59(5):3741–3753. doi:10.1016/j.aej.2020.06.030

**Marchis M** de, **Fontanazza CM, Freni G, Messineo A, Milici B, u. a. (2014)** Energy recovery in water distribution networks. Implementation of pumps as turbine in a dynamic numerical model. *Procedia Engineering* 70:439–448. doi:10.1016/j.proeng.2014.02.049

**Mays L (2010)** Water transmission and distribution (WSO). 4. Auflage. American Water Works Associa-tion, Denver, CO

**Menéndez J, Loredo J, Fernandez JM, Galdo M (2017)** Underground pumped-storage hydro power plants with mine water in abandoned coal mines. *Mine Water and Circular Economy*. https://www.imwa.info/docs/imwa_2017/IMWA2017_Menendez_6.pdf (Abruf am 2025-06-15)

**Menéndez J, Schmidt F, Konietzky H, Fernández-Oro JM, Galdo M, u. a. (2019)** Stability analysis of the underground infrastructure for pumped storage hydropower plants in closed coal mines. *Tunnelling and Underground Space Technology* 94(11):1–11. doi:10.1016/j.tust.2019.103117

**Menon ES (2011)** Pipeline planning and construction field manual. Elsevier Science, Burlington, MA

**Metso (2018)** Basics in mineral processing. https://www.metso.com/material-library/basics-in-minerals-processing-handbook/ (Abruf am 2025-06-16)

**Miedema SA (2019)** Slurry transport fundamentals, A historical overview & the Delft Head Loss & Limit Deposit Velocity Framework 2nd Edition. TU Delft OPEN Publishing, Delft. doi:10.5074/t.2019.002

**Minerals Council of Australia (2022)** Minerals industry water accounting framework. User guide version 2.0. https://minerals.org.au/wp-content/uploads/2022/12/MCA-Water-Accounting-Framework-User-Guide-2.0-2022.pdf (Abruf am 2025-06-16)

**Monteiro L, Delgado J, Covas DIC (2018)** Improved assessment of energy recovery potential in water supply systems with high demand variation. *Water* 10(6):1–10. doi:10.3390/w10060773

**Morabito A, Hendrick P (2019)** Pump as turbine applied to micro energy storage and smart water grids: a case study. *Applied Energy* 241:567–579. doi:10.1016/j.apenergy.2019.03.018

**Moran S (2016)** Process plant layout. 2. Auflage. Elsevier Science, Saint Louis, MO

**Motwani KH, Jain SV, Patel RN (2013)** Cost analysis of pump as turbine for pico hydropower plants – a case study. *Procedia Engineering* 51:721–726. doi:10.1016/j.proeng.2013.01.103

**Mudd GM (2008)** Sustainability reporting and water resources: a preliminary assessment of embodied water and sustainable mining. *Mine Water and The Environment* 27(3):136–144. doi:10.1007/s10230-008-0037-5

**Mühlmann M, Klingenschmid M, Lehner D (2019)** Energy recovery station at Transalpine Pipeline (TAL): from a vision to an innovative crude oil pipeline power plant. In: *Pipeline Technology Conference.* https://www.pipeline-conference.com/abstracts/energy-recovery-station-transalpine-pipeline-tal-vision-innovative-crude-oil-pipeline (Abruf am 2025-06-15)

**Mukerji S (2017)** Solid pumped hydro energy storage using slurry. https://patents.google.com/patent/AU2017213583A1/en (Abruf am 2025-06-16)

**Mular AL, Halbe, Doug, N., Barratt DJ (Hrsg) (2002)** Mineral processing plant design, practice, and control. Society for Mining Metallurgy and Exploration, Englewood, CO

**Müller U (2009)** Wasserkraft - eine zuverlässige alternative Energiequelle. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hrsg) *Wasserbaukolloquium 2009: Wasserkraftnutzung im Zeichen des Klimawandels. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen Heft 39,* S 19–32

**Musa AG, Islam SM, Jamal T (2022)** A case study of micro hydropower generation in the mining industry. In: *2022 International Conference on Energy and Power Engineering (ICEPE)*. 24.-26. November 2022, S 1–6. doi:10.1109/ICEPE56629.2022.10044896

**Nasir A, Salau AO, Dribssa E, Girma M (2023)** Technical and economic analysis of a pump as a turbine for rural electrification. *International Journal of Sustainable Energy* 42(1):914–928. doi:10.1080/14786451.2023.2244606

**Neukirchen F, Ries G (2016)** Die Welt der Rohstoffe. Springer Berlin Heidelberg, Berlin. doi:10.1007/978-3-662-48242-1

**Nevadas Governors´s Office of Energy (2021)** Renewable portfolio standard. https://energy.nv.gov/Resources/Renewable_Portfolio_Standard_Reporting/ (Abruf am 2025-06-15)

**Nguyen MT, Vink S, Ziemski M, Barrett DJ (2014)** Water and energy synergy and trade-off potentials in mine water management. *Journal of Cleaner Production* 84:629–638. doi:10.1016/j.jclepro.2014.01.063

**Nguyen QD, Boger DV (1998)** Application of rheology to solving tailings disposal problems. *International Journal of Mineral Processing* 54(3-4):217–233. doi:10.1016/S0301-7516(98)00011-8

**Niederhausen H, Burkert A (2014)** Elektrischer Strom. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-8348-2493-6

**Norgate T, Haque N (2010)** Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *Journal of Cleaner Production* 18(3):266–274. doi:10.1016/j.jclepro.2009.09.020

**Northey S, Haque N, Mudd G (2013)** Using sustainability reporting to assess the environmental footprint of copper mining. *Journal of Cleaner Production* 40:118–128. doi:10.1016/j.jclepro.2012.09.027

**Northey S, Haque N, Mudd G (2015)** The challenges in estimating the water footprint of mined commodities. In: *Dynamic Ecolibrium, SENG 2015 National Conference*

**Northey SA, Mudd GM, Saarivuori E, Wessman-Jääskeläinen H, Haque N (2016)** Water footprinting and mining: Where are the limitations and opportunities? *Journal of Cleaner Production* 135:1098–1116. doi:10.1016/j.jclepro.2016.07.024

**Northey SA, Mudd GM, Werner TT, Haque N, Yellishetty M (2019)** Sustainable water management and improved corporate reporting in mining. *Water Resources and Industry* 21:100104. doi:10.1016/j.wri.2018.100104

**Northey SA, Mudd GM, Werner TT, Jowitt SM, Haque N, u. a. (2017)** The exposure of global base metal resources to water criticality, scarcity and climate change. *Global Environmental Change* 44:109–124. doi:10.1016/j.gloenvcha.2017.04.004

**Novara D, McNabola A (2018)** The development of a decision support software for the design of micro-hydropower schemes utilizing a pump as turbine. In: *EWaS3 2018,* Basel, S 678. doi:10.3390/proceedings2110678

**Novara D, McNabola A (2021)** Design and year-long performance evaluation of a pump as turbine (PAT) pico-hydropower energy recovery device in a water network. *Water* 13(21):3014. doi:10.3390/w13213014

**Odegard ML (2009)** Method and system of recovering energy from a flow of oil sands slurry. https://patents.google.com/patent/CA2998019A1/en (Abruf am 2025-06-16)

**Ossa-Moreno J, McIntyre N, Ali S, Smart JC, Rivera D, u. a. (2018)** The hydro-economics of mining. *Ecological Economics* 145:368–379. doi:10.1016/j.ecolecon.2017.11.010

**Ovalle A (2020)** Analysis of the discount rate for mining projects. In: *MassMin 2020: Proceedings of the Eighth International Conference & Exhibition on Mass Mining,* S 1048–1064. doi:10.36487/ACG_repo/2063_76

**Page BJ, Danehy TP, Neely CA, Busler SL, Denholm CF, u. a. (2013)** Micro-hydroelectric power facility using mine drainage. In: *West Virginia Mine Drainage Task Force Symposium*. 26-27 March, West Virginia Mine Drainage Task Force

**Pandey B, Karki A (2016)** Hydroelectric energy. Renewable energy and the environment. CRC Press, Boca Raton, FL. doi:10.1201/9781315374840

**Pérez-Sánchez M, Sánchez-Romero F, Ramos H, López-Jiménez P (2016)** Modeling irrigation networks for the quantification of potential energy recovering: a case study. *Water* 8(6):234. doi:10.3390/w8060234

**Prenner M (2015)** Feststoffturbine zur Energierückgewinnung in Kombination mit Gurtförderanlagen. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 160(1):21–31. doi:10.1007/s00501-014-0327-0

**Price WA (2009)** Prediction manual for drainage chemistry from sulphidic geologic materials. MEND Report 1.20.1, Smithers, BC. https://www.fs.usda.gov/Internet/FSE_DOCU-MENTS/stelprdb5336546.pdf (Abruf am 2025-06-16)

**Punkkinen H, Räsänen L, Mroueh U-M, Korkealaakso J, Luoma S, u. a. (2016)** Guidelines for mine water management. Technical report. VTT Technology 266. http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-38-8443-7 (Abruf am 2025-06-16)

**Qi B, Zhang D, Li Y, Shen X, Geng L, van Esch BPM (2021)** A comparative study on the reducing flow rate design method for a desalination energy recovery pump as turbine. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 43(9):1–15. doi:10.1007/s40430-021-03143-w

**Rahmani N, Ranjbar H, Sam A, Taghinejad A (2013)** Identification of effective factors on mineral processing plant site selection and ranking them by AHP method. In: *International Conference on Civil Engineering Architecture & Urban Sustainable Development*. 18-19 December 2013

**Randgold Respurces (2017)** Annual report 2017. Investing in the future. https://www.randgold-exp.co.za/2018/03/26/randgold-exploration-2017-annual-report/ (Abruf am 2025-06-16)

**Rankin WJ (2011)** Minerals, metals and sustainability. Meeting future materials needs. CRC Press, Boca Raton, FL

**Renzi M, Rudolf P, Štefan D, Nigro A, Rossi M (2019)** Energy recovery in oil refineries through the installation of axial Pumps-as-Turbines (PaTs) in a wastewater sewer: a case study. *Energy Procedia* 158:135–141. doi:10.1016/j.egypro.2019.01.058

**Rio Tinto (2017)** 2017 Annual report. https://www.riotinto.com/-/media/content/documents/invest/reports/annual-reports/2017/rt-annual-report-2017.pdf (Abruf am 2025-06-16)

**Robertson A (1982)** Site selection and design options for uranium mine waste and plant tailings. In: Glen HW (Hrsg) *Proceedings of the 12th CMMI Congress,* South African Institute of Mining and Metall. https://robertsongeoconsultants.com/files/publications/mine waste.pdf (Abruf am 2025-06-16)

**Rodrigue J-P (2020)** The geography of transport systems. 5. Auflage. Routledge, London

**Rodríguez JE, Razo I, Lázaro I (2023)** Water footprint for mining process: A proposed method to improve water management in mining operations. *Cleaner and Responsible Consumption* 8:100094. doi:10.1016/j.clrc.2022.100094

**Rodríguez-Pérez ÁM, Pérez-Calañas C, Pulido-Calvo I (2021)** Energy recovery in pressurized hydraulic networks. *Water Resources Management* 35(6):1977–1990. doi:10.1007/s11269-021-02824-4

**Rossi M, Comodi G, Piacente N, Renzi M (2018)** Effects of viscosity on the performance of Hydraulic Power Recovery Turbines (HPRTs) by the means of Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations. *Energy Procedia* 148:170–177. doi:10.1016/j.egypro.2018.08.046

**Rossi M, Comodi G, Piacente N, Renzi M (2020)** Energy recovery in oil refineries by means of a Hydraulic Power Recovery Turbine (HPRT) handling viscous liquids. *Applied Energy* 270(10). doi:10.1016/j.apenergy.2020.115097

**Rossi M, Nigro A, Renzi M (2019)** Experimental and numerical assessment of a methodology for performance prediction of Pumps-as-Turbines (PaTs) operating in off-design conditions. *Applied Energy* 248:555–566. doi:10.1016/j.apenergy.2019.04.123

**Rossi M, Righetti M, Renzi M (2016)** Pump-as-Turbine for energy recovery applications: the case study of an aqueduct. *Energy Procedia* 101:1207–1214. doi:10.1016/j.egypro.2016.11.163

**Rother T (2016)** Energy recovery in crude oil pipelines. *11th Pipeline Technology Conference.* https://www.pipeline-conference.com/abstracts/energy-recovery-crude-oil-pipelines (Abruf am 2025-06-16)

**Roumpos C, Papacosta E (2013)** Strategic mine planning of surface mining projects incorporating sustainability concepts. *6th International Conference on Sustainable Development in the Minerals Industry 2013*, Milos Island. doi:10.13140/2.1.3566.9125

**Rudolph T, Benndorf J, Goerke-Mallet P (2021)** Geomonitoring zur Schaffung gesellschaftlicher Akzeptanz für den Bergbau. In: *Tagungsband Umwelt, Energie und Rohstoffe 2021 & 21. Geokinematischer Tag. 05.-07. Mai 2021, Freiberg.* Wagner Digitaldruck und Medien GmbH, Nossen, S 87–101

**Safari M, Kakaei R, Ataei M, Karamoozian M (2012)** Using fuzzy TOPSIS method for mineral processing plant site selection. *Arabian Journal of Geosciences* 5(5):1011–1019. doi:10.1007/s12517-010-0234-y

**Scheaua FD (2017)** Possibilities for agricultural farms of adopting and applying optimal energy recovery solutions from nearby water flows. *Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics(*2):68–71. https://hidraulica.fluidas.ro/2017/nr2/68-71.PDF (Abruf am 2025-06-16)

**Schneider B (2005)** Selection, operation and control of a work exchanger energy recovery system based on the Singapore project. *Desalination* 184(1-3):197–210. doi:10.1016/j.de-sal.2005.04.031

**Schnepper T, Kühn M, Kempka T (2023)** Hydrogeochemical impacts of pumped hydropower storage in open-pit lignite mines. *EGU General Assembly 2023. doi:*10.5194/egusphere-egu23-8226

**Shelbourn M (2010)** Geotechnical design verification and performance assessment of tailings storage facilities. In: *Proceedings of the First International Seminar on the Reduction of Risk in the Management of Tailings and Mine Waste,* S 3–14. doi:10.36487/ACG_rep/1008_01_Shelbourn

**Sinagra M, Picone C, Picone P, Aricò C, Tucciarelli T, Ramos HM (2022)** Low-head hydropower for energy recovery in wastewater systems. *Water* 14(10):1–16. doi:10.3390/w14101649

**Sinagra M, Sammartano V, Morreale G, Tucciarelli T (2017)** A new device for pressure control and energy recovery in water distribution networks. *Water* 9(5):1–14. doi:10.3390/w9050309

**Singh PK, Singh RS (2016)** Environmental and social impacts of mining and their mitigation. *MGMI National Seminar ESIMM 2016:*17–29

**Solgi N (2017)** Water balance of metal mining tailings management facilities: influence of climate conditions and tailings management options. Dissertation, The Faculty of Graduate and Postdoctoral Studies, University of British Columbia, Vancouver, BC

**Spedaletti S, Rossi M, Comodi G, Salvi D, Renzi M (2021)** Energy recovery in gravity adduction pipelines of a water supply system (WSS) for urban areas using Pumps-as-Turbines (PaTs). *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 45(4):1–12. doi:10.1016/j.seta.2021.101040

**statista (2024)** Projected annual inflation rate in the United States from 2010 to 2029. https://www.statista.com/statistics/244983/projected-inflation-rate-in-the-united-states/#:~:text=The%20inflation%20rate%20in%20the,base%20period%20was%201982%2D84 (Abruf am 2025-06-15)

**Stephenson D (1989)** Pipeline design for water engineers. 3. überarb. Auflage. Elsevier, Amsterdam

**Swamee PK, Sharma AK (2008)** Design of water supply pipe networks. Wiley-Interscience, Hoboken, NJ

**Tabrizia AB, Markoski R (2021)** Small hydropower; another source of renewables for Australian underground mining? https://www.imeconsultants.com.au/small-hydropower-another-source-of-renewables-for-australian-underground-mining/ (Abruf am 2025-06-16)

**Teschl G, Teschl S (2006)** Mathematik für Informatiker. Band. 1: Diskrete Mathematik und Lineare Algebra. Springer, Berlin

**Teuteberg BH (2010)** Design of a pump-as-turbine microhydro system for an abalone farm. https://scholar.sun.ac.za/items/d7e02914-3760-4647-910a-4a5e48791e1f (Abruf am 2025-06-16)

**Thomas AD, Cowper NT (2017)** The design of slurry pipelines - historical aspects, Sydney. https://swapoff.org/files/allan-thomas-papers/06%20The%20de-sign%20of%20slurry%20pipelines%20-%20historical%20aspects.pdf (Abruf am 2025-06-15)

**Thomashausen S, Capones JE, Hamil K (2016)** Water risks in the mining sector Peru. As of August 2016. https://ccsi.columbia.edu/sites/ccsi.columbia.edu/files/content/docs/our%20focus/Water-Template-Peru.pdf (Abruf am 2025-06-16)

**Thomashausen S, Maennling N, Mebratu-Tsegaye T (2018)** A comparative overview of legal frameworks governing water use and waste water discharge in the mining sector. *Resources Policy* 55:143–151. doi:10.1016/j.resourpol.2017.11.012

**Thurston GC, Plum MM (1991)** The feasibility of hydraulic energy recovery from geopressured- geothermal resources. https://www.osti.gov/biblio/6241014 (Abruf am 2025-06-15)

**Titus J, Ayalur B (2019)** Design and fabrication of in-line turbine for pico hydro energy recovery in treated sewage water distribution line. *Energy Procedia* 156(4):133–138. doi:10.1016/j.egypro.2018.11.117

**U.S. Energy Information Administration (2023)** Annual Energy Outlook. AEO March 2023. https://www.eia.gov/outlooks/aeo/IIF_IRA/ (Abruf am 2025-06-15)

**U.S. Energy Information Administration (2024)** Short-Term Energy Outlook. STEO October 2024. https://www.eia.gov/outlooks/steo/archives/oct24.pdf (Abruf am 2025-06-15)

**Ulrich P, Hill W (1976)** Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. *Wirtschaftswissenschaftliches Studium: Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt(*7):304–309

**Vale (2024)** Energy. Assets and stakes. Rio de Janeiro. https://vale.com/energy (Abruf am 2025-06-15)

**Vick SG (1990)** Planning, design, and analysis of tailings dams. 1. Auflage. Wiley-Interscience, New York, NY

**Wang C, Meng P, Wang S, Song D, Xiao Y, u. a. (2022)** Comparison of two types of energy recovery devices: pressure exchanger and turbine in an island desalination project case. *Desalination* 533(2013). doi:10.1016/j.desal.2022.115752

**Whillier A (1977)** Recovery of energy from the water going down mine shafts. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy:*183–186

**Whincup PR (2010)** Guidelines for mineral process plant development studies. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy* 119(4):191–198. doi:10.1179/037195510X12791826058217

**Williams AA (1996)** Pumps as turbines for low cost micro hydro power. *Renewable Energy* 9(1-4):1227–1234. doi:10.1016/0960-1481(96)88498-9

**Williamson SJ, Stark BH, Booker JD (2014)** Low head pico hydro turbine selection using a multi-criteria analysis. *Renewable Energy* 61:43–50. doi:10.1016/j.renene.2012.06.020

**Wills BA (2016)** Wills' mineral processing technology. An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. 8. Auflage. Butterworth-Heinemann, Oxford

**Yang GQ (2016)** Constant speed control system of a test-bed for a hydraulic energy recovery turbine. In: Patty A, Zhou P (Hrsg) *Advances in Materials Sciences, Energy and Environmental Engineering. Proceedings of the International Conference on Materials Science, Energy Technology and Environmental Engineering, (MSETEE 2016), Zhuhai, China, 28-29 May 2016.* CRC Press, Boca Raton, FL S 35–41

**Yarar B, Dogan ZM (1987)** Mineral processing design. 1. Auflage. Springer, Dordrecht. doi:10.1007/978-94-009-3549-5

**Younger PL, Banwart SA, Hedin RS, Alloway BJ, Trevors JT (2002)** Mine water. Hydrology, pollution, remediation. Chapter one: mining and the water environment. Springer, Dordrecht

**Zhang Z, Su X, Jin Y, Zhu Z, Lin T (2022)** Research on energy recovery through hydraulic turbine system in marine desulfurization application. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 51(1). doi:10.1016/j.seta.2021.101912

**Zhou D, Chen H, Yang C (2015)** A highly efficient Francis turbine designed for energy recovery in cooling towers. *Advances in Mechanical Engineering* 7(3). doi:10.1177/1687814015575976

# Anhang

## Anhang 1: Suchbegriffe der Literaturrecherche

*Tabelle A-1: Suchbegriffe für die systematische Literaturrecherche*

| Suchbegriffe | Englische Übersetzung | Synonyme / Antonyme |
|---|---|---|
| Bergbau | mining | Rohstoffgewinnung/-abbau, raw materials production/raw material extraction |
| Wasserkraft | hydropower | hydrodynamic power,hydroelectric power, hydroelectricity, hydraulic energy/power, hydro power, water power |
| Kraftwerk | power station | powerhouse, generatig station, power plant |
| Turbine | turbine | hydroelectric/hydro/hydraulic turbine |
| Pumpe als Turbine | pump as turbine (PaT) | Umkehrpumpe |
| Durchströmungsturbine | cross-flow turbine | Durchflussturbine, through-flow turbine, flow turbine |
| Generator | generator | electric generator, Stromgenerator |
| technische Anforderungen | technical requirements | |
| konventionell | conventional | herkömmlich; unkonventionell, unconventional |
| etabliert | established | mainstream, well-established, entrenched, well-known |
| unkonventionell | unconventional | innovativ; konventionell, conventional |
| neuartig | novel | nicht etabliert, unestablisched, non-establisched |
| Prozessflüssigkeit | process fluid | |
| Prozesswasser | process water | |
| Grubenwasser | mine water | pit water, mine drainage water, underground water |
| Aufbereitung | processing | treatment, benefication |
| Aufbereitunsverfahren | treatment process | benefication process |
| Aufbereitungsprodukt/Konzentrat | concentrate | Konzentrat |
| Aufbereitungsabgänge/-rückstände/-berge | tailings | mill tailings, Berge, Bergematerial, Rückstände |
| Bergbaurückstände | mine wastes | mine tailings, Bergbauabfälle, Bergbaureste |
| Schlämme | slurries | sludge, Suspension |
| Fluideigenschaften | fluid properties | Flüssigkeitseigenschaften, fluid characteristics |
| Flüssigkeit | liquid | fluid |
| Flüssigkeitsanteil | liquid content | fluid content |
| Feststoff | solid | particulate matter/material, solids |
| Feststoffanteil | solid content | solids content, solid fraction, solid percentage, Feststoffkonzentration, Feststoffmenge, Feststoffgehalt, Feststofffraktion, Pratikelanteil |
| Korngröße | particle size | grain size |
| Chemie | chemistry | |
| Energie | energy | power |
| erneuerbar | renewable | non-renewable |
| regenerativ | regenerative | |
| nachhaltig | sustainable | unsustainable |
| Energierückgewinnung | energy recovery | energy recuperation |

| | | |
|---|---|---|
| Energiepotenzial | energy potential | |
| Energieerzeugung | energy production | power generation |
| Stromerzeugung | power generation | Elektrische Energieerzeugung, electricity generation, electric power generation, power/electricity production |
| Steuerbarkeit | controllability | |
| Leistung | power | output |
| Potenzielle Energie | potenzial energy | Lageenergie, elevation energy, position energy, Höhenenergie, Gravitiationsenergie |
| Statischer Druck | static pressure | hydrostatic pressure, hydrostatischer Druck |
| Höhenunterschied | differential head | vertical hight, Höhendifferenz |
| Kinetische Energie | kinetic energy | Bewegungsenergie, velocity head, kinetic head |
| Dynamischer Druck | dynamic pressure | velocity head/pressure, stagnation pressure |
| Strömungsgeschwindigkeit | flow rate | flow speed/velocity |
| Volumenstrom | volume flow (rate) | Durchfluss(-menge), volumetric flow (rate), runoff/run-off |
| Dichte | density | volumic mass |
| Verlust | loss | |
| Druckverlust | pressure loss | pressure drop, head loss, Druckabfall, Durckminderung |
| Energieverlust | energy loss | power loss |
| Reibung | friction | Reibungswiderstand |
| hydraulischer Widerstand | hydraulic resistance | hydraulic resistivity |
| turbulente Strömung | turbulent flow | sinuous flow |
| Rohrleitung | piping | pipeline, pipe, plumbing, hydraulic line, pipe work |
| Transport/Förderung | transport | transportation |
| hydraulischer Transport | hydraulic transport | |

# Anhang 2: Beschreibung der Fluidströme aus Adjazenzmatrix

*Tabelle A-2: Beschreibung der identifizierten Fluidströme*

| Quelle | Ziel | Beschreibung |
|---|---|---|
| Grundwasser | Dritte | Gehobenes Grundwasser bzw. Wasserhaltung und Abgabe an Dritte/Ausleiten aus Betriebsgelände |
| | Frischwasserspeicher, Prozesswasserspeicher, oder Wasseraufbereitung | Gehobenes Grundwasser aus Brunnen zur Wasserversorgung oder Wasser aus der Wasserhaltung zur innerbetrieblichen Verwendung. |
| Niederschlag | Grundwasser | Niederschlag auf dem Betriebsgelände, welcher auf nicht versiegelten Flächen versickert |
| | Bergwerk | Niederschlag, der in das Bergwerk abfließt |
| | Frischwasserspeicher, Prozesswasserspeicher oder Wasseraufbereitung | Niederschlag, welcher bei Auslegung als Becken in den jeweiligen Speichern fällt |
| | Bergeteich/TSF | Niederschlag, welcher auf den Bergeteich fällt |
| | Laugungsanlage | Niederschlag, der auf der Laugungsanlage niedergeht, vor allem auf den Laugungshalden |
| | Sonstige Anlagen | Niederschlag, der auf den sonstigen Betriebseinheiten, Gebäuden oder versiegelten Flächen fällt und so gesammelt wird |
| Dritte | Frischwasserspeicher | Versorgung des Betriebs mit Frischwasser aus einer externen Quelle. Unabhängig von Art und Ursprung der Quelle wird das Frischwasser via Rohrleitung zum Bergwerksgelände transportiert |
| Bergwerk | Prozesswasserspeicher | Wasser aus dem Bergwerk wird in den Prozesswasserspeicher geleitet/gepumpt. Z. B. Wasser aus Sümpfung oder andere Prozesswässer |
| | Brech- und Mahlkreislauf | Die Feuchtigkeit im Erz gelangt mit dem Erz in den Brech- und Mahlkreislauf gegeben |
| | Laugungsanlage | Die Feuchtigkeit im Erz gelangt mit dem Erz in die Laugungsanlage bzw. auf die Halde |
| Frischwasserspeicher | Bergwerk | Wasser für Prozesse wie das Bohren oder zur Bindung von Staub werden ins Bergwerk geleitet |
| | Brech- und Mahlkreislauf | Wasser wird dem Brech- und Mahlkreislauf zugeführt. Das Wasser wird häufig beim Mahlprozess hinzugegeben, um eine pumpfähige Suspension zu erzeugen |
| | Flotation | Wasser, welches für den Flotationsprozess benötigt wird |
| | Laugungsanlage | Wasser, welches für die Lauge benötigt wird |
| | Sonstige Anlagen | Trinkwasser, Wasser für sanitäre Zwecke, Grünflächen und andere |
| Prozesswasserspeicher | Bergwerk | Prozesswasser, welches für betriebliche Prozesse oder die Staubbindung genutzt werden kann |
| | Wasseraufbereitung | Prozesswasser, das behandelt und einer höheren Qualität zugeführt werden soll und damit für andere Prozesse oder zur Abgabe an die Umwelt oder an Dritte geeignet ist |
| | Brech- und Mahlkreislauf | Prozesswasser wird dem Brech- und Mahlkreislauf zugeführt zum gleichen Zweck und priorisiert zum Frischwasser |
| | Flotation | Prozesswasser wird zu gleichen Zwecken wie Frischwasser verwendet, aber priorisiert verwendet |
| | Laugungsanlage | Prozesswasser wird zu gleichen Zwecken wie Frischwasser verwendet, aber priorisiert |

| | | |
|---|---|---|
| Wasseraufbereitung | Frischwasserspeicher | Aufbereitetes Wasser, welches wieder uneingeschränkt als Frischwasser genutzt werden kann |
| | Dritte | Aufbereitetes Wasser, das direkt an Dritte abgegeben wird |
| Brech- und Mahlkreislauf | Prozesswasserspeicher | Überschüssiges Wasser, welches wieder an den Prozesswasserspeicher abgegeben wird |
| | Wasseraufbereitung | Verunreinigtes Prozesswasser, welches aufbereitet werden muss |
| | Brech- und Mahlkreislauf | Direkt rezirkuliertes Prozesswasser, durchläuft dabei z. B. Hydrozyklone zur Klassifizierung |
| | Flotation | Das Mahlgut wird als Suspension in die Flotation geleitet, das Wasser dient dabei zur Verdünnung bis zur Pumpfähigkeit |
| | Laugungsanlage | Wasser gelangt als Feuchtigkeit in zerkleinertem Erz in die Laugungsanlage bzw. auf die Halde |
| Flotation | Prozesswasserspeicher | Überschüssiges Prozesswasser der Flotation wird zurück in den Prozesswasserspeicher geleitet |
| | Wasseraufbereitung | Überschüssiges Prozesswasser der Flotation wird zur Wasseraufbereitung geleitet |
| | Brech- und Mahlkreislauf | Rückführung von Material zum erneuten Mahlen |
| | Flotation | Direkte Rezirkulation oder zur nächsten Flotationsstufe |
| | Entwässerung | Konzentrat und Flotationsberge werden als Suspension zur Entwässerung geleitet |
| Entwässerung | Prozesswasserspeicher | Dem Produktstrom (Konzentrat oder Berge) wird Wasser entzogen, dieses wird dem Prozesswasserspeicher zugeführt |
| | Wasseraufbereitung | Dem Produktstrom (Konzentrat oder Berge) wird Wasser entzogen, soll dieses aufbereitet werden, wird es der Wasseraufbereitung zugeführt |
| | Bergeteich/TSF | Der Bergeanteil wird dem Bergeteich als pumpfähige Suspension zugeführt |
| | Sonstige Anlagen | Das Konzentrat kann als Suspension via Rohrleitung bis zum Abnehmer, z. B. Hafen, transportiert werden |
| Bergeteich/TSF | Grundwasser | Teile des im Bergematerial enthaltenen Wassers können versickern und gelangen so ins Grundwasser |
| | Prozesswasserspeicher | Wasser, das der TSF entzogen wird, kann dem Prozesswasserspeicher zugeführt werden |
| | Wasseraufbereitung | Wasser, das der TSF entzogen wird, kann der Wasseraufbereitung zugeführt werden, wenn es aufbereitet werden soll |
| Laugungsanlage | Prozesswasserspeicher | Überschüssiges Wasser aus dem Laugungssystem wird einem Prozesswasserspeicher zugeführt, teilweise auch gesammelter Niederschlag |
| | Wasseraufbereitung | Überschüssiges Wasser aus dem Laugungssystem, welches aufbereitet werden soll, wird der Wasseraufbereitung zugeführt |
| | Laugungsanlage | Interne Rezirkulation, vor allem der Kreislauf der Lauge vom neutralen Speicher, über die Halde, zur Aufbereitung |
| | Sonstige Anlagen | Transport des Konzentrats mit Restfeuchte |
| Sonstige Anlagen | Wasseraufbereitung | Brauchwasser der Sanitäranlagen wird der Wasseraufbereitung zugeführt oder in die Kanalisation abgeführt |
| Chemikalien | Bergwerk | Im Bergwerk verwendete flüssige Chemikalien, wie etwa Treibstoffe, Staubbindemittel etc. |
| | Wasseraufbereitung | Chemikalien zur Aufbereitung von Wasser |

| | |
|---|---|
| Flotation | Für den Prozess notwendige Flotationsmittel |
| Laugungsanlage | Chemikalien zur Herstellung der Lauge |

# Anhang 3: Liste der zusammengefassten Fluidströme in Bergwerken basierend auf Adjazenzmatrix

*Tabelle A-3: Liste der zusammengefassten Fluidströme in Bergwerken*

| # | Quelle | Ziel | Ausgeschlossen? |
|---|---|---|---|
| 1 | Grundwasser | Bergwerk | Ja |
| 2 | Grundwasser | Dritte | Nein |
| 3 | Grundwasser | Frischwasserspeicher, Prozesswasserspeicher, Wasseraufbereitung | Nein |
| 4 | Niederschlag | Grundwasser | Ja |
| 5 | Niederschlag | Bergwerk | Ja |
| 6 | Niederschlag | Frischwasserspeicher, Prozesswasserspeicher, Wasseraufbereitung, TSF | Ja |
| 7 | Niederschlag | Laugungsanlage | Ja |
| 8 | Niederschlag | Sonstige Anlagen | Ja |
| 9 | Dritte | Frischwasserspeicher | Nein |
| 10 | Bergwerk | Prozesswasserspeicher | Nein |
| 11 | Frischwasserspeicher, Prozesswasserspeicher | Bergwerk | Nein |
| 12 | Frischwasserspeicher, Prozesswasserspeicher | Brech- und Mahlkreislauf, Flotation, Laugungsanlage | Nein |
| 13 | Frischwasserspeicher | Sonstige Anlagen | Nein |
| 14 | Prozesswasserspeicher | Wasseraufbereitung | Nein |
| 15 | Wasseraufbereitung | Dritte | Nein |
| 16 | Wasseraufbereitung | Frischwasserspeicher | Nein |
| 17 | Brech- und Mahlkreislauf | Prozesswasserspeicher, Wasseraufbereitung | Ja |
| 18 | Brech- und Mahlkreislauf | Brech- und Mahlkreislauf | Nein |
| 19 | Brech- und Mahlkreislauf | Flotation | Nein |
| 20 | Flotation | Prozesswasserspeicher, Wasseraufbereitung | Ja |
| 21 | Flotation | Brech- und Mahlkreislauf | Nein |
| 22 | Flotation | Flotation | Nein |
| 23 | Flotation | Entwässerung | Nein |
| 24 | Entwässerung | Prozesswasserspeicher, Wasseraufbereitung | Nein |
| 25 | Entwässerung | TSF, Sonstige Anlagen | Nein |
| 26 | TSF | Grundwasser | Ja |
| 27 | TSF | Prozesswasserspeicher, Wasseraufbereitung | Nein |
| 28 | Laugungsanlage | Prozesswasserspeicher, Wasseraufbereitung | Nein |
| 29 | Laugungsanlage | Laugungsanlage | Nein |
| 30 | Laugungsanlage | Sonstige Anlagen | Nein |
| 31 | Sonstige Anlagen | Wasseraufbereitung | Nein |
| 32 | Chemikalien, Treibstoffe etc | Bergwerk | Nein |
| 33 | Chemikalien, Treibstoffe etc | Wasseraufbereitung, Flotation, Laugungsanlage, Chemikalien, Treibstoffe etc. | Ja |

## Anhang 4: Anhand der Potenzialkriterien ausgeschlossene Fluidströme

Die unten aufgeführten Fluidströme wurden anhand der in Kapitel 4.3.3 definierten Potenzialkriterien von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen:

**Grundwasser → Bergwerk (Nr. 1)**: Das Grundwasser tritt nicht an einer festgelegten Stelle in das Bergwerksgebäude ein, sondern die Zuflussstellen können sich mit dem fortschreitenden Abbau und der Veränderung des Grubenbaus verändern. Das im Bergbau gesammelte Grund- oder Grubenwasser, das in Sümpfen oder Becken gespeichert wird, und dessen weitere Verwendung, wird in Fluidstrom 10 genauer betrachtet.

**Niederschlag → Grundwasser (Nr. 4)**: Der versickernde Niederschlag hat keinen klaren Start- und Endpunkt. Sobald der Niederschlag an einer Stelle gesammelt wird, wird das Wasser einem anderen Fluidstrom zugeordnet.

**Niederschlag → Bergwerk (Nr. 5)**: Der Niederschlag, der insbesondere in ein offenes Bergwerk fällt, hat keinen definierten Startpunkt und lässt sich daher – unabhängig von der Größe des Fluidstroms – nicht nutzen. Sobald der Niederschlag in einem Becken im Bergwerk gespeichert und anschließend kontrolliert abgeleitet wird, handelt es sich um einen anderen Fluidstrom.

**Niederschlag → Frisch-, Prozesswasserspeicher, Wasseraufbereitung, TSF (Nr. 6)**: Die zusammengefassten Fluidströme haben gemeinsam, dass der Niederschlag direkt in die jeweiligen Wasserspeicher fällt. Aufgrund des undefinierten Startpunkts und der großen Fläche, auf die er fällt, ist der Fluidstrom jedoch weder technisch nutzbar noch hinreichend definiert.

**Niederschlag → Laugungsanlage (Nr. 7)**: Der Niederschlag auf einer Laugungsanlage erscheint auf den ersten Blick vielversprechend für die Nutzung eines hydroelektrischen Potenzials, da dieser durch Folien am Einsickern gehindert und gesammelt wird. Fluidstrom 7 beschreibt dabei nur den Niederschlag auf der Laugungshalde, während der abgeleitete Niederschlag in Fluidstrom 30 behandelt wird.

**Niederschlag → Sonstige Anlagen (Nr. 8)**: Niederschlag, der auf sonstige Anlagen fällt und dort möglicherweise gesammelt wird, ist weder definiert noch signifikant. Neben dem fehlenden klaren Startpunkt beim Niederschlag ist auch die Menge des Fluidstroms aufgrund der relativ kleinen Fläche der versiegelten Flächen nicht von Bedeutung.

**Brech- und Mahlkreislauf → Prozesswasserspeicher, Wasseraufbereitung (Nr. 17)**: Grundsätzlich wird den Prozessen im Bergbau nur so viel Wasser zugeführt, wie für den Betrieb notwendig ist. In der Regel wird nur eine geringe Menge an Wasser aus dem Prozess in die Wasserspeicher oder zur Wasseraufbereitung zurückgeführt, wodurch der Fluidstrom nicht signifikant ist.

**Flotation → Prozesswasserspeicher, Wasseraufbereitung (Nr. 20)**: Ähnlich wie bei Fluidstrom 17 wird in der Regel nur so viel Wasser verwendet, wie nötig ist, sodass an dieser Stelle kaum oder kein Wasser in die Speicher zurückgeführt wird.

**Bergeteich/TSF → Grundwasser (Nr. 26)**: Das Versickern von Wasser aus dem Bergeteich ins Grundwasser sollte unter normalen Umständen nicht passieren, geschieht es doch, können erhebliche Mengen versickern. Dieser Fluidstrom ist jedoch aufgrund der Fläche nicht definiert und technisch nicht nutzbar.

**Chemikalien → Wasseraufbereitung, Flotation, Laugungsanlage (Nr. 33)**: Die Zuführung von Chemikalien zu verschiedenen Prozessen erfolgt in konzentrierter Form und umfasst daher keine signifikanten Fluidströme.

# Anhang 5: Charakterisierte Fluidströme

*Tabelle A-4: Charakterisierte Fluidströme*

| **Fluidstrom 1: Grundwasser → Dritte** | |
|---|---|
| Zweck | Wasserhaltung oder Abpumpen von Grundwasser, welches (zum Teil) nicht für den eigenen Betrieb benötigt wird und daher an Dritte abgegeben wird. |
| Umsetzung | Zum Abpumpen wird ein Brunnen oder Bohrung erstellt, aus der mit einer Pumpe das Grundwasser gepumpt wird. Von dem Brunnen wird das Wasser über eine Rohrleitung und ggfs. weitere Pumpstationen oder Sammelpunkte vom Betriebsgelände zu Dritten geleitet. |
| Potenzialmöglichkeit | Potenziale könnten im Verlauf der übertägigen Rohrleitungen liegen. Je nach Umgebung und Verlauf könnten Abschnitte energetisch genutzt werden. |
| Einzigartigkeit | Der Fluidstrom ist nicht einzigartig, ähnelt zu großen Teilen anderen im Bergbau auftretenden oder sogar in anderen Industrien. Der Fluidstrom ist ähnlich zu der Hauptwasserversorgung oder anderen Wasserversorgungs- oder Wasserentsorgungsleitungen von Industrieanlagen. |
| Neuartigkeit | Es gibt bereits Anwendungen zur Energierückgewinnung in Frischwasserrohrleitungen, zum Beispiel in Bewässerungssystemen oder in Trinkwassernetzen, die im Prinzip vergleichbar sind (vgl. Kapitel 3). |
| Quantität | |
| **Fluidstrom 2: Grundwasser → Frischwasserspeicher, Prozesswasserspeicher, Wasseraufbereitung** | |
| Zweck | Wenn Grundwasser von einem Bergwerk zur Wasserhaltung gehoben wird, kann dieses als Prozesswasser für die eigenen Prozesse genutzt werden. |
| Umsetzung | Das Grundwasser in der Wasserhaltung wird durch Bohrungen oder Brunnen gefördert, anschließend wird es über Rohrleitungen einem der Wasserspeicher oder bei Minderqualität der Wasseraufbereitung zugeführt. |
| Potenzialmöglichkeit | Potenziale können im Verlauf der Rohrleitung auftreten, wenn Teilbereiche eine Fallhöhe aufweisen. |
| Einzigartigkeit | Die Fluidströme sind teilweise einzigartig, die technische Umsetzung ähnelt der Leitung von Grundwasser zu Dritten, die Länge der Leitungen wird aber wesentlich kürzer sein, auch sind auf dem Betriebsgelände geringere Fallhöhen zu erwarten. |
| Neuartigkeit | |
| Quantität | • Rohwasser aus Fluss  Bergwerk: 513 m³/h (Gunson 2013, S. 202) |
| **Fluidstrom 3: Dritte → Frischwasserspeicher** | |
| Zweck | Der Frischwasserbedarf von Bergwerken kann durch externe Wasserquellen oder sonstige Dritte gedeckt werden. Der Frischwasserbedarf hängt dabei vom Netto-Wasserverbrauch und sonstigen, innerbetrieblichen Wasseraufkommen ab. |
| Umsetzung | Für die Frischwasserversorgung wird über Rohrleitungen Wasser von Dritten in den Frischwasserspeicher geleitet. Diese Leitungen können je nach Entfernung des Entnahmepunktes und der Topografie bzw. Leitungsverlauf Drossel- oder Pumpstationen enthalten. |
| Potenzialmöglichkeit | Teilabschnitte der Rohrleitung können eine Fallhöhe und damit ein hydroelektrisches Potenzial aufweisen. |
| Einzigartigkeit | Nicht einzigartig. Der Fluidstrom ähnelt stark der Abgabe von Grundwasser an Dritte (lange Rohrleitung, Fallhöhen bzw. Potenzial durch Leitungsverlauf bestimmt, gleichmäßiger Volumenstrom) |
| Neuartigkeit | |
| Quantität | |
| **Fluidstrom 4: Bergwerk → Prozesswasserspeicher** | |
| Zweck | Im Bergwerk kann sich Prozess- oder Grubenwasser in Sümpfen sammeln, dieses Wasser muss gehoben werden, wenn es die Speicherkapazität übersteigt oder generell die Zuflussrate positiv ist. |
| Umsetzung | Aus dem Pumpensumpf wird das Wasser zumeist erst über Schläuche, später über Rohrleitungen aus dem Bergwerk bis zum Prozesswasserspeicher gepumpt. |

| | |
|---|---|
| Potenzialmöglichkeit | Der Fluidstrom kann vor allem in der Rohrleitung außerhalb des Bergwerks ein Potenzial enthalten, wenn die Steigleitung die Teufe des Bergwerks bereits überwunden hat. Das Potenzial kann also in einem Teil der Leitung, welcher vom Bergwerk zum Prozesswasserspeicher führt, auftreten, wenn die Leitung entsprechende Fallhöhen aufweist. |
| Einzigartigkeit | Der Leitungsverlauf und Ursprung des Fluidstroms als Grubenwasser sind einzigartig, damit auch die stark vom Standort und der vorherrschenden Hydrogeologie abhängige Größe des Volumenstroms. |
| Neuartigkeit | |
| Quantität | Sehr individuell je Bergwerk |
| **Fluidstrom 5: Frisch-/Prozesswasserspeicher → Bergwerk** | |
| Zweck | Im Bergwerk wird für verschiedene Prozesse, wie etwa das Bohren, Staubunterdrückung oder auch Sanitäranlagen Frisch- und Prozesswasser benötigt. |
| Umsetzung | Das benötigte Wasser wird über Rohrleitungen oder Schläuche vom übertägigen Speicher ins Bergwerk geleitet. Dafür muss es je nach Leitungsverlauf im Bereich außerhalb des Bergwerks und auf den verschiedenen Sohlen des Bergwerks gepumpt werden. |
| Potenzialmöglichkeit | Das hydroelektrische Potenzial tritt durch die große Fallhöhe vom übertägigen Wasserspeicher zum Verbraucher unter Tage bzw. im Tagebau auf. |
| Einzigartigkeit | Die große Fallhöhe, vor allem im untertägigen Bergbau, macht diese Art des Fluidstroms einzigartig. |
| Neuartigkeit | |
| Quantität | |
| **Fluidstrom 6: Frisch-/Prozesswasserspeicher → Brech- und Mahlkreislauf, Flotation, Laugungsanlage** | |
| Zweck | Zuleitung von Wasser für den Mahl- und Brechprozess und anschließende hydraulische Förderung des Mahlguts sowie für das Einstellen des Feststoffanteils in der Suspension bei der Flotation und die Versorgung des Laugungsprozesses mit dem benötigten Wasser. |
| Umsetzung | Das Wasser wird nach Entnahme aus den Wasserspeichern durch Rohrleitungen zu dem jeweiligen Prozess gepumpt, bei einem vorhandenen Gefälle fließt das Wasser gravimetrisch. |
| Potenzialmöglichkeit | Bei einer vorhandenen Höhendifferenz zwischen Wasserspeicher und Prozess kann ein hydroelektrisches Potenzial vorhanden sein. |
| Einzigartigkeit | Die Zuleitung von (Prozess)-Wasser in gleichmäßiger Menge durch Rohrleitungen ist nicht einzigartig und kann in verschiedenen Anwendungen auftreten. |
| Neuartigkeit | |
| Quantität | • Rohwasser zu Zerkleinerung: 171 m³/h,<br>• Recyclingwasser zu Zerkleinerung: 4.186 m³/h,<br>• Kühlwasser zu Zerkleinerung: 242 m³/h (Gunson 2013, S. 202 ff.). |
| **Fluidstrom 7: Frischwasserspeicher → Sonstige Anlagen** | |
| Zweck | Versorgung von sanitären Anlagen, landschaftlichen Bewässerungssystemen etc. mit Frischwasser. |
| Umsetzung | Das Wasser wird dem jeweiligen Verbraucher über Rohrleitungen zugeführt, meist unter Nutzung einer Pumpe. |
| Potenzialmöglichkeit | Je nach Leitungsverlauf und Orientierung der Anlagen zueinander können durch Höhenunterschiede hydroelektrische Potenziale auftreten. |
| Einzigartigkeit | Nicht einzigartig, der Fluidstrom kommt so oder so ähnlich in diversen Industrien und anderen Anwendungen vor. |
| Neuartigkeit | |
| Quantität | • Rohwasser zu Kühlwasser Kugelmühlen: 171 m³/h,<br>• Rohwasser zu Kühlwasser SAG Mühle: 171 m³/h (Gunson 2013, S. 202 ff.) |
| **Fluidstrom 8: Prozesswasserspeicher → Wasseraufbereitung** | |
| Zweck | Kontrollierte und gesteuerte Zuführung von Prozesswasser minderer Qualität zur Wasseraufbereitung. |
| Umsetzung | Das Wasser wird über eine einfache Rohrleitung zugeführt, je nach Orientierung der Anlagen zueinander durch Pumpen oder gravimetrisch. |

| | |
|---|---|
| Potenzialmöglichkeit | Bei entsprechender Orientierung der Anlagen zueinander kann je nach Leitungsverlauf ein hydroelektrisches Potenzial durch die Höhendifferenz auftreten. Prozesstechnisch wird die Wasseraufbereitung häufig tiefer angeordnet sein als die Quelle, um gravimetrische Effekte zu nutzen. |
| Einzigartigkeit | Dieser Fluidstrom ist ähnlich zu dem Fluidstrom 6, jedoch durch die tendenziell regelmäßige auftretende Anordnung der Anlagen zueinander und Flussrichtung und potenziellen Höhenunterschiede einzigartig. |
| Neuartigkeit | |
| Quantität | |

| **Fluidstrom 9: Wasseraufbereitung → Dritte** | |
|---|---|
| Zweck | Überschüssiges Wasser eines Bergwerks muss gereinigt werden, bevor es an die Umgebung oder einen Dritten abgegeben werden kann. Das Wasser wird dafür der Wasseraufbereitung zugeführt und von dort aus, wenn es nicht für andere Prozesse benötigt wird, vom Werksgelände abgeleitet. |
| Umsetzung | Das aufbereitete Wasser wird meist über Rohrleitungen gepumpt oder bei entsprechenden Gegebenheiten gravimetrisch über Rohrleitungen abgeleitet. |
| Potenzialmöglichkeit | Je nach Verlauf der Rohrleitung können in Abschnitten hydroelektrische Potenziale auftreten. |
| Einzigartigkeit | Der Fluidstrom kann durch die teilweise sehr abgelegenen Standorte von Bergwerken einzigartig sein, oft handelt es sich aber um eine gewöhnliche, nicht einzigartige Wasserrohrleitung. |
| Neuartigkeit | |
| Quantität | |

| **Fluidstrom 10: Wasseraufbereitung → Frischwasserspeicher** | |
|---|---|
| Zweck | Aufzubereitendes, verunreinigtes Prozesswasser kann nach der Aufbereitung wieder dem Frischwasserspeicher zugeführt werden, wenn es in Prozessen benötigt wird. |
| Umsetzung | Das aufbereitete Wasser wird über eine Rohrleitung zum Frischwasserspeicher gepumpt, oder fließt bei entsprechender Orientierung der Anlagen gravimetrisch. |
| Potenzialmöglichkeit | Bei entsprechender Orientierung der Anlagen zueinander kann in der Rohrleitung ein hydroelektrisches Potenzial vorhanden sein. |
| Einzigartigkeit | Art und Umfang des Fluidstroms sind nicht einzigartig. |
| Neuartigkeit | |
| Quantität | |

| **Fluidstrom 11: Brech- und Mahlkreislauf → Brech- und Mahlkreislauf** | |
|---|---|
| Zweck | Innerhalb des Brech- und Mahlkreislaufs wird das Erz so lange gemahlen und rezirkuliert, bis es die geplante Korngröße erreicht. Das Erz wird dabei als Suspension hydraulisch transportiert. |
| Umsetzung | Die Erz-Suspension wird in Rohrleitungen oder offenen Leitungen gepumpt oder fließt gravimetrisch. Die Erzpartikel werden z. B. in Hydrozyklonen anhand der Größe sortiert. |
| Potenzialmöglichkeit | Einzelne Teile des Kreislaufsystems können ein hydroelektrisches Potenzial enthalten, wenn die Suspension in dem Teil gravimetrisch fließt, gepumpt wird und unter Druck steht oder kinetische Energie beinhaltet. |
| Einzigartigkeit | Die Fluidströme sind einzigartig im Bergbau in Umfang und Art, die Ausprägung und Auslegung des Systems ist jedoch bei verschiedenen Bergwerken sehr ähnlich. |
| Neuartigkeit | |
| Quantität | |

| **Fluidstrom 12: Brech- und Mahlkreislauf → Flotation** | |
|---|---|
| Zweck | Das zerkleinerte Erz wird als Suspension zum nächsten Prozessschritt, der Flotation, geleitet.<br>Umsetzung: Die Erzsuspension wird hydraulisch in einer Rohr- oder Freispiegelleitung gepumpt oder geleitet. |
| Umsetzung | |
| Potenzialmöglichkeit | Beim Transport der Suspension kann stellenweise ein hydroelektrisches Potenzial auftreten, entweder durch den gravimetrischen Fluss, Druck oder kinetisch. |
| Einzigartigkeit | Die Fluidströme sind einzigartig im Bergbau in Umfang und Art, die Ausprägung und Auslegung des Systems ist jedoch bei verschiedenen Bergwerken sehr ähnlich. |

| | |
|---|---|
| Neuartigkeit | |
| Quantität | • Zerkleinerung zu Flotation: 4.651 m³/h (Gunson 2013, S. 202 ff.) |

**Fluidstrom 13: Flotation → Brech- und Mahlkreislauf**

| | |
|---|---|
| Zweck | Flotationsabgänge werden in einigen Aufbereitungsanlagen abermals aufgemahlen, um das Ausbringen zu erhöhen. Hierfür werden die Flotationsberge hydraulisch dem Mahlkreislauf zugeführt. |
| Umsetzung | Die Flotationsberge werden als Suspension entweder in einer Freispiegelleitung oder in einer Rohrleitung dem Mahlkreislauf zugeleitet oder gepumpt. |
| Potenzialmöglichkeit | Beim Transport der Suspension kann je nach Orientierung der Anlagen zueinander stellenweise ein hydroelektrisches Potenzial auftreten, entweder durch den gravimetrischen Fluss, Druck oder kinetisch. |
| Einzigartigkeit | Die Art des Fluidstroms ist einzigartig im Bergbau, aber ähnlich zu den Fluidströmen 11 und 12. |
| Neuartigkeit | |
| Quantität | |

**Fluidstrom 14: Flotation → Flotation**

| | |
|---|---|
| Zweck | Die Erzsuspension wird in manchen Aufbereitungsanlagen zwischen verschiedenen Flotationsstufen weitergeleitet oder rezirkuliert, um das Ausbringen zu erhöhen. |
| Umsetzung | Die Suspension fließt in Freispiegelleitungen oder wird in Rohrleitungen gepumpt. |
| Potenzialmöglichkeit | Beim Transport der Suspension kann je nach Orientierung der Anlagen zueinander stellenweise ein hydroelektrisches Potenzial auftreten, entweder durch den gravimetrischen Fluss, Druck oder kinetisch. |
| Einzigartigkeit | Die Art des Fluidstroms ist vor allem wegen der Beschaffenheit des Fluids einzigartig im Bergbau, aber ähnlich zu Fluidstrom 11-13. |
| Neuartigkeit | |
| Quantität | |

**Fluidstrom 15: Flotation → Entwässerung**

| | |
|---|---|
| Zweck | Der Produktstrom der Flotation als auch die Flotationsberge werden getrennt als Suspension der Entwässerung als nächstem Prozessschritt zugeführt. |
| Umsetzung | Der jeweilige Fluidstrom der Flotationsberge und der Produktstrom fließen entweder in einer Freispiegelleitung oder in einer Rohrleitung als Suspension zur Entwässerung. Teilweise sind die Fluidströme in noch weitere Teilströme unterteilt (Cleaner Tailings, Rougher Tailings etc.). |
| Potenzialmöglichkeit | Häufig fließt die Suspension ohne zusätzliche Pumpen und kann somit an einigen Stellen ein hydroelektrisches Potenzial enthalten, zusätzlich kann kinetische Energie im Fluid vorhanden sein oder das Fluid unter Druck stehen. |
| Einzigartigkeit | Die Art und der Umfang der Fluidströme ist einzigartig im Bergbau und ähnelt nur in der Art, aber nicht in Umfang und Auslegung der Leitung anderen Fluidströmen in Bergwerken. |
| Neuartigkeit | |
| Quantität | • Flotation Konzentrat zu Entwässerung des Kupferkonzentrats: 78 m³/h,<br>• Flotation Flotationsberge/Tailings zu Entwässerung der Flotationsberge/Tailings: 4.783 m³/h (Gunson 2013, S. 203). |

**Fluidstrom 16: Entwässerung → Prozesswasserspeicher, Wasseraufbereitung**

| | |
|---|---|
| Zweck | Das der jeweiligen Suspension in der Entwässerung entzogene Wasser wird dem Prozesswasserspeicher oder der Wasseraufbereitung zugeführt, um wieder genutzt werden zu können. |
| Umsetzung | Das Wasser aus der Entwässerung wird in einem Überlauf gesammelt und von dort aus durch eine Rohrleitung gepumpt, oder fließt gravimetrisch. |
| Potenzialmöglichkeit | In Teilen der Leitung kann je nach Bauart und Verlauf ein hydroelektrisches Potenzial auftreten. Außerdem kann direkt an der Entwässerung aufgrund der recht hohen Höhe von mehreren Metern ein Potenzial auftreten. |
| Einzigartigkeit | Das Potenzial direkt an der Entwässerung ist einzigartig, das im Verlauf der Rohrleitung nicht. |
| Neuartigkeit | |
| Quantität | • Entwässerung der Flotationsberge/Tailings zu Recyclingwasser: 4.232 m³/h, |

| | |
|---|---|
| | • Entwässerung des Kupferkonzentrats zu Recyclingwasser: 74 m³/h (Gunson 2013, S. 202 ff.). |
| **Fluidstrom 17: Entwässerung → TSF** | |
| Zweck | Hydraulischer Transport der Berge zum Bergeteich sowie der hydraulische Transport von Konzentrat zur Trocknung.<br>Außerdem kann das Bergematerial auch zur Rückverfüllung genutzt werden. |
| Umsetzung | Beide Produktströme werden als pumpfähige Suspension entweder in Rohrleitungen gepumpt oder geleitet, oder in Freispiegelleitungen geleitet. |
| Potenzialmöglichkeit | Wenn Bergematerial oder Erzkonzentrat über große Höhendifferenzen gravimetrisch gefördert wird, kann ein hydroelektrisches Potenzial aufkommen. Vor allem beim Transport der Berge zum Bergeteich können erhebliche Fallhöhen auftreten in Kombination mit hohen Volumina. Auch das Einbringen von Bergematerial als Versatz im über- oder untertägigen Bergwerk geschieht in Kombination mit einer erheblichen Fallhöhe. Auch der Transport von Erzkonzentrat oder Bergematerial über Rohrleitungen zu einem Hafen oder für Deep-Sea-Disposal überwindet große Höhendifferenzen. |
| Einzigartigkeit | Der Volumenstrom ist in Volumen und Art einzigartig. |
| Neuartigkeit | |
| Quantität | • Entwässerung der Flotationsberge/Tailings □ Berge/TSF: 512 m³/h (Gunson 2013, S. 202) |
| **Fluidstrom 18: TSF → Prozesswasserspeicher, Wasseraufbereitung** | |
| Zweck | Das bei der Entwässerung der im Bergeteich gelagerten Berge freiwerdende Wasser wird dem Prozesswasserspeicher oder der Wasseraufbereitung zugeführt, um es später in anderen Prozessen nutzen zu können. |
| Umsetzung | Nachdem das Sickerwasser in einem Becken gesammelt ist, wird es über eine Rohrleitung gepumpt oder Freispiegelleitung dem Ziel zugeführt. |
| Potenzialmöglichkeit | Je nach Orientierung der Anlagen zueinander und Verlauf der Leitung kann in Abschnitten durch Höhenunterschiede ein hydroelektrisches Potenzial auftreten. |
| Einzigartigkeit | Der Fluidstrom ist einzigartig, aber ähnlich zu anderen Prozesswasserströmen. |
| Neuartigkeit | |
| Quantität | • TSF Wasserrückgewinnung zu Recyclingwasser: 512 m³/h (Gunson 2013, S. 202) |
| **Fluidstrom 19: Laugungsanlage → Prozesswasserspeicher, Wasseraufbereitung** | |
| Zweck | Laugungshalden sind häufig gegen Niederschlag abgedichtet, um eine ungewünschte Verdünnung der Lauge zu verhindern. Der auf die Halden fallende Niederschlag wird gesammelt und kontrolliert abgeleite |
| Umsetzung | Nachdem der Niederschlag gesammelt ist, wird er über Rohrleitungen oder Freispiegelleitungen abgeleitet oder gepumpt. |
| Potenzialmöglichkeit | In Gebieten mit großen Mengen Niederschlag und einem entsprechenden Verlauf der Leitungen, kann ein hydroelektrisches Potenzial vorhanden sein. |
| Einzigartigkeit | Die große Menge gesammelter Niederschlag ist ungewöhnlich, die mögliche Nutzung ähnlich zu anderen Fluidströmen. |
| Neuartigkeit | |
| Quantität | |
| **Fluidstrom 20: Laugungsanlage → Laugungsanlage:** | |
| Zweck | Innerhalb der Laugungsanlage werden die Lauge und die gesättigte Lauge verarbeitet und das Wertmineral extrahiert. |
| Umsetzung | Die Laugen werden innerhalb der Anlage durch ein Rohrleitungssystem zwischen den Tanks gepumpt. |
| Potenzialmöglichkeit | Je nach Verlauf der Leitungen und dem Aufbau der Laugungsanlage ist eine Fallhöhe zu erwarten, in diese Richtung kann ein hydroelektrisches Potenzial entstehen. |
| Einzigartigkeit | Die Fluidströme sind vor allem wegen der Art des Fluids einzigartig. |
| Neuartigkeit | Keine Nutzung bekannt, ähnlich zu Raffinerien (vgl. Kapitel 3) |

| | |
|---|---|
| Quantität | Die Quantität wird an einigen Stellen der Anlage F21 ähneln. |
| **Fluidstrom 21: Laugungsanlage → Sonstige Anlagen** | |
| Zweck | Von der Laugungshalde muss die schwangere Laugungsflüssigkeit zur Laugungsanlage transportiert werden, um dort weiterverarbeitet werden zu können. Die Extraktion des Wertminerals findet meistens nicht direkt an der Laugungshalde statt, sondern in speziellen Aufbereitungsanlagen für die Laugungsflüssigkeit. |
| Umsetzung | Da die Laugen nicht in die Umwelt gelangen dürfen, werden diese durch Rohrleitungen transportiert oder gepumpt. |
| Potenzialmöglichkeit | Durch die Entfernung der Laugungshalden zu der Laugungsanlage können erhebliche Entfernungen und Fallhöhen auftreten. |
| Einzigartigkeit | Die Fluidströme sind vor allem wegen der Art des Fluids einzigartig. |
| Neuartigkeit | |
| Quantität | Ausgehend von einer Produktion von 50.000 t Erz pro Tag mit einem Kupfergehalt von 0,5 %, einem metallurgischen Ausbringen von 80 % sowie einer Reinheit der produzierten Kupferkathoden von 90 % ergibt sich eine tägliche Kathodenproduktion von etwa 180 t. Bei einem Wasserverbrauch von 27,4 m³ pro Tonne produzierter Kupferkathode ergibt sich daraus ein täglicher Fluidstrom von etwa 4.932 m³ bzw. rund 205,5 m³/h. (Gunson 2013, S. 24, 202 ff.) |
| **Fluidstrom 22: Sonstige Anlagen → Wasseraufbereitung** | |
| Zweck | In den Büros genutztes Wasser wird bei Inselbetrieben der internen Wasseraufbereitung zugeführt. |
| Umsetzung | Das Brauchwasser wird über die Kanalisation oder eine Rohrleitung zur Wasseraufbereitung gepumpt, oder fließt durch ein Gefälle dorthin. |
| Potenzialmöglichkeit | Bei entsprechendem Verlauf der Leitung kann ein hydroelektrisches Potenzial auftreten. |
| Einzigartigkeit | Nicht einzigartig. |
| Neuartigkeit | |
| Quantität | |
| **Fluidstrom 23: Chemikalien, Treibstoffe etc. → Bergwerk** | |
| Zweck | Verschiedene Kleber, Treibstoffe oder andere Chemikalien müssen von einem Tank oder Lager in das Bergwerk zum Verwendungsort transportiert werden. |
| Umsetzung | Diese Fluide werden meist in Tanks oder anderen Behältern transportiert, können aber bei großen benötigten Mengen über Fallleitungen oder Rohrleitungen transportiert werden. |
| Potenzialmöglichkeit | Werden die Fluide in Rohrleitungen transportiert, kann aufgrund der Teufe des Bergwerks ein Potenzial entstehen. |
| Einzigartigkeit | Einzigartig und sehr individuell je Bergwerk. |
| Neuartigkeit | |
| Quantität | |

# Anhang 6: Liste aller Planungsparameter aus Kapitel 5.3.

*Tabelle A-5: Liste aller Planungsparameter der Planungskategorie „Frischwasserversorgung und Abgabe von Brauchwasser“*

| Kategorie | Nr. | Planungsparameter | Einfluss |
|---|---|---|---|
| Genehmigung Wasserentnahme | 1 | Menge des zugeteilten Wassers | Direkt |
| | 2 | Staatliche Verfassung | Indirekt |
| | 3 | Lokale Verfassung | Indirekt |
| | 4 | Wettbewerb zwischen den Nutzern | Indirekt |
| | 5 | Verhältnis zu lokalen Gemeinschaften | Indirekt |
| | 6 | Vorrangige Rechte | Indirekt |
| | 7 | Umweltzertifizierung | Indirekt |
| | 8 | Zeit für die Erteilung der Genehmigung | Indirekt |
| | 9 | Dauer der Gültigkeit | Indirekt |
| | 10 | Erneuerung der Genehmigung | Indirekt |
| | 11 | Wassergebührensätze | Indirekt |
| | 12 | Möglichkeit zur Änderung der Genehmigungsbedingungen | Indirekt |
| Genehmigung Wasserabgabe | 13 | Durchflussmenge (Vorfluter) | Indirekt |
| | 14 | Benötigte Einleitungsmenge | Direkt |
| | 15 | pH-Wert | Indirekt |
| | 16 | Total Suspended Solids/Total Dissolved Solids | Indirekt |
| | 17 | Azidität/Alkalität | Indirekt |
| | 18 | Toxische Elemente | Indirekt |
| | 19 | Schwermetalle | Indirekt |
| | 20 | Trübung | Indirekt |
| | 21 | Kationen/Anionen | Indirekt |
| | 22 | Höchstzulässige Grenzwerte für den Einleitungssektor | Indirekt |
| | 23 | Geologie | Indirekt |
| | 24 | Klima (Einleitungen) | Indirekt |
| | 25 | Geochemie | Indirekt |
| | 26 | Biochemie | Indirekt |
| | 27 | Rohstoff | Indirekt |
| | 28 | Aufbereitungsmethode | Indirekt |
| | 29 | Bergbau-Methode | Indirekt |
| | 30 | Saure Grubenwässer (AMD) | Indirekt |
| | 31 | Beziehung zu lokalen Gemeinschaften | Indirekt |
| | 32 | Umweltverträglichkeitsprüfung und Genehmigung der Fachbehörde | Indirekt |
| | 33 | Strategie und Anforderungen für die Abwasserbehandlung | Indirekt |
| | 34 | Anmeldeformular für die Genehmigung von Abwassereinleitungen | Indirekt |
| | 35 | Bedingungen und Schutz der aufnehmenden Umwelt | Indirekt |
| | 36 | Konsequenzen für nachfolgende Wassernutzer | Indirekt |
| | 37 | Staatliche Verfassung | Indirekt |
| | 38 | Lokale Verfassung | Indirekt |
| | 39 | Zeitpunkt der Erteilung der Erlaubnis | Indirekt |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | 40 | Dauer der Gültigkeit | Indirekt |
| | 41 | Erneuerung der Genehmigungen | Indirekt |
| Rohrleitungsverlauf | 42 | Kapitalkosten | Indirekt |
| | 43 | Betriebliche Kosten | Indirekt |
| | 44 | Instandhaltungskosten | Indirekt |
| | 45 | Sanierungs- und Stilllegungskosten | Indirekt |
| | 46 | Wirtschaftliches Risiko | Indirekt |
| | 47 | Machbarkeit der Wiederverwendung | Indirekt |
| | 48 | Kosten der Vorbereitung | Indirekt |
| | 49 | Verwertbarkeit und Steuern | Indirekt |
| | 50 | Exposition gegenüber vorherrschenden Winden | Indirekt |
| | 51 | Windgeschwindigkeit | Indirekt |
| | 52 | Übergang zum Waldgebiet | Indirekt |
| | 53 | Klima (Streckenführung) | Indirekt |
| | 54 | Niederschlag | Indirekt |
| | 55 | Topografie | Direkt |
| | 56 | Unterliegende Gesteinsarten | Indirekt |
| | 57 | Verwerfungen | Indirekt |
| | 58 | Oberflächenböden Besiedlung | Indirekt |
| | 59 | Durchlässigkeit des Untergrunds | Indirekt |
| | 60 | Grundwasserabflussgebiet | Indirekt |
| | 61 | Überschwemmungsgebiete und Feuchtgebiete | Indirekt |
| | 62 | Gebiete mit Erdrutschen | Indirekt |
| | 63 | Bedrohte Arten | Indirekt |
| | 64 | Lebensraum und Qualität von Wildtieren | Indirekt |
| | 65 | Fischereilebensraum und -qualität | Indirekt |
| | 66 | Empfindliche oder einzigartige Ökosysteme | Indirekt |
| | 67 | Vegetationstypen | Indirekt |
| | 68 | Fläche der Störung | Indirekt |
| | 69 | Landnutzung für Erholung | Indirekt |
| | 70 | Wirtschaftliche Landnutzung | Indirekt |
| | 71 | Eigentumsverhältnisse | Indirekt |
| | 72 | Straßen oder andere öffentliche Einrichtungen | Indirekt |
| | 73 | Nähe zu menschlichen Aktivitäten | Indirekt |
| | 74 | Nähe zu mehrjährigen Bächen oder Flüssen | Indirekt |
| | 75 | Archäologische Ressource | Indirekt |
| | 76 | Historischer Wert | Indirekt |
| | 77 | Ästhetik | Indirekt |
| | 78 | Höhenlage | Direkt |
| | 79 | Landschaftlicher Wert | Indirekt |
| | 80 | Heilige oder traditionelle Stätten | Indirekt |
| | 81 | Sichtbarkeit | Indirekt |
| | 82 | Prominenz | Indirekt |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | 83 | Transport und Verkehr | Indirekt |
| | 84 | Schiffbare Gewässer | Indirekt |
| | 85 | Vom Transportsystem durchquerte Flüsse | Indirekt |
| | 86 | Ausgaben der Regierung | Indirekt |
| | 87 | Mittel und Bedarfe der regionalen Regierung | Indirekt |
| | 88 | Genehmigungen | Direkt |
| | 89 | Länge der Rohrleitung | Direkt |
| | 90 | Horizontale Entfernung zum Bergwerk | Direkt |
| | 92 | Höhenänderung in Bezug auf den Standort des Bergwerks | Direkt |
| | 93 | Speicherkapazität | Indirekt |
| | 94 | Zugang vom Bergwerk | Indirekt |
| | 95 | Verfügbarkeit von Bau- und Rekultivierungsmaterial | Indirekt |
| | 96 | Technische Durchführbarkeit | Indirekt |
| | 97 | Ausbaufähigkeit | Indirekt |
| | 98 | Stabilität | Indirekt |
| | 99 | Häufigkeit der Übergänge (Straßen, Flüsse und Schienen) | Indirekt |
| | 100 | Vorhandene Versorgungsleitungen | Indirekt |
| Auslegung der Rohrleitung | 101 | Benötigte Kapazität | Direkt |
| | 102 | Richtlinien und Normen | Indirekt |
| | 103 | Reibungswiderstand der Rohrleitung | Direkt |
| | 104 | Höhenlage der Rohrleitung | Direkt |
| | 105 | Maximal zulässige Druckhöhe | Direkt |
| | 106 | Vorgeschriebene Mindestdruckhöhe | Indirekt |
| | 107 | Förderdruck am Endpunkt | Direkt |
| | 108 | Pumpentyp | Indirekt |
| | 109 | Größe und Durchmesser der Rohrleitung | Direkt |
| | 110 | Rohrleitungsarmaturen | Direkt |
| | 111 | Ausreichende Zugfestigkeit | Indirekt |
| | 112 | Dehnbarkeit | Indirekt |
| | 113 | Biegsamkeit | Indirekt |
| | 114 | Korrosionsbeständigkeit und Rohrrauhigkeit | Direkt |
| | 115 | Wanddicke | Indirekt |
| | 116 | Widerstandsfähigkeit bei der Handhabung | Indirekt |
| | 117 | Installationsumgebung | Indirekt |
| | 118 | Strömungseigenschaften (Kontinuitätsgleichung, Bewegungsgleichung und Bernoulli-Gleichung) | Direkt |
| | 119 | Dichte der Flüssigkeit | Direkt |
| | 120 | Laufzeit eines Bergwerks (LOM) | Indirekt |
| | 121 | Spitzenwertfaktor | Direkt |
| | 122 | Verlässlichkeit | Indirekt |
| | 123 | Betriebsbedingungen und Wartung | Indirekt |
| | 124 | Verfügbarkeit von Material | Indirekt |
| | 125 | Entlüftungsventile | Direkt |
| | 126 | Verbindung von Rohrleitungen | Direkt |

# Anhang 7: Liste aller Planungsparameter aus Kapitel 5.4.

*Tabelle A-6: Liste aller Planungsparameter der Planungskategorie „Mineralische Aufbereitung“*

| **Kategorie** | **Nr.** | **Planungsparameter** | Einfluss |
|---|---|---|---|
| Standortauswahl | 1 | Kapitalkosten | Indirekt |
| | 2 | Betriebliche Kosten | Indirekt |
| | 3 | Instandhaltungskosten | Indirekt |
| | 4 | Rekultivierungs- und Schließungskosten | Indirekt |
| | 5 | Wirtschaftliches Risiko | Indirekt |
| | 6 | Machbarkeit der Wiederverwendung | Indirekt |
| | 7 | Vorbereitungskosten | Indirekt |
| | 8 | Steuern und Abgaben | Indirekt |
| | 9 | Transportkosten | Indirekt |
| | 10 | Topografie | Direkt |
| | 11 | Höhenlage | Direkt |
| | 12 | Geologie | Indirekt |
| | 13 | Bodenbeschaffenheit | Indirekt |
| | 14 | Stabilität des Bodens | Indirekt |
| | 15 | Absenkung | Indirekt |
| | 16 | Bedingungen für Erdrutsche | Indirekt |
| | 17 | Seismizität | Indirekt |
| | 18 | Klimadaten (Standortauswahl) | Indirekt |
| | 19 | Wasserquellen | Indirekt |
| | 20 | Oberflächenwasser | Indirekt |
| | 21 | Qualität des Oberflächenwassers | Indirekt |
| | 22 | Entfernung zu Oberflächengewässern | Indirekt |
| | 23 | Grundwasserspiegel | Indirekt |
| | 24 | Vorherrschende Windverhältnisse | Indirekt |
| | 25 | Grundwasserabflussgebiet | Indirekt |
| | 26 | Grundwasserbeschaffenheit | Indirekt |
| | 27 | Tiefe des Grundwassers | Indirekt |
| | 28 | Überschwemmungsgebiet | Indirekt |
| | 29 | Vegetation | Indirekt |
| | 30 | Lebensraum für Wildtiere | Indirekt |
| | 31 | Vegetationstypen | Indirekt |
| | 32 | Fläche der Störung | Indirekt |
| | 33 | Anforderungen an die Anlage | Indirekt |
| | 34 | Größere Betriebseinheiten | Indirekt |
| | 35 | Nähe zur Lagerstätte und Bergbau | Direkt |
| | 36 | Entfernung der Brecher zum Bergwerk | Indirekt |
| | 37 | Zugang zu einer geeigneten Bergehalde | Indirekt |
| | 38 | Anforderungen an die Bergeentsorgung | Indirekt |
| | 39 | Zugang zum Bergwerksgelände | Indirekt |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | 40 | Horizontale Entfernung zum Grubengelände | Direkt |
| | 41 | Höhenunterschied zum Bergwerk | Direkt |
| | 42 | Transportsystem und Kapazität | Indirekt |
| | 43 | Vom Transportsystem durchquerter Fluss | Indirekt |
| | 44 | Technische Machbarkeit (Standortauswahl) | Indirekt |
| | 45 | Erweiterbarkeit | Direkt |
| | 46 | Anforderungen an die Wasserqualität | Indirekt |
| | 47 | Anforderungen an die elektrische Energie | Indirekt |
| | 48 | Versorgung mit Infrastruktur | Indirekt |
| | 49 | Integrierter Standort oder unvollständige Produktionskette | Indirekt |
| | 50 | Wettbewerbsfähiges Umfeld | Indirekt |
| | 51 | Primäre, halbfertige oder fertige Produkte | Indirekt |
| | 52 | Arbeitskräftepool | Indirekt |
| | 53 | Verfügbare Wohnungen | Indirekt |
| | 54 | Beschäftigungsquoten | Indirekt |
| | 55 | Verfügbare Materialien | Indirekt |
| | 56 | Verfügbare Auftragnehmer | Indirekt |
| | 57 | Nähe zum Markt oder Abnehmer | Indirekt |
| | 58 | Entfernung zur Hütte | Indirekt |
| | 59 | Transportverbindung | Indirekt |
| | 60 | Eigentumsverhältnisse | Indirekt |
| | 61 | Oberflächenrechte | Indirekt |
| | 62 | Immobilienverfügbarkeit | Indirekt |
| | 63 | Regulatorische Anforderungen | Indirekt |
| | 64 | Vertragliche Anforderungen | Indirekt |
| | 65 | Staatliche Ausgaben | Indirekt |
| | 66 | Entwicklungsanreize | Indirekt |
| | 67 | Umweltbedingte Einschränkungen | Indirekt |
| | 68 | Straßen oder andere öffentliche Einrichtungen | Indirekt |
| | 69 | Nähe zu menschlichen Aktivitäten | Indirekt |
| | 70 | Archäologische Ressource | Indirekt |
| | 71 | Historischer Wert | Indirekt |
| | 72 | Ästhetik | Indirekt |
| | 73 | Höhe | Direkt |
| | 74 | Landschaftlicher Wert | Indirekt |
| | 75 | Heilige oder traditionelle Stätten | Indirekt |
| | 76 | Sichtbarkeit | Indirekt |
| | 77 | Bekanntheit der Landschaft | Indirekt |
| Metallurgie | 78 | Rohstoff | Direkt |
| | 79 | Physikalische Charakterisierung | Indirekt |
| | 80 | Ausbringen aus Erz | Indirekt |
| | 81 | Gehalt des Konzentrats | Indirekt |
| | 82 | Qualität des Produkts | Indirekt |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | 83 | Problematische Elemente | Indirekt |
| | 84 | Werthaltige Elemente | Indirekt |
| | 85 | Aufbereitungs- und Raffinierungskosten (Treatment and Refining Charges) | Indirekt |
| | 86 | Freisetzung von Mineralien (Fracturing und Tenacity) | Indirekt |
| | 87 | Anforderungen an Reagenzien | Indirekt |
| | 88 | Abrasionsindex | Direkt |
| | 89 | Verbrauch von Verschleißstahl | Indirekt |
| | 90 | Verhalten in allen Verarbeitungsschritten | Indirekt |
| | 91 | Verweilzeit im Prozess | Indirekt |
| | 92 | Zerkleinerbarkeit Brechen | Indirekt |
| | 93 | Zerkleinerbarkeit Mahlen | Indirekt |
| | 94 | Magnetismus | Indirekt |
| | 95 | Spezifisches Gewicht des Erzes | Direkt |
| | 96 | Benetzbarkeit der Oberfläche | Direkt |
| Bergbau | 97 | Mineralisierung | Indirekt |
| | 98 | Abbaumethode | Indirekt |
| | 99 | Jährliche Produktionsrate | Direkt |
| | 100 | Tägliche Produktionsrate | Direkt |
| | 101 | Beschränkungen des zu verarbeitenden Erzes und der Tonnage | Indirekt |
| | 102 | Gesteinskörnung | Indirekt |
| | 103 | Kontrolle des Erzgehalts | Indirekt |
| | 104 | Möglichkeit der selektiven Gewinnung (SMU) | Indirekt |
| | 105 | Kontinuität | Indirekt |
| | 106 | Lebensdauer des Bergwerks (LOM) | Indirekt |
| | 107 | Auswahl der Bergbauausrüstung (SKW, Selektivität des Ladegeräts) | Indirekt |
| Auslegung der Aufbereitungsanlage | 108 | Konstruktionsstandards | Indirekt |
| | 109 | Verfügbarkeit der Anlage | Direkt |
| | 110 | Lebensdauer der Anlage | Indirekt |
| | 111 | Klima (Anlagenplanung) | Indirekt |
| | 112 | Prozessabläufe und innerbetriebliche Materialströme | Direkt |
| | 113 | Anordnung der einzelnen Verarbeitungsschritte | Direkt |
| | 114 | Höhenunterschiede der Ausrüstung und Anordnung | Direkt |
| | 115 | Verarbeitungsspezifikationen | Indirekt |
| | 116 | Prozessgruppierung | Indirekt |
| | 117 | Größe der Ausrüstung | Direkt |
| | 118 | Abstand zwischen den Ausrüstungen | Direkt |
| | 119 | Erweiterungspläne für die Ausrüstung | Indirekt |
| | 120 | Anforderungen an das Gehäuse für die Hauptausrüstung | Indirekt |
| | 121 | Materialtransportsystem | Direkt |
| | 122 | Eintrittspunkte für Versorgungsleitungen | Indirekt |
| | 123 | Leitungsführung (Druckluft, Instrumentenluft, Kommunikation, Staubbekämpfung, Wasser und Energie) | Direkt |
| | 124 | Kundenspezifikationen (Anlagenplanung) | Indirekt |
| | 125 | Bedienbarkeit | Indirekt |

| | | |
|---|---|---|
| 126 | Anforderungen an die Steuerung | Indirekt |
| 127 | Anforderungen an das Unterstützungssystem | Indirekt |
| 128 | Anforderungen an die Wartung | Direkt |
| 129 | Anforderungen an die Zugangsplattform | Indirekt |
| 130 | Anforderungen an die Konstruktion | Indirekt |
| 131 | Anforderungen für die Inbetriebnahme | Indirekt |
| 132 | Speicherkapazität | Indirekt |
| 133 | Sicherheit des Bedienpersonals | Indirekt |
| 134 | Flucht und Brandbekämpfung | Indirekt |
| 135 | Gebäudetechnik (sauberes Anlagendesign) | Indirekt |
| 136 | Belüftung | Indirekt |
| 137 | Blitzschlag | Indirekt |
| 138 | Lärm | Indirekt |
| 139 | Harzeindämmung | Indirekt |
| 140 | Schutz der Produkte | Indirekt |
| 141 | Verschiedene Gebäude (Wartungswerkstatt, Wasseraufbereitungsanlage, Bedienerunterstand, Umspannwerke, Prüf- und Metallurgielabor) | Direkt |
| 142 | Straßen, Pflasterung, Zufahrtswege für die Wartung und den Zugang zur Ausrüstung | Indirekt |
| 143 | Höhenanforderungen für Fahrzeuge | Indirekt |
| 144 | Anforderungen an Versorgungsflure und Rohrgestelle | Indirekt |
| 145 | Anordnung der Rohre | Indirekt |
| 146 | Rohrleitungsvorschriften und -normen | Indirekt |
| 147 | Wasserbedarf der Anlage | Direkt |
| 148 | Reibungswiderstand der Rohrleitung | Direkt |
| 149 | Höhenlage der Rohrleitung | Direkt |
| 150 | Maximal zulässige Druckhöhe | Direkt |
| 151 | Vorgeschriebene Mindestdruckhöhe | Direkt |
| 152 | Spitzenwert-Faktor | Direkt |
| 153 | Pumpentyp | Indirekt |
| 154 | Größe und Durchmesser der Rohrleitung | Direkt |
| 155 | Rohrleitungsarmaturen | Direkt |
| 156 | Ausreichende Zugfestigkeit | Indirekt |
| 157 | Duktilität | Indirekt |
| 158 | Biegsamkeit | Indirekt |
| 159 | Korrosionsbeständigkeit und Rohrrauhigkeit | Direkt |
| 160 | Wanddicke | Indirekt |
| 161 | Strukturelle Überlegungen | Indirekt |
| 162 | Installationsumgebung | Indirekt |
| 163 | Strömungseigenschaften (Kontinuitätsgleichung, Bewegungsgleichung und Bernoulli-Gleichung) | Direkt |
| 164 | Dichte der Flüssigkeit | Direkt |
| 165 | Auslegungszeitraum | Indirekt |
| 166 | Verlässlichkeit | Direkt |

| | | |
|---|---|---|
| 167 | Betriebsbedingungen und Wartungsanforderungen | Direkt |
| 168 | Verfügbarkeit von Material | Indirekt |
| 169 | Entlüftungsventile | Direkt |
| 170 | Rohrbögen | Direkt |
| 171 | Verbindung von Rohrleitungen | Direkt |
| 172 | Kundenspezifikationen (Auslegung der Rohrleitungen im Werk) | Indirekt |
| 173 | Anforderungen an die Brandbekämpfung | Indirekt |

# Anhang 8: Liste aller Planungsparameter aus Kapitel 5.5.

*Tabelle A-7: Liste aller Planungsparameter der Planungskategorie „Bergeteich und Rohrleitung für Aufbereitungsberge“*

| **Kategorie** | **Nr.** | **Planungsparameter** | Einfluss |
|---|---|---|---|
| Standortauswahl | 1 | Kapitalkosten | Indirekt |
| | 2 | Betriebliche Kosten | Indirekt |
| | 3 | Kosten der Erhaltung | Indirekt |
| | 4 | Rekultivierungskosten | Indirekt |
| | 5 | Wirtschaftliches Risiko | Indirekt |
| | 6 | Machbarkeit der Wiederverwendung | Indirekt |
| | 7 | Aufbereitungskosten | Indirekt |
| | 8 | Steuern | Indirekt |
| | 9 | Klima | Indirekt |
| | 10 | Luftqualität | Indirekt |
| | 11 | Exposition gegenüber vorherrschenden Winden | Indirekt |
| | 12 | Windgeschwindigkeit | Indirekt |
| | 13 | Fläche der Halde | Indirekt |
| | 14 | Unterliegende Gesteinsarten | Indirekt |
| | 15 | Besiedlung des Oberflächenbodens | Indirekt |
| | 16 | Kompressibilität des Fundaments | Indirekt |
| | 17 | Durchlässigkeit des Fundaments | Indirekt |
| | 18 | Grundwasserabflussgebiet | Indirekt |
| | 19 | Überschwemmungsgebiet | Indirekt |
| | 20 | Qualität des Grundwassers | Indirekt |
| | 21 | Tiefe des Grundwassers | Indirekt |
| | 22 | Qualität des Oberflächenwassers | Indirekt |
| | 23 | Bedrohte Arten | Indirekt |
| | 24 | Lebensraum und Qualität von Wildtieren | Indirekt |
| | 25 | Fischereilebensraum und -qualität | Indirekt |
| | 26 | Empfindliche oder einzigartige Ökosysteme | Indirekt |
| | 27 | Qualität der Wassereinzugsgebiete | Indirekt |
| | 28 | Vegetationstypen | Indirekt |
| | 29 | Fläche der Beeinflussung | Indirekt |
| | 30 | Landnutzung | Indirekt |
| | 31 | Freizeit- und Erholungsnutzung | Indirekt |
| | 32 | Wirtschaftliche Landnutzung | Indirekt |
| | 33 | Eigentumsverhältnisse | Indirekt |
| | 34 | Straßen oder andere öffentliche Einrichtungen | Indirekt |
| | 35 | Nähe und Größe der menschlichen Aktivitäten | Indirekt |
| | 36 | Archäologische Ressource | Indirekt |
| | 37 | Historischer Wert | Indirekt |
| | 38 | Ästhetik | Indirekt |
| | 39 | Höhenlage | Direkt |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | 40 | Landschaftlicher Wert | Indirekt |
| | 41 | Heilige oder traditionelle Stätten | Indirekt |
| | 42 | Prominenz | Indirekt |
| | 43 | Nähe zur Öffentlichkeit | Indirekt |
| | 44 | Transport und Verkehr | Indirekt |
| | 45 | Schiffbare Gewässer | Indirekt |
| | 46 | Wohnmöglichkeiten | Indirekt |
| | 47 | Arbeitsmarkt | Indirekt |
| | 48 | Investitionen der Regierung | Indirekt |
| | 49 | Regionale Förderprogramme | Indirekt |
| | 50 | Genehmigungen | Indirekt |
| | 51 | Sickerwasserbegrenzungen | Indirekt |
| | 52 | Horizontale Entfernung der Grube | Direkt |
| | 53 | Entfernung und Höhenunterschied zum Bergwerk | Direkt |
| | 54 | Speicherkapazität | Indirekt |
| | 55 | Zugang vom Bergwerk | Indirekt |
| | 56 | Mögliche Entsorgungsoptionen | Indirekt |
| | 57 | Verfügbarkeit von Bau- und Rekultivierungsmaterialien | Indirekt |
| | 58 | Technische Machbarkeit (Standortauswahl) | Indirekt |
| | 59 | Ausbaufähigkeit | Indirekt |
| | 60 | Standsicherheit | Indirekt |
| | 61 | Topografie | Direkt |
| | 62 | Verwerfungen | Indirekt |
| | 63 | Vorgelagertes Entwässerungsgebiet | Indirekt |
| | 64 | Festigkeit und Komprimierbarkeit des vorgelagerten Entwässerungsgebiets | Indirekt |
| | 65 | Nähe zu mehrjährigen Bächen oder Flüssen | Indirekt |
| Auslegung Bergeteich | 66 | Abbaumethode | Indirekt |
| | 67 | Zeitplan der Produktion | Indirekt |
| | 68 | Rate der Abraumproduktion | Direkt |
| | 69 | Konfiguration der Abraumlagerung | Indirekt |
| | 70 | Anzahl der Aufstauungen (mehrere vs. eine) | Indirekt |
| | 71 | Größe der Aufschüttung | Indirekt |
| | 72 | Lebensdauer der Aufschüttung | Indirekt |
| | 73 | Höhe des Dammes | Indirekt |
| | 74 | Anfangsdeich | Indirekt |
| | 75 | Zeitplan für die Erhöhung des Dammes (betriebliche Flexibilität, Füllungsgrad) | Indirekt |
| | 76 | Richtung der Dammkrone (upstream, downstream, oder centerline) | Indirekt |
| | 77 | Material für den Dammbau (Erdreich, Bergbauabfälle, zyklonierter Abraum) | Indirekt |
| | 78 | Damm- und Hangstabilität | Indirekt |
| | 79 | Kontrolle der Zonen am Strand | Indirekt |
| | 80 | Anforderungen an die Entwässerung | Indirekt |
| | 81 | Anforderungen an den Umgang mit Wasser | Indirekt |
| | 82 | Überschwemmungs- und Regenwasserabflusskapazität | Indirekt |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | 83 | Wasserbehandlung von externem Abfluss (Gräben, Überlaufrinnen und Deiche) | Indirekt |
| | 84 | Anforderungen an die Sickerwasserkontrolle (Abdichtungen, Barrieren und Rücklaufsysteme) | Indirekt |
| | 85 | Material der Auskleidung | Indirekt |
| | 86 | Dicke der Auskleidung | Indirekt |
| | 87 | Einleitstelle (einzelner Punkt, peripherer Punkt) | Indirekt |
| | 88 | Anforderungen an die Überwachung | Indirekt |
| | 89 | Anforderungen an die Stilllegung | Indirekt |
| | 90 | Alternative Entsorgungstechniken | Indirekt |
| Eigenschaften der Berge | 91 | Rohstoff | Direkt |
| | 92 | ROM-Eigenschaften | Indirekt |
| | 93 | Aufbereitungsmethoden | Indirekt |
| | 94 | Art des Bergematerials (Sande, Schlämme, Ton) | Direkt |
| | 95 | Plastizität | Direkt |
| | 96 | Feste Dichte | Direkt |
| | 97 | Flüssige Dichte | Direkt |
| | 98 | Rheologisches Verhalten | Direkt |
| | 99 | Partikelgröße | Direkt |
| | 100 | Verteilung der Partikelgröße | Direkt |
| | 101 | Spezifisches Gewicht der Partikel | Indirekt |
| | 102 | Durchlässigkeit | Indirekt |
| | 103 | Konsolidierungsrate | Indirekt |
| | 104 | Wasserverbrauch | Indirekt |
| | 105 | pH-Wert | Indirekt |
| | 106 | Salzgehalt | Indirekt |
| | 107 | Verunreinigungen | Indirekt |
| Auslegung Rohr-leitung | 108 | Berge-Produktion (Rohrleitungs-Design) | Direkt |
| | 109 | Anforderungen an die Lagerung von Schlammstößen | Indirekt |
| | 110 | Verlauf der Rohrleitung | Direkt |
| | 111 | Richtlinien und Normen | Indirekt |
| | 112 | Reibungswiderstand der Rohrleitung | Direkt |
| | 113 | Höhenlage der Rohrleitung | Direkt |
| | 114 | Maximal zulässige Druckhöhe | Direkt |
| | 115 | Vorgeschriebene Mindestdruckhöhe | Direkt |
| | 116 | Förderdruck am Endpunkt | Direkt |
| | 117 | Anforderungen an die Pumpe | Direkt |
| | 118 | Betriebsgeschwindigkeit | Direkt |
| | 119 | Größe und Durchmesser der Rohre | Direkt |
| | 120 | Rohrverbindungen | Direkt |
| | 121 | Ausreichende Zugfestigkeit | Indirekt |
| | 122 | Duktilität | Indirekt |
| | 123 | Biegsamkeit | Indirekt |
| | 124 | Korrosionsbeständigkeit und Rohrrauhigkeit | Direkt |
| | 125 | Wanddicke | Indirekt |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | 126 | Installationsumgebung | Indirekt |
| | 127 | Fließeigenschaften (Kontinuitätsgleichung, Bewegungsgleichung und Bernoulli-Gleichung) | Direkt |
| | 128 | Dichte der Aufschlämmung | Direkt |
| | 129 | Auslegungszeitraum (LOM) | Indirekt |
| | 130 | Spitzenwertfaktor | Direkt |
| | 131 | Verlässlichkeit | Direkt |
| | 132 | Betriebsbedingungen und Wartung | Direkt |
| | 133 | Verfügbarkeit von Material | Indirekt |
| | 134 | Drosselstationen für die Energieableitung | Direkt |
| | 135 | Verbindung von Rohrleitungen | Direkt |
| | 136 | Technische Machbarkeit (Auslegung der Leitung) | Direkt |

# Anhang 9: Parameter der Fallstudie

*Tabelle A-8 : Parameter der Fallstudie*

| Typ | Parameter | Einheit | Wert |
|---|---|---|---|
| Daten des Bergwerks und Fluidstroms | Volumenstrom | gpm | 8.500-13.600 |
| | | m³/s | 536-858 |
| | Länge der Rohrleitung | m | 1432 |
| | Fallhöhe zwischen Ein- und Auslass | ft | 564 |
| | | m | 174 |
| | Nettofallhöhe | ft | 470-564 |
| | | m | 110-174 |
| Turbinenspezifikationen | Turbinentyp | - | Pumpenturbine, End-suction, centrifugal |
| | Volumenstrom | l/s | 300-480 |
| | Fallhöhe | m | 110-174 |
| | Max. Leistung je Turbine | kW | 535 |
| Technische Komponenten | Wasserkraftturbinen | - | 2 Pumpenturbinen |
| | Automatisierungspanel | - | Start/Stopp der Turbinen je nach Wasserdurchfluss und Messung Turbinenparameter |
| | Netzkopplungspanel | - | Zur Anbindung ans Betriebsnetz |
| | Leistungsfaktorkorrekturtafel | - | Zur Erreichung des Leistungsfaktors von >95% |
| | Automatische Regelventile | - | 2x Schaltventile, vor jeder Turbine<br>1x Modulationsventil in Parallelleitung<br>1x Schaltventil als Überdruckventil |
| Kosten | Turbinen und Generator | USD | 200.000-280.000 |
| | Automatisierung und Steuerung | USD | 220.000-240.000 |
| | Ventile | USD | 220.000-240.000 |

# Anhang 10: Berechnungen der jährlichen Energieerzeugung

| Verfügbarkeit [%] | Systemleistung [kW] | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 916 | 916 | 916 | 916 | 916 | 916 | 916 | 916 | 916 | 535 |
| 100% | 8.024.160 | 7.622.952 | 7.221.744 | 6.820.536 | 6.419.328 | 6.018.120 | 5.616.912 | 5.215.704 | 4.814.496 | 4.686.600 |
| 95% | 7.622.952 | 7.241.804 | 6.860.657 | 6.479.509 | 6.098.362 | 5.717.214 | 5.336.066 | 4.954.919 | 4.573.771 | 4.452.270 |
| 90% | 7.221.744 | 6.860.657 | 6.499.570 | 6.138.482 | 5.777.395 | 5.416.308 | 5.055.221 | 4.694.134 | 4.333.046 | 4.217.940 |
| 85% | 6.820.536 | 6.479.509 | 6.138.482 | 5.797.456 | 5.456.429 | 5.115.402 | 4.774.375 | 4.433.348 | 4.092.322 | 3.983.610 |
| 80% | 6.419.328 | 6.098.362 | 5.777.395 | 5.456.429 | 5.135.462 | 4.814.496 | 4.493.530 | 4.172.563 | 3.851.597 | 3.749.280 |
| 75% | 6.018.120 | 5.717.214 | 5.416.308 | 5.115.402 | 4.814.496 | 4.513.590 | 4.212.684 | 3.911.778 | 3.610.872 | 3.514.950 |
| 70% | 5.616.912 | 5.336.066 | 5.055.221 | 4.774.375 | 4.493.530 | 4.212.684 | 3.931.838 | 3.650.993 | 3.370.147 | 3.280.620 |
| 65% | 5.215.704 | 4.954.919 | 4.694.134 | 4.433.348 | 4.172.563 | 3.911.778 | 3.650.993 | 3.390.208 | 3.129.422 | 3.046.290 |
| 60% | 4.814.496 | 4.573.771 | 4.333.046 | 4.092.322 | 3.851.597 | 3.610.872 | 3.370.147 | 3.129.422 | 2.888.698 | 2.811.960 |
| 55% | 4.413.288 | 4.192.624 | 3.971.959 | 3.751.295 | 3.530.630 | 3.309.966 | 3.089.302 | 2.868.637 | 2.647.973 | 2.577.630 |
| 50% | 4.012.080 | 3.811.476 | 3.610.872 | 3.410.268 | 3.209.664 | 3.009.060 | 2.808.456 | 2.607.852 | 2.407.248 | 2.343.300 |
| 45% | 3.610.872 | 3.430.328 | 3.249.785 | 3.069.241 | 2.888.698 | 2.708.154 | 2.527.610 | 2.347.067 | 2.166.523 | 2.108.970 |
| 40% | 3.209.664 | 3.049.181 | 2.888.698 | 2.728.214 | 2.567.731 | 2.407.248 | 2.246.765 | 2.086.282 | 1.925.798 | 1.874.640 |
| 35% | 2.808.456 | 2.668.033 | 2.527.610 | 2.387.188 | 2.246.765 | 2.106.342 | 1.965.919 | 1.825.496 | 1.685.074 | 1.640.310 |
| 30% | 2.407.248 | 2.286.886 | 2.166.523 | 2.046.161 | 1.925.798 | 1.805.436 | 1.685.074 | 1.564.711 | 1.444.349 | 1.405.980 |
| 25% | 2.006.040 | 1.905.738 | 1.805.436 | 1.705.134 | 1.604.832 | 1.504.530 | 1.404.228 | 1.303.926 | 1.203.624 | 1.171.650 |
| 20% | 1.604.832 | 1.524.590 | 1.444.349 | 1.364.107 | 1.283.866 | 1.203.624 | 1.123.382 | 1.043.141 | 962.899 | 937.320 |
| 15% | 1.203.624 | 1.143.443 | 1.083.262 | 1.023.080 | 962.899 | 902.718 | 842.537 | 782.356 | 722.174 | 702.990 |
| 10% | 802.416 | 762.295 | 722.174 | 682.054 | 641.933 | 601.812 | 561.691 | 521.570 | 481.450 | 468.660 |
| 5% | 401.208 | 381.148 | 361.087 | 341.027 | 320.966 | 300.906 | 280.846 | 260.785 | 240.725 | 234.330 |
| 0% | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

**Legende: Jährliche Energieerzeugung [kWh/a]**

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8.024.160 | 7.021.140 | 6.018.120 | 5.015.100 | 4.012.080 | 3.009.060 | 2.006.040 | 1.003.020 | - |

*Abbildung A-1: Jährliche Energieerzeugung in Abhängigkeit der durchschnittlichen Systemleistung und der Verfügbarkeit, eigene Darstellung*

## Anhang 11: Aufbau des NPV-Modells und numerische Daten

*Tabelle A-9: Aufbau des NPV-Modells für die Fallstudie, Graue Felder berechnet für den Betrachtungszeitraum der Jahre 0 bis n, eigene Darstellung*

| Kategorie | Subkategorie | Einheit | Jahr t | | | Berechnung |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Einnahmen | Stromproduktion | kWh | | | | Eingabeparameter je Szenario |
| | Cum Strom | kWh | | | | $\sum_{t=0}^{i} Stromproduktion$ |
| | Strompreis | USD/kWh | $t = 0$ | $1..n-1$ | $n$ | $Strompreis_{t=0} * (1 + Inflation)^t$ |
| | Gewinn | USD | | | | $Strompreis_t * Stromproduktion$ |
| | Gewinn Cum | USD | | | | $\sum_{t=0}^{i} Gewinn$ |
| Kosten | CAPEX | USD | | | | $\sum CAPEX_t$ |
| | OPEX | USD | | | | $\sum OPEX_t$ |
| | Kosten Summe | USD | $t = 0$ | $1..n-1$ | $n$ | $\sum OPEX_t + CAPEX_t$ |
| | Kosten Cum | USD | | | | $\sum_{t=0}^{i} Kosten$ |
| Cashflow | | USD | | | | $Gewinn_t - Kosten_t$ |
| Abgezinster Cashflow | | USD | $t = 0$ | $1..n-1$ | $n$ | $Cashflow_t/(1 + Abzinsung)^t$ |
| NPV | | USD | | | | $\sum_{t=0}^{i} Abgezinster\ Cashflow$ |

### Numerische Daten

Die Berechnung der numerischen Werte des NPV-Modells für die Szenarien A, B und C befinden sich im elektronischen Anhang in Form einer Excel-Tabelle. Die Daten sind auf dem beigefügten elektronischen Anhang hinterlegt oder können direkt beim Autor angefragt werden.

# Anhang 12: Verzeichnis des elektronischen Anhangs

**Thematisch relevante Veröffentlichungen und Berichte des Autors:**

**Feldmann Y (2023)** Abschlussbericht CLIENT II-Verbundvorhaben: Smart$H_2$OEnergy – Entwicklung von Konzepten zur Nutzbarmachung des hydroelektrischen Wasserkraftpotenzials von Rohstoffgewinnungsbetrieben. https://doi.org/10.2314/KXP:1876595493

**Feldmann Y, Blauermel G, Roth M, Alapfy B, Hillig T, Lottermoser B (2021)** Hydro-electrical power potentials in the Peruvian mining industry. *International Future Mining Conference*, AusIMM, 6–10 Dezember 2021, Australien.

**Feldmann Y, Blauermel G, Alapfy, B, Hillig T, Lottermoser B (2020)** Developing the hydroelectric power potential of mine sites, Peru: The Smart$H_2$OEnergy Project. *8th International Congress on Water Management and Industrial Processes*, Gecamin, Santiago de Chile.

**Feldmann Y, Blauermel G, Alapfy B, Hillig T, Lottermoser B (2020)** Smart$H_2$OEnergy – Developing the hydroelectrical power potential of Peruvian mine sites, *Abstracts of the First International Conference Mineral Resources for Future Generations (AIMS 2020)*

**Daten der Fallstudie in Kapitel 6:**

(i) Anonymisierte technische Machbarkeitsstudie von Easy Hydro
(ii) Excel-Modell mit Berechnungen der Fallstudie in Kapitel 6