



István Erdösi, László Kajtár

## Die Änderung des Klimaverhältnisses in unterirdischen Räumen\*

Am Gebiet der Errichtung von unterirdischen Bauobjekten war in den vergangenen Jahrzehnten eine bedeutende Entwicklung zu verzeichnen. Am Anfang war die Anlegung und Ausführung von unterirdischen Bauwerken vorwiegend durch die große Bebauungsdichte der Siedlungen, sowie durch die geringe Anzahl der bebaubaren Grundstücke, begründet. Später trugen zur Verbreitung unterirdischer Bauobjekte und Stockwerke auch wärmetechnische und wirtschaftliche Erwägungen bei. Das Beispiel und die Inbetriebhaltungserfahrungen schon erbauter unterirdischer Bauobjekte beweisen eindeutig, daß bei deren Heizung eine 40- bis 60prozentige, bei deren Luftkonditionierung sogar eine 90 % übertreffende Einsparung erzielt werden kann, verglichen mit ähnlichen überirdischen Bauwerken. An die Installationstechnik stellte aber die Verbreitung derartiger Bauwerke neue Forderungen.

Der gegenwärtige Artikel soll für derartige Probleme Lösungen bieten, beziehungsweise auf die in diesem Zusammenhang zu erfahrenen Schwierigkeiten aufmerksam machen.

### Climate-control in subterranean rooms

Recent decades have seen a major development in the field of building subterranean structures. At the beginning, the principal justifications for the laying-out and realization of below-ground construction projects were the high density of existing developments as well as the limited availability of new building sites. Later, considerations of cost-effectiveness and climate-control technology also contributed to the spread of subterranean construction projects. Experience gained with existing subterranean structures and their operational maintenance prove unambiguously that, in comparison with similar above-ground structures, savings of 40–60 % in heating costs and in excess of 90 % in air-conditioning costs are achievable. The expansion of this type of construction, however, brought with it new challenges for climate-control installations. This report is an attempt at providing solutions to known problems and at drawing attention to the associated difficulties which can be anticipated.

### Changement des conditions climatiques dans des locaux souterrains

Pendant les dernières décennies, le nombre de constructions souterraines a considérablement augmenté. Au début, l'établissement et la réalisation des bâtiments souterrains dépendirent principalement d'une grande concentration de bâtiments dans les nouveaux quartiers et du petit nombre de terrains de construction. Plus tard, des recherches en génie climatique et des raisons économiques ont contribué à une expansion des constructions souterraines.

Les expériences obtenues à partir des constructions existantes prouvent qu'une économie de chauffage de 40–60 % peut être réalisée ainsi qu'une une économie de 90 % pour le conditionnement de l'air, en comparaison avec les constructions traditionnelles. Cependant, l'expansion de telles constructions faisait apparaître de nouvelles exigences pour la technique d'installation.

Cet article devrait proposer des solutions à ces problèmes et tirer l'attention sur les problèmes liés à ces constructions.

### 1. Der Einfluß des Bodens bei unterirdischen Räumen

Die Wettereinflüsse gelangen stark geschwächt und nur mit einer wesentlichen Verzögerung in die tieferen Bodenschichten. Die dämpfende und phasenverzögernde Wirkung des Bodens kommt bei unterirdischen Räumen vorteilhaft zur Geltung.

Die Auswirkung der äußeren Temperaturschwankung kann bis zu einer Tiefe von 15 bis 20 m verfolgt werden. Unter dieser Tiefe ist die Bodentemperatur von der Jahreszeit unabhängig praktisch konstant. Bei tiefer gelegenen Schichten entspricht die natürliche Bodentemperatur dem geothermischen Gradienten. In verschiedenen Klimazonen der Erde gemessen, verändert sich die Bodentemperatur vertikal pro Kilometer um 10 bis 15 °C. Der Wert des geothermischen Gradienten ist in Budapest 33 m/°C. In den witterungsabhängigen Tiefen der Erde ist der Wärmefluß ortsunabhängig nahezu konstant, d. h. 0,025–0,084 W/m<sup>2</sup>.

Das sich infolge der Wettereinflüsse in der oberen Bodenschicht ausbildende Temperaturfeld kann berechnet werden. Das physikalische Modell ist hier die Temperatur des halbunendlichen Raumes im Falle einer periodischen Wärmeeinwirkung. Als Erregungsfunktion die Temperaturschwankung der äußeren Atmosphäre zugrunde gelegt, erhält man eine Randbedingung dritter Art.

Bild 1 zeigt die auf Grund der für Ungarn charakteristischen Temperaturschwankungen berechneten Bodentemperaturen. Wie

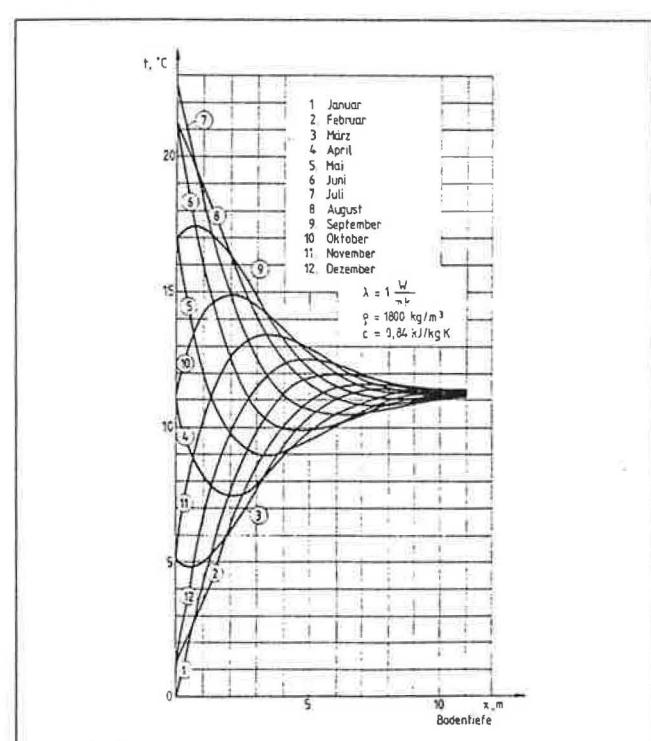


Bild 1 Berechnete Bodentemperaturen

\* Manuscript eingereicht im November 1988

ersichtlich, verändert sich die Tiefe der wärmsten Bodenschicht abhängig vom Monat.

Die dämpfende Wirkung des Bodens in Abhängigkeit der Tiefe ist:

$$\frac{1}{v} = \exp [-mx] \quad (1)$$

$$m = \sqrt{\frac{2\pi}{\tau_0}}$$

wobei:  $a$ ,  $m^2$   $\phi$  S der Temperaturabführkoeffizient  
 $x$ , m die Bodentiefe  
 $\tau_0$ , s die Periodenzzeit der Temperaturveränderung ist.

In Kenntnis des Temperaturfeldes kann die im Boden zustande kommende saisonabhängige Wärmeflußdichte bestimmt werden. Die Amplitude der saisonabhängigen Wärmeflußdichte kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$v_q = 2\lambda m v \exp [-mx] \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

wobei:  $v$ ,  $^{\circ}\text{C}$  die Amplitude der Temperaturveränderung in der vorgegebenen Bodentiefe ist.

Der Wert des Wärmeabsorptionskoeffizienten ist auf Grund der Temperatur- und der Wärmestromamplituden

$$S = \sqrt{\frac{2\pi}{\tau_0}} \lambda \zeta c \quad (3)$$

wobei:  $\lambda$ ;  $\zeta$ ;  $c$  die Materialkennwerte des Bodens sind.

Bei den üblichen Materialkennwerten des Bodens beträgt der Wert des Wärmeabsorptionskoeffizienten  $0,5 - 1 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Der Wärmestrom schwankt um den Nullwert. Dies bedeutet, daß die maximale Wärmestromdichte (in  $\text{W/m}^2$ ) – abhängig von den Materialkennwerten des Bodens – das 0,5 bis 1fache der Temperaturschwankung beträgt.

Die phasenverzögerte Wirkung des Bodens verändert sich linear mit der Tiefe und beträgt in Abhängigkeit der Materialkennwerte des Bodens in einer Tiefe von 10 m 170 bis 290 Tage.

## 2. Wärmetechnische Bemessung unterirdischer Räume

Die Lage des unterirdischen Raumes berücksichtigend, kann auf Grund der Bodentemperaturmessungen entschieden werden, mit welcher Ausgangstemperatur der Boden als Wirkungsfaktor bei der Berechnung des Heiz- und Kühlbedarfs eines Raumes zweckmäßig berücksichtigt werden soll.

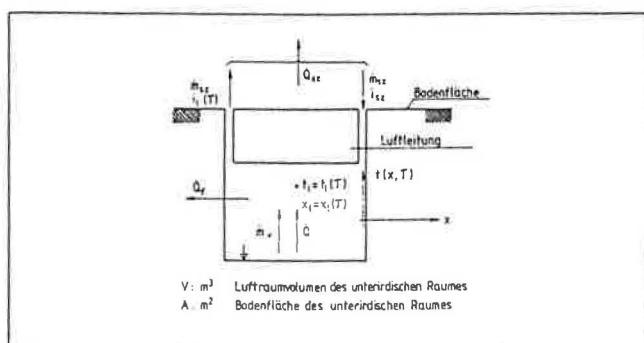


Bild 2 Wärmegleichgewicht des unterirdischen Raumes

Das Ziel einer wärmetechnischen Bemessung ist die Bestimmung des Leistungsbedarfs der Heizung und Lüftung, sowie die Berechnung der Parameter des sich im unterirdischen Raum bildenden Mikroklimas. Die von uns ausgearbeitete komplexe instationäre Bemessungsmethode ermöglicht die Bestimmung obiger Kennwerte sowie die Berechnung ihrer zeitbedingten Veränderung. Die Differentialgleichung für die Beschreibung des Wärmegleichgewichts im unterirdischen Raum lautet nach Bild 2 wie folgt:

$$[\dot{Q} - \dot{Q}_f(\tau) - \dot{Q}_{sz}(\tau)] d\tau = c_{pe} \cdot \zeta_e \cdot V \cdot dt_e$$

wobei:  $\dot{Q}$  : die Summe der inneren Wärmebelastung, der eventuellen Kühlung und der Leistung des konvektiven Wärmeabgebers.  
 $\dot{Q}_f(\tau)$  : der durch die Wand abgeleitete Wärmefluß,  
 $\dot{Q}_{sz}(\tau)$  : die Wärmeleistung der Lüftung,  
 $c_{pe} \zeta_e$  : die Materialkennwerte der Luft,  
 $\dot{m}_v$  : die Feuchtigkeitsbelastung ist.

Das für die Bestimmung des durch den Boden abgeleiteten Wärmeflusses anwendbare physikalische Modell ist die Temperatur des halbunendlichen Raumes im Falle einer Randbedingung dritter Art (Bild 3). Die Differentialgleichung der Wärmeleitung kann in diesem Fall mit Anwendung der Laplace-Transformation gelöst werden.

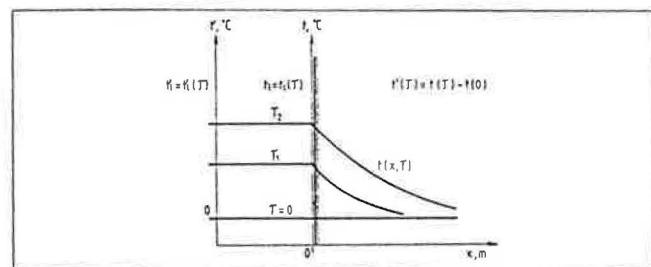


Bild 3 Temperaturänderung des halbunendlichen Raumes

In der Gleichung, die für den Gleichgewichtszustand eines unterirdischen Raumes aufgestellt wurde, bleibt nach Substitution nur die Lufttemperatur als Unbekannt zurück. Nach Ordnung lautet die Differentialgleichung wie folgt:

$$\frac{dte}{dt} + k_1 t_f + k_2 \left[ \int_0^\tau t' f(\tau-u) g(u) du + t(0, \tau) \right] + k_3 = 0 \quad (5)$$

$$g(u) = H \sqrt{\frac{a}{\pi u}} \exp \left[ -\frac{x^2}{4au} \right] - a H^2 \exp [Hx + a H^2 u] \cdot \operatorname{erfc} \left[ \frac{x}{2\sqrt{au}} + H \sqrt{au} \right] \quad (6)$$

wobei:  $H = \frac{\alpha}{\lambda}$

$k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  die Materialkennwerte, die geometrischen Abmessungen, die Kennwerte der Belüftung und der Raumluft sowie die resultierende Wärmebelastung, repräsentieren.

Gleichung (5) ist eine Integral-Differentialgleichung, die auch das Konvolutionsintegral der Lösungsgleichung enthält. Auch die absolute Feuchtigkeit der Raumluft verändert sich laufend, was mit einer bekannten Beziehung berechenbar ist. Die Differentialgleichung wurde mit der Methode der endlichen Differenzen gelöst. Die Zeitintervalle wurden der Lösungskonvergenz und des Maschinenzeitbedarfs der Berechnung entsprechend gewählt.

Mit Hilfe des ausgearbeiteten Computerprogramms kann die Temperatur- und Feuchtigkeitsveränderung im unterirdischen

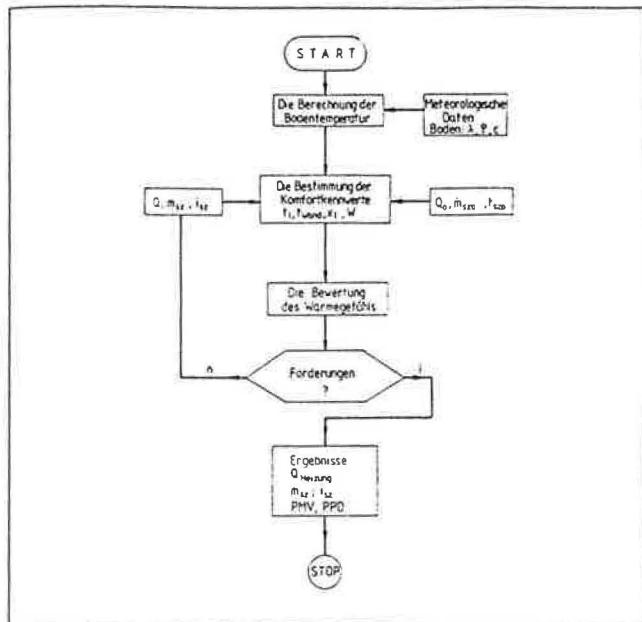


Bild 4 Blockschema der komplex-instantären wärmetechnischen Bemessung

Raum auf Grund der vorbestimmten Heizungs- und Lüftungsleistungen berechnet werden. Auf diese Weise kann auch der meistkomplexe Komfortkennwert, der PMW und der PPD-Wert, bestimmt werden.

Durch die Modifizierung der auf Grund der Komfortanforderungen vorher bestimmten Leistungsbedarfs für Heizung und Kühlung kann eine entsprechende Lösung erzielt werden. Das Blockschema der komplexen, instationären wärmetechnischen Bemessung unterirdischer Räume wird in Bild 4 dargestellt. Die Bemessung ermöglicht auch eine Wirtschaftlichkeitsprüfung, die einer optimalen technischen Lösung zugrunde gelegt werden kann.

### 3. Die Veränderung des Raumluftzustandes in unterirdischen Räumen

Der Raumluftzustand unterirdischer Räume ist – abhängig von der Belüftungsart und der Häufigkeit des Luftwechsels – unterschiedlich. Die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit der Raumluft kann in Abhängigkeit der Belüftungsweise und der Häufigkeit des Luftwechsels als eine Fläche dargestellt werden.

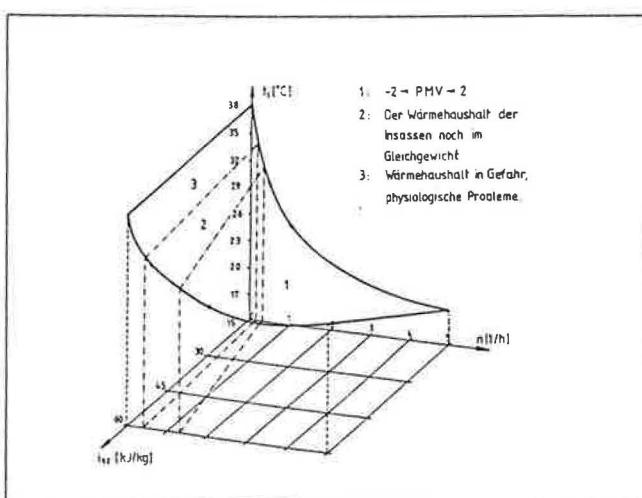


Bild 5 Die Raumtemperatur in Abhängigkeit von der Enthalpie der Zuluft und des Wertes des Raumluftwechsels

Bild 5 veranschaulicht Raumlufttemperaturverhältnisse. Die Werte beziehen sich auf einen Zustand nach 70 Stunden Betrieb bei bestimmter innerer Wärmebelastung und gewissen geometrischen Abmessungen. Die umgrenzten Gebiete bedeuten hinsichtlich menschlichen Wohnbefindens unterschiedliche Zonen. Die resultierende Fläche ermöglicht die Wahl verschiedener Alternativen.

Bei unterirdischen Räumen muß der Frage des lufttechnischen Systemausfalls und dessen Folge besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Sollte die Lüftung ausfallen, wird sich die innere Temperatur und der Feuchtigkeitsgehalt der Raumluft infolge der Wärme- und Feuchtigkeitsbelastung weiter erhöhen. Im Raum kann die Luft einen Sättigungszustand erreichen. Dadurch wird das Komfortgefühl der Insassen wesentlich verschlechtert. In einer warmen Umgebung kann das Gleichgewicht des menschlichen Wärmehaushaltes nur durch die Erhöhung der Wärmeabgabe des Körpers durch Verdunstung aufrechtgehalten werden. Bild 6 veranschaulicht die Änderung der Raumluftverhältnisse infolge eines Betriebsausfalls von zwei Stunden. In der Zeitperiode des Betriebsausfalls erhöht sich die Temperatur und der Feuchtigkeitsgehalt der Raumluft, zuletzt kommt es zu einem

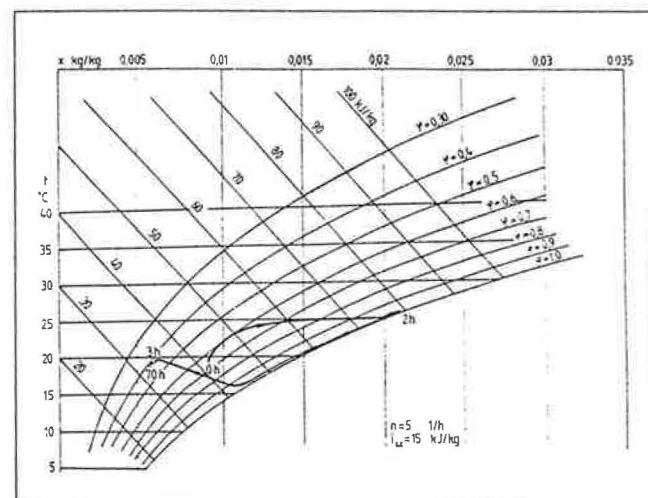


Bild 6 Ablaufkurven der Luftzustandsabänderung

Sättigungszustand. Nach der Beseitigung der Betriebsstörung wird sich die Lufttemperatur infolge der Lüftung wegen der nicht verdunsteten Feuchtigkeit der Sättigungskurve entsprechend vermindern.

Erst danach wird sich der relative Feuchtigkeitsgehalt der Raumluft verringern. Das Diagramm zeigt die Änderung der inneren Raumluftzustände bis zu einer Zeitspanne von 70 Stunden.

Die Veränderung der CO<sub>2</sub>-Konzentration ist selbstverständlich auch ein wichtiger Parameter. Dieser Wert erreicht aber während eines zweistündigen Betriebsausfalls der Lüftung den Grenzwert nicht.

#### Literatur:

1. Adams, J. A. / Rogers, D. F.: Höátvitel – viszgálatok számítógéppel. Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 1979.
2. Badii / Oberhett: Tables of Laplace Transforms Berlin–Heidelberg–New York, Springer, 1973.
3. Carslaw, H. S. / Jaeger, J. C.: Conduction of Heat in Solids. New York, Oxford Univ. Press, 1959.
4. Erdős I. / Kajtár L.: Föld alatti terek instacioner hötechnikai méretezése. Budapest, Épületgépészeti, 1985/3.
5. Grober / Erk / Grigull: Grundgesetze der Wärmeübertragung. Berlin–Göttingen–Heidelberg, Springer-Verlag, 1963.
6. Likov, A. V.: Teoriya teploprovodnosti, Moskva, Gosudarstvennoye izdatelstvo tehnichko-teoreticheskoy literatury, 1952.
7. Schneider, P. J.: Conduction Heat Transfer. Reading, Mass. Addison – Wesley, 1957.