

Speicherverluste

Inhalt:

1. Die Rolle des Oberflächen/Volumen-Verhältnisses für Wärmeverluste aus Saisonspeichern
 2. Abschätzung der Wärmeverluste aus zylinderähnlichen Heliogaia-Saisonspeichern
-

1. Die Rolle des Oberflächen/Volumen-Verhältnisses für Wärmeverluste aus Saisonspeichern

Das Volumen eines kompakten Körpers (Kugel, Zylinder, Würfel...) wächst in dritter, die Oberfläche in zweiter Potenz mit der Abmessung, weil ersteres drei und die Fläche nur zwei Dimensionen hat.

Da ein Speicher

- die benötigte Wärme mittels seiner Masse im Volumen festlegt,
- die unerwünschten Verluste aber durch die Oberfläche an die Umgebung abgibt,

bedeutet das: Je größer der Speicher, desto geringer der anteilige Wärmeverlust.

Die folgende Übersicht demonstriert das zum Nachrechnen für die Würfelform:

Kantenlänge	Volumen	Oberfläche	Verhältnis
in m	in m³	in m²	in m²/m³
1	1	6	6
10	1000	600	0,6
100	1000000	60000	0,06

Tabelle 1: Das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen in Abhängigkeit von der Größe eines Körpers am Beispiel des Würfels

Die Oberfläche des Würfels bezogen auf einen Kubikmeter seines Inhaltes nimmt mit wachsender Kantenlänge ab. Das gilt auch für anders geformte kompakte Körper.

Die Zahlen der rechten Spalte sind also ein Maß für die Verluste eines Speichers in einer bestimmten Zeit: Verliert der Würfel mit

- 1m Kantenlänge in einer betrachteten Zeiteinheit **60%** seiner Wärme an die Umgebung, so sind es beim
- 10m- Würfel in dieser Zeit nur **6%** und beim
- 100m- Würfel sogar nur noch **0,6%** .

Natürlich ist das bekannt: Eine Tasse Tee kühlt sich innerhalb weniger Minuten deutlich ab, eine Badewanne voller Wasser braucht dafür einige Stunden, das Meer speichert die Wärme über Jahreszeiten hinweg.

Für das Abkühlverhalten spielen auch

- die genaue Form des Körpers,
- die Umgebungstemperatur und
- die Wärmeübertragungseigenschaften der Hülle eine wichtige Rolle.

Diese Dinge können aber bei entsprechender Kompaktheit mit zunehmender Größe immer mehr vernachlässigt werden.

Der Erdkörper selbst liefert ein interessantes Beispiel:

Das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen errechnet sich zu $0,000.000.471 \text{ m}^2/\text{m}^3$, also knapp ein halber Quadratmillimeter Oberfläche je Kubikmeter Inhalt.

Für den Abfluss der in einem ganzen Kubikmeter gespeicherten Wärmemenge steht nur ein halber Quadratmillimeter Durchtrittsfläche zur Verfügung.

Kein Wunder, dass das Innere der Erde noch immer heiß ist. Die geringen Verluste von ca. $0,06 \text{ W}$ pro m^2 werden durch die radioaktiven Zerfälle der überall in Spuren vorhandenen Urnuklide ausgeglichen (vor allem Uran und Thorium mit Halbwertszeiten von mehreren Milliarden Jahren). Das Innere der Erde blieb und bleibt noch lange warm. Man versucht daher, diese Wärme durch sehr tiefe Bohrungen auch für energetische Zwecke nutzbar zu machen – **Tiefen-Geothermie**.

Weil aber das Potential für unsere Besiedlungsdichten in ökonomisch sinnvoll realisierbaren Bohrtiefen zu gering ist und eine Erschöpfung der lokalen Vorräte absehbar wäre, soll dieses Thema unter Heliogaia nicht weiter verfolgt werden. Auch besteht bei derartigen Tiefbohrungen ein Erdbebenrisiko.

(Ein Erdwärmeprojekt hat 2017 im südkoreanischen Pohang ein Erdbeben der Stärke 5,5 ausgelöst, 135 Menschen werden verletzt, mehr als 57 000 Gebäude beschädigt, und es entsteht ein Sachschaden von umgerechnet über 260 Millionen Euro.

<https://www.spektrum.de/news/geothermie-erdwaerme-ist-womoeglich-nicht-ohne-erdbebenrisiko-zu-haben/1634696>)

Wegen des riesigen Bedarfs an Speichermasse muss der Erdboden dennoch eine entscheidende Rolle spielen. Oberflächennahe Schichten bergen keine Erdbebengefahr.

2. Abschätzung der Wärmeverluste aus zylinderähnlichen Heliogaia-Saisonspeichern

Für einen im Erdboden eingerichteten Speicherkörper ergeben sich folgende denkbare Verlustmöglichkeiten:

1. Wärmeleitung ins umgebende Erdreich
2. Wärmestrahlung nach oben, Wärmeleitung durch Deckschicht und Wärmeübergang zur Luft
3. Wärmestrahlung durch torusförmige Grundwasserkonvektion, thermisch bedingt
4. Wärmestrahlung durch horizontale Grundwasserströmung, geographisch/geologisch bedingt
5. Wärmestrahlung durch Niederschlagswasser
6. Wärmestrahlung durch Verdampfungswärme des verdunsteten und entwichenen Wassers
7. Wärmeabstrahlung nach oben

Bemerkung: Die Begriffe Wärmeleitung, Wärmestrahlung, Wärmeströmung (Konvektion) und Wärmeübergang sind gängig in Physik und Technik. „Wärmestrahlung“, bezeichnet allgemein den Verlust an Wärme.

zu 1., 2. und 3.: Hauptanteile der Verluste

Diese drei Beiträge verursachen den Hauptteil der Verluste und werden hier als erstes im Verbund betrachtet.

Sie wurden für Speicher in Zylinder-, Halbkugel- und Plattensymmetrie (*für großflächige, flache Ausdehnungen, wie in Szenario Berlin*) mit ausreichend übereinstimmenden Ergebnissen untersucht.

Veröffentlicht wird hier nur die Abschätzung für zylindersymmetrische Speicherformen, gerechnet in der Tabellenkalkulation *zylindermodell007.ods*

(erreichbar unter <https://heliogaia.de/tabellen.html>, Zylindermodell).

Diese Kalkulation und ihre Ergebnisse werden im Folgenden beschrieben.

Zur Konkretisierung kamen die voreingestellten Zahlen aus Szenario Cottbus zum Einsatz, dessen mit Schlitzwand und Abdeckung versehener Speicher am Beginn der Heizperiode bei etwa 80°C auf ungefähr 400 Millionen kWh geladen ist.

Dieser wassergesättigte Erdspeicher besteht aus ortstypischem Erdboden.

Die Rechnung erfolgt schrittweise, mittels einer gedachten Zerlegung des Speicherkörpers in riesige, dicht ineinandergesetzte zylindrische „Becher“ der Wandstärke 2m, oben mit der Erdoberfläche bündig abschließend. Die damit ermöglichte Rechnung ist genau genug für die hier benötigte Abschätzung. Die Schachtelung setzt sich auch in der Umgebung fort.

Bei einer annähernd zylindersymmetrischen Beladung des Speichers ist es gerechtfertigt, jeder dieser Schichten eine zeitabhängige einheitliche Temperatur zuzuordnen.

Die radial gelegene Koordinatenachse x hat ihren Nullpunkt am Speicherrand und schneidet die Zylinderachse bei -194 m.

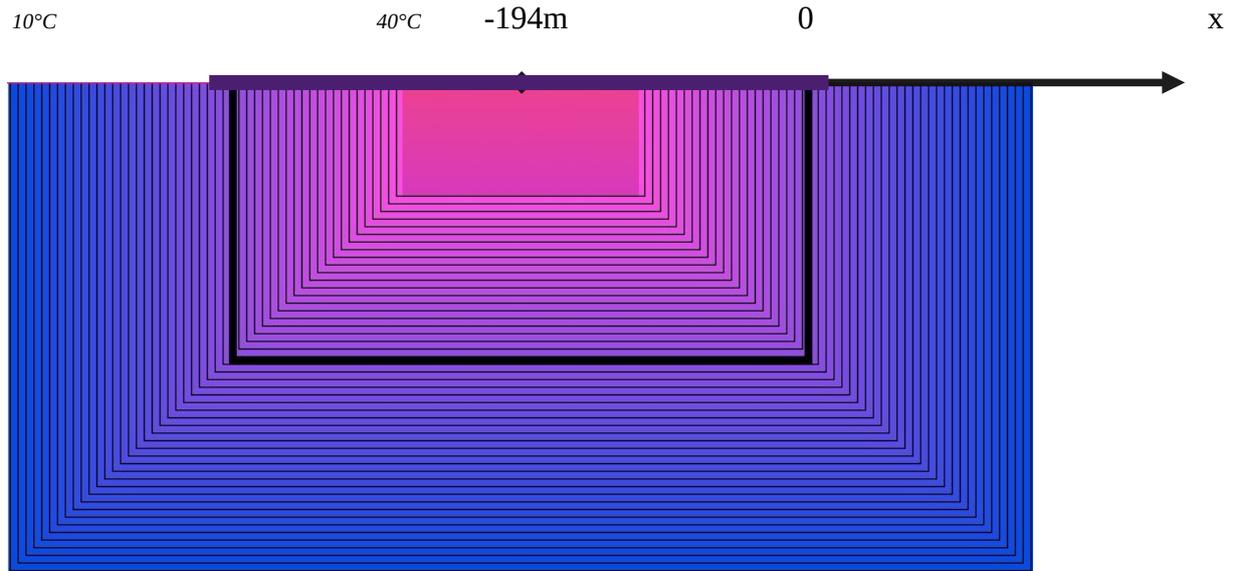


Bild 1: Querschnitt durch den entladenen zylinderförmigen Saisonspeicher und seine Umgebung. In Höhe der x-Achse befindet sich die Erdoberfläche. Im Zentrum befindet sich der nicht weiter gegliederte Kern. Die starke schwarze Linie stellt die Grenze dar zwischen innen und außen. Innen wird der Speicher durch Brunnen aktiv mit Wärme beladen und entladen, außen nicht.

*Zur numerischen Berechnung der Wärme- und Temperaturentbreitung ist der homogene Sedimentkörper in der Umgebung der Grenze in 2m dicke Hohlzylinderschichten gegliedert gedacht.
Zeichnung nicht maßstäblich*

Für eine übersichtliche Handhabung der Zahlen wurden in der Kalkulationstabelle fünf Blätter eingerichtet:

1. **e** Eingabe der Parameter (blau), Zwischenergebnisse (gelb), Endergebnisse (rot)
2. **t** Temperatur in Schicht *i* am Tag *j* (*i* Index für Spalten, *j* Index für Zeilen)
3. **w** bis Tag *j* aufsummierte Wärmezuflüsse
4. **vl** bis Tag *j* aufsummierte Wärmezuflüsse von oben aus der Atmosphäre
5. **gk** bis Tag *j* aufsummierte Verluste durch Grundwasserkonvektion

(Die kurzen Bezeichnungen der Tabellenblätter erleichtern das Lesen der Formeln.)

Nach Eingabe der Parameter gilt die Betrachtung in den Blättern **t** bis **gk** der Entwicklung von Temperatur und Wärmeinhalt der einzelnen Schichten, mit dem Ziel, daraus schließlich die Speicherverluste, also die Wärmeabflüsse über die „Speicher-Haut“ ermitteln zu können.

In diesen Blättern sind die zeitliche und die räumliche Abfolge dargestellt:

- Die Zeilen bilden in Tagesritten die zeitliche Entwicklung ab.
- Die Spalten bilden in 2m-Schritten das räumlichen Voranschreiten ab.

Der erste Tagesschritt beginnt zu Tag Null in **Zeile 13**,
der letzte nach drei Jahren zu Tag 1095 in **Zeile 1108**.

Die räumliche Darstellung beginnt in **Spalte J** mit einem nicht weiter gegliedert gedachten, auch zylinderförmigen Speicherkern. (Bild 1; Hier sind keine Randeefekte mehr zu erwarten.)

Die Werte der ersten und innersten Schicht, an den Kern anschließend, zeigt **Spalte K**, beginnend bei -40, endend bei -38; d.h. 40 m bis 38 m vom Rand aus.

Es gibt zwischen Kern und Rand 20 Schichten, erfasst in den **Spalten K bis AD**.

Spalte AE zeigt die Werte der ersten zum Außenbereich gehörenden Schicht, die nicht mehr aktiv geladen wird. Sie ragt 142 m tief in den Erdboden und hat einen Durchmesser von ca. 392 m.

Die letzte betrachtete (äußerste) Schicht gehört zu **Spalte BA**.

Sie liegt 44 m vom Speicherrand entfernt, hat 186 m Tiefe und einen Durchmesser von ca. 480 m.

In die Zeilen zu Tag Null sind jeweils die Startwerte eingetragen:

Tabellenblatt **t**: Temperatur im Speicher 40°C, außerhalb 10°C.

Tabellenblätter **w**, **vl** und **gk**: Die enthaltene Wärme wurde überall auf Bezugswert Null gesetzt.

Die Eintragungen für Tag Eins errechnen sich auf der Basis dieser Startwerte. Sie werden zu Tag Eins um 0:00 Uhr erreicht und den ganzen Tag über dann als unverändert angenommen.

Die Werte für Tag Zwei errechnen sich auf der Basis der Werte von Tag Eins. Sie werden zu Tag Zwei um 0:00 Uhr erreicht und diesen Tag über als unverändert angenommen u.s.w.

Getrennt berechnete Wärmeflüsse und aufgelaufene Wärmemengen in den Blättern **w**, **vl** und **gk**

Ein Wärmefluss entsteht z.B., wenn ein Volumenstück wegen einer erhöhten Temperatur T die Wärmemenge Q abgibt. Die Wärmeflussstärke $\Delta Q/\Delta t$ ist dann die Änderung Δ der Wärmemenge Q im betrachteten Volumenelement, bezogen auf die für diese Änderung benötigte Zeitspanne Δt . Man kann $\Delta Q/\Delta t$ auch als „Wärmeänderungsgeschwindigkeit“ betrachten.

Die Wärmeflussstärke wächst mit der Querschnittsfläche A , durch welche der Fluss hindurch strömt und das Temperaturgefälle $\Delta T/\Delta r$ (die auf die Strecke Δr bezogene Temperaturänderung ΔT).

In der Hohlzylinderschicht strömt die Wärme vorwiegend von innen nach außen, also in radialer Richtung. Daher bezeichnen wir die Strecke in Fließrichtung als Radiusänderung Δr . Die Durchtrittsfläche A ist der innere oder der äußere Teil der Oberfläche des 2m starken „Bechers“.

Weil auch dem durchflossenen Material durch seine Wärmeleitfähigkeit λ eine Rolle zukommt, entsteht die Beziehung: $\Delta Q/\Delta t = \lambda * A * \Delta T/\Delta r$

Grundsätzlich werden

- **Wärmezuflüsse positiv** und
- **Wärmeabflüsse negativ** gezählt,
*Verluste (wie in Blatt **gk**) umgekehrt.*

Wärmeflüsse sind Leistungen und werden in Watt (W) gemessen.

Multipliziert man mit der Zeit, die der Fluss angedauert hat, erhält man die eingeflossene Menge an Wärme, gemessen in Wh, kWh, MWh oder GWh.

Die Wärmezuflüsse in die Schichten berechnen sich also für jeden Tag auf der Grundlage

- der für jede Schicht in den Spalten von Blatt **t** eingetragenen Temperaturen des Vortages und
- der sonstigen äußeren Verhältnisse (A , λ , Δr).

Aus den Zu- bzw. Abflüssen im Laufe des Vortages und den bis zum Beginn des Vortages bereits eingelaufenen Wärmemengen ergeben sich die neuen Stände zu Beginn des aktuellen Tages. Die verschiedenen hier betrachteten Wärmestromarten werden unabhängig voneinander berechnet und separat dargestellt, jeweils in den Zellen der Tabellenblätter **w**, **vl** und **gk**.

Nach Zusammenführen (Addition) der drei aktuellen Wärmemengen-Stände aus diesen Blättern werden in **t** die neuen Temperaturen zu Beginn des aktuellen Tages ermittelt.

Aus den Summen der jährlich über die Speicherhaut abgeflossenen Wärmebeträge, zusammengeführt in den Spalten **I** (der Blätter **w** und **vl**) sowie der Konvektionsverluste in **AX** (Blatt **gk**), ergeben sich schließlich die Gesamtverluste, eingetragen ab **H24** in Blatt **e**.

Ergebnisse der Kalkulation zu den untersuchten Haupt-Verlustarten 1, 2 und 3 des Saisonspeichers aus Szenario Cottbus:

Verluste in den Erdboden	Jahr 1	29,94	GWh
Verluste in den Erdboden	Jahr 2	16,47	GWh
Verluste in den Erdboden	Jahr 3	14,57	GWh
Verluste nach oben	Jahr 1	10,70	GWh
Verluste nach oben	Jahr 2	11,73	GWh
Verluste nach oben	Jahr 3	12,75	GWh
Verluste durch Grundwasserkonvektion	Jahr 1	0,98	GWh
Verluste durch Grundwasserkonvektion	Jahr 2	1,76	GWh
Verluste durch Grundwasserkonvektion	Jahr 3	2,37	GWh
Summen	Jahr 1	41,62	GWh
Summen	Jahr 2	29,96	GWh
Summen	Jahr 3	29,70	GWh
errechneter relativer Verlust	Jahr 1	10,5	%
errechneter relativer Verlust	Jahr 2	7,6	%
errechneter relativer Verlust	Jahr 3	7,5	%

Die Kalkulation liefert auch Auskunft über die Entwicklung der Temperaturen am Speicherrand, hier z.B. in und um den Cottbuser Saisonspeicher im Laufe der ersten drei Jahre, gezeigt in den Spalten von Bild 2:

Jedes Teil-Diagramm gibt eine Darstellung der Temperaturen von 16 inneren und 15 äußeren 2m-Schichten, also etwa jeweils 30m nach innen und nach außen. Die 17. Schicht (rot) zählt schon zur Speicherumgebung und wird nicht mehr aktiv beheizt oder gekühlt.

Die Diagramme der ersten Zeile von Bild 2 zeigen Momentaufnahmen jeweils im Frühling, die der zweiten Zeile zu Johanni, die der dritten zum Herbst, die der vierten zu Weihnachten.

Zeilennummern beziehen sich auf die Rechentabelle und geben den jeweiligen Tag der Aufnahme an, Zeile 44 z.B. ist dem 21.4. des ersten Jahres zugeordnet.

Deutlich wird die sehr langsame Ausbreitung der Temperaturzunahme, in drei Jahren kaum über 30m hinaus.

In späteren Jahren werden die Wärmeleitungsverluste ins Erdreich durch die angestiegenen Umgebungstemperaturen kleiner. (Jahr 1: 30 GWh, Jahr 2: 16 GWh, Jahr 3: 15 GWh)

Weiterhin wird sichtbar, wie sich anscheinend der Speicher zum Ende der Heizperiode auch einen Teil der abgeflossenen Wärme zurückholen kann. Das ist unter 40 °C natürlich wenig realistisch. Die Delle entsteht, weil im Modell zur Heizperiode auch die äußeren Speicherschichten täglich mit dem gleichen volumenadäquaten Betrag entladen werden wie alle anderen, obwohl sie bereits verstärkt auch nach außen Wärme abgegeben hatten und in der Realität gar nicht mehr die erforderliche Temperatur liefern können. Diese Unstimmigkeit sollte toleriert werden, zumal man die äußersten Speicherschichten zu Beginn der Heizperiode verstärkt belasten könnte. Dadurch würden sie als erste entladen und so die Wärme wirklich teilweise zurückgeholt. Außerdem wäre dann das Temperaturgefälle verringert, wodurch die Verluste überhaupt erheblich sinken dürften.

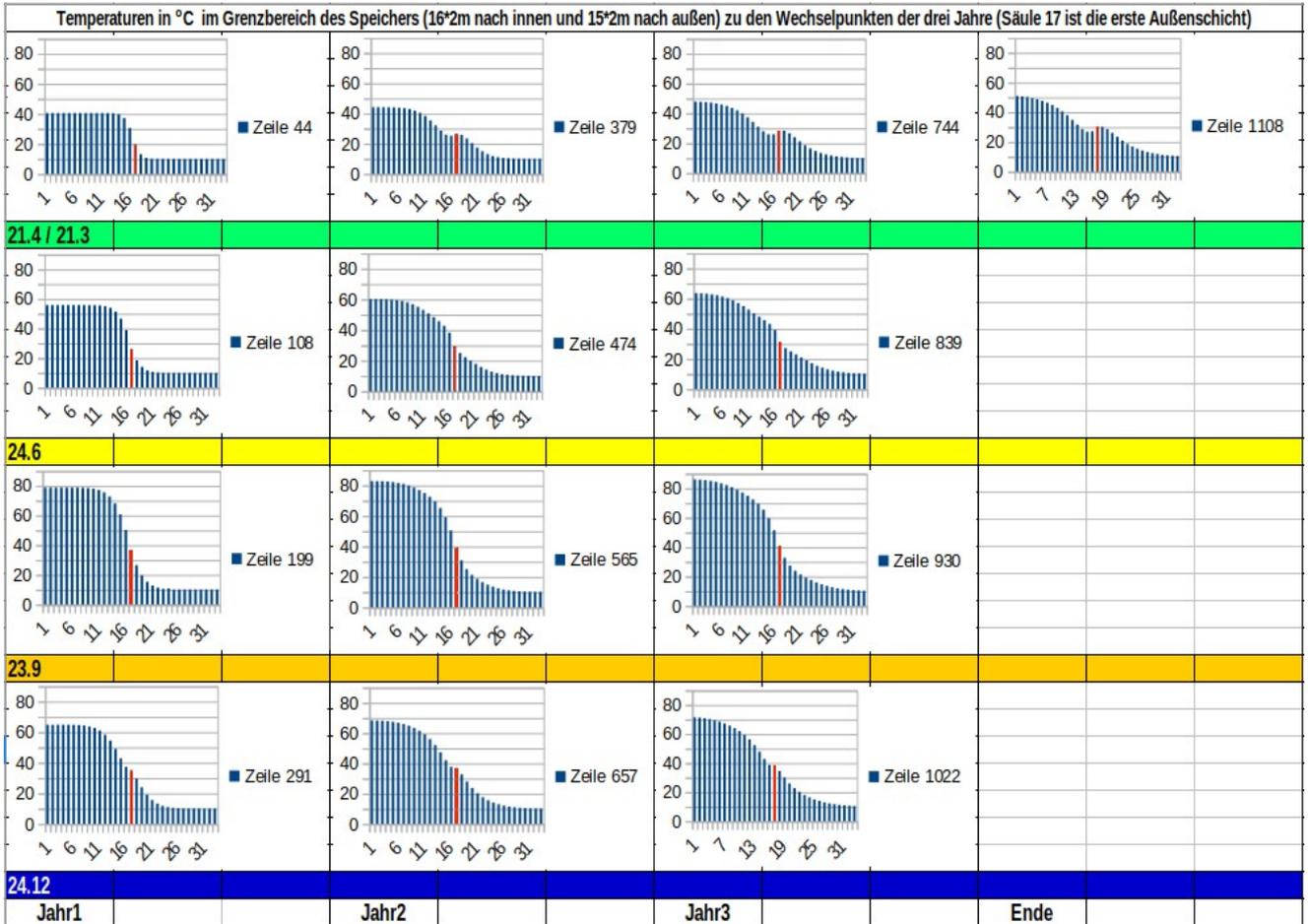


Bild 2: Temperaturentwicklung in der Grenzregion des Saisonspeichers Cottbus über 3 Jahre,
 Ordinate (senkrechte y-Achse): Temperatur in °C,
 Abszisse (waagerechte x-Achse): Ort in 2m-Schritten
 (Balken 17, rot, ist die erste Schicht außerhalb des Speichers)

zu 2. Wärmeleitung durch die Deckschicht und Wärmeübergang zur Luft

(nochmals ein Abschnitt hierzu, ausschließlich zu 2.)

Die Deckschicht besteht im Musterbeispiel von oben nach unten aus folgenden Teilen:

- 1m normal durchfeuchteter Füllboden/ Mutterboden
- Folie mit Verbiss-Schutz
- 2 m trockener sandiger Füllboden
- Folie mit Verbiss-Schutz

Die Dämmwirkung der Schicht über der oberen Folie und der Wärmeübergang zur Luft wurden wegen ihres geringen Einflusses nicht betrachtet. Diese Beiträge würden die Verluste noch etwas verringern.

Die Verluste infolge Wärmeleitung durch 2 m Abdeckung mit trockenem Sand hindurch betragen im 3. Jahr 12,75 GWh/a und in der pauschaleren Kontrollrechnung nach Tabelle *cottbus_rechentabelle* jährlich 12,1 GWh/a. Die erste Rechnung bezieht die Speicherumgebung bis 40 m mit ein, die zweite Rechnung nur bis zu 10 m.

Hier die Formel der Kontrollrechnung (Wärmeabfluss, Verlust als solcher wird hier positiv gezählt):

$$\frac{(D96+2 \cdot D52)^2 \cdot \pi \cdot D42 / D53 \cdot (D51 - D48)}{(D96+2 \cdot D52)^2 \cdot \pi \cdot D42 / D53 \cdot (D51 - D48)} \cdot 1000 \cdot 365 \cdot 24$$

D42
D53
(D51-D48)
1000
365*24

Wärmeübertragung nach oben in die Atmosphäre in kWh/a
 Speicherdeckfläche +10m Randüberlappung in m²
 in W*m/m²/K
 in m
 mittlere Temperaturdifferenz in K
 Umrechnung W nach kW
 Stunden pro Jahr in h/a

mit

D42	Wärmeleitwert, trockener sandiger Füllboden
D48	mehrfähig gemittelte Lufttemperatur
D51	Speichertemperatur Mittel
D52	Überlappung der Speicherabdeckung über den Rand
D53	Höhe der trockenen Füllbodenabdeckung
D96	Speicherdurchmesser

zu 3. Wärmeaustrag durch Grundwasserkonvektion, thermisch/geologisch bedingt

(nochmals ein Abschnitt hierzu, ausschließlich zu 3.)

Die Verluste durch Grundwasserkonvektion wurden in der Tabellenkalkulation *zylindermodell007* im zweiten Jahr zu 1,76 GWh und im Kontrollvergleich *cottbus_rechentabelle* nochmals auf pauschalere Weise zu 2,1 GWh ermittelt. Das sind rund 0,5% der Speicherladung.

Grundwasserkonvektion wird durch Temperaturunterschiede angetrieben und verläuft unabhängig von der durch Gefälle verursachten Grundwasserströmung, diese überlagernd. Die Dichtwand schützt das Innere des Speichers vor direkten Verlusten dieser beiden Arten.

Während in *zylindermodell007* die Umgebung schichtweise einzeln betrachtet wird, pauschalisiert der Kontrollvergleich noch mehr. Es wurde ein 30m- Ring um den Speicher mit aufsteigendem und die weitere Peripherie mit absteigendem Grundwasser bei gemittelter Temperatur in torusförmigem Kreislauf gedacht. Die entsprechenden Querschnitte, das strömungsaktive Porenvolumen und die temperaturbedingten Dichteunterschiede lassen über die Darcy-Gleichung eine Fließgeschwindigkeit und damit den Wärmetransport abschätzen.

Wegen Geringfügigkeit dieses Verlustbeitrages und der komplizierteren Rechnung wird hier auf die detaillierte Auseinandersetzung verzichtet.

zu 4. Wärmeaustrag durch Grundwasserströmung, horizontal, geologisch/geographisch bedingt

Verluste durch fließendes Grundwasser wurden in der Tabelle cottbus_rechentabelle zu 0,143 GWh/a ermittelt.

Horizontale Grundwasserströmung kann schon durch die Standortwahl sehr eingeschränkt werden. Man sucht ein Gebiet mit weit auseinander liegenden Grundwassergleichen und hat nur ein geringes Gefälle. Außerdem verhindert die Dichtwand das direkte Durchfließen des Speicherkörpers. Die angesetzte Oberflächen-Geschwindigkeit von 5 cm pro Tag betrifft also nur die Umgebung des Speichers. Die dort abgeführte Wärme verursacht dennoch zusätzliche Verluste, weil eine kühlere Umgebung die Wärmeableitung ins Erdreich beeinflusst.

Wie in Bild 2 sichtbar, muss man dazu die Umgebung bis etwa 30 m in Betracht ziehen.

Hier die Berechnungsformel aus cottbus_rechentabelle:

$$Q = \frac{(30 \cdot (D_{96} + 60) \cdot D_{44} + (60 \cdot D_{95}) \cdot (D_{43} + D_{44}) / 2) \cdot 365 \cdot D_{45} / 100 \cdot 1000 \cdot 4,2 \cdot 7,5 / 3600}{(30 \cdot (D_{96} + 60) \cdot D_{44} + (60 \cdot D_{95}) \cdot (D_{43} + D_{44}) / 2) \cdot 365 \cdot D_{45} / 100 \cdot 1000 \cdot 4,2 \cdot 7,5 / 3600}$$

mit

D95	Tiefe
D96	Durchmesser
D43	Geschwindigkeit oben
D44	Geschwindigkeit unten
D45	Porenvolumenanteil

Wärmeverlust Grundwasserfluss, in kWh
 Querschnitt mit >1K erhöhter Temperatur mal Geschwindigkeit, unten, m³/d
 Querschnitt mit >1K erhöhter Temperatur mal Geschwindigkeit, Seite, m³/d
 für 365 Tage
 Anteil Porenvolumen
 kg/m³
 spezifische Wärmekapazität von Wasser, kJ/kg/K
 mittlere Temperaturdifferenz, K
 1 kWh=3600 kJ

zu 5. Wärmeaustrag durch Niederschlagswasser

Größere Verluste durch Niederschlagswasser werden mittels wasserdichter Folie mit aufliegender Drainage unter der Füllboden-Abdeckung vermieden. Bei entsprechender Überlappung über den Speicherrand hinaus sind sie vernachlässigbar. Die über der oberen Folie von Niederschlagswasser ausgetragene Wärme muss die Abdeckung durchlaufen haben und wurde somit bereits in Punkt 2. erfasst.

zu 6. Wärmeaustrag durch Verdampfungswärme des verdunsteten und entwichenen Wassers

Verdunstungsverluste können erheblich sein, werden aber durch den Einbau der dampf- und wasserdichten Folien verhindert, welche die den Speicher abdeckende trockene Sandschicht einschließen. Der durch Verdunstung entstandene Wasserdampf kondensiert noch im Speicherinneren wieder, die Wärme bleibt erhalten. Auch an den Rändern ist der Effekt gering, wenn die umgebende tonhaltige Dichtwand feucht und dadurch weitgehend dampfdicht an die untere Folie anschließt.

zu 7. Wärmeabstrahlung nach oben

Strahlungsverluste treten an der Deckfläche des Speichers zur Luft hin auf, wenn deren Temperatur höher ist als die Lufttemperatur. Dort kommt aber nur der Betrag Wärme an, der durch die Deckschicht laut Rechnung hindurch gelassen wird. Dieser Verlust ist somit bereits berücksichtigt.

Gesamtbilanz:

Betrachtet werden nur die Verlustbeiträge für den eingelaufenen Zustand, etwa nach drei Jahren. Die meisten Beträge wurden einzeln und unabhängig voneinander ermittelt, obwohl Wärme an einer Stelle eigentlich nur einmal verschwinden kann. So kann sie aus der Speicherumgebung entweder durch Grundwasserfluss oder durch Grundwasserkonvektion verloren gehen. Weil viele Einzelbeiträge aber nur klein ausfallen, bilden wir einfach ihre Summe. Dadurch sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass die hier abgeschätzten Verluste in der Realität überschritten werden.

1. Wärmeleitung ins umgebende Erdreich, 3. Jahr	14,57	GWh
2. Wärmeübertragung nach oben in die Atmosphäre, 3. Jahr	12,75	GWh
3. Grundwasserkonvektion, thermisch/geologisch bedingt, 3. Jahr	2,37	GWh
4. Grundwasserströmung, horizontal, geologisch/geographisch bedingt	0,14	GWh
5. Niederschlagswasser	0	GWh
6. Verdampfungswärme durch Austrag verdunstenden Wassers	0	GWh
7. Wärmeabstrahlung nach oben	0	GWh
Summe	29,83	GWh
Speicherladung	394	GWh
Verlustanteil	7,6	%

Erhebliche Verlustabsenkung bewirkt die bereits erwähnte kluge Führung der Wärmeverteilung im Speicher, so dass 5% in der Realität wahrscheinlich noch deutlich unterschritten werden können.

Eine gesonderte Untersuchung zu Verlusten aus Heliogaia-Saisonspeichern in Abhängigkeit von der Abnehmerzahl bzw. Größe ergab eine Funktion mit der Gleichung

$$y = \frac{40,71}{x^{0,516}} + 4,893$$

Darin sind x die Abnehmerzahl in Tausend und y die Summe der Speicherverluste zum Jahresabschluss in Prozent. Aus ihrer Grafik (Bild 3) kann man z.B. ablesen, dass die Speicherverluste ab etwa 55.000 Anschlüssen unter 10 % sinken. **Sie liefert das entscheidende Argument für die unter Heliogaia favorisierten XXL- Speicher.** Verwendet wurden die Kalkulation *zylindermodell007* und andere bei Variation der entsprechenden Parameter und einer gesetzten Tiefenbegrenzung auf 140 m. Ohne Tiefenbegrenzung werden bessere Werte erreicht.

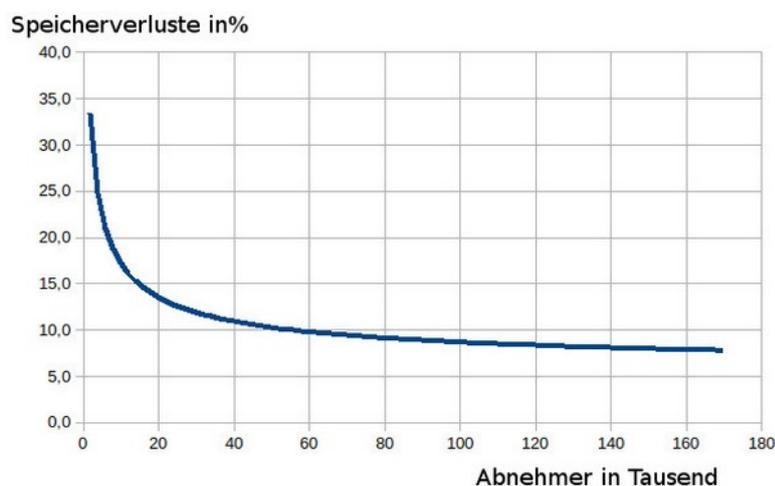


Bild 3: Verluste aus zylinderförmigen Heliogaia- Saisonspeichern in Abhängigkeit von der Abnehmerzahl, Tiefenbegrenzung 140m