

Pumpspeicherkraftwerke

Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.
Arbeitskreis Energie (AKE)

Frühjahrssitzung 2024 im Physikzentrum
Bad Honnef

Bad Honnef am 11. April 2024



Tractebel Hydroprojekt GmbH

PUBLIC

INTERNAL

RESTRICTED

CONFIDENTIAL

With the trusted expertise of  LAHMEYER
HYDROPROJEKT

01

Überblick Pumpspeicherkonzept

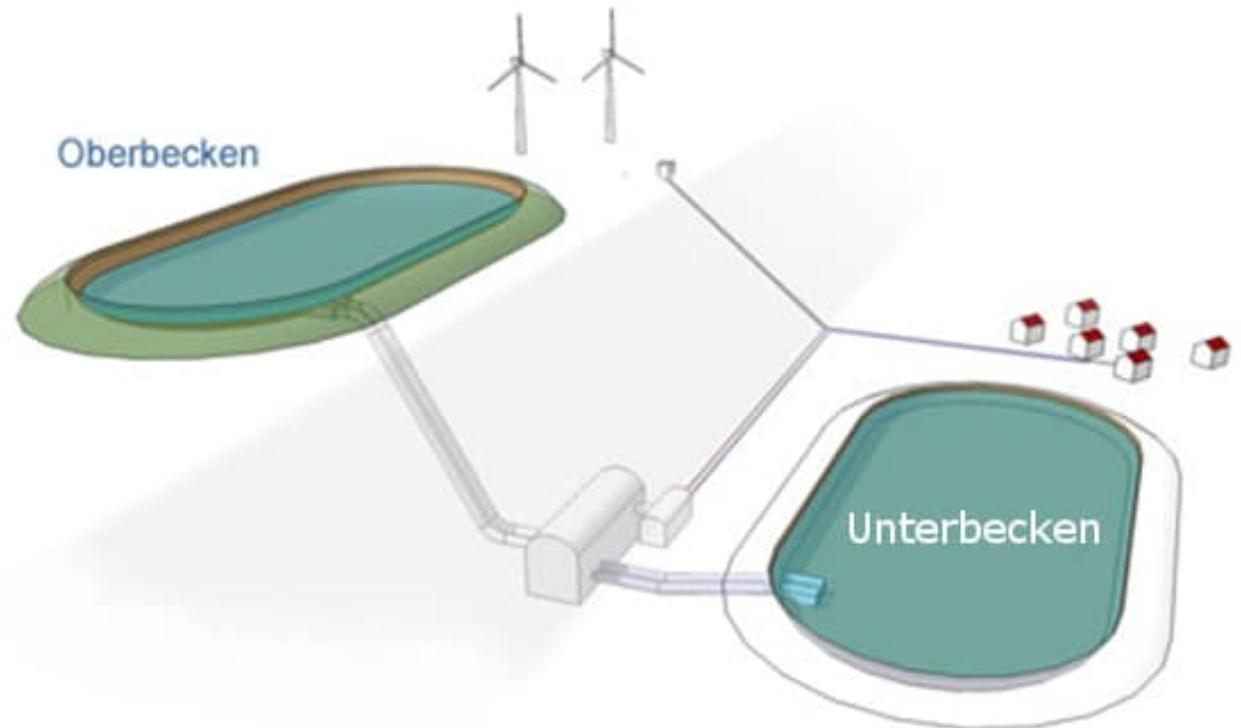


TRACTEBEL
ENGIE

Tractebel Hydroprojekt GmbH

Funktionsweise von Pumpspeicherkraftwerken

- Oberbecken
- Unterbecken
- Krafthaus
- Triebwasserleitungen (evtl. Wasserschloss)
- Netzanbindung

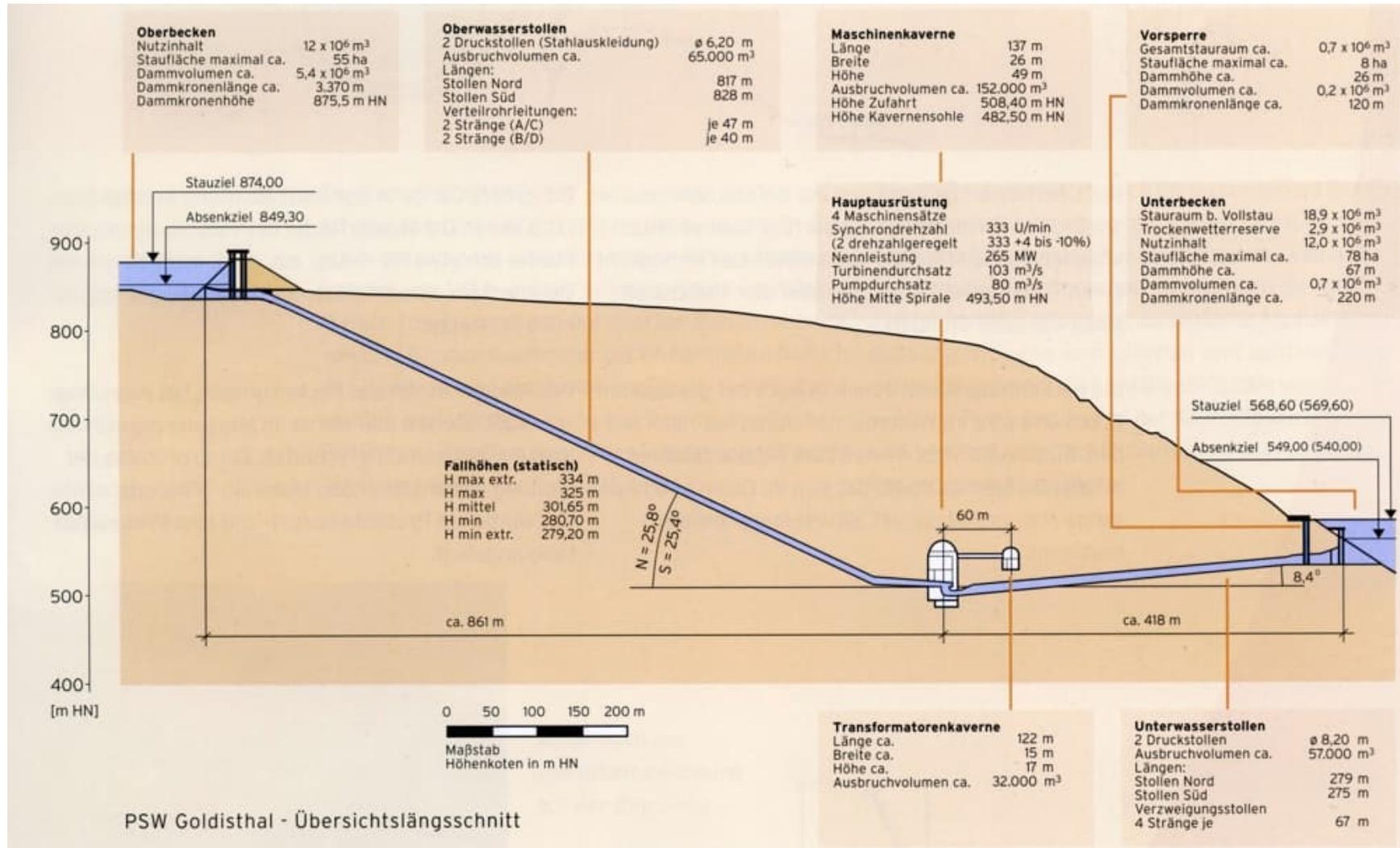


Energiespeicherung: Erhöhung der potentiellen Energie des Wassers unter Aufbringung von elektrischer Energie durch Hochpumpen von Wasser aus dem Unterbecken in das Oberbecken

Energierückgewinnung: Rückumwandlung der gespeicherten potentiellen Energie in elektrische Energie durch Turbinieren des Wassers aus dem Oberbecken und Abgabe in das Unterbecken

Quelle der Abbildung: <http://www.psw.at>

Funktionsweise von Pumpspeicherkraftwerken



Pumpspeicherwerk Goldisthal mit Ober- und Unterbecken (installierte Leistung 1.200 MW)

Funktionsweise von Pumpspeicherkraftwerken

Ideale Standortvoraussetzungen:

- **Große Fallhöhe** zwischen Ober- und Unterbecken
- **Kurze Horizontaldistanz** zwischen Ober- und Unterbecken
- Ausgleich von Verdunstungs- und Versickerungsverlusten

Direkte Proportionalität zwischen Leistung und Fallhöhe bzw. Durchfluss

$$\rightarrow P = \eta \times \rho \times Q \times H \times g$$

mit:

P = Anlagenleistung (W, kW, MW)

Q = Turbinen- bzw. Pumpdurchfluss (m³/s)

H = Fallhöhe (m)

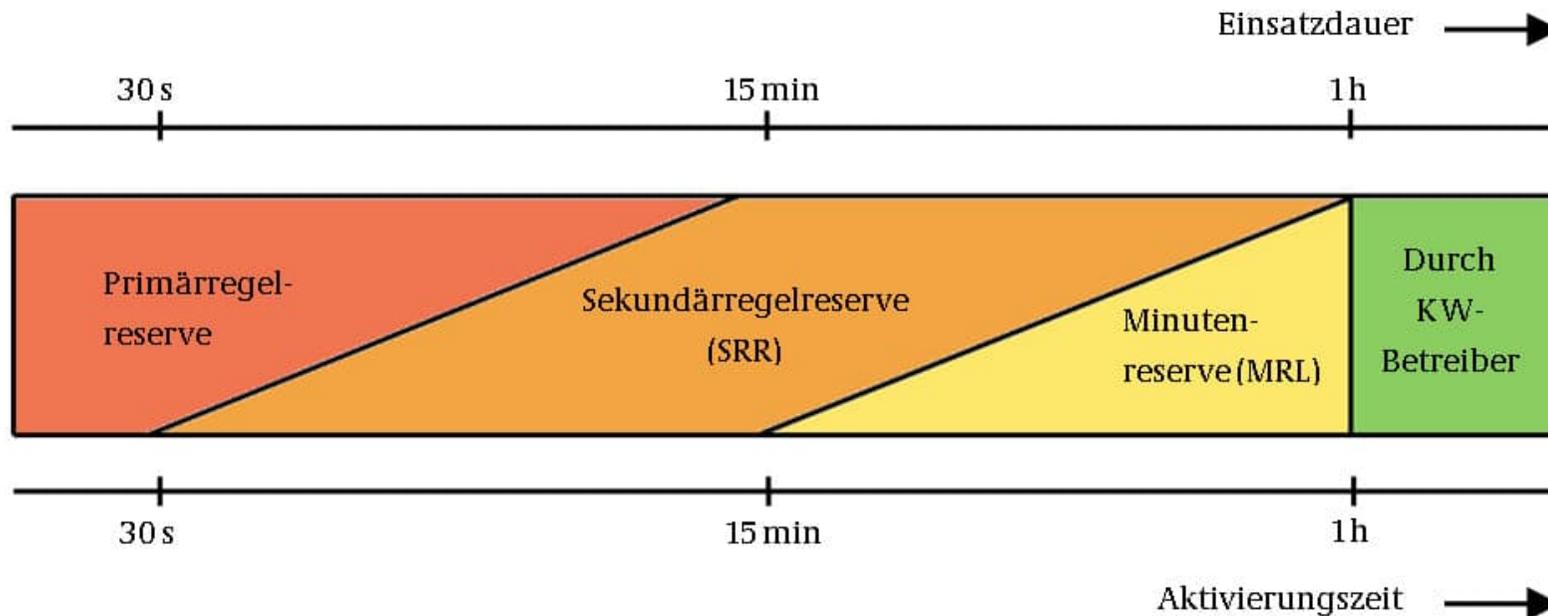
η = Anlagengesamtwirkungsgrad (-)

ρ = Dichte des Wassers (kg/m³)

g = Erdbeschleunigung (9,81 m/s²)

Bedeutung und Hauptaufgaben von PSW für das Stromnetz

- Tages und Wochenspeicher zum Ausgleich von Bedarfsschwankungen (Wälzbetrieb)
- Frequenzregelung (Primärregelung, Sekundärregelung, Minutenreserve) zum Lastausgleich und bei Prognoseabweichungen
- Blindleistungsregelung (Phasenschieberbetrieb)
- Schwarzstartfähigkeit nach einem Netzausfall



Quelle: Bundesnetzagentur

Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland

Nr	Pumpspeicherkraftwerk	Bundesland	Installierte Leistung (MW)	Speicherkapazität (MWh)	Jahr
1	Goldisthal	Thüringen	1.060	8.480	2003
2	Markersbach	Sachsen	1.050	4.018	1979
3	Schluchsee (Wehrkraftwerk)	Baden-Württemberg	980	6.073	1975
4	Waldeck II	Hessen	480	3.428	1975
5	Schluchsee (Kaverne)	Baden-Württemberg	370	2.064	1967
6	Hohenwarte II	Thüringen	320	2.087	1966
7	Erzhausen	Niedersachsen	220	1.110	1964
8	Schluchsee (Kraftwerk Witznau)	Baden-Württemberg	220	626	1950
9	Happburg	Bayern	160	900	1958
10	Schluchsee Kraftwerk Waldshut	Baden-Württemberg	160	402	2011

10 größte PSW in Deutschland,
Quelle: Wikipedia

Pumpspeicherkraftwerk Goldisthal



Pumpspeicherwerk Goldisthal mit Ober -und Unterbecken (installierte Leistung 1.060 MW)

Pumpspeicherkraftwerk Goldisthal



Bau Unterbecken Goldisthal



Bau Oberbecken Goldisthal



Kraftwerkskaverne Goldisthal (installierte Leistung 1.060 MW)

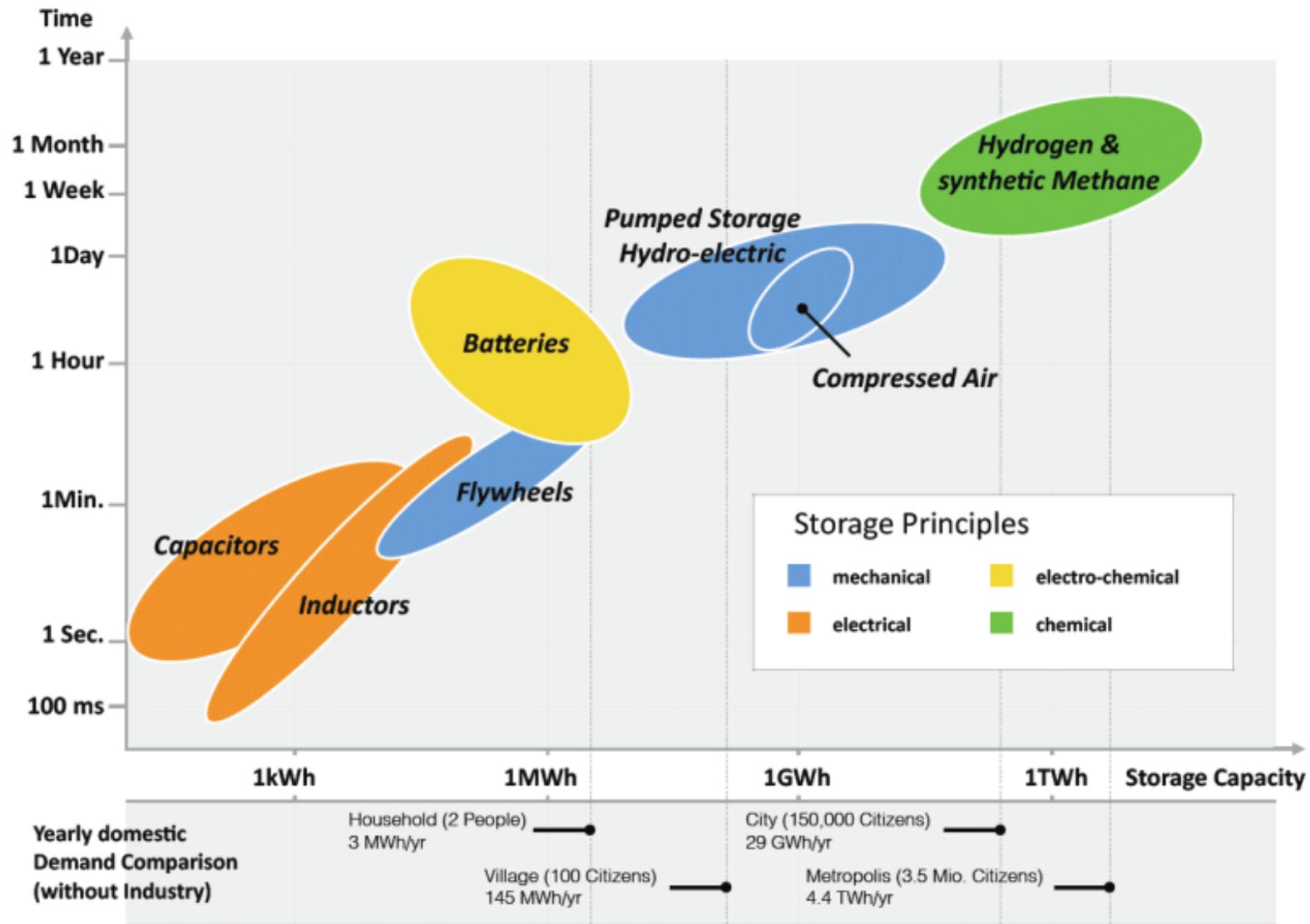


Einlaufbauwerk Oberbecken Goldisthal

Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland

- Es gibt ungefähr **30 bestehende Pumpspeicherkraftwerke** in Deutschland.
- **Installierte Leistung, gesamt** ca. **7 GW**
- **Speicherkapazität, gesamt** ca. **40 GWh**
- **Jährliche Energieerzeugung** ca. **4.000 GWh**
- **Jährliche Energiespeicherung** ca. **5.800 GWh**
- Momentan nur **sehr wenige Pumpspeicherprojekte** im Gange (z.B. das sich im Bau befindende **PSW Forbach** von EnBW), v.a. wegen der ungünstigen wirtschaftlichen Randbedingungen.

Vergleich von Speichertechnologien



Speichertechnologien im Vergleich (Quelle: M. Sterner, Energiespeicher, 2014)

Vergleich von Speichertechnologien - Technische und ökonomische Parameter

	Pump-speicher	Batterie	Superkon-densatoren	Wasserstoff	Druckluft diabat
Ansprechzeiten	Min.	Millisek.	Millisek.	systemspez.	Min.
Speicherkapazität in MWh*	100 MWh – 100 GWh	bis 50 MWh	Bis 100 kWh	10GWh bis 10TWh	1 GWh
Speicherleistung in MW	>1.000	27	0,1	0,2	290
Kosten in €/kW	800 -1.500*	1.200-2.000	sehr hoch	2.500	600
Schwarzstartfähigkeit	ja	evtl.	evtl.	k.A.	ja
Phasenschieberbetrieb	ja	ja	ja	nein	nein
Regelenergie	ja	bedingt	nein	nein	nein
Blindleistung	ja	nein	nein	nein	bedingt
Wirkungsgrad	70-80%	80-95%	80-95%	30-40%	50%
Zyklenzahl	unbegrenzt	<10.000	>1.000.000	k.A.	unbegrenzt

Quellen: DENA 2010, Wikipedia „Energiespeicher“, LBS 2010, DBACB 2010, AEE 2011, GE 2012

* Eigenangabe Tractebel Hydroprojekt GmbH

02

Pumpspeicher im Rheinischen Revier



TRACTEBEL
ENGIE

Tractebel Hydroprojekt GmbH

Studie über Pumpspeicherpotentiale im rheinischen Revier

“Konzepte zur energetischen Nachnutzung von Tagebaurestlöchern in Nordrhein-Westfalen”,

Tractebel Hydroprojekt GmbH vom November 2019, beauftragt vom Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen

Untersuchung über Möglichkeiten zum Bau von **Pumpspeicherkraftwerken** zur energetischen Nachnutzung der Tagebaurestlöcher nach dem Kohleausstieg

- **Grundlagenermittlung** (Geologie und Geotechnik, Hydrologie, Umwelt, Regionalplanung)
- Untersuchung zahlreicher **Pumpspeicherkonzepte**
- Identifikation und Auswertung von **möglichen Standorten**

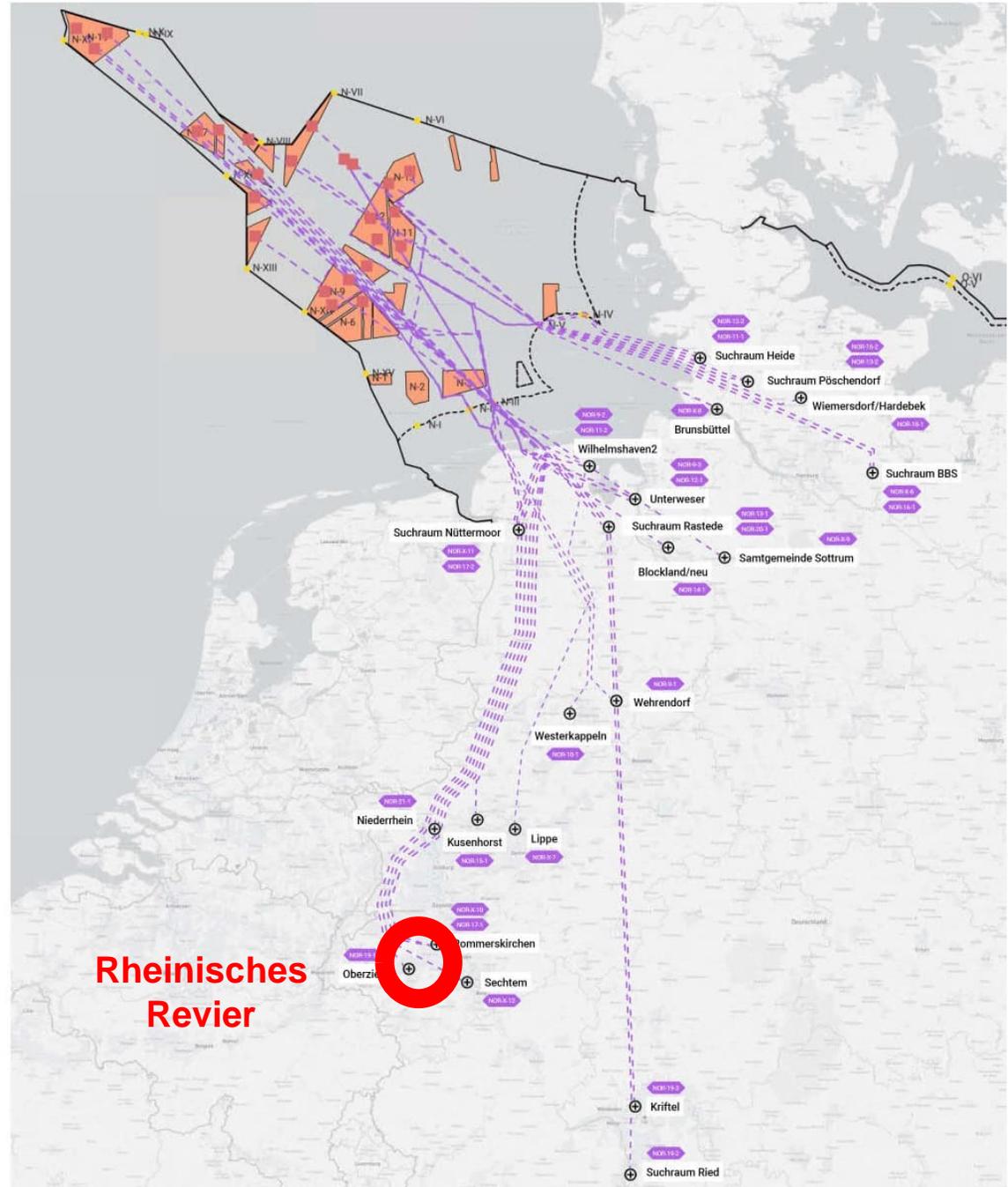


Studententitel, Tractebel Hydroprojekt GmbH, 2019
Download: Publikationen | Wirtschaft NRW

Netzentwicklungsplan

Geplante Hauptstromnetzleitungen zwischen **Nordsee** und **Nordrhein-Westfalen**

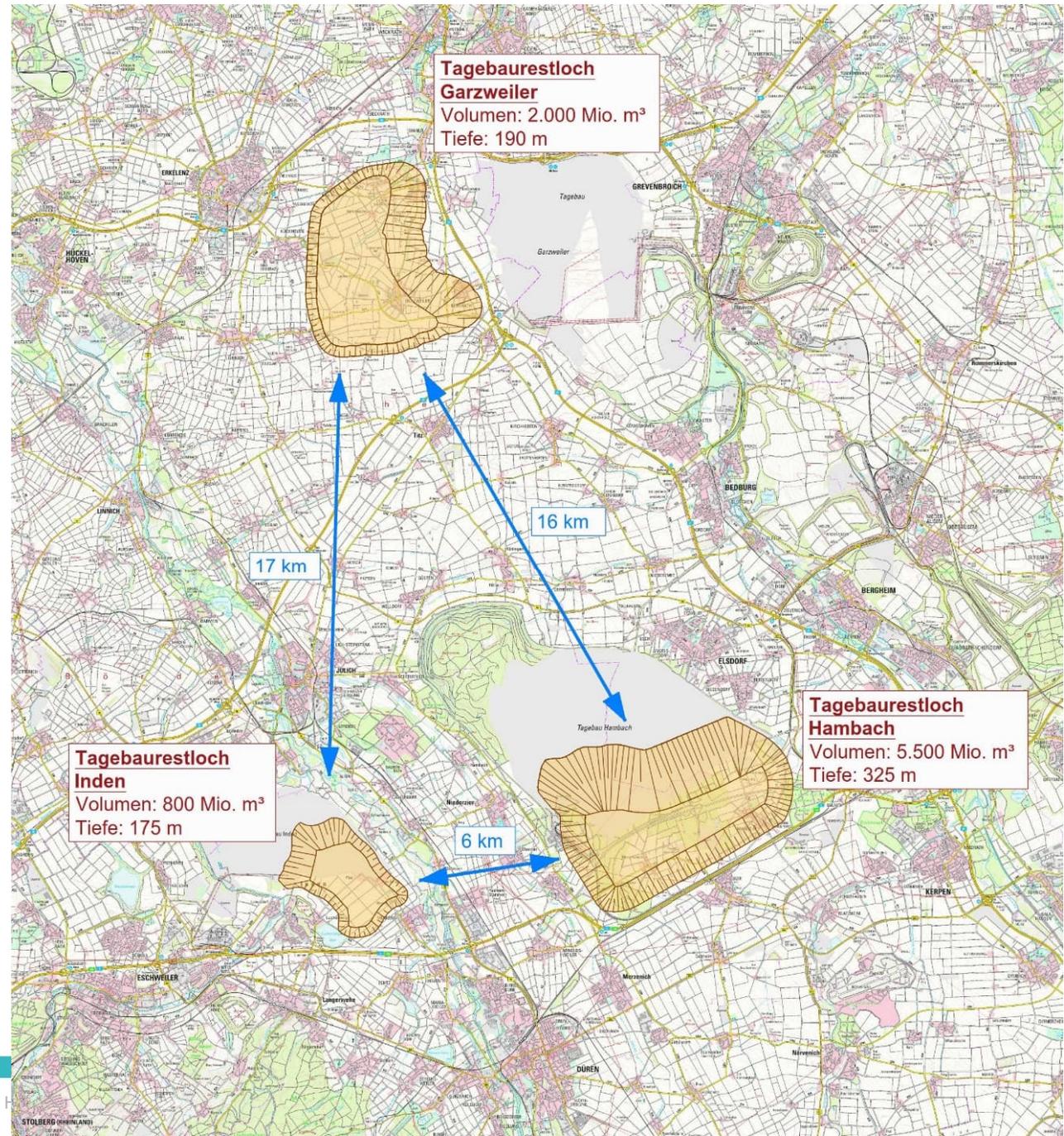
Ideal zur **Einspeisung von Windenergie** aus den offshore Windparks in den **Speicherkraftwerken im rheinischen Revier**



Quelle: Bundesnetzagentur,
Netzentwicklungsplan 2037/2045,
Version 2023

Pumpspeicher im Rheinischen Revier - Übersicht

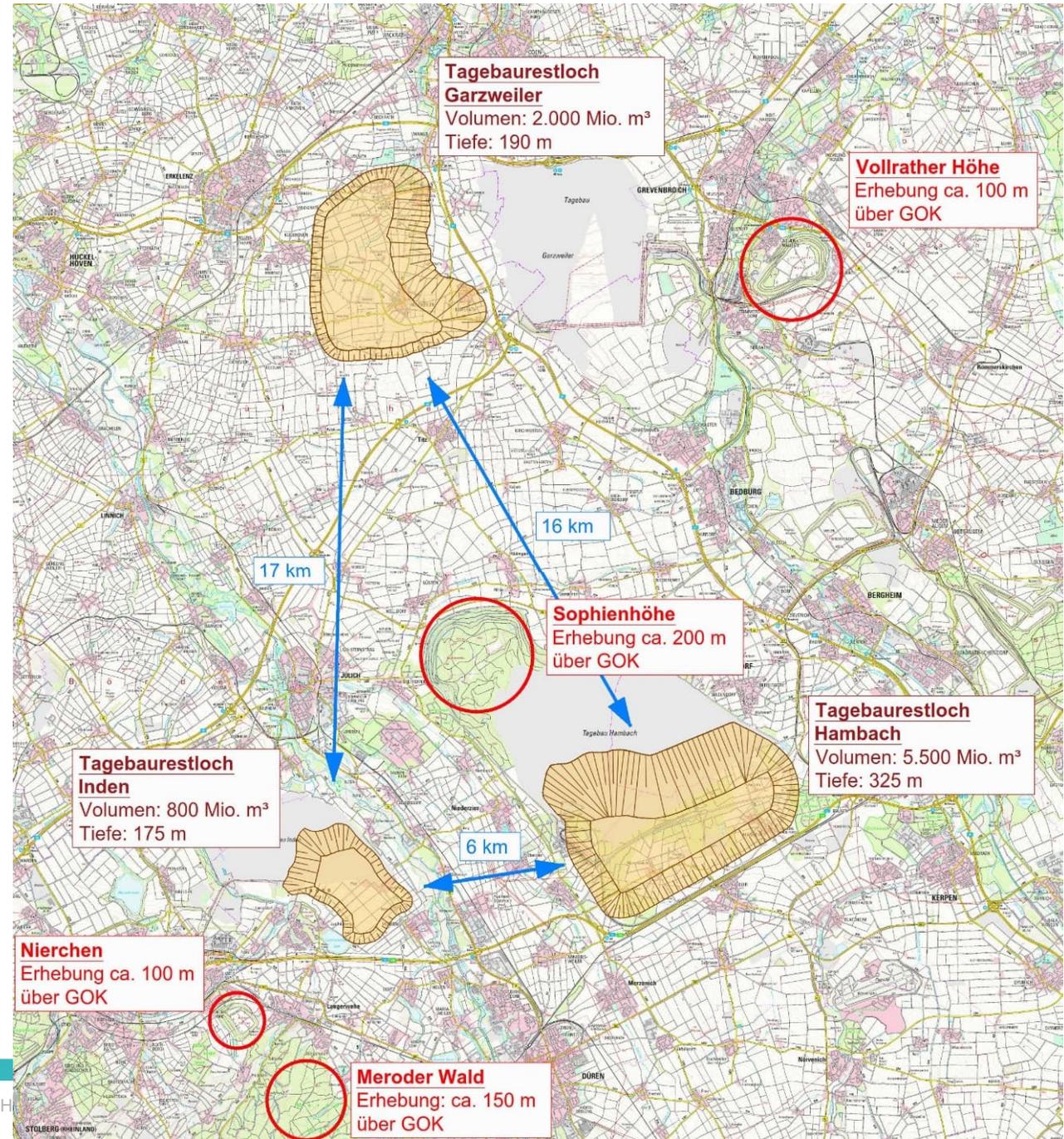
- Tagebaurestlöcher **Garzweiler, Hambach** und **Inden**
- **Große Restlochvolumina** und **-tiefen** bieten ideale Voraussetzungen für PSW-Anlage
- **Kohleausstieg 2030** (gemäß „Reviervertrag 2.0“ vom Mai 2022)
- **Regionalplan:** Füllung der Restlöcher mit Wasser (**Tagebaurestseen**); Füllzeit ca. **20 bis 40 Jahre**



Übersicht Rheinisches Revier

Pumpspeicher im Rheinischen Revier - Übersicht

- Einbeziehung von vorhandenen **Geländeerhebungen** (Halden bzw. natürlich) in PSW-Konzept als **mögliche Oberbeckenstandorte**



Übersicht Rheinisches Revier
mit Geländeerhebungen

Pumpspeicher im Rheinischen Revier - Projektauslegungen

Pendelwasservolumen (bestimmend für **Anlagenleistung** und **Zyklusdauer**):

- Große Wasservolumina durch Tagebauseen vorhanden



gewählt für PSW-Studie: 10 Mio. m³ (Wasserkörper von D = 700 m und Tiefe von 30 m)

(großer Wert im Vergleich zu anderen PSW in Deutschland)

Anzahl der Volllaststunden (abhängig von **Ausbauziel** und **Zweck des PSW**):

- **Kleine Anzahl von Volllaststunden** (z.B. 4 bis 6 h): Erzeugung von möglichst hoher Leistung, Ausgleich von Tagesspitzen, Anwendung bei kleinen Pendelwasservolumina
- **Große Anzahl von Volllaststunden** (größer 8 h): Nutzung als Langzeitspeicher (z.B. zur Speicherung von Wind- und Solarenergie), dafür geringere Leistung, Anwendung bei großen Pendelwasservolumina



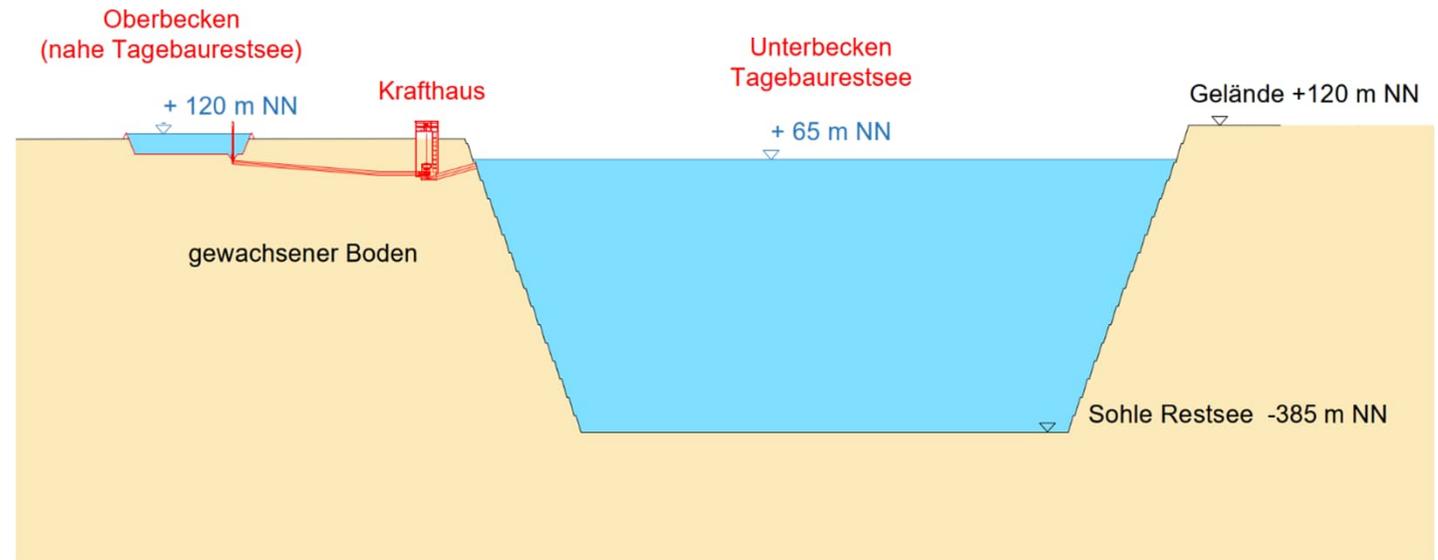
gewählt für PSW-Studie: 12 Stunden

Pumpspeicher-Konzept 1:

Gefüllte Restseen als Unterbecken

Gefüllter Tagebausee als Unterbecken

Oberbecken in unmittelbarer Nähe von Tagebausee



- + Geringe Distanzen
- + Keine Sümpfungen erforderlich
- + Günstige geotechnische Bedingungen

- - **Sehr geringe Fallhöhen**

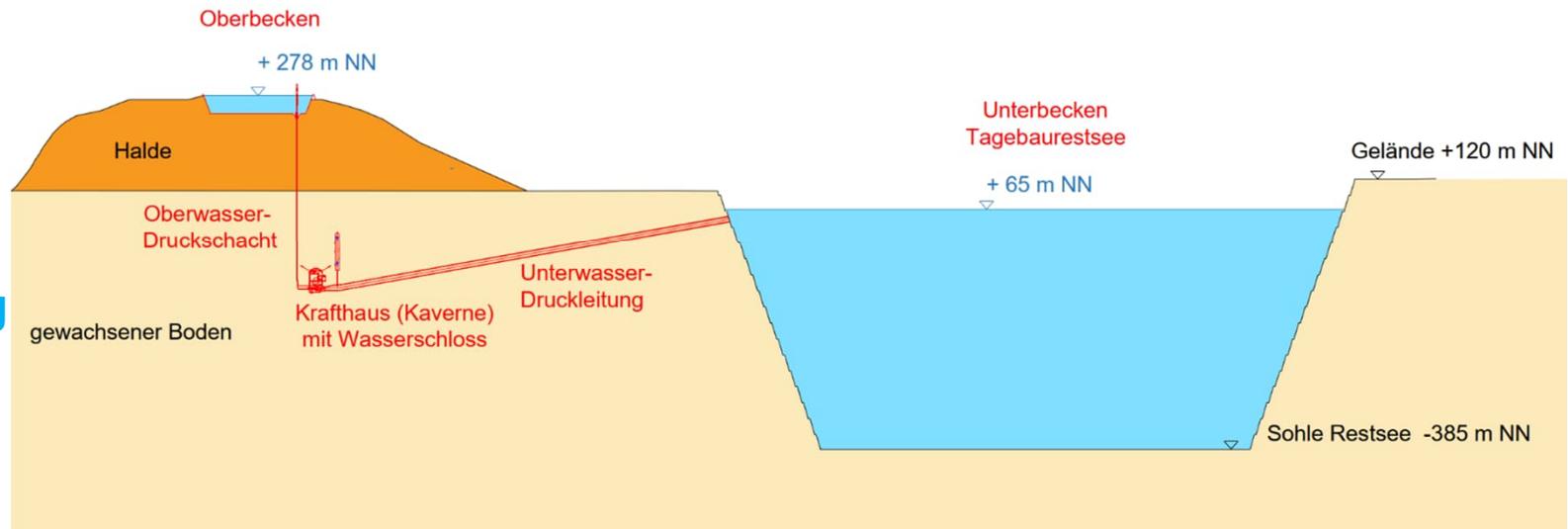
- Später Beginn PSW-Betrieb, da Tagebausee erst gefüllt werden muss

Pumpspeicher-Konzept 2

Gefüllte Restseen als Unterbecken

Gefüllter
Tagebausee als
Unterbecken

Oberbecken auf
Geländeerhebung
(z.B. Halden)



+ Keine Sümpfungen erforderlich

o Geringe bis mittlere Fallhöhe

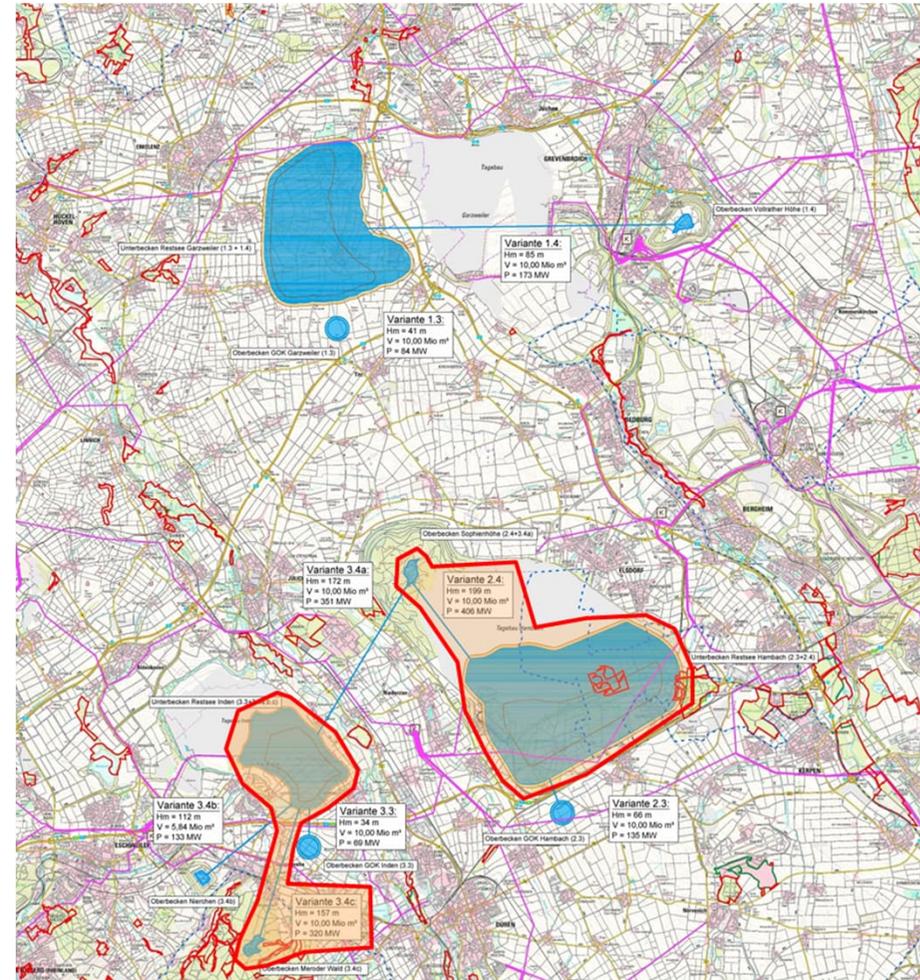
- Größere Distanzen zwischen Geländeerhebung und Tagebausee
- Schwierige Geotechnik (Oberbecken auf geschüttetem Material)
- Später Beginn PSW-Betrieb, da Tagebausee erst gefüllt werden muss

Pumpspeicher-Konzepte 1 und 2

Restseen als Unterbecken

Pumpspeicherkonzepte mit
gefüllten Restseen als
Unterbecken:

- Durchschnittliche geodätische Fallhöhen:
30 m - 200 m
- Installierte Leistungen:
50 MW - 400 MW
(für 10 Mio m³ Speichervolumen und
12 h Volllaststunden-Betrieb)
- Speicherkapazitäten:
600 - 5.000 MWh
(je 12h - Zyklus)



PSW-Konzepte mit gefüllten Tagebaurestseen



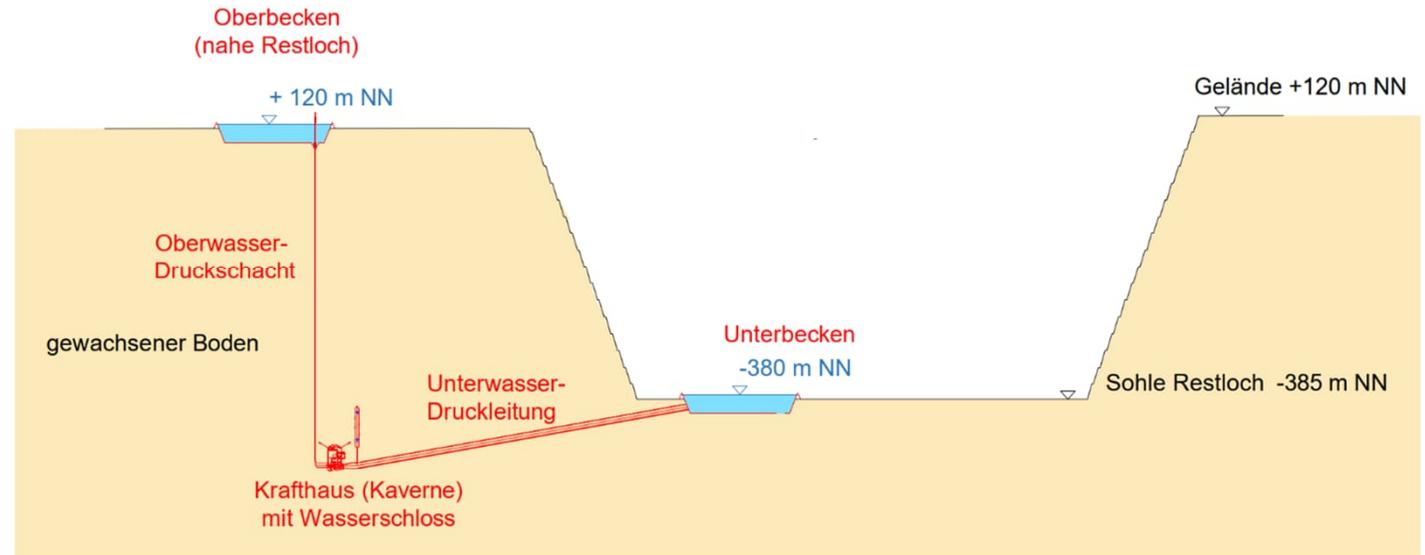
OB: Halde Sophienhöhe – UB: Tagebaurestsee Hambach
OB: Erhöhung Meroder Wald – UB: Tagebaurestsee Inden

Pumpspeicher-Konzept 3

Unterbecken auf Restlochsohle

Unterbecken im Sohlbereich des Restlochs als offenes Becken

Oberbecken entweder auf Geländeerhebung bzw. in unmittelbarer Nähe der Tagebauseen



+ Große bis sehr große Fallhöhen

+ Früher PSW-Betrieb möglich

- - Permanente Sumpfung notwendig!

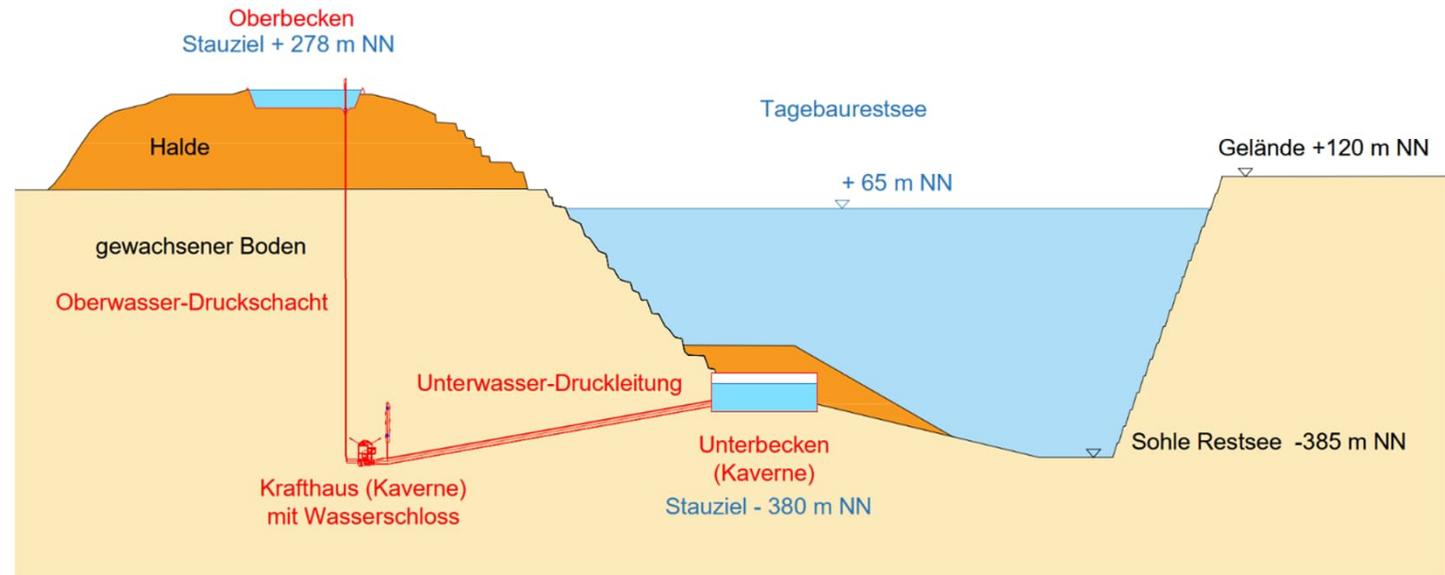
- - Keine Nutzung als Tagebausee möglich!

Pumpspeicher-Konzept 4

Unterbecken auf Sohle im Restsee

Unterbecken im Sohlbereich des Restlochs als geschlossene Kaverne

Oberbecken entweder auf Geländeerhebung bzw. in unmittelbarer Nähe der Tagebauseen



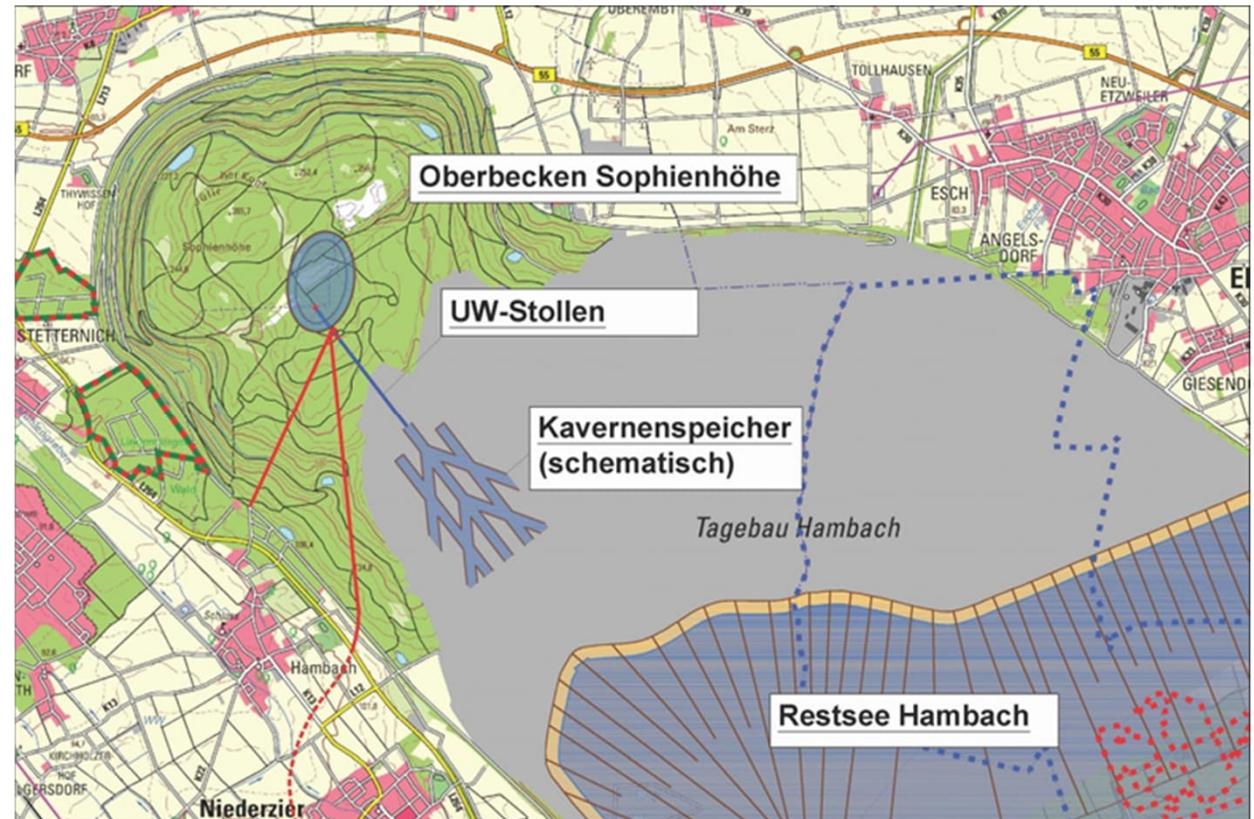
- ++ Große bis sehr große Fallhöhen
- ++ Früher PSW-Betrieb möglich
- + Keine Sümpfungen erforderlich
- Große technische Herausforderung
- Reduziertes Pendelwasservolumen (nur begrenzter Ausbau des Kavernenspeichers)

Pumpspeicher-Konzept 4

Unterbecken auf Sohle im Restsee

PSW-Konzepte mit **tiefliegenden Unterbecken im Bereich der Restlochsohlen:**

- Erzielbare mittlere Fallhöhen: **220 m bis 650 m**
- Erzielbare Anlagenleistungen: **400 MW bis 1.300 MW**
(für 10 Mio. m³ Arbeitsvolumen und 12 h Volllastbetrieb)
- Erzielbare Speicherkapazitäten: **5.000 bis 16.000 MWh**
(pro 12h - Zyklus)

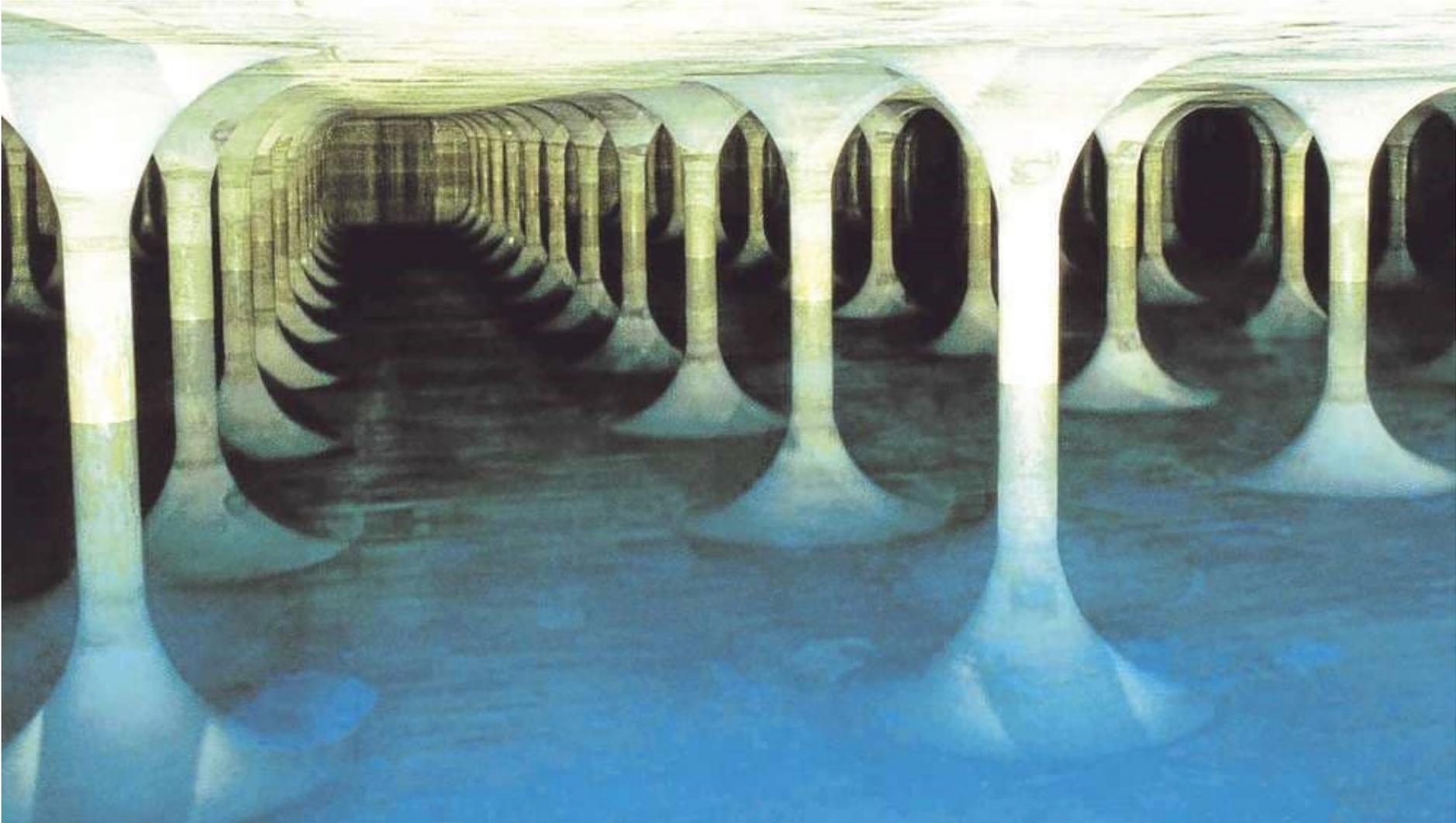


PSW-Konzept Sophienhöhe – Kavernenspeicher Hamburg



OB: Halde Sophienhöhe – UB: Restlochsohle Hambach (Kaverne)
OB: neben Tagebau Hambach – UB: Restlochsohle Hambach (Kaverne)

Unterwasserkavernenspeicher als unterirdische Halle



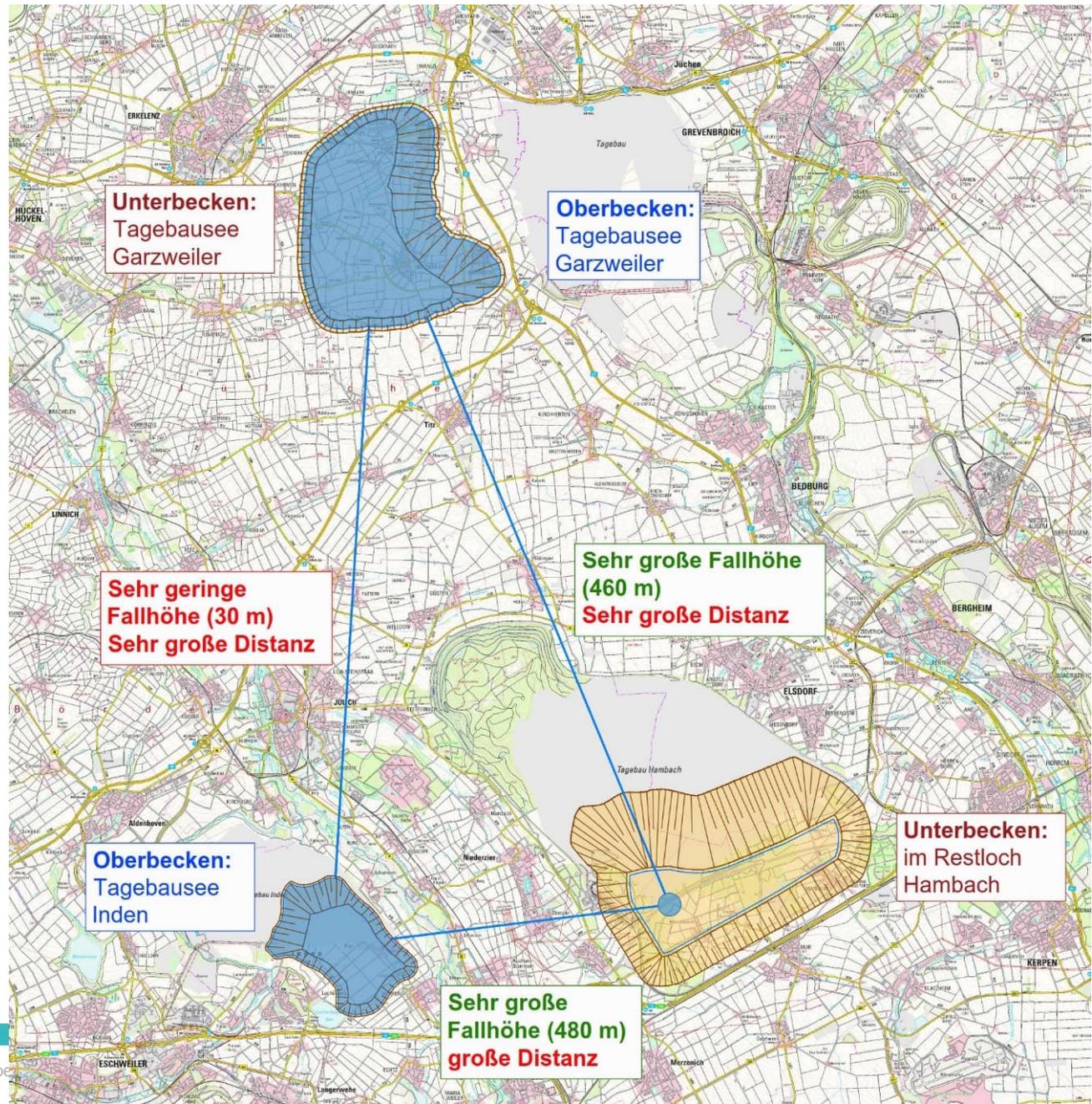
Trinkwasserspeicher München, Foto: SWIM

Pumpspeicher-Konzept 5 Verbindung der Tagebaulöcher untereinander

**++ Große Beckenvolumina
ideal für Langzeitspeicher**

-- Sehr große Distanzen

**-- Sehr geringe Fallhöhen bei
Kombination von zwei
Tagebauseen**



*PSW-Konzept mit Verbindung
der vorhandenen Tagebaue*

03

Aktuelle Pumpspeicherprojekte

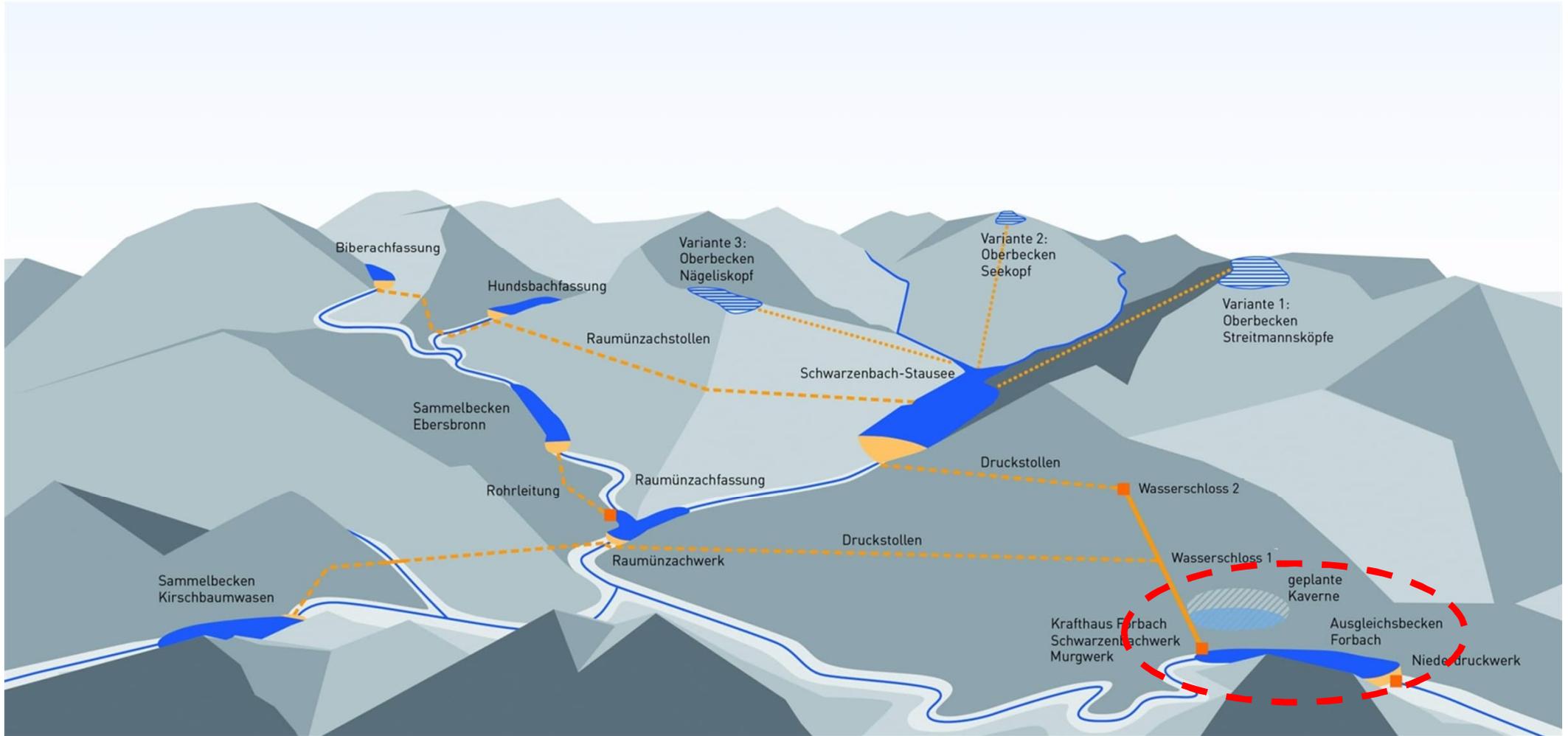


TRACTEBEL
ENGIE

Tractebel Hydroprojekt GmbH

PSW Forbach

Unterwasserkavernenspeicher als Stollensystem



PSW Forbach - Übersicht, Quelle: EnBW, Tractebel

PSW Forbach Unterwasserkavernenspeicher als Stollensystem

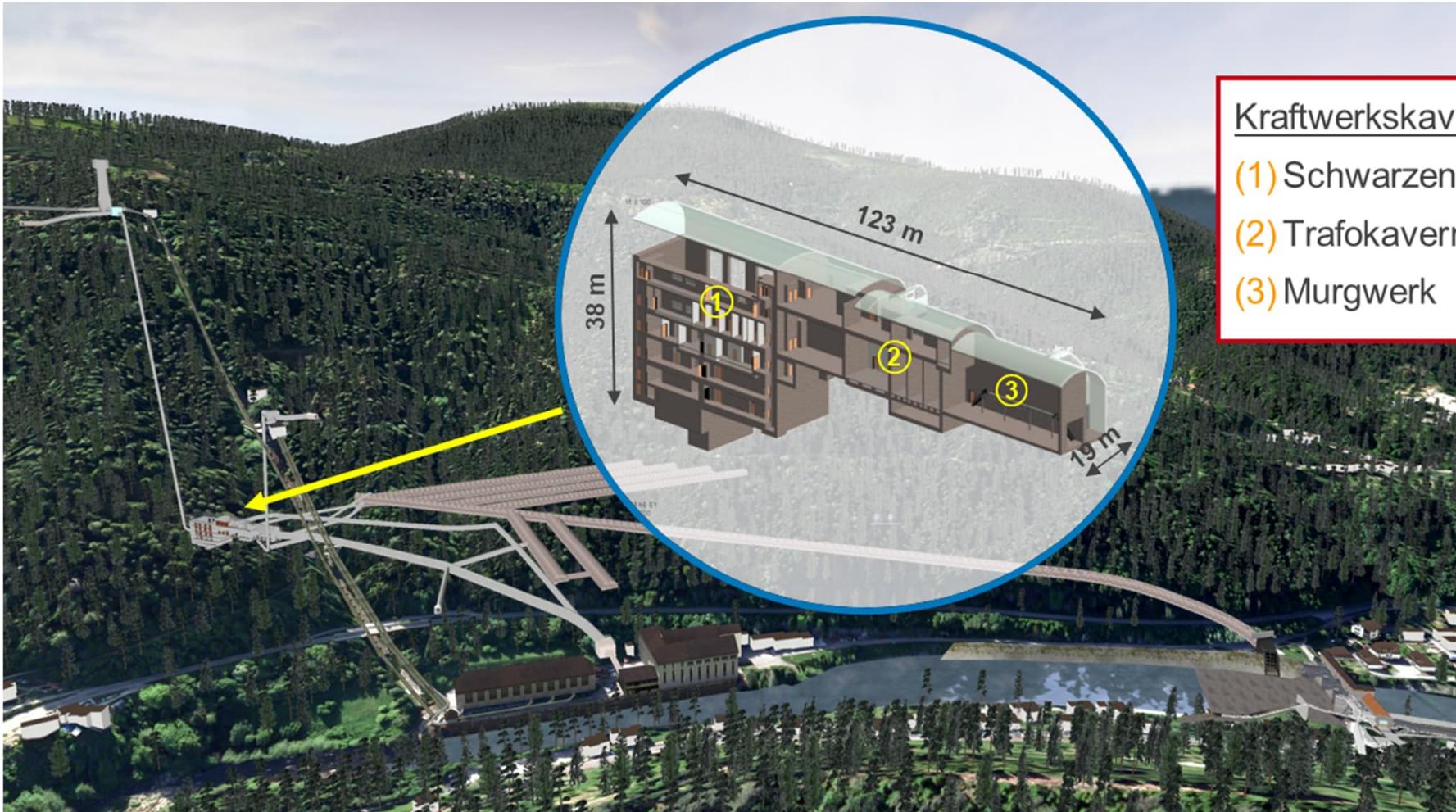
- Hohes Zubaupotential für **Photovoltaik** in Baden-Württemberg
- **Rückgang der regelbaren Erzeugung** in der Region (KKW Neckarwestheim II in 2022)
- Verstetigung der zunehmend intermittierenden Energieerzeugung mit hoher Flexibilität aufgrund **drehzahlvariabler Pumpturbine**
- Anteil der **Erneuerbaren Energien in 2030 bereits 65 %** ist politischer Wille (Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung)
- **Abregelung von Erneuerbaren Energien** aufgrund Lastmanagement wird aller Voraussicht nach steigen
- PSW Forbach leistet wichtigen Beitrag zu einer **zentralen Herausforderung der Energiewende** – bedarfsgerechte Energiespeicherung und -erzeugung

PSW Forbach Unterwasserkavernenspeicher als Stollensystem



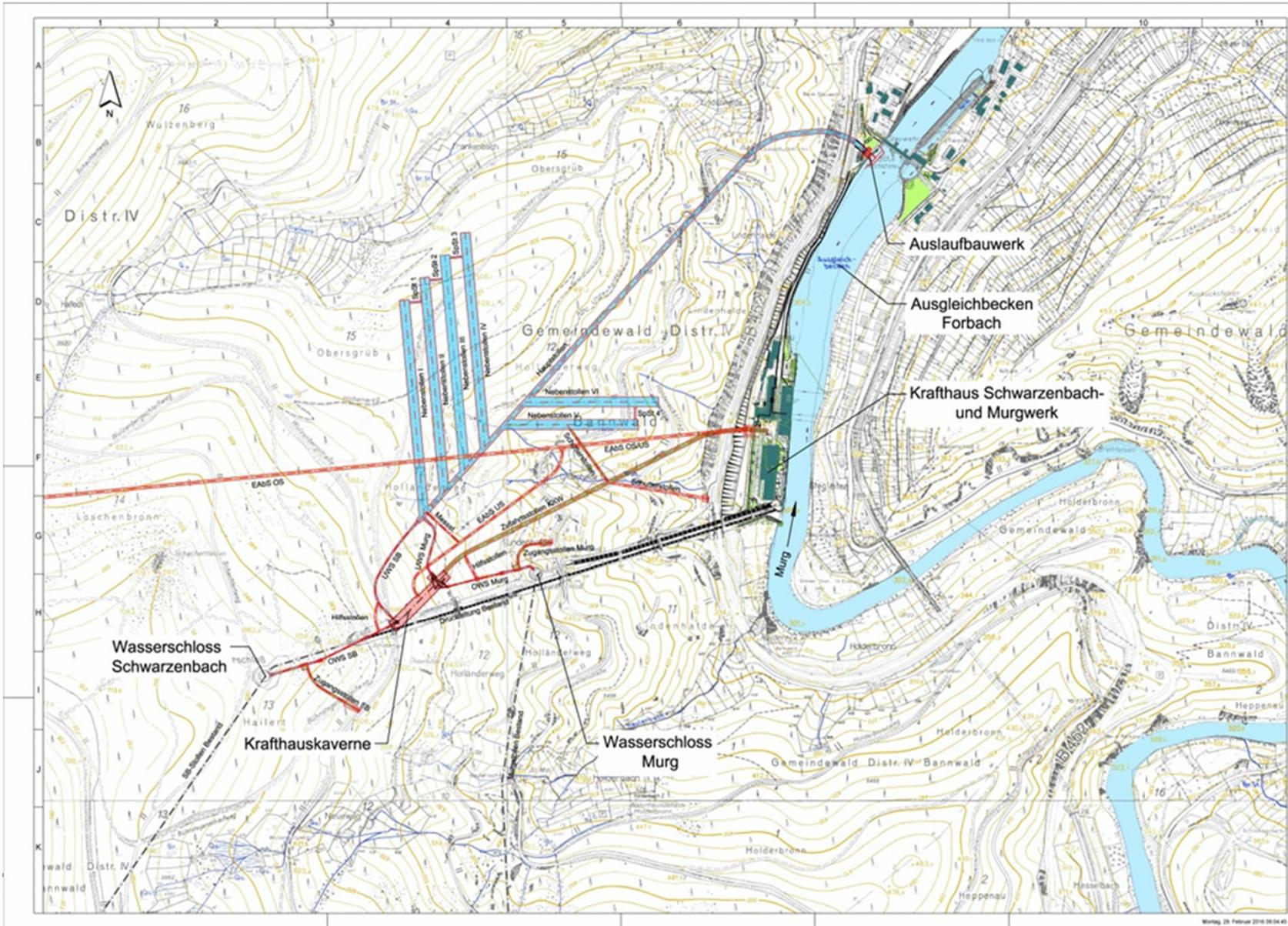
PSW Forbach - Stollensystem, Quelle: EnBW, Tractebel

PSW Forbach Unterwasserkavernenspeicher als Stollensystem



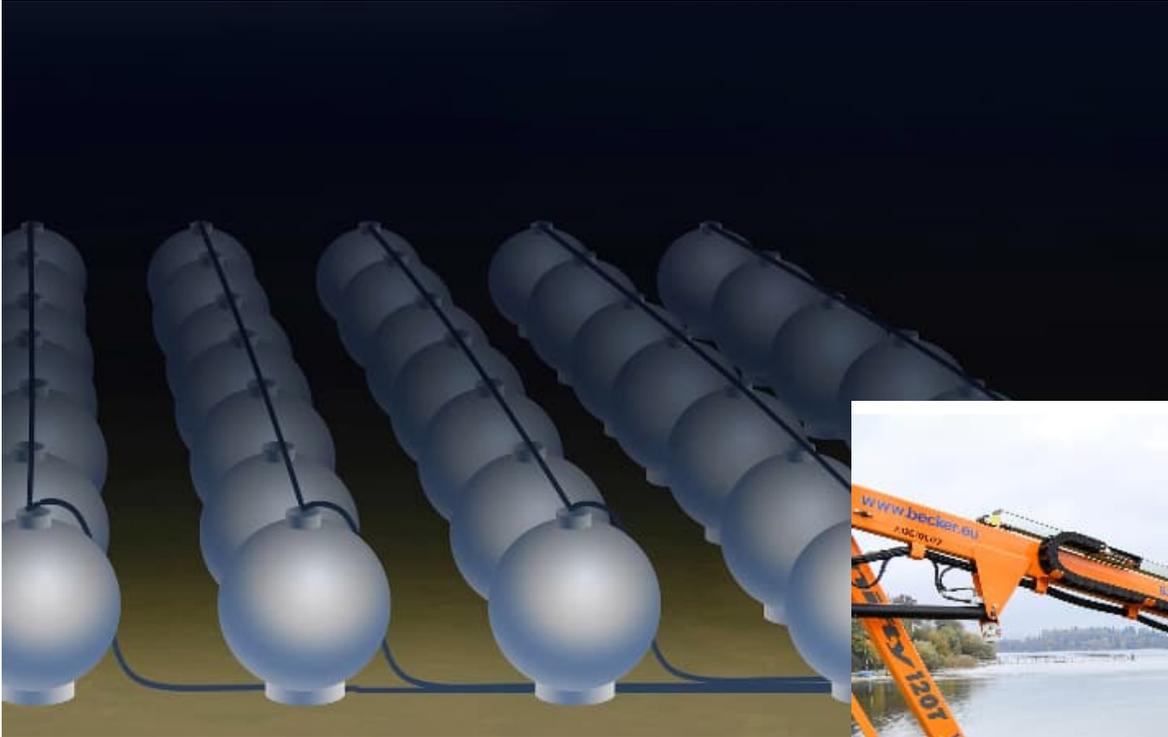
PSW Forbach – Stollensystem mit Kaverne, Quelle: EnBW, Tractebel

PSW Forbach Unterwasserkavernenspeicher als Stollensystem



*Beispiel
Kavernenspeicher
PSW Forbach,
Planung Tractebel*

Betonkugeln auf der Tagebauseesohle

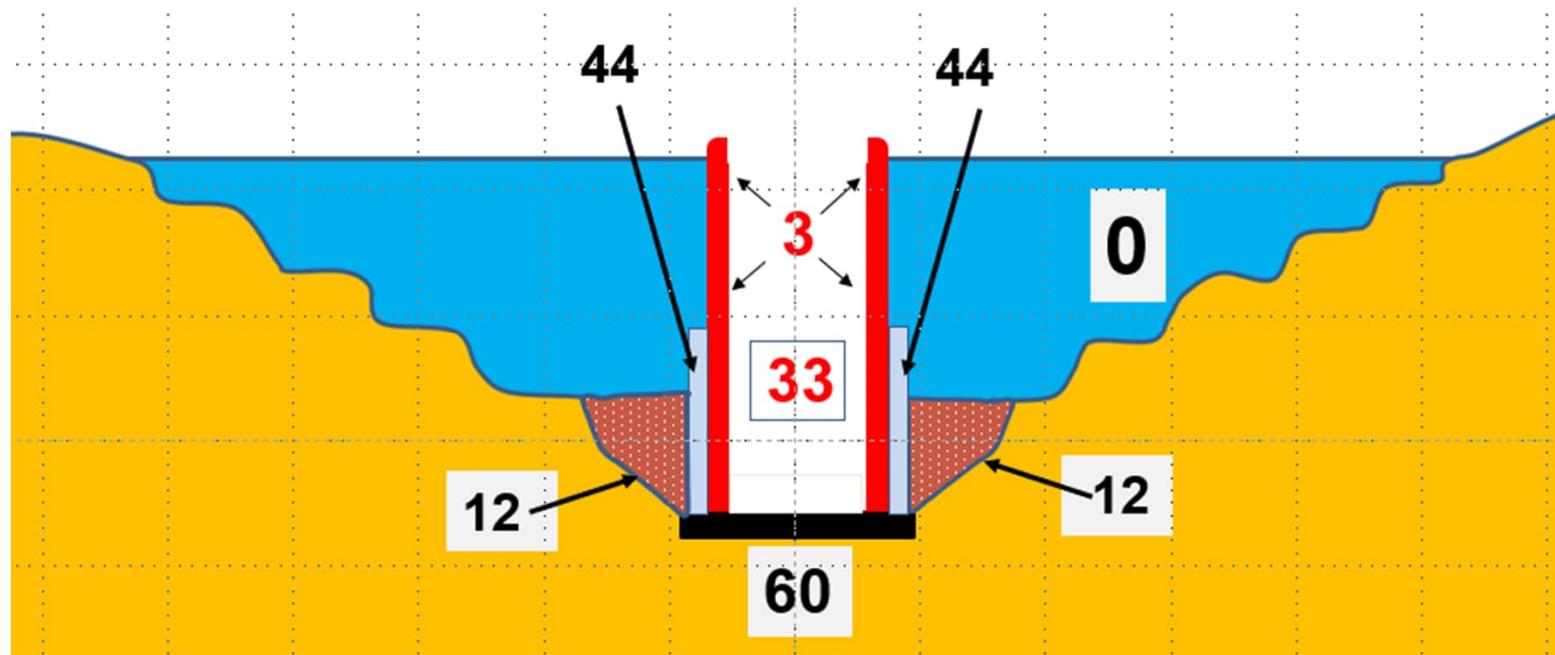


„Betonkugeln als Unterbecken
auf Restlochsohle“



Quelle:
Pumpspeicherkonzept
StEnSEA, Fraunhofer
Institut IWES (Kassel)

Ringmauerspeicher im Tagebauloch



Quelle: DE 10 2020 004 099.9 („SeeEi4“), Bild 2

Oberbecken (0): Tagebaurestsee (z.B. Hambach)

Unterbecken (33): getrennt vom Tagebaurestsee durch eine Stahlbeton-Ringmauer (3)

Maschinensätze: Installiert auf der Bodenplatte innerhalb der Ringmauer (60)
(Pumpturbinen)

Druckrohrleitungen und Zugangssystem (44)

Stabilisierung durch Erdmaterial (12)

Pumpspeicher im Rheinischen Revier - Ausblick

Untersuchung der **technischen Machbarkeit eines Pumpspeichertyps** im Bereich des jetzigen Tagebaulochs Hambach (alternativ Garzweiler, Inden oder anderer Tagebaustandort):

- **Geotechnische bzw. baustatische Machbarkeit**
- Bestimmung der möglichen **Tiefenlage** (technisch und wirtschaftlich)
- Bestimmung der **Bauart** (Stollen- oder Hallensystem, Betonkugeln, Ringmauer)
- Detaillierte Untersuchungen zum **Materialmanagement**
- Bestimmung der **machbaren Ausbaugrößen** eines PSW (Pendelwasservolumen, Speicherkapazität, installierte Leistung)

Pumpspeicher im Rheinischen Revier - Ausblick

Weitere detaillierte Untersuchungen zu

- **Maschinensätzen** (Entwicklung von Sonderlösungen für derartige besondere Projekttrandbedingungen)
- Möglichen **Oberbecken-Standorten** im Einklang mit den **Zielen bzw. Vorgaben der Regionalplanung**
- **Logistik und Infrastruktur** (Zugänge- und Fluchtmöglichkeiten, Energieableitung, etc.)
- Berücksichtigung von **umwelt- und gesellschaftlichen Belangen**

➔ PSW-Planungen müssen so schnell wie möglich intensiviert werden, da Kohleausstieg vsl. im Jahr 2030!

VIELEN DANK FÜR IHRE AUFMERSAMKEIT !

Dipl.-Ing. Matthias Feldmann
Tractebel Hydroprojekt GmbH

matthias.feldmann@tractebel.engie.com

T: +49 89 381907-76

M: +49 171 679 2029



Tractebel Hydroprojekt GmbH

PUBLIC

INTERNAL

RESTRICTED

CONFIDENTIAL

With the trusted expertise of  LAHMEYER
HYDROPROJEKT