

# Adiabatische Kühlung von Zuschlagsstoffen

H. LANER, F. HAAS  
 Arbeitsbereich Bauphysik,  
 TVFA, Universität Innsbruck

(Hubert.Laner@uibk.ac.at)

## 1. Motivation

Durch normative Reglementierungen ist die Einbautemperatur von Beton (z. B. Weisse Wanne) zu begrenzen und falls erforderlich vor Einbau zu prüfen. Zur Kühlung des Betons werden aus diesem Grund zur Zeit Scherbeneisanlagen oder Kühlungen mittels flüssigem Stickstoff verwendet. Der energetische Aufwand ist bei beiden Verfahren sehr hoch. Aus energetischer Sicht ist es sinnvoll, einen Kühlangriff an der im Beton gewichtsmässig präsentesten Fraktion (Gesteinskörnung) zu realisieren. Ein neuer Ansatz hierfür stellt die Nutzung der Verdunstungskälte (adiabatische Kühlung) dar (siehe Abbildung 1). Selbige wird im vorliegenden Projekt entwickelt und optimiert. Dabei wird die Gesteinskörnung in übliche Fraktionen aufgeteilt (0-4 mm / 4-8 mm / 8-16 mm / 16-22 mm) und in eigens entwickelten, thermisch gedämmten Mischbehältern unter ständiger Befuchtung und Luft durchströmt. Durch Verdunstung der Feuchtigkeit, welche an der Oberfläche der Gesteinskörnung haftet, wird Selbige gekühlt. In einem ersten Schritt wird die Energieeinbringung ermittelt, um daraus Energiebilanzen und die theoretisch nutzbare Verdunstungsenthalpie zu bestimmen (siehe Abbildung 2).

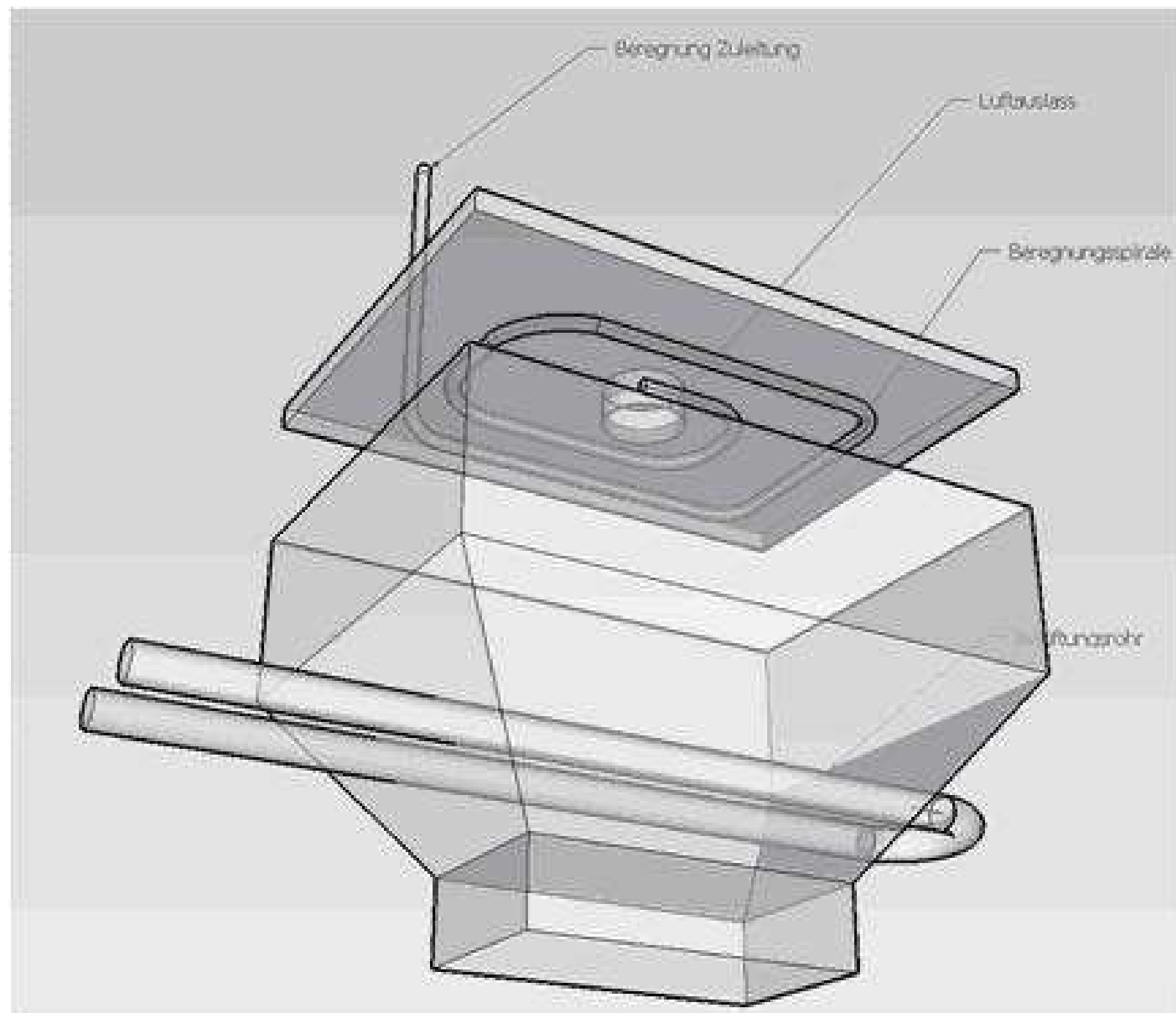


ABBIldung 1: Skizze

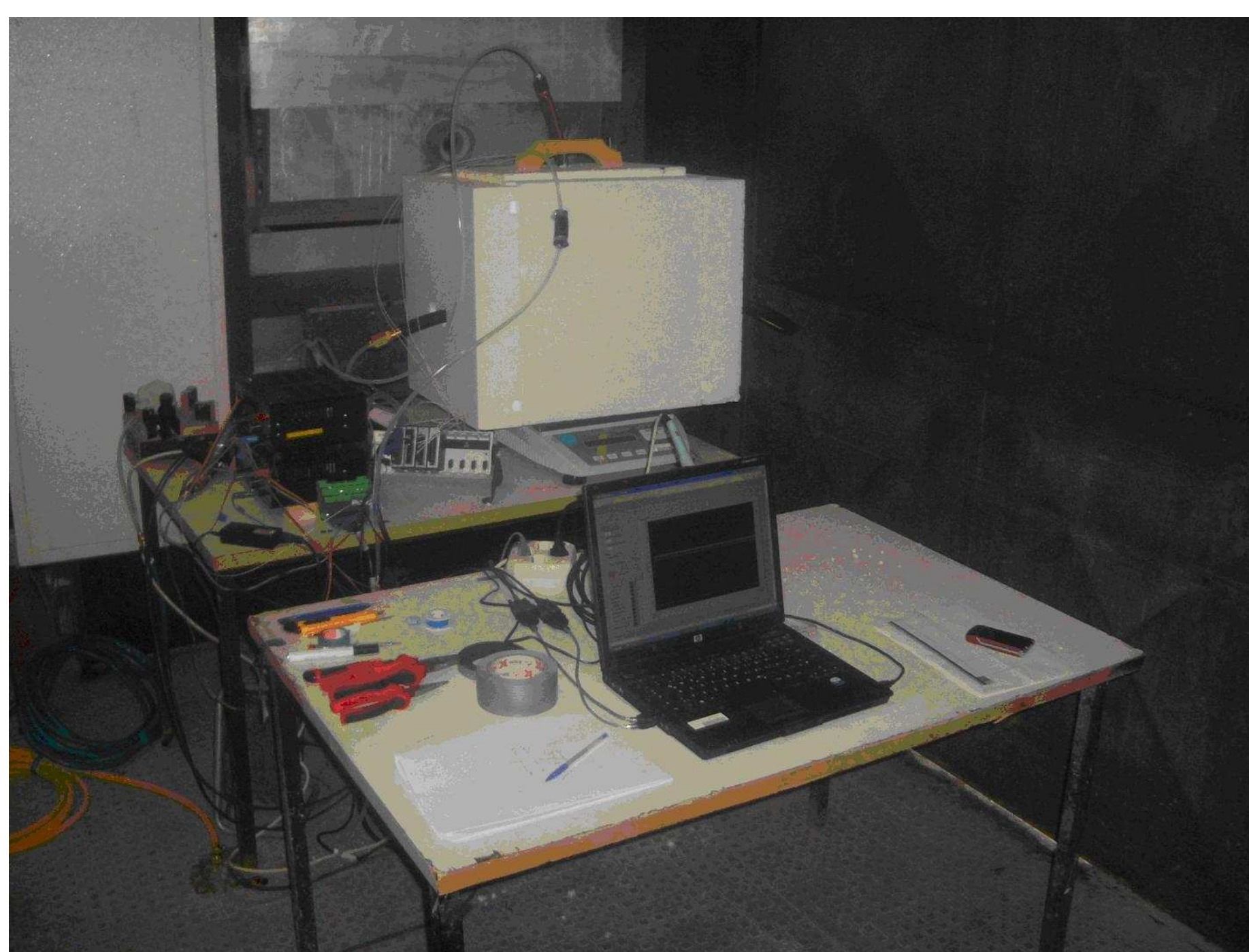


ABBIldung 2: Versuchsaufbau

## 2. Durchführung Versuch

Durch ein Belüftungsrohr wird die definierte Menge an Luft eingebracht, und die Gesteinskörnung im Inneren des Behälters wird in Folge durch Perforierungen am Rohr kontinuierlich über die Breite belüftet. Die definierten Eigenfeuchten der eingebrachten Gesteinskörnung werden durch eine Beregnungsspirale, die am Deckel des Behälters angebracht wird, durch rechnergesteuerte Beregnung mit Wasser erreicht. Um eine konstante Eigenfeuchteverteilung der Gesteinskörnung (laut Vorgabe der Prüfmatrix) zu gewährleisten, wird die Masse der Gesteinskörnung und des zusätzlichen Wassers kontinuierlich über eine Waage bestimmt. Weicht das Ergebnis der Waage von der errechneten

Masse ab, wird die Gesteinskörnung bis zum Massenausgleich berieselt. Diese Berieselung wird über Online-Messung mithilfe der Messsoftware Labview automatisch dem Verdunstungsverlauf nachgeführt.

Flankierend werden die

- Zulufttemperatur
- Ablufttemperatur
- Wassertemperatur
- Zuluftfeuchte
- Abluftfeuchte

gemessen. Das gesamte Modell ist thermisch gedämmt.

Es werden in steigender Höhe der Schüttung die sich ergebenden Temperaturen gemessen (siehe Abbildung 3):

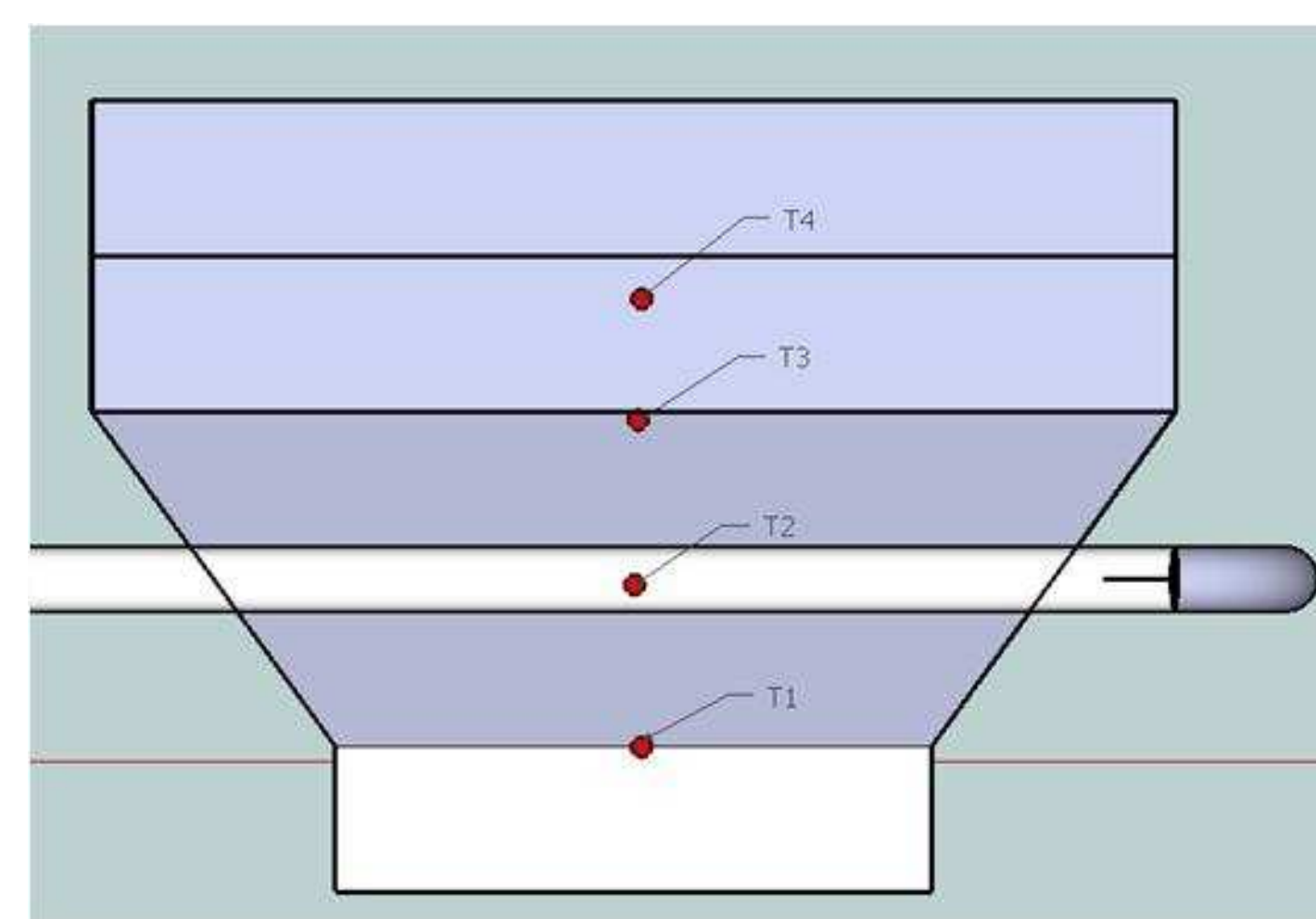


ABBIldung 3: Vorderansicht Schüttung

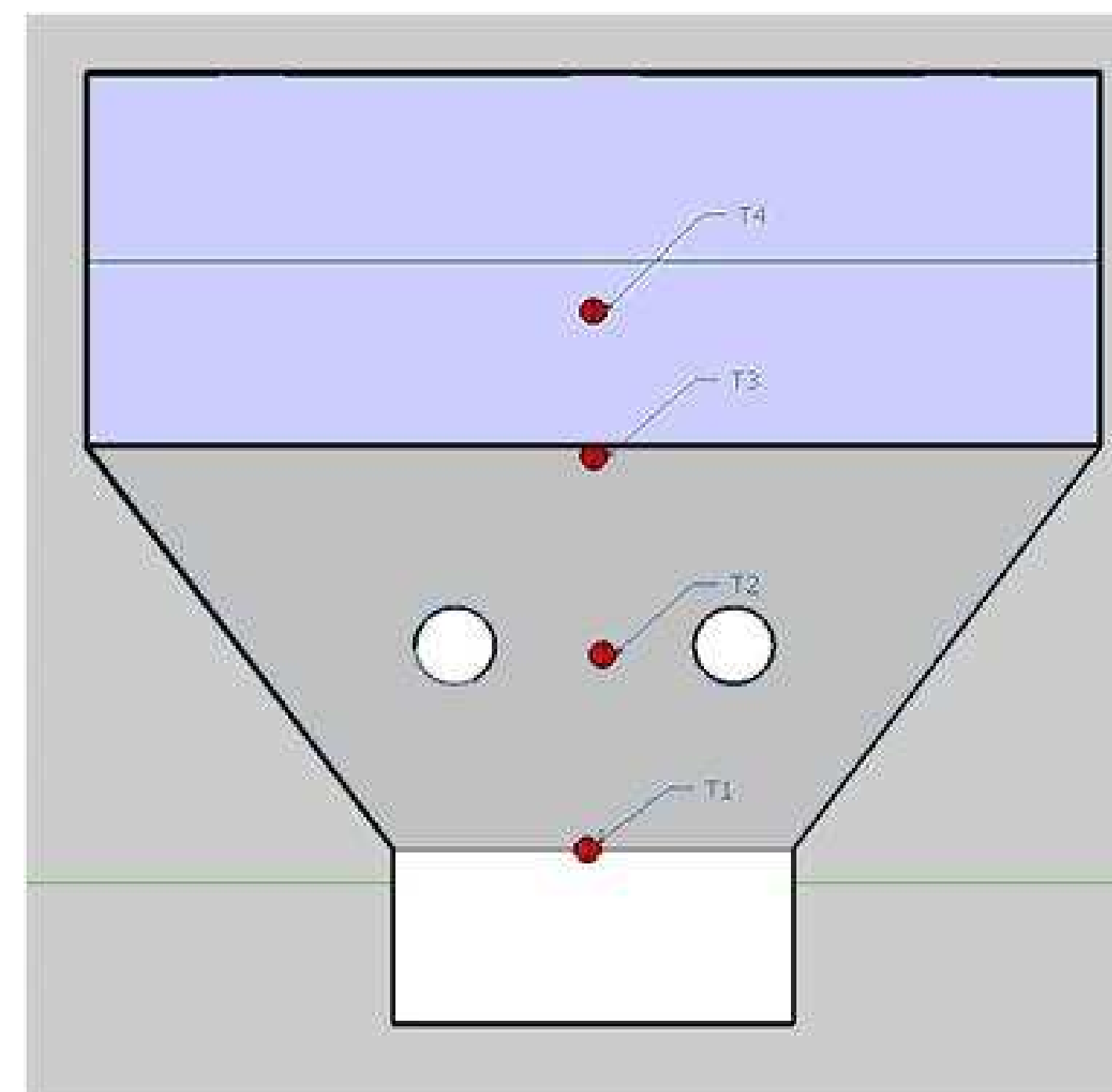


ABBIldung 4: Seitenansicht Schüttung

Als Plausibilitätskontrolle der Messungen wurde aufgrund der erhaltenen Messwerte auf die Verdunstungsenthalpie des Wassers zurückgerechnet.

$$h_v := \frac{m_{zuluft} * h_{zuluft} + m_{wasser} * h_{wasser} - m_{zuluft} * h_{tr,b} - h_{dampf,b}}{m_{wasser}}$$

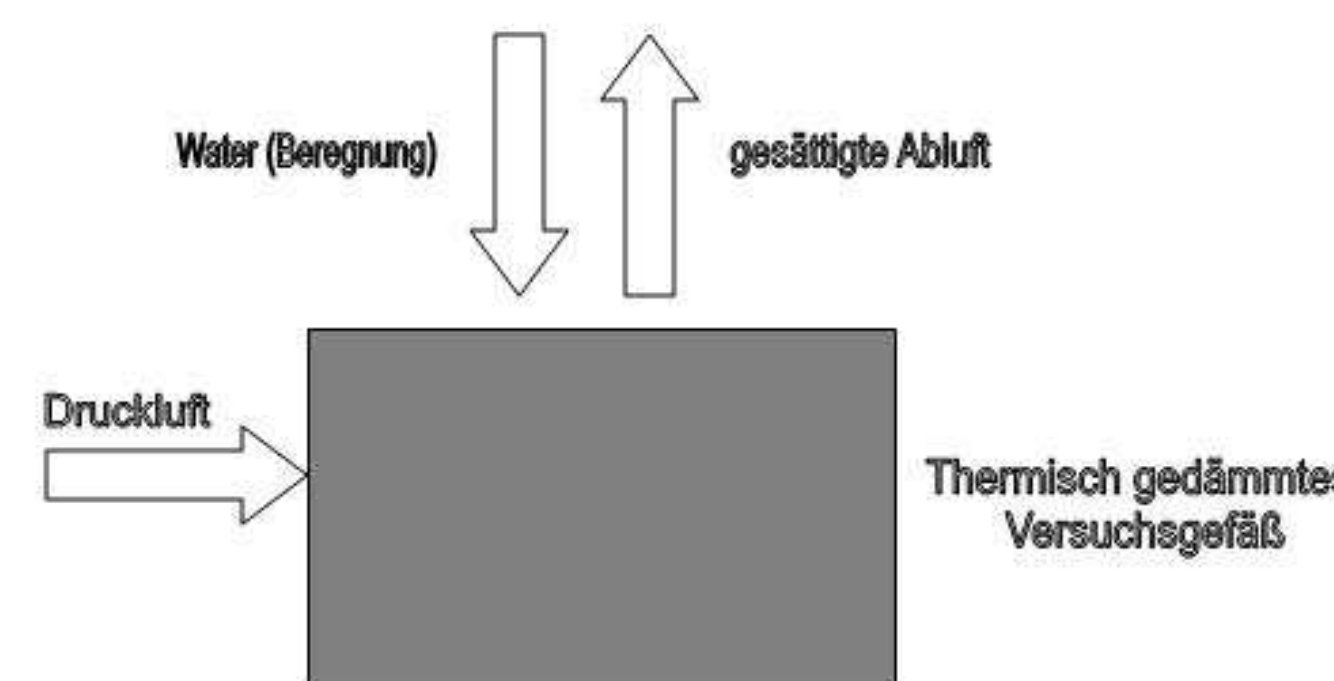


ABBIldung 5: Bilanzansatz für Berechnung der Verdunstungsenthalpie im thermisch stationären Zustand

Der Mittelwert aus verschiedenen Messungen für die Verdampfungsenthalpie ergibt sich mit rund 2300 kJ/kg recht nahe an den Werten aus der Literatur (Quelle: H.D.Baer; K.Stephani: Wärme- und Stoffübertragung) von 2476 kJ/kg bei 10°C.

Berechnung der Verdunstungsenthalpie	7.5m³/h, 5%	11.25m³/h, 5%	14.4m³/h, 5%	7.5m³/h, 10%	11.25m³/h, 10%	14.4m³/h, 10%	7.5m³/h, 15%	11.25m³/h, 15%	14.4m³/h, 15%
Feuchtigkeit Zuluft [%]	2.90	2.89	3.61	2.60	3.41	3.79	1.20	2.10	2.22
Belastung Zuluft aus Diagramm [g/kg]	0.50	0.50	0.50	0.40	0.50	0.50	0.20	0.40	0.40
m³/h Zuluft	7.50	11.25	14.40	7.50	11.25	14.40	7.50	11.25	14.40
Dichte Zuluft aus Mollier h-x-Diagramm [kg/m³]	1.14	1.15	1.15	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14
Masse Luft zu [kg/h]	8.55	12.94	16.56	8.55	12.83	16.42	8.55	12.83	16.42
Temperatur Luft ab [°C]	5.94	5.56	6.21	6.45	6.10	5.84	5.35	6.67	9.21
Temperatur Luft zu [°C]	16.47	14.22	15.12	15.50	16.67	16.57	13.36	16.92	15.41
Temperatur Wasser zu [°C]	20.16	19.23	18.88	20.45	21.28	20.80	17.90	20.58	19.47
c Luft trocken [kJ/(kg·K)]	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
c Dampf [kJ/(kg·K)]	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
c Wasser [kJ/(kg·K)]	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20
Wasserstand Beginn [ml]	450.00	505.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00
Wasserstand Ende [ml]	215.00	150.00	145.00	365.00	180.00	45.00	95.00	140.00	355.00
Messzeitraum [h]	6.25	5.16	4.92	2.58	5.08	5.00	8.46	4.75	3.33
Masse Wasser zu [kg/h]	0.04	0.07	0.07	0.05	0.06	0.09	0.05	0.08	0.04
Enthalpie Zuluft aus Mollier h-x [kJ/kg]	17.50	15.00	15.00	18.50	17.50	17.50	18.00	17.00	17.00
Enthalpie trockene Luft bei Abluft [kJ/kg]	5.96	5.58	6.23	6.48	6.12	5.86	5.37	6.10	9.25
Enthalpie Wasser zu [kJ/kg]	87.19	80.77	79.30	85.89	89.38	87.36	75.18	86.44	81.77
Enthalpie Dampf in Abluft [kJ/kg]	11.05	10.34	11.55	12.00	11.35	10.86	9.95	12.41	17.13
Masse trockener Luft [kg/h]	8.55	12.93	16.55	8.55	12.82	16.41	8.55	12.82	16.41
Masse Dampf in Zuluft [kg/h]	0.004	0.006	0.008	0.003	0.006	0.008	0.002	0.005	0.007
Verdampfungsenthalpie [kJ/kg]	2698.83	1840.98	2077.99	2682.93	2394.90	2175.25	2311.23	1986.38	2986.41
Mittelwert	2274.989 kJ/kg								

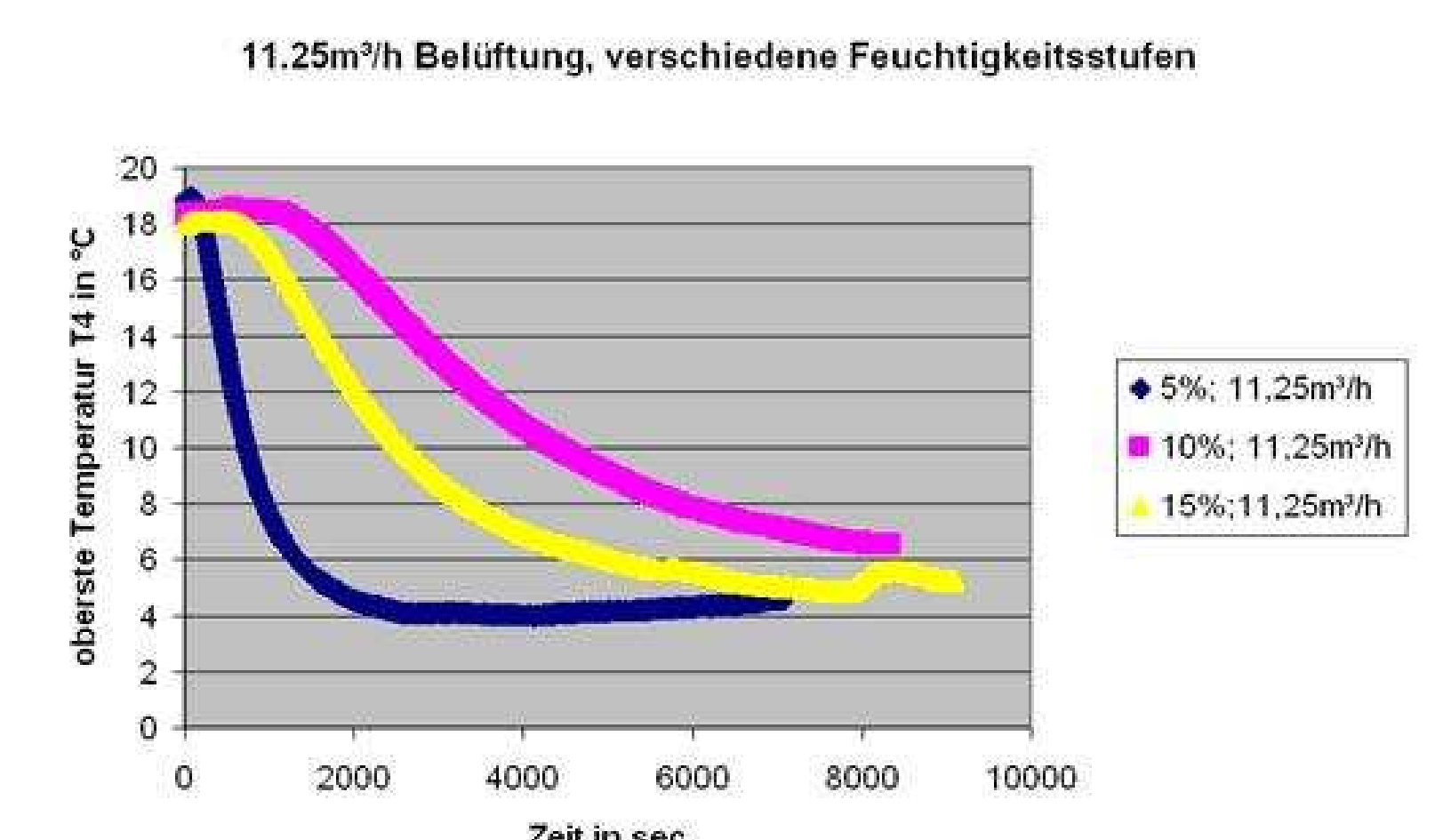
ABBIldung 6: Berechnung Verdampfungsenthalpie

Erreichbare Temperaturen bei thermischem Gleichgewicht:

Thermoelementtemperaturen	7.5m³/h, 5%	11.25m³/h, 5%	14.4m³/h, 5%	7.5m³/h, 10%	11.25m³/h, 10%	14.4m³/h, 10%	7.5m³/h, 15%	11.25m³/h, 15%	14.4m³/h, 15%
T1	13.78	13.99	14.08	9.10	9.4	9.37	7.43	8.31	11.11
T2	7.98	12.87	13.86	7.42	8.03	8.16	6.52	7.44	9.82
T3	6.84	13.41	13.84	5.22	6.21	6.44	4.18	5.95	7.79
T4	4.30	4.55	5.14	8.12	6.11	5.28	3.02	4.41	7.53
Durchschnitt	6.24	11.10	11.73	6.74	7.19	7.11	5.29	6.45	9.06

ABBIldung 7: Auszug Berechnung

Beispiel für die Abkühlung einer Schüttung mit 0-4mm Korndurchmesser bei 5



Regressionsfunktionen der Abkühlkurven mit Bestimmtheitsgrad:

5% Feuchte, 11.25m³/h:	10% Feuchte, 11.25m³/h:	15% Feuchte, 11.25m³/h:
$y = -5E-22x^2 - 5E-16x^2 + 2E-13x^2 - 2E-09x^2 + 1E-05x^2 - 0.021x + 21.204$ $R^2 = 0.9999$	$y = 3E-22x^2 - 6E-18x^2 + 1E-14x^2 + 4E-10x^2 - 2E-06x^2 + 0.0025x + 17.928$ $R^2 = 0.9998$	$y = 1E-21x^2 + 4E-17x^2 - 5E-13x^2 + 3E-09x^2 - 8E-06x^2 + 0.0048x + 17.537$ $R^2 = 0.9994$

ABBIldung 8: Feuchtigkeitsstufen

## 3. Resumee

Die Kühlung des Gesteinskorn über Ausnutzung der Verdampfungsenthalpie ist eine sehr kostengünstige Alternative zur Kühlung mit Flüssig-Stickstoff bzw. Scherbeneis. Die vorliegenden Ergebnisse sollen den Weg zu Verbreitung dieser Methode ebnen, die vor allem in energetischer Hinsicht den anderen beiden schon aufgrund des Wegfallens der Bereitstellung von Kühlungsenergie weit überlegen ist.

## 4. Quelle

Arbeitsbereich Bauphysik,  
 TVFA, Universität Innsbruck