

# "ICEPIT"

## Simulationsprogramm für vertikal geschichteten Erdbecken-Speicher zur Wärme- und Kältespeicherung

Für einen unterirdischen Wasser- bzw. Kies/Wasser-Speicher mit Rohrschlangen als Wärmeaustauscher, der in thermischem Kontakt mit dem umgebenden Erdreich und der Außenluft steht, wurde das Programm "ICEPIT" erstellt. Die Differentialgleichungen werden mit einem kombinierten analytisch/numerischen Verfahren gelöst.

Der in "ICEPIT" berechnete Wärme-/Kältespeicher ist als Erdbecken ausgebildet (siehe Bild 1). Er kann wahlweise die Form eines Kegelstumpfes oder eines vertikalen Kreiszylinders haben. Das Speichergebiet ist in  $n$  ( $1 < n < 20$ ) horizontale Schichten eingeteilt. Die Höhe jeder Schicht  $\Delta z_j$  ist frei wählbar, d.h. es ist auch ein nicht-äquidistantes Gitter möglich. Jede Schicht kann mit einer Rohrschlange versehen werden. Über dem Speichergebiet befindet sich eine Wärmedämmschicht.

Das Erdreich und die Wärmedämmschicht über dem Speichergebiet werden von "ICEPIT" automatisch in ein radialsymmetrisches zweidimensionales Gitter eingeteilt. In radialer Richtung sind maximal 22, in vertikaler Richtung maximal 28 Unterteilungen möglich. "ICEPIT" baut das Gitter auf Basis der vom Anwender festgelegten Speichergeometrie immer folgendermaßen auf:

Unter dem Speicher werden 8 horizontale Schichten gebildet. Die erste Schicht unter dem Speicher ist 0,3 m hoch, die Höhen der darunterliegenden Schichten vergrößern sich jeweils um den Faktor 1,5. Das Gitter reicht in vertikaler Richtung bis 14,78 m unter den Speicherboden, die unterste Schicht ist 5,13 m hoch. Der Gitterabstand vergrößert sich deshalb mit zunehmender Entfernung vom Speicher, da in größerer Entfernung geringere Temperaturgradienten erwartet werden. Neben dem Speicher befinden sich  $n/2$  horizontale Schichten. Im Erdreich und in der Wärmedämmschicht über dem Speicher werden, je nach Tiefe des Speichers unter der Geländeoberkante (maximal 3 m), 3 bis 10 horizontale Schichten mit Schichthöhen von maximal 0,3 m gebildet.

In radialer Richtung sind zwischen der Symmetrieachse des Speichers und der Speicherunterkante 5 Gitterzellen vorhanden. Die Gitterbreite  $\Delta r$  erhöht sich in Richtung der Symmetrieachse je Gitterzelle um den Faktor 1,5. Zwischen Speicherunter- und Speicheroberkante sind  $n/2$ , außerhalb des Speichergebiets 7 radiale Gitterunterteilungen. Die Gitterzelle neben der Speicheroberkante ist 0,5

m breit, in radialer Richtung erhöht sich die Gitterbreite jeweils um den Faktor 1,5. Der seitliche Rand des Gitters ist 16,1 m von der Speicheroberkante entfernt, die äußerste Zelle ist 5,7 m breit.

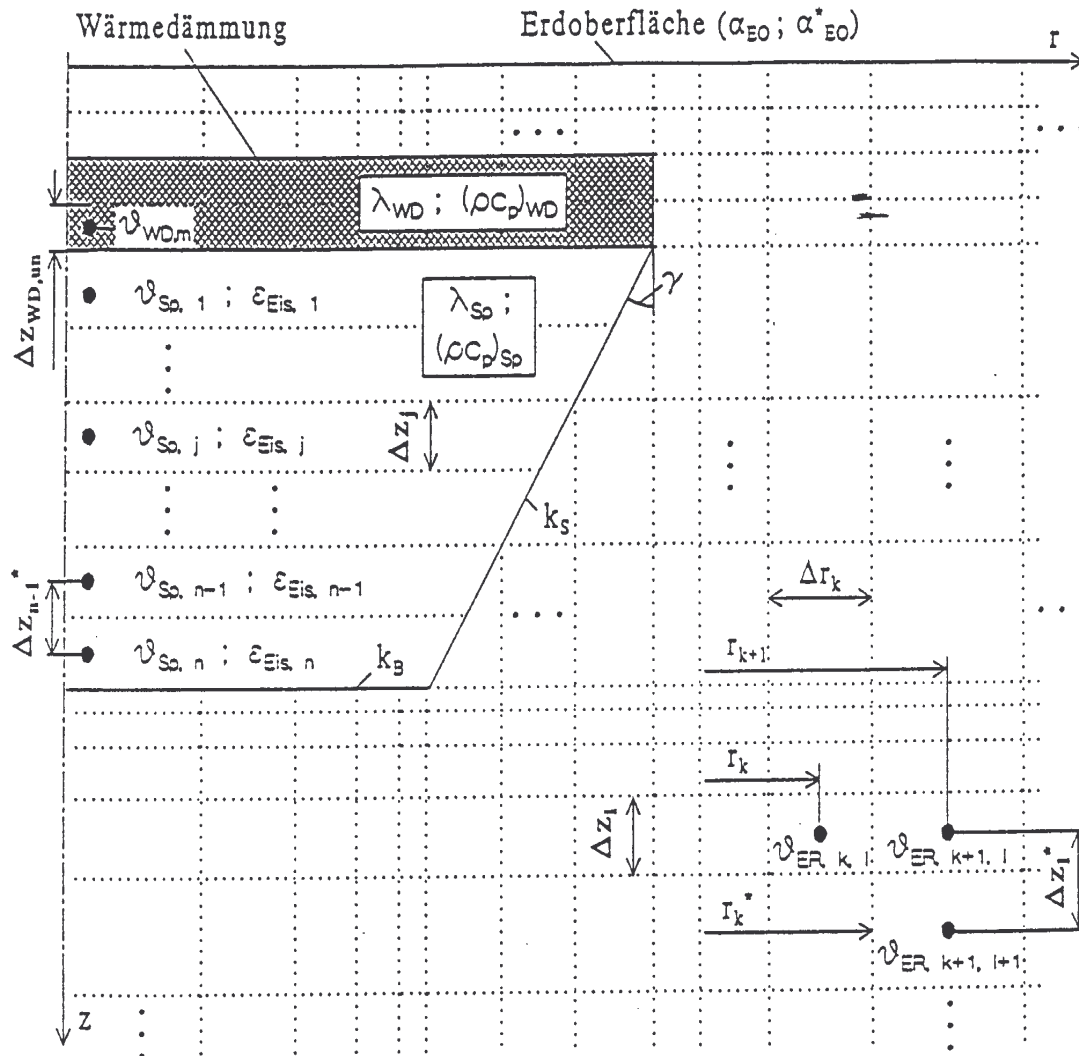


Bild 1: Gittereinteilung in "ICEPIT"

Der Speicher kann durch direkten Wasseraustausch oder über horizontale Rohrschlangen-Wärmeaustauscher thermisch be- und entladen werden (Bild 2). Bei direktem Wasseraustausch kann das Wasser entweder aus der untersten Speicherschicht entnommen und in die oberste Schicht eingespeist (Beladung) oder aus der obersten Schicht entnommen und in die unterste Schicht eingespeist werden (Entladung). Die Rohrschlangen werden parallel durchströmt, wobei zwei getrennte Kreisläufe betrieben werden können. Jede Rohrschlange kann wahlweise an einen der beiden Kreise angekoppelt oder abgesperrt werden. Über die Rohrschlangen ist die Vereisung des Speicherwassers möglich.

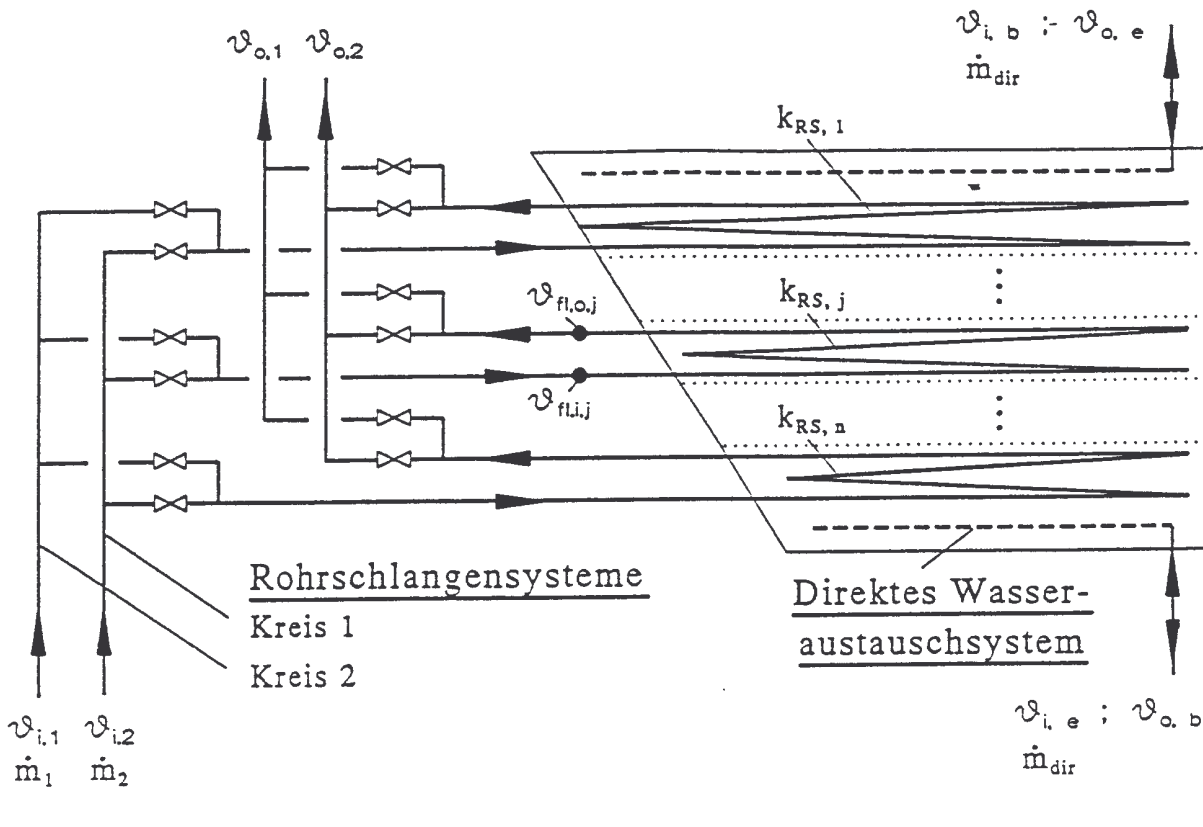


Bild 2: Be- und Entladearten in "ICEPIT"

Die Speichertemperatur in einer Speicherschicht ist konstant, d.h. horizontale Temperaturgradienten im Speichergebiet werden vom Berechnungsverfahren nicht berücksichtigt. Im Speicher berechnet "ICEPIT" folgende Wärmetransportvorgänge:

- ◆ Senkrechte instationäre Wärmeleitung im Speichermedium mit konstanter Wärmeleitfähigkeit und konstanter volumetrischer Wärmekapazität
- ◆ konvektiver senkrechter Wärmetransport bei der Be- und Entladung durch direkten Wasser-austausch mit dem Massenstrom  $\dot{m}_{dir}$
- ◆ Wärmedurchgang durch die Speicherberandungsflächen (Decke, Boden, Seitenwand)
- ◆ bei indirekter Be- und Entladung Wärmedurchgang durch die Rohrschlangen-Wärmeaustauscher und den gegebenenfalls vorhandenen Kies/Eis-Mantel
- ◆ Phasenwechsel des Speicherwassers um die Rohrschlangen

Die Wärmedämmschicht über der Speicherdecke hat überall die konstante volumetrische Wärmekapazität  $(\rho \cdot c_p)_{WD}$  und die konstante Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{WD}$ . Da erwartet wird, daß an der Seitenwand und am Speicherboden dünnere Wärmedämmschichten ausreichen, wird diesen Dämmschichten keine Wärmekapazität zugeordnet. Dort wird mit konstanten Wärmedurchgangskoeffizienten  $k_S$  und  $k_B$ , die der Anwender vorgibt, gerechnet.

Zur Berechnung der Wärmeströme, die über die Rohrschlangen zu- oder abgeführt werden, unterscheidet "ICEPIT" zwei Fälle: Wärmetransport ohne und mit Eisbildung.

Im Fall 1 ohne Eisbildung wird der Wärmedurchgangskoeffizient der Rohrschlange  $k_{RS}$  aus dem inneren Wärmeübergangskoeffizienten, dem Wärmewiderstand durch Leitung im Rohrmaterial und dem äußeren Wärmeübergangskoeffizienten berechnet. Er ist auf die Rohraußenfläche bezogen.

An einer Rohrschlange tritt Eisbildung (Fall 2) auf, wenn die Temperatur  $\vartheta_{w,j}$  der Rohraußenfläche  $0^\circ\text{C}$  unterschreitet. Hat die Bildung von Eispartikeln eingesetzt, so findet keine nennenswerte Unterkühlung des Wassers mehr statt. An der Phasengrenzfläche wird daher die Temperatur  $\vartheta_p = 0^\circ\text{C}$  vorausgesetzt. Die dem Eismantel durch Eisunterkühlung entzogene sensible Wärme beträgt weniger als 1,2 % der latenten Wärme. Die Eisunterkühlung wird im Berechnungsverfahren daher vernachlässigt. Zur Berechnung der zeitlichen Änderung des Eisvolumens um eine Rohrschlange wird die Wärmebilanz an der Phasengrenzfläche aufgestellt. Die zeitliche Änderung der im Eismantel latent gespeicherten Wärme  $\Delta Q_{lat}/\Delta t$  ergibt sich aus der Summe der Wärmeströme  $\dot{Q}_{RS}$  (zwischen dem Fluid in der Rohrschlange und der Phasengrenzfläche) und  $\dot{Q}_{Sp}$  (zwischen dem Speichermedium und der Phasengrenzfläche).

Nach der Berechnung der Temperaturänderung wird in jedem Zeitschritt abgeprüft, ob im Speicher eine Dichteinversion auftritt, d.h. ob in zwei benachbarten Speicherschichten die Dichte in z-Richtung abnimmt. Ist dies der Fall, so werden diese Schichten thermisch vollkommen durchmischt.

An der Speicherdecke ( $j=1$ ) und am Speicherboden ( $j=n$ ) herrschen Randbedingungen 3. Art. Im Erdreich sowie in der Wärmedämmschicht unmittelbar über dem Speicher wird mit zweidimensionaler instationärer Wärmeleitung in r- und z-Richtung gerechnet. An der seitlichen Berandung des Erdreichgebiets herrschen adiabate Randbedingung, da angenommen wird, daß in großer Entfernung vom Speicher (16,1 m) der radiale Temperaturgradient Null ist. Am unteren Rand des simulierten Erdreichgebiets, 14,78 m unter dem Speicher, wird mit einer isothermen Randbedingung ( $\vartheta = 12^\circ\text{C}$ ) gerechnet.

Die Differenzengleichungen werden im Programm "ICEPIT" mit einem modifizierten Euler-Verfahren gelöst.

Parameter	Programm-variable	Beschreibung	Einheit
1	DTOP	oberer Speicherdurchmesser	[m]
2	DBOT	unterer Speicherdurchmesser	[m]
3	HLAY(1)	Höhe der ersten Speicherschicht (von oben)	[m]
.	.	.	.
N+2	HLAY(N)	Höhe der N-ten Speicherschicht (von oben)	[m]
N+3	DEEPST	Tiefe der Speicheroberkante unter der Erdoberfläche (max. 3 m)	[m]
N+4	HINS	Stärke der Wärmedämmung an Speicherdecke	[m]
N+5	ROCPST	Volumetrische Wärmekapazität des Speichermaterials	[kJ/m <sup>3</sup> K]
N+6	LAMBST	Wärmeleitfähigkeit des Speichermaterials	[kJ/hmK]
N+7	POROST	Hohlraumanteil des Speichermaterials (Wasservolumen / Gesamtvolumen, bei Waserspeicher: 1)	[-]
N+8	PERMST	Permeabilität des Speichermaterials (Kies: 10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> , Wasser: ( $\pi$ DACOIL) <sup>2</sup> )	[m <sup>2</sup> ]
N+9	KSIDE	Wärmedurchgangskoeffizient an Speicherseitenwand	[kJ/hm <sup>2</sup> K]
N+10	KBOT	Wärmedurchgangskoeffizient an Speicherboden	[kJ/hm <sup>2</sup> K]
N+11	ROCPTI	Volumetrische Wärmekapazität der Wärmedämmung an der Speicherdecke	[kJ/m <sup>3</sup> K]
N+12	LAMBTI	Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung an der Speicherdecke	[kJ/hmK]
N+13	ROCPGR	Volumetrische Wärmekapazität des Erdreichs	[kJ/m <sup>3</sup> K]
N+14	LAMBGR	Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs	[kJ/hmK]
N+15	ALFAGS	Wärmeübergangskoeffizient der Erdoberfläche	[kJ/hm <sup>2</sup> K]
N+16	ABKOGS	Absorptionsgrad der Erdoberfläche	[-]
N+17	CPFLUI	spezifische Wärmekapazität des Fluids in den Wärmeaustauscher-Rohrschlangen	[kJ/kgK]
N+18	LAMBIC	Wärmeleitfähigkeit des gefrorenen Speichermaterials (Eis oder Kies/Eis)	[kJ/hmK]
N+19	DACOIL	äußerer Durchmesser der Wärmeaustauscher-Rohrschlangen	[m]
N+20	DICOIL	innerer Durchmesser der Wärmeaustauscher-Rohrschlangen	[m]
N+21	ALFICO	innerer Wärmeübergangskoeffizient der Wärmeaustauscher-Rohrschlangen	[kJ/hm <sup>2</sup> K]

N+22	LAMBCO	Wärmeleitfähigkeit des Rohrschlangenmaterials	[kJ/hmK]
N+23	LCOIL(1)	Länge der 1. Wärmeaustauscher-Rohrschlange	[m]
.	.		
.	.		
2*N+22	LCOIL(N)	Länge der N-ten Wärmeaustauscher-Rohrschlange	[m]
2*N+23	DEGICE(1)	anfänglicher volumetrischer Eisanteil der 1. Speicherschicht	[-]
.	.		
.	.		
3*N+22	DEGICE(N)	anfänglicher volumetrischer Eisanteil der N-ten Speicherschicht	[-]
3*N+23	TGRSRT	anfängliche Erdreichtemperatur, wenn beim Programmstart eine homogene Temperaturverteilung gewählt wurde	[°C]
3*N+24	TGRINF	Erdreichtemperatur am äußeren Rand des simulierten Gebiets	[°C]
3*N+25	POTGRD	Option für Ausdruck der Temperaturverteilung im Erdreich: 0: kein, 1: jährlicher, 2: monatlicher 3: wöchentlicher, 4: täglicher, 5: stündlicher Ausdruck	
3*N+26	LUPRTG	Nummer der Ausgabeeinheit für Datei mit Erdreichtemperaturen	

<b>Eingabegröße</b>	<b>Programmvariable</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Einheit</b>
1	TINCO1	Eintrittstemperatur Rohrschlangenkreis 1	[°C]
2	MINCO1	Massenstrom Rohrschlangenkreis 1	[kg/h]
3	TINCO2	Eintrittstemperatur Rohrschlangenkreis 2	[°C]
4	MINCO2	Massenstrom Rohrschlangenkreis 2	[kg/h]
5	TINDIR	Eintrittstemperatur direktes Wasseraustauschsystem	[°C]
6	MINDIR	Massenstrom direktes Wasseraustauschsystem (> 0: abwärts, < 0: aufwärts)	[kg/h]
7	TAMB	Umgebungstemperatur	[°C]
8	EGLOBH	globale Bestrahlungsstärke auf Horizontale	[kJ/hm <sup>2</sup> ]

9	GAMMA1(1)	Ventilstellung für Ankopplung der Rohrschlange 1 an Rohrschlangenkreis 1 (GAMMA1(1) = 1: offen)	[-]
.	.		
.	.		
N + 8	GAMMA1(N)	Ventilstellung für Ankopplung der Rohrschlange N an Rohrschlangenkreis 1	[-]
N + 9	GAMMA2(1)	Ventilstellung für Ankopplung der Rohrschlange 1 an Rohrschlangenkreis 2	[-]
.	.		
.	.		
2*N + 8	GAMMA2(N)	Ventilstellung für Ankopplung der Rohrschlange N an Rohrschlangenkreis 2	[-]

Achtung: Jede Rohrschlange kann nur an maximal einen Kreis angekoppelt werden!

Ausgabegröße	Programmvariable	Beschreibung	Einheit
1	TOUCO1	Austrittstemperatur Rohrschlangenkreis 1	[°C]
2	MOUCO1	Massenstrom Rohrschlangenkreis 1	[kg/h]
3	TOUCO2	Austrittstemperatur Rohrschlangenkreis 2	[°C]
4	MOUCO2	Massenstrom Rohrschlangenkreis 2	[kg/h]
5	TOUDIR	Austrittstemperatur direktes Wasseraustauschsystem	[°C]
6	MOUDIR	Massenstrom direktes Wasseraustauschsystem	[kg/h]
7	QLOST	Wärmeverluststrom durch Speicherdecke	[kJ/h]
8	QLOSS	Wärmeverluststrom durch Speicherseitenwand	[kJ/h]
9	QLOSB	Wärmeverluststrom durch Speicherboden	[kJ/h]
10	QLOSTT	Wärmeverluststrom gesamt	[kJ/h]
11	QSTTOT	innere Energie im Speicher (QSTTOT = 0 bei $\mathcal{G}_{sp} = 0$ und Eisanteil $\varepsilon_{Eis} = 0$ )	[kJ]
12	QTCO1	Wärmestrom Rohrschlangenkreis 1	[kJ/h]
13	QTCO2	Wärmestrom Rohrschlangenkreis 2	[kJ/h]
14	QTDIR	Wärmestrom direktes Wasseraustauschsystem	[kJ/h]
15	TSTAVG	mittlere Speichertemperatur	[°C]
16	TSTA(1)	Temperatur 1. Speicherschicht	[°C]
.	.		
.	.		
N + 15	TSTA(N)	Temperatur N-te Speicherschicht	[°C]

N + 16	DEGICE(1)	Volumetrischer Eisanteil 1. Speicherschicht	[-]
.	.		
2*N + 15	DEGICE(N)	Volumetrischer Eisanteil N-te Speicherschicht	[-]
2*N + 16	KARS(1)	Wärmeübertragungsvermögen der 1. Rohrschlange	[kJ/hK]
.	.		
3*N + 15	KARS(N)	Wärmeübertragungsvermögen der N-ten Rohrschlange	[kJ/hK]
3*N + 16	ALFAA(1)	äußerer Wärmeübergangskoeffizient · Außenfläche ( $\alpha_a \cdot A_a$ ) der 1. Rohrschlange	[kJ/hm <sup>2</sup> K]
.	.		
4*N + 15	ALFAA(N)	äußerer Wärmeübergangskoeffizient · Außenfläche ( $\alpha_a \cdot A_a$ ) der N-ten Rohrschlange	[kJ/hm <sup>2</sup> K]

<b>Abhängige Variable (Derivative)</b>	<b>Programmvariable</b>	<b>Beschreibung</b>	
1	TSTA(1)	Temperatur 1. Speicherschicht	[°C]
.	.		
N	TSTA(N)	Temperatur N-te Speicherschicht	[°C]

Anzahl der unabhängigen Variablen (Derivatives) = Anzahl der Speicherschichten:  $n \leq 20$ ; n muß eine gerade Zahl sein.