

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 es 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 Volumens 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 Faktoren 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 $0,000000471 \text{ m}^2/\text{m}^3$, 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-womoglich-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 vorab 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 die Abschätzung für zylindersymmetrische Speicherformen, gerechnet in der Tabellenkalkulation *zylindermodell007.ods* (erreichbar unter Home, Tabellen, Zylindermodell). Diese Kalkulation und ihre Ergebnisse werden im Folgenden beschrieben.

(Zu Kontrollzwecken enthalten auch die Tabellen zu den einzelnen Szenarien teilweise davon unabhängige Rechnungen)

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.

(Parameter, gerundet: Einwohnerzahl 100.000; Speichervolumen 17 Millionen m³, Speicher-Durchmesser 400 m, Speicher-Tiefe 140m, ...)

Die Rechnung erfolgt in Anlehnung an die „Methode der finiten Elemente (FEM)“, d.h. numerisch, schrittweise. Das ist nicht genau, genügt aber für die hier nötige Abschätzung, zumal die Verhältnisse zur Sicherheit so angesetzt wurden, dass **die berechneten Verluste größer** sein müssen **als die erwarteten**.

Der wassergesättigte Erdspeicher besteht aus ortstypischem Sediment, mit Ausnahme der als Mantel umgebenden grundwasserdichten Schlitzwand und der wärmedämmenden Trockensand-Abdeckung.

Zur Trennung von innen und außen wird um das Speichervolumen herum eine Haut definiert.

Der Speicherkörper und seine Umgebung werden für die Berechnung in 2m dicke Hohlzylinderschichten gegliedert gedacht, jede mit zugehöriger runder Grundplatte, aber alle bündig mit der Erdoberfläche abschließend. Man kann sich riesige, lückenlos ineinander gesetzte zylindrische Becher der Wanddicke 2m vorstellen. Bei einer annähernd zylindersymmetrischen, zentral und von oben her geschichteten Beladung des Speichers ist es gerechtfertigt, jedem dieser Elemente eine zwar zeitabhängige, aber räumlich einheitliche gleiche Temperatur zuzuordnen.

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

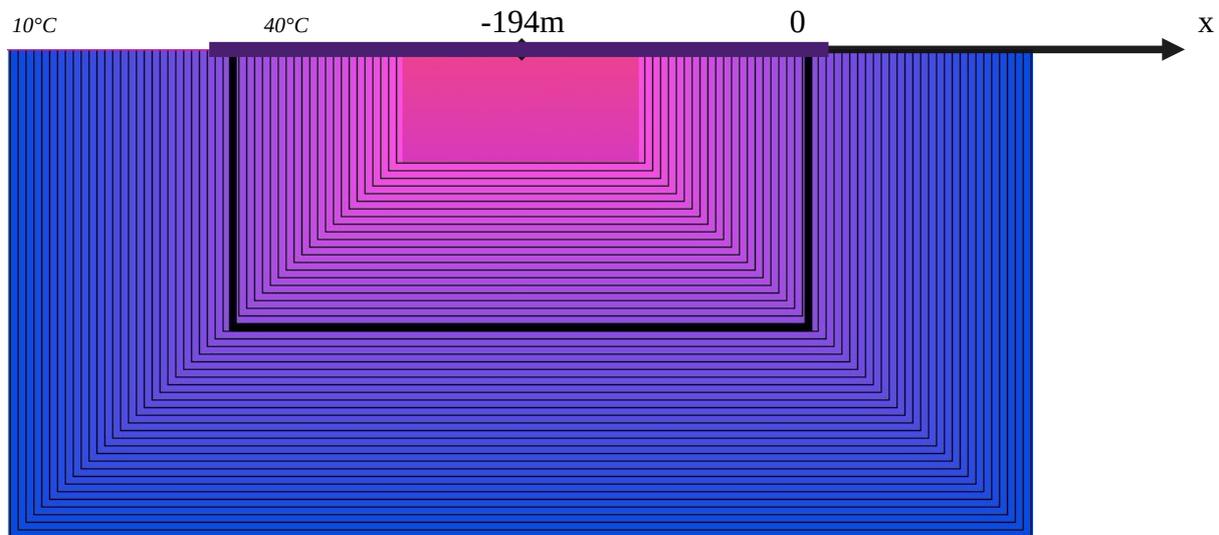


Bild 1: Querschnitt durch einen (im April entladenen, im Erdreich definierten) zylinderförmigen Saisonspeicher und seine Umgebung. In Höhe der x -Achse befindet sich die Erdoberfläche. Im Zentrum befindet sich der nicht weiter gegliederte Kern. Die starke schwarze Linie stellt die Grenze dar zwischen 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 Kalkulation *zylindermodell007.ods* fünf Tabellenblätter 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 dato aufsummierte (*kumulierte*)Wärmezuflüsse aus Wärmenetz und Nachbarschichten
4. **vl** kumulierte Wärmezuflüsse von oben aus der Atmosphäre (*Verluste sind hier negativ dargestellt*)
5. **gk** kumulierte Verluste durch Grundwasserkonvektion (*Verluste sind hier positiv dargestellt*)

(Kurze 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 „Haut“ ermitteln zu können.

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

- Zeilen bilden in Tagesritten die zeitliche Entwicklung ab.
- 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 Randeffekte mehr zu erwarten.)

Die Werte der ersten und innersten 2m starken Hohlzylinder-Schicht, an den Kern anschließend, zeigt **Spalte K**, beginnend bei -40, endend bei -38; d.h. 40 m bis 38 m vom Rand aus, innerhalb des Speichers.

Es gibt zwischen Kern und Rand 20 Schichten zu je 2m, erfasst in den **Spalten K bis AD**.

Spalte AE zeigt die Werte der ersten zum Außenbereich gehörenden Hohlzylinder-Schicht, die nicht mehr aktiv be- oder entladen wird.

Jene 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.
(Die Grenzen lassen sich zu ausgedehnteren Untersuchungen mit einigem Aufwand verschieben.)

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 diesen 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**

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

In der hier als Volumenelement gedachten 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 entsprechende Teil der Oberfläche des 2m starken Hohlzylinders.

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,
*es sei denn, ein Blatt erfasst ausdrücklich die Verluste (wie Blatt **gk**), so ist (nur an dieser Stelle) alles umgekehrt.*

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

Multipliziert man mit der Zeit in Stunden (h), 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 Wärmeströme 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 betrachteten Verluste, eingetragen ab **H24** in Blatt **e**.

Durch versuchsweises Verkleinern und Vergrößern der räumlichen und zeitlichen Schrittweiten und auch durch weitere Modelle ergab sich ein Bild der Genauigkeit dieser Methode. Die letztlich gewählten festen Schrittweiten und das Zylindermodell sind hinlänglich genau bei vertretbarem Rechenaufwand.

* * *

Der folgende Textabschnitt wendet sich an Leser, die tiefer in die zu 1., 2. und 3. durchgeführten Berechnungen eintreten wollen. Er kann aber auch ohne Verständnisverlust übersprungen werden. Dann weiter auf Seite 12 nach * * *

Jedes finite Element besteht aus einer Schicht, aus dem Verbund einer runden, 2m dicken Bodenplatte mit einem darauf stehenden, 2m starken Mantelteil eines Zylinders. Der Mitte jeder Schicht wird jeweils per Definition die gesamte enthaltene Wärmeladung und die über den Tag hin konstant angenommene Temperatur zugeordnet.

Wärmeströme, Wärmeleistungen

Jede Schicht kann am Tage j infolge der verschiedenen möglichen Wärmeströme in Summe eine bestimmte Wärmemenge aufnehmen oder abgeben. Positive Werte zeigen Zustrom, negative Werte zeigen Abstrom.

Sie werden in drei Teilen (**w**, **vl** und **gk**) separat erfasst und gelangen auf folgenden Wegen in die Schichten:

w

- von innen, über die innere Hohlzylinder-Mantelfläche und die obere Fläche der Bodenplatte
- von außen, über die äußere Hohlzylinder-Mantelfläche und die untere Fläche der Bodenplatte
- aus dem Kollektorfeld bzw. Wärmenetz über die Brunnenbohrungen (nur innerhalb der „Haut“)

vl

- von oben, aus der Luft, über eine ringförmige Fläche der Abdeckung

gk

- durch Grundwasserkonvektion, mit Dichtwand nur außerhalb des Speichers

Dazu jeweils eine Bemerkung:

von innen, von außen

Existieren zwischen benachbarten Zylinderschichten Temperaturdifferenzen ΔT , so kommt es über die Grenzflächen des Flächeninhaltes A und die Distanzen $\Delta r=2m$ von Mitte zu Mitte der Schichten zu einer Wärmestromstärke, Wärmeflussstärke $\Delta Q/\Delta t$:

(Es wird in dieser Näherung gesetzt, dass Temperaturen im Tageslauf konstant bleiben.)

$$\Delta Q/\Delta t = \lambda * A * \Delta T / \Delta r$$

oder

$$\Delta Q/\Delta t = \Delta T / R_{th} \quad (\text{analog zum Ohmschen Gesetz } I=U/R; \text{ hier mit } 1/R_{th} = \lambda * A / \Delta r \text{ bzw. } R_{th} = \Delta r / \lambda / A)$$

- mit R_{th} als Wärmewiderstand, welcher mit der durchlaufenen Distanz Δr wächst (hier 2m) und mit der Vergrößerung der Durchtrittsfläche A sowie mit steigendem Wärmeleitvermögen λ kleiner wird; (analog zum elektrischen Widerstand: $R=l/\kappa/A$, Länge / elektrische Leitfähigkeit / Querschnittsfläche)
- mit ΔT als Temperaturdifferenz zwischen den Austauschpartnern
- mit $\Delta Q/\Delta t$ als Wärmeflussstärke (Leistung) und damit auch Änderungsgeschwindigkeit des Wärmehaltes der am Vorgang beteiligten Schichten in Watt.

Diese Beiträge werden zusammen mit den Zuläufen aus Kollektoren bzw. Wärmenetz in Blatt w erfasst, letztere aufgeteilt auf die Schichten gemäß ihres prozentualen Anteils am Speichergesamtvolumen.

von oben, aus der Luft

Dieser Wärmestrom berechnet sich auf analoge Weise aus der Temperaturdifferenz zwischen der Außenluft und der aktuellen Schicht (3 m tief unter der Abdeckung im Speicher), geteilt durch den entsprechenden Wärmewiderstand, der sich durch die 2 m dicke Aufschüttung trockenen Füllbodens ergibt, bzw. außerhalb der Abdeckung durch (festgesetzt) 3 m normal durchfeuchteten Boden. In Blatt **vl** erfasst.

durch Grundwasserkonvektion

Dieser Teil berechnet sich aus der temperaturbedingten Dichtedifferenz zwischen aktueller Schicht und kalter Umgebung als Antrieb einerseits und den Bodenverhältnissen und Querschnittsflächen andererseits. In Blatt **gk** erfasst.

Wärmeinhalte, Temperaturen

Der tägliche Wärmezuwachs ergibt sich aus der Wärmeleistung vom Vortag, multipliziert mit 24h. Zusammen mit den seit Tag Null bereits eingesammelten Wärme-Beträgen (notiert jeweils in den Zeilen zum Vortag) ergeben sich die aktuellen Wärmestände (notiert in den Zeilen zum aktuellen Tag), separiert für die drei Teile **w**, **vl** und **gk**.

In Blatt **t** wird für jede Schicht aus der bis dahin eingesammelten Gesamtwärme Q (Summe der drei Teile), der zugehörigen Kapazität C und der Temperatur T_0 des Starttages die Temperatur T_j für den aktuellen Tag errechnet:

$Q = Q_w + Q_{vl} - Q_{gk}$ Der aktuelle Wärmeinhalt der Schicht bezüglich Startwert 0 ergibt sich als Summe der drei Teile

$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$ Grundgleichung der Wärmelehre,
 Q steht für die enthaltene, seit Tag Null von der Schicht eingesammelte Wärme,
mit Masse m , [spezifische Wärmekapazität \$c\$](#) , Temperaturdifferenz zum Starttag $\Delta T = T_j - T_0$

$Q = V \cdot m/V \cdot c \cdot \Delta T$ Erweitert mit Volumen V
 $Q = V \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T$ mit Dichte $\rho = m/V$
 $Q = V \cdot s \cdot \Delta T$ mit Wärmespeicherzahl $s = \rho \cdot c$; $s = 0,611 \text{ kWh/m}^3/\text{K}$ (gesetzt für [Erdboden](#), $1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$)
 $Q = C \cdot \Delta T$ bzw. mit Kapazität C als Wärmespeichervermögen in kWh/K ; $C = V \cdot s$

$\Delta T = Q/C$
 $T_j = T_0 + \Delta T$ aktuelle Temperatur am Tag j , mit $\Delta T = T_j - T_0$

also: $T_j = T_0 + (Q_w + Q_{vl} - Q_{gk})/C$

Die aktuelle Temperatur T_j am Tag j ergibt sich aus der Anfangstemperatur T_0 plus der Temperaturerhöhung, die sich durch die bis dahin eingesammelte Wärme $Q_w + Q_{vl} - Q_{gk}$ errechnet. C vermittelt, welche Wärmemenge das durch C charakterisierte Volumenelement pro Grad Temperaturerhöhung aufnehmen kann, in kWh/K . Dem entsprechend lässt sich die Temperaturerhöhung $(Q_w + Q_{vl} - Q_{gk})/C$ berechnen, wenn der Wärmezufluss $Q_w + Q_{vl} - Q_{gk}$ bekannt ist.

Struktur und Inhalt der analog zueinander gestalteten Blätter t bis gk

Tabellenfeld

Die Zellen des inneren Tabellenfeldes der entsprechenden Blätter enthalten jeweils:

- t** die für diesen Tag in der Mitte der Schicht konstant angenommene Temperatur in °C
- w** den bis Beginn des aktuellen Tages in der aktuellen Schicht eingelaufenen Wärmehalt (bezüglich Tag Null) in MWh
- vl** den bis Beginn des aktuellen Tages in der aktuellen Schicht aus der Luft empfangenen Wärmegewinn (Verlust negativ) in MWh
- gk** den bis Beginn des aktuellen Tages in der aktuellen Schicht aufgelaufenen Verlust durch Grundwasserkonvektion in kWh
(Da die Zellenhalte hier als „Verluste“ bezeichnet sind, werden sie positiv dargestellt, zum Schluss natürlich dann abgezogen)

Tabellenvorspalten

Für jeden Tagesschritt werden in den Vorspalten A bis I der Tabelle folgende Größen berechnet und eingetragen:

- A Datum
- B Index j
- C Zeit; Nummer des Tages
- D Lufttemperatur; nach einer Sinusfunktion aus den Eingabeparametern über die Tage des Jahres verteilt
- E Verbrauch in GWh; Wärmeverbrauch der Stadt; mit Sinusfunktion aus den Eingabeparametern über die Tage des Jahres verteilt
- F Gewinn in GWh; Kollektorgewinn; mit Sinusfunktion aus den Eingabeparametern über die Tage des Jahres verteilt
- G Direktversorgung in GWh; =WENN((F15-E15)<0;F15;E15); Heizung aus den Kollektoren, am Speicher vorbei
- H Speicher laden in GWh; =F15-E15
- I Speicherverlust bis Datum in GWh; z.B. in w =SUMME(AE15:AW15)/1000000

Bemerkungen: Betrachtet wird Zeile 15, also der 23. März.; Alle Verluste werden einzeln betrachtet und anschließend summiert, obwohl sie sich mitunter gegenseitig einschränken. Das vereinfacht die Schätzung und erhöht ihre Sicherheit.

- zu G: ist an diesem Tag 15 der Gewinn F15 kleiner als der Verbrauch E15 (Bedingung erfüllt), geht der gesamte Gewinn F15 in den Sofortverbrauch, ansonsten wird vom Gewinn nur der nötige Teil verbraucht, also der Verbrauch E15,
- zu H: die Differenz wird gespeichert (positives Vorzeichen) oder entladen (negatives Vorzeichen)
- zu I: in w: Summe aller in w erfassten Wärmezuflüsse zu Schichten außerhalb des Speichers; AE ist die erste äußere Schicht, AW in 36 m Entfernung vom Speicherrand die letzte mit merkbarer Temperaturerhöhung nach drei Jahren (+0,3 Grad)
- zu I: in vl: Summe aller in vl erfassten Wärmezuflüsse zu den Schichten innerhalb und bis 20m außerhalb des Speichers;
- zu I: in gk: Summe aller in gk erfassten Wärmeverluste in den Schichten außerhalb des Speichers; AE ist die erste äußere Schicht, AT (in 30 m Entfernung vom Speicherrand) die letzte mit merkbarem Konvektionsverlust nach drei Jahren

Tabellenkopf

Für jede Schicht (Spalte i) wird vorab ausgerechnet und zur weiteren Verwendung in den Tabellenkopf (Zeilen 3 bis 9) eingetragen:

- 3 Ort der Innenfläche der Schicht in m, ab Speicherrand, negative Werte bezeichnen den Innenbereich des Speichers
- 4 Wärmewiderstand der Schicht R_{th} in K/W, gerechnet von Mitte der inneren Nachbar-Schicht bis Mitte der betrachteten Schicht
- 5 Kapazität der Schicht C in kWh/K; Wärmefähigkeit pro Kelvin Temperaturdifferenz
- 6 Anteil der Schicht am gesamten Speichervolumen in %
- 7 Volumen der Schicht V in m³
- 8 Größe des zur Schicht gehörenden ringförmigen Teils der Deckfläche, nach oben zur Luft in m²
- 9 Wärmewiderstand nach oben zur Luft in K/W

Bemerkungen:

- zu 4: $R_{th} = \Delta r / \lambda / A$; mit Schalendicke $\Delta r = 2m$, Schaleninnenfläche A , Wärmeleitfähigkeit des Erdkörpers $\lambda = 2,7 \text{ W/m/K}$
- zu 5: $C = V * s$; mit V als Volumen der Schicht und $s = 0,611 \text{ kWh/m}^3/\text{K}$ als Wärmespeicherzahl des Erdbodens
- zu 9: außerhalb der Abdeckung werden 3m normal durchfeuchteter Boden als „Dämmschicht“ angesetzt

Erläuterung einiger Musterformeln

Als erstes Muster sei die Formel einer willkürlich herausgegriffenen Beispielszelle **N17** aus Tabellenblatt **w** der Tabelle *zylindermodell007.ods* (rot markiert) erläutert.

Die Zelle zeigt den Teil-Wärmeinhalt von -53 MWh in der zugehörigen Schicht.

Es handelt sich um die 2m starke Schicht zwischen Meter 32 und Meter 34 vom Rand entfernt im Inneren des Speichers (Spalte **N**) zu 0:00 Uhr des 25.03. (Zeile **17**), und darin eben Teil **w**.

Gezeigt wird die Summe aller bisher gespeicherten Wärmeladungen

- aus dem Fernwärmenetz und
- aus Wärmeströmen zwischen benachbarten Schichten.

Dieses Teilvolumen wurde durch den Überhang an Wärmebedarf gegenüber dem Kollektorgewinn vier Tage hintereinander entladen. Die Temperaturabnahme ist noch unter 0,5 K und wird in t bei der eingestellten Rundung auf volle Grad noch nicht sichtbar. Der ganze Speicher kann pro K Temperaturänderung ca. 10 Millionen kWh Wärme abgeben, bisher waren es nur ca. 2,4 Millionen kWh =2,4GWh (siehe Spalte t.H13 bis t.H16 und Zelle e.H18).

Die in **w.N17** eingetragene Formel heißt:

```
=N16+$H16*10*N6+((t.M16-t.N16)/N4+(t.O16-t.N16)/O4)/1000000*24
```

Das Dollarzeichen \$ markiert die Bereiche (Tabellenblattbezeichnung, Spaltenbuchstaben, Zeilennummern), die beim automatischen Ausfüllen der Tabelle (Weiterziehen) konstant gehalten werden sollen, haben also auf die Rechnung in den Zellen keinen Einfluss.

```
=N16 +H16*10*N6 +((t.M16 - t.N16)/N4 +(t.O16 - t.N16)/O4)/1000000*24
```

Alles bezieht sich zeitlich auf den Vortag (Zeile **16**), d.h., der Stand zu 0:00 Uhr des aktuellen Tages wird aus den Daten des Vortages errechnet.

Die einzelnen Summanden können je nach der geklammerten Differenz oder dem Vorzeichen in **H16** positiv sein (Wärmeaufnahme) oder negativ (Wärmeabgabe); Sie bedeuten:

| | |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| N16 | Wärmeinhalt der Schicht N in MWh am Vortag (24.03. , 0:00 Uhr, Zeile 16) |
| +H16*10*N6 | Vortagesration an Wärme für Schicht N aus dem Kollektorfeld oder dem Fernwärmenetz in MWh |
| +((t.M16 -t.N16)/N4 | Wärmestrom aus der nächstinneren Schicht M in Watt, mit Temperaturen vom Vortag |
| +(t.O16 -t.N16)/O4)) | Wärmestrom aus der nächstäußeren Schicht O in Watt, mit Temperaturen vom Vortag |
| /1000000*24 | Umrechnung der äußeren Klammer von W in MWh, tägliche 24-Stunden-Bilanz |

mit

| | |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| H16 | Tagesration Wärme in GWh aus Wärmenetz vom Vortag (24.3.), „Speicherladen“ -0,5GWh, Spalte H |
| 10=1000/100 | entsteht bei der Umrechnung von GWh in MWh (1000) und Prozent von N6, was 1/100 bedeutet |
| N6 | Volumenanteil in % der Schicht N bezüglich des gesamten Speichervolumens, Zeile 6 |
| t.M16 | Temperatur der innen angrenzenden Schicht M (t. markiert, dass M16 aus Blatt t geholt wird) |
| t.N16 | Temperatur der betrachteten Schicht N |
| t.O16 | Temperatur der außen angrenzenden Schicht O |
| N4 | Wärmewiderstand in K/W, Schicht N, Zeile 4, näherungsweise von Mitte M zu Mitte N über Innenfläche von N |
| O4 | Wärmewiderstand in K/W, Schicht O, Zeile 4, näherungsweise von Mitte N zu Mitte O über Innenfläche von O |

--.--.--

Zweites Muster sei die Formel in der parallelen Beispielzelle **N17** aus Tabellenblatt **vl**. Die Zelle zeigt den Teil-Wärmeinhalt von -1 MWh in der zugehörigen Schicht. Es handelt sich um die gleiche 2m starke Schicht zwischen Meter 32 und Meter 34 vom Rand entfernt im Inneren des Speichers (Spalte **N**) zu 0:00 Uhr des 25.03. (Zeile **17**), und darin den in **vl** betrachteten Teil, also die Teil-Ladung an Wärme aus der Luft.

Die Schicht hat infolge des Temperaturgefälles von ca. 35 K in vier Tagen etwa 1 MWh durch die Trockensandabdeckung nach oben verloren.

Die in **vl.N17** eingetragene Formel heißt:

$$=N16+(\$D16-\$t.N16)/N\$9/1000000*24$$

Aufbauend auf dem Vortagesstand **N16**, wird nach Ermittlung der hier negativen Zuflüsse $((D16-t.N16)/N9)/1000000*24$ der neue Stand errechnet.

mit

| | |
|-------------|-----------------------------------------------------|
| D16 | Temperatur der Außenluft am Vortag |
| t.N16 | Temperatur der untersuchten Schicht am Vortag |
| N9 | Wärmewiderstand der Schicht nach oben |
| /1000000*24 | Umrechnung von W in MWh, tägliche 24-Stunden-Bilanz |

Hier könnte man einwenden, dass bei Schichtung der Temperaturen, im oberen Bereich des Speichers von Mai bis Oktober, also halbjährig 80°C, in der restlichen Zeit zwischen 80 und 40, also im Mittel 60°C anliegen, was zu einem Jahresmittel von 70°C führt. Rechnet man *zylindermodell007.ods* damit und nicht mit der angesetzten tagesaktuellen Temperatur der Schicht **t.N16**, so ergibt sich für das dritte Jahr ein Gesamtverlust von 7,8%. Der Vergleich mit 7,5% im hier realisierten Ansatz zeigt nur geringfügige Abweichung. In die Richtung zu niedrigeren Verlusten an die Atmosphäre wirkt zudem die Tatsache, dass auch die obersten internen Bodenschichten unter der Folie zur Dämmwirkung beitragen, so dass der hier realisierte Ansatz gerechtfertigt erscheint.

--- --

Drittes Muster sei die Formel in der parallelen Beispielzelle **N17** aus Tabellenblatt **t**. Die Zelle zeigt die Temperatur in der gleichen 2m starken Schicht zwischen Meter 32 und Meter 34 vom Rand entfernt im Inneren des Speichers (Spalte **N**) zu 0:00 Uhr des 25.03. (Zeile **17**), errechnet aus den beiden in den Zellen **w.N17** und **vl.N17** aufgelaufenen, aus den Werten des Vortages berechneten Wärmemengen. Zelle **gk.N17** kann noch keinen Beitrag liefern, weil innerhalb der Haut die Grundwasser-Konvektionsverluste mittels Dichtwand verhindert werden.

Die Schicht hat etwas an Temperatur verloren, aber noch unter 0,5 K. Das wird bei der eingestellten Rundung auf volle Grad noch nicht sichtbar. In vier Tagen wurde sie um etwa (53 MWh plus 1 MWh) entladen.

Die in **t.N17** eingetragene Formel heißt:

$$=N\$13+(w.N17+vl.N17)*1000/N\$5$$

Die zu Beginn des Tages erreichten Teil- Wärmestände **w.N17** und **vl.N17** werden addiert, entsprechend der oben bei **N5** eingetragenen Kapazität der Schicht in die adäquate Temperaturänderung umgerechnet und zur Anfangstemperatur von 40 °C (in **N13**) hinzugezählt. (*1000 wegen der Umrechnung von MWh in kWh, bei **N5** verwendete Einheit.)

* * *

Ergebnisse der Kalkulation (zylindermodell007.ods) zu den untersuchten Haupt-Verlustarten 1., 2. und 3. (S.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 zählt schon zur Speicherumgebung und wird nicht mehr aktiv beheizt oder gekühlt.

Die Diagramme der ersten Zeile von Bild 2 zeigen Momentaufnahmen zum Frühlingsbeginn eines jeden der drei Jahre (mit Ausnahme des allerersten, das ist vom 21.4.), die der zweiten Zeile zu Johanni, die der dritten zur Tag-Nacht-Gleiche im Herbst, die vierte Reihe zeigt die Temperaturen zu Weihnachten eines jeden Jahres.

Zeilennummern betreffen 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.

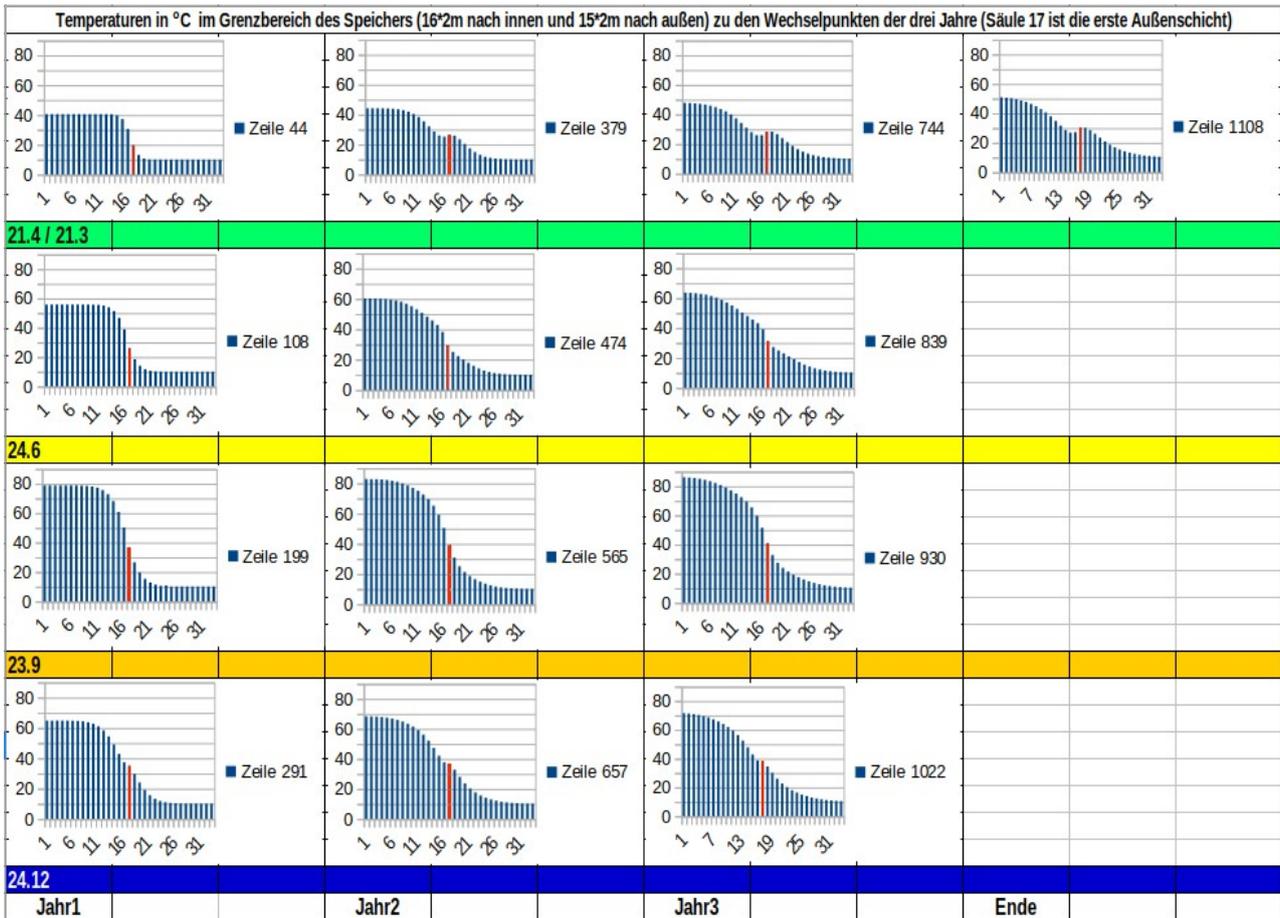


Bild 2: Temperaturentwicklung in der Grenzregion des Saisonspeichers Cottbus über 3 Jahre, Ordinate (senkrechte y-Achse): Temperatur in °C, Abszisse (waagerechte x-Achse): Ort in 2m-Schritten (Balken 17, rot, ist die erste Schicht außerhalb des Speichers)

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 nach Tabelle *zylindermodell007* 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):

$$\frac{(D96+2 \cdot D52)^2 \cdot \pi \cdot D42 / 4 \cdot D53 \cdot (D51 - D48)}{(D96+2 \cdot D52)^2 \cdot \pi \cdot D42 / 4 \cdot D53 \cdot (D51 - D48)} \cdot 1000 \cdot 365 \cdot 24$$

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:

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

365
D45/100
1000
4,2
7,5
3600

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, kJ/kg/K
 mittlere Temperaturdifferenz, K
 1 kWh=3600 kJ

mit

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

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 Anschließern unter 10 % sinken. **Sie liefert das entscheidende Argument für die unter Heliogaia favorisierten XXL- Speicher.** Verwendet wurden *zylindermodell007* und andere bei Variation der entsprechenden Parameter und einer gesetzten Tiefenbegrenzung auf 140 m. Ohne Tiefenbegrenzung werden bessere Werte erreicht.

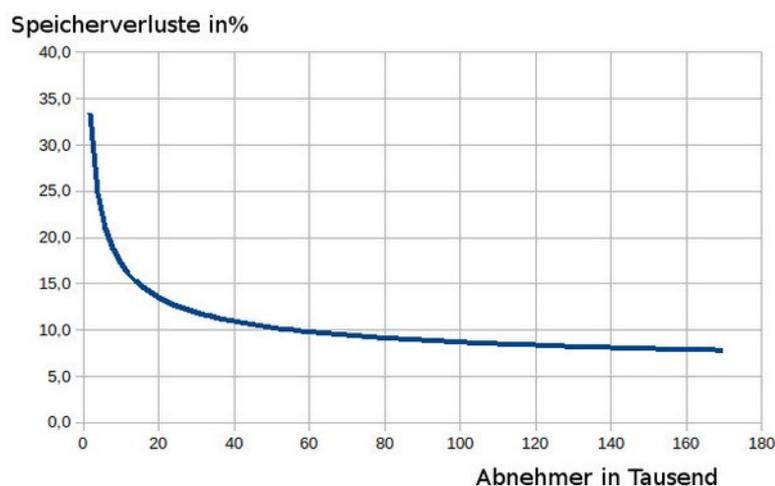


Bild 3: Verluste aus zylinderförmigen Heliogaia- Saisonspeichern in Abhängigkeit von der Abnehmerzahl, Tiefenbegrenzung 140m