

# Abschlussbericht zum Verbundvorhaben

## „MACHBARKEIT EINES UNTERTÄGIGEN PUMPSPEICHERWERKES AM BERGWERK PROSPER-HANIEL IN BOTTROP IN DER BERGBAUFOLGE“

BMWi, Projektträger Jülich, Förderkennzeichen: 03E T6100  
MWIDE NRW, Projektträger ETN, Förderkennzeichen: PRO 0063

Durchführungszeitraum: 01.08.2016 bis 31.12.2018

### Projektleitung

Universität Duisburg-Essen  
Fakultät für Ingenieurwissenschaften  
Abteilung Bauwissenschaften  
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft  
Prof. Dr.-Ing. André Niemann  
Universitätsstr. 15  
45141 Essen



*Offen im Denken*



Essen, 27. Juni 2019

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

Gefördert durch:

Ministerium für Wirtschaft, Innovation,  
Digitalisierung und Energie  
des Landes Nordrhein-Westfalen



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

PROJEKTPARTNER:

UNIVERSITÄT  
DUISBURG  
ESSEN

*Offen im Denken*

**INSTITUT FÜR WASSERBAU UND WASSERWIRTSCHAFT**

(AP 2.2, 2.5, AB 3)

**FACHGEBIET GEOLOGIE**

(AP 2.4)

---

**RUB**

**LEHRSTUHL ENERGIESYSTEME UND  
ENERGIEWIRTSCHAFT**

(AP 2.2, 2.3, 2.5, 2.6, 2.7, AB 3)

---

**RAG**

**RAG AKTIENGESELLSCHAFT**

(AB 1, AP 2.1, 2.2, 2.5, 2.7)

---

**DMT**

**DMT GMBH & Co. KG**

(AB 1, AP 2.1, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7)

---

**RISP**

**RHEIN-RUHR-INSTITUT FÜR SOZIALFORSCHUNG UND  
POLITIKBERATUNG E.V.**

(AP 2.8)

## Inhaltsverzeichnis

<b>Investitions- und Betriebskosten eines untertägigen Pumpspeicherwerkes</b>	<b>6</b>	
<b>1</b>	<b>Kostenmodell</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Kostengleitung</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Kostensätze der Komponenten</b>	<b>9</b>
3.1	Oberbecken	10
3.2	Kavernen	15
3.3	Maschinen	16
3.4	Ringspeicher	18
3.5	Infrastruktur	21
3.6	Sonstiges	27
<b>4</b>	<b>Betrachtete Varianten und Parameter</b>	<b>32</b>
<b>5</b>	<b>Bau- und Investitionskosten</b>	<b>36</b>
5.1	Baukosten bei variierenden Anlagenparametern	36
5.2	Spezifische Baukosten	38
5.3	Investitionskosten	41
<b>6</b>	<b>Laufende Kosten</b>	<b>43</b>
<b>7</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung</b>	<b>44</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Veranschaulichung der Best-/Average-/Worst-Case-Betrachtung in Abhängigkeit der Einzelparameter	7
Abbildung 2.1: Klassen der Kostenschätzung nach AACE	9
Abbildung 3.1: Gliederung der Baugruppen im Kostenmodell des UPSW	10
Abbildung 3.2: Querprofil vom Damm des projektierten Oberbeckens	11
Abbildung 3.3: Prinzipieller Aufbau eines Einlaufturms	13
Abbildung 3.4: Skizze des Ausleitungsbauwerks für den Ringspeicher	20
Abbildung 5.1: Baukosten der betrachteten Varianten und deren Spannweite	36
Abbildung 5.2: Anteile der sechs Hauptgruppen an den Gesamtbaukosten	37
Abbildung 5.3: Gesamtbaukosten bei variierenden Speicherparametern	38
Abbildung 5.4: Spezifische Baukosten bezogen auf die installierte Leistung	39
Abbildung 5.5: Spezifische Baukosten bezogen auf die Speicherkapazität	41

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Spezifische Kosten im Oberbecken	12
Tabelle 3.2: Pauschale Kostenpositionen für Elemente des Einlaufsturms	14
Tabelle 3.3: Kostensätze für den Bau der Kavernen	16
Tabelle 3.4: Elektro-Mechanische Kraftwerksausrüstung	17
Tabelle 3.5: Pauschale Kosten für die Maschinenausrüstung	17
Tabelle 3.6: Kostensätze für den Bau des Ringspeichers	19
Tabelle 3.7: Sonstige Kosten für den Ringspeicher	20
Tabelle 3.8: Kosten für die Nutzung der Bergbau-Infrastruktur	22
Tabelle 3.9: Kostenzusammensetzung für die Druckrohrleitung	22
Tabelle 3.10: Längen der aufzufahrenden Tunnel	24
Tabelle 3.11: Kostenauflistung der Triebwasserwege	25
Tabelle 3.12: Kosten einer 110 kV Stromleitung	26
Tabelle 3.13: Spezifische Kosten einer 380 kV Stromleitung	27
Tabelle 3.14: Anteil der Versicherungskosten an den Gesamtbaukosten	31
Tabelle 3.15: Pauschalkosten der Sicherheits- und Überwachungseinrichtungen	32
Tabelle 4.1: Vergleich von zwei Maschinenkonfigurationen	34
Tabelle 4.2: Hauptparameter der untersuchten Varianten	35
Tabelle 5.1: spezifische Kosten ausgewählter Pumpspeicherwerke	39
Tabelle 5.2: Prozentuale Verteilung der Baukosten während der Bauzeit	41
Tabelle 5.3: Investitionskosten der UPSW-Varianten	43
Tabelle 7.1: Benötigte jährliche Mindesteinnahmen der UPSW-Varianten für einen positiven Kapitalwert	45

<b>AP 2.3</b>	<b>Investitions- und Betriebskosten eines untertägigen Pumpspeicherwerkes</b>
Projektbearbeitung	<b>Ruhr-Universität Bochum Lehrstuhl Energiesysteme und Energiewirtschaft</b>

## Investitions- und Betriebskosten eines untertägigen Pumpspeicherwerkes

Innerhalb der Energiewirtschaft kann eine Technologie oder ein Konzept nur dann als erfolgreich angesehen werden, wenn sie am Markt rentabel ist. Um zu prüfen, ob das UPSW für einen Betreiber profitabel wäre, wird innerhalb dieses Kapitels eine umfassende Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt. Dabei werden, wie zunächst die Investitionskosten bestimmt. Diese umfassen den Barwert der Gesamtbaukosten im Jahr der Inbetriebnahme des UPSW [DAO15]. Anschließend werden die laufenden Kosten und die möglichen Einnahmen betrachtet.

### 1 Kostenmodell

Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie wurde unter anderem eine umfangreiche Betrachtung der Investitionskosten eines untertägigen Pumpspeicherwerks am Standort Prosper-Haniel durchgeführt. Hierzu wurde ein parametervariierendes Kostenmodell erstellt, das zahlreiche Einflüsse erfasst und daraus Investitions- und Betriebskosten für das UPSW ableitet.

Das Grundgerüst für dieses Modell bildet der Ansatz, die Baukosten nach [DAO15] in die Hauptgruppen Oberbecken, Unterbecken, Infrastruktur, Maschinen und Sonstiges zu gliedern und diese dann jeweils in weitere Untergruppen zu unterteilen. Die berücksichtigten Komponenten und Kostenpunkte werden in Kapitel 3 näher betrachtet. Innerhalb des Modells werden zwischen fixen und variablen Parametern unterschieden: Die variablen Parameter umfassen alle Größen, welche unmittelbar mit der Konfiguration des UPSW im Zusammenhang stehen. Dies sind zum Beispiel Volumen der Speicher, Anzahl der Maschinensätze oder Länge und Art der Anbindung an das Hochspannungsnetz. Als fixe Parameter werden die Größen eingeordnet, welche von der Anlagenkonfiguration unbeeinflusst sind. Beispielsweise sind dies spezifische Kostensätze für Beton oder Anbindungskosten für den Stromnetzanschluss.

Durch Änderung der variablen Parameter können verschiedene Ausführungen des UPSW berechnet werden. Da die Kostensätze der fixen Parameter meist als Funktion hinterlegt sind, können diese Varianten innerhalb definierter Grenzen fließend gewählt werden. So kann das Berechnungstool durch einfaches Eingeben der gewünschten Anlagenkonfiguration unterschiedliche Ausführungen mit Varianz in Speichervolumen, Fallhöhe, Anzahl und Art der Maschinensätze, Hochspannungsniveau, Durchmesser des Ringspeichers, Energieableitung, Zu-

gangsstollen, Form des Oberbeckens, Kavernengröße und anderen Optionen darstellen. Die innerhalb dieser Wirtschaftlichkeitsbetrachtung untersuchten Varianten werden in Kapitel 4 beschrieben. Im Kostenmodell werden auch die laufenden Kosten erfasst und berücksichtigt. Es können auch mögliche Einnahmen des UPSW eingetragen werden, sodass das Modell direkt den Kapitalwert errechnet. Auf diese Weise können Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit, welche durch Änderungen in der Konfiguration hervorgerufen werden, direkt sichtbar gemacht werden.

	Best-Case	Average-Case	Worst-Case
	Kostenposition 1	Kostenposition 1	Kostenposition 1
	Kostenposition 2	Kostenposition 2	Kostenposition 2
	Kostenposition 3 = $\text{Fix}_3 \times \text{Var}_3$	Kostenposition 3 = $\text{Fix}_3 \times \text{Var}_3$	Kostenposition 3 = $\text{Fix}_3 \times \text{Var}_3$
	Kostenposition 4 = $\text{Fix}_{4A} \times \text{Fix}_{4B} \times \text{Var}_4$	Kostenposition 4 = $\text{Fix}_{4A} \times \text{Fix}_{4B} \times \text{Var}_4$	Kostenposition 4 = $\text{Fix}_{4A} \times \text{Fix}_{4B} \times \text{Var}_4$
	Kostenposition 5 = $\text{Fix}_{5A} + \text{Fix}_{5B} \times \text{Var}_5$	Kostenposition 5 = $\text{Fix}_{5A} + \text{Fix}_{5B} \times \text{Var}_5$	Kostenposition 5 = $\text{Fix}_{5A} + \text{Fix}_{5B} \times \text{Var}_5$
	• • •	• • •	• • •
	Kostenposition N	Kostenposition N	Kostenposition N
$\Sigma$	Gesamtkosten	Gesamtkosten	Gesamtkosten

<span style="background-color: #90EE90; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> = Best-Case	<span style="background-color: #FF0000; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> = Worst-Case	<span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> = Fixe Parameter
<span style="background-color: #FFFF00; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> = Average-Case	<span style="background-color: #FFFFFF; border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> = übergreifend	<span style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 15px; height: 10px;"></span> = Variable Parameter

**Abbildung 1.1: Veranschaulichung der Best-/Average-/Worst-Case-Betrachtung in Abhängigkeit der Einzelparameter**

Aufgrund der Vielzahl zu ermittelnder Kostenpositionen stammen die Quellen aus unterschiedlichen Zeiträumen. Um die Preissteigerung zu berücksichtigen, werden die Werte mithilfe der Inflationsraten [SBA18] auf das Jahr 2018 normiert. Die meisten ermittelten Kostensätze sind nicht auf einen konkreten Wert festzulegen, daher wird die vorliegende Abschätzung mit einer Kostenspreizung berechnet. Dazu werden innerhalb des Modells die vorteilhaftesten, durchschnittlichen und unvorteilhaftesten Werte in einer je eigenen Worst-Case-, Best-Case- und Average-Case-Variante berücksichtigt. In Abbildung 1.1 wird dieses Vorgehen schematisch verdeutlicht. Darin sind die Parameter und Kostenpositionen, welche eine Kostengleitung aufweisen, nach dem Ampelprinzip farblich gekennzeichnet; fallübergreifende Punkte sind farblos. Innerhalb der Skizze werden verschiedene Arten aufgezeigt, wie sich die Kostenvarianz der Einzelparameter auf die Kostenpositionen und die Gesamtkosten auswirken. Die Varianz der einzelnen Kostenpunkte kann verschiedene Ursachen haben. Auf die Berücksichtigung dieser Kostengleitung wird im folgenden Kapitel 2 weiter eingegangen.

## 2 Kostengleitung

Die Kostenermittlung der einzelnen Komponenten ist mit einer gewissen Unsicherheit verbunden. Daher wird für jede Kostenposition, wie im vorangegangenen Kapitel 1 beschrieben, eine monetäre Spannweite in das Modell eingegeben. Wenn im Rahmen der Kostenrecherche mehrere plausible Werte ermittelt werden konnten, so bildet der jeweils minimale und maximale Wert die Grenzen der Spanne. Der arithmetische Mittelwert aller Werte gibt den Average-Case an. Dieses Vorgehen ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn die Abweichung der einzelnen Zahlen voneinander nicht übermäßig groß ist. In einigen Fällen wurden für das Kostenmodell Werte aus Industrieerfahrungen gewählt. In diesen Fällen wird die Kostenspanne der Industriepartner übernommen. Liegt nur ein Wert und keine bekannte Varianz vor, so wird die Gleitung in Anlehnung an AACE (Association for Advancement of Cost Engineering) gewählt. In dieser Schätzmethode werden die Phasen der Kostenschätzung ihrem Reifegrad entsprechend in fünf Klassen eingeteilt. Der Vorteil dieser Einteilung liegt in der Genauigkeit jeder Klasse bezüglich ihrer Komplexitätsbestimmung und der Berücksichtigung eines passenden Eventualitätsschlusses. Abbildung 2.1 zeigt die Einteilung eines Projektes in diese fünf Klassen. [LEN15]

Da das UPSW aus vielen Segmenten besteht, wird jede Einzelkomponente als eigenes Projekt aufgefasst und individuell bewertet. Beispielweise sind marktbekannte Bauteile wie Aufzuganlagen oder Motorgeneratoren in einer genaueren Klasse einzustufen, als die mit vielen Unsicherheiten behafteten Tunnelvortriebsarbeiten. Die Beschreibung des Projektfortschrittes wurde dementsprechend auf die jeweilige Kostenposition angewandt. Mithilfe dieses Vorgehens, kann eine genauere Kostengleitung für die Baugruppen und somit für die Gesamtkosten festgelegt werden. Der jeweils gewählte Typ der Kostengleitung wird im Kapitel 3 bei der Beschreibung der Komponenten aufgeführt.



Klasse der Kostenschätzung	Projektfortschritt	Genauigkeit untere Grenze	Genauigkeit obere Grenze
<b>Class 5</b> estimate (order of magnitude estimate/ratio estimate)	Beabsichtigter Anlagentyp, Standort, Kapazität; Projekt ist zu weniger als 2 % definiert	-20 % bis -50 %	+30 % bis +100 %
<b>Class 4</b> estimate (study estimate/factored estimate)	Block und Grundfließbild, vorläufige Equipment-Liste; Engineering bis zu 1 % bis 5 % abgeschlossen	-15 % bis -30 %	+20 % bis +50 %
<b>Class 3</b> estimate (preliminary estimate/budget authorization estimate)	Fließbilder für Prozess und Hilfsmittel, vorläufige Verfahrensfließbilder, Auslegung wichtigstes Equipment abgeschlossen; Projekt ist zu 10 % bis 40 % definiert	-10 % bis -20 %	+10 % bis +30 %
<b>Class 2</b> estimate (definitive estimate/project control estimate)	Verfahrensfließbilder, Bilanzen, Aufstellungsplan, Equipment-Liste komplett, E-Technik Pläne, Händlerangebote, Arbeitspläne; Engineering zu 30 % bis 70 % abgeschlossen	-5 % bis -15 %	+5 % bis +20 %
<b>Class 1</b> estimate (detailed estimate/contractors estimate)	Dokumentation, Projektdurchführung und Planung der Inbetriebnahme abgeschlossen; Engineering zu 50 % bis 100 % abgeschlossen	-3 % bis -10 %	+3 % bis 15 %

Abbildung 2.1: Klassen der Kostenschätzung nach AACE [LEN15]

### 3 Kostensätze der Komponenten

Gemäß Kapitel 1 werden für das Rechenmodell die Komponenten des UPSW in sechs Hauptgruppen unterteilt: Oberbecken, Speicherring, Infrastruktur, Kavernen, Maschinen und Sonstiges. Diese werden in weitere Untergruppen gegliedert, wie in Abbildung 3.1 dargestellt. Folglich summieren sich die Kosten der Hauptgruppen zu den gesamten Baukosten:

$$\begin{aligned}
 K_{Bau} = & K_{Maschinen} + K_{Kavernen} + K_{Oberbecken} \\
 & + K_{Ringspeicher} + K_{Infrastruktur} + K_{Sonstiges}
 \end{aligned}
 \quad (3.1)$$

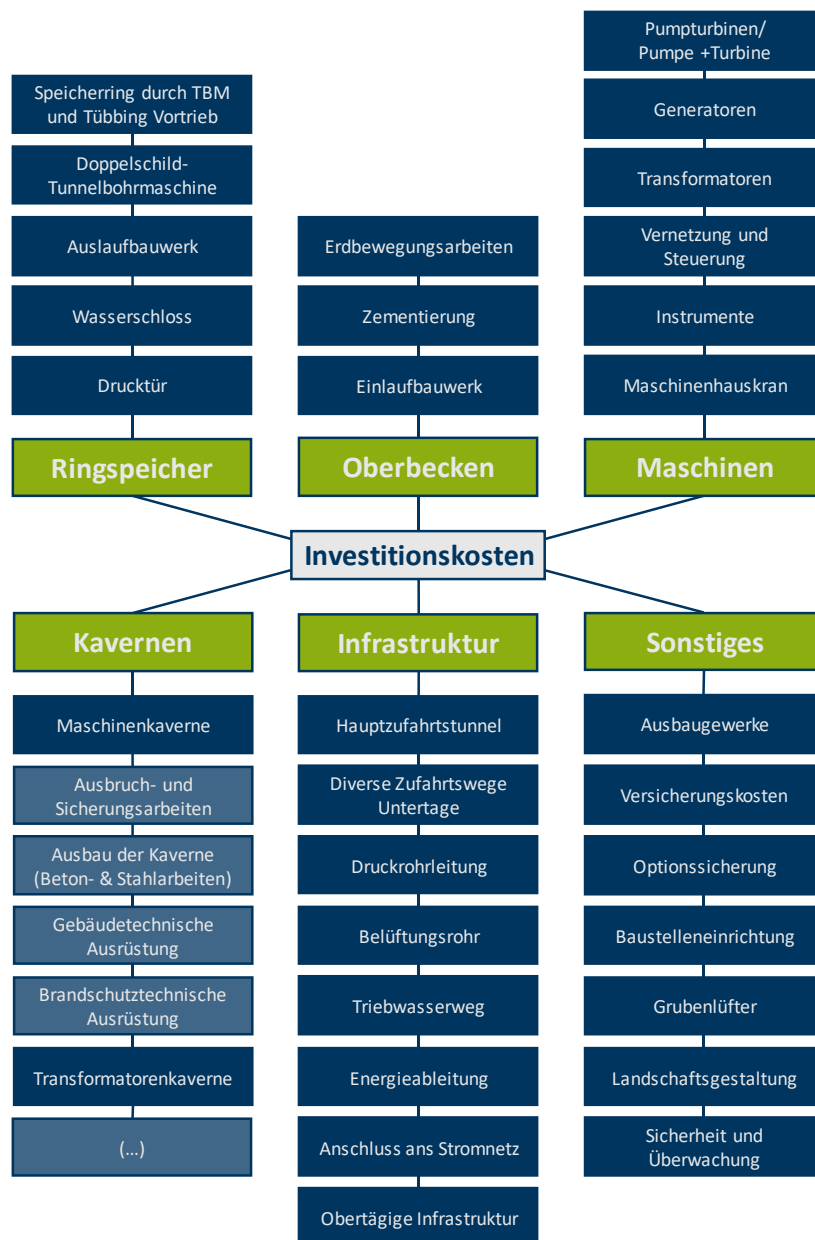


Abbildung 3.1: Gliederung der Baugruppen im Kostenmodell des UPSW

Im Folgenden wird nun auf die einzelnen Komponenten, ihre Kostenfunktionen und die gewählte Kostengleitung eingegangen.

### 3.1 Oberbecken

In einem Pumpspeicherwerk dient das Oberbecken zur Wasserspeicherung oberhalb der Turbine. Es wird während des Turbinierens entleert und während des Pumpens gefüllt. Üblicherweise sind Oberbecken als künstliche Becken ausgeführt und in ihrem schematischen Aufbau

meist identisch. Sie bestehen aus Schüttdämmen mit Abdichtung, Verschlussystemen, Rohrleitungen sowie Kontrollgängen [JEH05]. Das Oberbecken eines UPSW Prosper-Haniel wäre auf dem ehemaligen Zechengelände oberhalb der Kavernen verortet. Aufgrund seiner übertägigen Lage stellt es den trivialsten Baubereich dar. Üblicherweise werden Oberbecken so flach wie möglich ausgeführt, um große Schwankungen des Wasserspiegels zu vermeiden [HOE13]. Am projektierten Standort wird das Speicherbecken aber durch die Beschaffenheit des Geländes eingeschränkt und steht in Konkurrenz zu einer gewerblichen Nutzung. Der Verlauf des Dammes kann jedoch flexibel gewählt werden, was eine Anpassung vereinfacht.

Der Grundwasserspiegel auf dem Gelände liegt knapp unterhalb der Oberfläche, daher kann das Oberbecken nicht wie ein künstlicher See gegraben und somit in das Gelände integriert werden. Vielmehr sorgt ein umlaufender homogener Schüttdamm für das benötigte Speichervolumen. Dieser kann aus logistischen und ökonomischen Gründen aus dem Abraum der untertägigen Arbeiten gebildet werden. Die Aufschüttung und Verdichtung des Dammes verursacht Kosten, welche annähernd proportional zum bewegten Erdvolumen sind.

Abhängig von der Beschaffenheit des Untergrundes kann es notwendig sein, die wasserführende Oberfläche des Speicherbeckens zur Vermeidung von Erosion und Sickerverlusten abzudichten. Im Bereich der Pumpspeicherwerke hat sich weltweit die Asphaltbetondichtung durchgesetzt [STR06]. Diese können, trotz der täglich mehrmaligen Wechsel zwischen Befüllung und Entleerung der Becken, eine Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten erreichen. Abbildung 3.2 skizziert den homogenen Erdschüttdamm inklusive Asphaltbetondichtung für das UPSW. Die Böschungsneigung ist üblicherweise bei einem Verhältnis von 1,6:1,0–2,0:1,0 angesetzt.

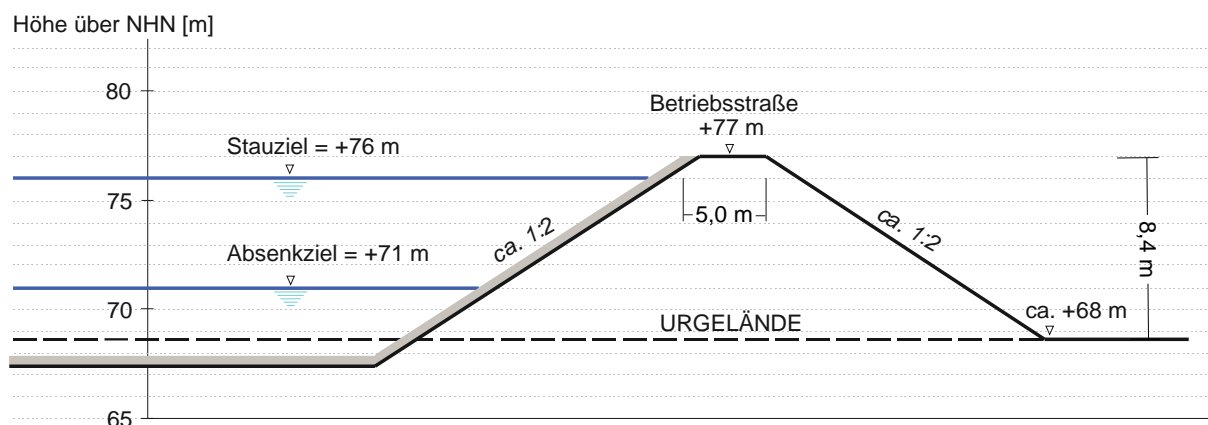


Abbildung 3.2: Querprofil vom Damm des projektierten Oberbeckens [ILF17B]

Die Gesamtkosten des Oberbeckens errechnen sich wie folgt:

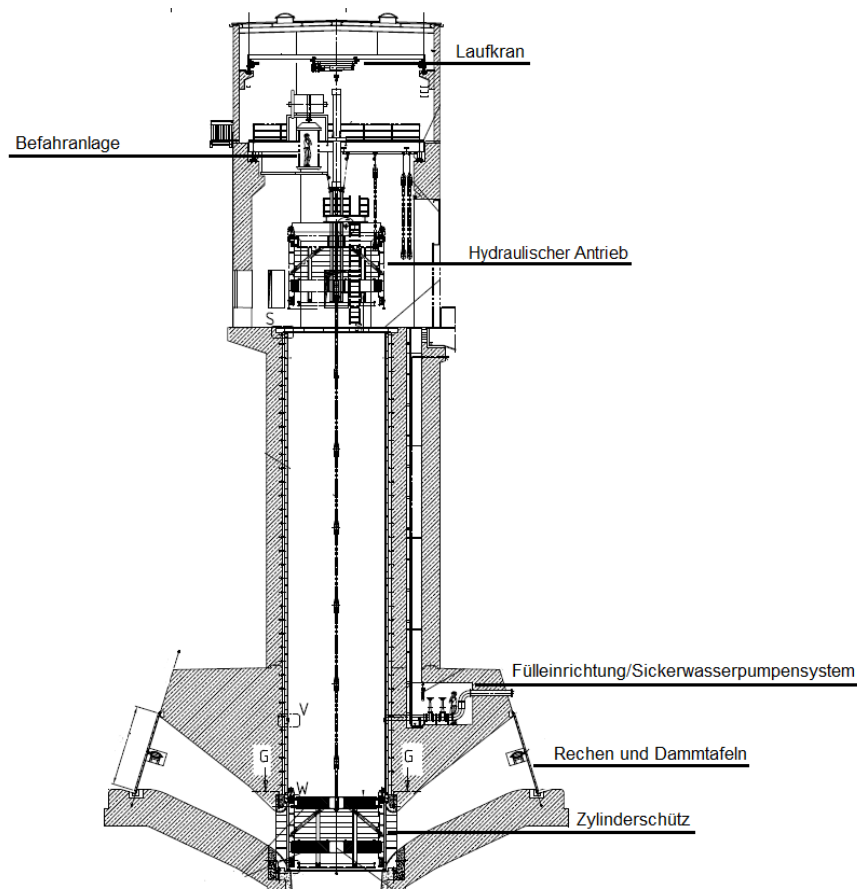
$$K_{Oberbecken} = k_{Erd} \cdot V_{Damm} + k_{dicht} \cdot O_{OB} + K_{EB} \quad (3.2)$$

Dabei ist  $V_{Damm}$  das Volumen des Dammes in  $m^3$  und  $O_{OB}$  die abzudichtende Oberfläche in  $m^2$  welche je nach Ausführung und Lage des Oberbeckens variieren. Die spezifischen Kosten für die Erdbewegungsarbeiten  $k_{Erd}$  in Euro je Kubikmeter und für die Oberflächenabdichtung  $k_{dicht}$  wurden in [HOE14] recherchiert zu:

**Tabelle 3.1: Spezifische Kosten im Oberbecken**

Spezifische Kosten	Variable	Best-Case	Average-Case	Worst-Case
Erdbauarbeiten	$k_{Erd}$	6 €/m <sup>3</sup>	12 €/m <sup>3</sup>	16 €/m <sup>3</sup>
Abdichtung	$k_{dicht}$	55 €/m <sup>2</sup>	115 €/m <sup>2</sup>	150 €/m <sup>2</sup>

Die Kosten  $K_{EB}$  bezeichnen die Kosten des Einlaufbauwerks, welches den Wasserzufluss oberwasserseitig kontrolliert und die Maschinen vor Verschmutzung bewahrt. Es kann an beliebiger Stelle innerhalb des Oberbeckens platziert werden. In Abbildung 3.3 wird der prinzipielle Aufbau eines Einlaufturms skizziert, wie er auch beim UPSW zum Einsatz kommen könnte.



**Abbildung 3.3: Prinzipieller Aufbau eines Einlaufturms [NOE13]**

Wie der Abbildung 3.3 entnommen werden kann, wird das Einlaufbauwerk aus Kostensicht in folgende Positionen gegliedert [ALB13]:

- Zylinderschütz
- Hydraulischer Antrieb des Zylinderschützes
- Fülleinrichtung/Sickerwasserpumpensystem
- Brückendrehlaufkran (dient Montage- und Wartungsarbeiten)
- Befahranlage (dient der Inspektion des Einlaufturms und des vertikalen Schachtes bis ca. 10 m unter dem Zylinderschütz)
- Einlaufrechen
- Dammtafel

Die einzelnen Komponenten des Einlaufbauwerks lassen sich wiederum in weitere Unterpositionen gliedern. Für genauere Kostenangaben zu den einzelnen Komponenten wird auf [ALB13] verwiesen. Die Gesamtkosten des Einlaufbauwerks addieren sich zu:

$$K_{EB} = K_{ZS} + K_{Hyd} + K_{ER} + K_{FS} + K_{BK} + K_{Bef} + K_{DT} \quad (3.3)$$

Die Kostenfunktion des Zylinderschützes, welches dazu dient, die Druckrohrleitung von oben komplett zu verschließen, wurde ermittelt zu:

$$K_{ZS} = (638.084) \cdot \frac{h_Z}{4} \cdot \frac{D_{DR} + 0,7}{4,5 + 0,7} \quad [€] \quad (3.4)$$

Diese ist abhängig von der Höhe des Zylinderschützes  $h_Z$  und dem Durchmesser der Rohrleitung  $D_{DR}$ , welche an diesem anliegt. Das Zylinderschütz wird über einen hydraulischen Antrieb angehoben und abgesenkt. Die Kosten für den Antrieb sind abhängig vom Gewicht:

$$K_{Hyd} = 345.000 + \left( 363.748 \cdot \frac{h_Z}{4} \cdot \frac{D_{DR} + 0,7}{4,5 + 0,7} \right) \quad [€] \quad (3.5)$$

Die Kosten des Einlaufrechens, welcher größere Fremdkörper aus dem Triebwasser aussiebt, ist abhängig von der Gesamtfläche  $A_{ER}$  seiner einzelnen Elemente:

$$K_{ER} = 2628 \cdot A_{ER} \quad [€] \quad (3.6)$$

Die Einlaufrechen können zu Wartungsarbeiten über die Dammtafeln verschlossen werden. Die Kostenkalkulation dieser Bauteile erfolgt analog zu den Einlaufrechen über die Gesamtfläche  $A_{DT}$  der Verschlusselemente:

$$K_{DT} = 3439 \cdot A_{ER} \quad [€] \quad (3.7)$$

Die Kosten für Fülleinrichtung und Sickerpumpen, der Befahranlage sowie des Brückendrehlaufkrans sind weitgehend unabhängig von der Größe des Einlauffturms. Die Pauschalpreise sind in Tabelle 3.2 aufgeführt:

**Tabelle 3.2: Pauschale Kostenpositionen für Elemente des Einlauffturms**

Kostenposition	Pauschalkosten
Fülleinrichtung und Sickerpumpensystem	100.000 €
Befahranlage	110.000 €

Brückendrehlaufkran	95.000 €
---------------------	----------

### 3.2 Kavernen

Die Maschinenkaverne dient vor allem der Unterbringung von Pumpen, Turbinen (ggf. Pumpturbinen) und Generatoren. Die Transformatoren sind in einer eigenen Kaverne, der Transformatorenkaverne untergebracht. Nach dem Ausbruch der Hohlräume aus dem Gestein wird eine umfangreiche Sicherung durch Stahlanker und einen dicken Stahlbetonmantel vorgenommen. Diese Maßnahmen sollen dem bestehenden Gebirgsdruck und somit einer Verformung der Kavernen entgegenwirken. Dies ist insbesondere wichtig, da bei einer Positionsänderung die hochpräzisen Wellen, Turbinen und Generatoren in Kombination mit den schnellen Drehbewegungen beschädigt werden können. Anschließend wird die Kaverne weiter mit Stahlbeton ausgebaut und so zu einem Rohbau gewandelt. Es folgt eine Ausrüstung mit Gebäudetechnik (z.B. Stahltore, Traversen, Leitwarte, Geländer). Aufgrund der unterirdischen Lage und der damit verbundenen Gefahren wird der Einbau umfassender Brandschutztechnik wie Handfeuerlöscher, Brandmeldetechnik, Inertgaslöschanlagen, Feuerschotte und Entrauchungsanlagen erforderlich. Zur Wartung und Transport der Maschinen wird ein Deckenkran mit hoher Tragkraft verbaut. Die Gesamtkosten für Errichtung und Ausbau dieser Hohlräume setzen sich insgesamt zusammen aus den Kosten für:

- Ausbruch- und Sicherungsarbeiten
- Ausbau der Kaverne (Beton- und Stahlarbeiten)
- Gebäudetechnische Ausrüstung
- Brandschutztechnische Ausrüstung
- Kräne

Da diese Positionen hauptsächlich vom Volumen der Kaverne abhängen, können zur Berechnung der Gesamtkosten spezifische Kosten herangezogen werden, wie in Gleichung 3.8 aufgeführt:

$$K_{Kavernen} = (V_{MK} + V_{TK}) \cdot (k_{AS} + k_{BS} + k_{GT} + k_{BT}) + K_K \quad (3.8)$$

Dabei bezeichnet  $V_{MK}$  das Ausbruchvolumen der Maschinenkaverne und  $V_{TK}$  das Volumen der Transformatorenkaverne. Die angesetzten spezifischen Kostensätze und Kosten für die Krananlage basieren auf Erfahrungswerten vom Anlagenplaner ILF und betragen für beide Kavernen [ILF18]:

**Tabelle 3.3: Kostensätze für den Bau der Kavernen [ILF18]**

Bezeichnung	Variable	Kosten
Ausbruch- und Sicherungsarbeiten	$k_{AS}$	117 €/m <sup>3</sup>
Beton- und Stahlarbeiten	$k_{BS}$	254 €/m <sup>3</sup>
Gebäudetechnische Ausrüstung	$k_{GT}$	32 €/m <sup>3</sup>
Brandschutztechnische Ausrüstung	$k_{BT}$	32 €/m <sup>3</sup>
Krananlage	$K_K$	288.400 €

Als Kostengleitung wird aufgrund der großen Unsicherheiten bezüglich Baustatik und Ausbau eine Bandbreite von -15 % bis +25 % gemäß Klasse 5 der Kostenschätzungsrichtlinie AACE gewählt (s. Kapitel 2).

### 3.3 Maschinen

Die bedeutendsten und kostenintensivsten Maschinen in einem Pumpspeicherwerk sind die Transformatoren, die Motor-Generatoren sowie die Turbinen und Pumpen bzw. die Pumputurbinen. Zusätzlich werden diverse Hilfssysteme benötigt. In der folgenden Auflistung sind alle relevanten Komponenten der elektro-mechanischen Kraftwerksausrüstung aufgeführt, mit den zwei verschiedenen Turbinenausführungen [ILF18]:



**Tabelle 3.4: Elektro-Mechanische Kraftwerksausrüstung [ILF18]**

<b>Bezeichnung</b>		<b>Anzahl</b>
Pumpe	Pumpturbine	3
Turbine		3
Motor-Generator		3
Absperroorgane (jeweils Saug- und Druckkugelschieber)		6
Mechanische Hilfs- und Nebensysteme		
<i>EPS (Electric Power System):</i>		
Anfahrumsrichter		1
Einphasen-Maschinentrafo		9
Generatorschaltanlage		3
Erregungssystem		3
EB-Transformator		3
Mittelspannungs-Anlage		3
Niederspannungs-Verteilung, 400V		1
Gleichstrom-Batterieanlage, 110V		1
SCADA (automatisierte Überwachung und Steuerung)		1
Verkabelung		

Da im projektierten UPSW nur konventionelle Technik zum Einsatz kommen soll, können auch für die Maschinentechnik Erfahrungswerte vergangener Projekte angesetzt werden. Diese summieren sich für ein 200 MW-Pumpspeicherwerk je nach Turbinenart zu [ILF18]:

**Tabelle 3.5: Pauschale Kosten für die Maschinenausrüstung**

	<b>Ternärer Maschinensatz</b>	<b>Pumpturbine</b>
<b>Kosten</b>	103.000.000 €	147.084.000 €

Soll eine Anlagenkonfiguration mit abweichender Leistung berechnet werden, kann von einem annähernd linearen Zusammenhang zwischen Maschinenleistung und den Anschaffungskosten dieser Hauptgruppe ausgegangen werden [HOE13]. Aufgrund der fortgeschrittenen Planung und Sicherheit für diese Baugruppe wird für die Kostengleitung ein Band von -10 % bis +10 % nach Klasse 3 der AACE-Richtlinie gewählt.

### 3.4 Ringspeicher

In Anlehnung an das klassische Pumpspeicher-Konzept stellt der Ringspeicher das Unterbecken dar; es dient somit zur Speicherung des Triebwassers bei niedriger potentieller Energie. Beim UPSW ist der untere Speicher als zum Ring geschlossener Tunnel ausgeführt, da nur auf diese Weise ein derart großer, geologisch stabiler Hohlraum gebildet werden kann [UPW14]. Darüber hinaus kann das Volumen so mit klassischer Tunnelbau-Vortriebstechnik installiert werden. Im Projektverlauf der Machbarkeitsstudie UPSW hat sich dabei ein Auffahren durch eine geschildete Tunnelbohrmaschine (TBM) als Vorzugslösung ergeben. Bei diesem Verfahren wird der gebildete Hohlraum unmittelbar hinter dem Bohrkopf durch Stollenauskleidung, den sogenannten Tübbing, stabilisiert. Diese erhöht auch die Abdichtung gegenüber dem umgebenen Gebirge.

Im Lauf der Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass der Anteil des Ringspeichers an den Gesamtbaukosten aufgrund der hohen spezifischen Kosten und der projektierten Tunnellänge von etwa 15 km sehr groß sein wird. Dementsprechend detailliert muss die Betrachtung dieser Baugruppe erfolgen. Der Arbeitsaufwand und damit die spezifischen Kosten von Tunnelbauvorhaben sind jedoch starken Unterschieden unterworfen. Durch die zahlreichen Wechselwirkungen zwischen Gebirge und Hohlraumbauwerk ist dieser schwer vorhersehbar. Die hohe Anzahl an Parametern ist einer ausgeprägten statistischen Streuung unterworfen, welche eine höhere Unsicherheit aufweist als in anderen Baudisziplinen wie dem Brücken- oder Hochbau. [GIR13]

Hinsichtlich der Kostenkalkulation der Tunnelvortriebsarbeiten sind unter der geschilderten Problematik erhebliche Projektrisiken in Bezug auf die Einhaltung geschätzter Kostenwerte verbunden. Auch in der Literatur sind nur wenige, fundierte Kostenangaben zu dieser Thematik zu finden. Jede Tunnelbaustelle ist gewissermaßen einzigartig und unterscheidet sich durch die Standortgegebenheiten und dem Bauvorhaben von anderen Tunnelbauprojekten. Insofern ist die Generalisierung über spezifische Kostensätze nur eingeschränkt sinnvoll, da sie selten auf andere Projekte übertragen werden können. [SCH18]

Aus diesem Grund wurde der Kontakt zu deutschen und österreichischen Tunnelbauunternehmen gesucht, da nur mit Erfahrungswerten und geeignetem Fachwissen eine fundierte Kostenschätzung gelingen kann. Hieraus entstand eine Zusammenarbeit mit dem Bauunternehmen *Baresel* aus Leinfelden-Echterdingen, die in [SCH18] dokumentiert wird.

Die Kosten für den Tunnelbau setzen sich aus einem fixen Anteil sowie einem variablen Anteil zusammen. Der fixe Anteil entsteht durch die Baustelleneinrichtung sowie das benötigte Förderband und die Schachanlage, durch die das Ausbruchmaterial abtransportiert werden kann. Zusätzlich wird eine Tunnelbohrmaschine benötigt, die speziell für das Vorhaben angeschafft wird. Der variable Anteil der Kosten setzt sich aus den Personalgemeinkosten, den Lohnkosten

sowie den Kosten für Tübbingausbau und Baustoffe zusammen. Die von Baresel ermittelten Kostensätze sind in Tabelle 3.6 aufgeführt [BAR18].

**Tabelle 3.6: Kostensätze für den Bau des Ringspeichers [BAR18]**

<b>Position</b>	<b>Kosten</b>
Personalgemeinkosten	1.133 €/m
Lohnkosten	2.600 €/m
Tübbingausbau	5.167 €/m
Baustoffe	1.733 €/m
<b>Summe der variablen Kosten</b>	<b>10.633 €/m</b>
Baustelleneinrichtung	15.000.000 €
Tunnelbohrmaschine	20.000.000 €
Förderband und Schachtanlage	24.000.000 €
<b>Summe der Fixkosten</b>	<b>59.000.000 €</b>

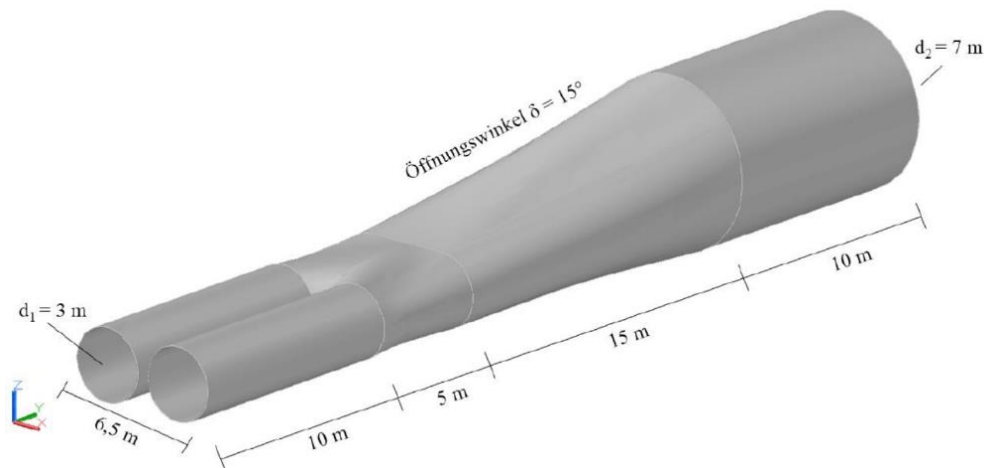
Folglich errechnen sich die Tunnelbaukosten für einen Ringspeicher mit der Länge  $l_{RS}$  nach Gleichung 3.9:

$$K_{Tunnel} = 59.000.000 \text{ €} + l_{RS} \cdot 10.633 \text{ €/m} \quad (3.9)$$

Diese Angaben wurden jedoch für eine projektierte Länge von 15.500 m und für das gegebene geologische Profil ermittelt, weswegen eine Skalierung der Länge nur begrenzt möglich ist. Zudem setzen die aufgeführten Werte einen reibungslosen Bauablauf voraus und stellen somit das Best-Case-Szenario dar. Aufgrund der einschlägigen Erfahrung von Baresel und dem verhältnismäßig guten geologischen Kenntnisstand wird für die Kostengleitung eine Bandbreite von -10 % bis +10 % nach Klasse 3 der AACE-Richtlinie gewählt.

Neben dem eigentlichen Speicherring werden für den Betrieb als Unterbecken noch weitere Komponenten benötigt, welche aufgrund der Unwägbarkeit mit -15 % bis +20 % nach der Klasse 4 der AACE-Richtlinie abgeschätzt werden. Für einen hydraulisch beherrschbaren Ein- und Austrag des Wassers aus dem Unterbecken wird ein Ein-/Ausleitungsbauwerk benötigt. Dieses ist so gestaltet, dass die ausströmenden Wassermassen während des Turbiniervorgangs aus dem Druckrohr geleitet werden und keine Beschädigung des Tunnels hervorrufen. Gleichzeitig soll das Arbeitsmedium beim Pumpvorgang störungsarm und luftfrei in die Druckrohre

gelangen. Abbildung 3.4 zeigt das im Rahmen der ersten Machbarkeitsstudie entwickelte Modell. Im Gegensatz zum Einlaufturn im Oberbecken wäre dieses Bauwerk simpel aufgebaut und würde aus einer Stahlbetonkonstruktion mit vormontierten Einlaufrechen bestehen. Diese beiden Kostenpunkte werden größenskaliert vom Einlaufturn übernommen. [UPW14A]



**Abbildung 3.4: Skizze des Ausleitungsbauwerks für den Ringspeicher [UPW14A]**

Um den Speicherring zwecks Wartung befahren zu können, ist eine Drucktür vorgesehen, welche den wasserführenden Teil von den Kavernen abtrennt. Aufgrund der Einzigartigkeit des Ringspeichers und dem daraus resultierenden Mangel an Daten, muss für die Kosten der Drucktür angenommen werden, dass sie denen des Zylinderschützes vom Oberbecken ähneln.

Da im unteren Speicher Druckstöße auftreten können [ILF17A], wurde errechnet, dass dort ein Wasserschloss installiert werden muss, um diese abzdämpfen. Dieser lotrechte Schacht ist Stand der Technik bei Pumpspeicherwerken und wird mit dem Raise-Boring-Verfahren realisiert. Der Kostenaufwand wurde von ILF geschätzt und ist in Tabelle 3.7 zusammen mit den weiteren sonstigen Kosten des Ringspeichers aufgeführt [ILF18].

**Tabelle 3.7: Sonstige Kosten für den Ringspeicher**

Bezeichnung	Variable	Kosten
Auslaufbauwerk	$K_{AB}$	1.223.500 €
Wasserschloss	$K_{WS}$	808.600 €
Drucktür	$K_{DR}$	102.700 €

Die Gesamtkosten für den Ringspeicher summieren sich insgesamt zu:

$$K_{Ringspeicher} = K_{Tunnel} + K_{AB} + K_{WS} + K_{DR} \quad (3.10)$$

### 3.5 Infrastruktur

Die Hauptgruppe Infrastruktur umfasst sämtliche Zufahrtswege, Wasserwege sowie die Energieableitung. Die Kosten der Infrastruktur ergeben sich aus den summierten Kosten der folgenden Untergruppen:

- Ertüchtigung der Grubenbauwerke
- Hauptzufahrtstunnel
- Diverse Zufahrtswege Untertage
- Druckrohrleitung
- Belüftungsrohr
- Betonhinterfüllung Druckrohrleitung
- Triebwasserweg
- Energieableitung Untertage
- Anschluss an das Stromnetz
- Straßen und Wege Obertage
- Aufzuanlagen

#### Ertüchtigung der Grubenbauwerke

Die Nutzung der Grubengebäude des Bergwerkstandorts Prosper-Haniel hat viele Vorzüge. Hierzu müssen die vorhandenen Grubengebäude beim Abwerfen der Zeche ertüchtigt werden, was für den Betreiber RAG zusätzliche Kosten verursacht. Dies umfasst das Entfernen bergbauspezifischer Installationen, die sogenannte *Raubung*, die Installation und Ertüchtigung explosionsgeschützter Dämme sowie weiterer Maßnahmen. Je nachdem, ob der vorhandene Schrägschacht in das Konzept integriert wird, entstehen für die Ertüchtigung unterschiedliche Kosten (Tabelle 3.8 [RAG18]).

Soll der Förderberg als Zufahrt bestehen bleiben, so muss er mit einem 3,9 km langen Verbindungstunnel an die Kavernen angeschlossen werden. Dieser kann nicht mit einer TBM angelegt werden, sondern muss mit dem teureren Sprengvortrieb errichtet werden. Alternativ wird der bestehende Förderberg abgeworfen und als Zugang wird ein neuer, um 10 % geneigter und 5,9 km langer Schrägschacht geschaffen, welcher direkt zur Kaverne führt. Dieser Zufahrtstunnel kann mit der Tunnelbohrmaschine aufgefahren werden, welche beim Bau des Ringspeichers zum Einsatz kommt, was zu einer Verringerung der Vortriebskosten führt. Weitere Kosten in Höhe von 3 Millionen Euro werden zudem eingespart, da bei dieser Variante die TBM nicht

aufwendig untertägig montiert werden müsste. Die nötigen Investitionen der verschiedenen Zugangsarten sind in Tabelle 3.8 erfasst [BAR18]:

**Tabelle 3.8: Kosten für die Nutzung der Bergbau-Infrastruktur [RAG18, BAR18]**

	Mit Förderberg	Ohne Förderberg
Ertüchtigung Grubengebäude	26.440.000 €	17.040.000 €
Zufahrtstunnel	92.211.000 €	85.448.000 €

### Druckrohrleitung und Belüftungsrohr

Für den Betrieb eines Pumpspeicherwerks ist die Druckrohrleitung die zentralste Infrastruktur. Sie verbindet die Turbinen mit dem Einlaufbauwerk des Oberbeckens. Bei der angepeilten Vollast von 200 MW werden bei einer Fallhöhe von 520 m rund 40 t Wasser jede Sekunde durch das rund 590 m lange Druckrohr geleitet. Dies führt zu einer großen Druckbelastung für die Leitung. Auch das umgebene Gebirge übt Druck aus. Daher ist die Druckrohrleitung mit Stahl gepanzert und mit Beton hinterfüllt.

Bei einem konventionellen Kavernenkraftwerk muss der Schacht für den vertikalen Triebwasserweg erst aufwendig in die Erde getrieben werden. Bei dem Standort Prosper-Haniel werden jedoch die bestehenden Schächte genutzt, weshalb diese Kosten entfallen. Für den projektierten Kavernenstandort würden die insgesamt drei benötigten Schächte nach [SCH18] Mehrkosten in Höhe von 41,4 Millionen Euro bedeuten.

Der Schacht Haniel 1, in welchem die Druckrohrleitung vorgesehen ist, soll zusätzlich für die Be- und Entlüftung des Ringspeichers dienen, weswegen zwei Leiter parallel verlaufen. In diesem Abschnitt werden daher Druckrohrleitung und Belüftung zusammen betrachtet. Die Kosten für die Druckrohrleitung setzen sich zusammen aus einem fixen Anteil für die Baustelleneinrichtung sowie spezifischen Kosten für Engineering, Fertigung, Transport, Montage und Material. Die Materialkosten hängen von der eingesetzten Stahlsorte ab, welche bei der vorliegenden Betrachtung als S460ML angenommen wird. Die Kostensätze der Druckrohrleitung mit einem Gesamtgewicht von  $m_D$  [in t] werden in der folgenden Tabelle 3.9 aufgeführt [ALB13]:

**Tabelle 3.9: Kostenzusammensetzung für die Druckrohrleitung [ALB13]**

Kostenposition	Kosten
Baustelleneinrichtung	3.500.000 €
Engineering	220 €/t
Fertigungskosten	1.350 €/t
Transportkosten	180 €/t

Montagekosten	2.100 €/t
Materialkosten (S460ML)	1.170 €/t

Ableitend errechnen sich die Kosten für die Druckrohrleitung aus der Summe der spezifischen Einzelkosten zu:

$$K_{Dr} = 3.500.000 + m_D \cdot 5.020 \quad [€] \quad (3.11)$$

Die Druckrohrleitung mit der Länge  $L_{Dr}$ , dem Nenndurchmesser  $D_{Dr}$  und der Blechdicke  $b_{Dr}$  kann als hohler Zylinder angesehen werden. Daher kann das Gesamtgewicht über geometrische Beziehungen und der Dichte von Stahl  $\rho_{St}$  hergeleitet werden:

$$m_{Dr} = \left( \left( \frac{D_{Dr} + 2 \cdot b_{Dr}}{2} \right)^2 - \left( \frac{D_{Dr}}{2} \right)^2 \right) \cdot \pi \cdot \rho_{St} \cdot L_{Dr} \quad [t] \quad (3.12)$$

Auch das Belüftungsrohr wird durch den umgebenden Gebirgsdruck belastet, daher ist es ebenfalls gepanzert. Hier entfällt allerdings der hohe Wasserdruck, weswegen es insgesamt dünnwandiger ausfallen kann. Die Kosten für das Belüftungsrohr mit dem Nenndurchmesser  $D_{Br}$  errechnen sich äquivalent zu denen der Druckrohrleitung. Druckrohrleitung und Belüftungsrohr sollen in den gleichen Schacht untergebracht werden, weshalb sich das benötigte Volumen für die Betonhinterfüllung verringert. Die spezifischen Kosten für Beton inklusive Transport und Guss betragen nach [ILF18] 200 €/m<sup>3</sup>. Die Kosten für die Betonhinterfüllung  $K_{B,S}$  ergibt sich daher aus der Differenz des Schachtvolumens  $V_{Sch1}$  und der Volumina von Druck- und Belüftungsrohr:

$$K_{B,S} = \left[ V_{Sch1} - \left( \left( \frac{D_{Dr}}{2} \right)^2 + \left( \frac{D_{Br}}{2} \right)^2 \right) \cdot \pi \right] \cdot L_{Dr} \cdot 200 \quad [€] \quad (3.13)$$

Sowohl für die Rohre, als auch für die Betonhinterfüllung wird eine Kostenspreizung von -15 %/+25 % gemäß Klassifizierung 4 der AACE-Richtlinie gewählt.

### Diverse Hilfsstrecken und Triebwasserwege

Neben dem Hauptzufahrtstunnel müssen weitere Zufahrtswege errichtet werden, welche die einzelnen unterirdischen Abschnitte miteinander verbinden. Zusätzlich erfordert das Verlegen der Triebwasserleitungen ebenfalls Tunnel. Aufgrund der geringen Länge und dem kleineren Querschnitt ist der Ausbruch über das konventionelle Sprengvortriebsverfahren hier wesentlich geeigneter als ein Auffahren mit der Tunnelbohrmaschine. Beim Sprengvortriebsverfahren

kommen diskontinuierliche, sich ständig wiederholende Arbeitszyklen zum Einsatz, wie Bohren, Sprengen, Aufladen und Absichern [SCH18].

Die Hilfstunnel sind unabhängig von Anlagengröße und Konfiguration, weswegen an dieser Stelle über die spezifischen Kosten direkt die Pauschalkosten bestimmt werden. Es handelt sich um die in Tabelle 3.10 aufgelisteten Strecken mit einem Ausbruchquerschnitt von je 25 m<sup>2</sup>:

**Tabelle 3.10: Längen der aufzufahrenden Tunnel [ILF17]**

<b>Funktion</b>	<b>Länge</b>
Zufahrtsstollen Kalotte Maschinenkaverne	130 m
Verbindungsstollen Ringspeicher	590 m
Zufahrtsstollen Unterbecken und Verteilrohrleitung	180 m
Zufahrtsstollen Transformatorenkaverne	135 m
Zufahrtsstollen Verteilrohrleitung Oberwasser	205 m
Ausbruch unterwasserseitiger Triebwasserweg	270 m
Ausbruch oberwasserseitiger Triebwasserweg	360 m
<b>Gesamt</b>	<b>1.870 m</b>

Von Baresel wurde ein Worst-Case-Kostensatz von 30.000 €/m für die kürzeren Abschnitte festgelegt und ein Kostensatz von 25.000 €/m für den längeren Abschnitt zwischen Ringspeicher und Kaverne. Diese spezifischen Kosten werden entsprechend der Klasse 4 der ACE-Richtlinie umgerechnet. Insgesamt summieren sich die sonstigen Ausbruchkosten durch Sprengvortrieb  $K_{SV}$  auf **53.577.000 Euro** für den Average-Case.

Der oberwasserseitige Triebwasserweg verbindet den Druckschacht mit den in der Maschinenkaverne verorteten Turbinen<sup>1</sup>; der unterwasserseitigen Triebwasserweg verbindet die Turbinen mit dem Auslaufbauwerk des Ringspeichers. Die Kosten für den Triebwasserweg bestehen aus den oben aufgeführten Ausbruchskosten, den Stahlwasserbaukosten für die Verteilrohrleitungen sowie der Betonhinterfüllung. Da sie vergleichbare Anforderungen haben wie die Druckrohrleitung, werden die Kosten der Verteilrohrleitungen über die spezifischen Kosten der Druckrohrleitung bestimmt. Hierzu wird mittels geometrischen Vergleichsrechnungen das spezifische Gewichtsverhältnis zwischen der Druckrohrleitung und den Verteilrohrleitungen zu

<sup>1</sup> Bei der Wahl eines Dreimaschinensatzes ist der Druckrohrschacht über entsprechende Verteilrohre ebenfalls mit den Pumpen verbunden.



0,54 bestimmt. Wird das Gesamtgewicht der Verteilrohrleitungen mit den spezifischen Kosten der Druckrohrleitung von 5.020 €/t multipliziert, ergeben sich die Kosten des Stahlwasserbaus, die in Tabelle 3.11 aufgeführt werden.

Das Volumen der Betonhinterfüllung ist äquivalent zur Druckrohrleitung die Differenz aus dem Ausbruchsvolumen und dem Volumen der Panzerung. Multipliziert mit den spezifischen Kosten für die Betonhinterfüllung summieren sich die Kosten auf die in Tabelle 3.11 gelisteten Werte [ILF18].

**Tabelle 3.11: Kostenauflistung der Triebwasserwege**

Kostenposition	Oberwasserseitig	Unterwasserseitig
Stahlwasserbau	2.227.000 €	1.670.000 €
Betonhinterfüllung	1.240.000 €	1.640.000 €
Ausbruch	<i>bereits in sonstigen Ausbruchskosten enthalten</i>	

### Energieableitung

Die Stromübertragung vom Kavernenkrafthaus zum nächsten Anschlusspunkt des öffentlichen Stromnetzes wird in zwei Abschnitte unterteilt [HOE14]. Zunächst muss der Strom vom untertägigen Kavernenkrafthaus an die Oberfläche transportiert werden, ab da soll eine Ableitung zum nächsten Eingangspunkt ins Verteilnetz erfolgen. Für den ersten Abschnitt können klassische Kabelsysteme und gasisolierte Leitungssysteme (GIL) zum Einsatz kommen. Für die Energieableitung ist der bestehende Schacht II vorgesehen, sodass hier keine zusätzlichen Kosten anfallen. Es wird angenommen, dass die Leitung aus Stabilitätsgründen in einer Sinusspirale an der Schachtwand verlegt wird, was die zu überwindende Entfernung verlängert. Die Distanz zwischen Transformatorenkaverne und Schacht II sowie zwischen Schacht und Oberfläche wird mit insgesamt 75 m abgeschätzt. So ergibt sich die Länge der Energieableitung in Metern bei einer Kavernenteufe von  $t_K$  zu:

$$L_{EAL} = t_K \cdot \sqrt{2} + 75 \quad [m] \quad (3.14)$$

Die Kosten für eine GIL-Übertragung mit einer Länge  $L_{EAL}$  zwischen 500 m und 1000 m können abgeschätzt werden über [HOE14]:

$$K_{EAL,GIL} = 48.000 \cdot L_{EAL}^{0,651} \quad [€] \quad (3.15)$$

Alternativ zur GIL ist auch der Einsatz eines deutlich günstigeren 110 kV Kabelsystems möglich, das jedoch höhere Übertragungsverluste und eine gesteigerte Brandgefahr im Schacht aufweist. Die Kosten für eine Aluminiumausführung sind:

$$K_{EAL,K} = 650 \cdot L_{EAL} \quad [€] \quad (3.16)$$

Der Netzanschluss ab dem obertägigen Bereich des UPSW würde mit Kabel- und Freileitungssystemen realisiert werden. Je nach angepeilter Spannungsebene müssen unterschiedliche Kostensätze gewählt werden: Wird das UPSW bei 110 kV angeschlossen, setzen sich diese bei den Kabelsystemen im Wesentlichen aus den Kosten für die Trassierung, die Baustelleneinrichtung, die Kabel, die Garnituren, die Überspannungsableiter, den Tiefbau, die Montage, den Kabelzug und die Hochspannungsprüfung zusammen. Die Ausgaben für die Doppelfreileitungen sind abhängig von der Ausführung der Masten, den aktuellen Stahlpreisen, der Geländebeschaffenheit, der Anzahl von Abspannmasten im Verhältnis zu den Tragmasten und der Art der Fundamente. Werden beide Übertragungsarten verwendet, muss zwischen jedem Abschnitt eine Übergangstation gebaut werden, die im Wesentlichen aus einem Endmast mit einer zusätzlicher Traverse zur Aufnahme der Kabelendverschlüsse sowie Überspannungsableitern besteht und mit 600.000 € anzusetzen ist. Insgesamt können die Kosten für die Stromübertragung zwischen UPSW und Netzanschlusspunkt auf der 110 kV-Ebene mit folgendem Zusammenhang abgeschätzt werden [HOE14]:

$$K_{NA,110} = n_{\text{ÜS}} \cdot 600.000 + \sum(L_{NA} \cdot k_{NA}) \quad [€] \quad (3.17)$$

Dabei sei  $n_{\text{ÜS}}$  die Anzahl der Übergangstationen,  $L_{NA}$  die Länge des Netzanschlusses und  $k_{NA}$  steht für die spezifischen Kosten des gewählten Übertragungssystems, welche in der folgenden Tabelle zusammengefasst sind:

**Tabelle 3.12: Kosten einer 110 kV Stromleitung [HOE14]**

Freileitung	VPE-CU-Kabel	VPE-AL-Kabel
300.000 €/km	750.000 €/km	650.000 €/km

Wird das UPSW an das 380 kV-Netz angeschlossen, muss hinter der untertägigen Energieableitung ein Umspannwerk installiert werden, welches den Strom von 110 kV auf 380 kV hochspannt und mit 20 Millionen Euro zu kalkulieren ist. Es können ebenfalls Doppelfreileitungen und erdgebundene Kabelsysteme verwendet werden. Die Kosten einer Übergangsanlage bei der

Verwendung beider Systeme sind mit 2 Millionen Euro abzuschätzen. Analog zu Gleichung 3.17 ergeben sich die Kosten des Netzanschlusses bei 380 kV zu:

$$K_{NA,380} = 20 \cdot 10^6 + n_{\text{ÜS}} \cdot 2.000.000 + \sum(L_{NA} \cdot k_{NA}) \quad [€] \quad (3.18)$$

Die längenbezogenen Kosten für die 380 kV-Übertragung sind in der folgenden Tabelle aufgeführt [HOE14]:

**Tabelle 3.13: Spezifische Kosten einer 380 kV Stromleitung [HOE14]**

Freileitung	Erdkabel
1.000.000 €/km	2.651.000 €/km

### Obertägige Straßen und Wege

Die derzeit bestehende Infrastruktur am Standort Prosper-Haniel ist für den Steinkohleabbau ausgelegt. Für den Betrieb eines UPSW werden größtenteils andere Straßen und Wege benötigt, die beispielweise Oberbecken, Schächte und Zufahrtstollen miteinander verbinden. Diese müssten unabhängig von Größe oder Konfiguration des Speichers angelegt werden, weswegen sie pauschal auf **3.180.000 Euro** abgeschätzt werden [ILF18]. Die Gleitung dieser Kosten wird entsprechend der Klasse 4 der AACE-Richtlinie auf -15 %/+20 % festgelegt.

### Aufzuanlage

Um den Zugang zur Kaverne und dem Ringspeicher zu gewährleisten, wird eine Aufzuanlage benötigt. Alternativ müsste der Personentransport komplett über den Zugangsstollen abgewickelt werden, was einen logistischen Mehraufwand bedeutet. Darüber hinaus ist der Zugang über mehrere Wege aus sicherheitstechnischen Gründen obligatorisch. Aus diesem Grund soll im bestehenden Schacht 9 eine entsprechende Aufzuanlage installiert werden. Unter Berücksichtigung der enormen Länge der Schächte werden die Kosten des Aufzugs in [ILF18] auf **12.084.000 Euro** abgeschätzt. Die Kostengleitung wird aufgrund des schwer zu schätzenden Aufwands gemäß der Klasse 4 der AACE-Richtlinie auf -15 %/+20 % festgelegt.

## 3.6 Sonstiges

In der Kostengruppe Sonstiges sind all jene Aufwendungen zusammengefasst, die sich keiner der vorigen Kategorien zuordnen lassen. Im Folgenden werden diese Positionen aufgeführt und beschrieben:

- Ausbaugewerke
- Versicherungskosten

- Optionssicherung
- Baustelleneinrichtung
- Grubenlüfter
- Landschaftsgestaltung
- Sicherheit und Überwachung

## Ausbaugewerke

Die Kostenposition Ausbaugewerke umfasst den gebäudetechnischen Innenausbau sowie Teile der Gebäudetechnik. Darunter fallen gängige Handwerksarbeiten wie Trockenbau, Innenputz, Fliesenverlegen, Mal- und Lackierarbeiten, einfache Elektroinstallationen, Innentüren, Treppenbau, raumbildender Ausbau, Klimatisierung und Lüftung, Wandverkleidung sowie Heizungs- und Sanitärarbeiten. Die Maßnahmen sind notwendig, um den Rohbau des UPSW zu einem Arbeitsplatz nach gängigen Vorschriften, Komfortbedürfnissen und praktischen Erfordernissen zu formen. Unter der Annahme, dass die auszubauenden Räumlichkeiten hauptsächlich die beiden Kavernen umfassen, können die Kosten anhand von Erfahrungen aus bereits realisierten Kavernenkraftwerken abgeleitet werden. Nach Angaben des Anlagenplaners ILF liegen die spezifischen Kosten für die Ausbaugewerke bei 37,1 €/m<sup>3</sup> [ILF18]. Somit ergeben sich die Kosten für den Innenausbau zu:

$$K_{Ag} = 31,7 \cdot (V_{MK} + V_{TK}) \quad [€] \quad (3.19)$$

Die Zufahrtswege bleiben erfahrungsgemäß unbearbeitet und erhalten keinen Innenausbau. Bezüglich der obertägigen Gebäude wird davon ausgegangen, dass die bestehenden Bauten in das Konzept integriert und die dort anfallenden Arbeiten im Verhältnis zum Gesamtaufwand vernachlässigt werden können.

## Baustelleneinrichtung

Der Begriff Baustelleneinrichtung beinhaltet alle Produktions-, Lager-, Transport- sowie sonstige Einrichtungen, welche zur Errichtung eines Bauwerks einer Baustelle benötigt werden. Hauptsächlich sind dies temporäre Gebäude zur Unterbringung von Arbeitskräften, witterungsempfindlichen Bau- und Bauhilfsstoffen, Ersatzteilen und Ähnlichem sowie Flächen zur Bearbeitung und Lagerung. Hinzu kommen angemessen große Verkehrsflächen sowie Maschinen, Stromversorgung, Baustellensicherung, Geräte, Kräne und Beleuchtung. [DRE71]

Der überwiegende Großteil der Einrichtungen und Maßnahmen würde sich im Fall des UPSW auf die obertägigen Flächen des ehemaligen Bergwerks konzentrieren. Hierbei ist von Vorteil, dass dieses Gebiet bereits industriell und infrastrukturell ungewöhnlich gut erschlossen ist und es voraussichtlich keine direkte Nutzungskonkurrenz geben würde. Im Vergleich dazu müssen beim Bau alpiner Pumpspeicherwerke erst geeignete Flächen, Zufahrtsstraßen oder gar Seilbahnen geschaffen werden.

Die Kostenabschätzung der Baustelleneinrichtung ist im vorliegenden Fall nicht trivial, da der genaue Bauablauf sowie die Baulogistik nicht bekannt sind. Aus diesem Grund müssen die Kosten über Erfahrungswerte in Abhängigkeit des Baustellenumfangs abgeschätzt werden. ILF schätzt die Baustelleneinrichtungskosten mit 10 % der veranschlagten Baukosten ein. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die erforderlichen Maßnahmen und Einrichtungen aufgrund der teils chronologischen Bauabfolge überschneiden und nicht neu durchgeführt werden müssen. Beispielsweise kann das Errichten der Kavernen erst nach Bauabschluss des Zufahrtstunnels erfolgen, weswegen es nicht zu Engpässen in der obertägigen Baustelleneinrichtungsfläche käme. Auch Beleuchtungsmasten, Containerstädte oder Kräne müssten nicht für jeden Bauabschnitt gesondert errichtet werden, sondern könnten nacheinander genutzt werden. [SCH11, ILF18]

Da in der Kostenabschätzung der Tunnelbohrung und Druckrohrleitung bereits Baustelleneinrichtungskosten eingeplant sind [BAR18], werden in der vorliegenden Betrachtung nur die Baukosten für Oberbecken, Sprengvortrieb, Kavernen und Ausbaugewerke berücksichtigt. Somit ergeben sich die Kosten für die Baustelleneinrichtung zu:

$$K_{Be} = 0,1 \cdot (K_{Kavernen} + K_{Oberbecken} + K_{Ag} + K_{SV}) \quad [€] \quad (3.20)$$

Aufgrund der schwer abzuschätzenden Umstände dieser Kostenposition, verursacht durch den nicht definierten Bauablauf, wird eine Kostengleitung von -20%/+30% gemäß Klasse 5 der AACE-Richtlinie gewählt.

### Grubenlüfter

Für den Betrieb untertägiger Anlagen ist eine ausreichende Bewetterung zwingend erforderlich. Nur so sind eine Versorgung mit Frischluft und ein Abtransport potentiell gefährlicher Gasgemische gewährleistet. In Bergwerken wird dies über einen oder mehrere Grubenlüfter gewährleistet. [BIS10]. Die am potentiellen Standort für das UPSW Prosper-Haniel verwendeten Grubenlüfter entsprechen nicht mehr dem Stand der Technik und müssen daher ausgetauscht werden. Eine Kalkulation seitens des Betreibers RAG hat ergeben, dass eine Neuanschaffung eine Leistungsdimension von 500 kW aufweisen müsste. Ein solches Gerät führt zu Anschaffungskosten in Höhe von **500.000 Euro** [RAG18A].]. Aufgrund der gut abschätzbaren Aufwendung einer solchen Investition, wird eine Kostenspreizung von -10 %/+10 % gemäß Klasse 3 der AACE-Richtlinie gewählt.

### Optionssicherung

Die Möglichkeit ein untertägiges Pumpspeicherwerk im ehemaligen Bergwerk Prosper-Haniel zu errichten, ergibt sich aus dem Rückzug Deutschlands aus dem Steinkohleabbau. Im Zuge

des sogenannten „Abwurfs“ der Zeche Prosper-Haniel besteht ein Zeitpunkt, ab dem sich der Betreiber RAG für eine komplette Schließung der Anlage oder für die Nachnutzung durch das UPSW entscheiden muss. Je nach Option würden sich die Natur der Rückzugsarbeiten und der Umgang mit der bestehenden Infrastruktur grundsätzlich unterscheiden. Schon zu Beginn der Machbarkeitsstudie wurde daher, unter Berücksichtigung des näher rückenden Stichtags, die Notwendigkeit erkannt, die Baumaßnahmen für ein UPSW zu einem späteren Zeitpunkt durchführen zu können. Hierzu müsste die Infrastruktur des Bergwerks technisch „konserviert“ werden und könnte dadurch noch Jahrzehnte später genutzt werden. Diese Maßnahmen, im weiteren Verlauf Optionssicherung genannt, können aufgrund strenger Auflagen, bedingt durch die staatliche Subventionierung, nicht von der RAG getragen werden. Daher sind die anfallenden Ausgaben den Baukosten zuzuschreiben.

Bei einem kompletten Abwurf der Zeche würde ein Großteil der Hohlräume und Strecken verfüllt und die Schächte müssten vollständig und dauerhaft zugeschüttet werden [BRO11]. Für eine Offenhaltung der Hohlräume und Strecken wird eine Vielzahl an Maßnahmen notwendig. Unter anderem müssen explosionsgeschützte Hängedämme und Abschlüsse errichtet werden, welche die Gefahr durch explosionsfähige Gasgemische mindern. Außerdem müssen die verwendeten Strecken entkernt werden, was „Rauben“ genannt wird [RAG18].

Teile der Maßnahmen würden auch bei einem unmittelbaren Ausbau zum UPSW nötig und sind daher bereits im Kapitel 3.5 unter *Ertüchtigung der Grubenbauwerke* berücksichtigt. Die verbleibenden Kosten hängen auch bei der Optionssicherung davon ab, ob der bestehende Förderberg in das Konzept integriert wird. Hier wurden von Seiten der RAG folgende Mehrkosten ermittelt [RAG18]:

- Mit Integrierung des Förderbergs: **2.350.000 Euro**
- Ohne Integrierung des Förderbergs: **1.900.000 Euro**

Aufgrund der Detailtiefe der notwendigen Planungsschritte wird hier eine Spreizung von -10%/+10% gemäß Klasse 3 der AACE-Richtlinie gewählt.

### **Versicherungskosten**

Die Bauarbeiten für das UPSW umfassen eine Vielzahl aufwändiger und kostenintensiver Maßnahmen und Arbeitsschritte. Gerade bei dieser neuartigen Verbindung von Bergbautechnologie mit Pumpspeicher-Bautechnik bestehen daher verschiedene Risiken. Denkbar sind der Verlust von teurem Arbeitsgerät durch Baufehler, kostspielige Rettungseinsätze aufgrund von Einstürzen oder schlimmstenfalls der komplette Bauabbruch einer annähernd fertiggestellten Anlage. Um derartige Risiken abzudecken muss eine entsprechende Projektversicherung abgeschlossen werden. Aufgrund möglicher Beeinflussung ökologischer Systeme muss auch eine Umwelt-

haftpflichtversicherung eingeplant werden [STA16]. Die Höhe der gesamten Versicherungsprämien hängt prozentual von den totalen Baukosten ab und wird mit einer folgenden Spannweite abgeschätzt:

**Tabelle 3.14: Anteil der Versicherungskosten an den Gesamtbaukosten**

Best-Case	Average-Case	Worst-Case
0,5 %	1,0 %	1,5 %

### Rekultivierung und Landschaftsgestaltung

Ein großer Vorteil des untertägigen Pumpspeicherwerkes ist der geringe Eingriff in die Natur im Vergleich zu oberirdischen Systemen. So wäre von der Anlage lediglich das Oberbecken zu sehen. Das UPSW würde als Leuchtturmprojekt für den Strukturwandel zahlreiche Besucher anlocken, zusätzlich möchte die Stadt Bottrop die Fläche der ehemaligen Zeche für eine gewerbliche Nutzung bereitstellen. Aus diesen Gründen ist es notwendig, das Gelände nach Abschluss der Bauarbeiten einer Landschaftsgestaltung und Rekultivierung zu unterziehen. Zunächst gilt es, in der Bauphase entstandene Überbleibsel wie Baustraßen oder Materialhalden rückzubauen. Anschließend könnte das Oberbecken begrünt werden, Wege und Zufahrtsstraßen würden mit Bäumen bepflanzt werden und auch das Anlegen von Beeten und Rasenflächen könnte ein Teil dieser Maßnahmen sein. Neben der repräsentativen Funktion kann eine Begrünung der Anlage auch helfen, schädigender Erosion durch Wind und Niederschlag entgegenzuwirken. Die Kosten der Landschaftsgestaltung werden von ILF auf pauschal **2.000.000 Euro** abgeschätzt [ILF18]. Da die Maßnahmen in dieser frühen Konzeptionierungsphase schwer zu ermessen sind, wird ein Kostenband von -15 %/+25 % gemäß Klasse 4 der ACE-Richtlinie gewählt.

### Sicherheit und Überwachung

Der Betrieb unterirdischer Bauten wie Tunnel oder Kavernen erfordert den Einsatz geeigneter Überwachungstechnik, die als Frühwarnsystem strukturelle Probleme weit vor dem Eintritt einer Katastrophe erkennen und anzeigen können. Somit ist der Betreiber in der Lage, bautechnische Gegenmaßnahmen zu treffen oder in akuten Fällen die Evakuierung der Anlage zu veranlassen. Neben der seismischen Überwachung müssten auch Sensoren zur Atemluftkontrolle sowie Detektoren für zündfähige Luftgemische betrieben werden. Im Fall des UPSW würden entsprechende Sensoren in Kavernen, den Zufahrtswegen und dem Ringspeicher zum Einsatz kommen. Die erfassten Daten würden in einer Sicherheitszentrale zusammenlaufen und von da aus auch extern ausgespeist werden.

Um eine stabile Kommunikation innerhalb des UPSW zu gewährleisten, werden Telekommunikationsanlagen an verschiedenen Positionen innerhalb der Anlage benötigt. Für eine schnellere Informierung und Reaktion des Personals im Gefahrenfall müssen darüber hinaus Gefahrenmeldeanlagen installiert werden. Der Hauptzufahrtsstollen zur Kaverne, der Einfahrtstollen der Kaverne sowie der Energieableitungsschacht müssen mit einer Brandschutzanlage ausgestattet werden. Für die Steuerung und Überwachung der Einspeisung ins Übertragungsnetz wird eine Steuerungseinheit benötigt. Die Kosten aller aufgeführten Sicherheits- und Überwachungssysteme werden in Tabelle 3.15 zusammengefasst [ILF18].

**Tabelle 3.15: Pauschalkosten der Sicherheits- und Überwachungseinrichtungen**

<b>Kostenposition</b>	<b>Pauschalkosten</b>
Telekommunikationsanlagen	100.000 €
Gefahrenmelde/-Alarmanlagen	30.000 €
Übertragungsnetze-Steuerung	30.000 €
Überwachungseinrichtungen	3.000.000 €
Brandschutzanlagen	800.000 €

Da sich der geschätzte Umfang der Maßnahmen bei fortschreitendem Planungsverlauf noch stark ändern kann, wird eine größere Kostengleitung von -15 %/+25 % gemäß Klasse 4 der AACE-Richtlinie gewählt.

## 4 Betrachtete Varianten und Parameter

Im Laufe der Machbarkeitsstudie wurde eine Konfiguration als präferierte Variante herausgearbeitet. Diese Vorzugslösung wurde von den beteiligten Wissenschaftlern als technisches Optimum hinsichtlich Speichervolumen, elektrischer Leistung, Kavernengröße, Fallhöhe und Spannungsebene identifiziert [UPW14]. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit können jedoch abweichende Parameter von Vorteil sein. Daher werden mehrere mögliche Varianten berechnet und betrachtet. Die einflussreichsten Parameter sind Maschinenkonzept, Speicherkapazität und elektrische Leistung.

### Maschinenkonzept

Im Gegensatz zu einem Laufwasserkraftwerk müssen die eingesetzten Strömungsmaschinen eines Pumpspeicherwerks sowohl in der Lage sein, die Potenzialenergie des Wassers in mechanische Energie zu wandeln (Turbinieren), als auch das Wasser mittels mechanischer Energie auf ein höheres Energieniveau zu heben (Pumpen).



Die Aufgaben können kombiniert durch Pumpturbinen übernommen werden. Dies sind Francis-Turbinen, welche hydraulisch sowohl für den Pump- als auch für den Turbinenbetrieb ausgelegt sind: Wird die Maschine angetrieben, wirkt sie wie eine Pumpe und gibt Leistung an das Arbeitsmedium ab; wird sie vom Arbeitsmedium durchströmt, so wirkt sie als Turbine und nimmt Leistung vom Arbeitsmedium auf. Alternativ kann die Pumpe als eigenständige Strömungsmaschine getrennt von der Turbine betrieben werden. Eine solche Konfiguration wird Ternärer Maschinensatz genannt, da inklusive Motor-generator drei Maschinen je Gruppe vorliegen. Da Pumpe und Turbine auf einer Welle angeordnet sind, kann beim Wechsel von Pump- in den Turbinenbetrieb die Drehrichtung beibehalten werden, was deutlich schnellere Umschaltzeiten im Vergleich zur Pumpturbine ermöglicht, bei der ein vollkommendes Abbremsen des Maschinensatzes nötig wird [Hei13]. Der dadurch bedingte geringere Verschleiß ist ebenfalls ein Vorteil des Ternären Satzes. Weitere Vorzüge sind ein höherer Wirkungsgrad<sup>2</sup> und die Ermöglichung eines hydraulischen Kurzschlusses<sup>3</sup> innerhalb des Maschinensatzes. Nachteile sind ein gesteigerter Platzbedarf, eine größere technische Anfälligkeit und hohe Investitions- und Betriebskosten. Letztere könnten jedoch über höhere Einnahmen kompensiert werden, die sich aufgrund der Flexibilitätssteigerung durch schnellere Umschaltzeiten ergeben. Die Vor- und Nachteile beider Maschinenkonfigurationen werden in Tabelle 4.1 schematisch zusammengefasst [nach STA11].

Für die Kostenabschätzung ergeben sich je nach Auswahl unterschiedliche, in Abschnitt 3.3 aufgeführte Pauschalkosten für die Maschinen sowie daraus resultierende, unterschiedlich große Maschinenkavernen.

### **Installierte Leistung**

Je höher die installierte Leistung eines Pumpspeicherwerks, desto flexibler kann es an den Energiemärkten agieren. So ist beispielsweise die Teilnahme an Ausschreibungen möglich, welche mit kleinerer Leistung nicht bedient werden können. Andererseits korreliert die Leistung mit den Anschaffungskosten für die Maschinensätze und im Falle von Kavernenkraftwerken auch mit der Kavernengröße. Zudem sind die Speicherbecken der Anlage schneller entleert, was zu einer geringeren Vollastdauer führt. Bei einer möglichen Realisierung des UPSW müssen in einer gesonderten Untersuchung zuvor die Ansprüche des Marktes an einen solchen Speicher ermittelt werden. In der vorliegenden Betrachtung werden daher die Investitionskosten ver-

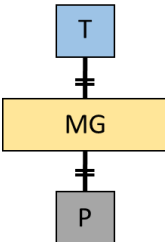
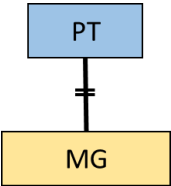
---

<sup>2</sup> Der erhöhte mechanische Wirkungsgrad ergibt sich durch die spezialisierte Auslegung der Strömungsmaschinen auf die jeweilige Aufgabe.

<sup>3</sup> Bei einem hydraulischen Kurzschluss werden Pumpe und Turbine gleichzeitig betrieben und das Wasser im Kreis geführt. Dies kann nötig sein, um die fehlende Regelbarkeit von Pumpen auszugleichen und somit Leistungen unterhalb der Pumpenvollast zu erreichen.

schiedener Leistungskonfigurationen untersucht. Innerhalb des Rechenmodells wird die Änderung der installierten elektrischen Nennleistung über die Anpassung der Maschinenkosten und der Kavernengröße berücksichtigt.

**Tabelle 4.1: Vergleich von zwei Maschinenkonfigurationen [nach STA11]**

Maschinenkonzept		
	Ternärer Maschinensatz	Reversible Pumptur- bine
Anschaffungskosten	–	+
Betriebskosten	–	+
Instandhaltungskosten	–	+
Technische Risiken	–	+
Hydraulische Fallhöhen	+	–
Hydraulischer Kurzschluss	+	–
Einbau	+	–
Wirkungsgrad	+	–
Umschaltzeiten	+	–
Platzbedarf	–	+

Ein Pluszeichen (+) symbolisiert einen Vorteil, ein Minuszeichen (-) symbolisiert einen Nachteil der jeweiligen Technologie. (MG) steht für Motorgenerator, (P) für Pumpe, (T) für Turbine, (PT) für Pumpturbine.

### Speicherkapazität

Die elektrische Speicherkapazität ist bei konstanter Fallhöhe proportional zur speicherbaren Wassermenge. Bei der Auslegung eines Pumpspeicherwerks ist auch hier die passende Dimensionierung entscheidend: Ein zu großer Speicher kann durch marktbedingte, hohe Stillstandszeiten unwirtschaftlich sein, ein zu kleiner Speicher verringert die Flexibilität und Möglichkeiten am Energiemarkt.

Im Fall des UPSW müssen bei einer Abweichung von der Vorzugslösung sowohl Ringspeicher als auch Oberbecken angepasst werden. Eine Verkleinerung ist nahezu beliebig möglich, eine Vergrößerung um den Faktor zwei ist ebenfalls realisierbar, da der Ringspeicher auch mit zwei parallelen Röhren umgesetzt werden kann. Das Oberbecken ist rein technisch gesehen beliebig skalierbar, es könnte jedoch zu einer gewerblichen Nutzungskonkurrenz kommen.

### Nicht variierte Parameter

Einige Parameter sind zwar im Rechenmodell berücksichtigt und änderbar, jedoch werden sie in der Untersuchung nicht variiert, da eine Abweichung von der Vorzugslösung keine Vorteile hat oder die Änderungen keine relevanten Auswirkungen auf die Investitionskosten haben.

Beispielweise ist eine Änderung der Fallhöhe nur in der Theorie sinnvoll, da der geologische stabilste Standort für die Kavernen unter hohem Aufwand festgelegt wurde. Eine Änderung der Spannungsebene führt nur zu geringen Abweichungen der gesamten Investitionskosten, weswegen keine eigene Variante hierzu gerechnet wird. Es werden daher in allen betrachteten Varianten die Nebenparameter der Vorzugslösung übernommen.

### Gewählte Varianten

Die Vorzugslösung mit einer elektrischen Speicherkapazität von 750 MWh wird im weiteren Verlauf als Variante 1 bezeichnet. Davon unterscheidet sich Variante 1t lediglich durch die Wahl der teureren ternären Maschinensätze.

Variante 2 steht für eine insgesamt größere Anlage, mit einer doppelten Speicherkapazität von 1.500 MWh. Diese große Anlage könnte bei der erhöhten elektrischen Nennleistung von 300 MW für 5 Stunden bei Volllast arbeiten und könnte dadurch insgesamt flexibler am Markt agieren.

Mit Variante 3 wird eine kleinere Anlage betrachtet, die durch einen kürzeren Speicherring und einem kleineren Oberbecken eine Speicherkapazität von 500 MWh aufweist. Bei einer kleineren elektrischen Nennleistung von 100 MW kann das Pumpspeicherwerk ebenfalls 5 Stunden arbeiten, durch das geringere Regelband allerdings nicht so flexibel am Markt agieren. Der Vorteil besteht in den verringerten Investitionskosten. In Tabelle 4.2 sind die vier Variationen und ihre Hauptparameter dargestellt.

**Tabelle 4.2: Hauptparameter der untersuchten Varianten**

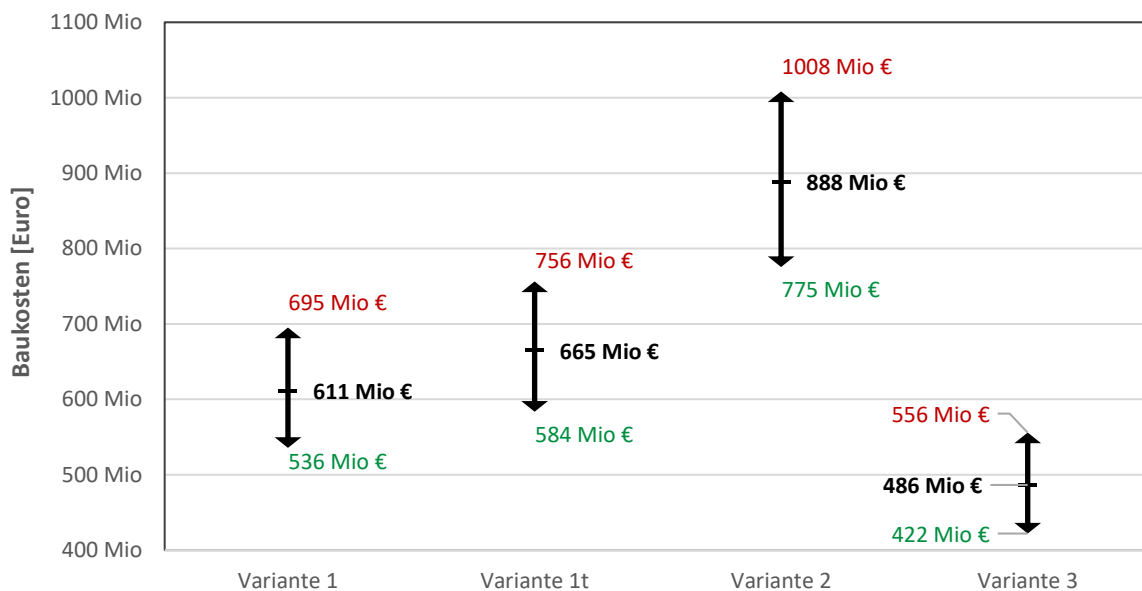
	Nennleistung		
Kapazität	100 MW	200 MW	300 MW
500 MWh	3		

750 MWh		<b>1</b>	<b>1t</b>	
1.500 MWh				<b>2</b>

## 5 Bau- und Investitionskosten

### 5.1 Baukosten bei variierenden Anlagenparametern

Durch das in den Kapiteln 1 bis 3 beschriebene und in Kapitel 4 parametrisierte Kostenmodell können die Gesamtbaukosten für die betrachteten Varianten abgeschätzt werden. Dabei wird jeweils ein Wert für das Worst-, Average- und Best-Case-Szenario ermittelt. So bildet der Bereich zwischen Worst- und Best-Case-Wert die Spannweite ab, in der sich die tatsächlichen Baukosten erwartungsgemäß bewegen würden. Der Average-Wert gibt hierbei den Durchschnitt der statistischen Verteilung an. Abbildung 5.1 zeigt die ermittelten Kostenintervalle der vier berechneten Varianten.

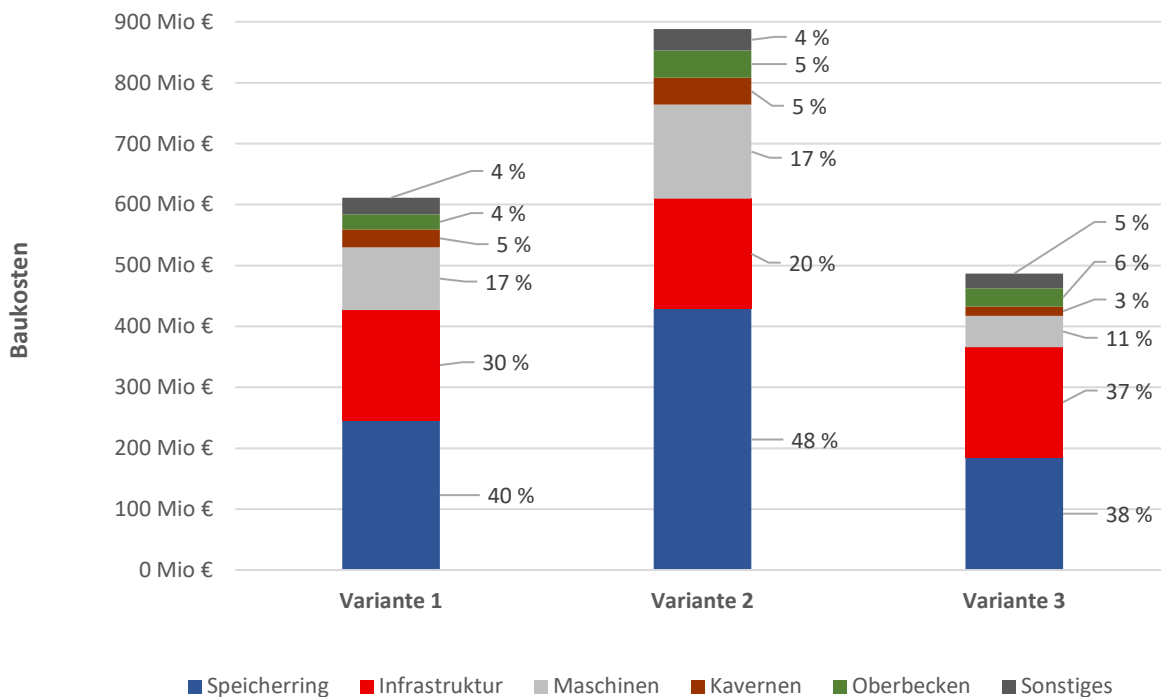


**Abbildung 5.1: Baukosten der betrachteten Varianten und deren Spannweite**

Die Spannweite der erwarteten Baukosten liegt somit bei -12 %/+14 % für die Varianten 1 und 1t sowie bei -13 %/+14 % für die Varianten 2 und 3. Im weiteren Verlauf der Ergebnisbetrachtung werden zur vereinfachten Darstellung jeweils nur die Average-Kosten zur Betrachtung herangezogen und an dieser Stelle auf die weiterhin geltende Streuung hingewiesen.

Ein großer Teil der Gesamtbaukosten werden durch die unterirdischen Vortriebs- und Ausbrucharbeiten verursacht. So entfallen in der Hauptvariante 1 rund 75 % der Gesamtbaukosten auf die Gruppen Infrastruktur, Speicherring und Kavernen. Die Kosten für den Unterspeicher

sind mit 40 % Anteil etwa zehnmal so hoch wie die des Oberspeichers. Bei einem konventionellen Pumpspeicherwerk entfallen die Kosten für den Speicherring und für die langen Zufahrtswege. Lediglich die Ausbruchsarbeiten der Kavernen (hier 5 %) sowie die Vortriebsarbeiten für wenige kurze Zufahrts- und Triebwasserwege müssen bei Kavernenkraftwerken berücksichtigt werden. Die Anteile der Hauptgruppen an den Gesamtbaukosten werden in Abbildung 5.2 für die Varianten 1, 2 und 3 dargestellt.



**Abbildung 5.2: Anteile der sechs Hauptgruppen an den Gesamtbaukosten**

Da das UPSW in einer Vielzahl von technisch möglichen Varianten (bezüglich Leistung und Kapazität) realisiert werden kann, bestehen dementsprechend viele mögliche Baukosten. Abbildung 5.3 zeigt den stetigen Anstieg der Gesamtbaukosten bei zunehmender Speicherkapazität sowie Leistung der Anlage. Der Übersichtlichkeit halber wurden die Verläufe von nur drei Leistungswerten aufgetragen, da alle Graphen parallel verlaufen. Die Kosten erhöhen sich proportional zur Leistung, mit annähernd 0,7 Mio. Euro/MW. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass die Kosten der Maschinensätze einen annähernd proportionalen Zusammenhang zu  $P_{el}$  aufweisen [FFE14]. Die Größe der Maschinenkaverne nimmt mit steigender Leistung ebenfalls proportional zu. Vernachlässigbar klein hingegen ist die Kostensteigerung für die Druckrohrleitung und Absperrventile.

Für eine Erhöhung der elektrischen Speicherkapazität des UPSW müssen die Speichervolumina von Oberbecken und Speicherring gleichermaßen erhöht werden. Die für die Errichtung des Speicherrings anfallenden Kosten weisen einen fixen und einen variablen Teil auf (Tabelle 3.6).

Da die variablen Kosten der Tunnelvortriebsarbeiten unabhängig von der Länge sind (Gleichung 3.9), steigen auch die Kosten des Unterspeichers linear an. Da die Beckenhöhe des Oberbeckens nicht beliebig erhöht werden kann, steigt die benötigte Grundfläche des Oberbeckens proportional zur speicherbaren Wassermenge an. Hierdurch ergibt sich abermals eine weitestgehend lineare Funktion, lediglich der Umfang des Oberbeckens und somit die Kosten der Dammschüttung werden durch einen quadratischen Zusammenhang beschrieben.

Variante 1t unterscheidet sich von Variante 1 durch einen aufwendigeren, flexibleren und teureren Maschinensatz. Aufgrund der unterschiedlichen Technik wird sie in den folgenden Abbildungen nicht dargestellt. Die Kostenkurve dieser Variante verläuft jedoch ebenfalls parallel zur Variante 1.

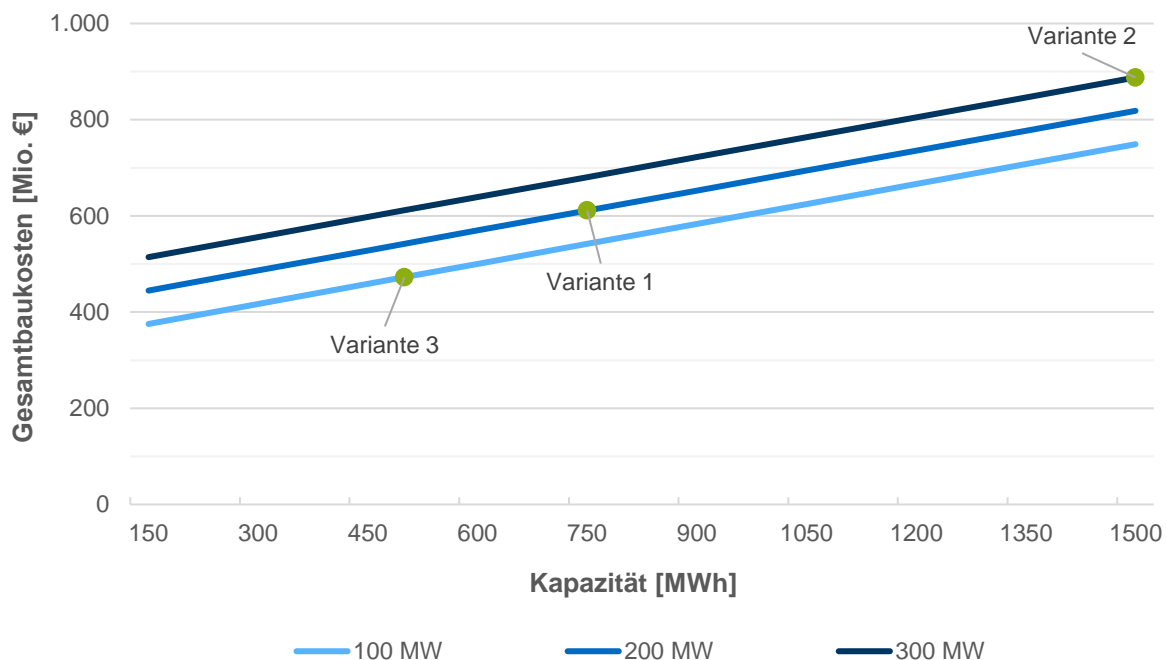


Abbildung 5.3: Gesamtbaukosten bei variierenden Speicherparametern

## 5.2 Spezifische Baukosten

Für einen Vergleich innerhalb der Varianten sowie mit anderen realisierten oder geplanten Speicheranlagen, müssen die spezifischen Baukosten ermittelt werden. Diese können sich auf die installierte Leistung oder die elektrische Speicherkapazität beziehen.

Abbildung 5.4 zeigt die spezifischen Baukosten je Leistung, in Anlehnung an Abbildung 5.3 für verschiedene Speicherparameter. Diese liegen für Variante 1 bei **3.060 €/kW**, für Variante 2 bei **2.960 €/kW** und für Variante 3 bei **4.730 €/kW**. Es ist erkennbar, dass die spezifischen

Kosten mit steigender Leistung abnehmen. Dieser Zusammenhang besteht durch den Skaleneffekt bei allen Pumpspeicherwerken, beim UPSW tritt der Effekt jedoch verstärkt auf, da die Kosten der Maschinensätze einen geringen Anteil an den Gesamtkosten haben.

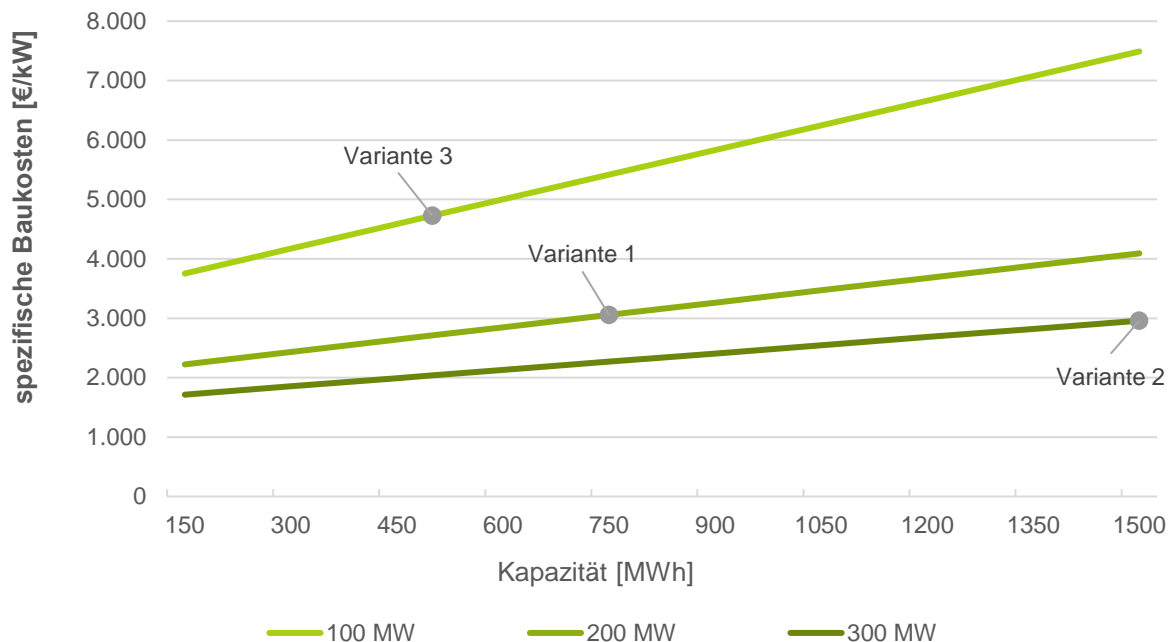


Abbildung 5.4: Spezifische Baukosten bezogen auf die installierte Leistung

Im Vergleich mit anderen Pumpspeicherwerken fallen alle drei betrachteten Varianten teurer aus. Allerdings muss dabei beachtet werden, dass die Bauzeit dieser Anlagen lange zurückliegt und diese unter anderen Bedingungen errichtet wurden. So wurden die Vorarbeiten zum Pumpspeicherwerk *Goldisthal* bereits zu DDR-Zeiten durchgeführt und staatlich finanziert, weswegen die Kosten nur eingeschränkt vergleichbar sind. Zudem steigen die Ausgaben für den Bau von PSW, neben der üblichen Inflation, durch immer strengere Umweltauflagen. Die mangelnde Transparenz vieler Kostendaten gestaltet einen geeigneten Vergleich ebenfalls schwierig. In Tabelle 5.1 werden die Kennzahlen ausgewählter geplanter und realisierter Pumpspeicherwerke gegenübergestellt.

Tabelle 5.1: spezifische Kosten ausgewählter Pumpspeicherwerke [DAO15]

Bezeichnung	spez. Kosten [€/kW]	spez. Kosten [€/kWh]	Inbetriebnahme
Atdorf	1.143	123	aufgegeben
Jochberg	857	143	aufgegeben
Goldisthal	1.100	137	2003

UPSW Variante 1	3.060	815	Konzeptstudie
-----------------	-------	-----	---------------

Zum Vergleich von PSW untereinander werden üblicherweise die spezifischen Kosten je Leistung gewählt, da ein großer Anteil der Kosten durch die Maschinensätze hervorgerufen wird und die Kosten der Speicherkapazität durch die geographischen Gegebenheiten wenig ins Gewicht fallen. Bei einem Vergleich mit Speichertechnologien wie Batteriesystemen bietet sich hingegen an, die spezifischen Kosten je Kapazität zu ermitteln. Abbildung 5.5 zeigt die spezifischen Baukosten je Speicherkapazität, in Anlehnung an Abbildung 5.3 für verschiedene Speicherparameter.

Dieser Kennwert liegt für Variante 1 bei **815 Euro/kWh**, für Variante 2 bei **592 Euro/kWh** und für Variante 3 bei **945 Euro/kWh**. Im Vergleich dazu sind chemische Speicher mit 1.250 Euro/kWh für Bleiakkumulatoren oder 1.000-1.400 Euro/kWh für Lithium-Ionen-Akkumulatoren derzeit teurer bei geringerer Lebensdauer [STR18]. Die kapazitätsbezogenen spezifischen Kosten steigen mit sinkender Kapazität asymptotisch an, da der Verlauf eine Funktion der Form  $f(x) = a \cdot 1/x$  darstellt. Dies zeigt auch, dass eine Reduzierung der Speicherkapazität nur bis zu einer gewissen Größe sinnvoll ist.

Die spezifischen Baukosten zeigen, dass durch den Einfluss des Skaleneffekts eine große Dimensionierung der Anlage wirtschaftlich am sinnvollsten ist. Da eine große Dimension aber auch insgesamt zu höheren absoluten Investitionskosten führt – ungeachtet der spezifischen Werte – wird eine Betreibersuche erschwert. Bei Gesprächen mit potentiellen Investoren und Betreibern im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurde häufig die Frage bezüglich der Skalierbarkeit gestellt. Da in der Kostenzusammensetzung des UPSW jedoch ein großer Teil unabhängig von Leistung und Kapazität ist, kann die Anlage nicht sinnhaft auf eine beispielsweise 30 Mio. Euro teure, kleinere Anlage dimensioniert werden.



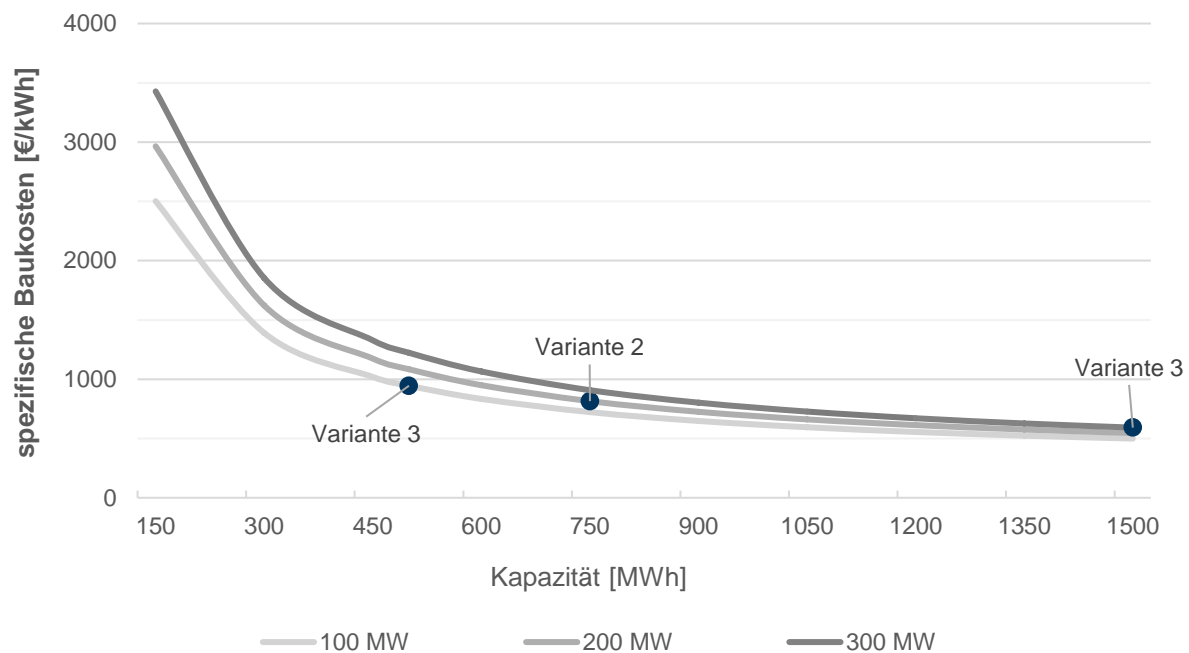


Abbildung 5.5: Spezifische Baukosten bezogen auf die Speicherkapazität

### 5.3 Investitionskosten

Während die Begriffe Baukosten und Investitionskosten häufig synonym verwendet werden, unterscheiden sich deren Werte bei einem Projekt mit langer Bauzeit deutlich: Die Investitionskosten umfassen den Barwert der Gesamtbaukosten, die auf das Jahr der Inbetriebnahme eines UPSW diskontiert wurden [DAO15]. Trotz einer langen Bauzeit mit breit verteilten Auszahlungen kann dieser dynamisch ermittelte Wert die Investitionshöhe zu einem bestimmten Zeitpunkt darstellen und so einen Vergleich mit anderen Projekten vereinfachen.

Da die Bauzeit und die Zahlungsströme der einzelnen Jahre nicht genau bestimmbar sind, wird die Verteilung der Baukosten nach [DAO15] abgeschätzt. Der prozentuale Verteilungsfaktor  $x_{Bau,n}$  wird in Tabelle 5.2 in Abhängigkeit der Bauzeit  $n_{Bau}$  aufgelistet (gültig ab  $n_{Bau} > 2$ ). Mit Ausnahme des ersten und letzten Jahres wird eine gleichmäßige Verteilung der Kosten angenommen:

Tabelle 5.2: Prozentuale Verteilung der Baukosten während der Bauzeit [DAO15]

Baujahr	1	2	...	$n_{Bau}-1$	$n_{Bau}$
Anteil der Baukosten $x_{Bau,n}$	10 %	$\frac{70 \%}{n_{Bau} - 2}$			20 %

Mit dieser Verteilung der Baukosten  $K_{Bau}$  kann die Abzinsung der Zahlungen auf den Betriebsbeginn erfolgen. Die Investitionskosten für das UPSW ergeben sich demnach zu:

$$K_I = \sum_{j_{Bau}=1}^{n_{Bau}} (K_{Bau} \cdot x_{Bau,n}) \cdot (1 + i)^{n_{Bau}} \quad (5.1)$$

Die Berechnung der Investitionskosten der einzelnen UPSW-Varianten erfolgt unter folgenden Voraussetzungen:

- Bezug auf die Gesamtbaukosten des Average-Case
- Bezug auf das Jahr der Inbetriebnahme
- Die Bauzeit der Anlage beträgt 8 Jahre
- Der Kalkulationszinssatz beträgt 6,88 %
- Verteilung der Baukosten nach Gleichung 5.1

Somit errechnen sich die Investitionskosten der vier Varianten des UPSW zu den in Tabelle 5.3 aufgeführten Werte:

**Tabelle 5.3: Investitionskosten der UPSW-Varianten**

Variante 1	Variante 1t	Variante 2	Variante 3
816 Mio. Euro	888 Mio. Euro	1.185 Mio. Euro	650 Mio. Euro

## 6 Laufende Kosten

Die jährlichen Kosten für Wartung, Instandhaltung und Betrieb setzen sich im Fall des UPSW aus den klassischen Kostensätzen für ein Kavernenpumpspeicherwerk sowie den Zusatzkosten für die untertägige Bauweise zusammen.

Die konventionellen jährlichen Betriebsaufwendungen werden nach [FFE14] in einen variablen sowie einen fixen Anteil gegliedert. Der fixe Kostenanteil steigt proportional zur installierten Leistung  $P_{el}$  [MW], die variablen Betriebsaufwendungen hängen von der eingespeisten Strommenge  $E_{el, Jahr}$  sowie den durchschnittlichen Lastwechseln der Anlage im Jahr ab. Dabei werden die Startvorgänge der Pumpe ( $S_P$ ) höher gewichtet als die der Turbine ( $S_T$ ).

Für die bergmännischen Sicherheitsaspekte und die untertägigen Wartungsarbeiten konnte als großer Kostenfaktor die Grubenbewetterung identifiziert werden. Die Betriebskosten für den Grubenlüfter setzen sich zusammen aus Stromkosten, Wartung und Instandhaltung, Materialkosten sowie die Abnahme durch eine sicherheitstechnische Prüforganisation [RAG18A]. Die spezifischen Betriebskosten des Grubenlüfters belaufen sich auf 58.853 Euro je belüfteten Kilometer Strecke, welche mit der Länge des Ringspeichers  $l_{RS}$  gleichgesetzt wird.

Insgesamt können die jährlichen Betriebsaufwendungen  $k_{B,j}$  für das UPSW durch folgende Funktion ausgedrückt werden:

$$k_{B,j} = l_{RS} \cdot 58,853 + P_{el} \cdot (3.066 + 3,58 \cdot S_T + 9,59 \cdot S_P) + 0,6 \cdot E_{el, Jahr} \quad [€/Jahr] \quad (6.1)$$

Für die Vorzugsvariante 1 wurden so die laufenden Kosten zu **4,4 Mio. Euro** Jahr abgeschätzt. Da der Kapitalwert mit dem realen, also inflationsbereinigten, Zinssatz berechnet wird, findet keine Berücksichtigung einer Preissteigerung durch Inflation statt. Die errechneten jährlichen Betriebsaufwendungen stellen somit den Zeitwert im Jahr der Inbetriebnahme dar.

## 7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Wirtschaftlichkeit der betrachteten UPSW-Varianten wird mittels der Kapitalwertmethode untersucht. Hierbei werden die Zahlungen während der Bau- und Betriebsphase über einen festgelegten Kalkulationszinssatz auf den Zeitpunkt der Inbetriebnahme diskontiert. Die so ermittelten Barwerte der Geldflüsse können zum Kapitalwert aufsummiert werden. Ein positiver Kapitalwert zeigt einen Vermögenszuwachs innerhalb der betrachteten Betriebszeit, während ein negativer Kapitalwert auf eine unrentable Investition hinweist. Auf diese Weise können verschiedene Anlagen-Varianten mit abweichenden Geldflüssen untereinander verglichen werden. [BLO06, GÖT14]

Im Falle des UPSW ergibt sich der Kapitalwert zu [DAO15]:

$$K_0 = -K_I + \sum_{j=1}^n \frac{E_{ges,j} - K_{B,j}}{(1+i)^j} \quad (7.1)$$

mit

$K_0$	Kapitalwert
$K_I$	Investitionskosten [€]
$K_{B,j}$	jährliche Betriebsaufwendungen [€]
$E_{ges,j}$	jährliche Gesamteinnahmen [€]
$n$	Betrachtungszeitraum [a]
$j$	Jahresindex [a]
$i$	Kalkulationszinssatz [%]

Ein Pumpspeicherwerk erzielt Einnahmen durch Systemdienstleistungen und Teilnahme am Energiemarkt. Bei Pumpspeicherwerken kommen folgende Einkommensfelder infrage:

- Day-Ahead Strommarkt  $E_{DA}$
- Intraday Strommarkt  $E_{ID}$
- Regelleistungsmarkt  $E_{RL}$
- Blindleistungsbereitstellung  $E_{BL}$
- Erhaltung der Schwarzstartfähigkeit  $E_{SF}$

Den Erlösen aus diesen Verdienstmöglichkeiten, welche an den Betreiber des PSW gezahlt werden, stehen die Einkaufskosten des Stroms gegenüber. Diese Kosten werden nicht zu den jährlichen Betriebsaufwendungen gezählt, da sie unmittelbar mit der Aktivität des PSW am Markt und den Erlösen in Verbindung stehen.

In der klassischen Betriebswirtschaftslehre und im kaufmännischen Rechnungswesen werden Einnahmen vom Gewinn abgegrenzt, da bei letzterem bereits die anfallenden Kosten berücksichtigt werden. In der vorliegenden Arbeit wird abweichend, aufgrund der komplexen energiewirtschaftlichen Zusammenhänge und im Unterschied zum klassischen Warenhandel, die Summe aller Einnahmen abzüglich der Kosten für den Strombezug  $K_{SB}$  als Gesamteinnahme bezeichnet. Die Ausgaben für den Strom werden so als negative Einnahme betrachtet. Das UPSW kann folglich durch geschickten Ein- und Verkauf von Strom und dem gezielten Angebot der Systemdienstleistungen gewisse jährliche Einnahmen  $E_{ges,j}$  erzielen:

$$E_{ges,j} = E_{ID} + E_{DA} + E_{RL} + E_{BL} + E_{SF} - K_{SB} \quad (7.2)$$

Die Einnahmen eines Pumpspeicherwerkes sind von einer Vielzahl an Faktoren abhängig, vorwiegend aber von der aktuellen Situation des Energiemarktes. Diese ist unstetig und trotz zahlreichen Prognosen unvorhersehbar. Für die Gewinnabschätzung eines Pumpspeicherwerks werden jedoch verlässliche Aussagen über den täglichen Verlauf der Strompreise benötigt. Während bei einem rein erzeugenden Stromlieferanten, wie einem Steinkohlekraftwerk, bereits die Kenntnisse über das mittlere Strompreisniveau ausreichen, ist die Situation eines PSW durch das hochgetaktete Wechselspiel zwischen Ein- und Verkauf sowie den unterschiedlichen Märkten hingegen deutlich komplexer. Für ein in der Zukunft liegendes Inbetriebnahmedatum von frühestens 2028 ist eine Abschätzung der Einnahmesituation nicht abbildbar.

Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung statt einer Berechnung des Kapitalwerts über prognostizierte Einnahmen, der Grenzwert für  $E_{ges,j}$  bestimmt, bei dem der Kapitalwert positive Werte annimmt. Dies wird erreicht, indem die Gleichung 7.1 nach  $E_{ges,j}$  aufgelöst wird. Der resultierende Wert  $E_{Grenz}$  stellt eine Annuität der mindestens zu erzielenden Erlöse dar und kann zu täglichen Mindesteinnahmen umgerechnet werden.

Unter Berücksichtigung eines Kalkulationszinssatzes von 6,88 % (Bestimmt über die Methode des ("WACC" Weighted Average Cost of Capital) nach [KON17]) und den in den vorigen Kapiteln ermittelten Parametern, liegt die Annuität der benötigten Einnahmen für die Vorzugsvariante 1 bei **65,1 Mio. Euro**. Dies setzt eine durchschnittliche tägliche Einnahme von rund 178.000 Euro voraus (auf tausend gerundet). Tabelle 7.1 fasst die ermittelten Grenzwerte der benötigten jährlichen Einnahmen zusammen.

**Tabelle 7.1: Benötigte jährliche Mindesteinnahmen der UPSW-Varianten für einen positiven Kapitalwert**

Variante 1	Variante 1t	Variante 2	Variante 3
65,1 Mio. Euro	70,5 Mio. Euro	92,6 Mio. Euro	52,8 Mio. Euro

Wie weit entfernt die real möglichen Einnahmemöglichkeiten des UPSW am Strommarkt von den in Tabelle 7.1 aufgeführten Werte sind, kann mit der folgenden überschlägigen Rechnung am Beispiel von Variante 1 gezeigt werden: Im Optimalfall kann das UPSW zwei komplette Be- und Entladungszyklen am Tag durchlaufen, wenn es überschlägig acht Stunden im Pumpbetrieb, acht Stunden im Turbinenbetrieb und acht Stunden im Bereitschaftsmodus arbeitet. Bei einer gespeicherten elektrischen Arbeit von 750 MWh je Zyklus ergibt sich bei zwei Zyklen eine ausgespeiste elektrische Energie  $E_{el,Tag}$  von:

$$E_{el,Tag} = 2 \cdot 750 \text{ MWh} = 1.500 \text{ MWh} \quad (7.3)$$

Die eingespeicherte elektrische Arbeit muss zuvor durch den Pumpbetrieb in das Pumpspeicherwerk geladen werden, wobei systembedingt Verluste entstehen und nur ein Teil der eingesetzten Energiemenge nutzbar ist. Der Gesamtwirkungsgrad des UPSW wird mit  $\eta_{ges} = 85\%$  angenommen. Somit muss für die aufgewendete Energiemenge  $E_{aufw,Tag}$  gelten:

$$E_{aufw,Tag} = \frac{E_{el,Tag}}{\eta_{ges}} = \frac{1.500 \text{ MWh}}{0,85} = 1.765 \text{ MWh} \quad (7.4)$$

Das Arbitragegeschäft von Pumpspeicherwerken basiert auf der Ausnutzung der Kursunterschiede im Strompreis. Der Strom wird zum niedrigen Strompreis  $P_{EK}$  eingekauft und zum höheren Preis  $P_{VK}$  verkauft. Der erzielte Gewinn ist somit die Differenz zwischen Stromeinkaufskosten und Erträgen aus den Verkäufen. In Anbetracht der Kapitalwertanalyse muss somit für die mittleren täglichen Einnahmen  $\overline{E}_{Tag}$  gelten:

$$\begin{aligned} \overline{E}_{Tag} &= \frac{65,1 \text{ Mio } \text{€}}{365} \stackrel{!}{=} 1.500 \text{ MWh} \cdot \overline{p}_{vk} - \frac{1.500 \text{ MWh}}{\eta_{ges}} \cdot \overline{p}_{ek} \\ &\Rightarrow 119 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} = \overline{p}_{vk} - \frac{1}{0,85} \cdot \overline{p}_{ek} = \overline{p}_{vk} - \frac{20}{17} \cdot \overline{p}_{ek} \\ &\Rightarrow \overline{p}_{vk} - \overline{p}_{ek} = \overline{\Delta p} = 119 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} + \frac{3}{17} \cdot \overline{p}_{ek} \end{aligned} \quad (7.5)$$

Nach dieser Rechnung muss die durchschnittliche Preisdifferenz zwischen eingekauftem und verkauftem Strom  $\overline{\Delta P}$  über **119 Euro je MWh** liegen. Eine solche Preisspanne lässt sich auf dem heutigen Strommarkt nicht erzielen, insbesondere nicht für 365 Tage im Jahr. Im Jahr 2017 lagen die obersten vier Stundenwerte eines Tages für eine MWh Strom auf dem Day-Ahead-Markt bei durchschnittlich 47 Euro, die untersten vier Stundenwerte eines Tages lagen bei durchschnittlich 22 Euro. Die Differenz der obersten und untersten 4 Stundenwerte eines Tages betragen **25 Euro je MWh**. Der Mittelwert der Intraday-Preise lag im Jahr 2017 bei 34 Euro.

Das Geschäft mit Regelleistungsbereitstellung, aus welchem Pumpspeicherwerken seit der Energiewende rund ein Drittel der Einnahmen bezogen haben, hat im Laufe der Jahre immer mehr an Bedeutung verloren. Grund dafür sind sinkende Leistungspreise. Ebenso ist die Erzeugung von Blindleistung nicht ausreichend vergütet und eignet sich daher nicht als rentables Geschäftsfeld.

Ein Vergleich der benötigten Mindesteinnahmen mit den von Dao Pulido im Rahmen der ersten Machbarkeitsstudie simulierten Erlösen zeigt ebenfalls, dass ein Erzielen der benötigten Einnahmen selbst bei optimalem Einsatz nicht möglich ist: Für die Regelleistungsbereitstellung und durch Arbitrageinsatz auf dem Spotmarkt kann laut [DAO15] insgesamt lediglich eine Annuität von 22,5 Mio. Euro erzielt werden.

Insgesamt weist die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nach, dass ein Pumpspeicherwerk mit den ermittelten hohen Investitionskosten und dem herkömmlichen Betreibermodell für alle betrachteten Varianten derzeit nicht wirtschaftlich darstellbar ist. Ein alternatives Geschäftsmodell zur Einspeicherung von elektrischer Energie müsste die in Tabelle 7.1 aufgeführten Jahreseinnahmen generieren, was bei jetzigem Kenntnisstand ebenfalls nicht möglich scheint. Sollten sich die Marktbedingungen für Pumpspeicherkraftwerke durch stärker fluktuierende Strompreise oder durch die Einführung einer Vergütung für die Systemdienstleistung *Stromspeicherung* verbessern, so bietet das UPSW trotz der vergleichsweise hohen Investitionskosten viele Vorteile.