VDI
Wissensforum
Der Lageenergiespeicher
Lösung des Stromspeicher-Problems?
Referent: Prof. Dr. Eduard Heindl, Hochschule Furtwangen | Der Lageenergiespeicher

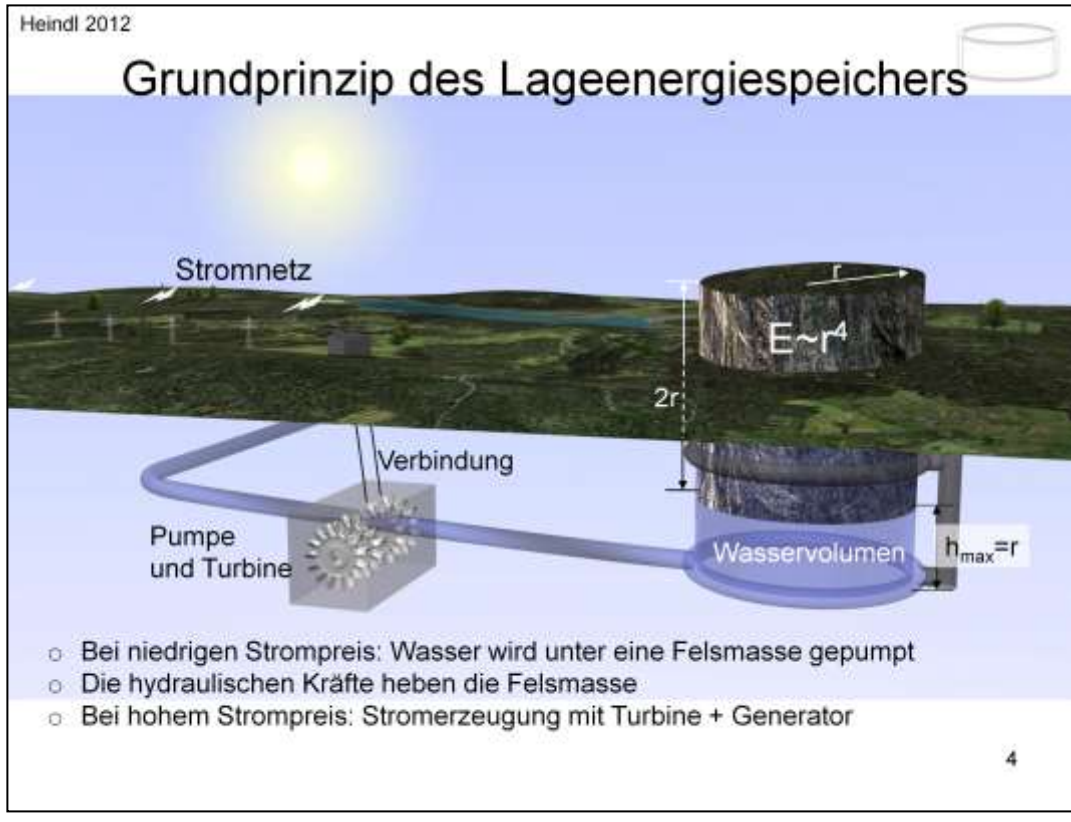
Titelblatt

Vortragsunterlagen von der 2. VDI-Fachkonferenz Stationäre Energiespeicher für Erneuerbare Energien, Karlsruhe, 21. Juni 2012 von Eduard Heindl

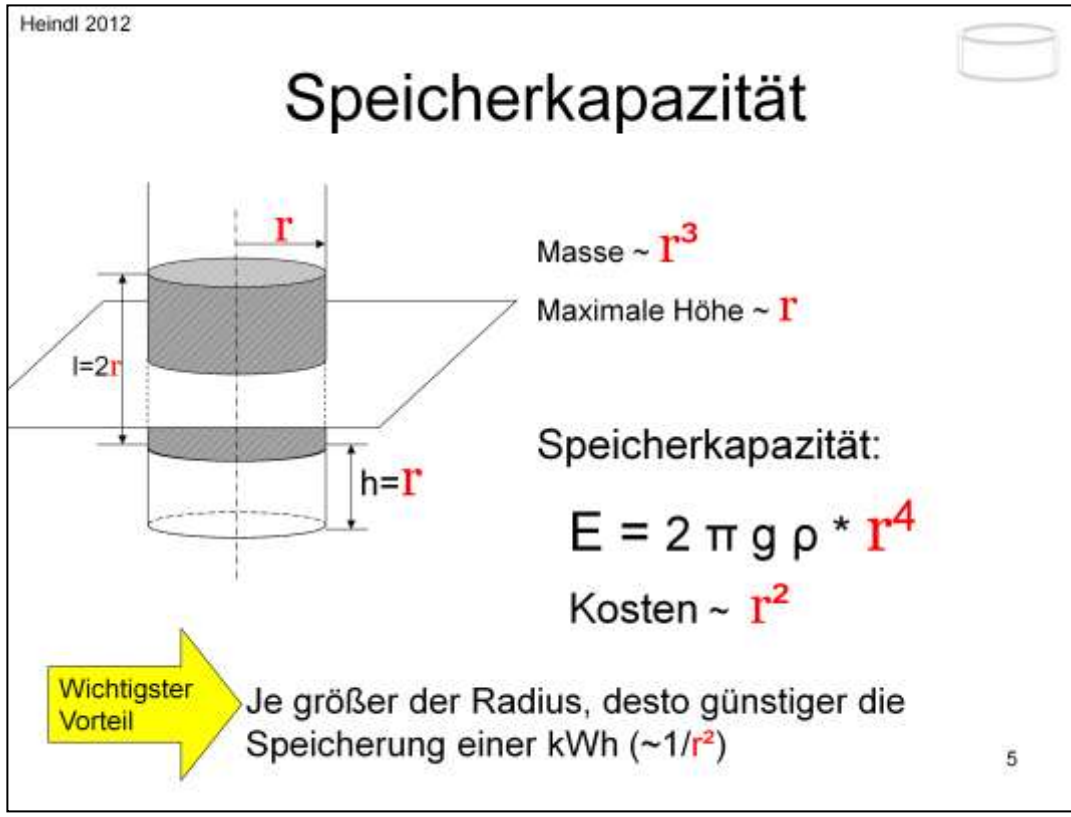
Fragen

- Grundprinzip des hydraulischen Lageenergiespeichers
- Bau eines Lageenergiespeichers
- Eigenschaften des Speichers aus technischer Sicht
- Wirtschaftlichkeit des Speicherkonzepts
- Mögliche Standorte und Geschäftsmodell

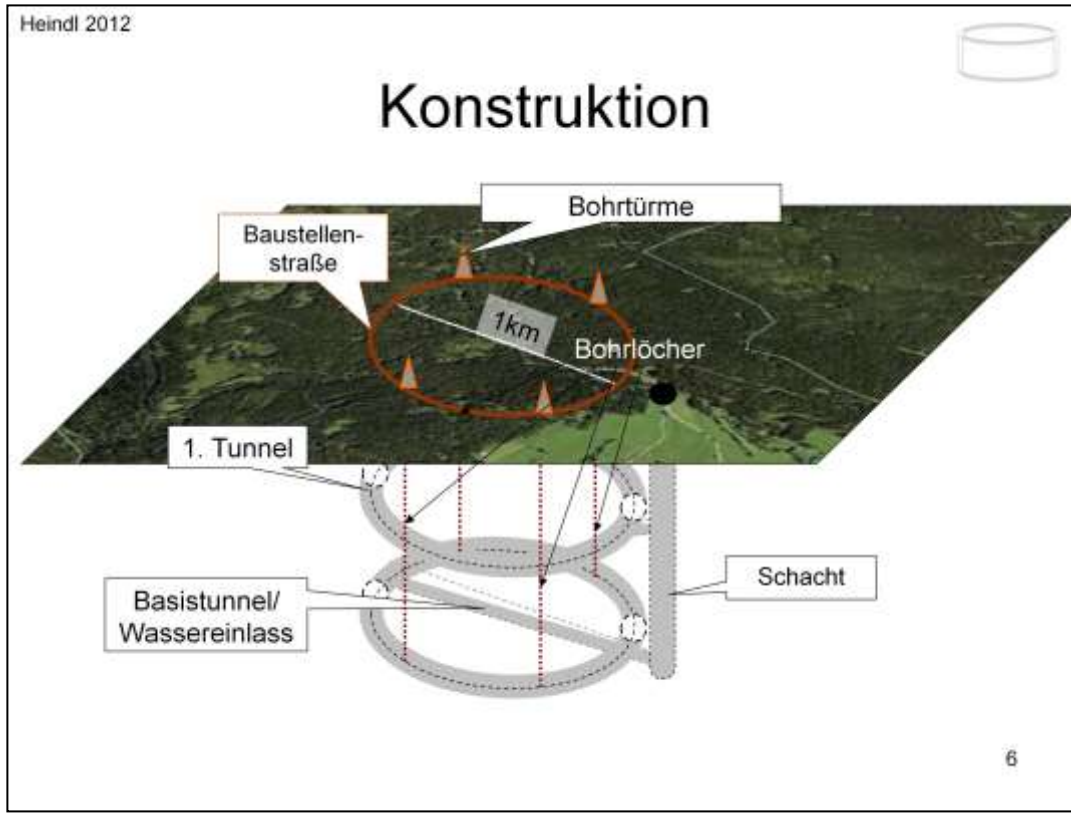
Inhalt



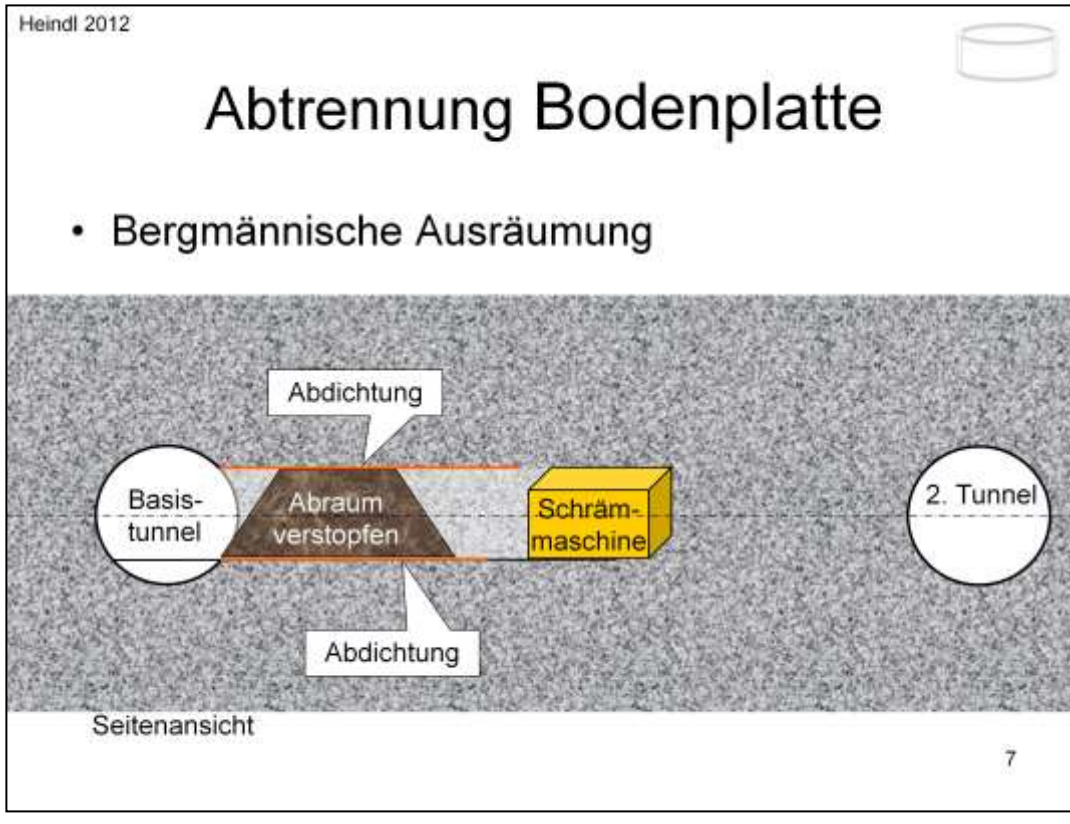
Grundprinzip wie bei einem Pumpspeicherkraftwerk, nur wird statt Wasser ein Fels angehoben



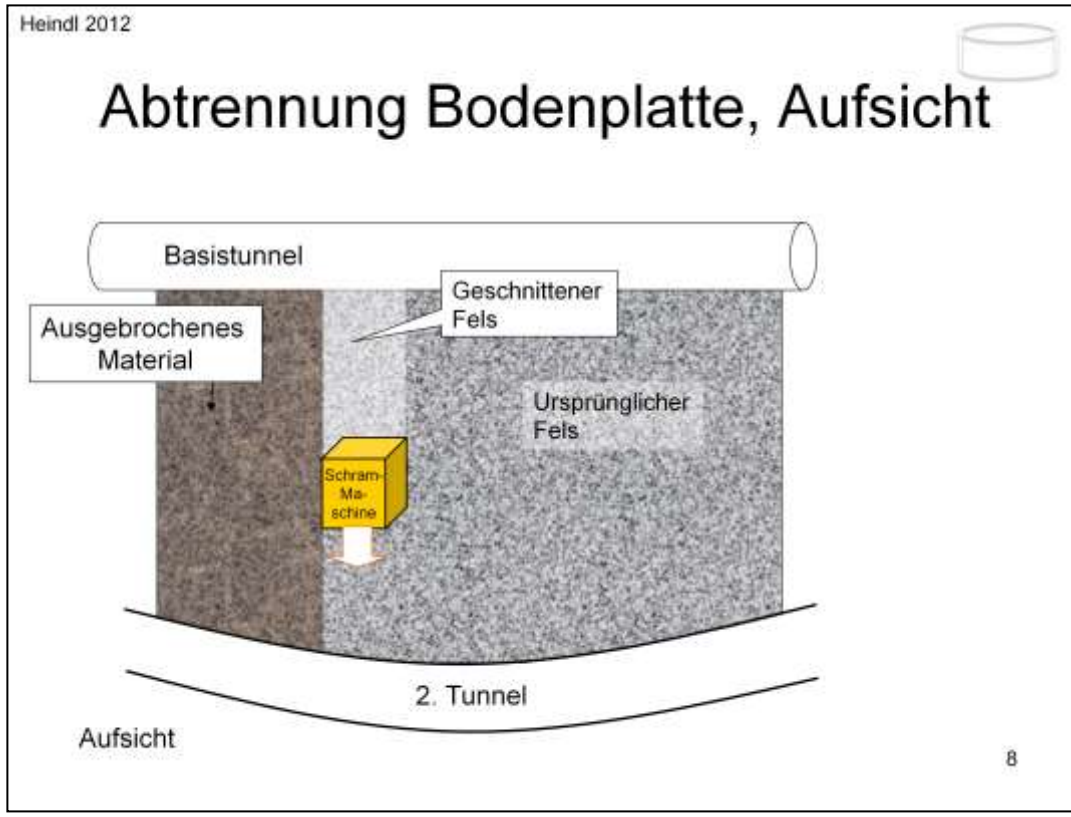
Der USP eines LES liegt in der 4. Potenz, mit der die Kapazität wächst und in der 2. Potenz, mit der der Preis Pro Speichereinheit fällt.



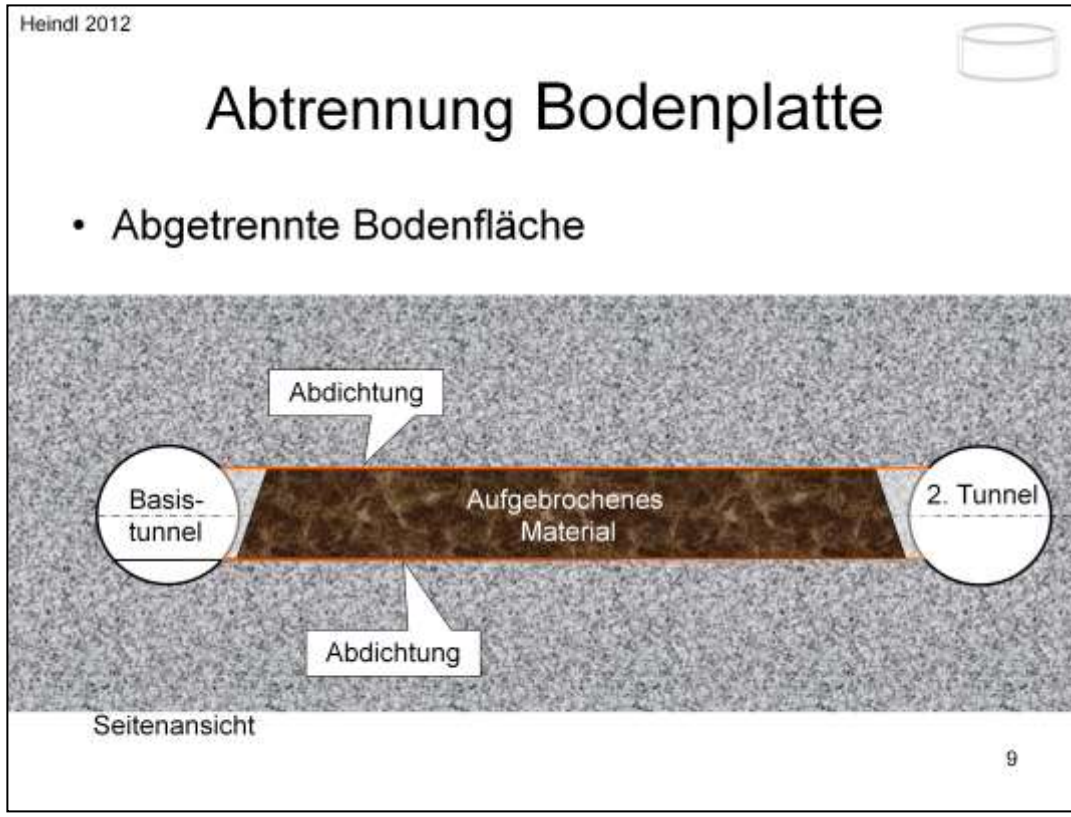
Für die Konstruktion werden zuerst mehrere Tunnel freigelegt



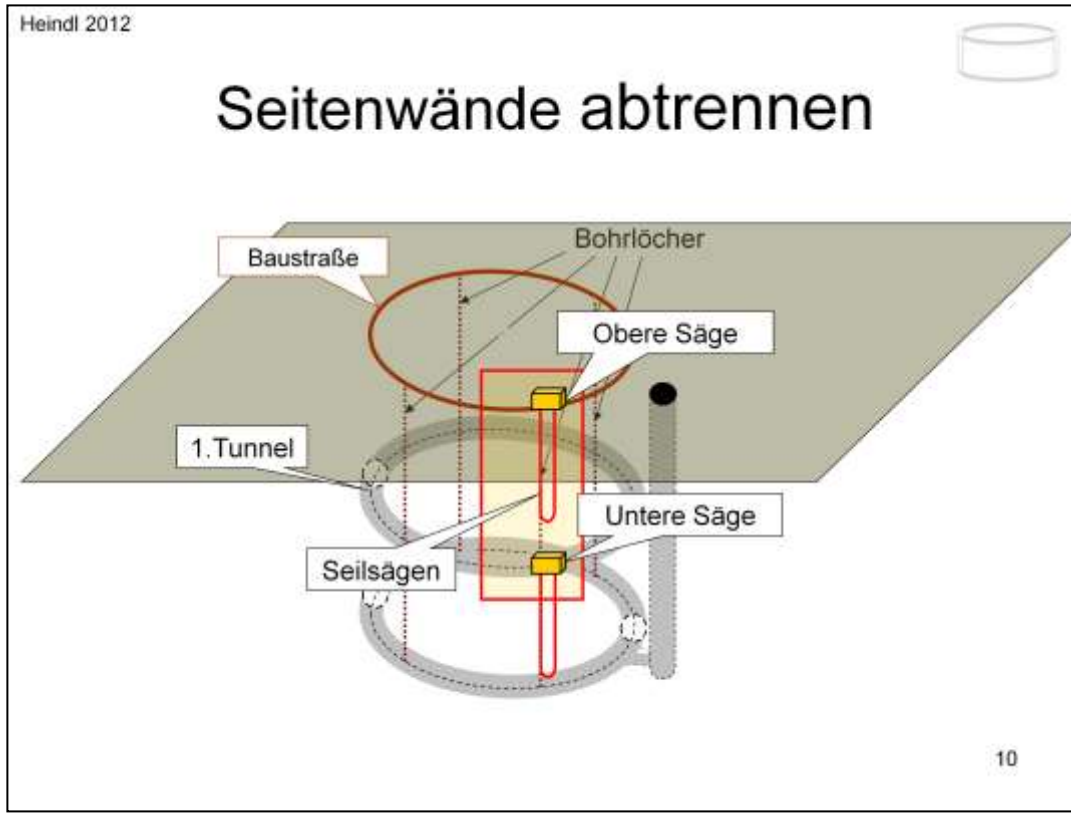
Die Bodenfläche wird mit einer Schrämmaschine abgetrennt. Auf die Gesteinsflächen wird Dichtungsfolie (Geomembrane) geklebt. Der Abraum verbleibt im Wesentlichen im Untergrund als Auflager des Zylinders.



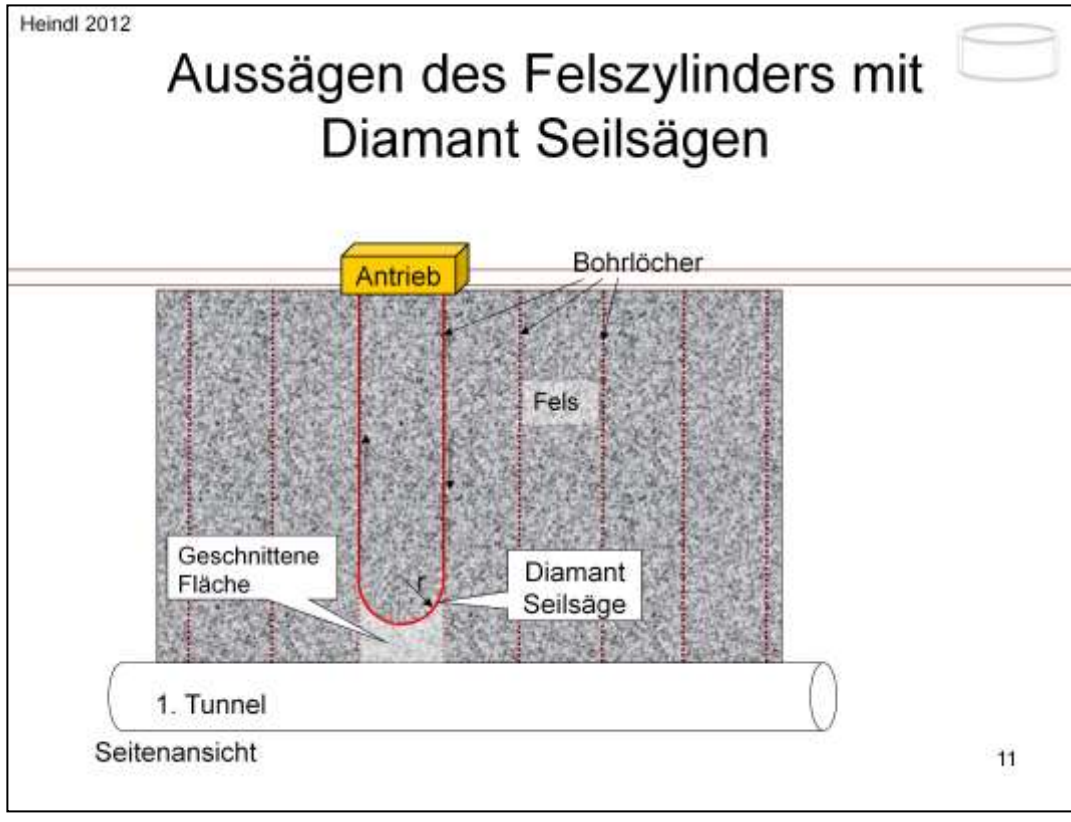
Die Schrämmaschine bearbeitet Spur für Spur, ähnlich wir im Untertagekohlebergbau.



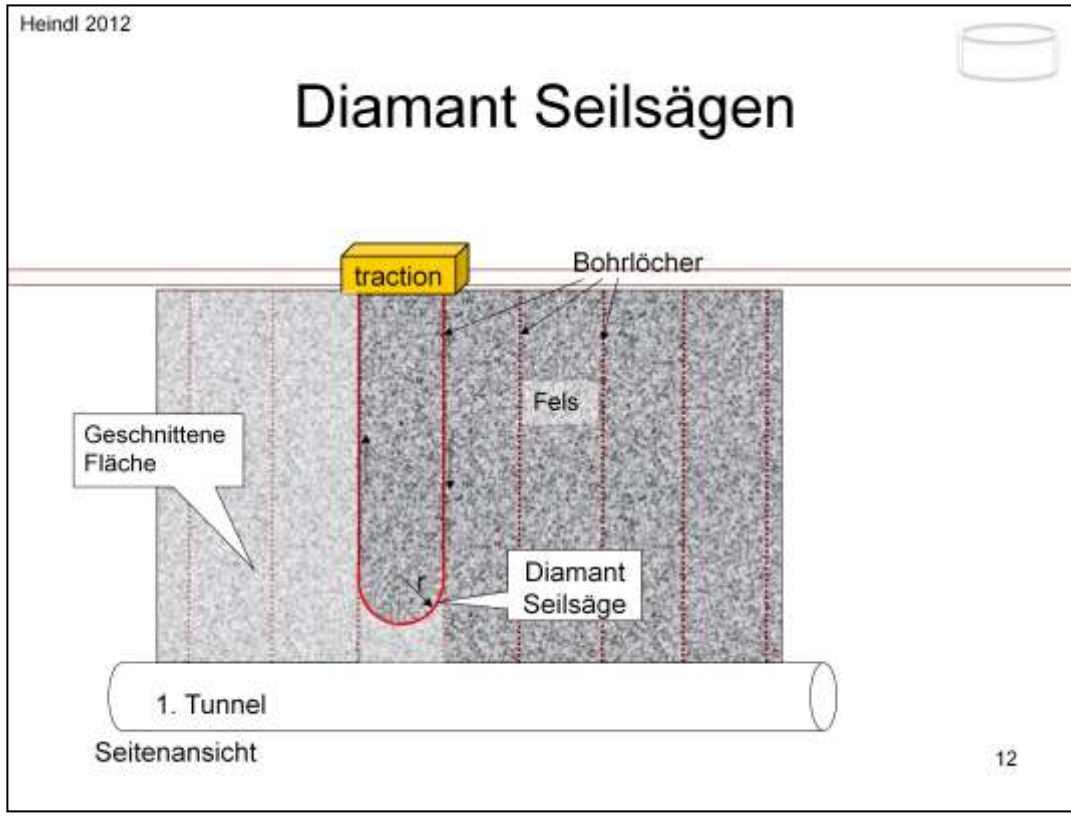
Jetzt ist die Bodenplatte vollständig von der Umgebung abgetrennt. Der Zylinder hängt nicht frei, sondern liegt auf dem Abraum.



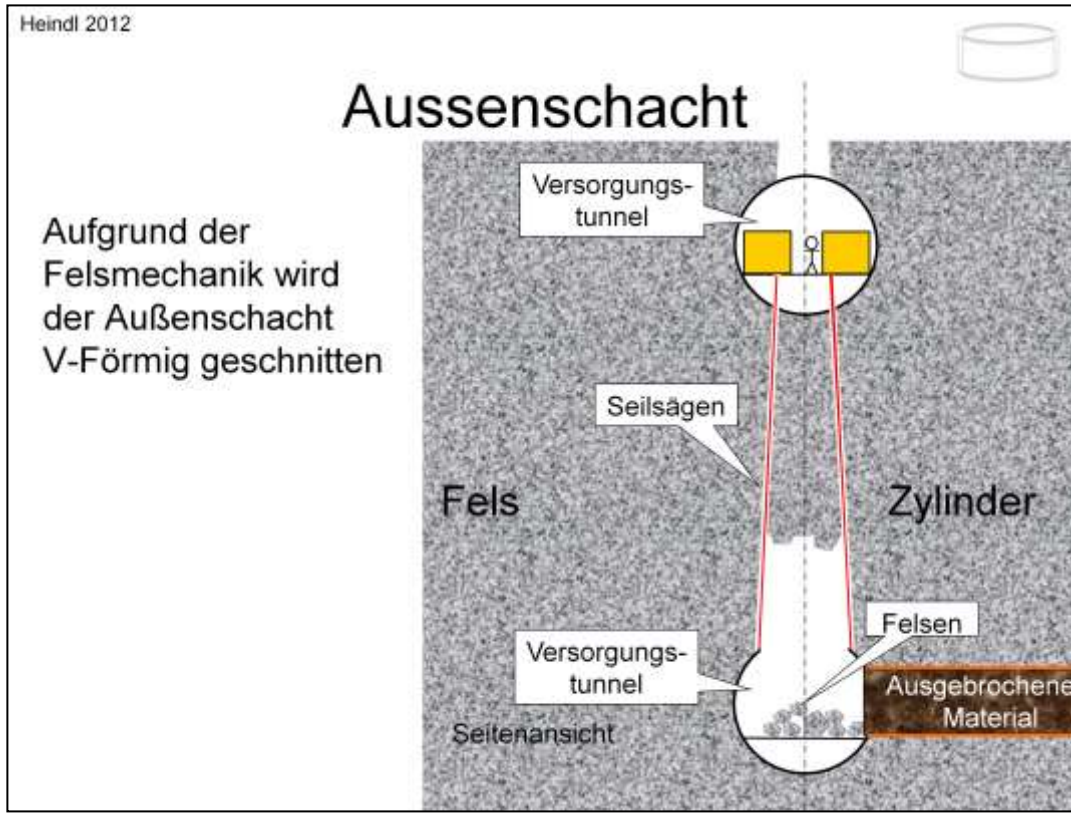
In Bohrlöcher werden Sägeseile eingeführt.



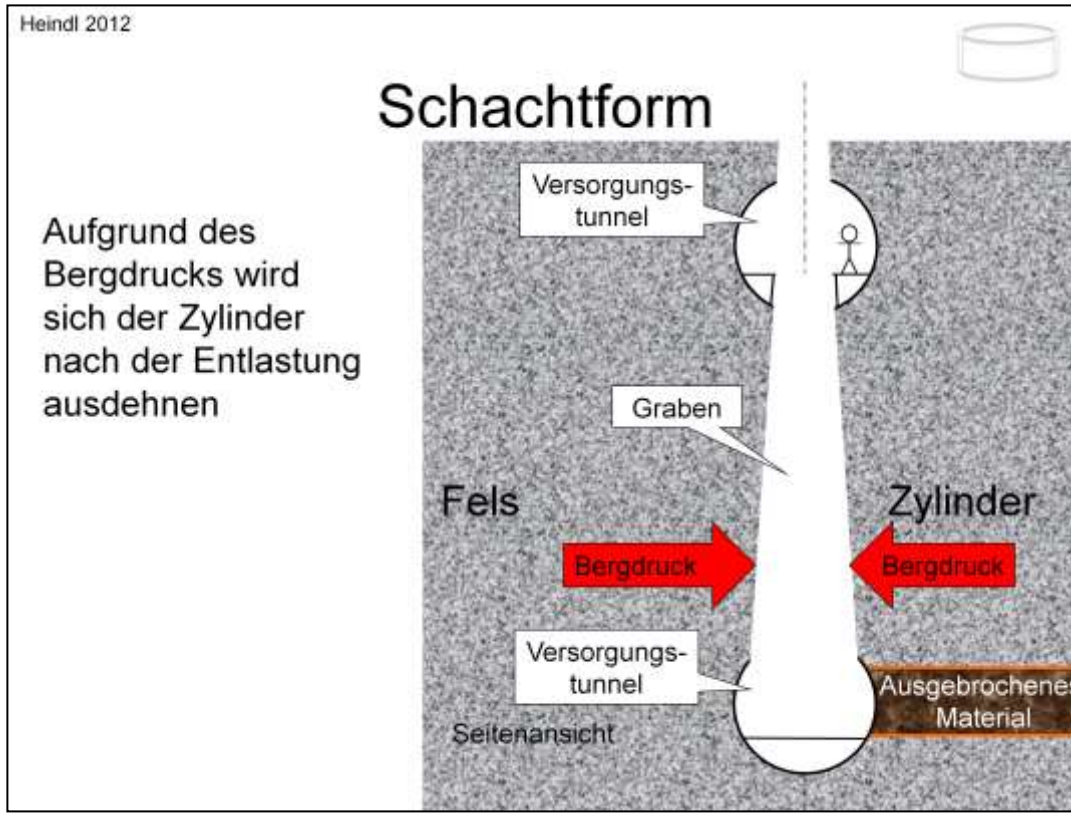
Die Diamantsäge trennt Facette für Facette der Aussenwand ab.



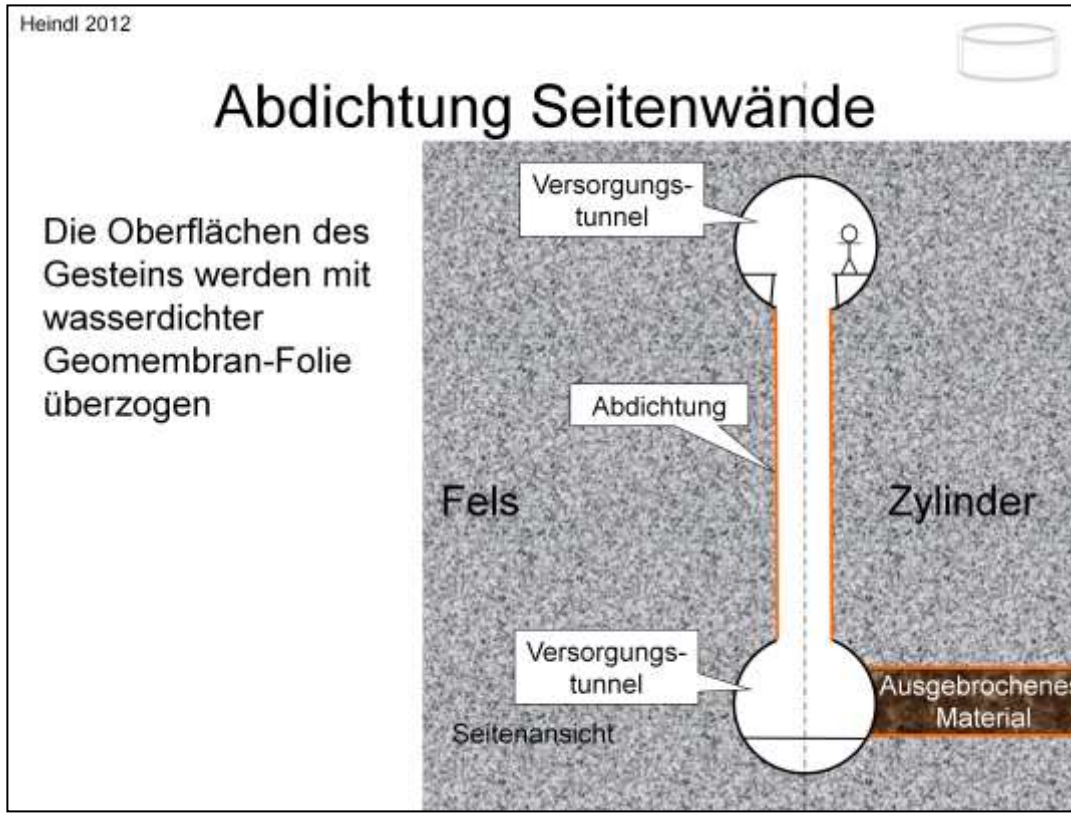
Links ist der bereits geschnittene Bereich zu sehen.



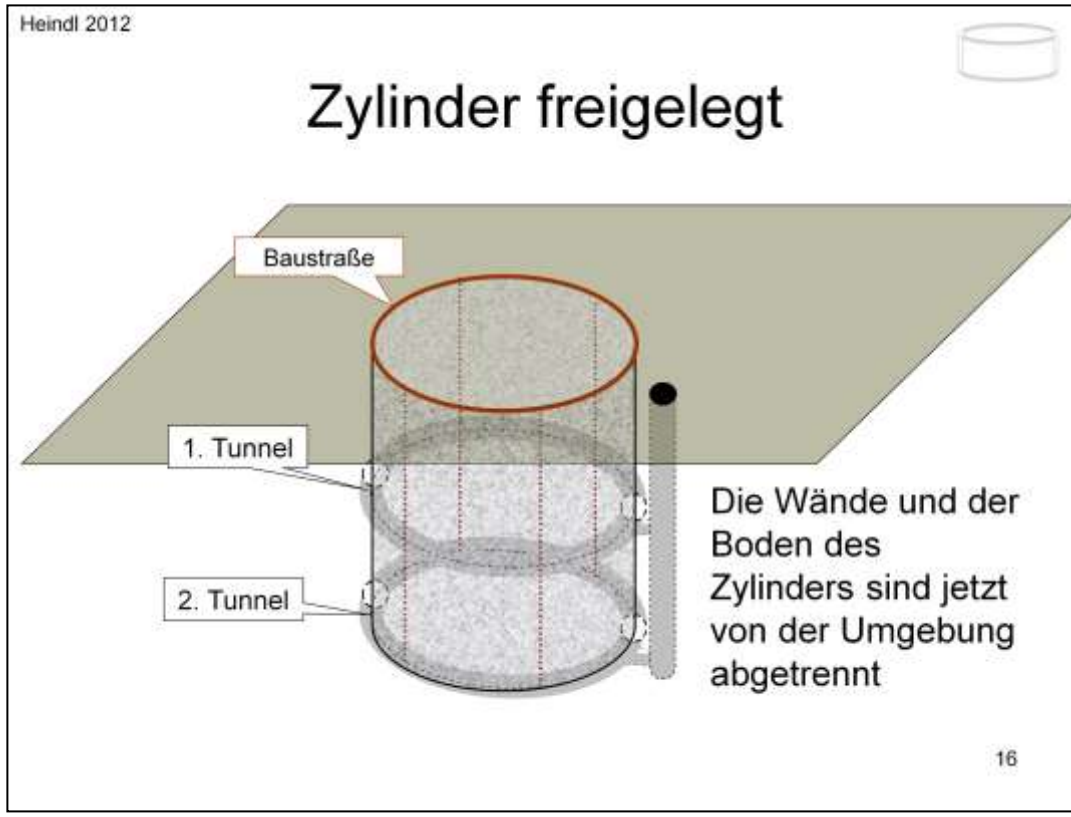
Genaugenommen wird ein doppelter Schnitt geführt, da aus Felsmechanischen Gründen und aus praktischen Gründen die Oberfläche zugänglich sein muss.



Der fehlende Bergdruck läßt den Zylinder und die Umgebung elastisch expandieren.

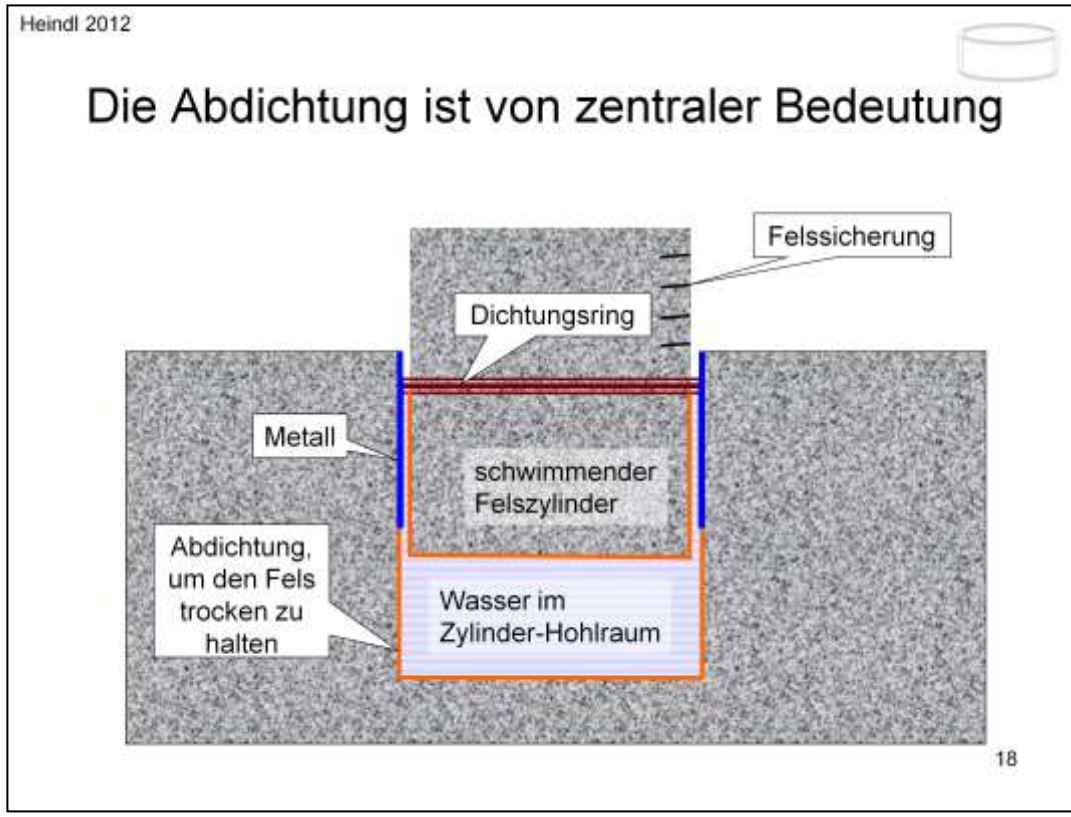


Auch die Aussenflächen werden vollständig mit Geomembran gegenüber dem Wasservolumen abgedichtet, damit es zu Keinem Wasserverlust und zu keiner Gesteinsschädigung kommt.

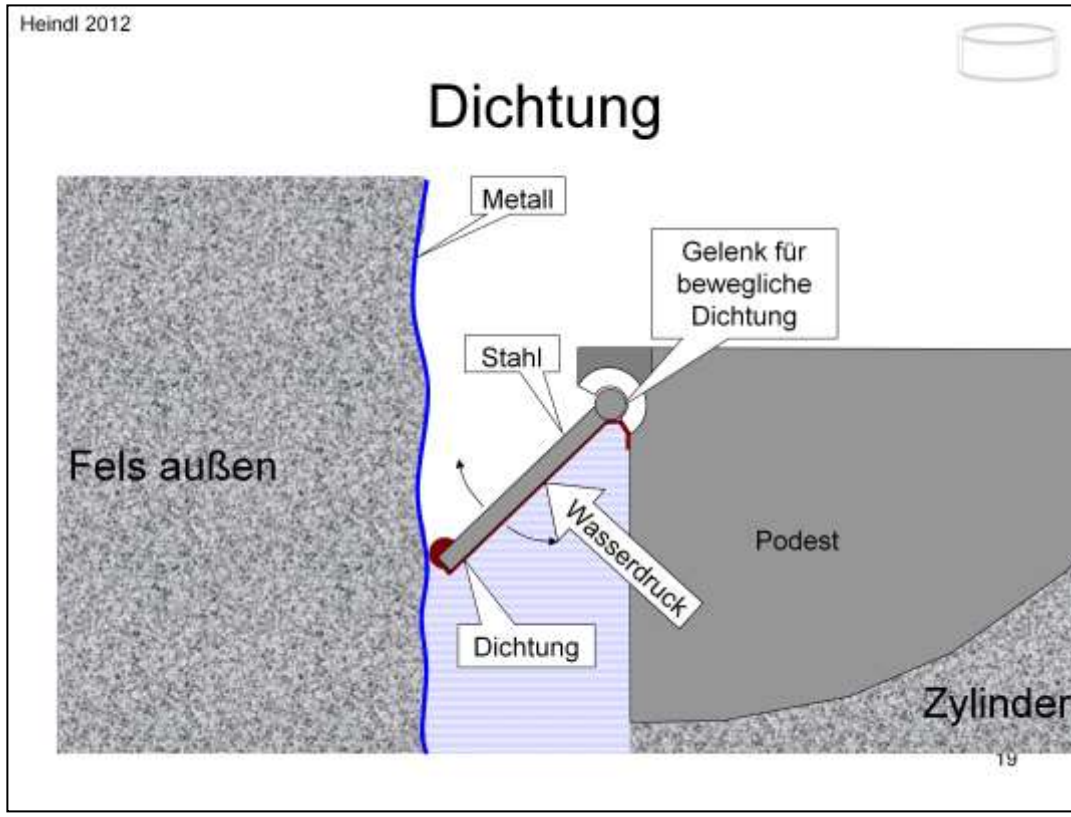


Freilegung abgeschlossen.

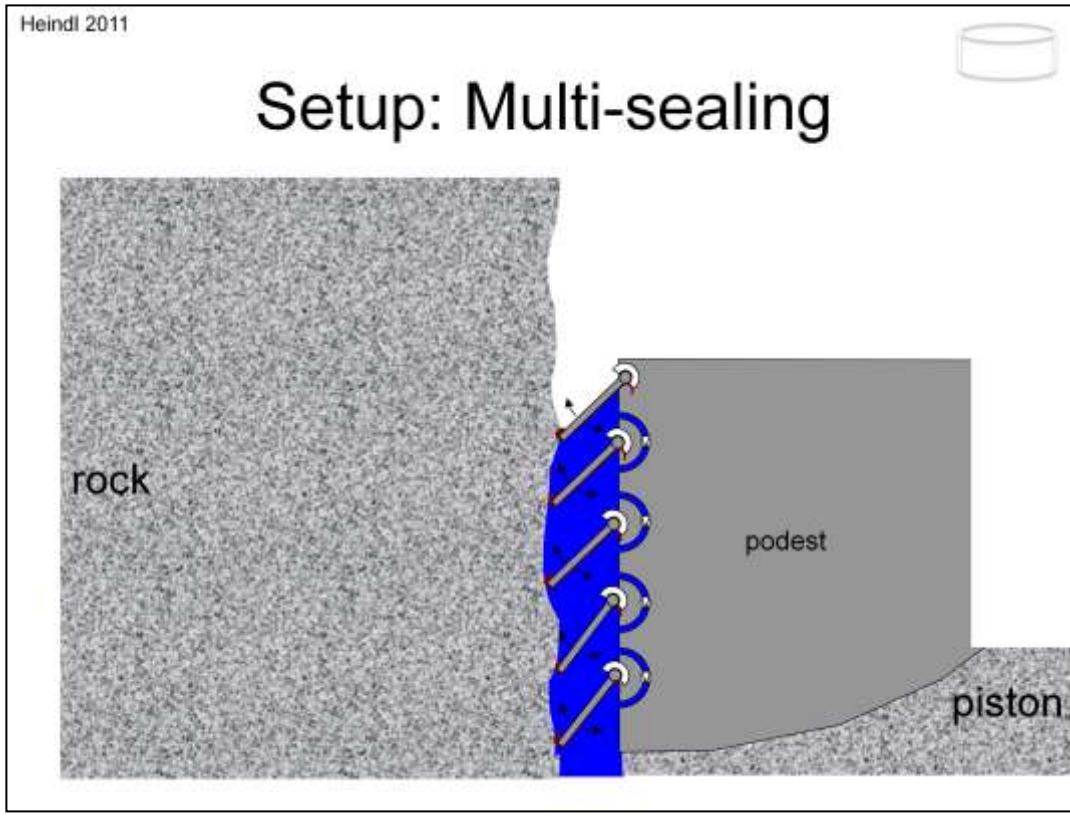
So darf man sich einen ausgesägten Granitblock vorstellen.



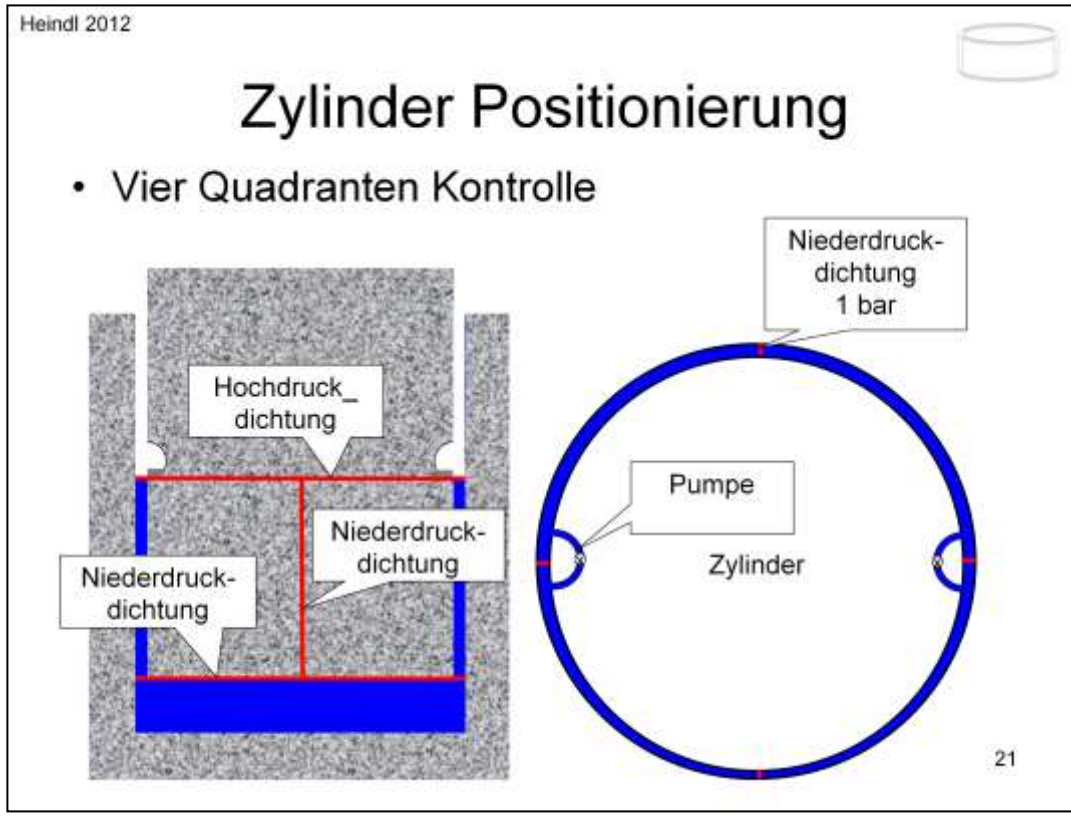
Alle Flächen im Überblick: An der oberen Hälfte der Aussenwand wird Metall angebracht, damit die Dichtungen gut laufen. Am oberen freiliegenden Kolben können gegebenenfalls Felssicherungen angebracht werden.



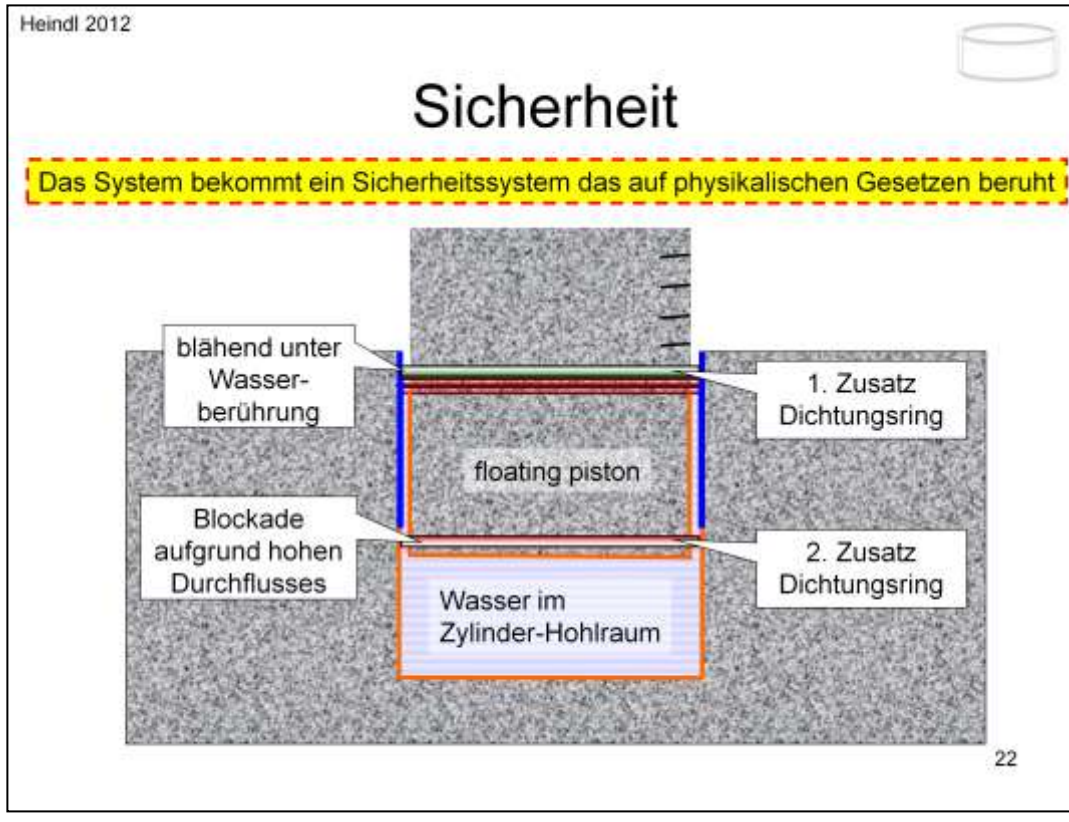
Das Dichtungssystem, Da die Aussenwand nicht perfekt eben sein wird, wird die Dichtung flexibel geführt.



Bei hohen Drücken übernimmt eine Dichtungskaskade die Abdichtung. Zwischen den einzelnen Lamellen können Drücke von etwa 10 Bar abgebaut werden.



Ein Niederdruckdichtungssystem erlaubt das exakte Positionieren des Felszylinders in seinem Becken. Kleine Umwälzpumpen mit wenigen mBar Überdurck genügen um dien Zylinder zu positionieren, da die Flächen sehr groß sind.



Es gibt ein doppeltes Sicherungssystem: Der obere Ring bläht sich bei Wasserkontakt auf. Der untere Ring liegt bei Normalbetrieb fast an der Aussenwand an. Bei Druckabfall dehnt sich der Zylinder elastisch aus, der 2. Dichtungsring presst sich gegen die Aussenwände.

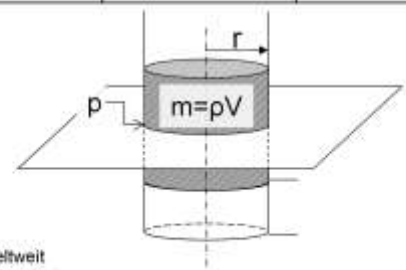
Heindl 2012

Technische Daten

Radius [m]	62,5	125	250	500
Durchmesser [m]	125	250	500	1.000
Volumen Fels [m³]	1.534.000	12.272.000	98.175.000	785.398.000
Masse Fels [t]	3.988.000	31.907.000	255.254.000*	2.042.040.000
Druck [Bar]	26	52	103	206
Druck oben [Bar]	20	39	78	157
Energie [GWh]	0,5	8	124	** 1.980

Abhängigkeit vom Radius:

- Druck wächst linear
- Masse wächst in der 3. Potenz
- Energie wächst in der 4. Potenz



* Entspricht etwa der Ladekapazität aller Kontainerschiffe weltweit
** Entspricht etwa Tagesproduktion der deutschen Energiewirtschaft

23

Die technischen Daten zeigen, dass das volumen und die Masse des Zylinders mit der 3. Potenz wächst, der Druck nur linear ansteigt, hingegen die Energiespeicherkapazität von 0,5GW auf sensationelle 2000GWh anwächst, wenn man den Radius dreimal verdoppelt. Die Energiemenge ist hier die Bruttoenergie ohne Turbinenverluste.

Wi groß können senkrechte Felswände stehen? Hier einige beispiele wo die Natur durch besondere Umstände sehr hohe Felswände freigelegt hat.

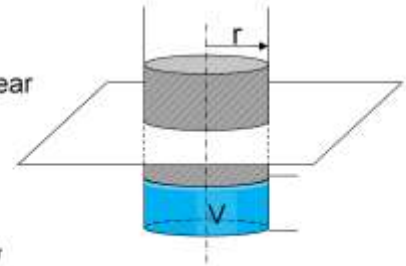
Heindl 2012

Leistungsdaten

Radius [m]	62,5	125	250	500
Energie [GWh]	0,5	8	124	1.980
Wasservolumen [m³]	767.000	6.136.000	49.087.000	392.699.000*
Energiedichte [kWh/m³]	0,63	1,26	2,52	5,04
8 Stunden Leistungsentnahme [MW]	60	**967****	15.466	247.462

Abhängigkeit vom Radius:

- Energiedichte im Wasser wächst linear
- theoretische Leistungsabnahme wächst mit der 4. Potenz



* Entspricht einer Absenkung des Bodensee um einen Meter
** Typisches Pumpspeicherkraftwerk in Deutschland

25

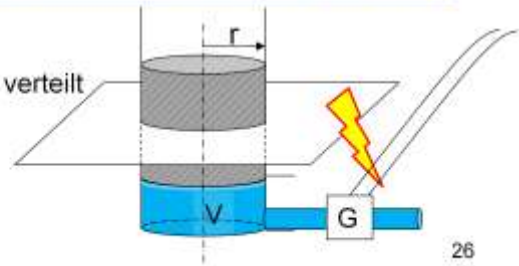
Einige Leistungsdaten: Ein kleiner Zylinder mit 62,5 Meter kann mit einer 60 MW Pumpe in 8h vollständig angehoben werden. Für den 500 Meter Zylinder ist dies undenkbar, da die Anschlussleistung größer als die westeuropäische Stromproduktion wäre. Hier geht man auf wesentlich längere Pumpzeiten.

Heindl 2012

Wasser - Generator

Radius [m]	62,5	125	250	500
Energie [GWh]	0,5	8	124	1.980
Wasserablauf 8h [m³/s]	27	**213**	1.704	13.635
Wasserablauf 168h [m³/s](Woche)	1,3	10,1*	**81**	649
Wasserablauf 720h [m³/s] (Monat)	0,3	2,4	19	**152**
Turbine/Pumpe 8h [MW]	60	**967**	15.466	247.462
Turbine/Pumpe 168h [MW](Woche)	3	46	**736**	11.784
Turbine/Pumpe 720h [MW] (Monat)	1	11	172	**2.750**

Anmerkung:
- Leistung wird auf längere Zeiträume verteilt
- Wasserablauf und Wasserzulauf gegebenenfalls über Speichersee gedämpft



* Wasserentnahme Schluchseewerke am Rhein

26

Der Wasserzulauf aber auch der Wasserablauf limitieren die Zyklenzahl. Kleine Zylinder könten im Tagestakt betrieben werden, große Zylinder nur im Wochen oder gar Monatszyklus.

Heindl 2012

Speicherbedarf pro Einwohner in D

- 21 kWh Strom pro Tag
- 147 kWh Strom pro Woche (vermuteter Bedarf)
- Batteriepreise
  - Bleiakku 150€/kWh (Weltvorrat 64 Mio t)
  - Lithium 1000€/kWh (14 Mio t)
- Speicher für eine Woche,
  Kosten pro Person
  25.000€ (2,2t) ... 130.000 €

Speicherkosten in Deutschland:
2.000 Mrd.€ ... 10.400 Mrd.€ !!

27

Die Speicherkosten mit konventionellen Batterien würden die Leistungsfähigkeit der stärksten Volkswirtschaft sprengen, abgesehen davon fehlen ausreichende Rohstoffe.

Wirtschaftlichkeit

Radius [m]	62,5	125	250	500
Energie [GWh]	0,5	8	124	1.980
Wert einer Speicherladung bei 100€/MWh [T€]	48	773	12.400	198.000
Einnahmen bei 100 Speicherzyklen à 100€/MWh [Mio.€]	5	77	1.237	**19.797**
20 Jahre 25 Zyklen [Mio.€]	24	386	**6.187**	98.985
20 Jahre 300 Zyklen [Mio.€]	**290**	**4.640**	74.239	1.187.817

Realistische Betriebszenarien zeigen, dass die erwarteten Einnahmen bei den jeweils möglichen Speicherzyklen enorm groß sind.

Heindl 2012

Kostenschätzung für 500 m-Radius

Tunnel	10.000	€/m	73	Mio. €
Bohren	500	€/m	157	Mio. €
Sägen	10	€/m²	63	Mio. €
Abraum	20	€/m³	126	Mio. €
Bodenplatte abtrennen	1.000	€/m²	785	Mio. €
Dichtfläche (Edelstahl)	200	€/m²	157	Mio. €
Abdichtung	100	€/m²	393	Mio. €
Dichtungsring	10.000	€/m	31	Mio. €
Summe			**1.785**	**Mio. €**

29

Eie Analyse aller relevanter Baukosten.

Heindl 2012

Wirtschaftliche Betrachtung

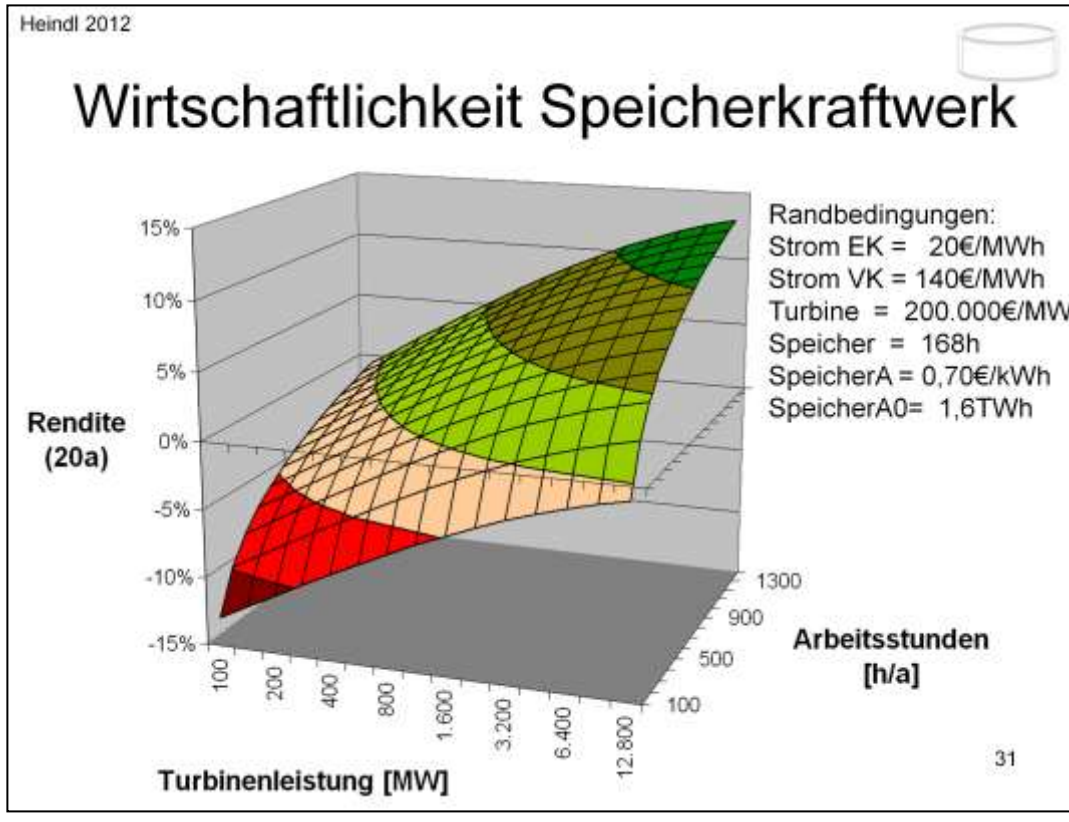
Radius [m]	62,5	125	250	500
Kapazität [GWh]	0.5	8	125	2000
Investitionskosten* [Mio.€]	39	131	472	1,785
Mögliche Einnahmen [Mio.€]	290	4.640	6.187	19.797
Investment per kWh* [€]	81	17	4	0,90

Preis eines Pumpspeicher-kraftwerks

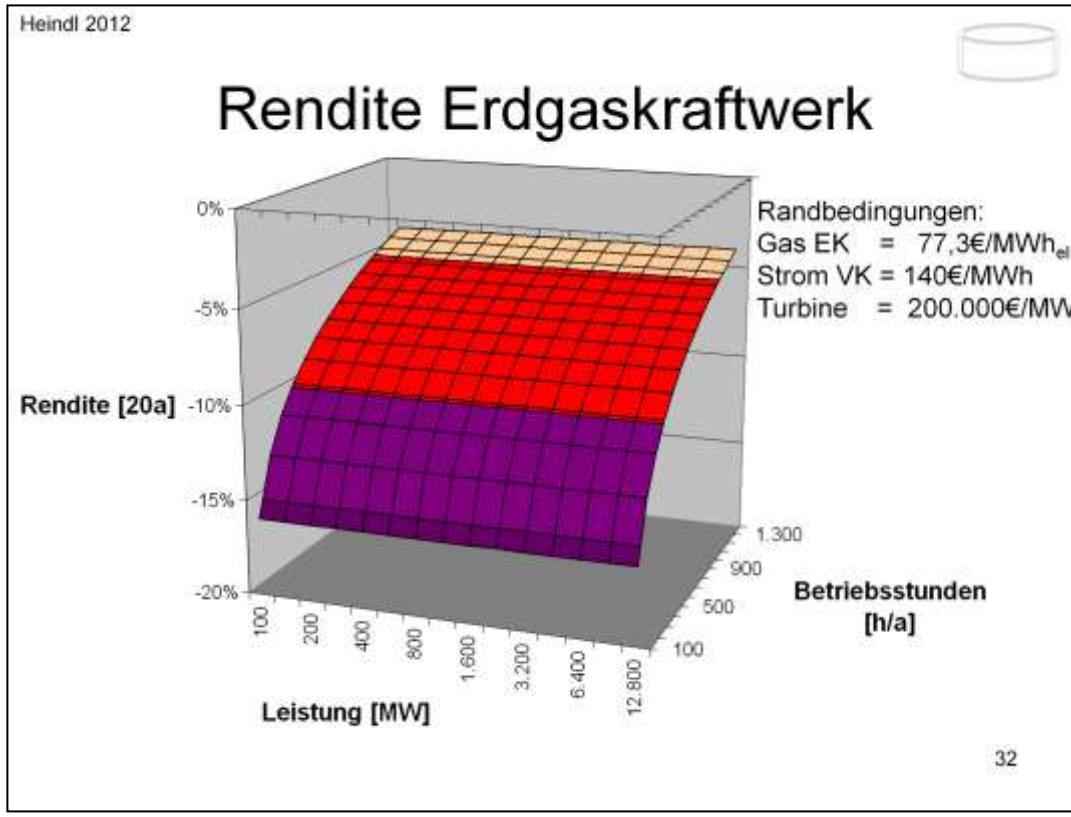
*Alle Angaben ohne Turbinen und Infrastruktur

30

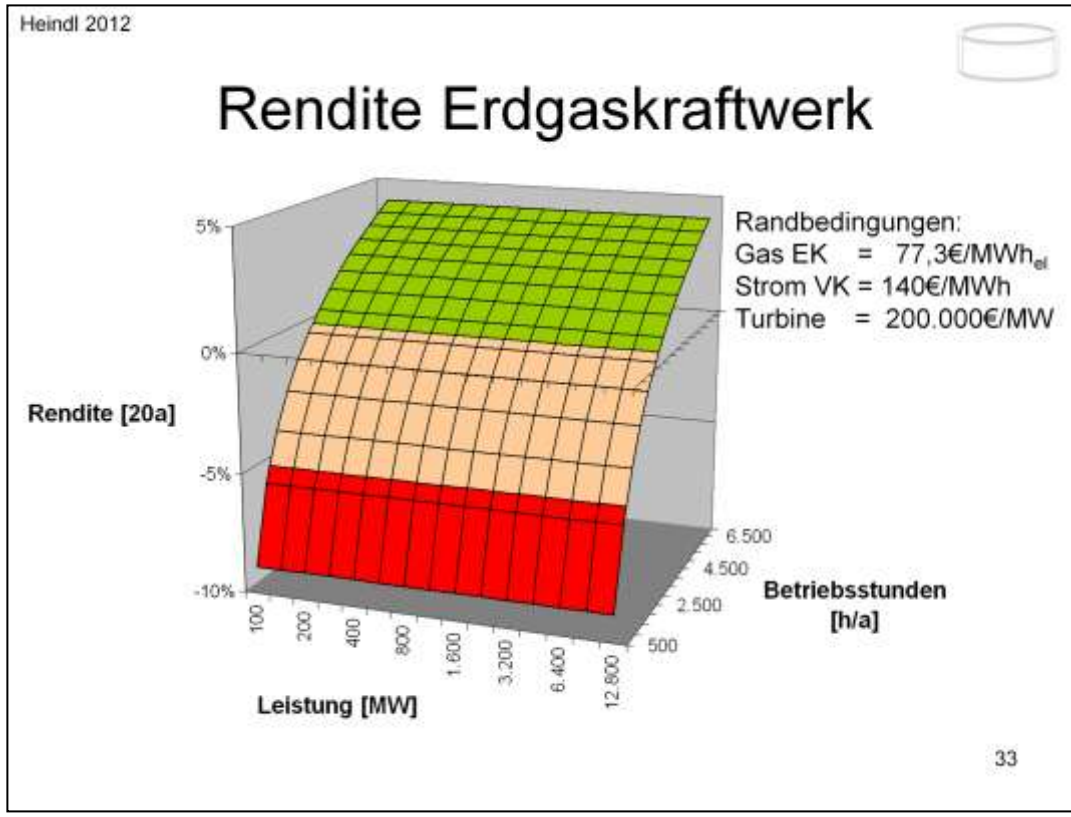
Offensichtlich liegen die Investitionskosten um eine Größenordnung unterhalb der möglichen Einnahmen.



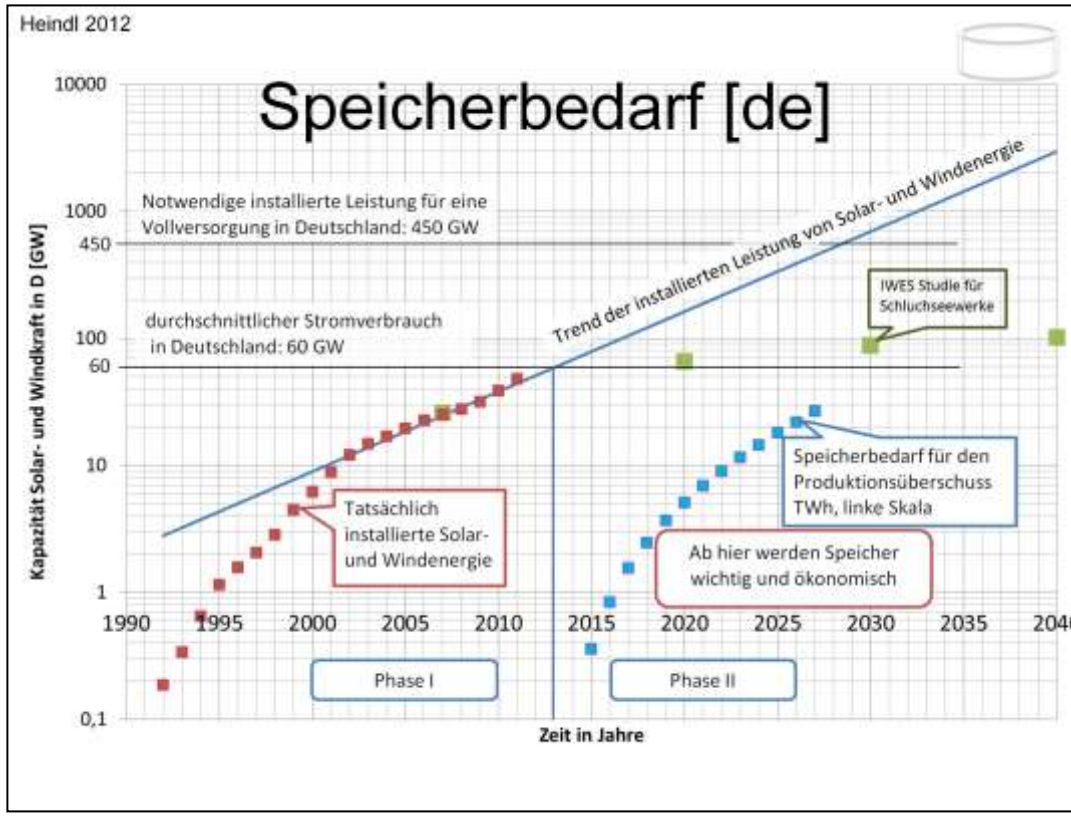
Modellrechnung für einen Speicher. Der grüne Bereich zeigt das ökonomische Fenster.



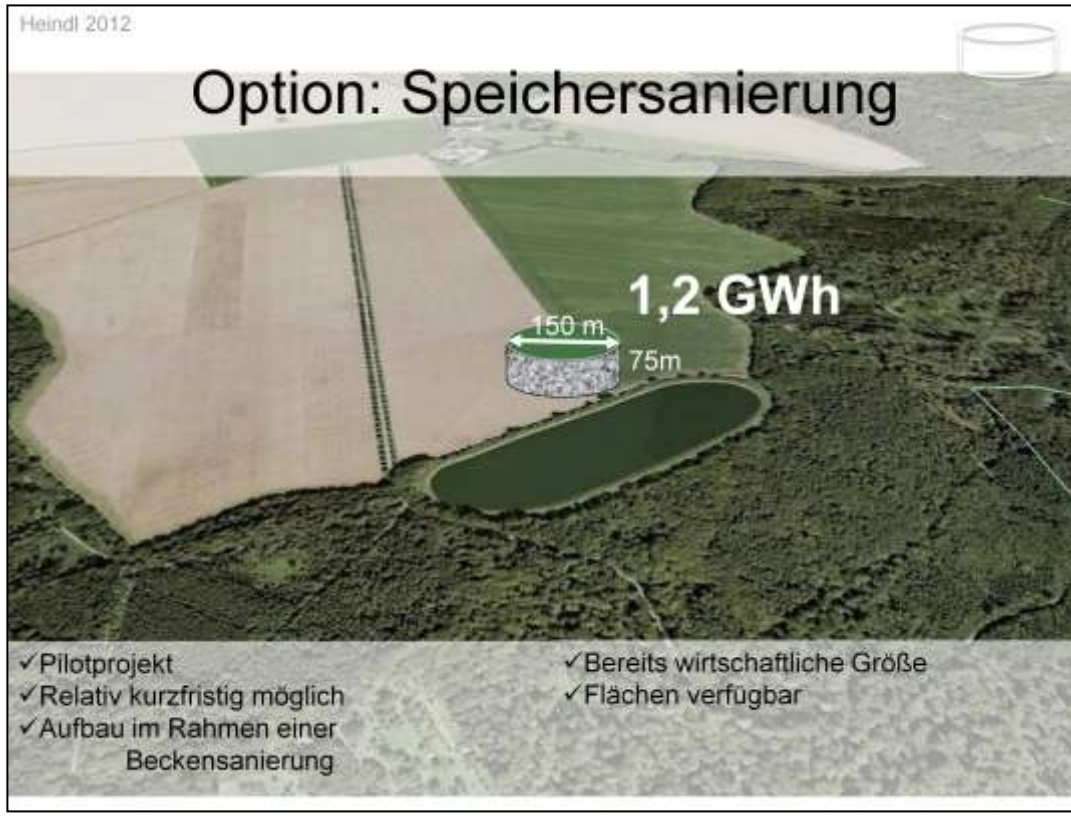
Ein Gaskraftwerk mit gleicher Kostenstruktur würde Verluste einfahren.



Nur bei viel mehr Betriebsstunden könnte ein Gaskraftwerk ökonomisch arbeiten.

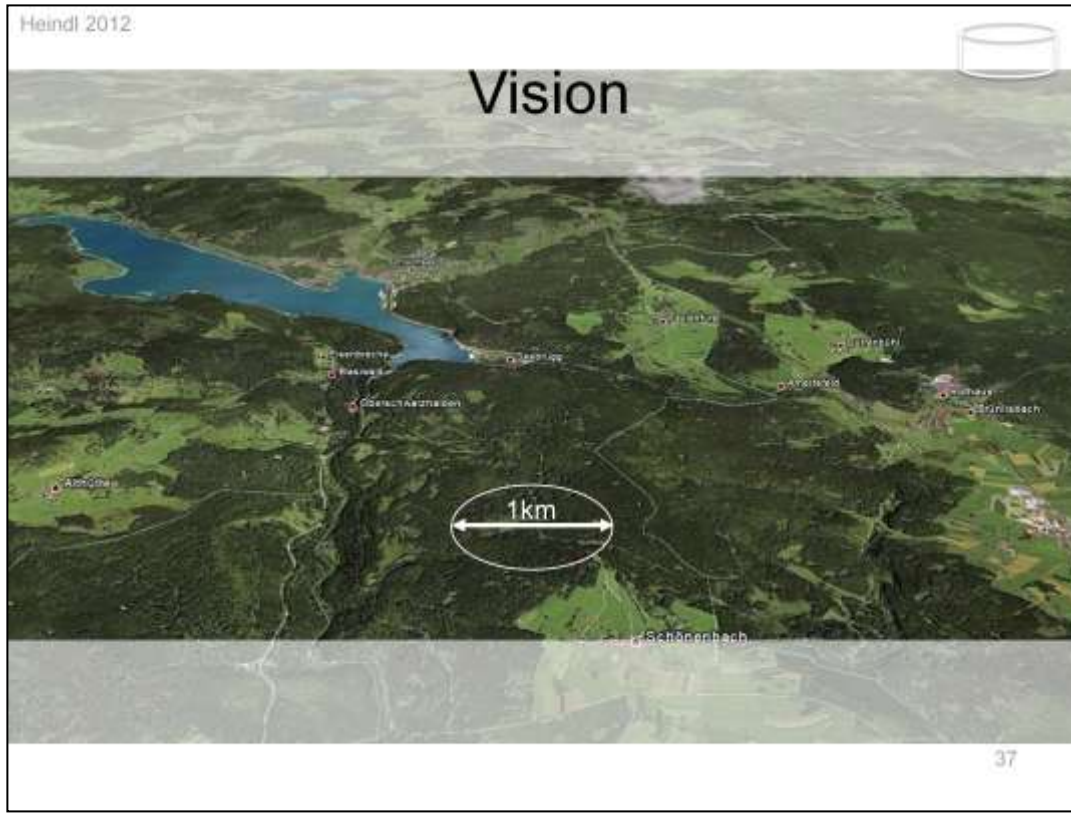


Ein Szenario, wie sich der Speicherbedarf entwickeln könnte, wenn in den nächsten Jahren weiterhin, wie in den letzten 10 Jahren, jährlich 15% erneuerbare Energiesysteme (Wind, Sonne) zugebaut derden.

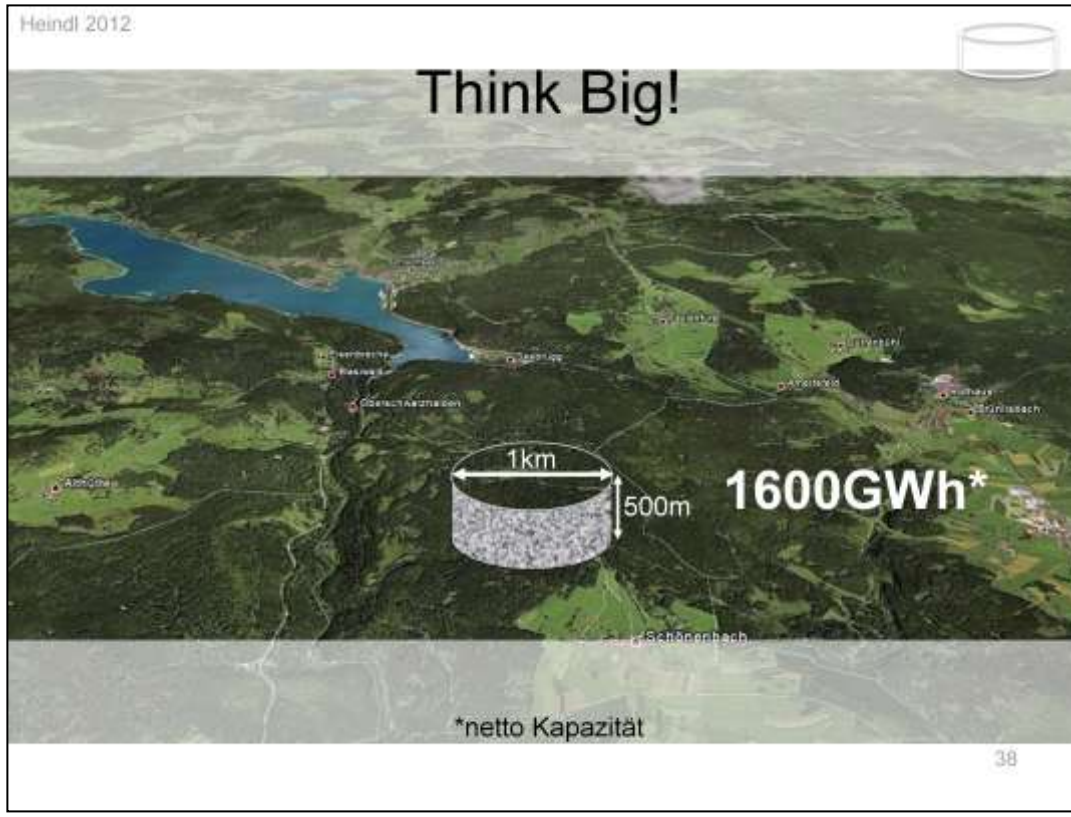


Ein denkbarer Standort an einem alten Oberbecken.

Eine Möglichkeit nahe bei Atdorf 14 GWh mit einem Lageenergiespeicher zu speichern.



Die Vision eines extrem großen Speichers wenn die 100% Umstellung auf Erneuerbare Energieen kommt.



Die Nettokapazität würde dem heutigen Tagesverbrauch in Deutschland entsprechen.

Übersicht Standortbedingungen

- **Geologische Bedingungen:** möglichst kompaktes, einheitliches Gestein mit geringer Neigung zur Zerklüftung. Kein Gebirge erforderlich!
- **Hydrologische Bedingungen:** Der Lageenergiespeicher benötigt wie Pumpspeicher die Nähe zu einem Wasserzu- und Abfluss, jedoch keine großflächigen Ober- und Unterbecken. Nur ein Becken oder ein unterirdisches Wasserreservoir ist ausreichend.
- **Marktbedingungen:** der Lageenergiespeicher arbeitet optimal in Stromnetzen und -märkten mit hohem Anteil erneuerbarer Energien, deren Kosten bei überschüssiger Erzeugung gering sind.

Der Lageenergiespeicher eignet sich für den weltweiten Einsatz

Zusammenfassung (I) Lageenergiespeicher

- **Speicherkapazität**: sehr groß!
  Kein anderes Speicherkonzept weist eine derart große Speicherkapazität auf.
- **Wirtschaftlichkeit:** durch die Tatsache, dass die Speicherkapazität mit dem Radius in der 4ten Potenz steigt, die Baukosten jedoch nur in der zweiten, wird der Lageenergiespeicher mit zunehmender Größe günstig. Bei 500 Meter Radius 50 Mal günstiger als heutige Pumpspeicher.
- **Technologie:** es werden bewährte und ausgereifte Technologien kombiniert, aber nicht neu „erfunden".
  1. Bohr und Tunneltechnologie
  2. Dichtungsmechanik

  Marktführer der beiden Bereiche bestätigen die Machbarkeit

Zusammenfassung (II) Lageenergiespeicher

- **Flächenbedarf:** mit 0,5 m²/MWh sehr gering, zum Vergleich 50 m²/MWh bei Pumpspeichern
- **Wasserbedarf:** rund ¼ des Bedarfs bei Pumpspeichern
- **Ökologie:**
  - Eingriff in die Landschaft vergleichsweise gering
  - gehobener Zylinder verändert das Landschaftsbild nur zeitweise
  - kein Einsatz von Chemikalien notwendig
- **Akzeptanz:** angesichts der obigen Vorteile ist mit einer vergleichsweise hohen Akzeptanz bei der Bevölkerung zu rechnen

Weitere Entwicklung

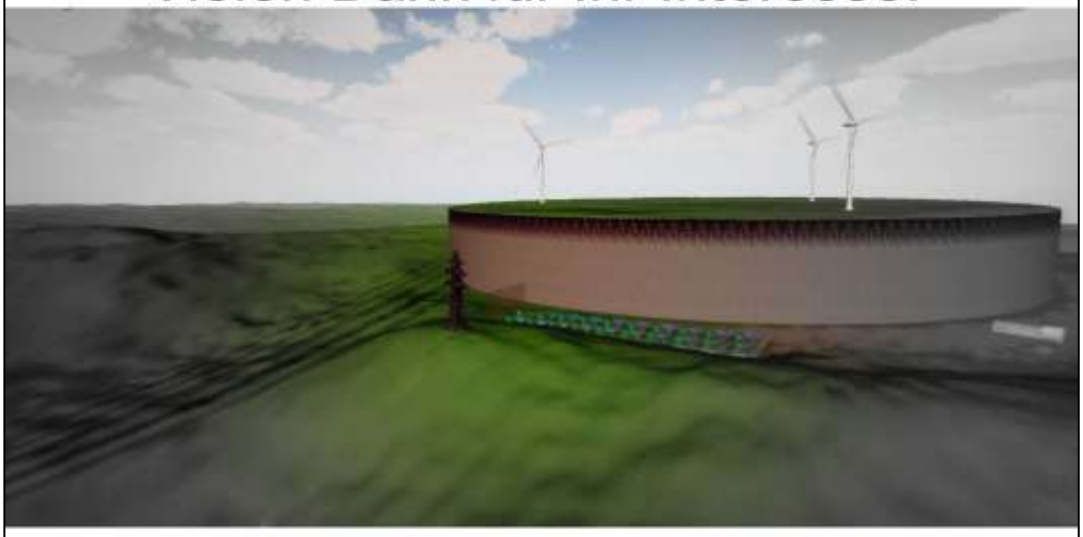
- Investorensuche für Detailplanung (1. Halbjahr 2012)
- Vorbereitung Forschungsverbund zur Klärung technischer Fragen zur Umsetzung; Begin in 2012
- Suche nach Pilotstandorten im In- und Ausland (bis 2013)
- Bauvorbereitung Pilotspeicher ab 2014
- Erster kommerzieller Speicher: frühestens ab 2018

Für Pilotvorhaben werden Energieversorger gesucht (möglichst als Konsortium)

Zusammenfassung der Vorteile

- ✓ **Speicherkapazität** jenseits von 1000 GWh denkbar
- ✓ **Effizienz**: 80-85% bekannter Wert aus PSW
- ✓ Kein Resourcenproblem
- ✓ Kein Gebirge nötig
- ✓ Einfache Entsorgung
- ✓ Geringer **Flächenbedarf** (bis zu 2 MWh/m²)
- ✓ Weniger Wasserbedarf als PSW (~1/4)
- ✓ bekannte **Technologien**
- ✓ **Preis** fällt mit $1/r^2$ (<1€/kWh möglich)
- ✓ Schwarzstartfähig
- ✓ Rotierende Massen

Vielen Dank für Ihr Interesse!



www.Lageenergiespeicher.de

VDI Wissensforum

Kontakt

Hochschule Furtwangen
Prof. Dr. Eduard Heindl
Robert Gerwig Platz 1
78120 Furtwangen
Germany
+49 177 2183578
hed@hs-furtwangen.de
www.lageenergiespeicher.de