

# Innovative Closure Concepts around the Water-Energy-Nexus in Mining – a Case Study from South Africa

Since the earliest days of extracting and processing minerals, access to both, water and energy, has been indispensable. Using historic and contemporary examples at various scales the paper explores the interdependencies between both resources in the context of mining. For the semi-arid mining nation South Africa water and energy security are currently posing significant challenges as the recent AMD crisis and the ongoing energy shortage illustrate, which both have severe implications for the gold mining industry. Before this background, an innovative concept is presented to address water and energy aspects when closing mines. Termed underground pumped hydro energy storage (UPHES) the concept aims to avert the flooding of depleted mines and associated long-term pollution of water resources by repurposing underground mining infrastructure to generate and store hydro energy.

When applied as a closure option for mines, the concept allows to continue dewatering in a cost-neutral manner as the generated income by far exceeds costs for pumping out surplus ingress water. Through UPHES, mine voids are thus turned from potential environmental liabilities into economic assets improving water and energy security. The feasibility of the concept was investigated for an operational gold mine in the Far West Rand goldfield. Several options were identified ranging from a few Megawatts to well over one Gigawatt power output, with larger projects generally being economically more attractive. By combining the excellent renewable energy potential with the large underground storage capacity gold mining created in over a century, South Africa has a major competitive advantage in emerging global markets for green energy.

# Innovative Stilllegungskonzepte rund um den Wasser-Energie-Nexus im Bergbau – ein Fallbeispiel aus Südafrika

Seit den Anfängen der Gewinnung und Verarbeitung von Mineralen ist der Zugang zu Wasser und Energie unverzichtbar. Anhand historischer und zeitgenössischer Beispiele verschiedener räumlicher Maßstäbe untersucht der Beitrag die Wechselwirkungen zwischen beiden Ressourcen im Kontext des Bergbaus. Für die semiaride Bergbaunation Südafrika stellen sowohl die Wasser- als auch die Energiesicherheit derzeit eine erhebliche Herausforderung dar, wie die kürzliche Grubenwasserkrise und anhaltende Stromsperrungen zeigen, die beide auch erhebliche Auswirkungen auf die heimische Goldbergbauindustrie haben. Vor diesem Hintergrund wird ein innovatives Konzept zur Schließung von Bergwerken vorgestellt, das sowohl Wasser- als auch Energieaspekte berücksichtigt und kostspielige Langzeitaufgaben im nachbergbaulichen Wassermanagement vermeidet. Das als untertägiges Pumpspeicherwerk (UPSW) bezeichnete Konzept zielt darauf ab, vorhandene untertägige Grubeninfrastruktur zur Erzeugung und Speicherung erneuerbarer Energie zu nutzen und damit flutungsbedingte Langzeitbelastungen

von Wasserressourcen mit bergbaubürtigen Schadstoffen zu verhindern. Umgesetzt als Konzept zur Grubenstilllegung ermöglicht ein UPSW eine kostenneutrale Fortsetzung der Wasserhebung, da die erzielten Einnahmen die Kosten für das Abpumpen überschüssigen Zulaufwassers bei weitem übersteigen. Mittels UPSW werden Grubenbaue somit von potentiellen Kontaminationsquellen in werterzeugende Wirtschaftsgüter umgewandelt, die zudem noch sowohl die Wasser- als auch die Energiesicherheit verbessern. Die Machbarkeit des Konzepts wurde für ein aktives Goldbergwerk in der Far West Rand-Region untersucht. Es wurden mehrere Optionen identifiziert, die von wenigen Megawatt bis weit über 1 GW Leistung reichen, wobei größere Projekte in der Regel wirtschaftlich attraktiver sind. Durch die Kombination des hervorragenden Potentials erneuerbarer Energien mit der großen unterirdischen Speicherkapazität, die in über einem Jahrhundert des Goldabbaus geschaffen wurde, verfügt Südafrika über einen erheblichen Wettbewerbsvorteil auf dem entstehenden globalen Markt für grüne Energie.

## 1 The water-energy nexus

### 1.1 On planetary level

The concept of treating water and energy as a nexus problem where both components are inextricably linked to each other – sometimes with food added as a third component – is com-

## 1 Der Wasser-Energie-Nexus

### 1.1 Auf planetarischer Maßstabsebene

Das Konzept, Wasser und Energie als Nexus-Problem zu behandeln, bei dem die Komponenten untrennbar miteinander verbunden sind – manchmal wird Nahrung als dritte Komponente hinzugefügt –

monly applied to better understand complex interrelations relating to human activities like using water for generating energy, e.g., water as cooling agent in thermal power plants, or using energy for providing water, e.g., electricity to pump and treat water. However, the nexus approach also applies to natural systems, like the planetary hydrosphere. By far the biggest share of all solar energy Earth receives – some 85 % of the 170 million GW – is used to evaporate water and power the hydrological cycle that sustains life on earth (1). By transforming liquid water into atmospheric water vapour, the nuclear energy earth receives from the sun in the form of electromagnetic radiation is converted into thermal and then mechanical energy. Clouds and other forms of atmospheric water vapour therefore contain gigantic amounts of potential energy. Via rainfall this energy is transformed into kinetic energy strong enough to eventually erode entire mountain ranges away (1). Any hydropower dam taps into a tiny fraction of this global energy flux. By applying the principle of transforming potential into kinetic energy and vice versa that underlies the global water cycle, hydropower plants can be turned into pumped hydro energy storage (PHES) facilities discussed later in the paper.

For understanding energy-water nexus issues affecting whole countries like South Africa, a planetary view also proves helpful. Being located within the subtropical high-pressure belts where dry descending air from the inner-tropical convergence zone leads to large deserts forming across the globe, like the Kalahari, Namib, Atacama and inner-Australian deserts, South Africa is a water-scarce country with below-world average rainfall and above-average evapotranspiration rates. The very same reason that causes the natural water deficit, namely descending dry air with clear skies and long-sunshine hours, also leads to an above-average input of solar energy. In that sense, the cause of the water problem may well be part of a solution for the energy problem. Surrounded by vast stretches of open ocean, South Africa also has a high wind capacity as well as large tracks of land available for installing wind and solar farms. The interplay between scarce water resources and abundant renewable energy also has implications for current and future mining activities in the country. By using regional examples of historic mining from Germany, recent global mining and deep-level gold mining in South Africa the relevance of the water-energy-nexus for mineral extraction and processing is illustrated highlighting the transformative role technology can play.

## 1.2 In medieval mining

Ensuring uninterrupted access to water and energy is as much a key consideration now as it was centuries ago. In medieval mining water often served a dual purpose. On the one hand, it was used in the metallurgical process (crushing, washing and sorting of ore, cooling of molten metals etc.) and on the other hand, it directly provided the energy driving waterwheels of sophisticated dewatering systems to remove infiltrating water from underground mines, i.e. fighting water with water. These systems not only required superior mechanical skills to build the complex structures underground but also involved advanced surface water management systems with vast networks of tens of kilometre-long low-gradient canals and reservoirs designed to intercept and store run-off from neighbouring catchments. By hydraulically linking the head waters of several watersheds and storing the runoff in dams next to the

dient in der Regel dazu, komplexe Wechselbeziehungen zwischen den Ressourcen im Zusammenhang mit anthropogenen Aktivitäten, wie z. B. der Nutzung von Wasser zur Energieerzeugung, z. B. Kühlmittel, oder dem Energieeinsatz bei der Trinkwasserbereitstellung, z. B. Pumpen, Aufbereitung, zu analysieren. Der Nexus-Ansatz kann jedoch auch auf natürliche Systeme wie die planetarische Hydrosphäre übertragen werden. Der weitaus größte Teil der Sonnenenergie, welche die Erde empfängt – etwa 85 % der 170 Mio. GW – wird zum Verdunsten von Wasser und damit zum Antrieb des globalen Wasserkreislaufs verwendet, der das Leben auf der Erde erhält (1). Durch die Umwandlung von flüssigem Wasser in atmosphärischen Wasserdampf wird die Kernenergie, welche die Erde von der Sonne in Form elektromagnetischer Solarstrahlung erhält, erst in thermische und dann in mechanische Energie umgewandelt. Wolken und andere Formen atmosphärischen Wasserdampfs enthalten daher gigantische Mengen an potentieller Energie. Durch Regen wird diese Energie in kinetische Energie umgewandelt, die stark genug ist, um im Lauf der Zeit ganze Gebirgsketten abzutragen (1). Jedes Wasserkraftwerk erschließt einen winzigen Teil dieses globalen Energieflusses. Durch die Anwendung des Prinzips der Umwandlung von potentieller in kinetische Energie und wieder zurück, das auch dem globalen Wasserkreislauf zugrunde liegt, können solche Wasserkraftwerke in Pumpspeicherkraftwerke (PSW) umgewandelt werden, die später besprochen werden.

Für die Übertragung der Energie-Wasser-Nexusproblematik auf die Maßstabebene von Ländern, wie hier z. B. Südafrika, ist der planetarische Betrachtungsmaßstab ebenfalls hilfreich. Südafrika liegt im südlichen, erdumspannenden subtropischen Hochdruckgürtel, wo trockene, aus der innertropischen Konvergenzzone wieder absteigende Höhenluft zur Bildung großer Wüsten, wie z. B. der Kalahari, Namib, Atacama oder den inneraustralischen Wüsten, führt. Südafrika ist daher ein eher wasserarmes Land mit unter dem Weltdurchschnitt liegenden Niederschlägen und überdurchschnittlichen hohen Verdunstungsverlusten. Derselbe Grund, der das natürliche Wasserdefizit verursacht, nämlich trockene absinkende Luft mit klarem Himmel und vielen Sonnenstunden, führt also auch zu einem überdurchschnittlichen Eintrag von Sonnenenergie. In diesem Sinne könnte die Ursache des Wasserproblems durchaus Teil der Lösung des derzeitigen Energieproblems sein. Umgeben von ausgedehnten offenen Ozeanen verfügt Südafrika zudem auch über eine hohe Windkapazität sowie genügend große Freiflächen für die flächenintensive Installation von Wind- und Solarparks. Das Zusammenspiel zwischen knappen Wasserressourcen und hohem Potential an erneuerbarer Energie beeinflusst auch die aktuellen und künftigen Bergbauaktivitäten im Land.

Anhand von Beispielen des Bergbaus in Vergangenheit und Gegenwart in lokalem, regionalem und globalem Maßstab wird im Folgenden die Bedeutung des Wasser-Energie-Nexus für die Mineralgewinnung und -verarbeitung veranschaulicht und die transformative Rolle hervorgehoben, die Technologie hier spielen kann.

## 1.2 Im mittelalterlichen Bergbau

Die Gewährleistung des ununterbrochenen Zugangs zu Wasser und Energie ist im Bergbau heute genauso wichtig wie vor Hunderten von Jahren. Im mittelalterlichen Bergbau erfüllte Wasser dabei oft einen doppelten Zweck. Einerseits wurde es im metallurgischen Prozess verwendet – zerkleinern, waschen und sortieren von Er-

mines, the limited local water resources of hilly mine sites with small natural catchments were augmented ensuring uninterrupted water supply all year round<sup>1</sup>.

The energy needed for the metallurgical process was mainly extracted from burned wood cut in nearby forests, which often led to deforestation around medieval mines and smelters. Simply burning felled trees was generally not enough to reach the temperatures required for melting metallic ores. To achieve this, in a first step, water had to be removed from the freshly cut trees through pyrolysis, in this case charcoal burning. Again, some energy was required to remove water. By slowly smouldering wood at low oxygen levels in moss-covered heaps of cut wood (kilns) carbon concentrates to the required levels in the resulting charcoal. In the Harz Mountains alone, an estimated 30,000 of such kilns produced charcoal, which at the time accounted for some 50% of the operational cost of smelters. This practice depleted the natural forest to such an extent that charcoal soon had to be imported from neighbouring areas like the Weser Bergland (4, 5). Initially, only charcoal made from high-caloric hard tree species like oaks and beech yielded the needed temperatures. The selective removal of such trees gradually changed the composition of the forest, which soon were dominated by fast-growing conifers that – as an initially rather rare species – were often reserved for the aristocratic landowners and not used as fuel.

This changed at around 1200 AD, some 300 years after mining started in the Harz Mountains, with the introduction of bladders to power smelting fires. The forced influx of oxygen into the fires now also allowed the use of less energy-dense charcoal made from soft conifers like spruce to achieve the needed temperatures. As a faster-growing species, spruce increasingly replaced broad-leaved deciduous trees and soon dominated the Harz Mountains. With some ups and downs over the centuries and non-mining factors also playing a role, spruces are still dominating today (4). Being shallow-rooted trees they are, however, more vulnerable to storms and droughts than deeper-rooted broad-leaved trees. The consequences were recently seen when two consecutive drier-than-normal years resulted in vast patches of spruce dying off since their roots could not follow the dropping groundwater levels. In this way, rippling effects of medieval mining impact today's water-energy nexus resulting in lost resilience against climatic fluctuations and a reduced ability of forests to store climate-neutral energy in the form of wood. It may now even shift the water-energy balance in a rather unexpected way as some seriously suggest restocking deforested areas not with trees but wind turbines instead (6). In view of the pivotal role of forests for the natural water balance this could have significant implications for ensuring long-term water security as well as flood protection.

### 1.3 In global contemporary mining

As mining in many developed countries started to decline once it was no longer needed to fuel industrialisation with coal for steam engines or heavy industries, there appears to be a growing public

zen, abkühlen von Schmelzen usw. – und andererseits lieferte es die Energie für den Antrieb von Wasserrädern komplizierter Systeme zur Hebung von Sumpfungswässern aus untertägigen Bergwerken, wo also sozusagen Wasser mit Wasser bekämpft wurde. Diese sogenannten Wasserkünste erforderten nicht nur hochentwickelte Fähigkeiten, um die dazugehörige untertägige Mechanik zu errichten, sondern auch ein fortschrittliches Wassermanagement bei dem mit Hilfe ausgedehnter Netzwerke aus Teichen und kilometerlangen Kanälen geringsten Gefälles der Oberflächenabfluss benachbarter Einzugsgebiete angezapft, gespeichert und zu den Bergwerken umgeleitet wurde. Durch die hydraulische Verbindung der Quellbereiche mehrerer Einzugsgebiete und die Speicherung des Oberflächenabflusses in den sogenannten Kunstteichen wurden die begrenzten lokalen Wasserressourcen der oft hochgelegenen und daher wasserarmen Gruben erweitert und eine ganzjährige unterbrechungsfreie Wasserversorgung gewährleistet<sup>1</sup>.

Die für den metallurgischen Prozess benötigte Energie wurde dabei hauptsächlich durch die Verbrennung von Holz aus nahegelegenen Wäldern gewonnen, was häufig zur Abholzung Letzterer rund um mittelalterliche Bergwerke und Schmelzhütten führte. Das bloße Verbrennen gefällter Bäume reichte im Allgemeinen aber nicht aus, um auf die zum Schmelzen von Metallerzen erforderlichen Temperaturen zu kommen. Um diese zu erreichen, musste in einem ersten Schritt dem frischen Holz durch Pyrolyse, hier Verkohlung, mittels Einsatz von Energie Wasser entzogen werden. Durch langsames Schwelen des Holzes bei niedrigem Sauerstoffgehalt in moosbedeckten Holzhaufen (Köhlermeilern) wird Kohlenstoff in der resultierenden Holzkohle schließlich bis auf das erforderliche Niveau konzentriert. Allein im Harz produzierten schätzungsweise 30.000 solcher Köhler-Meiler Holzkohle, die damals etwa 50% der Betriebskosten der Schmelzhütten ausmachte. Dies dezimierte den natürlichen Wald so stark, dass Holzkohle bald aus benachbarten Gebieten wie dem Weserbergland importiert werden musste (4, 5). Zunächst lieferte nur Holzkohle aus kalorienreichen Hartholzarten wie Eiche und Buche die nötigen Temperaturen. Durch die selektive Entnahme solcher Bäume veränderte sich nach und nach die Zusammensetzung des Walds, der bald von schnell wachsenden Nadelbäumen dominiert wurde, die als zunächst eher seltene Art oft den aristokratischen Grundbesitzern vorbehalten waren und vorher nicht als Brennstoff genutzt wurden.

Dies änderte sich um 1200 n. Chr., etwa 300 Jahre nach Beginn des Bergbaus im Harz, mit der Einführung von Blasebälgen zum Anfachen von Schmelzfeuern. Durch die erhöhte Zufuhr von Sauerstoff in die Schmelzfeuer konnten nun auch weniger energiedichte Holzkohle aus weichen Nadelhölzern wie Fichten verwendet und trotzdem die benötigten hohen Temperaturen erreicht werden. Als schneller wachsende Art verdrängte die Fichte zunehmend die Laubbäume und dominierte bald den gesamten Waldbestand im Harz. Trotz einiger Veränderungen im Lauf der Jahrhunderte auch durch nicht-bergbauliche Faktoren, wie z. B. kommerzielle Holzwirtschaft, spielt die Fichte bis heute eine dominierende Rolle (4). Als flachwurzelnder Baum ist sie jedoch anfälliger für Stürme und

<sup>1</sup> Remains of such water systems are found in the lower (2) and upper Harz-Mountains, with the latter described by Teicke (3) as worldwide largest pre-industrial energy supply system, now a UNESCO World Heritage site.

<sup>1</sup> Überreste solcher Wassersysteme finden sich im Unter- (2) und Oberharz, wobei letzterer von Teicke (3) als weltweit größtes vorindustrielles Energieversorgungssystem beschrieben wird, das heute zum UNESCO-Weltkulturerbe gehört.

perception that mining with all its noise and dirt should be something of the past and best be phased out as soon as possible to protect the environment. Consequently, Europe with its high density of developed nations, was the only continent where, between 2000 and 2019, mineral extraction declined by almost 28%, while all other continents displayed increases ranging from 13 to 145% (7). This trend is also illustrated by a drop in the number of students in mining and metallurgy even in classical mining nations like Australia, which recorded a decline in the number relevant degrees by 40% over the past eight years (8). This happens at a time when mining needs to be significantly expanded.

After two decades of steeply increasing global mineral extraction since 1990, mainly in response to the growing resource needs of the expanding Chinese economy, demand for minerals is still increasing as the global transformation towards decarbonised energy generation, e-mobility and digitalisation requires significantly more mineral resources per output unit than any technology ever before (9, 10). If the current rate of growth in mineral extraction continues for the next ten years, by about 2035, humans will have mined more minerals in the preceding two decades than in all human history before. As the energy needed for mining and milling already accounts for some 10% of the total global use there are concerns that energy might ultimately become the limiting factor, rather than geological availability of critical minerals (11). The energy requirements are set to rise even further as not only more minerals are needed but these minerals are more difficult and costly to extract as the richest and easiest deposits have already been exploited. Future mining will need to access deposits of lower grades, at greater depths and in more remote locations driving up operational costs as well as water and energy consumption and associated volumes of generated mine waste such as tailings.

As some 80% of all mining is currently taking place in water-stressed regions of the Global South, which produces most minerals used worldwide, this is likely to exacerbate the already fierce competition for limited local water resources at many mining sites (12, 13). Water is commonly among the most affected natural resources including reduced availability through large-scale draw-down of groundwater tables as well as contamination by toxic substances often continuing for decades or even centuries after mines closed (14, 15). In the USA alone, tens of thousands of kilometres of rivers are polluted by contaminated drainage emanating from abandoned mines. In recognition of the severity of such impacts the US-EPA declared mine-waste-related environmental degradation as the most severe global problem second only to climate change and ozone depletion (16).

Given the poor experiences with past mining activities, public resistance to new or expanding mining projects is increasing even in communities desperately needing new jobs. Withholding what is termed the "social license to operate" consequently was, for the past couple of years, among the highest business risks reported by major mining companies (17). Meeting the ESG-criteria which investors recently introduced to address these concerns and increase public acceptance of the much-needed expansion of mineral resource extraction is now a prerequisite for mining companies to access required capital of investors. In addition to ensuring fair working conditions and economic prosperity of min-

Dürren als Laubbäume. Die Folgen davon wurden kürzlich sichtbar, als zwei aufeinanderfolgende Trockenjahre zum Absterben großer Fichtenflächen führten, da ihre Wurzeln dem sinkenden Grundwasserspiegel nicht folgen konnten. Auf diese Weise wirkt sich der mittelalterliche Bergbau indirekt auf den derzeitigen Wasser-Energie-Haushalt des Walds aus und verringerte sowohl dessen Widerstandsfähigkeit gegenüber Klimaschwankungen, als auch seinen Fähigkeit, klimaneutrale Energie in Form von Holz zu speichern. Darüber hinaus könnte dies aber auch das Wasser-Energie-Gleichgewicht auf eher unerwartete Weise beeinflussen, da ernsthaft vorgeschlagen wurde, entwaldete Gebiete nicht wieder mit Bäumen, sondern mit Windkraftanlagen aufzustocken (6). Angesichts der zentralen Rolle von Wäldern für den Landschaftswasserhaushalt wäre dies möglicherweise ein erheblicher Eingriff in die langfristige Sicherstellung der Wasserversorgung und den Hochwasserschutz.

### 1.3 Im globalen Bergbau der Gegenwart

Seitdem der Bergbau in vielen hochentwickelten, wohlhabenden Ländern nicht mehr benötigt wurde, um die Industrialisierung mit Kohle für Dampfmaschinen oder die Schwerindustrie voranzutreiben, scheint sich zunehmend die Wahrnehmung zu verbreiten, dass Bergbau mit all seinem Lärm und Schmutz der Vergangenheit angehören und am besten ganz eingestellt werden sollte. Folglich war das wohlhabende Europa der einzige Kontinent, auf dem die Mineralgewinnung zwischen 2000 und 2019 um fast 28% zurückging, während alle anderen Kontinente Zuwächse zwischen 13 und 145% verzeichneten (7). Ein weiterer Indikator dieser Entwicklung ist der kontinuierliche Rückgang der Studierendenzahlen in den Montanwissenschaften selbst in klassischen Bergbauländern wie Australien, wo die Anzahl relevanter Abschlüsse in den letzten acht Jahren um 40% schrumpfte (8). Diese fällt in eine Zeit, in der mehr Bergbau benötigt wird als je zuvor.

Nach zwei Jahrzehnten weltweit stark wachsenden Rohstoffabbaus seit 1990, hauptsächlich in Folge des steigenden Ressourcenbedarfs der expandierenden chinesischen Wirtschaft, steigt die Nachfrage nach mineralischen Rohstoffen gegenwärtig sogar noch stärker, getrieben durch den globalen Wandel hin zu kohlenstoffarmer Energieerzeugung, E-Mobilität und Digitalisierung, der deutlich mehr mineralische Rohstoffe erfordert als frühere Technologien (9, 10). Wenn die derzeitige Wachstumsrate der Mineralgewinnung in den nächsten zehn Jahren anhält, wird die Menschheit bis 2035 in den dann vergangenen zwei Jahrzehnten mehr Rohstoffe abgebaut haben, als in ihrer gesamten Geschichte zuvor. Dabei macht der Energiebedarf für den Bergbau einschließlich des Aufmahlens von Erzen und Gestein mittlerweile schon etwa 10% des weltweiten Gesamtverbrauchs aus. Daher gibt es Befürchtungen, dass nicht knappe geologische Vorräte, sondern die zu Abbau und Verarbeitung nötige Energie der limitierende Faktor der Transformation sein könnte (11). Dabei wird der Energiebedarf noch weiter steigen, da nicht nur mehr Rohstoffe benötigt werden, sondern auch deren Gewinnung immer aufwendiger ist, weil die ergiebigsten und einfachsten Lagerstätten in der Regel bereits ausgebeutet wurden. Zukünftiger Bergbau muss daher auf Lagerstätten mit geringerem Erzgehalt, in größeren Teufen und an entlegeneren Standorten zugreifen, was die Betriebskosten sowie den Wasser- und Energieverbrauch und die damit verbundenen Mengen an anfallenden Bergemassen und Rückständen in die Höhe treibt.





Fig. 1. Uncontrolled decanting AMD at a flooded shaft in the Western Basin (2011). // Bild 1. Saures Grubenwasser tritt unkontrolliert aus einem gefluteten Schacht im Western Basin aus (2011). Photo/Foto: Winde

ing communities after closure this also includes decarbonisation of their energy base, increasing water efficiency and adhering to circular economy principles.

#### 1.4 On national level: South Africa

Mining impacts on water resources in South Africa are perhaps best illustrated by the AMD<sup>2</sup>-crisis from 2002 to 2012. Faced with the enormous cost of pumping water from ultra-deep shafts to keep underground mine workings dry, many marginal mines eventually stopped dewatering altogether, which increased pumping volumes in hydraulically linked neighbouring mines that soon also had to close as a consequence. At the end of this domino process whole mining basins – as interconnected void systems are called – were flooded with highly polluted mine water (AMD) that eventually decanted into rivers and streams, wiping out entire aquatic ecosystems and even threatening the geotechnical stability of urban infrastructure (18) (Figures 1, 2, 3).



Fig. 2. AMD in the Western Basin leading to iron crusts forming on vegetation in the receiving environment (2012). Bild 2. Austretendes saures Grubenwasser führt zur Bildung von Eisenkrusten auf der Vegetation (Western Basin, 2012). Photo/Foto: Winde

Da derzeit etwa 80% des gesamten Bergbaus in wasserarmen Regionen des globalen Südens stattfinden, wo die überwiegende Mehrheit der weltweit verwendeten mineralischen Rohstoffe extrahiert wird, dürfte dies den ohnehin schon harten Wettbewerb um begrenzte lokale Wasserressourcen an vielen Bergbaustandorten noch zusätzlich verschärfen (12, 13). Dies gilt insbesondere für Wasser, das häufig zu den am stärksten vom Bergbau betroffenen Ressourcen zählt. Zu typischen Auswirkungen gehören verringerte Wasserverfügbarkeit für lokale Kommunen durch großflächige Grundwasserabsenkungen sowie Wasserbelastung mit giftigen Substanzen, die oft Jahrzehnte oder sogar Jahrhunderte nach Bergbauende anhält (14, 15). Allein in den USA sind tausende Flusskilometer durch bergbauliche Wässer kontaminiert. Angesichts des Umfangs dieser Belastungen erklärte die US-EPA die durch bergbauliche Rückstände verursachte Umweltzerstörung zum schwerwiegendsten globalen Problem, nach Klimawandel und Ozonabbau (16).

Aufgrund schlechter Erfahrungen mit früheren Bergbauaktivitäten nimmt der öffentliche Widerstand gegen neue oder expandierende Bergbauprojekte nun selbst auch in Kommunen zu, die dringend neue Arbeitsplätze benötigen. Die Verweigerung der sogenannten sozialen Betriebserlaubnis wird seit einigen Jahren von großen Bergbauunternehmen als eines der größten Geschäftsrisiken angesehen (17). Die Erfüllung der ESG-Kriterien, die Investoren kürzlich eingeführt haben, um diese Missstände zu beseitigen und die öffentliche Akzeptanz für die dringend benötigte Ausweitung der Rohstoffgewinnung zu erhöhen, ist mittlerweile eine unabdingbare Voraussetzung dafür, Zugang zu erforderlichem Kapital zu erhalten. Neben der Gewährleistung fairer und sicherer Arbeitsbedingungen und des wirtschaftlichen Wohlstands der Bergbaugemeinden nach Einstellung des Abbaus, gehören dazu auch die Dekarbonisierung der Energieversorgung der Bergbauunternehmen, die Steigerung der Wassereffizienz und die Übernahme von Prinzipien einer abfallfreien Kreislaufwirtschaft.

#### 1.4 Auf nationaler Ebene: Bergbaunation Südafrika

Die Auswirkungen des Bergbaus auf die Wasserressourcen in Südafrika lassen sich sehr gut an der AMD<sup>2</sup>-Krise von 2002 bis 2012



<sup>2</sup> AMD – Acid mine drainage

<sup>2</sup> Acid mine drainage: saure Bergbauwässer





Fig. 3. AMD from flooded deep level gold mines in the Eastern Basin (top, 2009) and the Western basin (bottom, 2012).

Bild 3. Saure Grubenwässer aus gefluteten Bergwerken des Goldtiefbergbaus (oben: Eastern Basin, 2009; unten: Western Basin, 2012).

Photo/Foto: Winde

With electricity cost as the root cause, the AMD-water crisis, was essentially an energy issue. Following recommendations of the governmental Expert Team on AMD, a pump-and-treat approach was eventually adopted by Government aimed at keeping water levels in flooded mine voids below vulnerable aquifers (termed environmental critical level, ECL) and neutralising the pumped water in high-density sludge plants through liming (19). The neutralised water is discharged into nearby streams still containing most of the high sulphate levels as well as toxic metals and radionuclides. Pumping and treating a total of some 130 MI/d across all three mining basins in and around Johannesburg this approach also generates significant amounts of waste in the form of toxic sludge (20). After having exhausted storage space on adjacent slim dams the sludge is now pumped back into the very same void from which the mine water is extracted increasing pumping volumes and worsening its quality. As nearly all affected streams eventually flow into the Vaal River, frequent releases of clean water from Vaal Dam<sup>3</sup> are needed to lower salt levels and render the river water usable for large downstream irrigation schemes such as

<sup>3</sup> Located upstream of the mining area and fed by clean (and expensive) water imported from Lesotho.

veranschaulichen. Angesichts der enormen Kosten für das Pumpen von Wasser aus extrem tiefen Grubengebäuden stellten viele marginal-profitable Bergwerke schließlich ihre Wasserhaltung ein und die dazugehörigen Pumpen ab. Dies führt wiederum häufig zum Anstieg der zu pumpenden Wassermengen in benachbarten Gruben, deren Weiterbetrieb dadurch ebenfalls gefährdet wird. Am Ende dieses Dominanzprozesses wurden ganze Mining Basins – wie die miteinander verbundenen Hohlräume in Südafrika genannt werden – mit stark kontaminiertem Wasser geflutet, welches schließlich in Flüsse und Bäche überlief und dabei ganze aquatische Ökosysteme auslöschte sowie die Standsicherheit städtischer Infrastruktur gefährdete (18) (Bilder 1, 2, 3).

Da letztlich hohe Stromkosten für die unkontrollierte Flutung der Gruben verantwortlich waren, ist die AMD-bedingte Wasserkrise im Wesentlichen ein Energieproblem. Den Empfehlungen des AMD-Expertenteams der Regierung folgend, wurde schließlich ein Pumpen-und-Behandeln-Ansatz eingeführt, der darauf abzielt, den Wasserstand in überfluteten Grubenhohlräumen unterhalb gefährdeter Grundwasserleiter auf dem sogenannten umweltkritischen Niveau (ECL) zu halten und das abgepumpte Wasser mittels Kalkung zu neutralisieren (19). Das neutralisierte Wasser, das noch immer hohe Konzentrationen an Sulfat sowie giftigen Metallen und Radionukliden aufweist, wird in nahegelegene Bäche eingeleitet. Durch das Pumpen und Aufbereiten von insgesamt etwa 130 MI/d in und um Johannesburg werden erhebliche Mengen an Abfall in Form von giftigem Schlamm generiert (20). Nachdem der Deponieraum auf den angrenzenden Tailingshalden erschöpft wurde, wird der Schlamm nun in denselben Grubenraum zurückgepumpt, aus dem das saure Grubenwasser abgepumpt wird. Dies erhöht sowohl die Pumpmengen als auch den Belastungsgrad des gehobenen Grubenwassers. Da fast alle betroffenen Bäche schließlich in den Vaal münden, ist ein regelmäßiges Ablassen von sauberem Wasser aus dem Vaal-Staudamm<sup>3</sup> erforderlich, um den Salzgehalt im stromabwärts liegenden Flußabschnitt zu senken und das Flusswasser für große weiter flussabwärts gelegene Bewässerungsflächen, wie das Vaal-Hartz System, nutzbar zu machen (21). Mit 10 Mrd. R<sup>4</sup>, die das Finanzministerium im Jahr 2014 allein für die „unmittelbare und kurzfristige“ AMD-Behandlung bewilligt hat, stellt die nachbergbauliche Wasserbewirtschaftung eine ganz erhebliche wirtschaftliche Belastung für den südafrikanischen Staat dar (20). Dies insbesondere, da kein Ende der aufwendigen Wasserbehandlung in Sicht ist und, wie im kürzlich stillgelegten Steinkohlenbergbau des Ruhrgebiets im westlichen Deutschland, eine Wasseraufbereitung möglicherweise auf Dauer erforderlich sein wird<sup>5</sup>. Da sowohl die knappen Wasserressourcen weiter durch die nur unzureichend behandelten Abwässer kontaminiert und zudem dafür erhebliche Energiemengen verbraucht werden, verschärft der aktuelle Lösungsansatz die bestehende Wasser- und Energieknappheit. Gleichzeitig verzeichnet das staatliche Rand Water Board als wichtigster Wasserversorger der Region ein Defizit von 396 Mio. l/d<sup>6</sup> (22). Bei Übertragen dieses Szenarios auf noch aktive Goldbergbauregionen, wo derzeit deutlich größere Wassermengen

<sup>3</sup> Liegt stromaufwärts des Bergbaugebiets und wird mit sauberem (und teurem) Wasser gespeist, das aus Lesotho importiert wird.

<sup>4</sup> Entsprech ca. 680 Mio. € zu dieser Zeit.

<sup>5</sup> <https://www.rag-stiftung.de/ewigkeitsaufgaben>

<sup>6</sup> Dies entspricht ca. 9% der Gesamtversorgungsmenge.

Vaal-Hartz (21). With 10 bn R<sup>4</sup> being allocated by treasury in 2014 to the “immediate and short-term” AMD-treatment, post-closure mine water management places a significant economic burden on the South African state (20). This in particular as there is no end in sight and, like in the recently closed hard-coal mining area of the Ruhr area in Germany, water management may be required in perpetuity<sup>5</sup>. By still polluting scarce water resources and using significant amounts of energy for the continuous pumping of water from depth, the current approach to managing AMD exacerbates existing water and energy shortages. At the same time, the state-owned Rand Water Board as the main water utility in the region reports a shortfall of 396 Ml/d<sup>6</sup> (22). If similar scenarios were to play out in the still active goldfields where even higher volumes are pumped, it could triple the already prohibitive mine water management costs currently incurred by Government.

On the energy side, South Africa has been in crisis mode since 2008 when the state-owned utility Eskom first failed to meet the domestic peak demand. Since then, rolling power cuts of increasing frequency and duration are scheduled (termed load shedding) to prevent the national power grid from collapsing. The extent of load shedding, which is measured in stages, recently reached such levels that Government declared a state of disaster (23). The energy crisis, in turn, also caused a water crisis in the densely populated Gauteng Province as electrical pumps could not be operated for long enough to replenish reservoirs pressure-feeding the urban water reticulation system (24).

## 1.5 On industry level: South African gold mining

For long periods in the history of South Africa, gold mining was the backbone of the economy initiating and driving urbanisation, modernisation and industrialisation. Consequently, gold mining regions are today among the most densely populated and industrialised areas in the country. After outcropping gold deposits were discovered in 1886 at a farm that later grew into metropolitan Johannesburg it was already ten years later that all near-surface resources were exhausted and technologically more demanding underground mining commenced<sup>7</sup>. After well over a century many mines are now closed or approaching the end of life with entire goldfields like the West Rand, Central Rand and East Rand no longer being actively mined. Mines do not always close because ore reserves are fully exhausted but often due to steeply rising costs of accessing remaining deposits at ever greater depths.

### 1.5.1 Energy and water

It is this extraordinary depth that renders underground gold mines extremely energy intensive. With rock face temperature at bottom levels reaching up to 60 °C, fresh air for ventilating the mine workings needs to be cooled down using large and energy-intensive underground ice plants. The largest share of the costs, however, often relates to the continuous pumping out of ingress water back to the

gepumpt werden, würden sich die ohnehin schon hohen Kosten nahezu verdreifachen.

Energieseitig befindet sich Südafrika seit 2008 im Krisenmodus, als es der staatliche Energieversorger Eskom erstmals nicht mehr schaffte, den Spitzenlastbedarf im Land zu decken. Seitdem werden fortlaufende Stromabschaltungen mit zunehmender Häufigkeit und Dauer vorgenommen (sogenanntes load shedding – Lastabwurf), um einen Zusammenbruch des nationalen Stromnetzes zu verhindern. Die Lastabwürfe, die in Stufen gemessen werden, erreichten kürzlich ein solches Ausmaß, dass die Regierung vorübergehend den Katastrophenzustand ausrief (23). Die Energiekrise führte zudem zu lokalen Wasserkrisen in der dicht besiedelten Provinz Gauteng, da aufgrund der häufigen Stromsperrungen elektrische Pumpen nicht lange genug betrieben werden konnten, um Druckbehälter der städtischen Wasserversorgung wieder aufzufüllen (24).

## 1.5 Auf industrieller Ebene: Im südafrikanischen Goldbergbau

Über lange Zeiträume in der Geschichte Südafrikas war der Goldbergbau das Rückgrat der Wirtschaft der außerdem auch die Urbanisierung, Modernisierung und Industrialisierung des Landes vorantrieb. Nachdem austreichendes Golderz 1886 auf einer Farm entdeckt wurde, die sich später zur Millionenmetropole Johannesburg entwickelte, waren die oberflächennahen Goldvorkommen bereits nach zehn Jahren abgebaut und der technologisch anspruchsvollere, untertägige Abbau begann<sup>7</sup>. Nach weit über einem Jahrhundert sind nun aber viele Bergwerke geschlossen oder stehen kurz vor dem Produktionsende und ganze Abbauregionen wie der West-, Central- und East Rand wurden bereits stillgelegt. Dabei werden Bergwerke nicht immer geschlossen, weil Erzreserven vollständig erschöpft wären, sondern oft deshalb, weil die Kosten für den Zugang zu verbleibenden, tieferen Lagerstätten mit größerer Teufe stark ansteigen.

### 1.5.1 Energie und Wasser

Es ist die außergewöhnliche Teufe, welche die Bergwerke äußerst energieintensiv macht. Da die Temperatur der Gesteinsschichten im Grubentiefsten bis zu 60 °C beträgt, müssen die Frischwetter zur Belüftung der Bergwerksanlagen mit Hilfe energieintensiver, unterirdischer Eisanlagen gekühlt werden. Der größte Teil der Kosten entfällt häufig jedoch auf das kontinuierliche Herauspumpen eindringenden Kluftwassers zurück an die Oberfläche, entgegen einer mit mehreren Tausend Metern auflastenden Wassersäule. Dies gilt besonders für sogenannte wet mines, die unterhalb großer Karstgrundwasserleiter im Far West Rand- und KOSH<sup>8</sup>-Gebiet operieren und Zutrittsmengen von bis zu 100 Ml/d<sup>9</sup> pro Bergwerk aufweisen. Da die Strompreise im Zeitraum von 2007 bis 2022 um 653% gestiegen sind<sup>10</sup>, stellt das energieintensive Pumpen ein wachsendes Risiko für die ohnehin kaum noch rentablen Bergwerke dar (25, 26).

<sup>7</sup> Dies führte zur Konsolidierung vieler kleinerer Bergwerke zu größeren Gesellschaften um das für den untertägigen Abbau erforderliche Kapital zu generieren. Das Wort „Deep“ (tief) im Namen vieler neugeformter Unternehmen wie z.B. Durban Roodepoort Deep (DRD) ist ein Hinweis auf diese Veränderung.

<sup>8</sup> Klerksdorp-Orkney-Stilfontein-Hartebeesfontein, auch als Klerksdorp Goldfield bekannt

<sup>9</sup> Megaliter pro Tag = 4.166 m<sup>3</sup>/h

<sup>10</sup> Im Vergleich zur durchschnittlichen Inflationsrate von 129% im gleichen Zeitraum

<sup>4</sup> Equating 680 M € at the time.

<sup>5</sup> <https://www.rag-stiftung.de/ewigkeitsaufgaben>

<sup>6</sup> Megalitre per day; amounting to 9% of the total supply.

<sup>7</sup> That led to a consolidation of many smaller mines into large ones to pool capital resources required for accessing deeper ore. The word “deep” in many newly formed mining companies like Durban Roodepoort Deep (DRD) is reminder of this shift.

surface over several thousands of meters of hydraulic head. Ingress volumes are particularly high in so-called wet mines operating below large dolomitic karst aquifers in the Far West Rand and KOSH<sup>8</sup> area where (average) ingress rates of up 100 Ml/d (4,166 m<sup>3</sup>/h) per mine are found. As the electricity tariffs increased from 2007 to 2022 by 653%<sup>9</sup> pumping-related electricity costs now pose a significant risk to many of the marginally profitable mines (25, 26). The economic pressure is even higher for mines with closed shafts that no longer yield any revenue but continue adding significant costs for ongoing dewatering. Furthermore, the frequent load shedding by Eskom resulted in significant production losses and necessitated investments in expensive back-up systems such as diesel generators. Being important customers of Eskom mines may be preferentially treated and are somewhat less affected by load shedding than others. Yet, they still suffer from regular limitations of available energy termed load curtailments adversely impacting on total output and productivity.

### 1.5.2 Illegal mining

On top of these challenges, there is now another threat emerging for South African gold mines in the form of illegal miners. Locally called “zama zamas”, these miners originally only targeted closed mines where remaining reefs were mined using manual tools and simple ropes to access abandoned shafts. Over the last decade or so, increasingly also closed shafts of operating mines are affected while the number of often heavily armed illegal miners grew steadily resulting in turf wars of rivaling gangs and open shoot outs with mine security and police. It is estimated that currently about 30,000 illegal miners with close ties to international organised crime syndicates are operating in South Africa producing gold with a total value of 14 bn R that is mainly sold in the United Arab Emirates and Switzerland (27). The former mining town of Welkom in the Free State Province, once praised as a designer urban role model in the Witwatersrand goldfields, is now run by competing syndicates of illegal miners controlling nearly all aspects of the municipal economy (28).

For illegal miners, too, the water-energy nexus is of crucial importance. During the severe drought in 2016, it became apparent how excessive their water use is when zama zamas intercepted water pipes and diverted canals to tap into water needed to extract gold from mined rock<sup>10</sup>. In addition, cable theft and illegal electricity connections often result in unexpected power interruptions with associated risks for legal miners being trapped underground (27). The fact that illegal mining requires significant geological and metallurgical expertise suggests that former miners with local knowledge are involved. This again, points to another ripple effect from the past when gold mines relied on cheap black manual labour provided by the notorious migrant labour system. It is the dire economic circumstances resulting from inadequate pay and the absence of alternative jobs among rampant unemployment that force former miners to now risk their lives in the dangerous, yet highly lucrative, illegal mining.

<sup>8</sup> Klerksdorp-Orkney-Stilfontein-Hartebeesfontein (also known as Klerksdorp goldfield)

<sup>9</sup> Compared to the average inflation rate of 129% over the same period.

<sup>10</sup> This is commonly done through amalgamation with (toxic) mercury that subsequently contaminates nearby streams and groundwater.

Noch größer ist der wirtschaftliche Druck bei Bergwerken mit schon geschlossenen Schächten, die weiterhin aktiv entwässert werden, um benachbarte Gruben vor Wassereintrüben zu schützen, da die anfallenden Kosten nicht mehr durch Goldproduktion gedeckt werden. Darüber hinaus führen die häufigen Lastabwürfe bei Eskom zu erheblichen Produktionsausfällen und erforderlichen Investitionen in Backup-Systeme wie Dieselgeneratoren. Als wichtige Kunden von Eskom werden die Goldbergwerke zwar oft bevorzugt behandelt und sind weniger davon betroffen als andere Kunden, leiden jedoch dennoch erheblich unter regelmäßigen Einschränkungen der verfügbaren Energie durch sogenannte load curtailments (Lastkürzungen).

### 1.5.2 Illegaler Bergbau

Zusätzlich zu diesen Herausforderungen zeichnet sich nun eine weitere Bedrohung ab, die sich auf die Rentabilität südafrikanischer Goldbergwerke auswirkt: illegale Bergleute. Diese „Zama Zamas“ genannten Bergleute zielten ursprünglich nur auf geschlossene Bergwerke, in die sie sich abseilten und verbleibende Erzgänge manuell abbauten. Im Lauf des letzten Jahrzehnts dehnten sich die Aktivitäten auch auf stillgelegte Schächte noch aktiver Bergwerke aus. Gleichzeitig wuchs die Zahl der oft schwer bewaffneten illegalen Bergleute stetig, was zu Revierkämpfen rivalisierender Banden und offenen Schießereien mit Sicherheitskräften der Bergwerksunternehmen und der Polizei führte. Schätzungen zufolge sind derzeit etwa 30.000 illegale Bergleute mit engen Verbindungen zu internationalen Syndikaten der organisierten Kriminalität in Südafrika tätig und produzieren Gold im Gesamtwert von 14 Mrd. R, das hauptsächlich in den Vereinigten Arabischen Emiraten und der Schweiz verkauft wird (27). Die frühere Bergbaustadt Welkom in der Free State Province, die einst als Vorzeigestadt im Zentrum des reichsten Goldabbaugebiets der Erde von Goldbergwerken gegründet wurde, wird jetzt von rivalisierenden Syndikaten illegaler Bergleute beherrscht, die fast alle Bereiche der kommunalen Wirtschaft kontrollieren (28).

Auch für den illegalen Bergbau ist der Wasser-Energie-Nexus von entscheidender Bedeutung. Während der Dürre von 2016 wurde deutlich, wie übermäßig der Wasserverbrauch der Zama Zamas für die Goldgewinnung<sup>11</sup> ist, als Wasserleitungen und ganze Kanäle angezapft wurden. Darüber hinaus führen Kabeldiebstahl und illegale Stromanschlüsse häufig zu unerwarteten Stromausfällen mit entsprechenden Risiken für legale Bergleute unter Tage. Die Tatsache, dass illegaler Bergbau erhebliche geologische und metallurgische Fachkenntnisse erfordert, lässt darauf schließen, dass ehemalige Bergleute mit Ortskenntnissen beteiligt sind. Auch hier handelt es sich also um Nachwirkungen der Vergangenheit, als die Goldbergwerksbesitzer auf billig importierte schwarze Arbeitskräfte setzten, die durch das berüchtigte System der Wanderarbeiter, als einem Vorläufer des Apartheidsystems, zentral bereitgestellt wurden. Es sind die wirtschaftlichen Missstände, die sich aus schlechter Bezahlung und fehlenden Einkommensalternativen ergeben, die ehemalige Bergleute nun dazu zwingen, ihr Leben im gefährlichen, allerdings auch äußerst lukrativen, illegalen Bergbau zu riskieren.

<sup>11</sup> Dies geschieht üblicherweise durch Amalgamierung mit (giftigem) Quecksilber, das anschließend benachbarte Bäche oder das Grundwasser kontaminiert.



### 1.5.3 Environmental, social and governance (ESG) standards

Following the introduction of increasingly stringent ESG-criteria by investors and shareholders, mines are additionally exposed to economic and reputational risks by not meeting shareholder demands for decarbonising their operations given that some 90 % of Eskom's energy is coal-based. While some mines originally considered buying coal mines and building their own coal power plants to decouple from Eskom (29), this is now no longer an option. Instead, investments are redirected towards renewable energy alternatives, with most mines aiming for climate neutrality in a couple of years (30). With natural capacity factors for solar and wind facilities being double to triple of those in Germany, South Africa offers an excellent potential for renewable energy. Consequently many mines are now building their own PV-plants and consider wheeling<sup>11</sup> wind power from remote coastal locations. This is aligned with Government policy now aiming to add 20 GW of renewable energy provided by Independent Power Producers (IPP) by 2030<sup>12</sup>. To render the solar and wind energy reliably dispatchable ways must be found to store the intermittent input. Potential means of creating large-scale energy storage facilities that also address energy and water challenges are explored in the following section.

## 2 Underground pumped hydro-energy storage (UPHES)

### 2.1 Blue batteries for green energy

The idea of storing electricity by pumping water to a higher reservoir when cheap energy is available in order to recover it by running the water back into the lower reservoir via a turbine and sell it at a higher price during high-demand periods is well over 100 years old. PHEs is thus a reliable and mature technology with currently 136 GW accounting for 94 % of the total global energy storage capacity (31). Given the growing share of renewable energy in the total energy mix and the rapidly rising need for adequate storage capacity, China, e. g., plans to double its pumped storage capacity to 65 GW by 2025 and, in January 2022, commissioned the world's largest PHEs in Hebei Province producing 3.6 GW (32). In contrast to metal-based batteries, pumped storage does not require large amounts of critical and often toxic materials and also has a much longer lifespan, resulting in an overall smaller environmental footprint (33). Hurdles for the required expansion of pumped hydro storage capacity include the lack of suitable sites as most of the best-suited sites have already been taken, while new projects frequently meet public resistance due to environmental concerns<sup>13</sup>. Also, evaporation from large dams, especially in warmer climates, causes significant water losses that may exacerbate locally existing water-stress. In addition, newly built PHEs are quite capital-intensive mainly due to

<sup>11</sup> The term "wheeling" refers to the transfer of energy from one location to another using transmission infrastructure like overland power lines and transformer stations of Eskom.

<sup>12</sup> This is equivalent to about half of the current installed total capacity of Eskom.

<sup>13</sup> Interestingly, this seems to be different for wind turbines that are now requested to be also erected in lesser protected nature conservation areas as well as densely forested hilltops of lower mountain ranges in Germany.

### 1.5.3 Umwelt-, Sozial- und Governance-Standards (ESG)

Nach der Einführung immer strengerer ESG-Kriterien durch Investoren und Aktionäre sind insbesondere die südafrikanischen Bergbauunternehmen dem Risiko ausgesetzt, Dekarbonisierungsvorgaben nicht zu erreichen, da derzeit etwa 90 % des Stroms von Eskom aus Kohlekraftwerken stammt. Während einige Bergwerke zu Beginn der Energiekrise darüber nachgedacht hatten, Kohlebergwerke zu kaufen und eigene Kraftwerke zu bauen, um sich von Eskom abzukoppeln, ist die Nutzung fossiler Energieträger nun keine Option mehr (29). Stattdessen wurden Investitionen zu erneuerbaren Energien umgelenkt, mit dem Ziel, in ein paar Jahren vollständige Klimaneutralität zu erreichen (30). Da die Kapazitätsfaktoren für Solar- und Windkraftanlagen doppelt bis dreimal so hoch sind wie in Deutschland, bietet Südafrika hierfür exzellente Möglichkeiten. Viele Bergwerke bauen daher ihre eigenen Photovoltaik (PV)-Anlagen und erwägen die Einspeisung von Windenergie aus abgelegenen Küstenstandorten. Dies steht im Einklang mit dem Ziel der Regierung, bis 2030 insgesamt 20 GW erneuerbare Energien einzuspeisen, die vor allem von unabhängigen Stromerzeugern (IPP) bereitgestellt werden und circa der Hälfte der derzeit installierten Gesamtkapazität Eskoms entspricht. Um die Solar- und Windenergie allerdings zuverlässig nutzbar zu machen, müssen Möglichkeiten gefunden werden, den intermittierend erzeugten Strom zu speichern. Eine dazu geeignete Technologie, die gleichzeitig auch die nachbergbauliche Wasserproblematik der Bergwerke löst, wird im folgenden Abschnitt vorgestellt.

## 2 Untertägige Pumpspeicherwerke (UPSW)

### 2.1 Blaue Batterien für grüne Energie

Die Idee, Strom zu speichern, indem man mit preisgünstiger Energie Wasser in ein höher gelegenes Speicherbecken pumpt und diese wiederzugewinnen, indem man das Wasser zu Spitzenbedarfszeiten über eine Turbine wieder in das tiefergelegene Becken zurücklaufen lässt, ist mittlerweile über 100 Jahre alt. PSW sind eine ausgereifte und zuverlässige Technologie, die mit derzeit 136 GW Gesamtleistung ca. 94 % der gesamten globalen Energiespeicherkapazität ausmacht (31). Angesichts des wachsenden Anteils erneuerbarer Energien am Energiemix und des schnell steigenden Bedarfs an entsprechender Speicherkapazität plant beispielsweise China, seine Pumpspeicherkapazität bis 2025 auf 65 GW zu verdoppeln und hat im Januar 2022 das mit 3,6 GW weltweit größte PSW in Betrieb genommen (32). Im Gegensatz zu metallbasierten Batterien kommen Pumpspeicher dabei weitestgehend ohne kritische und oft toxische Materialien aus und haben eine deutlich längere Lebensdauer sowie einen insgesamt kleineren ökologischen Fußabdruck (33). Zu den Hürden für den erforderlichen Ausbau der Pumpspeicherkapazität gehört oft der Mangel an geeigneten Standorten, da die meisten der geeigneten Standorte bereits genutzt wurden, während neue Projekte aus Natur- und Umweltschutzgründen häufig auf öffentlichen Widerstand stoßen<sup>12</sup>. Darüber hinaus führt die Verdunstung über großen Staudämmen, insbesondere in wärmeren Klimazonen, zu erheblichen Wasserverlusten, die lokal bestehenden Wassermangel verschärfen können.

<sup>12</sup> Interessanterweise gilt dies offenbar nicht in gleichem Maße für Windkraftanlagen, deren Errichtung auch in Landschaftsschutzgebieten und dichtbewaldeten Kammlagen der Mittelgebirge mittlerweile auch durch Naturschutzverbände in Deutschland gefordert bzw. toleriert wird.

civil construction and excavation work accounting for the majority of the costs (34).

## 2.2 Repurposing underground mines

### 2.2.1 Rationale

The three hurdles, namely public resistance, evaporative water loss and high capital requirements, are all addressed when PHES plants are installed underground in repurposed mines. As no land on the surface is claimed, public and regulatory acceptance are generally much higher. This even more so as the concept results in tangible environmental benefits by averting closed mines becoming expensive legacy sites and long-term sources of water pollution. Through storing water underground protected from sunlight, water losses through excessive evaporation are minimised. Also, capital requirements are much reduced by using existing underground mine voids free of charge instead of having to build large dam walls and excavate underground penstock tunnels and machine caverns out of solid hard rock. The amount of energy that can be stored in a PHES facility is mainly determined by the volume (mass) of circulated water and the vertical distance it is lifted against gravity (hydraulic head). Being exceptionally deep and carved out from stable quartzitic hard rock, South African gold mines are particularly well suited for applying the concept (Figure 4).

Compared to surface systems with average heads of a few hundred meters, hydraulic heads in deep-level gold mines are up to an order of magnitude larger. At identical water volumes, i. e. deep level mines could store up to ten times more energy than conventional surface systems. This is supplemented by an exceptionally large underground storage space created in over a



Fig. 4. Partially flooded mine tunnel at a gold mine in the Far West Rand.  
Bild 4. Teilweise gefluteter Stollen in einem Goldbergwerk im Far West Rand-Gebiet. Photo/Foto: Winde

century of mining. This space consists of numerous levels of permanent horizontal infrastructure in the form of tunnels (drives, crosscuts, haulages etc.) designed to access the dipping gold reefs at different depths amounting to a total length of several hundreds of kilometers per mine. All levels are connected to vertical shaft systems comprising of up to three tiers (main-, sub-vertical and tertiary shafts) reaching total depths of up to 4 km below surface. Levels closest to the surface are proposed

Außerdem sind neu gebaute PSW vergleichsweise kapitalintensiv, insbesondere wegen der teuren Tiefbau- und Aushubarbeiten, die in der Regel den größten Teil der Gesamtkosten ausmachen (34).

## 2.2 Umwidmung untertägiger Grubengebäude

### 2.2.1 Kernidee

Alle drei Hürden, nämlich öffentlicher Widerstand wegen hoher Umweltbeanspruchung, hoher Kapitalbedarf und hohe Verdunstungsverluste werden vermieden, wenn Untertagebergwerke zu UPSW umgebaut werden. Da keine oberirdischen Flächen beansprucht werden, ist die öffentliche und behördliche Akzeptanz im Allgemeinen deutlich höher als bei konventionellen PSW. Im Gegenteil, das Konzept führt sogar zu spürbaren Vorteilen für die Umwelt, da es verhindert, dass stillgelegte Bergwerke zu langfristigen Quellen der Wasserverschmutzung werden. Durch die Umnutzung bereits existierender Schächte und Tunnel wird der Kapitalbedarf signifikant reduziert, weil kaum kostentreibende Tiefbauarbeiten erforderlich sind. Anstatt große Staumauern für das Ober- und Unterbecken zu bauen und Verbindungsstollen und Maschinenkavernen komplett ausheben zu müssen, ist in Untertagebergwerken bereits nahezu die gesamte erforderliche Infrastruktur vorhanden. Zudem sind dort die Verdunstungsverluste im Vergleich zu den offenen Wasserflächen großer Staudämme an der Oberfläche gering. Die Energiemenge, die in Pumpspeichieranlagen gespeichert werden kann, wird hauptsächlich durch das Volumen (Masse) des zirkulierenden Wassers und die vertikale Distanz bestimmt, über die dieses Wasser gegen die Schwerkraft angehoben wird (hydraulischer Gradient). Da die Goldbergwerke Südafrikas außergewöhnlich tief und in sehr hartem und damit geotechnisch stabilem Quarzgestein ausgearbeitet sind, eignen sie sich besonders gut für die Umsetzung des Konzepts (Bild 4).

Im Vergleich zu Oberflächensystemen mit durchschnittlichen Fallhöhen von einigen Hundert Metern sind diese in den Goldbergwerken bis zu einer Größenordnung höher. Das heißt, bei gleichen Wassermengen können Bergwerke bis zu zehnmal mehr Energie speichern als durchschnittliche Übertagesysteme. Ergänzt wird die Standortgunst durch das außergewöhnlich große Grubenvolumen das in über hundert Jahren Goldabbau entstanden ist. Dieser potentielle Stauraum besteht aus zahlreichen Abbauebenen (Sohlen) der zum Erzabbau nötigen permanenten Infrastruktur in Form von Tunneln, Stollen, Strecken, Vortrieben, Querschlägen usw. mit Gesamtlängen von mehreren Hundert Kilometern pro Bergwerk. Alle Sohlen sind mit einem vertikalen Schachtsystem verbunden, das aus bis zu drei Teilen besteht (Hauptschacht, Subvertikal- und Tertiärschächte), die Gesamtteufen von bis 4 km erreichen können. Die oberflächennahen Sohlen dienen als oberes Speicherbecken, während sich das Unterbecken auf Sohlen des Grubentiefsten befindet. Eine Druckrohrleitung, die sowohl vertikal im Schacht als auch horizontal in Tunneln verläuft, verbindet dabei Ober- und Unterbecken.

### 2.2.2 Stand der Forschung

Neben Goldbergwerken in Südafrika (z. B. 35, 36) wird das Konzept zunehmend für die Anwendung in Kohle- und Metallbergwerken in Australien (37, 38), Belgien (39), China (40), Tschechien (41), Finnland (42, 43), Deutschland (44, 45, 46, 47), Estland (41), Polen (48), Spanien (49, 50) und Schweden (41) erforscht. Einen Überblick über das Konzept unterirdischer Pumpspeicherung bietet Pickard (51). Laut einer gemeinsamen Pressemitteilung von Voith Hydro und Swe-

to be used as upper reservoir while bottom levels serve as lower reservoir both connected by a penstock running in vertical shaft barrels and horizontal tunnels.

### 2.2.2 State of research

Apart from gold mines in South Africa (e.g., 35, 36) the concept is increasingly researched for application in coal and metals mines in Australia (37, 38), Belgium (39), China (40), Czech Republic (41), Finland (42, 43), Germany (44, 45, 46, 47), Estonia (41), Poland (48), Spain (49, 50) and Sweden (41). A general overview of the concept of UPHEs is provided by Pickard (51). According to a joint press release of Voith Hydro and Swedish Mine Storage<sup>14</sup>, there are "...more than one million abandoned mines in the world, and with mature, proven energy storage technology, mine storage can be a game changer for the environment" (52). Seed funding for pilot projects in Finland has meanwhile been approved by the EU (43). Given the rising demand for energy storage and the short supply of available and suitable sites there are now even efforts to freshly excavate underground reservoirs at greenfield sites and install UPHEs from scratch. This approach is explored, e.g., in the Netherlands and by the International Hydropower Association (IHA) in the form of LAPS (location agnostic pumped storage) (53, 54, 55).

## 3 Feasibility of the UPHEs concept

### 3.1 Study aims and area

#### 3.1.1 Aims and objectives

The main aims of the study were to identify suitable shafts, develop shaft-specific concepts, assess their technical feasibility, and to identify business models including their respective viability. Conducted as a desk study the research largely relied on existing secondary data largely provided by the mine owner or retrieved from other sources.

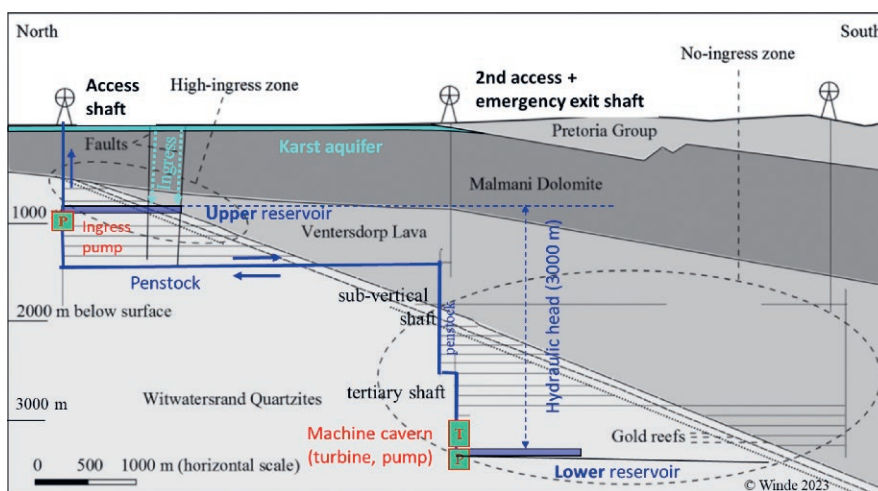


Fig. 5. Geological cross-section of the investigated mine in the Far West Rand depicting the dolomitic karst aquifer as well as main ingress locations for fissure water and concept-relevant infrastructure. // Bild 5. Geologischer Schnitt des untersuchten Bergwerks im Far West Rand mit dolomitischem Karst-Grundwasserleiter und Haupteintragspfaden für eindringendes Kluftwasser und konzeptrelevanter Infrastruktur. Source/Quelle: Winde

dish Mine Storage<sup>13</sup> gibt es weltweit mehr als eine Million verlassene Bergwerke, sodass mit ausgereifter, bewährter Energiespeichertechnologie die Bergwerksspeicherung die Umwelt entscheidend verändern kann (52). Anschubfinanzierungen für Pilotprojekte in Finnland wurden inzwischen von der EU und anderen Parteien genehmigt (43). Angesichts der steigenden Nachfrage nach Energiespeicherung und des knappen Angebots an verfügbaren und geeigneten Standorten gibt es mittlerweile auch Bestrebungen, unterirdische Speicherräume frisch auszuheben, wie z. B. für die Niederlande und im LAPS-Ansatz (location agnostic pumped storage) der International Hydropower Association (IHA) vorgeschlagen (53, 54, 55).

## 3 Umsetzbarkeit des UPSW Konzepts

### 3.1 Untersuchungsziele und -gebiet

#### 3.1.1 Untersuchungsziele

Die Hauptziele der Studie waren die Identifizierung geeigneter Schächte einschließlich der Entwicklung schachtspezifischer Konzepte, die Bewertung der technischen Machbarkeit und die Identifizierung möglicher Geschäftsmodelle mit den dazugehörigen Rentabilitätsbewertungen. Die durchgeführten Untersuchungen stützten sich im Wesentlichen auf vorhandene Sekundärdaten, die größtenteils vom Bergwerksbetreiber bereitgestellt oder aus anderen Quellen abgerufen wurden.

#### 3.1.2 Geologie und Hydrogeologie

Das Bergwerk befindet sich unterhalb von zwei großflächig entwässerten dolomitischen Karstkompartimenten und pumpt 100 MI/d (100.000 m<sup>3</sup>) Sumpfungswasser zur Oberfläche. Der größte Teil des Kluftwassers fließt der Grube auf den obersten Sohlen direkt an der Grenzfläche zum Dolomit zu, wo die Stollen Risse, Klüfte und Verwerfungen angeschnitten haben, welche die Grube nun mit dem Karstgrundwasserleiter verbinden (Bild 5).

Um den Zufluss von Kluftwasser zu begrenzen, senkte das Bergwerk seit Ende der 1950er Jahre den Grundwasserspiegel ab, indem kontinuierlich mehr Wasser abgepumpt wurde, als auf natürliche Weise nachkam.

Mit sinkendem Grundwasserstand ließen die Pumpraten allmählich nach bis sich das neue Gleichgewicht zwischen natürlicher Grundwasserneubildung und Kluftwasserzufluss auf einem Pumpniveau von ca. 100 MI/d einstellte. Zu den Folgen der großflächigen Grundwasserabsenkung gehörten das Austrocknen schüttungsstarker Karstquellen, die für die Bewässerungslandwirtschaft genutzt wurden, und die unerwartete Bildung teils katastrophaler Erdfälle, die Todesopfer forderten und die Infrastruktur z. T. massiv beschädigten. Um die Entschädigung der betroffenen Landeigentümer zu koordinieren, wies die Regierung die Bergwerke an, die Far West Rand Dolomitic Water Association zu gründen, die auch mit der Überwachung der Bodenstabilität in der Region

<sup>14</sup> A recently established company specifically focussing on converting closed mines into energy storage facilities.

<sup>13</sup> Hierbei handelt es sich um ein erst kürzlich gegründetes Unternehmen mit Schwerpunkt auf der Nutzung aufgelassener Bergwerke zur Energiespeicherung.



### 3.1.2 Geology and geohydrology

The investigated mine operates below two dewatered dolomitic compartments and daily pumps some 100 MI of ingress water to keep underground workings dry. Most of the ingress occurs at the upper-most levels directly at the dolomitic interface where mine tunnels intersect fissures and faults connecting the void to the overlying karst aquifer in the near-surface part of the up to 1 km thick dolomite (Figure 5).

In order to reduce the hydraulic head and limit the inflow of fissure water, the mine – since the late 1950s – lowered the groundwater table in the karst aquifer by consistently pumping out more water than could be naturally replenished. Eventually, pumping rates subsided and reached an equilibrium with natural recharge at an ingress of some 100 MI/d that still applies. Consequences of the large-scale dewatering included the drying up of springs used for irrigation and the unexpected formation of partly catastrophic sinkholes that claimed lives and massively damaged infrastructure. In order to coordinate the compensation of affected landowners the Government ordered the mines to form the Far West Rand Dolomitic Water Association (FWRDWA), which was also tasked with monitoring ground stability in the region (56). Most of the fissure water is of potable quality when it enters the mine void and only gets contaminated while trickling down the mine void and coming in contact with unmined ore, dust and other sources of pollution that lower the pH and increase sulphate levels and concentrations of uranium and other toxic heavy metals. The majority of the pumped-out ingress is discharged into the Wonderfonteinspruit as main stream draining the area (Figure 6).

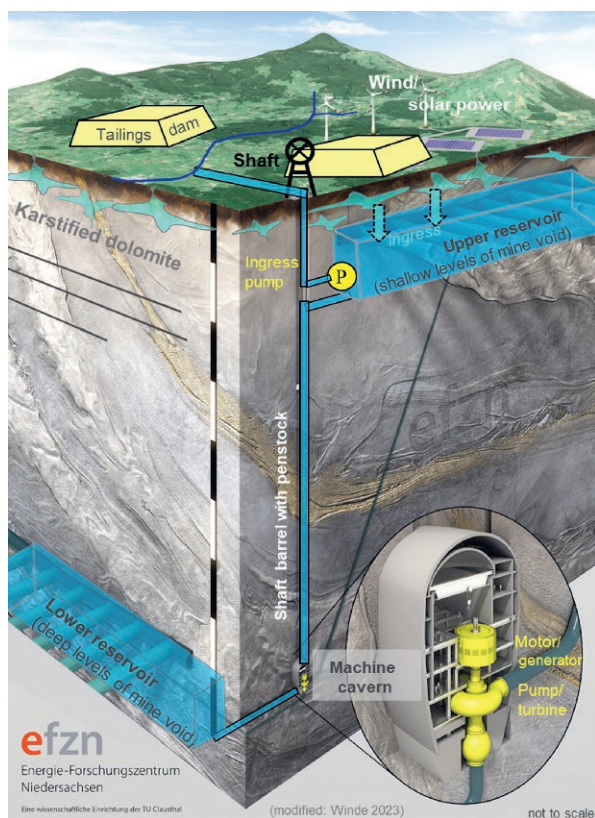


Fig. 6. Schematic depiction of UPHES in a deep level gold mine (original figure by EFZN, 2011; adopted and modified from (36)).

Bild 6. Schematische (unmaßstäbliche) Darstellung eines UPSW in einem tiefen Goldbergwerk (EFZN Originalabbildung aus (36) übernommen und modifiziert).

beauftragt war (56). Der größte Teil des zuzitenden Kluftwassers hat Trinkwasserqualität, wenn es in den Bergwerkshohlraum gelangt und wird erst verunreinigt, wenn es beim Durchsickern der Grube mit anstehendem Erz, Staub und anderen Kontaminationsquellen in Kontakt kommt. Dies führt über Pyritoxidation in der Regel zur Versauerung und erhöht stark die Gehalte an Sulfat, Uran und anderen toxischen Schwermetallen im Grubenwasser. Der Großteil des abgepumpten Grubenwassers wird in den Wonderfonteinspruit, als Hauptvorfluter der Bergbauregion, eingeleitet (Bild 6).

Gepumpt wird vorwiegend nachts sowie an Wochenenden und Feiertagen, wenn die Strompreise niedrig sind. Da die verbleibende Restlaufzeit vieler Bergwerke nur noch wenige Jahre beträgt, sind UPSW auch eine nachhaltige Stilllegungsoption, da damit zwei Hauptprobleme gelöst werden. So werden damit sowohl die Flutung der Grube und damit verbundene Kontaminationsrisiken großer Grundwasservorkommen als auch Langzeitkosten für die fortgesetzte Entwässerung bereits stillgelegter Schächte vermieden (36, 57).

## 3.2 Technische Machbarkeit

### 3.2.1 Allgemeiner Ansatz

Nach Untersuchungen von Swart et al. (58) und Schrader et al. (59, 60) wird der Grundwasserspiegel trotz bergbaubedingter Durchörterung hydraulisch trennend wirkender Dioritgänge zwischen den einzelnen dolomitischen Kompartimenten nach Abstellen der Pumpen schließlich wieder auf das Niveau vor dem Abbau ansteigen. Da nun das aus der Tiefe aufsteigende Grubenwasser über dieselben Klüfte und Wegsamkeiten zurück in den Karstgrundwasserleiter gelangt, über die es vorher in die Grube kam, kommt es dadurch zur Kontamination des Karstgrundwasserleiters. Aufgrund der hohen Konzentrationen an Sulfaten und giftigen Metallen, die mehrere Größenordnungen über denen des unbelasteten Karstgrundwassers liegen, besitzt das Grubenwasser ein hohes Kontaminationspotential, bei dem ein Liter ausreicht, mehrere Tausend Liter Karstwasser zu verunreinigen. Eine vollständige Flutung der Gruben sollte daher unbedingt vermieden werden.

Als Stilllegungsalternative wird die Installation eines UPSW mit offenem Wasserkreislauf in der Grube vorgeschlagen, bei dem beide Speicherbecken unter der Erde liegen<sup>14</sup>. Neben anderen Vorteilen, deckt diese Option auch die Kosten für die Fortführung der Grubenwasserhaltung. Durch die Platzierung des Oberbeckens so nah wie möglich an der Grenzfläche zum hängenden Dolomit wird zuzitendes Karstwasser aufgefangen und zum Auffüllen des oberen Speicherbeckens verwendet. Sobald dieses gefüllt ist, kann das UPSW in Betrieb gehen. Da der Zustrom von Kluftwasser aber weiterhin anhält, wird es kontinuierlich direkt vom oberen Speicherbecken aus an die Oberfläche gepumpt, was deutlich kostengünstiger ist, als das bisherige Pumpen aus größerer Tiefe. Da Pumpvolumina nur einen Bruchteil der Gesamtmenge des zirkulierenden Wassers ausmachen, das zur Energieerzeugung verwendet wird, schmälern die damit verbundenen Kosten den erzielten Gewinn nur marginal und erlauben so eine wirtschaftliche langfristige Weiterführung der Wasserhebung (36). Da die Wände der Speicher aus chemisch weitgehend inertem Quarzit bestehen

<sup>14</sup> Bei vielen ähnlichen Bergwerksprojekten, die derzeit weltweit bearbeitet werden, ist das obere Speicherbecken an der Oberfläche.

Much of the pumping is done at night and over weekends and holidays when off-peak tariffs reduce associated electricity costs for pumping. With only a few years of life-of-mine remaining at many mines in the region UPHES is also proposed as a sustainable closure option addressing two main concerns, namely the flooding-related contamination of the karst aquifer and long-term costs for continuously dewatering closed shafts that otherwise jeopardize the economic survival of affected mines (36, 57).

## 3.2 Technical feasibility

### 3.2.1 General design

To protect the dolomitic groundwater a complete flooding of the mine void cannot be allowed as rising acidic mine water will eventually infiltrate into the overlying karst aquifer via the very same fractures and faults that currently allows karst water to ingress into the mine void. As groundwater levels will eventually recover to pre-mining elevations (58, 59, 60), the entire karst aquifer is at risk of being contaminated. With concentrations of sulphates, toxic metals and radionuclides such as uranium being several orders of magnitude above natural background values, mine water has an enormous contamination potential, where one litre AMD can render thousands of litres of karst water unfit for use. Since flooding is not a viable closure option, ways must be found to afford continued dewatering.

As one such way an open-loop pumped-hydro storage plant is proposed, where both reservoirs are located underground using existing mine tunnels. By placing the upper reservoir as close as possible to the dolomitic interface, ingressing clean karst water is intercepted before it gets polluted and used as feed-flow to initially charge the system. Once the upper reservoir is filled, the system can start operating. Since ingress will naturally continue even after the system is full, surplus water needs to be removed. This is affected by pumping it directly from the upper reservoir to the surface, which is much cheaper than pumping it from depth as it is currently done. As ingress volumes amount to only a tiny fraction of the total circulated water volume that generates revenue, the latter by far over-compensates the dewatering costs (36). What is more, in this way the ingress water is kept clean as it does not come into contact with underground sources of pollution while tunnel walls consist of chemically inert quartzite. The pumped-out ingress will thus be of good quality and improve conditions in the Wonderfonteinspruit, which as main drainage line of the goldfield, currently suffers from high loads of salts and toxic metals such as uranium emitted from a multitude of gold mining-related sources (61).

### 3.2.2 Key findings

A model of the mine void geometry was developed which confirmed that water can drain freely from the tunnels following a consistent gradient towards shafts without flowing over polluted stoping areas. No additional ventilation systems are thus needed as all tunnels used for storing water have sufficiently large openings to route displaced air via the open shaft barrel to the surface. Underground catchment areas were delineated for selected shafts and associated storage volumes for freely drainable water calculated. Together with usable hydraulic heads this was used to determine potential power yields. As a result, several viable concepts were identified ranging from small to medium to extra-

und das Wasser auch keinen Kontakt zu den immer jeweils mehrere Meter über den Speichern liegenden Abbaustreben hat, kommt es zu einer deutlichen Qualitätsverbesserung des abgeschlagenen Wassers, die sich günstig auf die Wasserqualität im Wonderfonteinspruit auswirkt. Als Hauptvorfluter des Bergbaugebiets ist der Wonderfonteinspruit durch eine Vielzahl bergbaulicher Kontaminationsquellen sowohl mit hohen Salzfrachten als auch mit Uran und anderen toxischen Schwermetallen belastet (61).

### 3.2.2 Wichtigste Ergebnisse

Das erarbeitete Modell der Grubengeometrie zeigte, dass das gespeicherte Wasser über Sohlen mit einem konstanten Gefälle frei in Richtung der Schächte abfließen kann, ohne dabei mit den kontaminierten Arealen in Kontakt zu kommen. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass keine zusätzlichen Entlüftungsanlagen installiert werden müssen, da alle zur Wasserspeicherung genutzten Tunnel über ausreichend große Wegsamkeiten verfügen, um die bei der Befüllung der Speicher verdrängte Luft über die Schachtröhre an die Oberfläche zu leiten. Basierend auf der Abgrenzung untertägiger Einzugsgebiete für ausgewählte Schächte wurde das mögliche Speichervolumen für frei abfließendes Wasser berechnet und anschließend mit Hilfe der nutzbaren hydraulischen Fallhöhen die Energiespeicherkapazität ermittelt. Dabei wurden verschieden profitable Konzepte entwickelt, die von kleinen über mittlere bis hin zu sehr großen Anlagen reichen (< 10 bis > 1.000 MW). Während die kleinen und mittleren Projekte als Co-Mining-Projekte konzipiert sind, die parallel zum laufenden Bergbau umgesetzt und betrieben werden könnten, sind die großen Projekte als Schließungsoptionen für das gesamte Bergwerk geplant. Basierend auf den verschiedenen Betriebsmodi, daraus resultierenden Pumpstunden pro Tag und täglichen Speicherzeiten wurden Durchflussmengen für die Pump- und Entladephasen ermittelt und die erforderlichen Durchmesser der Druckleitungen abgeschätzt. Dies zeigte, dass alle Druckrohrleitungen in die vorhandenen Schachtdurchmesser passen. Details zur Fluidodynamik und erforderlichen hydromechanischen Maschinen wie Turbinen, Pumpen, Motoren, Generatoren, Transformatoren usw. wurden nicht berücksichtigt, da dies in der anschließenden Machbarkeitsstudie untersucht wird. Erste Hinweise aus der Literatur zeigen, dass die verfügbaren Maschinen so bemessen sind, dass diese durch bestehende Schächte abgesenkt und bei Bedarf unter Tage wieder zusammengebaut werden können.

Im Vergleich zu Schwerkraftspeichern (SWGS), die ebenfalls als mögliche Nachnutzung für Schächte diskutiert werden, weisen UPSW deutlich höhere Energieerträge auf. Für einen 600 m tiefen Schacht berechneten Menendez et al. (50) weniger als 4 MWh gespeicherte Energie pro Zyklus für SWGS im Vergleich zu 717 MWh für UPSW. Darüber hinaus müsste bei Bergwerken mit erheblichen Wassereintrüben jede SWGS-Lösung auch den permanenten Pumpbedarf decken, wodurch sich der Nettoenergieertrag weiter verringert.

Im Hinblick auf mögliche Risiken wurde ein umfassendes Risikoregister erstellt, das geologische (Seismizität, Gesteinsintegrität usw.), technische (Wasserchemie, Maschinen usw.), rechtliche (Genehmigungen, UVP usw.), soziale und wirtschaftliche Risiken (Wechselkursschwankungen, Inflation, Zinssätze, Rating usw.) umfasst, deren detaillierte Betrachtung im Rahmen der nachfolgenden Machbarkeitsstudie vorgesehen ist. Bisher wurden diesbezüglich keine Warnsignale oder Ausschlussrisiken festgestellt.

large projects (< 10 to > 1,000 MW). While the small and medium options are designed as co-mining projects that could be implemented and operated in parallel to ongoing mining, the extra-large projects are proposed as closure option involving large parts of the entire mine. Based on the various operational modes and resulting pumping hours per day and storage times, flow rates for pumping and discharge phases have been determined and the required diameters of penstocks approximated. It was concluded that all penstocks would easily fit into existing shafts diameters. Details on fluid dynamics and required hydro-mechanical machinery like turbines, pumps, motors, generators, transformers etc. are to be considered in a more detailed follow-up study. Indications from literature suggest that available machinery can be lowered through existing shafts, and where required, reassembled underground.

Compared to suspended weight gravity storage systems (SWGS), as a possible alternative after-use, UPHEs have significantly larger energy yields. For a 600 m deep shaft Menendez et al. (50) calculated less than 4 MWh of stored energy per cycle for SWGS compared to 717 MWh for UPHEs. In addition, for mines with significant water ingress any SWGS solution would also still need to address the permanent pumping needs thereby lowering the net-output even further.

Regarding associated risks, a comprehensive register was compiled including geological (seismicity, rock integrity etc.), technical (water chemistry, machinery etc.), legal (permits, EIA etc.), social, labour and economic risks (exchange rate fluctuations, inflation, interest rates, agency rating etc.) to be considered in more detail in the follow-up feasibility study. So far, no red flags or fatal risks were identified.

### 3.3 Economic viability

#### 3.3.1 Financial model

The main objective of the financial modelling part of the study was to assess to what extent the various proposed technical options are economically viable on business case level assuming a conventional arbitrage model where profits are made solely by buying electricity for pumping at lower prices than the generated electricity is sold for. In conventional systems this usually exploits price differences between peak and off-peak tariffs, e.g., between day and night, which in the Megaflex tariff of Eskom can reach up to several hundred percent, e.g., off-peak vs. peak electricity in winter. Required model parameters such as capex, installed costs (US\$/kW), capital expenditure (machinery and labour), operational and maintenance costs, capital repayment costs etc. were extracted from literature. Such values are generally derived from conventional surface systems that have much higher civil construction costs and therefore tend to overestimate actual costs. Since this, in turn, lowers the predicted profitability the modelled results are conservative. This also applies to the used lifetime of 50 years, which in practice is often exceeded with some projects already operating for over 100 years. Also, earnings from potential carbon credits have not been considered, while all dewatering cost were included, targeting an overall accuracy level of + 50% and – 30%. In addition to the arbitrage model with Eskom as customer, also benefits from peak-load shifting (moving high consumption to off-peak times) and replacing the import of expensive electricity from open cycle gas turbine generation from Eskom are to be considered.

### 3.3 Wirtschaftlichkeit

#### 3.3.1 Finanzmodell

Das Hauptziel hier bestand darin, zu beurteilen, inwieweit die verschiedenen vorgeschlagenen technischen Optionen unter der Annahme eines herkömmlichen Arbitrage-Modells wirtschaftlich realisierbar sind, bei dem Gewinne durch den Kauf des benötigten Stroms zum Pumpen zu niedrigeren Preisen als dem erzeugten Strom erzielt werden. Dabei wird in herkömmlichen Systemen meist der Preisunterschied zwischen Peak- und Off-Peak-Tarifen, z. B. zwischen Tag und Nacht, ausgenutzt, der im Megaflex-Tarif von Eskom mehrere Hundert Prozent betragen kann, z. B. Off-Peak vs. Peak-Strom im Winter. Erforderliche Modellparameter wie Investitionskosten, Installationskosten (US-\$/kW), Kapitalaufwand (Maschinen und Arbeitskräfte), Betriebs- und Wartungskosten, Kapitalrückzahlungskosten usw. wurden aus der Literatur entnommen. Solche Werte wurden im Allgemeinen von herkömmlichen Oberflächensystemen mit viel höheren Baukosten abgeleitet und überschätzen daher tendenziell die tatsächlichen Kosten. Da dies wiederum zu einer geringeren Rentabilität führt, sind die verwendeten Modelle als konservativ zu betrachten. Dies gilt auch für die Nutzungsdauer von 50 Jahren, die in der Praxis häufig überschritten wird, da einige Projekte bereits seit über 100 Jahren laufen. Auch Einnahmen aus potentiellen CO<sub>2</sub>-Gutschriften wurden nicht berücksichtigt, während dagegen alle Entwässerungskosten einkalkuliert wurden. Die angestrebte Genauigkeit liegt bei + 50% und – 30%. Zusätzlich zum Arbitrage-Modell mit Eskom als Hauptkunde profitiert es auch von der Spitzenlastverlagerung (Verlagerung eines hohen Verbrauchs in Nebenzeiten) und dem Ersatz des Imports von teurem Strom aus der Open-Cycle-Gasturbinenerzeugung von Eskom.

#### 3.3.2 Konkurrierende Technologien

Beim Vergleich eines Li-Ionen-Batterie-Energiespeichersystems (BESS) mit einem konventionellen Pumpspeichersystem identischer Speicherkapazität über eine Lebensdauer von 100 Jahren fanden Krüger et al. (33) heraus, dass der ökologische Fußabdruck von UPSW deutlich geringer ist als der von Batterien, die 15-mal mehr Metalle und mineralische Ressourcen benötigen und etwa den doppelten CO<sub>2</sub>-Ausstoß verursachen. Dies liegt vor allem an der deutlich kürzeren Lebensdauer der Batterien, die derzeit etwa alle fünf Jahre ausgetauscht werden müssen. Infolgedessen sind die Gesamtinstallationskosten für PHES über einen 100 Jahre langen Betriebszeitraum insgesamt sogar niedriger als für Batterien (1.142 vs. 1.200 €/kW), trotz der viel höheren Anfangsinvestitionen. Die jüngsten Preiserhöhungen für Batteriemetalle wie Lithium um das Fünffache dürften die Wettbewerbsfähigkeit von PSW weiter steigern. Da UPSW zudem einen Großteil der PSW-Investitionskosten einsparen, ist ihr finanzieller Vorteil sogar noch größer. Jüngste Vergleiche der nivellierten Stromspeicherkosten (LCOS) zwischen verschiedenen Technologien ergaben die niedrigsten Kosten für UPHEs (0,09 bis 0,16 US-\$/kWh), gefolgt von konventioneller Pumpspeicherung (PHES: 0,15 bis 0,2 US-\$/kWh) und Li-Ionen-Batterien (0,21 bis 0,2 US-\$/kWh) (41). Laut IRENA (34) ist Wasserkraft einschließlich Pumpspeicherung trotz deutlich gesunkener Preise für Wind- und Solarenergie derzeit immer noch die günstigste erneuerbare Energiequelle.

#### 3.3.3 Alternative Einnahmequellen

Da keine der sich derzeit entwickelnden alternativen Einnahmequellen durchaus profitabler sein können als das Arbitrage-Modell, in



### 3.3.2 Competing technologies

Comparing Li-ion battery energy storage systems (BESS) with a pumped storage system of identical storage capacity over a 100 year lifetime, Krüger et al. (33) found that the environmental footprint of PHES is significantly lower since batteries need 15 times more mineral resources at about double the CO<sub>2</sub>-output. This is mainly due to the much shorter life span of batteries requiring replacement every five years or so. As a result, the overall installed costs for PHES are lower than for batteries (1,142 vs. 1,200 €/kW) despite their much larger initial capex. Recent increases in battery metal prices like lithium by several hundred percent are likely to further increase the future competitiveness of PHES. As UPHES save on civil construction costs accounting for the majority of capex in conventional PHES, the actual financial advantage is even larger. Recent comparisons of levelised cost of storage between different technologies indicated the lowest cost for UPHES (0.09 to 0.16 US\$/kWh) followed by conventional pumped storage (PHES: 0.15 to 0.2 US\$/kWh) and Li-ion batteries (0.21 to 0.3 US\$/kWh) (41). According to IRENA (34), hydropower including pumped storage, is currently still the cheapest source of renewable energy despite massive drops in prices for wind and solar energy.

### 3.3.3 Alternative revenue streams

The predicted overall profitability is even more conservative as none of the alternative revenue streams have been considered that are currently emerging with potentially higher yields than the arbitrage model. This includes frequency stabilisation of grids by providing energy when demand rises – that could otherwise result in a drop in frequency that damages electrical appliances – or by adding load if demand is too low by recharging the upper reservoir. Similar to an insurance company, UPHES operators would be paid a premium from grid owners to keep the service ready if needed, quite independent of how often it may actually be used. Another potential income relates load balancing, whereby excess renewable energy that cannot be absorbed by the grid is used to recharge UPHES. This prevents excess energy produced during windy and sunny days being sold at “negative prices” as currently practised in Germany with associated losses amounting to billions of euros per year (62). For IPPs producing renewable energy, the service of capacity firming rendering fluctuating solar and wind energy reliably dispatchable is also set to become a major market as the share of renewables increases in total energy generation. Other potential income streams relate to the fast and flexible ramping ability of pumped storage facilities and the option of long-term water and energy storage to balance seasonal fluctuations. In addition, UPHES would guard the mine against future energy price hikes and costly power interruptions.

### 3.3.4 Key findings

Even when only using the conventional arbitrage model all identified concepts were found to be economically viable. Generally, profitability increases with the size of projects rendering large projects financially more attractive than smaller ones. Apart from direct financial benefits, mine owners also derive indirect monetary benefits by meeting ESG and decarbonisation targets ensuring access to institutionalised finance and green funding. UPHES

Betracht gezogen wurden, ist die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung insgesamt konservativ. Zu den alternativen Einkommensquellen gehört beispielsweise die Frequenzstabilisierung durch die Bereitstellung von (Turbinen)-Energie bei steigendem Bedarf, was andernfalls zu einem Frequenzabfall führt, der elektrische Maschinen und Geräte schädigt, oder die Lasterhöhung bei zu geringem Verbrauch durch das Heraufpumpen von Wasser in das Oberbecken. Ähnlich wie bei einer Versicherungsgesellschaft würde der Betreiber eines UPSW vom Netzeigentümer eine Prämie erhalten, um den Dienst bereitzuhalten, unabhängig davon, ob oder wie oft er wirklich benötigt wird. Eine weitere Einkommensquelle ist der Lastausgleich, bei dem überschüssige erneuerbare Energie, die nicht vom Netz aufgenommen werden kann, zum Aufladen von UPSW verwendet wird. Dies würde verhindern, dass überschüssige Energie, die beispielsweise an windigen, sonnigen Tagen erzeugt wird, zu „negativen Preisen“ an benachbarte Netze verkauft wird, wie derzeit in Deutschland praktiziert, was allein 2020 zu Verlusten von 1,4 Mrd. € führte (62). Für IPPs, die erneuerbare Energien produzieren, werden Dienstleistungen, mit deren Hilfe die Schwankungen eingespeister Solar- und Windenergie ausgeglichen werden können, angesichts der zunehmenden Rolle erneuerbarer Energie zu einem immer wichtigeren Markt. Weitere potentielle Einnahmequellen ergeben sich aus der schnellen und flexiblen Ausbaufähigkeit von PSW und der Möglichkeit der langfristigen Wasser- und Energiespeicherung zum Ausgleich saisonaler Schwankungen. Darüber hinaus würde UPSW das Bergwerk vor künftigen Energiepreiserhöhungen und kostspieligen Stromunterbrechungen schützen.

### 3.3.4 Wichtigste Ergebnisse

Bereits nur auf Grundlage des konservativen Arbitrage-Modells erwiesen sich alle vorgeschlagenen Projekte als wirtschaftlich tragfähig, wobei die Rentabilität mit der Größe der Projekte steigt, große Projekte finanziell also generell attraktiver als kleinere sind. Neben direkten Einkünften ergeben sich für Bergwerkseigentümer aber auch indirekte monetäre Vorteile, indem ESG- und Dekarbonisierungsziele erreicht werden, was u. a. die Voraussetzung für den Zugang zu benötigtem Kapital ist und gleichzeitig eine Versicherung für Fälle, in denen langandauerndes Heben und Behandeln von Grubenwasser in stillgelegten Schächten das wirtschaftliche Überleben des Bergwerks gefährdet. Darüber hinaus werden die immer strengeren Anforderungen zur Gewährleistung einer nachhaltigen wirtschaftlichen Entwicklung ehemaliger Bergbaugemeinden nach der Schließung erfüllt, was die Erteilung einer behördlichen Schließungsgenehmigung erleichtert.

Zusätzlich zum Gewinn für den Bergwerkseigentümer gibt es auch einen erheblichen makroökonomischen Nutzen für Staat und Gesellschaft. Dieser bezieht sich u. a. auf die Verbesserung der regionalen Wasser- und Energieversorgung mittels Schutz der Grundwasserressourcen vor flutungsinduzierter Kontamination und Bereitstellung zusätzlicher Spitzenlastkapazität zur Verringerung von Häufigkeit und Dauer der notorischen Lastabwürfe, die derzeit die Wirtschaft lähmen. Gleichzeitig tragen UPSW zur Dekarbonisierung der südafrikanischen Energiebasis bei und ermöglichen durch Bereitstellung von Speicherkapazität den weiteren Ausbau erneuerbarer Energien. Außerdem werden so langfristige Kosten zur nachbergbaulichen Hebung und Behandlung belasteter Grubenwässer vermieden, die den südafrikanischen Staat schon jetzt erheblich belasten.

may also serve as contingency plan for scenarios where prolonged pump-and-treat of mine water from closed shafts jeopardizes the economic survival of the mine. The concept also assists meeting increasingly stringent requirements for sustainable post-closure development of former mining communities facilitating the notoriously elusive regulatory approval of mine closure applications.

In addition to direct monetary benefits for mine owners on business case level there are also significant indirect macro-economic benefits for Government and society at large. They relate, inter alia, to enhancing regional water security by protecting the large karst groundwater resources, averting prolonged water scarcity during decade-long rewatering, and providing clean water through operating water-positive UPHES. Simultaneously, the national energy security could be improved by adding significant peak load capacity and reducing load shedding that cripples the national economy. At the same time, UPHES facilitate penetration of renewable energy by providing balancing power and ancillary services like capacity firming and frequency stabilisation. Lastly, the concept averts long-term costs for post-closure mine water management that already place a significant burden on the South African state.

## 4 Conclusions

### 4.1 The water-energy-nexus

After more than hundred years of deep-level mining South Africa encounters major challenges arising from closed and soon to be closed mines that threaten to pollute scarce natural water resources in the semi-arid country. The situation is exacerbated by municipal wastewater treatment plants failing across the country and polluting rivers additionally with raw sewage as well as the protracted energy crisis of Eskom. As a result, water and energy security, as most crucial pillars of any economy, are currently severely compromised in South Africa. In this paper, a way is proposed to address some of these challenges around the water and energy nexus by turning closed mines from being potential environmental liabilities into economic assets that protect groundwater resources and generate clean water and electricity. First studies in the Far West Rand goldfield show that converting closed mines into underground pumped storage facilities is technically feasible and economically viable. With similar projects increasingly gaining momentum around the world it is probably only a matter of time before the world's first reference project will be commissioned.

### 4.2 Energy security

Apart from avoiding perpetual pump-and-treat costs, the repurposing of shafts and mine tunnels into PHES facilities enhances energy security, which currently is severely compromised. The unique combination of very deep shafts and an exceptionally large underground mine void system in geologically stable hard rock results in potentially large power outputs of UPHES that are able to significantly improve the compromised energy security even on national level. With power yields of single mines exceeding that of Eskom's Ingula plant as the largest pumped hydro scheme in South Africa (1,344 MW), repurposing only some of the many deep-level gold mines could significantly reduce the current shortage in peak-power supply. The proximity of major energy users to mines would reduce transmission losses incurred by the remote power plants

## 4 Schlussfolgerungen

### 4.1 Der Wasser-Energie-Nexus

Nach über hundert Jahren Goldbergbau steht Südafrika vor großen Herausforderungen durch die flächenhafte Stilllegung von Goldbergwerken und damit verbundenen Risiken für die knappen Wasserressourcen im Land. Die angespannte Lage im Wassersektor wird durch nicht adäquat funktionierende, kommunale Kläranlagen verschärft, die Flüsse mit unzureichend behandeltem Abwasser kontaminieren. Derzeit ist die Verfügbarkeit von Wasser und Energie in Südafrika, als notwendige Grundressourcen jeder Wirtschaft, z. T. erheblich eingeschränkt. Im vorliegenden Artikel wird eine Möglichkeit aufgezeigt, einige der Herausforderungen rund um den bergbaulichen Wasser-Energie-Nexus anzugehen. Dabei wandeln sich stillgelegte Bergwerke von potentiellen Schadstoffquellen in wirtschaftliche Vermögenswerte, was sowohl ausgedehnte Grundwasserressourcen schützt sowie sauberes Wasser und erneuerbare Energie erzeugt. Erste Ergebnisse von Untersuchungen in der Far West Rand-Region zeigen, dass die Umwandlung tiefer Goldbergwerke in Pumpspeichieranlagen sowohl technisch machbar als auch wirtschaftlich rentabel ist. Da ähnliche Projektansätze weltweit an Dynamik gewinnen, ist es vermutlich nur eine Frage der Zeit, bis das erste Referenzprojekt entsteht.

### 4.2 Energiesicherheit

Die Umwidmung von Schächten und zugehörigen Gruben in PSW hat im Vergleich zur Flutung und damit verbundener Folgekosten zahlreiche Vorteile. So werden dadurch nicht nur Ausgaben für das Heben und Behandeln von Grubenwasser vermieden, sondern auch die Wasser- und Energiesicherheit verbessert. Angesichts der Kombination von ultratiefen Schächten mit einem großen untertägigen Stauraum sind die Speicherkapazitäten von UPSW in südafrikanischen Goldbergwerken so signifikant, dass diese in der Lage wären, die südafrikanische Stromversorgung im nationalen Maßstab zu stabilisieren. Da die potentiellen Stromerträge einzelner UPSW die des Ingula-Kraftwerks von Eskom, als mit 1.344 MW größtem PSW Südafrikas, übertreffen, könnte schon die Umnutzung einiger weniger Goldbergwerke den aktuellen Mangel an Spitzenstrom erheblich verringern. Durch die vom Goldbergbau ausgehende, industrielle Entwicklung befinden sich große Energienutzer zudem meist in unmittelbarer räumlicher Nähe der Bergwerke, sodass auch Übertragungsverluste, wie sie derzeit bei den weiter entfernten Kraftwerken in Mpumalanga und den Drakensbergen auftreten, stark reduziert würden. Zusätzlich zu den Kosteneinsparungen durch die Nutzung des vorhandenen unterirdischen Stauraums, dessen Aushub mit dem abgebauten Gold bereits bezahlt wurde, erlaubt auch die Nutzung bereits existierender technischer Infrastruktur, wie z. B. von Hochleistungsnetzanschlüssen, großkalibrigen Steigleitungen und Pumpen, eine weitere potentielle Senkung der Investitionskosten. Schließlich steht auch die Umnutzung der kostspielig aufgebauten Infrastruktur<sup>15</sup> im Einklang mit Wiederverwendungsprinzipien der Kreislaufwirtschaft.

### 4.3 Wassersicherheit

Durch den Schutz des Karstgrundwasserleiters als strategisch wichtigem Notreservoir für die Provinz Gauteng würden UPSW indirekt

<sup>15</sup> Das Abteufen nur eines einzelnen Schachts kostet bereits mehrere Milliarden Rand.

in Mpumalanga and the Drakensberg Mountains. In addition to saving civil construction costs by using infrastructure the mined gold already paid for, capital requirements are further reduced by using existing high-capacity grid connections and pumping infrastructure. Finally, the concept of repurposing infrastructure that was very costly to build – already sinking a single shaft cost several billions of Rand – also aligns well with circular economy and zero-waste principles of reusing, repairing, and recycling.

### 4.3 Water security

By protecting the overlying karst aquifer as a strategically important emergency reservoir for metropolitan areas in Gauteng Province UPHES could significantly enhance water security in the economic heartland of the country. Operating as open-loop, water-positive system UPHES are able to close current supply gaps of the local water utility. With over 240 MI/d of mine water currently pumped in the Far West Rand goldfield, nearly two-thirds of the current water deficit could be covered if the relevant pumping shafts are repurposed.

### 4.4 Challenges

Naturally, there are also hurdles for the concept. One of them is the innovative nature of the project for which, globally, no reference project yet exists. As most investors are risk averse this is an obstacle for mobilising required funds. Also, the project generally appears to be too heavy on energy for mining companies and too heavy on mining for energy companies, making it difficult to find the right investor. For mining houses, it is often also a problem to invest in projects that exceed the life-of-mine when their actual aim is to find a cheap, quick and easy walk-away closure solution. In addition, the persistent energy crisis, inflation, sharply rising energy and labour costs, the increasing encroachment of illegal mining and protracted political disagreements between the government and the mining industry, all tend to currently dampen the overall appetite for long-term investments in the South African gold mining sector.

### 4.5 Future perspectives

There are, however, also supporting factors like the alignment of the concept with recently adopted sustainability standards and decarbonisation efforts of industry and government. By combining the excellent wind and solar energy potential with the exceptionally large and much-needed capacity of closed gold mines to store intermittent renewable energy South Africa possess a globally competitive advantage in the emerging green energy market. This includes a possible future production and export of green hydrogen and green ammonia as recently discussed with potential importers (63, 64). Providing clean water and green energy UPHES also offer a sound base for a sustainable post-closure development of former mining communities as required by legislation. Contributing to improved water and energy security may also help mines to improve the prevailing poor public perceptions regarding their environmental performance.

### Acknowledgement

I wish to thank Guy Richards and Ewald Erasmus for reviewing the manuscript and providing most helpful feedback.

auch einen wichtigen Beitrag zur Wassersicherheit im dicht besiedelten, wirtschaftlichem Kernland Südafrikas leisten. Konzipiert als offenes Kreislaufsystem, das täglich Millionen Liter sauberes Überschusswasser generiert, tragen UPSW auch dazu bei, bestehende Lücken der regionalen Wasserversorgung zu schließen. Mit über 240 MI/d an Grubenwasser, das derzeit durch Goldbergwerke allein in der Far West Rand-Region gepumpt und abgeschlagen wird, könnten durch die Umwidmung der Pumpschächte fast zwei Drittel des aktuellen Wasserdefizits der Region gedeckt werden.

### 4.4 Herausforderungen

Eine Hürde, welche die Umsetzung des Konzepts erschwert, hängt mit dem innovativen Charakter des Projekts zusammen, für das weltweit noch kein Referenzprojekt existiert. Da Kapitalanleger und Investoren in der Regel risikoscheu sind, stellt dies ein Hindernis für die Mobilisierung erforderlicher Mittel dar. Zudem scheint das Projekt für Bergbauunternehmen zu energielastig und für Energieunternehmen zu bergbaulastig zu sein, sodass es sich als schwierig erwiesen hat, den richtigen Investor zu finden. Für Bergbauunternehmen ist es darüber hinaus oft auch ein Problem, in Projekte zu investieren, die über die Lebensdauer des Bergwerks hinausgehen, da ihr eigentliches Ziel normalerweise darin besteht, ausgeerzte Bergwerke so schnell, einfach und kostengünstig wie möglich stillzulegen. Schließlich beeinträchtigen auch die anhaltende Energiekrise, eine hohe Inflation sowie stark steigende Energie-, Material- und Lohnkosten die anhaltende Ausweitung des illegalen Bergbaus sowie politische Zwistigkeiten zwischen Regierung und Bergbauindustrie momentan das Klima für langfristige Investitionen im südafrikanischen Goldbergbausektor.

### 4.5 Zukunftsperspektiven

Es gibt aber auch positive Entwicklungen, welche die perspektivische Umsetzung des Konzepts unterstützen, wie z. B. die kürzliche Einführung von Nachhaltigkeitsstandards und Prinzipien der Kreislaufwirtschaft sowie der Trend hin zu regenerativen Energien sowohl im Bergbausektor als auch der Regierungspolitik. Durch die Möglichkeit, das erstklassige Potential erneuerbarer Energie mit der enormen Kapazität fluktuierender Sonnen- und Windenergie in den Goldbergwerken speichern zu können, verfügt Südafrika über einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil auf dem sich gerade entwickelnden globalen Markt für grüne Energie. Perspektivisch gehören zu Letzterem auch Produktion und Export von grünem Wasserstoff und grünem Ammoniak, wie sie kürzlich mit potentiellen Importeuren aus Europa diskutiert wurden (63, 64). Durch die Bereitstellung von sauberem Wasser und grüner Energie bieten UPSW zudem eine wichtige Voraussetzung für die gesetzlich festgeschriebene nachhaltige Wirtschaftsentwicklung der ehemaligen Bergbaugemeinden. Mit der Implementierung innovativer Stilllegungskonzepte aktiv zur Verbesserung der nationalen Wasser- und Energiesicherheit beizutragen, kann dem Bergbausektor möglicherweise auch dabei helfen, sein stark angeschlagenes Umweltimage in der breiten Öffentlichkeit langfristig zu verbessern.

### Danksagung

Ich danke Guy Richards und Ewald Erasmus für das Gegenlesen des Manuskripts und ihre hilfreichen Hinweise.



## References / Quellenverzeichnis

- (1) Mason, B.; Moore, C. B. (1985): Grundzüge der Geochemie. ISBN 3-432-94611-2, Enke Verlag, Stuttgart, S. 318–320.
- (2) Krause, K. H. (2012): Historische bergbauliche Wasserwirtschaft im Ostharz – das Beispiel Unterharzer Teich- und Grabensystem. In: Christoph Ohlig (Hrsg.): UNESCO-Weltkulturerbe Oberharzer Wasserwirtschaft. DWhG (Hrsg.): Schriften der Deutschen Wasserhistorischen Gesellschaft (DWhG) e. V., Band 19. Books on Demand, Norderstedt, ISBN 978-3-8482-0803-6.
- (3) Teicke, J. (2011): UNESCO-Welterbe Oberharzer Wasserwirtschaft – Das Oberharzer Wasserregal, das bedeutendste vorindustrielle Energiegewinnungs- und Energieversorgungssystem der Welt. Harzwasserwerke, Clausthal-Zellerfeld.
- (4) Knolle, F.; Wegener U.; Rupp, H. (2021): 6.000 Jahre Umweltfolgen der Harzer Montanwirtschaft (Teil 1). *Bergbau*, 9/2021, S. 400–407.
- (5) Beck, M. (1986): Betriebsgeschichte des VEB Eisen- und Hüttenwerke Thale 1686–1986. Teil 1: Von den Anfängen bis zum ersten Weltkrieg 1686–1917. Betriebsparteiorganisation des VEB Eisen- und Hüttenwerke Thale, Selbstverlag.
- (6) Kunßberg, J. L. (2022): Streitgespräch im Harz. Diskussion: Sollten Windräder in unserem Wald stehen? Harzkurier, 20.04.2022; <https://www.harzkurier.de/region/article235126539/Diskussion-Sollten-Windraeder-in-unserem-Wald-stehen.html>. Accessed 21.04.2023.
- (7) Reichl, C.; Schatz, M. (2021): World mining data 2021. Volume 36, minerals production. Federal Ministry of Agriculture, Regions and Tourism, ISBN 978-901074-50-9, last update 27th April 2021, Vienna, pp. 268; <https://www.world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD2021.pdf>
- (8) Mining Review (2023): Chasing the transition – critical minerals and mining's new era. 17th May 2023.
- (9) International Energy Agency (IEA) (2022): The role of critical minerals in clean energy transition. World energy outlook special report. Revised version, March 2022. [www.iea.org/corrections](http://www.iea.org/corrections). pp. 284.
- (10) Watari, T.; McLellan, B. C.; Giurco, D.; Dominish, E.; Yamasue, E.; Nansai, K. (2019): Total material requirement for the global energy transition to 2050: a focus on transport and electricity. In: *Resources, Conservation & Recycling*, 148, pp 91–103, [doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.015](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.05.015).
- (11) Vidal, O.; Goffe, B.; Arndt, N. (2013): Metals for a low-carbon society. In: *Nature Geoscience*, Vol. 6, November, pp 894–896. [www.nature.com/naturegeoscience](http://www.nature.com/naturegeoscience)
- (12) Lebre, E.; Stringer, M.; Svoboda, K.; Owen, J. R.; Kemp, D.; Cote, C.; Arratia-Solar, A.; Valenta, R. K. (2020): The social and environmental complexities of extracting energy transition metals. *Nature Communications*, [doi.org/10.1038/s41467-020-18661-9](https://doi.org/10.1038/s41467-020-18661-9), pp 1–8.
- (13) Paul, M.; Winde, F. (2022): Emerging global trends in the extractive industry – international potential and future roles of remediation expertise from Germany. In: *Mining Report Glückauf*, 158 (6), pp 538–551.
- (14) Bainton, N.; Kemp, D.; Lebre, E.; Owen, J. R.; Marston, G. (2021): The energy-extractive nexus and the just transition. *Sustainable Development*, pp 1–11, [doi: 10.1002/sd2163](https://doi.org/10.1002/sd2163).
- (15) Luckeneder, S.; Giljum, S.; Schaffartzik, A.; Maus, V.; Tost, M. (2021): Surge in global metal mining threatens vulnerable ecosystems. In: *Global Environmental Change*, 69, 102303, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102303>.
- (16) U.S. Environmental Protection Agency (US-EPA) (1994): Acid mine drainage prediction. Technical document, December 1994, pp 52, Washington, USA.
- (17) Ernst and Young (EY) (2020): Global mining and metals top 10 business risks and opportunities – 2021. EYG no. 006539-20Gbl, pp 34, [ey.com/miningmetals](http://ey.com/miningmetals)
- (18) Winde, F.; Erasmus, E.; Stoch, E. J.; Hoffmann, E. (2011): Desktop assessment of the risk for basement structures of buildings of Standard Bank and ABSA in central Johannesburg to be affected by rising mine water levels in the Central Basin. Final report, Volume I (pp 267) and Volume I-III, Standard Bank of South Africa (Rosebank Branch), ABSA (CBD Branch), Johannesburg, unpublished, pp 267 (Vol. I).
- (19) Expert Team (2010): Mine water management in the Witwatersrand Gold Fields with special emphasis on acid mine drainage. Report to the Inter-Ministerial Committee on acid mine drainage. 20 December 2010, pp 146, Pretoria.
- (20) Department for Water Affairs and Sanitation (DWS) (2016): Media statement: R600 million committed to the long-term permanent solution for AMD challenge. 18th May 2016, Pretoria.
- (21) Department: Water Affairs (DWA) (2010): Position statement on the Vaal River System and acid mine drainage. November 2010, Pretoria, South Africa, pp 6.
- (22) ENCA (2023): SA's water crisis: Rand Water can't meet Gauteng demand. 14 March 2023, <https://www.enca.com/news/sas-water-crisis-rand-water-cant-meet-demand>
- (23) Gumbi, K. (2023): South Africa revokes "state of disaster" declared over power crisis. Reuters, 6th April 2023.
- (24) Johannesburg Water (JW) (2021): Media statement: Water restrictions in the City of Johannesburg. 17th March 2021, [www.johannesburgwater.coa.za](http://www.johannesburgwater.coa.za)
- (25) Jacobs, S. (2023): Electricity prices to increase further – expert. Daily Investor, 23 March 2023.
- (26) Capes and Moolman (no year): The price of water and electricity in South Africa: A tale of two tragedies. Green Economy Media, <https://greeneconomy.media/the-price-of-water-and-electricity-in-south-africa-a-tale-of-two-tragedies/>
- (27) van Vuuren, R. J. (2023): Illegal mining and power blackouts – the last nail in SA's coffin? *Mining Review*, 3rd May 2023, <https://www.miningreview.com/gold/illegal-mining-and-electricity-crisis-the-last-nails-in-sas-coffin/>
- (28) De Greef, K. (2023): The dystopian underworld of South Africa's illegal gold mines. *The New Yorker*, 27 February, <https://www.newyorker.com/magazine/2023/02/27/the-dystopian-underworld-of-south-africas-illegal-gold-mines>
- (29) Theron, A. (2015): S. Africa: Sibanye Gold seeks to buy coal mine to support its transition off the grid. *ESI Africa*, 7th August 2015, <https://www.esi-africa.com/top-stories/south-africa-sibanye-gold-seeks-to-buy-coal-mine-to-support-its-transition-off-the-grid/>
- (30) Hedley, N. (2021): Mining groups gear up for an emissions-free world. *Green Economy Journal*, 21st September 2021, <https://greeneconomyjournal.com/news-analysis/mining-groups-gear-up-for-an-emissions-free-world-ext/>
- (31) International Renewable Energy Agency (IRENA) (2020): Innovative operation of pumped hydropower storage. Innovative landscape brief. ISBN 978-92-9260-180-5, Abu Dhabi.
- (32) Bellini, E. (2022): State Grid of China switches on world's largest pumped-hydro station. In: *PV Magazine*, 4th January 2022; <https://www.pv-magazine.com/2022/01/04/state-grid-of-china-switches-on-worlds-largest-pumped-hydro-station/>
- (33) Krüger, K.; Mann, P.; van Bracht, N.; Moser, A. (2018): Li-ion battery vs. pumped storage for bulk energy storage – a comparison of raw materials, investment cost and CO<sub>2</sub>-footprint. Paper presented at HydroVision 2018; Charlotte, North Carolina, USA; 27th June 2018.
- (34) International Renewable Energy Agency (IRENA) (2023): The changing role of hydropower: Challenges and opportunities, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi; ISBN: 978-92-9260-522-3, [https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Feb/IRENA\\_Changing\\_role\\_of\\_hydropower\\_2023.pdf?rev=85b54f8dd8794f8fbc6270b5a1e0b92a](https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Feb/IRENA_Changing_role_of_hydropower_2023.pdf?rev=85b54f8dd8794f8fbc6270b5a1e0b92a)
- (35) Winde, F.; Stoch, E. J. (2010b): Threats and opportunities for post-closure development in dolomitic gold mining areas of the West Rand and Far West Rand (South Africa) – a hydraulic view. Part II: Opportunities. *Water SA*, 36 (1), pp 75–82.
- (36) Winde, F.; Kaiser, F.; Erasmus, E. (2017): Exploring the use of deep level gold mines in South Africa for underground pum-

- ped hydroelectric energy storage schemes. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, pp 668–682, <https://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.116>
- (37) ARUP (2018): Pre-feasibility study of renewable energy pumped hydro in Bendigo. Pre-feasibility Study Report – Final. 16th March 2023, East Melbourne, Australia, pp 63.
- (38) Filatoff, N. (2020): Eureka moment for Kidston Pumped Storage Hydro Project. In: *PV Magazine Australia*, 30th March 2020, <https://www.pv-magazine-australia.com/2020/03/30/eureka-moment-for-kidston-pumped-storage-hydro-project/>
- (39) Kitsikoudis, V.; Archambeau, P.; Dewals, B.; Pujades, E.; Orban, P.; Dassargues, A.; Piroton, M.; Ericum, S. (2020): Underground Pumped-Storage Hydropower (UPSH) at the Martelange Mine (Belgium): Underground Reservoir Hydraulics. In: *Energies*, 13, 3512, doi: 10.3390/en13143512.
- (40) Zhang, C.; Wang, F.; Bai, Q. (2021): Underground space utilization of coal mines in China: A review of underground water reservoir construction. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103657>.
- (41) Sustainable Energy Solutions Sweden (SENS) (2021): SENS initiates cooperation in the Czech Republic. 8th July 2021, Press SENS.
- (42) Zeller, E. (2017): An innovative pumped-storage project in an underground mine (Pyhäsalmi project). Presentation at the Science-Business-Society dialogue conference: Linking Science, Society, Business and Policy for the sustainable use of abandoned mines in the SADC region. 28–30th November 2017, Johannesburg, South Africa.
- (43) Pumped Hydro Storage (PHS) (2021): Aland presentation. May 2021, unpublished.
- (44) Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN) (2011): Windenergiespeicherung durch Nachnutzung stillgelegter Bergwerke. Abschlussbericht, 31.08.2011, Goslar, 864 S.
- (45) Niemann, A. (2018): UPHES feasibility: Case study from German hard coal mines. In: *Academy of Science of South Africa (ed.): Proceedings of the Science-Business-Society dialogue conference: Linking Science, Society, Business and Policy for the sustainable use of abandoned mines in the SADC region.*, 28–30th November 2017, Johannesburg, South Africa, ISBN 978-0-6399410-0-4, <https://dx.doi.org/10.17159/as-saf.2018/0025>, pp 31–33.
- (46) Bellinger, I. (2018): Neue Energien. In: *National Geographic Germany*, December 2018, S. 127–132.
- (47) Günther, M.; Rapp, C.; Fallahnejad, M. (2019): Why underground pumped hydro storage plants despite their broad advantages are not built? *Mining Report Glückauf*, 155 (3), pp 315–320.
- (48) Saigustia, C.; Robak, S. (2021): Review of Potential Energy Storage in Abandoned Mines in Poland. In: *Energies*, 14, p 6272, <https://doi.org/10.3390/en14196272>
- (49) Menendez, J.; Loredó, J.; Galdo, M.; Fernandez-Oro, J. M. (2018): Energy storage in underground coal mines in NW Spain: Assessment of an underground lower water reservoir and preliminary energy balance. *Renewable Energy*, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.042>
- (50) Menéndez, J.; Schmidt, F.; Loredó, J. (2020): Comparing Subsurface Energy Storage Systems: Underground Pumped Storage Hydropower, Compressed Air Energy Storage and Suspended Weight Gravity Energy Storage. *E3S Web of Conferences* 162, 01001, ICPME 2020, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016201001>
- (51) Pickard, W. F. (2011): The history, present state, and future prospects of underground pumped hydro for massive energy storage. *Proceedings of the IEEE*, 100 (2), pp 473–483.
- (52) Voith Hydro (2021): Voith Hydro and Swedish Mine Storage enter development partnership for the advancement of decarbonisation. 7th June 2021, Newsroom, Voith Hydro and Swedish Mine Storage enter development partnership for the advancement of decarbonization, Voith.
- (53) Kibrit, B. (2013): Pumped hydropower storage in the Netherlands. A study at large-scale energy storage and the transformation of the Slufter from a silt depot to a pumped hydro-electricity storage system. MSc thesis Civil Engineering, Delft University of Technology, <http://resolver.tudelft.nl/uuid:6f98d3d5-6454-4e20-af5e-5b8615dcaba0>
- (54) De Ingenieur (2018): Energy storage using water is an option in The Netherlands. 24th September 2018; <https://www.deingenieur.nl/artikel/energy-storage-using-water-is-an-option-in-the-netherlands>
- (55) International Forum on Pumped Storage Hydropower (IFPSH) (2021): Innovative pumped storage hydropower configurations and uses. Capabilities, costs & innovation working group, September 2021, pp 93.
- (56) Swart, C.; Stoch, E.; van Jarsveld, V.; Brink, A. (2003a): The lower Wonderfonteinspruit: an expose. In: *Environmental Geology*, 43, pp 635–653, DOI:10.1007/S00254-002-0686-9.
- (57) Winde, F.; Stoch, E. J. (2010a): Threats and opportunities for post-closure development in dolomitic gold mining areas of the West Rand and Far West Rand (South Africa) – a hydraulic view. Part I: Mining legacy and future threats. In: *Water SA*, 36 (1), pp 69–74.
- (58) Swart, C.; Kleywegt, R.; Stoch, E. (2003b): The future of the dolomitic springs after mine closure on the Far West Rand, Gauteng, RSA. In: *Environmental Geology*, 44, pp 751–770; DOI:10.1007/S00254-003-0820-3.
- (59) Schrader, A.; Winde, F.; Erasmus, E. (2014a): Using impacts of deep-level mining to research karst hydrology – a Darcy-based approach to predict the future of dried-up dolomitic springs in the Far West Rand goldfield (South Africa). Part 1: A conceptual model of recharge and inter-compartmental flow. *Environ Earth Sci*, DOI 10.1007/s12665-014-3263-0, pp 17.
- (60) Schrader, A.; Winde, F.; Erasmus, E. (2014b): Using impacts of deep-level mining to research karst hydrology – a Darcy-based approach to predict the future of dried-up dolomitic springs in the Far West Rand goldfield (South Africa). Part 2: Predicting inter-compartmental flow and final groundwater tables. *Environ Earth Sci*, DOI 10.1007/s12665-014-3298-2, pp 13.
- (61) Winde, F. (2010a): Uranium pollution of the Wonderfonteinspruit: 1997–2008. Part I: U-toxicity, regional background and mining-related sources of U-pollution. In: *Water SA*, 36 (3), pp 239–256.
- (62) Rürup, B. (2021): Hohe Ausgaben für „Geisterstrom“. *Handelsblatt*, 30.05.2021; <https://www.handelsblatt.com/politik/konjunktur/research-institute/ruerups-woche-hohe-ausgaben-fuer-geisterstrom/27169204.html>
- (63) Bloomberg (2022): Germany eyes a piece of South Africa’s new energy “gold rush”. 5th December 2022, [https://business.tech.co.za/news/energy/648853/germany-eyes-a-piece-of-south-africas-new-energy-gold-rush/?trk=organization\\_guest\\_main-feed-card\\_feed-article-content](https://business.tech.co.za/news/energy/648853/germany-eyes-a-piece-of-south-africas-new-energy-gold-rush/?trk=organization_guest_main-feed-card_feed-article-content)
- (64) Onyango, C. (2023): Europe’s growing interest in Africa’s green hydrogen potential. How we made it in Africa. 15th March 2023, <https://www.howwemadeitinafrica.com/europes-growing-interest-in-africas-green-hydrogen-potential/152002/>

#### Author / Autor

Dr. habil. Frank Winde, Wismut GmbH, Chemnitz/Germany, and North-West University, Potchefstroom/South Africa