

Optimierte Wärmespeicher für Nahwärmenetze

13.08.2015

Fabian Ochs, Dr.-Ing. UIBK



AP2 - Optimierung der Baudetails und Bauausführung von Erdbecken-Wärmespeichern

Konzeptentwicklung

Konzepte und Bauweise von großen
Wärmespeichern

Grobdimensionierung (SDH Online)

Standort: Würzburg

Last: $(15+25) \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a}) * 140 \text{ m}^2 * 100 \text{ kWh}$

Kollektorfläche: 500 m^2

Netz: 60/30 °C

Speichervolumen / [m^3]	Verluste / [MWh]	Spezifischer Kollektor-ertrag / [$\text{kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$]	Stagnation / [d]	Solare Deckung / [%]
400	30	382	51	29
450	32	389	46	29
500	32	395	42	29
550	34	402	37	30

Grobdimensionierung (SDH Online)

Standort: Würzburg

Last: $(15+25) \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a}) * 140 \text{ m}^2 * 100 \text{ kWh}$

Kollektorfläche: 1500 m^2

Netz: 60/30 °C

Speichervolumen / [m^3]	Verluste / [MWh]	Spezifischer Kollektor-ertrag / [$\text{kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$]	Stagnation / [d]	Solare Deckung / [%]
1500	71	265	55	56
2250	94	290	42	61
3000	107	314	35	65
4500	132	361	21	73

I = ~ 1 Mio €

250 €/m²FK, 150 €/m³WSp

Grobdimensionierung (SDH Online)

Standort: Würzburg

Last: $(15+25) \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ a}) * 140 \text{ m}^2 * 100 \text{ kWh}$

Kollektorfläche: 2500 m^2

Netz: $60/30 \text{ }^\circ\text{C}$

Speichervolumen / [m^3]	Verluste / [MWh]	Spezifischer Kollektor-ertrag / [$\text{kWh}/(\text{m}^2 \text{ a})$]	Stagnation / [d]	Solare Deckung / [%]
1250	97	188	80	67
2500	124	218	56	75
5000	165	255	39	84
7500	203	290	25	92

$I = \sim 1.4 \text{ Mio } \text{€}$

$250 \text{ €/m}^2\text{FK}, 100 \text{ €/m}^3\text{WSp}$

Speicher-Anwendung

	Konzept 1 („Puffer“)	Konzept 2 („Monat“)	Konzept 3 („Langzeit“)
Geometrie	Zylinder	Zylinder od. Kegel- /Pyramidenstumpf	Kegel- /Pyramidenstumpf
Volumen [m ³]	500	1000	>5000
h/d / [-]	2	1	.5
Konstruktion	Stahl/Stahlbeton	Stahl/Stahlbeton od. Erdbecken	Erdbecken
Abdeckung	freitragend	freitragend	schwimmend
Abdichtung	Edelstahl	Edelstahl/Polymer	Polymer
Wärmedämmung	o m u BG/Perlite/MW/VIP BG/Perlite/MW Schaumglas	BG/Perlite/MW/PUR SGS SGS	BG,MW SGS SGS / keine

MW: Mineralwolle; SGS: Schaumglasschotter; BG Blähglas

Konzepte

- Konzept 1: Zylinder, $h/d > 1$, freistehend od. teilvergraben -> kleine bis mittlere Speichergröße
- Konzept 2: Kegel- bzw. Pyramidenstumpf, $h/d \sim 1$, vergraben, begehbar, befahrbar mit Einschränkung (freitragende Abdeckung) -> kleine bis mittlere Speichergröße (Speichergröße max. 5000 m^3)
- Konzept 3: Kegel- bzw. Pyramidenstumpf, $h/d < 1$, vergraben, begehbar mit Einschränkung (schwimmende Abdeckung) -> großer Speicher ($> 5000 \text{ m}^3$)

alle Speicher drucklos, Speichermedium Wasser

Grundlagen und Randbedingungen

Geometrie

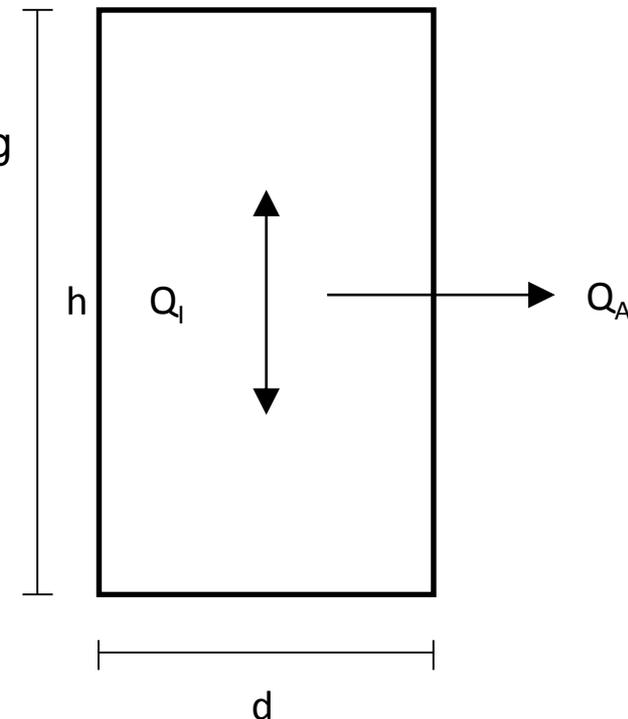
Zur Minimierung der Wärmeverluste wird eine geeignete Geometrie des Wärmespeichers benötigt, d.h. ein kleines Oberflächen-/Volumen-Verhältnis (A/V -Verhältnis).

Es gilt zu unterscheiden in:

- innere Wärmeverluste (Q_I) infolge Temperaturschichtung
→ ausschlaggebend h/d -Verhältnis
- äußere Wärmeverluste (Q_A) über die Oberfläche
→ ausschlaggebend A/V -Verhältnis

Pufferspeicher $l/d \approx 3,0$

Langzeit-Wärmespeicher $l/d \approx 1,0$



Speichergeometrie - Zylinder

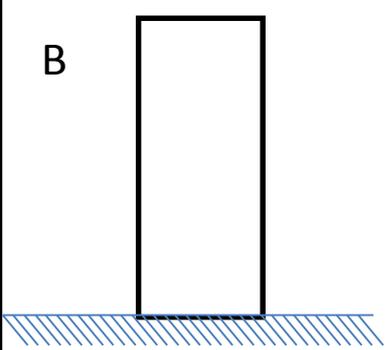
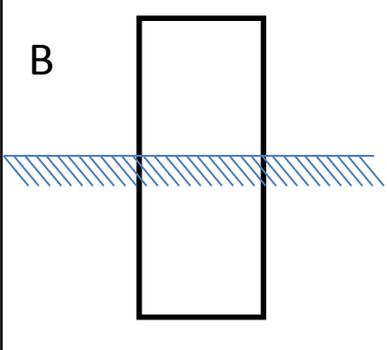
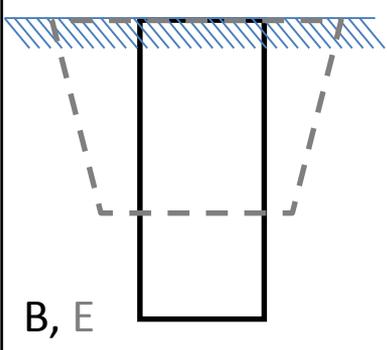
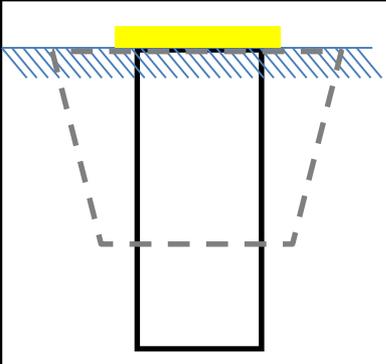
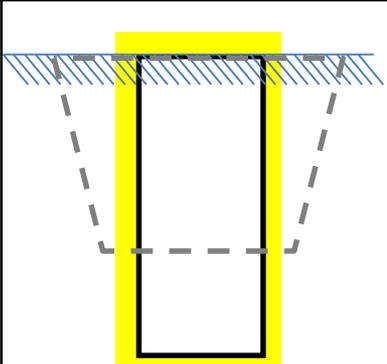
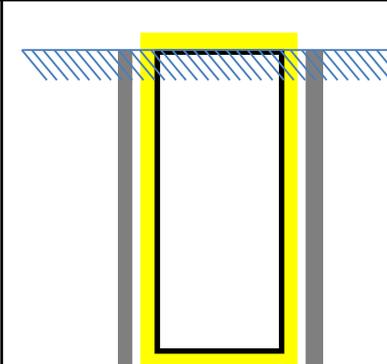
$h/d = 0,5$

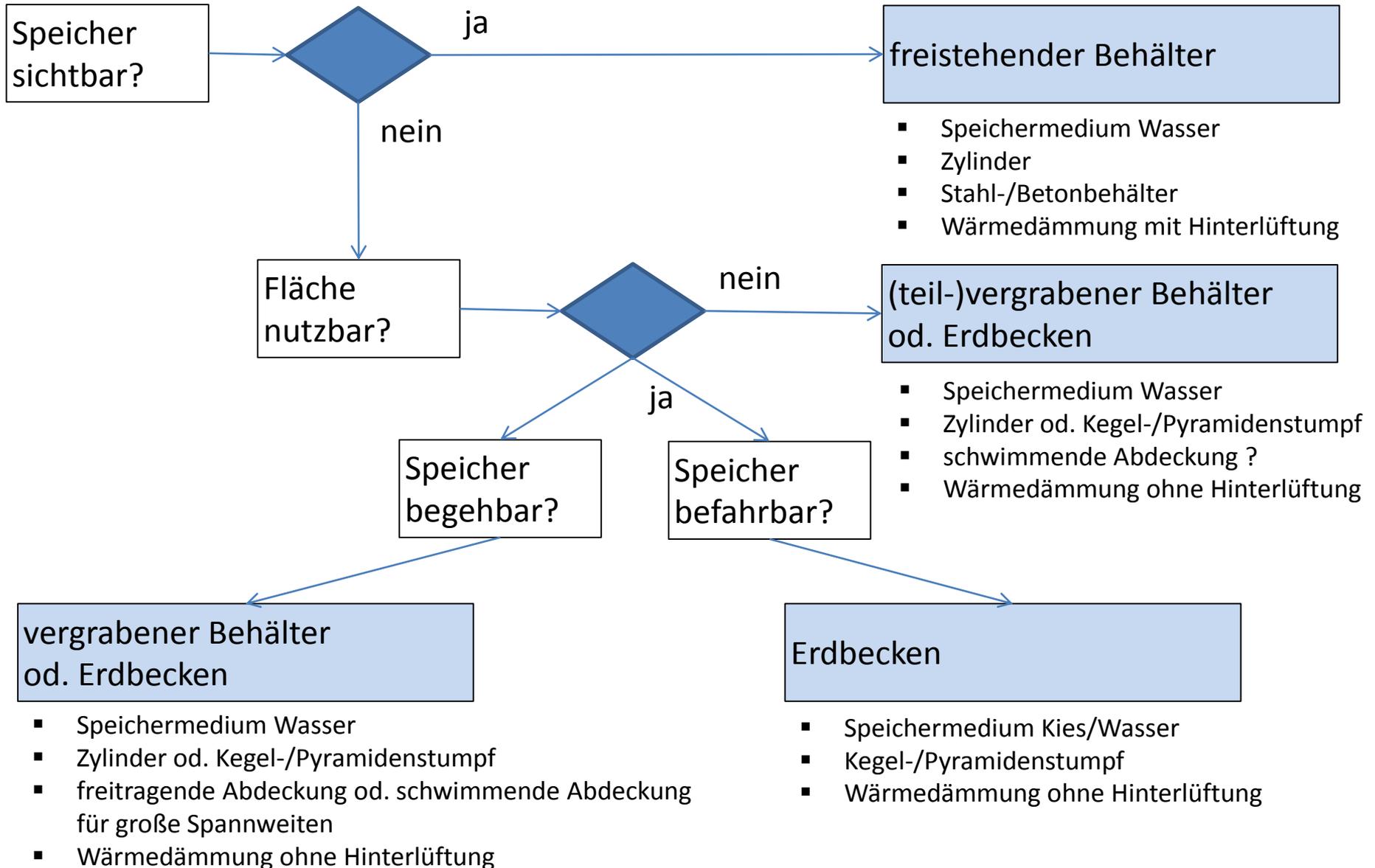
Volumen [m ³]	Tiefe [m]	Durchmesser [m]	A/V-Verhältnis
500	5,40	10,8	0,741
5000	11,50	23,5	0,344
10000	14,75	29,40	0,272

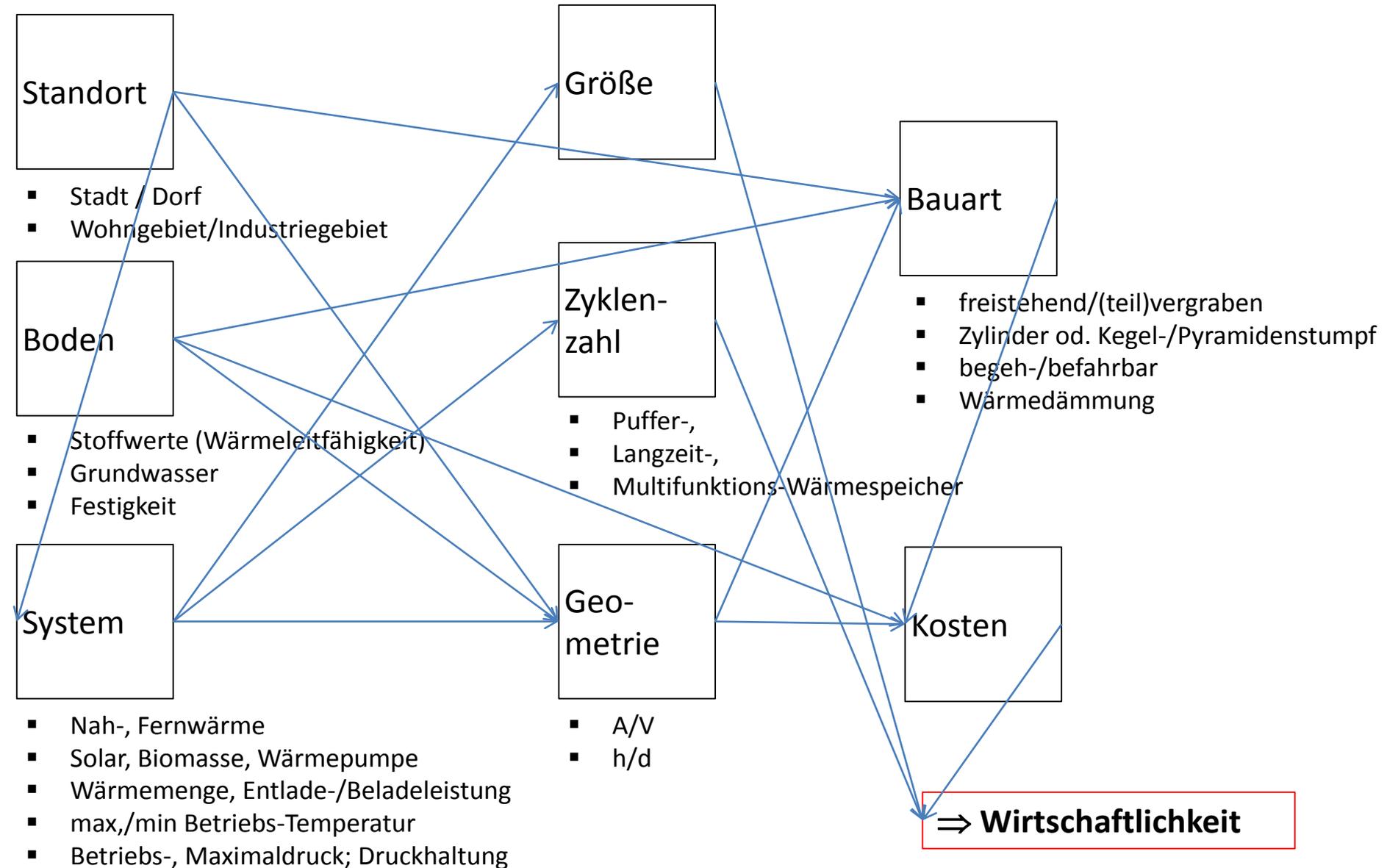
$h/d = 1,0$

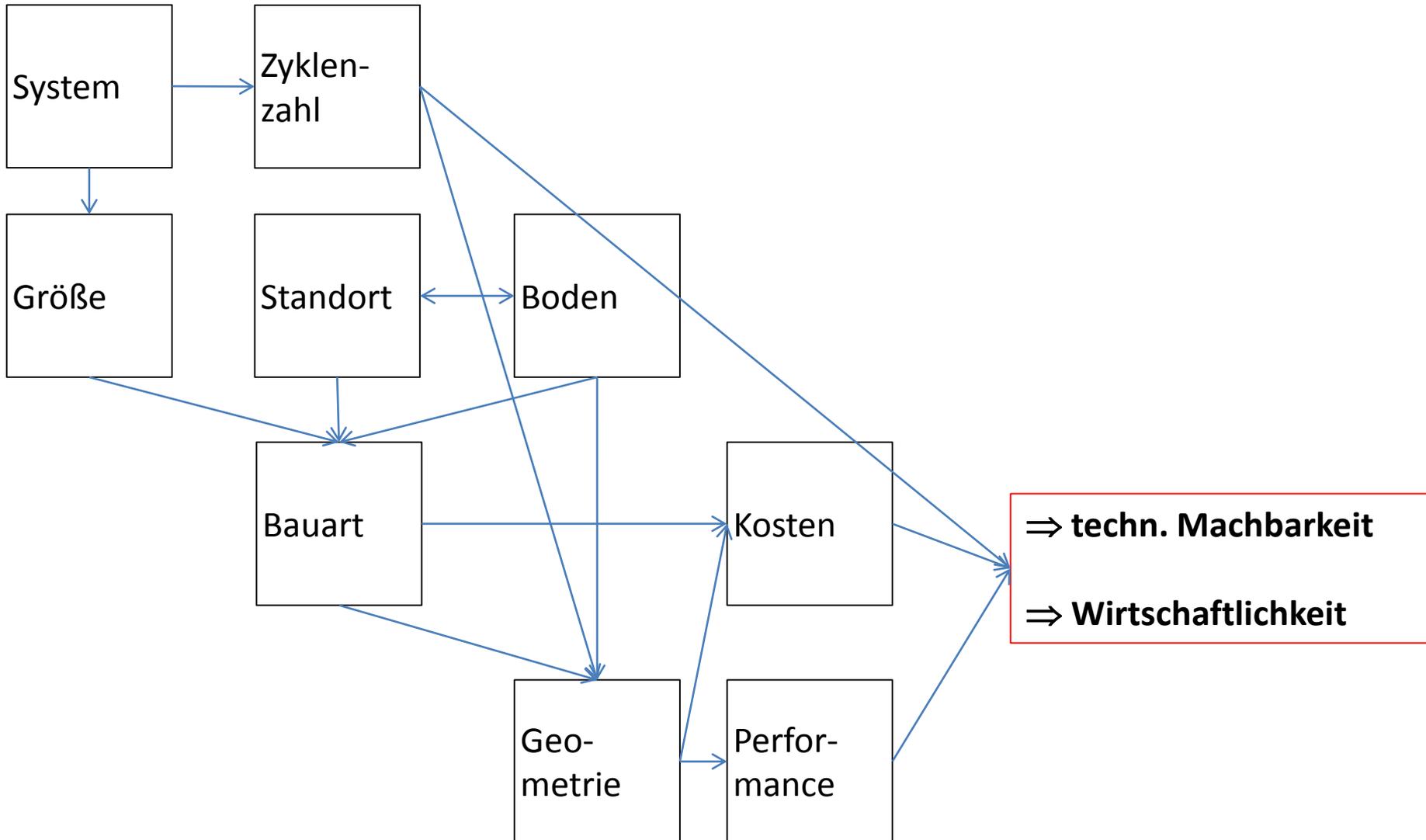
Volumen [m ³]	Tiefe [m]	Durchmesser [m]	A/V-Verhältnis
500	8,60	8,60	0,698
5000	18,50	18,50	0,324
10000	23,50	23,35	0,256

Bauformen von Behälter (B)- und Erdbecken (E)- Wärmespeichern

	oberirdisch	teilvergraben	unterirdisch
Aufstellung	B 	B 	B, E 
	unterirdisch ungedämmt	unterirdisch gedämmt	unterirdisch gedämmt mit Hinterlüftung
Wärmedämmung	 B, E	 B, E	 B





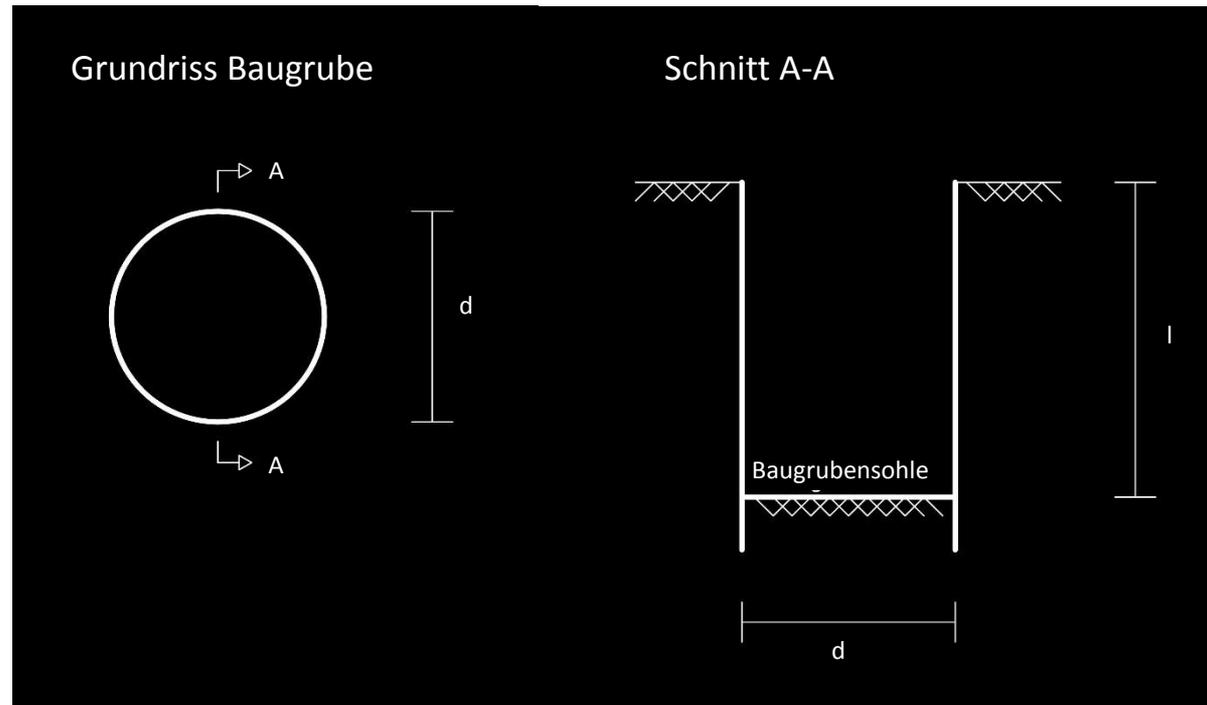


Speicherkonzept - Randbedingungen

- Wärmespeicher für Nahwärmenetz (in Siedlungsnähe, unterirdisch)
- mit Solarunterstützung (Langzeit-Wärmespeicherung (mehrere Tage bis einige Wochen, Wärmeverluste))
- und Einbindung einer Wärmepumpe (Schichtung, h/d-Verhältnis)

Standort - Randbedingungen

- Bodenverhältnisse
- Grundwasserverhältnisse
- Art der Nachbarbebauung
- Platzverhältnisse
- Umweltschutz

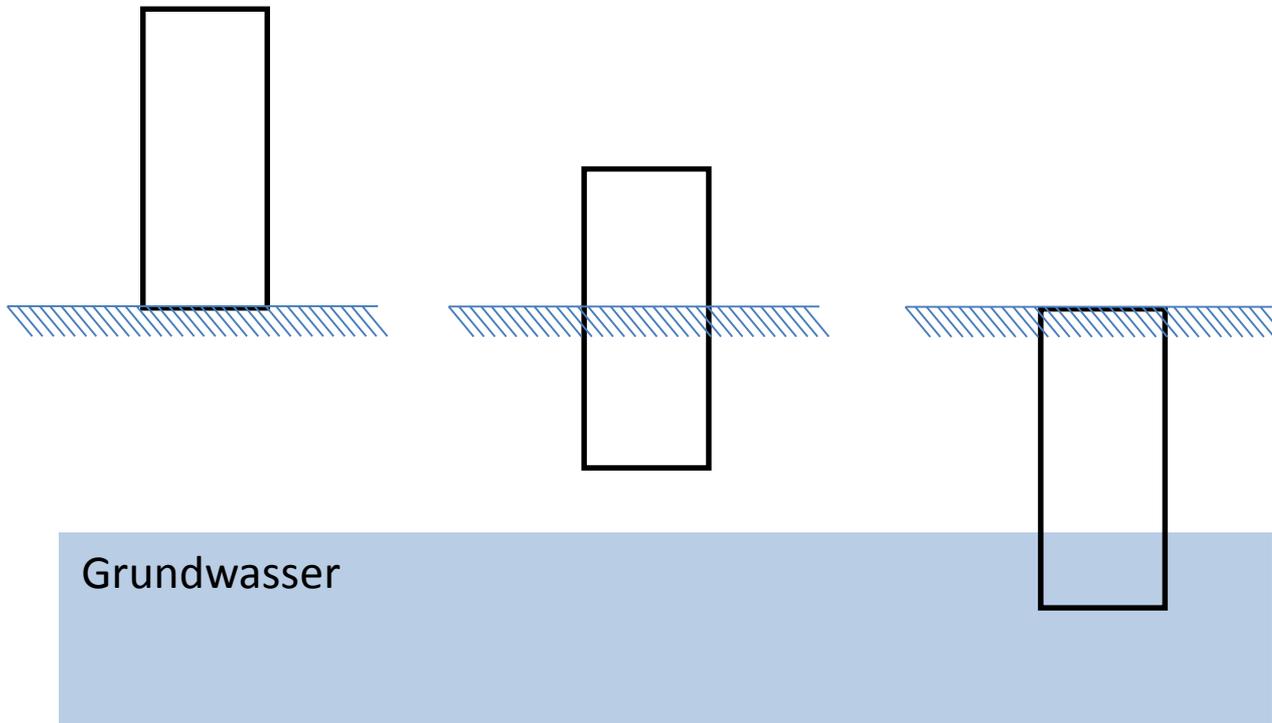


Randbedingungen - Boden

	Gesättigte Wichte γ_r [kN/m ³]	Wichte unter Auftrieb γ' [kN/m ³]	Feucht- wichte γ [kN/m ³]	Reibungs- winkel φ' [°]	Kohäsion c' [kN/m ²]
bindiger Boden ohne Grundwasser			18	22.5	10
bindiger Boden mit Grundwasser	20	10		22.5	10
nichtbindiger Boden mit Grundwasser		10	17	30	

Motivation – Verbau (Spezialtiefbau)

A) Teilvergraben, vergraben - Grundwasser



Motivation – Verbau (Spezialtiefbau)

B) Zylinder vs. Kegelstumpf (bzw. Pyramidenstumpf),

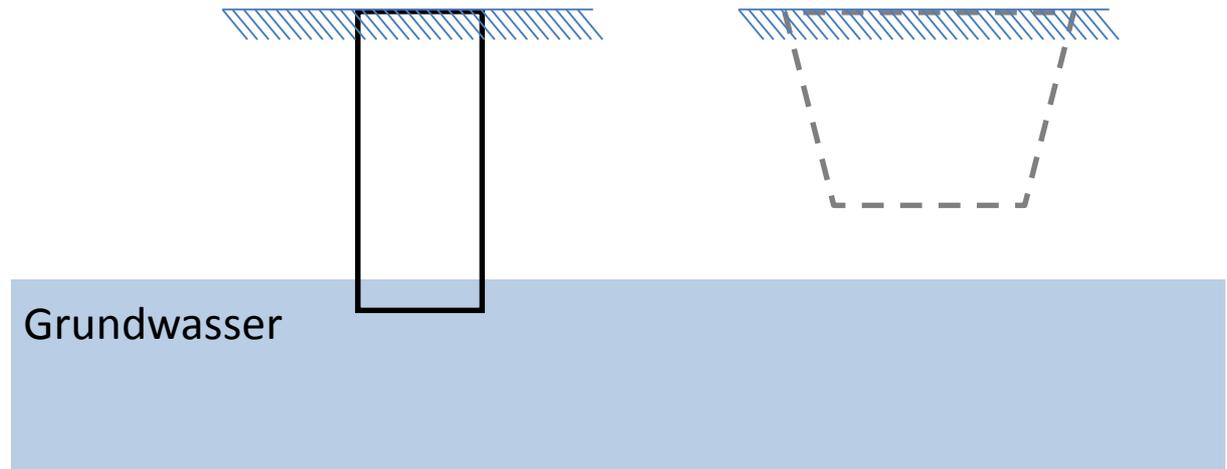
Schichtung (h/d-Verhältnis)

gut

mäßig

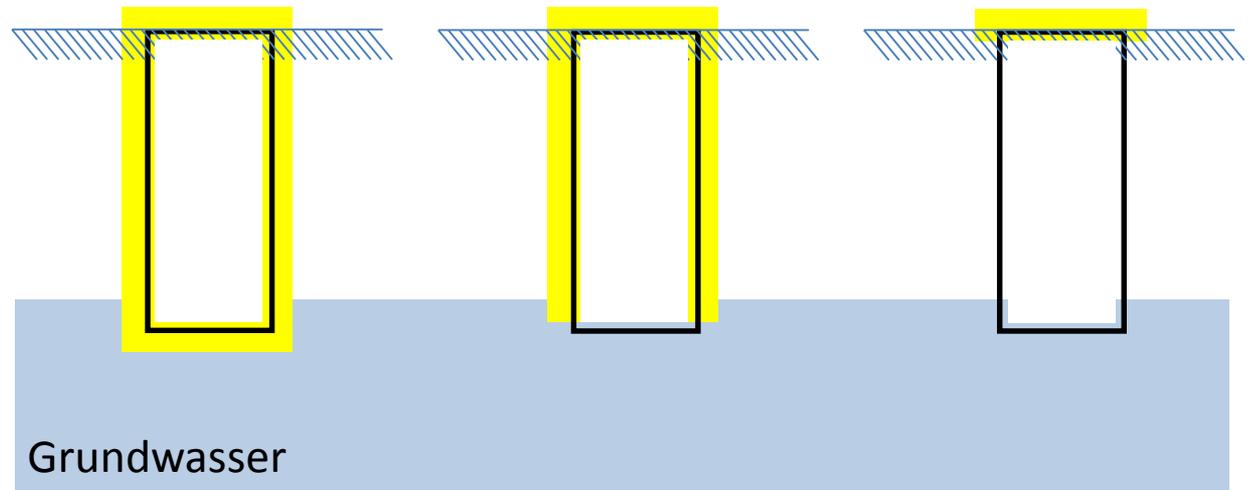
Wärmeverluste (A/V-Verhältnis)

... kommt darauf an ...



Motivation – Verbau (Spezialtiefbau)

C) Wärmedämmung, Grundwasser



Bewertung über A/V – Verhältnis ggf. irreführend, ggf. U -Wert gewichtet (Randbedingung!)

Bewertungsgrößen

Problemstellung:

Beurteilung der Wirtschaftlichkeit, Berücksichtigung Wärmepumpe

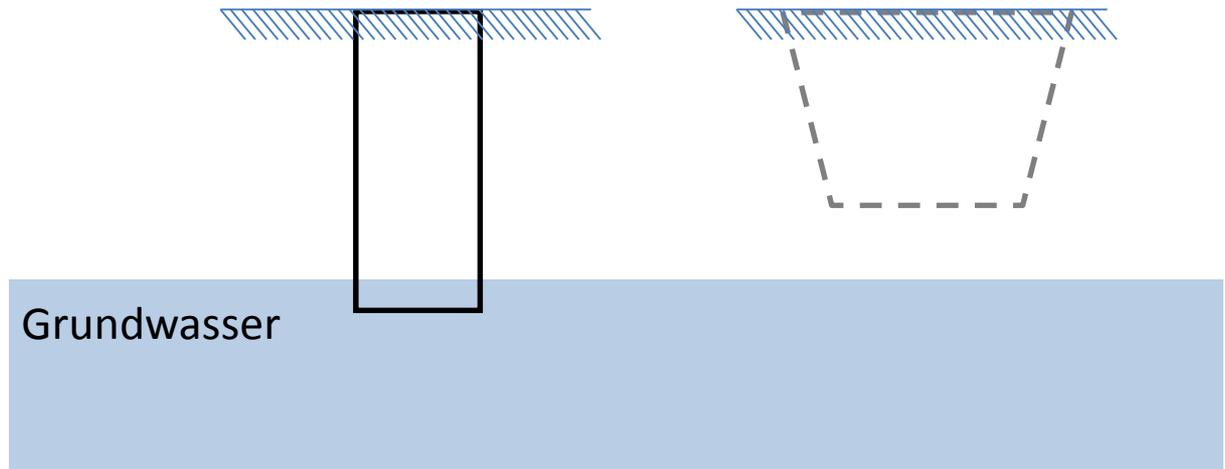
Temperaturniveau, Schichtung

Äußere Wärmeverluste (längerfristige Effekte)

Innere Wärmeverluste (vertikale Wärmeausbreitung, Schichtung – Effizienz Solar und WP)

Speichernutzungsgrad

Exergetische Bewertung



AUFGABENSTELLUNG

DEZENTRALE SPEICHER IN STÄDTISCHEN FW-NETZEN

Die *bautechnische Aufgabe* ist wesentlich charakterisiert durch diese Anforderungen:

- Örtliche Zwänge: Städtische Umgebung
 - Städtebauliche Anforderungen: Möglichst „unauffällige“ Speicher, baurechtliche Genehmigungsfähigkeit und öffentliche Akzeptanz, Flächenverbrauch
 - Grundstückspreise und –nutzbarkeit: Speicher möglichst nicht als einzige Nutzung - oder zumindest Maximierung der Speicherkapazität
 - beengte Verhältnisse, Nachbarbebauung
 - Sicherheitsanforderungen: Minimierung von Havarie- oder Sabotagefolgen
- Betrieblicher Bedarf
 - Druckhaltung ermöglichen
 - Belade-/Entladeleistung
- Geometrische Randbedingungen
 - Möglichst zylindrische Form
 - Volumen von einigen hundert bis mehreren zehntausend bzw. hunderttausend Kubikmetern

Wahl einer geeigneten Verbauart (Spezialtiefbau)

Unterscheidung nach

- Nachgiebigkeit

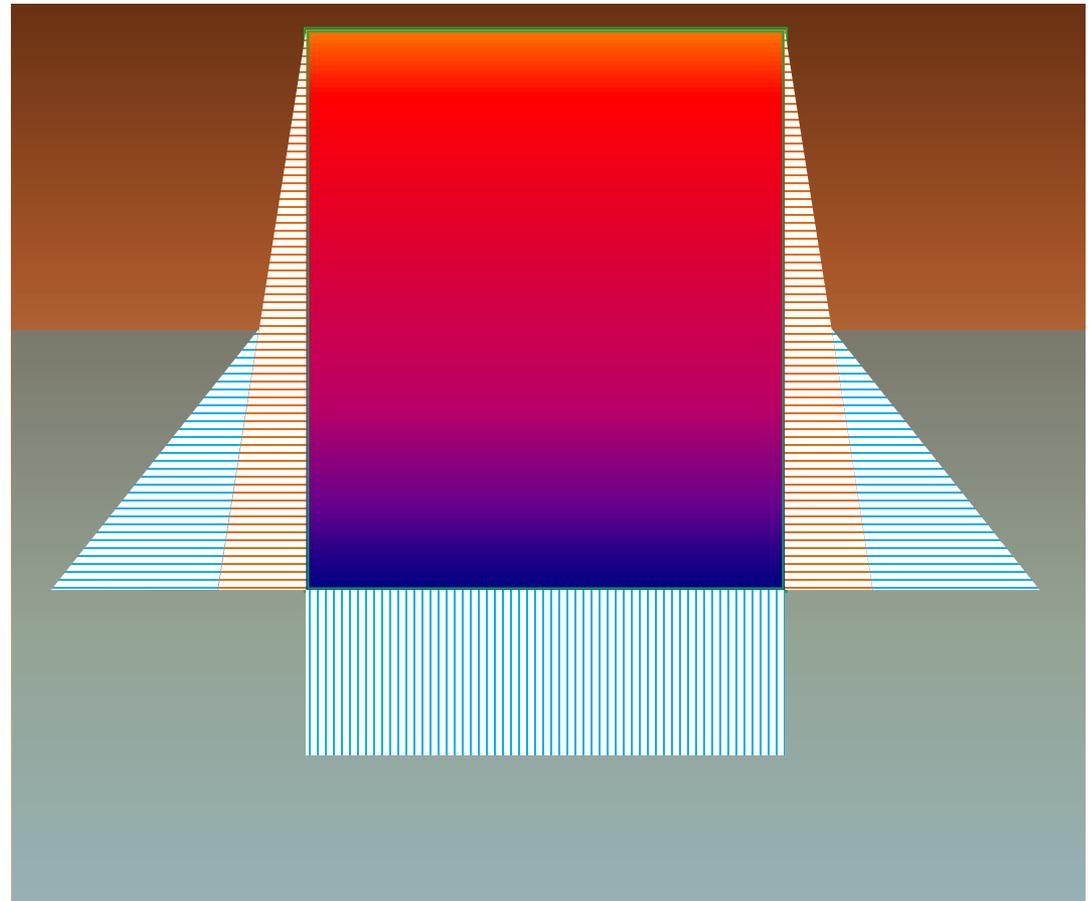
nachgiebig	unnachgiebig
<ul style="list-style-type: none"> - Trägerbohlwand - Spundwand 	<ul style="list-style-type: none"> - Bohrpfahlwand - Schlitzwand

- Berücksichtigung des Grundwassers

oberhalb des Grundwassers (bzw. nach dessen Absenkung)	mit Grundwasser
<ul style="list-style-type: none"> - Trägerbohlwand - Bodenvernagelung 	<ul style="list-style-type: none"> - überschnittene Bohrpfahlwand - Schlitzwand - Spundwand

Geologie und Hydrologie

- Erddruck
 - Aktiver Erddruck/Erdruchedruck als Belastung beim Bau
 - Passiver Erddruck (ca. Faktor 10 größer) als Stützung im Betrieb
- Wasserdruck
 - Prinzipiell wie Erddruck, hat u. U. quantitativ den größeren Einfluss
 - Auftriebsproblematik bei Bau und Betrieb (Lastfall „Behälter leer“)
 - Möglicherweise bauzeitliche Abdichtung nach unten nötig



BAUVERFAHREN:

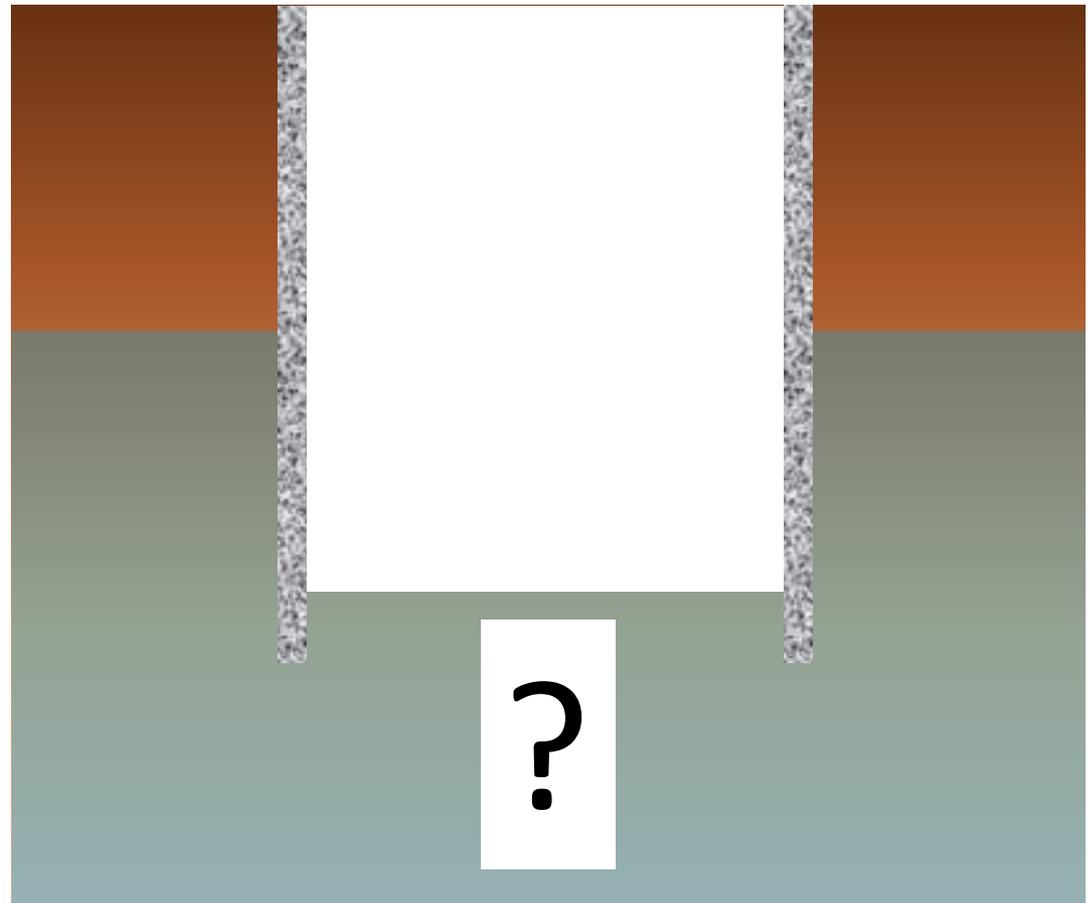
KONSTRUKTIONSPRINZIPIEN BEI SCHACHTBAUGRUBEN

Horizontale Umschließung

- Druckring aus Betonbauteilen

Sohlabdichtung?

Auftriebssicherung?



Verbauarten

- Schlitzwände
- überschnittene Bohrpfehlwände
- Spundwände
- Trägerbohlwände
- Bodenvernagelung



Quelle: Züblin Spezialtiefbau GmbH

SCHACHT ALS SCHLITZWANDPOLYGON

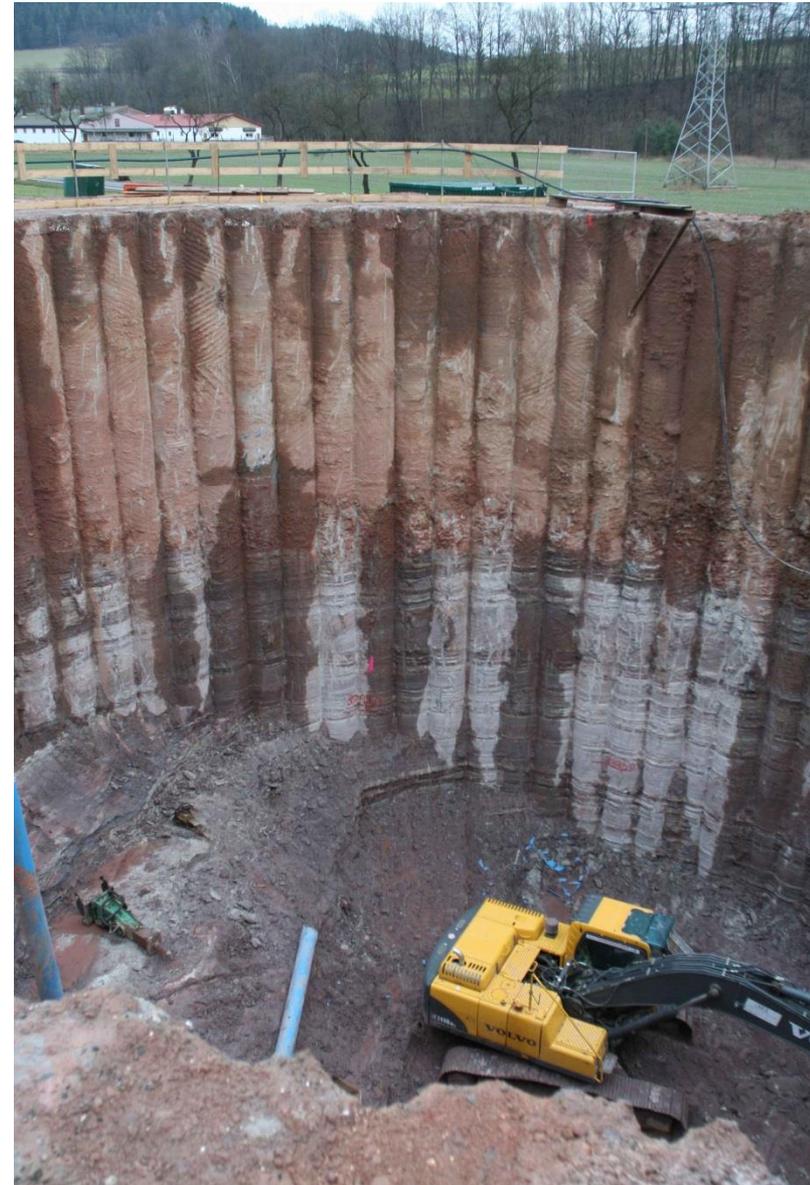


Verbauarten

- Schlitzwände
- **überschnittene Bohrpfehlwände**
- Spundwände
- Trägerbohlwände
- Bodenvernagelung



Quelle: Züblin Spezialtiefbau GmbH



Quelle: wikipedia (Bohrpfahlwand)

SCHACHTWAND AUS BOHRPFÄHLEN

UNTERWASSERAUSHUB UND UNTERWASSERBETONSOHLE

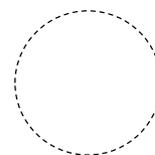
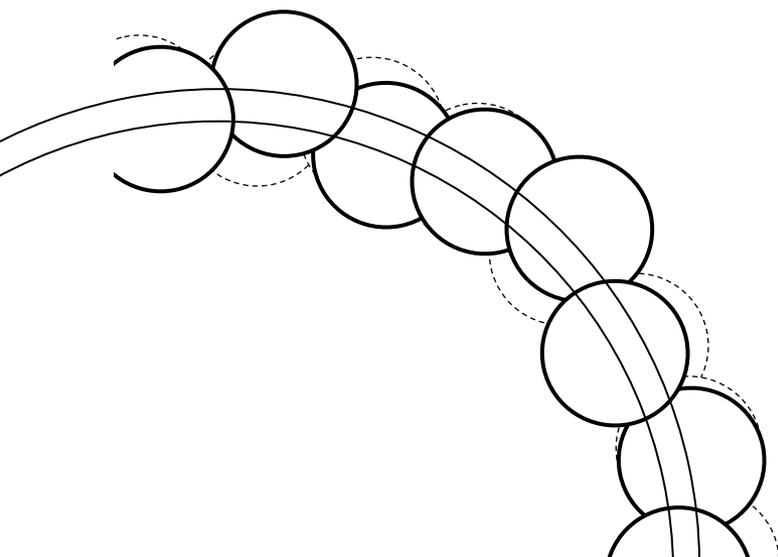


SCHACHTWAND AUS BOHRPFÄHLEN

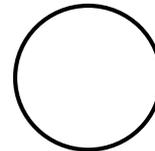
AUFTRIEBSICHERUNG (VERANKERUNG) VORAB VOM GELÄNDE AUS



überschnittene Bohrpfehlwand



Soll-Lage



Ist-Lage



effektive Druckringbreite

Verbauarten

- Schlitzwände
- überschnittene Bohrpfehlwände
- **Spundwände**
- Trägerbohlwände
- Bodenvernagelung



Quelle: Züblin Spezialtiefbau GmbH

Verbauarten

- Schlitzwände
- überschnittene Bohrpfehlwände
- Spundwände
- **Trägerbohlwände**
- Bodenvernagelung



Quelle: Züblin Spezialtiefbau GmbH

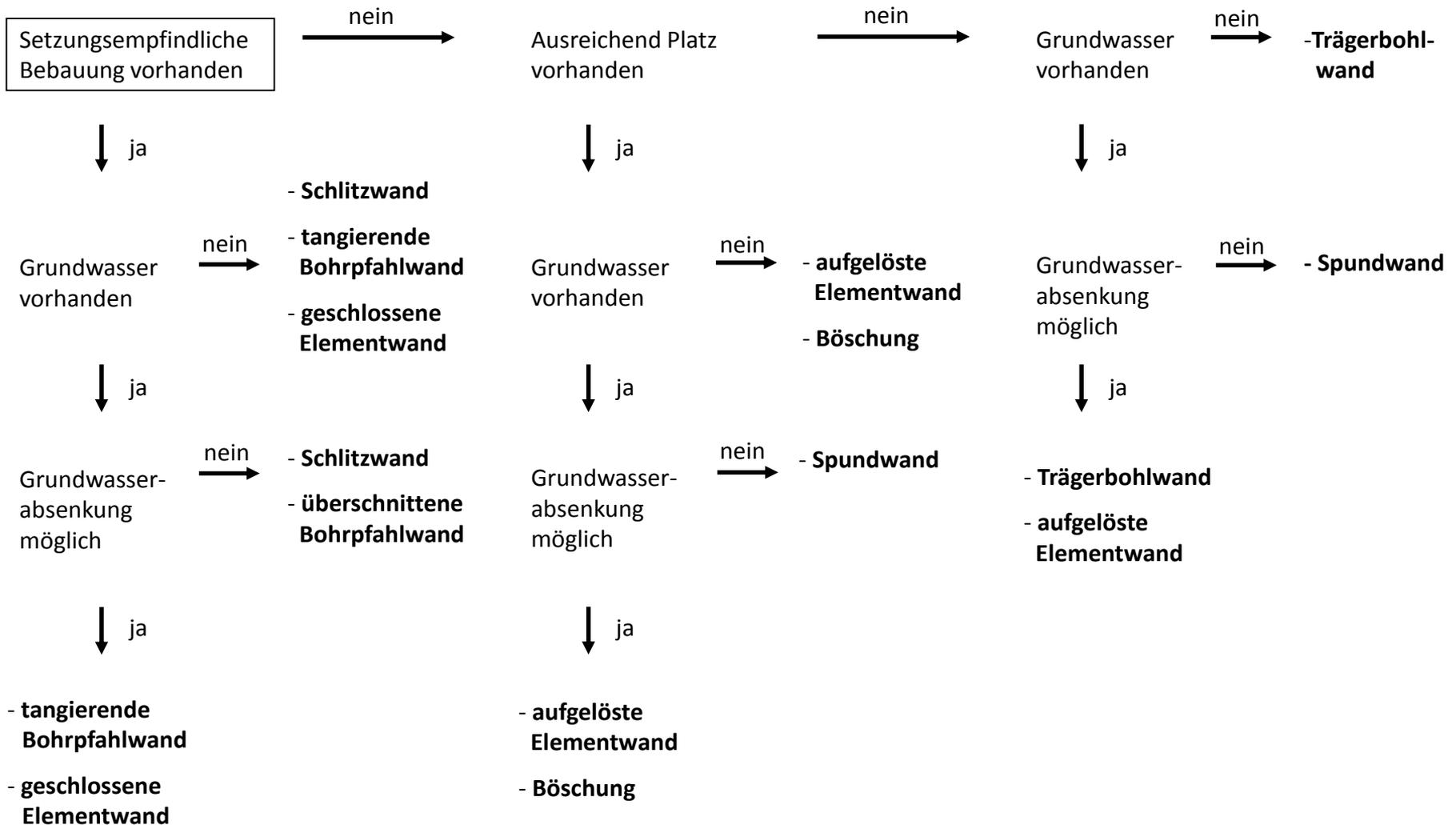
Verbauarten

- Schlitzwände
- überschnittene Bohrpfehlwände
- Spundwände
- Trägerbohlwände
- **Bodenvernagelung**



Quelle: Züblin Spezialtiefbau GmbH

Wahl einer geeigneten Verbauart



Verfahren der Grundwasserabsperrung

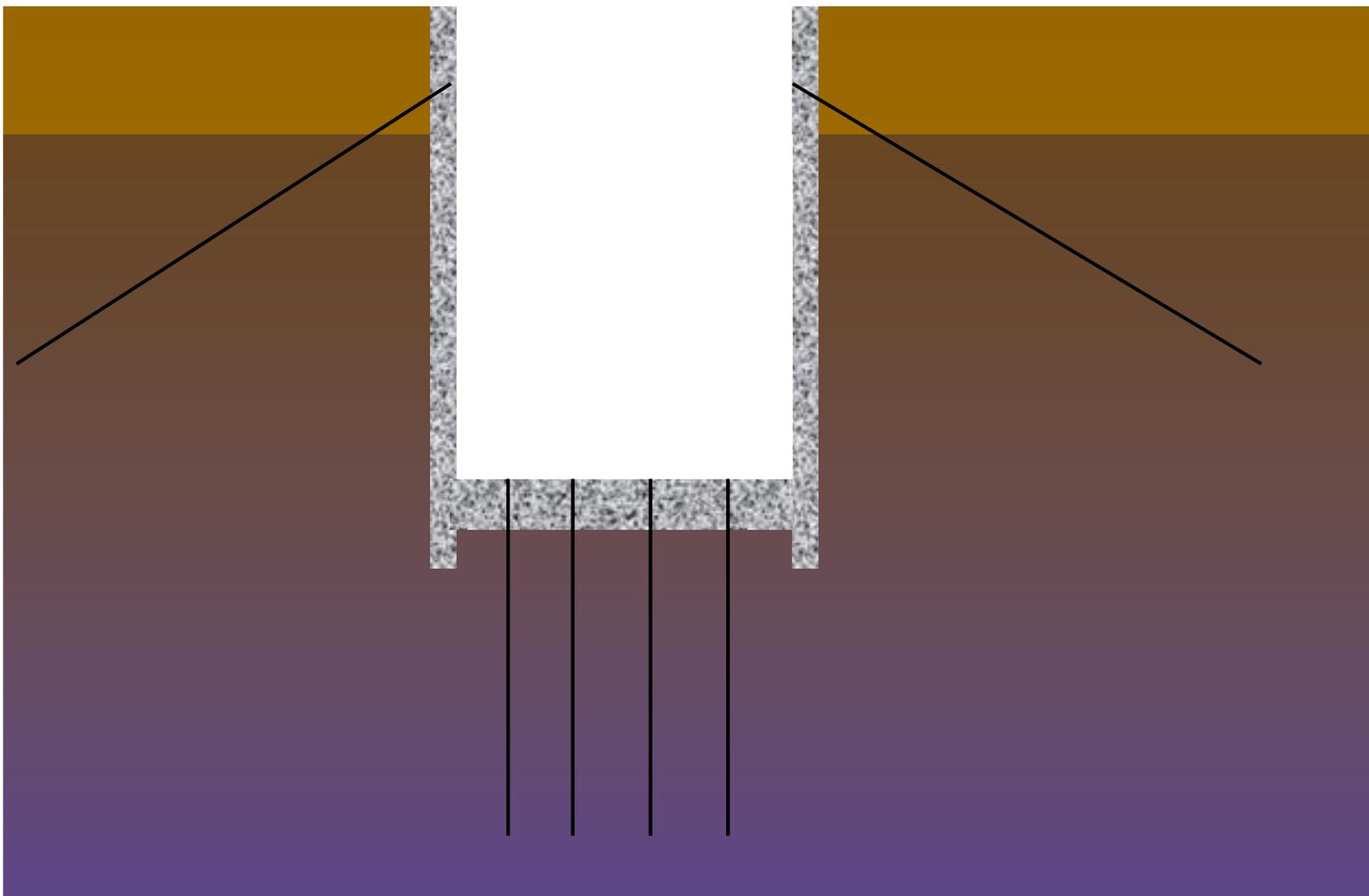
- **vertikale Abdichtung**

- Spundwand
- Schlitzwand
- überschnittene Bohrpfahlwand

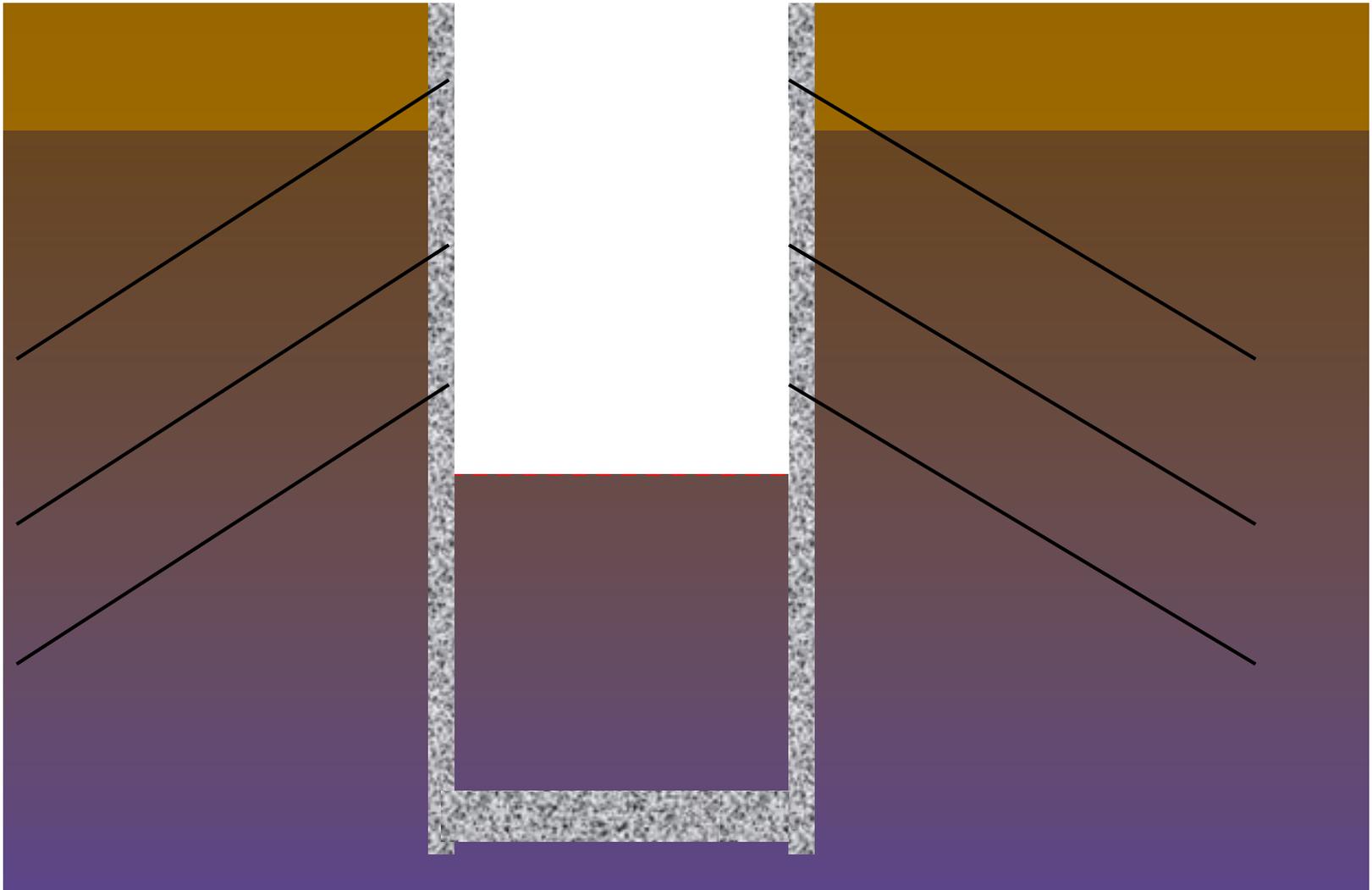
- **horizontale Abdichtung**

- Einbindung der Verbauwände in wasserundurchlässige Schicht
- Unterwasserbetonsohle
- Hochdruckinjektionssohle

Unterwasserbetonsohle



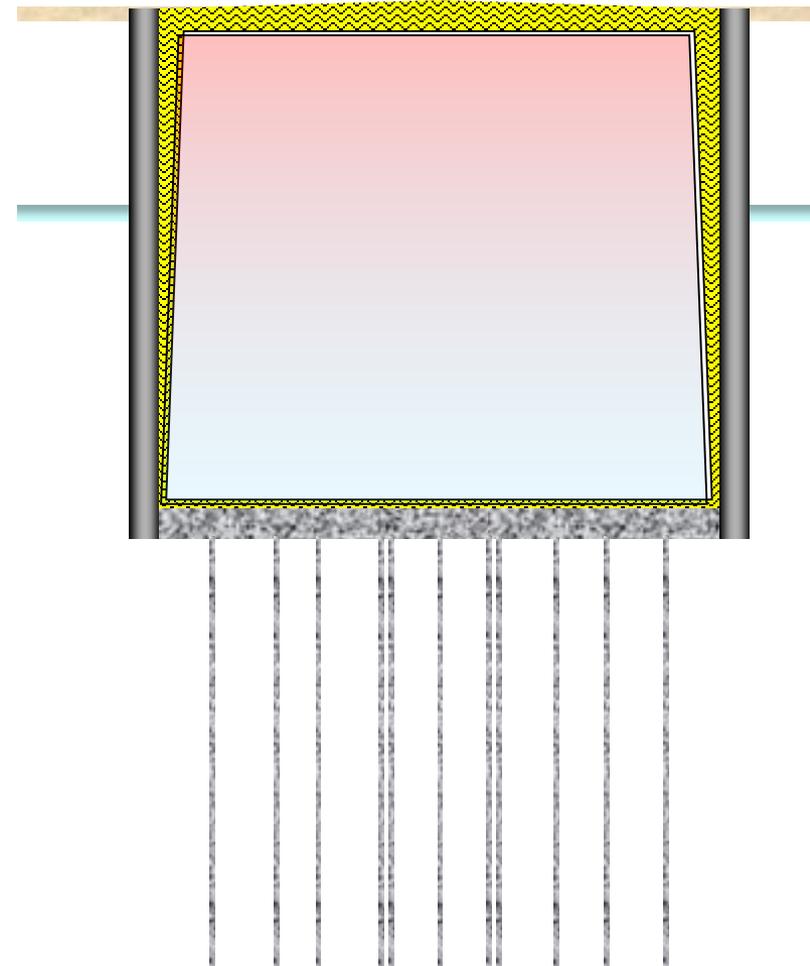
Hochdruck- oder Niederdruckinjektionssohle



Beispiel eines Speichers mit Bohrpfählen und Unterwasserbetonsohle

Ausführung

- Abdichtung
- Wärmedämmung
- Abdeckung



Zusammenfassung Verbauarten

- Bei allen Verbauarten treten Kostendegressionseffekte auf.
- Oberhalb des Grundwassers ist bei kleinen Tiefen die Bodenvernagelung die preiswerteste Verbauart. Vergrößert sich die Tiefe der Wand, fallen die Kostendegressionseffekte im Vergleich zu den anderen Verbauarten geringer aus.
- Eine weitere rel. günstige Variante ist die Trägerbohlwand. Durch eine Vergrößerung des Abstandes zwischen den Trägern lassen sich zusätzlich Kosten einsparen.
- Wenn neben der Stützwirkung eine Grundwasserabdichtung gefordert wird, ist die Spundwand zumindest bei geringen Tiefen am günstigsten.
- Wenn Bodenbewegungen bzw. Setzungen hinter der Wand auf ein Minimum beschränkt werden sollen, z.B. bei Baugrubenumschließungen in unmittelbarer Nähe von Bauwerken, bietet sich die Bohrpfahlwand an.
- Im Gegensatz zu den Schlitzwänden können Bohrpfahlwände den statischen Vorteil (zweiachsiges Tragverhalten) nicht vollständig nutzen. Bei größeren Tiefen ist dadurch die Schlitzwand die preiswerteste Alternative.
- Aufgrund des niedrigen Reibungswinkels bei bindigen Böden ergeben sich sehr große Erddruckkräfte, die sich entscheidend auf die Statik und dadurch auf die Kosten auswirken.

Unterirdische Wärmespeicher, Erdbecken- Wärmespeicher

- Ziel ist es, die Kosten von unterirdischen Wärmespeichern zu reduzieren bzw. die Auswahl möglicher Standorte zu erweitern.
- Durch den senkrechten Verbau können das A/V-Verhältnis von unterirdischen Wärmespeichern und damit die spezifischen Wärmeverluste minimiert werden.
- Außerdem lassen sich, bei vorhandenem Grundwasser durch die Wahl der Verbauart (Schlitzwände, überschnittene Bohrpfahlwände oder Spundwände), unterirdische Wärmespeicher standortunabhängig einsetzen.
- Die (wirtschaftliche) Effizienz des Gesamtsystems wird durch die anfänglich höheren Investitionskosten beeinflusst. Diese hängen stark von den örtlichen Randbedingungen ab.

KOSTEN UND TERMINE

Generell natürlich abhängig von der Geologie und Schachtgeometrie

- Anstehendes Grundwasser wirkt verteuernd, wassersperrende Schichten können helfen
- Injizierbarkeit des Bodens ist zu klären
- Beengtes innerstädtisches Bauen wirkt verteuernd
- Preis je m³ sinkt generell mit Speichergröße (Kostendegression)

KOSTEN UND TERMINE

Unter Berücksichtigung dieser Begleitumstände Netto-Richtpreise Herbst 2014:

- Bohrpfahlschacht (Pfähle \varnothing 120 cm, 35 cm Überschneidung) € 350/m²
- Schlitzwandschacht (80 cm Wandstärke) € 450/m²

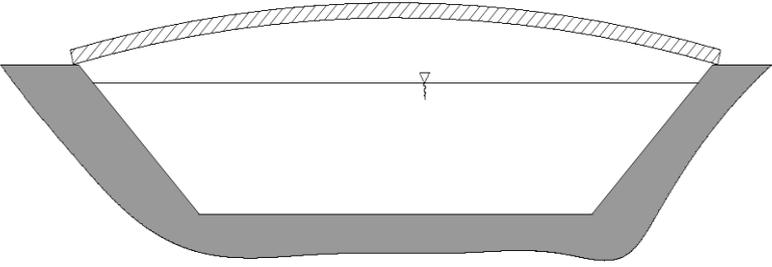
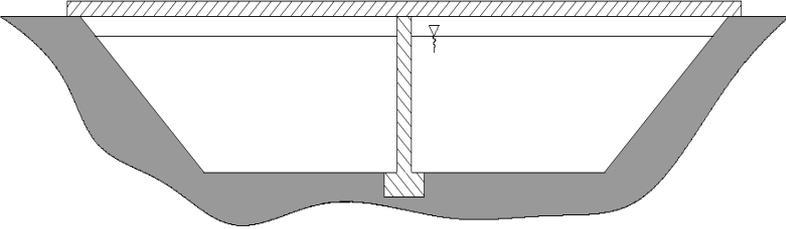
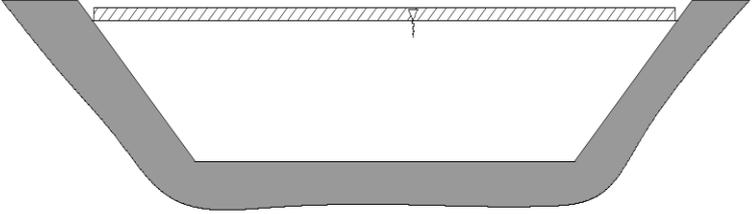
- Aushub trocken € 15/m³ bis € 35/m³
- Aushub nass € 25/m³ bis € 55/m³

- Injektionssohle (Weichgel) € 200/m²
- Düsenstrahlsohle (Zementmörtel) € 300/m²
- Auftriebsanker € 100/lfm
- Auftriebspfähle €150/lfm
- Unterwasserbetonsohle (1 m Stärke) € 160/m²
- Konstruktive Stahlbetonsohle (1 m Stärke) € 200/m²

Speicherausbau

- Wärmedämmung
 - Boden (Druck) 150 €/m³
 - Wand 100 €/m³
- Abdichtung
 - Edelstahl 100 €/m²
 - Kunststoffdichtungsbahn 50 €/m²
- Abdeckung
 - Freitragend
 - Schwimmend 200 €/m²
- Beladesystem 20000 €
- Baustelleneinrichtung 50000 €

Abdeckung von Heißwasser-Wärmespeichern

<p>Selbsttragende Abdeckung:</p> <ul style="list-style-type: none"> + begehbare Abdeckung + Speicher ist begehbar und wartbar - aufwändige (teure) Konstruktion - relativ hoher Aufbau (Stich) - begrenzte Speichergröße (Oberfläche) 	<p>Växjö (S) Särö (S) Malung (S) Friedrichshafen Herlev (DK) Sjökulla (FN) Hannover München</p>	
<p>Abgestützte tragende Abdeckung:</p> <ul style="list-style-type: none"> + begehbare Abdeckung + Speicher ist begehbar und wartbar - Durchdringung der Abdichtung am Beckenboden - hohe Last auf Säule(n) - Wärmebrücke an Decke und Boden 	<p>Rottweil Hamburg</p>	
<p>Schwimmende Abdeckung:</p> <ul style="list-style-type: none"> + einfache (kostengünstige) Konstrukt. + Speichergröße nahezu beliebig (bei aufschwimmender Abdeckung) - eingeschränkte Begehbarkeit bzw. Befahrbarkeit - Zugänglichkeit (Wartung/Sanierung) - Einbau Beladesystem 	<p>Studsвик (S) Lombohov (S) Berlin Ottrupgard (DK) Lyngby (DK) Marstal (DK) Stuttgart Marstall II (DK)</p>	

Schwimmende Abdeckung - Schlussfolgerungen

- Realisierung unterschiedlicher Konzepte schwimmender Abdeckungen
- Installation auf gefülltem Speicher ist begrenzt auf bestimmte Speichergröße
- Wärmebrücken bei modularen Systemen
- Erfahrungen mit aufschwimmender Abdeckung im Bereich Wasserrückhaltebecken



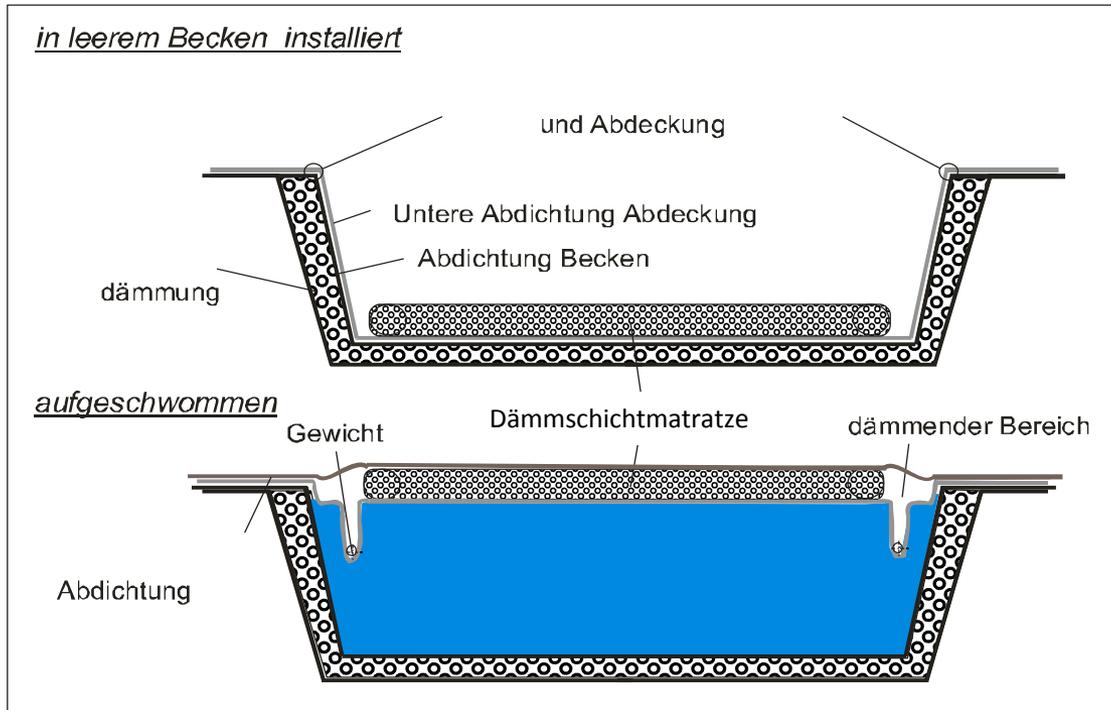
Tabelle: Ausgeführte Abdeckungen von Forschungs- und Pilot- Langzeit-Wärmespeichern, Referenzen, siehe Tabelle 6 bzw. [116], [117], [118], [119], [120]

Abdeckung	Projekt	V [m ³]	Land	Jahr	Bemerkung
Freitragende Abdeckung	Växjö	1 000	S	1987	Erdbecken
	Särö	640	S	1989	Stahlbehälter in Grube (Wickelfalz)
	Malung	1 000	S	1989	Erdbecken
	Friedrichshafen	12 000	D	1996	Betonbehälter, vorgespannt
	Herlev	3 000	DK	1991	Erdbecken
	Sjökulla	195	FN	1993	Erdbecken
	Hannover	2 750	D	2000	Betonbehälter, vorgespannt
	Attenkirchen	500	D	2001	Betonbehälter, vorgespannt (als Puffer für Erdsonden-Wärmesp.)
	München	6 000	D	2006	Betonbehälter, vorgespannt
Abgestützte Abdeckung	Hamburg		D		
	Rottweil	600	D	1994	Betonbehälter, 1 Säule
Schwimmende Abdeckung	Hamburg	4 500	D	1996	Betonbehälter, 6 Säulen
	Wales	100	UK	1977	Erdbecken, auf Wasser Installation
	Studsvik	800	S	1978	Betonbehälter, modularer Aufbau
	Lombohov	10 000	S	1980	Betonbehälter, modularer Aufbau
	Lyngby	540	DK	1983	modularer Aufbau
	Mannheim	30 000	D	1983	Studie, modularer Aufbau
	Wolfsburg	10 000	D	1984	Studie, auf Wasser Installation
	Hjortekaer	50 000	Dk	1984	Studie, k.A.
	Berlin	170	D	1986	Erdbecken, modularer Aufbau
	Ottrupgaard	1 500	DK	1995	Erdbecken, modularer Aufbau, ge-lagert auf 2 Querstreben, 4 Säulen
	Jülich	2 500	D	1996	Erdbecken, modular, 1:10 Model
	Lyngby	500	DK	2002	Erdbecken, auf Wasser Installation
	Marstal	10 000	DK	2003	Erdbecken, auf Wasser Installation
	Stuttgart	150	D	2005	Erdbecken, aufschwimmende Abdeckung, Außenlaborversuch
Marstall	75000	DK	2012	Erdbecken, auf Wasser Installation	

Droninglund

...

Außenlabor - Aufschwimmende Abdeckung



Nachteile einer schwimmenden Abdeckung:

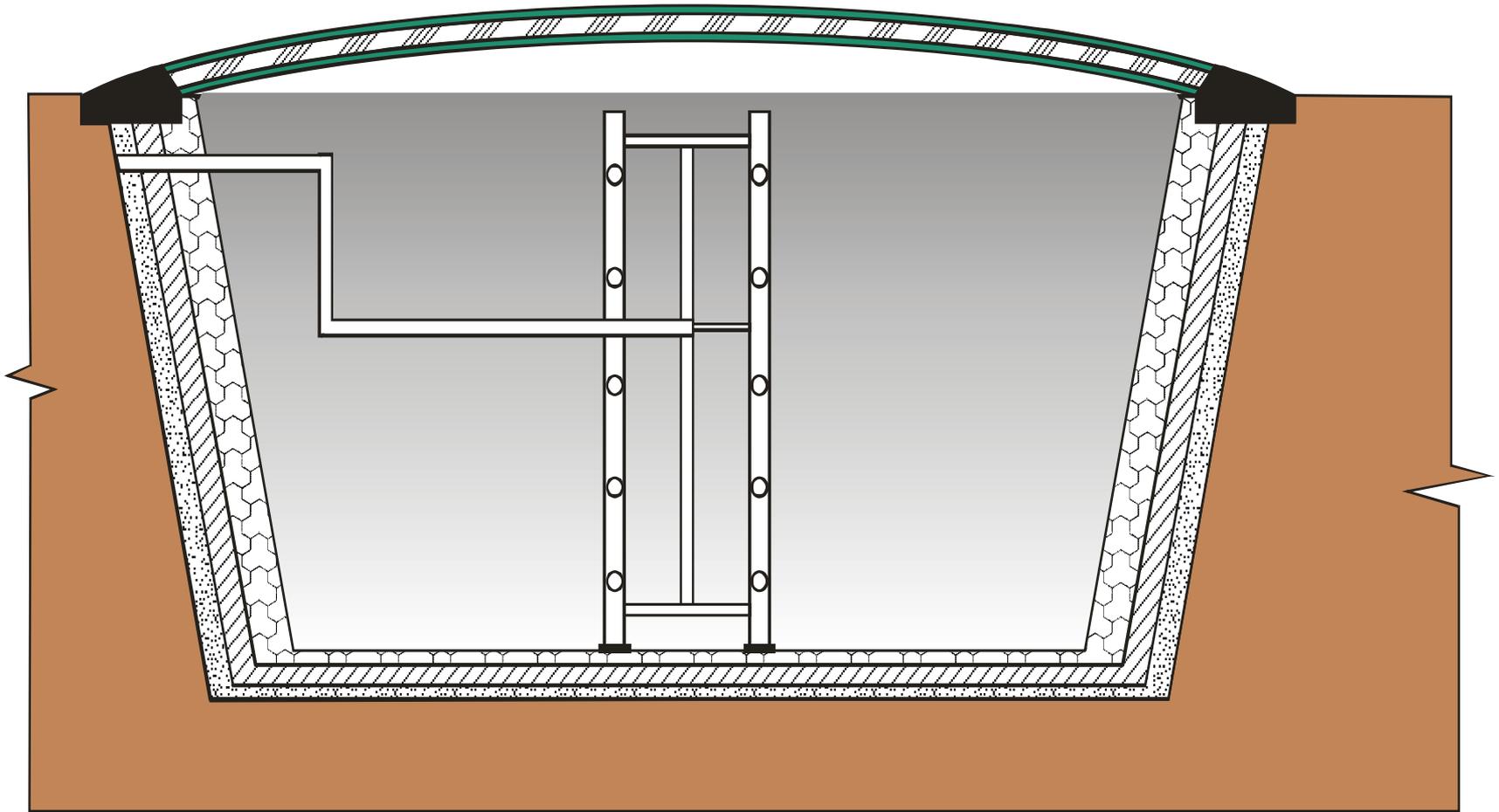
- Abdeckung nicht nutzbar
- Speicher nicht befahrbar und nicht wartbar
- Installation der Be- und Entladeeinrichtung

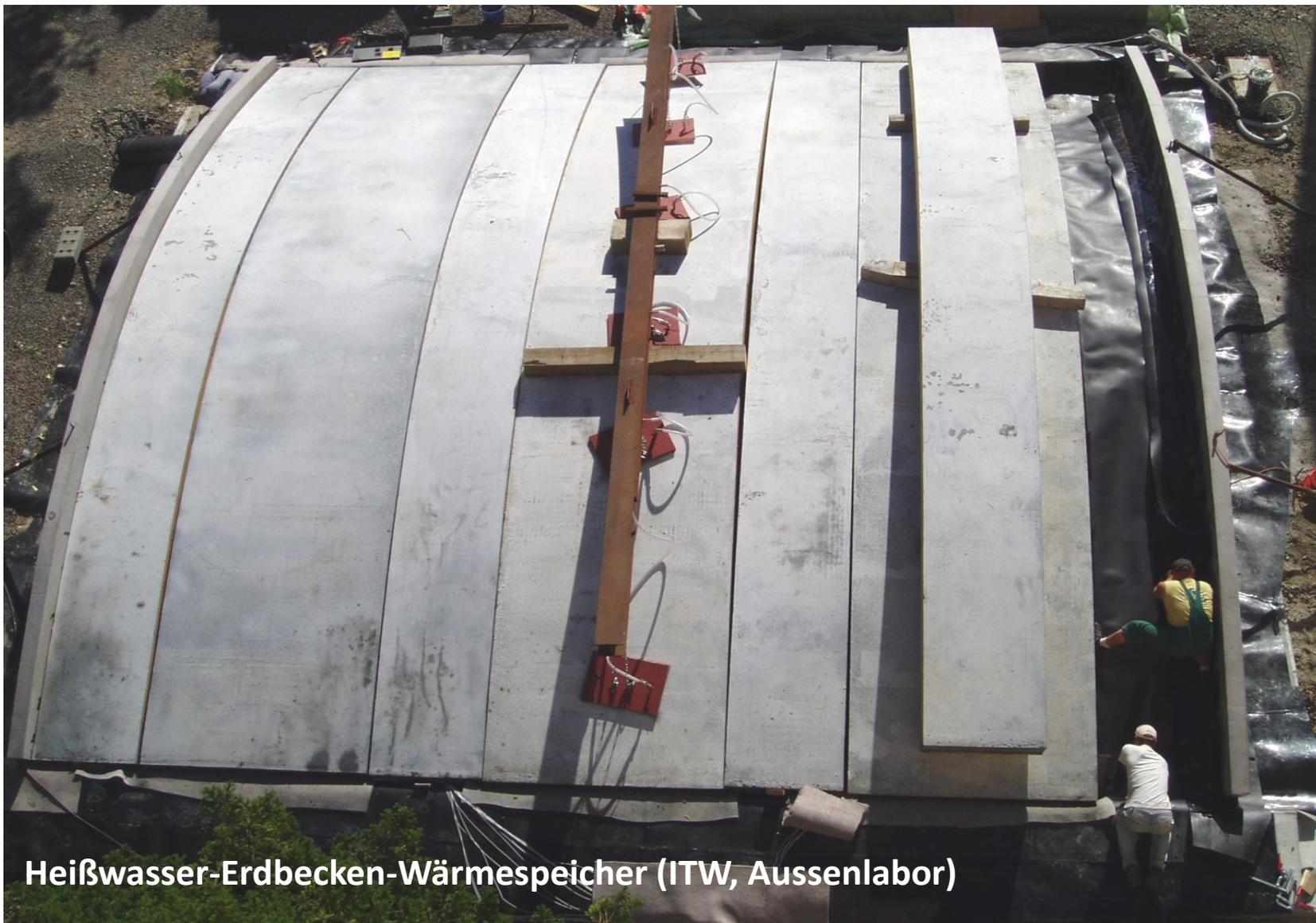
Diffusionsproblem ist noch ungelöst!

Freitragende Abdeckung



Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher





Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher (ITW, Aussenlabor)

Heißwasser-Erdbecken-Wärmespeicher ITW, Aussenlabor



Arbeitsbereich

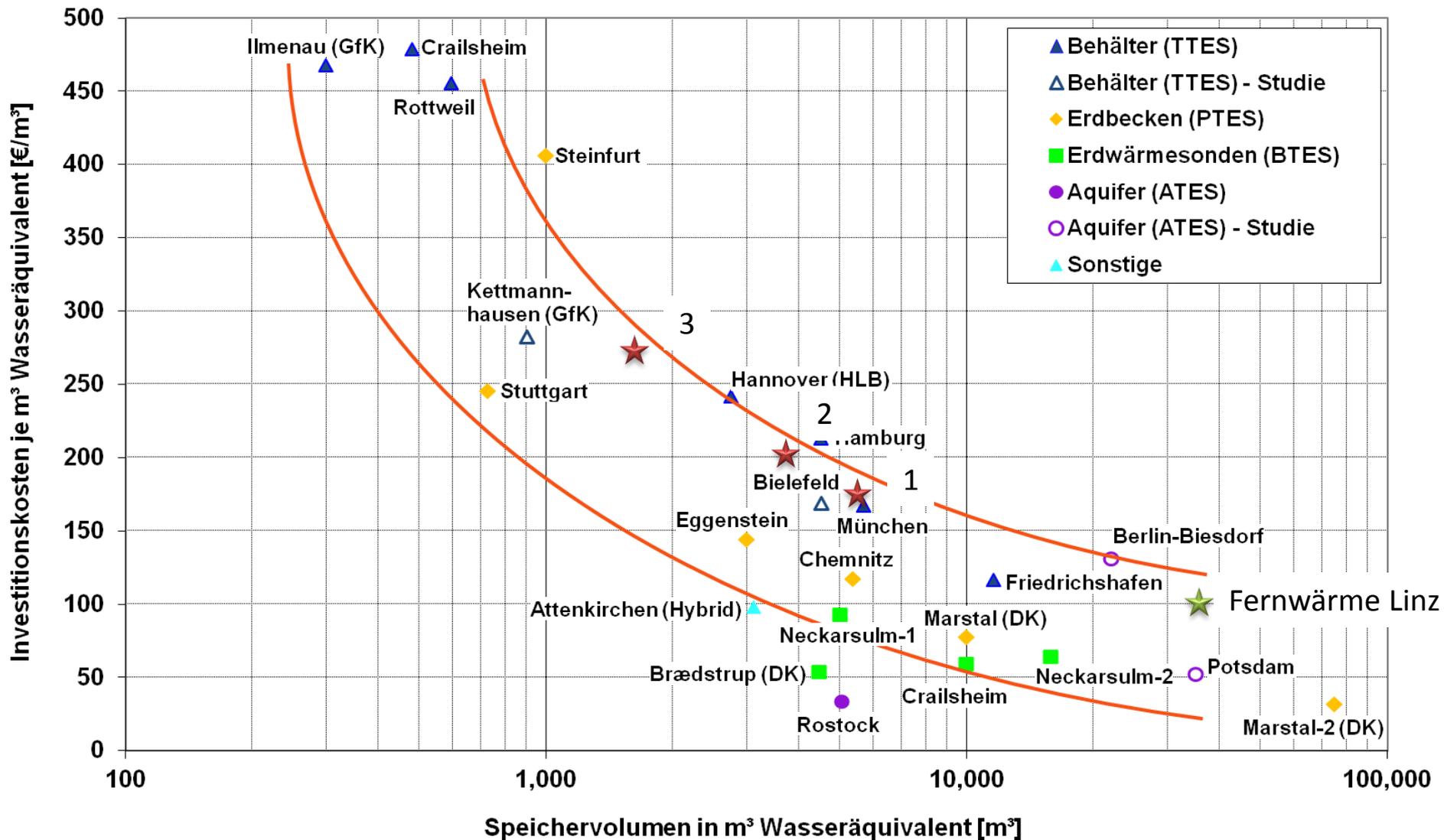
Energieeffizientes Bauen

universität innsbruck

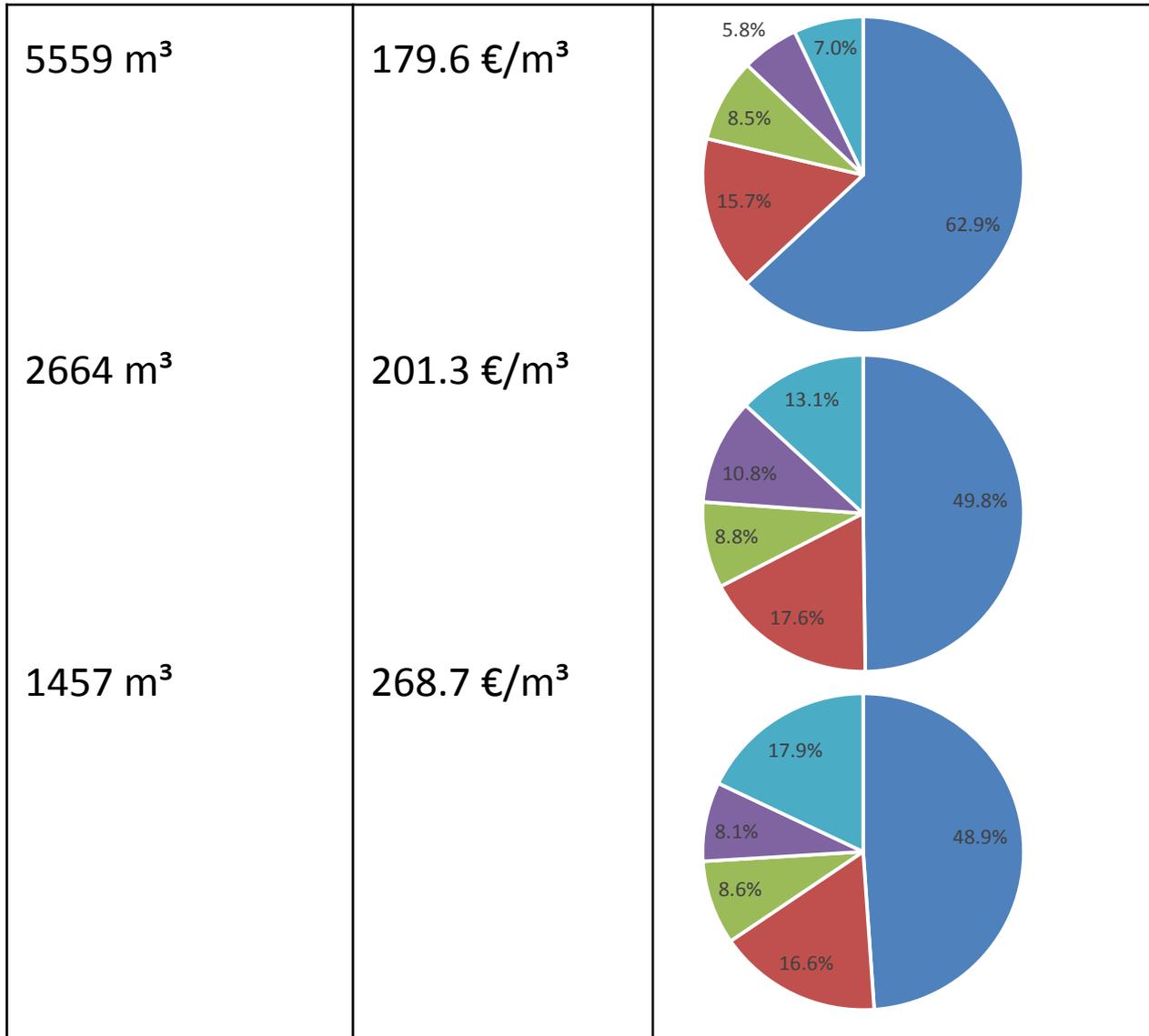


Beispiel unterirdische Zylinder

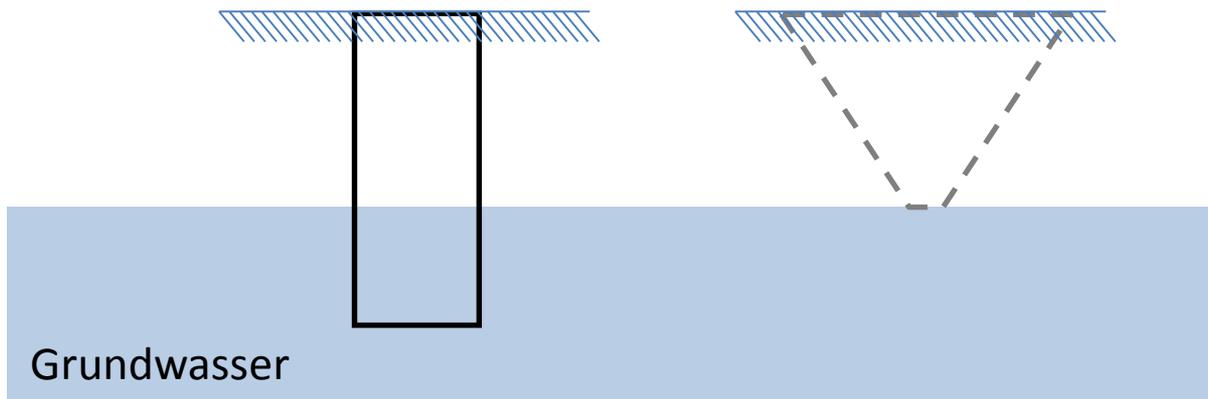
		1	2	3
Durchmesser	[m]	20	20	15
Höhe	[m]	20	10	10
davon unterhalb GW	[m]	10	0	0
V	[m ³]	5559	2664	1457
A/V	[1/m]	.330	.453	.541
h/d	[-]	1.0	.5	.6
Maßnahmen	Bohrpfahlwand	X	X	X
	U-W Beton	X		
	Aushub	X	X	X
	Abdichtung	X	X	X
	Wärmedämmung	X	X	X
	Abdeckung	X	X	X
c	[€/m ³]	179.6	201.3	268.7



Anteile Kosten



Erdecken-Wärmespeicher - Kegelstumpf



Erdecken-Wärmespeicher - Kegelstumpf

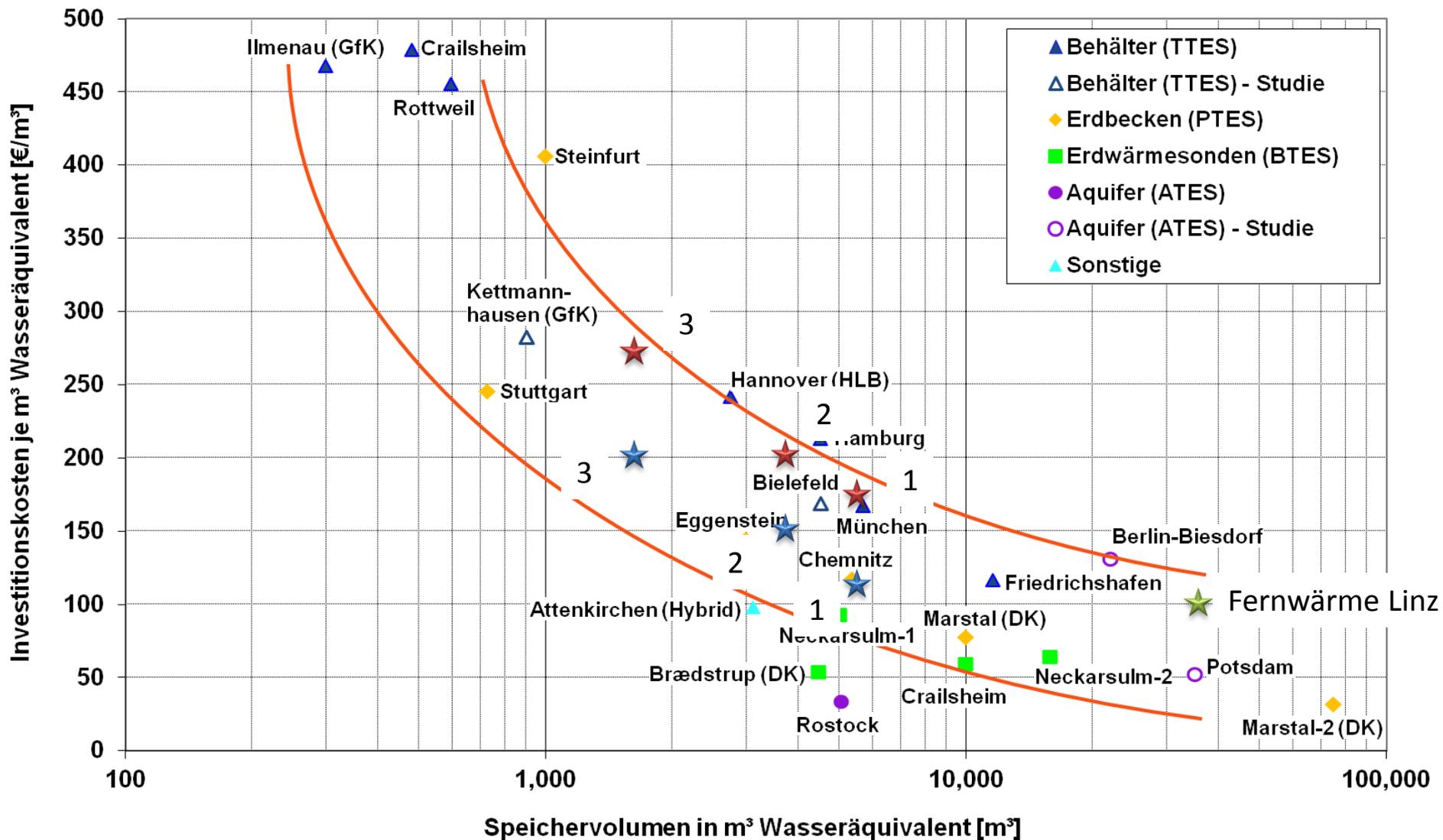
		1	2	3
Durchmesser	[m]	42.1	32.8	26.8
		10.2	0.9	1.9
	[°]	30	30	30
Höhe	[m]	10	10	8
davon unterhalb GW	[m]	0	0	0
V	[m ³]	5559	2664	1457
A/V	[1/m]	0.537	0.683	0.835
h/d	[-]	0.352	0.546	0.502
Maßnahmen	Baugrube	X	X	X
	Abdichtung (KDB)	X	X	X
	Wärmedämmung	X	X	X
	Abdeckung	X	X	X
c	[€/m ³]	114	152	200

Bewertung

- Investitions-Kosten
- Lebensdauer
- Speichernutzungsgrad
- Schichtung

Abhängig vom Betrieb!

		Spezifische Kosten / [€/m ³]		
		1	2	3
V	[m ³]	5559	2664	1457
	Zylinder	179.6	201.3	268.7
	Erdbecken	114	152	200



Bewertung

- Investitions-Kosten
- Lebensdauer
- Speichernutzungsgrad
- Schichtung

Abhängig vom Betrieb!

		Spezifische Kosten / [€/m ³]		
		1	2	3
V	[m ³]	5559	2664	1457
	Zylinder	179.6	201.3	268.7
	Erdbecken	114	152	200
	Erdb. ohne WD	92	123	163

Schlussfolgerung

- Konzepte für
 - hocheffizienten unterirdischen zylindrischen Wärmespeicher (Spezialtiefbau, freitragende Abdeckung bei kleineren Speichervolumina)
 - Kostengünstigen Erdbecken-Wärmespeicher (ungedämmt, schwimmende Abdeckung)
- Speicherkosten variieren stark mit der Geometrie (Kegelstumpf, Zylinder) und mit der geforderten Qualität der Hülle (Wärmedämmung) und der Art der Abdeckung (freitragend, schwimmend)
- Optimale Bauweise ist nur in Verbindung mit Systemsimulation ermittelbar