Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 77 (1959)
Heft: 33

Artikel: Vom Raumklima in Luftschutzstollen
Autor: Bader, Emil
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-84298

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

ORGAN DES SCHWEIZERISCHEN INGENIEUR- UND ARCHITEKTEN-VEREINS S.I.A. UND DER GESELLSCHAFT EHEMALIGER STUDIERENDER DER EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE G.E.P.

Vom Raumklima in Luftschutzstollen

DK 628.8:699.852

Von **Emil Bader**, dipl. Ing., Zürich

A. Einleitung

In der Schweiz ist es bekanntlich Pflicht, bei jedem Neubau für die Personen, die darin wohnen oder beschäftigt sind, Schutzräume zu schaffen [1]. Diese sollen die Schutzsuchenden im Krieg vor den Einwirkungen von Kampfgasen, schädlichen Strahlungen, Bakterien, sowie vor Bombensplittern und Druckstössen bewahren. Wie in andern Sparten der Kriegführung, hat die Atombombe auch hier eine neue Lage geschaffen, an die man sich notgedrungenermassen anpassen muss. Abgesehen von der grösseren Zerstörungskraft erzwingt sie infolge der radioaktiven Verseuchung einen längeren Aufenthalt im Schutzraum. So werden beispielsweise in den USA Schutzräume gefordert, die einen Aufenthalt von 14 Tagen ermöglichen [2].

Die Dauer des Aufenthaltes wirkt sich massgebend auf das Klima im Schutzraum aus. Erfahrung und Rechnung zeigen, dass in belegten Schutzräumen Temperatur und Feuchtigkeit der Raumluft rasch ansteigen und die Insassen — falls keine künstliche Kühlvorrichtung vorhanden ist — nach einer gewissen Zeitspanne zum Verlassen des Schutzraumes gezwungen werden. Diese Tatsache war übrigens in Deutschland bereits vor dem zweiten Weltkrieg bekannt. So kommt Prof. *Gröber* [3] auf Grund von Messergebnissen in belegten Schutzräumen, die im Jahre 1935 ermittelt wurden, zum Schluss, dass besonders im Sommer die Luftverhältnisse nicht befriedigen. Weitere Versuche der Auer-Gesellschaft [4] im Jahr 1953 bestätigen, dass innerhalb von acht Stunden die Temperatur auf 26 bis 30° C und die relative Feuchtigkeit auf 80 % und mehr ansteigen kann.

Begreiflicherweise taucht in diesem Zusammenhang immer wieder die Frage auf, wie lange wir in der Schweiz mit einem Aufenthalt im Luftschutzkeller rechnen müssen. Die Vorschriften sagen darüber nichts aus. Wenn die massgebenden Fachleute — in diesem Falle Atomphysiker und militärische Instanzen — keine bestimmte Dauer angeben können, so sollten sämtliche Schutzräume doch mindestens nach einem einheitlichen Pflichtenheft gebaut sein, in der Meinung, dass im Kriegsfalle der General nicht nur mit einer bestimmten Reichweite der Kanonen rechnen kann, sondern auch die Gewissheit hat, dass für die Zivilbevölkerung Schutzräume bereitstehen, die einen Aufenthalt von einer bestimmten Dauer — z. B. 72 Stunden — ermöglichen.

Vom baulichen Standpunkt aus stellt die Berechnung des Temperaturanstieges in Schutzräumen ein Problem der instationären Wärmeleitung dar. Schutzräume sind ja üblicherweise in Kellern eingebaut und grenzen meist ans Erdreich, an Aussenluft sowie an benachbarte Keller- und Wohnräume. Einfacher hingegen gestaltet sich die Rechnung für Luftschutzstollen, welche etwa 20 bis 30 m tief im Boden liegen. Hier lassen sich die in Wirklichkeit auftretenden Verhältnisse gut auf die beim hohlen Zylinder reduzieren, der in einem unendlich ausgedehnten homogenen Material liegt und durch dessen Wände eine zeitlich und räumlich konstante Wärmemenge abfliesst. Bevor wir aber auf die technischen Probleme eingehen, soll versucht werden, die obere Grenze des Luftzustandes zu finden, die den Schutzsuchenden im Kriegsfalle in Schutzräumen noch zugemutet werden darf.

B. Obere Erträglichkeitsgrenze des Raumklimas

Der Zweck einer Klimaanlage besteht darin, in einem bestimmten Raum ein behagliches Raumklima zu schaffen, wobei unter den Behaglichkeitszonen (Bild 1) genau definierte und teilweise sogar normierte (VDI) Luftzustände verstanden werden. Das Problem ist für Schutzräume analog, nur dürfen hier die Anforderungen an die Aufenthaltsbedingungen nicht derart hoch gestellt werden. Hier geht es lediglich darum, unter Verzicht auf allen Komfort einen Aufenthalt von gewisser Dauer garantieren zu können, durch den das blosse Leben gerettet werde.

Tiefe Temperaturen sind in Schutzräumen viel weniger gefährlich als hohe. Erstens sinkt die Temperatur in Kellerräumen auch bei längerem Unterbruch des Heizbetriebs meist nie unter 0° C, zudem kann man sich mit Kleidern und Decken gegen Kälte schützen. Eine Bedingung gegen tiefe Temperaturen aufzustellen scheint demzufolge nicht angezeigt. Hingegen soll zur Winterszeit die eingeblasene Frischluft mittels eines Lufterhitzers auf etwa 25° C aufgeheizt werden können, um in der Nähe der Luftauslässe unangenehme Zugserscheinungen zu verhindern.

Im Gegensatz zur unteren Grenze muss hingegen die Erträglichkeitszone gegen zu hohe Temperatur kritisch betrachtet werden. Kann der Körper die Wärme, die sich infolge langsamer Verbrennung der Nährstoffe bildet, nicht abführen, so entsteht eine Wärmestauung. Der Temperaturanstieg im Körper wächst und kann zu einem Hitzschlag und schliesslich sogar zum Tod führen. Die Schutzsuchenden können die Wärme im Schutzraum zur Hauptsache nur durch Konvektion und Verdunstung abgeben. Da die Wandtemperatur der Lokale nach einer gewissen Aufenthaltsdauer — wie wir noch sehen werden — rasch 25° C und

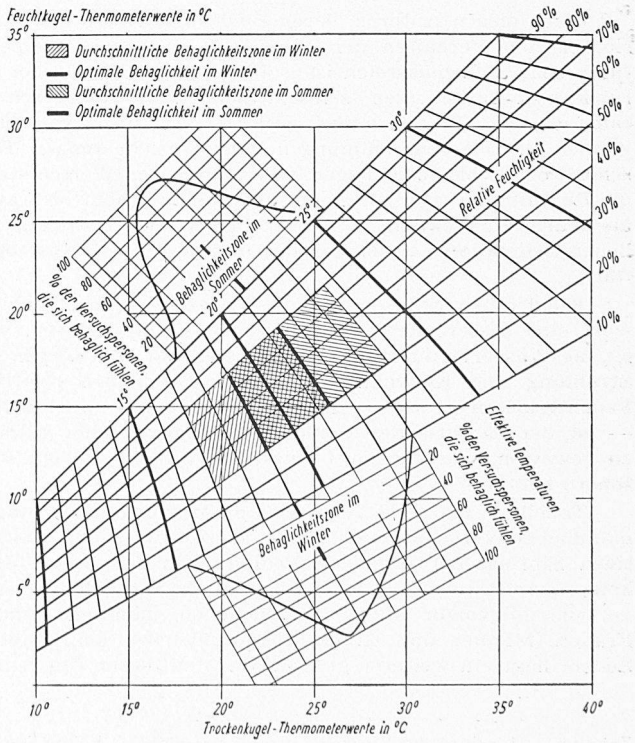


Bild 1. Behaglichkeitszonen aus «Guide 1955» der American Society of Heating and Ventilating Engineers. Uns interessiert hier besonders die Linie mit 25° C effektiver Temperatur und die Tatsache, dass sich bei diesem Luftzustand noch ein geringer Prozentsatz der Versuchspersonen behaglich fühlten

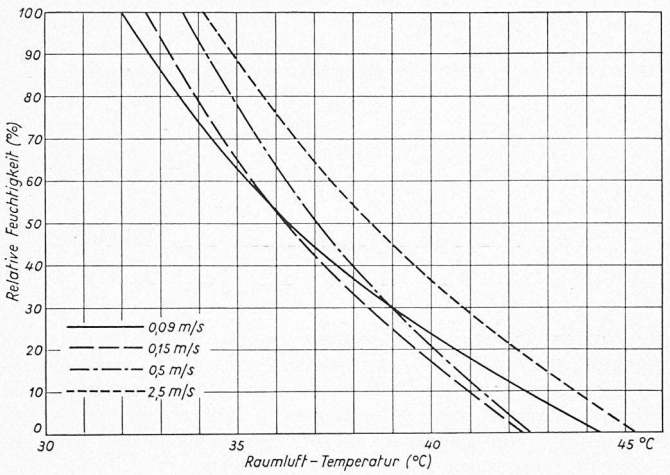


Bild 2. Obere Grenze der Luftzustände, bei denen eine Wärmeregulierung — gemessen an einer ruhenden, nackten Person — noch möglich ist. (Nach Winslow & Herrington [6])

mehr erreichen wird, fällt der sonst sehr wirkungsvolle Austausch durch Strahlung weg. Aber auch jener Anteil, der durch Wasserverdunsten an die Umgebung abgeleitet wird, ist begrenzt, weil die Raumluft — mangels genügender Frischluftzufuhr — im nicht künstlich gekühlten Schutzraum sehr feucht ist.

Aus diesem Grunde sind die Temperaturen, die *C. E. A. Winslow & L. P. Herrington* [5] als obere Grenze der selbsttätigen Wärmeregulierung (wobei nach diesen Autoren für ruhende Personen 85 kcal/h abzuführen sind) bei hohen Luftfeuchtigkeiten angeben, verhältnismässig niedrig (Bild 2). Weiter geht aus Bild 2 hervor, dass erhöhte Luftbewegung im Bereich hoher Feuchtigkeiten das Ertragen von höheren Temperaturen ermöglicht. Bei niedrigen relativen Feuchtigkeiten ist dies nicht der Fall, die Kurven überschneiden sich teilweise. Obwohl die höheren Luftgeschwindigkeiten den Verdunstungsvorgang auf der Haut begünstigen, wird anderseits der rückläufige Wärmefluss von der Raumluft an die kühlere Hautoberfläche gefördert.

Nach diesen Autoren, deren Buch hinsichtlich dem physiologischen Verhalten der Menschen bei hohen Temperaturen sehr aufschlussreich ist, soll die obere Grenze, bei der ruhende Personen den selbsttätigen Wärmeaustausch in Luft, die mit Wasserdampf gesättigt ist, noch vollziehen können (in Uebereinstimmung mit der Ansicht anderer Forscher), bei 30 bis 32° C liegen. Oberhalb diesen Werten steigt die Rektaltemperatur stark an, und zudem erhöht sich auch die Wärmeentwicklung aus einem bisher noch nicht ersichtlichen Grunde, was bei längerem Aufenthalt zur Katastrophe führt.

Kleider bewirken bei niederen relativen Feuchtigkeiten wohl eine bessere Erträglichkeit hoher Temperaturen, weil sie die Wasserverdunstung begünstigen und den Körper vor Strahlung und Konvektion schützen. Bei hohen relativen Feuchtigkeiten — wie sie in Schutzräumen zu erwarten sind — ist der Einfluss der Bekleidung hingegen eher negativ zu bewerten, wie Tabelle 1 zeigt, die von den selben Forschern stammt.

Tabelle 1 und Bild 2 fussen auf Messungen an jungen männlichen Versuchspersonen. Sie decken wohl den qualitativen Einfluss der einzelnen Bedingungen auf, geben aber keine quantitativen Werte der oberen Erträglichkeitsgrenze an, die allgemein auf Schutzsuchende, nämlich Kinder, Frauen, Männer und Greise angewendet werden könnten. Zudem liegt ein weiterer grosser Nachteil dieser Daten hinsichtlich unserer Fragestellung darin, dass keine Angaben über die Dauer gemacht werden, während der diese hohen Temperaturen ausgehalten werden. Berücksichtigt man dazu noch, dass bei jeder Art Menschenansammlung die Gefahr der Panik gross ist, diese anderseits die Wärmeproduktion hinaufsetzt, so wird klar, dass die für uns in Frage kommende Erträglichkeitsgrenze bedeutend unterhalb den Werten von Bild 2 liegen müssen.

Tabelle 1. Einfluss der Kleider auf die Erträglichkeit hoher Temperaturen (aus Winslow und Herrington)

Lufttemp.		° C	50,0	45,0	42,5	40,0	37,5	35,0	32,5	31,0
rel. Feucht.	bekl.	%	5	18	26	38	51	69	89	100
	nackt	%	—	1	13	29	47	70	100	—

Solange noch keine gründlichen Studien und Messungen über Luftzustände vorliegen, die einem breiten Publikum zugemutet werden können, sind die oberen Erträglichkeitsgrenzen in unmittelbarer Nähe der anerkannten Behaglichkeitslinien zu suchen. Hält man sich an die Behaglichkeitszonen nach Bild 1, so ergeben sich als Erträglichkeitsgrenzen folgende Luftzustände:

Temperatur	° C	25	26	28	30	32	34
Relative Feuchtigkeit	%	100	86	60	40	25	10

Diese Zahlenreihe bezeichnet Zustände gleicher Behaglichkeit. Für einen anderen (höheren) Grad von Behaglichkeit lassen sich andere ähnliche Zahlenreihen aufstellen, die bei 100 % relativer Feuchtigkeit mit einer anderen (tieferen) Temperatur beginnen. Diese Anfangstemperatur, der also eine relative Feuchtigkeit von 100 % entspricht, nennt man «effektive Temperatur». Sie stellt einen hauptsächlich in Amerika angewandten Behaglichkeitsmasstab dar.

Die «effektive Temperatur» von 25 ° C liegt entschieden oberhalb der Behaglichkeitszone im Sommer, scheint aber den Insassen doch noch zugemutet werden zu dürfen, da — wie die Kurve links oben in Bild 1 zeigt — noch rd. 8 % der Versuchspersonen derartige Zustände als behaglich erklärten.

C. Einfluss der Belüftung auf das Raumklima

Das Volumen der Schutzräume muss in der Schweiz 2 m³ pro Person betragen. Schutzraumanlagen für mehr als 50 Personen sind künstlich zu belüften und zwar betragen die Raten 2 m³/h pro Person filtrierte und 6 m³/h pro Person unfiltrierte Luft. Das Filter soll einerseits radioaktiven Staub und Bakterien und anderseits Kampfgase zurückhalten. Es besteht aus einer Zelle zur Abscheidung von Schwebstoffen und einem Behälter mit Aktivkohle.

Die Luftrate von 2 m³/h pro Person bewirkt bei einem Rauminhalt von 2 m³ pro Person einen einfachen stündlichen Luftwechsel. Es ist das Mass an Frischluft, die den Aufenthaltsräumen zugeführt werden muss, damit der Kohlensäuregehalt rd. 1 Volumenprozent nicht übersteigt. Bei der Festlegung dieser Luftrate ist also nicht das Raumklima, sondern die chemische Zusammensetzung der Luft der massgebende Faktor. Mit ihr ist, entgegen vielfach herrschender Meinung, der Aufenthalt hinsichtlich der Raumtemperatur nicht gesichert. Denn jenes Mass an Kühlwirkung, das durch das Einführen von kalter Frischluft bei der vorgeschriebenen Rate für den Filterbetrieb erzielt werden kann, ist gegenüber der Wärmemenge, die im Durchschnitt pro Person erzeugt wird (Bild 3), immer noch sehr klein.

In Bild 4 sind im I-x-Diagramm zwei Aussenluftbereiche für Luftraten von 6 und 12 m³/h pro Person angegeben, bei denen für einen bestimmten Innenluftzustand P von beispielsweise 27,5 ° C und 66 % die Kühl- und Trockenwirkung der eingeführten Luft die Wärme- und Feuchtigkeitsentwicklung der Insassen ausgeglichen wird. Dabei ist allerdings vorausgesetzt, dass keine Wärme durch die Aussenwände abfliesst, noch Wasserdampf auskondensiert. Der entsprechende Punkt für Filterbetrieb, d. h. für eine Luftrate von 2 m³/h, würde bei einer Temperatur von etwa 100 ° C liegen, aber nicht einmal mit derart kalter Aussenluft könnte der Innenluftzustand stationär gehalten werden, weil der Feuchtigkeitsgehalt trotz der absolut trocken eingeführten Luft immer noch ansteigen würde.

Aus Bild 4 geht hervor, dass bei 6 m³/h pro Person — dies ist, wie schon erwähnt, jene Luftrate, die gemäss den eidgenössischen Vorschriften bei Filterumgehung, also beim sogenannten Ventilationsbetrieb erforderlich ist — höchstens zur Winterzeit Gleichgewicht zwischen Heizleistung der Personen und Kühlwirkung der Zuluft erlangt werden kann.

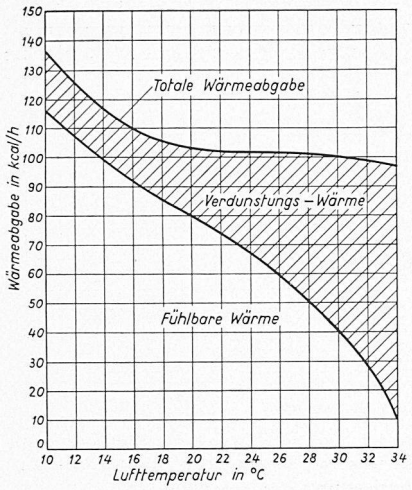


Bild 3. Wämeabgabe von nicht körperliche Arbeit verrichtenden Personen in Abhängigkeit von der Lufttemperatur, wie sie üblicherweise lüftungstechnischen Berechnungen zugrunde gelegt wird. (Aus *Rietschel/Raiss*, «Heiz- und Lüftungstechnik», Springer 1958)

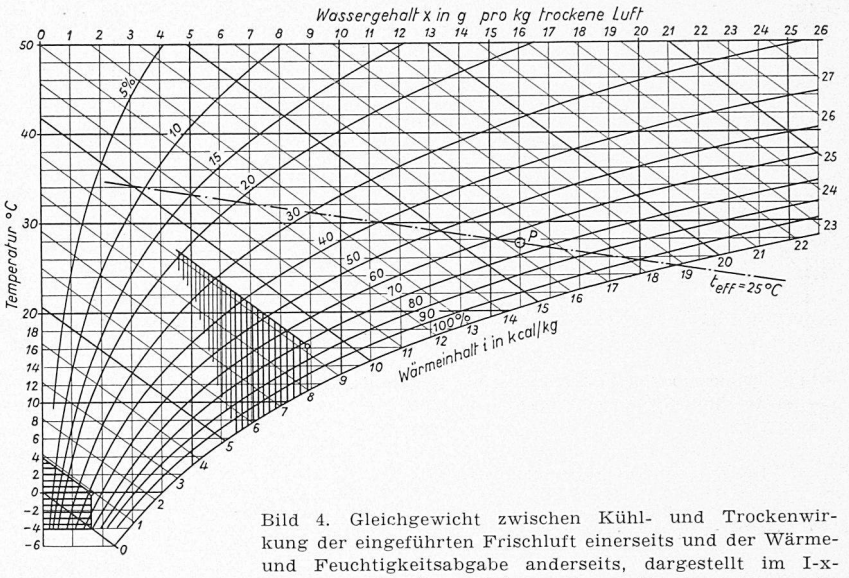


Bild 4. Gleichgewicht zwischen Kühl- und Trockenwirkung der eingeführten Frischluft einerseits und der Wärme- und Feuchtigkeitsabgabe anderseits, dargestellt im I-x-Diagramm für 716 mm QS. P = Raumluftzustand. Die strichpunktierte Linie durch P entspricht einer effektiven Temperatur von 25° C. Der Bereich für eine Luftmenge von 12 m³/h ist vertikal, derjenige für 6 m³/h horizontal schraffiert

Günstiger, aber immer noch knapp, liegen die Verhältnisse bei der zweimal grösseren Luftrate (12 m³/h). Interessanterweise war dieser Wert ursprünglich in den «Richtlinien für den baulichen Luftschutz» des EMD 1949 vorgeschrieben. Da die Beschaffung von Ventilatoren mit den zwei stark voneinander abweichenden Betriebspunkten angeblich Schwierigkeiten bereitet haben soll, wurde später die Leistung für den Ventilationsbetrieb von 12 auf 6 m³/h herabgesetzt [6].

D. Der Abfluss der Wärme ins Erdreich

Um die Frage nach der Raumtemperatur im Stollen beantworten zu können, ist vorerst abzuklären, welche Temperaturen im Erdreich bestehen und unter welchen Bedingungen Wärme von der Stollenwand ins Erdreich abgeleitet wird. Die Temperatur der Erdoberfläche hängt hauptsächlich von der Sonnenbestrahlung ab. Als Mass kann mit einer Genauigkeit, die für unsere Zwecke ausreicht, die Temperatur der Luft jener der Erdoberfläche gleichgesetzt werden. Die täglichen Schwankungen können sich bis in eine Tiefe von etwa ein Meter auswirken, während die Abweichungen vom jährlichen Mittel der Lufttemperaturen — das im schweizerischen Mittelland rd. 9 ° C beträgt — bis auf 6 bis 10 m Tiefe feststellbar sind. Die Gesetze, nach welchen periodische Schwankungen der Erdoberflächentemperatur ins Innere eindringen, sind längst bekannt und beispielsweise im Buch von *Gröber* «Wärmeübertragung», Springer 1957, nachzuschlagen.

Tiefer als 10 m unter dem Erdboden ist die Temperatur konstant und entspricht ungefähr dem jährlichen Mittel der Lufttemperatur, um allmählich gegen das Erdinnere zuzunehmen. Vom Bergbau her weiss man, dass die geothermische Tiefenstufe, d. h. die vertikale Distanz in m, bei der die Temperatur um 1 ° C ansteigt, 20 bis 100 m/° C beträgt. So werden im Simplontunnel — mit einer Ueberlagerung von 2000 m — 50 bis 55 ° C angetroffen.

Zur Berechnung des Wärmeabflusses durch die Stollenwand sollen vorerst folgende Annahmen getroffen werden:

1. Die Oberfläche des Stollens sei ein Kreiszylinder.

2. Die Temperatur, sowie die Stoffwerte (γ, c, λ), seien im Bereich von mindestens 2 m im Umkreis des Stollens konstant.

3. Die Raumluft im Stollen sei überall dieselbe. Diese Annahme deckt sich mit der Forderung nach einer energischen Umwälzung der Raumluft.

4. Der Wärmeanfall durch die Schutzsuchenden (Bild 3), die Beleuchtung, die Ventilation und allfällige weitere Wärmequellen sei während der uns interessierenden Zeitdauer konstant.

Mit diesen Voraussetzungen lässt sich das Problem auf den Fall des hohlen Zylinders im unendlich ausgedehnten Medium zurückführen, wobei für einen konstanten Wärmefluss q in kcal/m² h nach der Temperaturzunahme $\Delta\vartheta_w$ der Stollenwand zur Zeit t gefragt wird, falls zur Zeit $t = 0$ überall die Temperatur ϑ_0 herrscht. Dieses, sowie viele weitere Probleme der Wärmeleitung, sind mittels der *Laplace*-Transformation von *Carslaw* und *Jaeger* [7] gelöst worden. Die allgemeine Gleichung ist kompliziert. Für kleine Werte von $a\,t/R^2$ wird hingegen für die Temperaturerhöhung $\Delta\vartheta$ an einem beliebigen Punkt im Abstand r vom Stollenzentrum folgende relativ einfache Formel angegeben:

$$(1)\qquad \Delta\vartheta = \frac{2q}{\lambda}\sqrt{\left(\frac{a\,R\,t}{r}\right)}\left[i\,\mathrm{erfc}\,\frac{r-R}{2\sqrt{a\,t}} - \frac{(3r-R)\sqrt{a\,t}}{4\,R\,r}\,i^2\,\mathrm{erfc}\,\frac{r-R}{2\sqrt{a\,t}}\ldots\right]$$

Dabei bedeuten:

$a = \lambda/\gamma c$	m²/h	die Temperaturleitzahl
R	m	den Stollenradius
r	m	den Abstand vom Stollenzentrum
γ	kg/m³	das spezifische Gewicht
c	kcal/kg °C	die spezifische Wärme
λ	kcal/m h °C	die Wärmeleitzahl

$$i\,\mathrm{erfc} = \frac{1}{\sqrt{\pi}}e^{-x^2} - x\,\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_x^\infty e^{-\xi^2}\,d\xi$$

$$i^2\,\mathrm{erfc} = \frac{1}{4}\left[(1+2x^2)\,\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_x^\infty e^{-\xi^2}\,d\xi - \frac{2}{\sqrt{\pi}}\,x\,e^{-x^2}\right]$$

Die beiden letzten Ausdrücke sind von der Gausschen Fehlerfunktion (erfc bedeutet error function) abgeleitete Grössen. Im Buch von *Carslaw & Jaeger* sind hierfür numerische Werte in Tabellenform angegeben.

Für $r = R$ geht $\Delta\vartheta$ in $\Delta\vartheta_w$ über und (1) vereinfacht sich zu

$$(2)\qquad \Delta\vartheta_W = \frac{2q}{\lambda}\sqrt{a\,t}\left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} - 0{,}25\,\frac{\sqrt{a\,t}}{R}\right)$$

In Bild 5 ist eine dimensionslose Darstellung des Temperaturanstieges aus dem Buche von Carslaw & Jaeger wiedergegeben, die allerdings mittels Gleichung (2) in jenem Bereich, der uns interessiert, mit grösserer Genauigkeit dargestellt werden konnte.

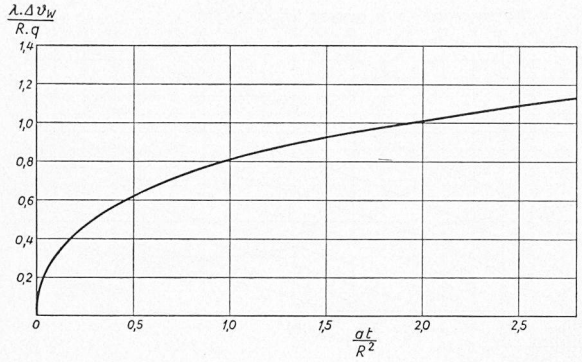


Bild 5. Dimensionslose Darstellung des Temperaturanstieges an der Stollenwand in Funktion der Zeit

Ist $R = \infty$, so geht (2) über in

$$\Delta\vartheta_W = \frac{2\,q}{b\sqrt{\pi}}\sqrt{t} \qquad (3)$$

wobei $b = \sqrt{\lambda\,c\,\gamma}$ die sogenannte Wärmeeindringzahl darstellt. Gleichung (3) sagt aus, dass die Temperatur an einer Wand, die mit konstanter Intensität geheizt wird, proportional der Quadratwurzel der Zeit ansteigt.

Der Einfluss der Wölbung ist aus Bild 6 erkennbar. Man sieht, dass in jenen Bereichen, die uns hier interessieren, für den Temperaturanstieg der Stollenwand mit genügender Genauigkeit durchwegs die Formel für die gerade Wand angewendet werden kann.

In Bild 7 ist der Temperaturanstieg in Funktion der Zeit für die uns interessierenden Werte q/b nach Gl. (3) dargestellt. Bild 8 zeigt den Temperaturverlauf im unendlich ausgedehnten Körper bei ebener Abgrenzung und konstanter Heizleistung q. Er wurde mit folgender Formel aus [7] berechnet:

$$\vartheta = \frac{2\,q\sqrt{a\,t}}{\lambda}\,i\,\mathrm{erfc}\,\frac{x}{2\sqrt{a\,t}}$$

Man erkennt, dass die Wärme nicht tief eindringt, sondern das thermische Geschehen sich im Temperatur- und Zeitbereich, das für Schutzräume in Frage kommt, in unmittelbarer Nähe der Oberfläche abspielt.

In Tabelle 2 sind einige Stoffwerte, die beim Stollenbau in Frage kommen, angegeben. Da die Bezeichnung der Stoffe Sammelnamen sind — bekanntlich gibt es verschiedene Arten «Sandstein» —, so werden die Zahlenwerte selten für einen konkreten Fall genau stimmen. Hingegen geben sie

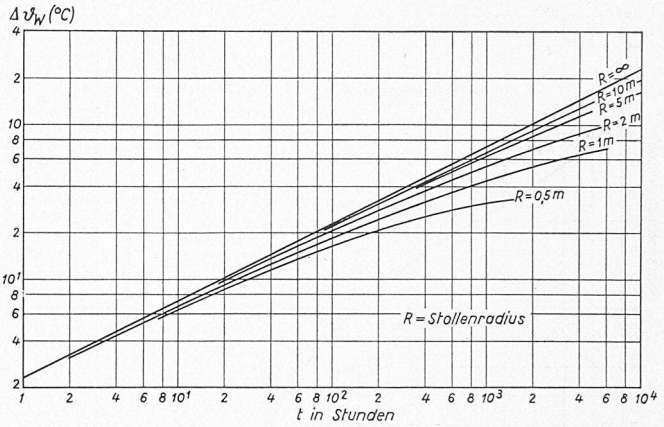


Bild 6. Temperaturanstieg an der Stollenwand für Stoffwerte, die ungefähr jenen von Beton entsprechen: $c = 0{,}21$; $\lambda = 1{,}3$; $\gamma = 2200$ und für eine konstante Heizleistung von 50 kcal/m² h

einen Begriff über die Grössenordnung. Zudem beeinflusst die Feuchtigkeit die Wärmeleitfähigkeit sehr stark — wohl mit ein Grund, weshalb beispielsweise für «Böden» in der

Tabelle 2. Stoffwerte für Baugründe und Baustoffe

	Gew. Spez. γ kg/m³	Spez. Wärme c kcal/kg°C	Wärmeleitzahl λ kcal/mh°C	Temp.-leitzahl a m²/h	Wärmeeindringzahl b kcal/m² °C$\sqrt{\text{h}}$
Granit	2600	0,21	2,2	0,0040	34,7
Kalkstein	2500	0,22	1,4	0,0025	27,8
Sandstein	2300	0,23	2,2	0,0042	34,2
Boden (Mittel)	2500	0,20	0,83	0,0017	20,4
Boden, sandig, trocken	1650	0,19	0,23	0,0007	8,5
Boden, sandig, 8 % feucht	1750	0,24	0,50	0,0012	14,5
Kiesbeton, lufttrocken	1800	0,21	0,80	0,0021	17,4
Kiesbeton, lufttrocken	2200	0,21	1,30	0,0028	24,5
Backsteinmauer, lufttrocken	1400	0,20	0,50	0,0018	11,8
Backsteinmauer, lufttrocken	1800	0,20	0,70	0,0019	15,9

Die Zahlen der ersten 6 Reihen stammen aus *Carslaw & Jaeger*, der Rest wurde *Rietschel/Raiss:* Heiz- und Lüftungstechnik, 1958, entnommen.

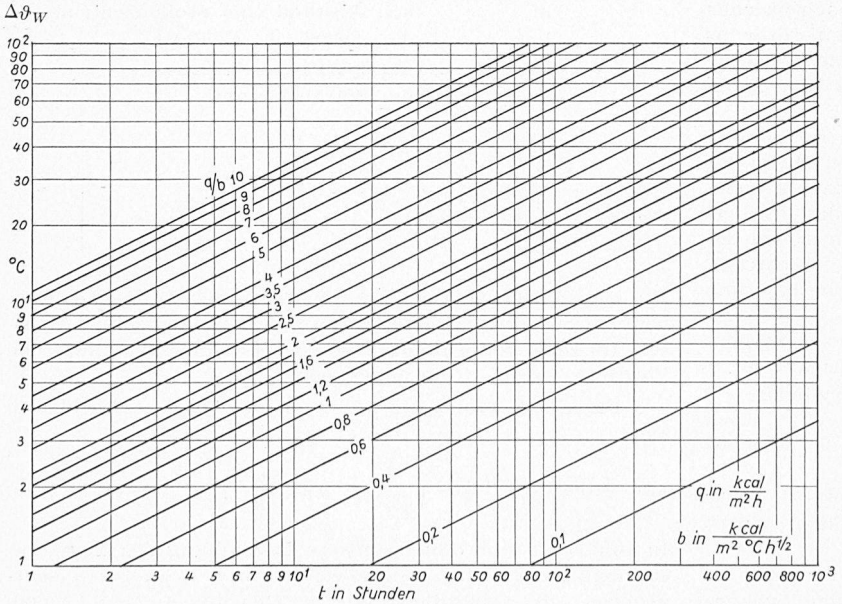


Bild 7. Wandtemperaturanstieg am ebenen, unendlich ausgedehnten Körper für konstante Verhältnisse des Wärmeflusses q zur Wärmeeindringzahl b

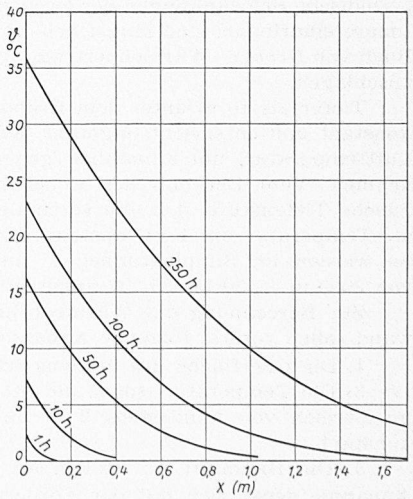


Bild 8. Temperaturverlauf im ebenen, unendlich ausgedehnten Körper bei konstanter Heizleistung ($q = 50$ kcal/m² h) für die Stoffwerte von Beton

Literatur sehr stark voneinander abweichende Werte angetroffen werden.

Um zu zeigen, wie weitgehend Wärmeleitprobleme bereits analytisch gelöst sind, soll hier kurz der interessante Aufsatz von *Hans Künzler* [8] gestreift werden, der ein verwandtes Thema behandelt. Es geht dabei hauptsächlich um die folgenden Wärmeleitprobleme:

In einer Platte (bzw. einem Hohlzylinder oder einer Hohlkugel) aus homogenem Material mit unendlicher Ausdehnung (Bild 9) herrsche zur Zeit $t = 0$ überall die Temperatur ϑ_0. Von diesem Zeitpunkt an wird bei $x = 0$ (bzw. $r = R$) Wärme an die Raumluft abgestrahlt, deren Temperatur 0 sei. Die pro Zeit- und Flächeneinheit ausgetauschte Wärme sei $\vartheta_w \cdot \alpha$, wobei ϑ_w die Wandtemperatur und α der Wärmeübergangskoeffizient sei.
Die Gleichungen lauten:

a) *Ebene Begrenzung*

$$(5) \qquad \frac{\vartheta_W}{\vartheta_0} = e^{\left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2 a\,t} \operatorname{erfc} \frac{\alpha}{\lambda} \sqrt{a\,t}$$

erfc ist wiederum ein Ausdruck, der die Gaussche Fehlerfunktion enthält. Die Grössen $z = e^{y^2} \operatorname{erfc} y$ sind übrigens für $y = 0$ bis 3,0 im Buch von Carslaw & Jaeger angegeben.

b) *Zylindrische Begrenzung*

Der Ausdruck für ϑ_w/ϑ_0 ist ziemlich kompliziert, kann aber doch explizite angegeben werden. Carslaw & Jaeger geben eine Kurvenschar $(\vartheta_w/\vartheta_0)$ $(a\,t/R^2)$ mit $(R \cdot \alpha/\lambda)$ als Parameter an.

c) *Kugelförmige Begrenzung*

$$(6) \qquad \frac{\vartheta_W}{\vartheta_0} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{R\frac{\alpha}{\lambda}}} (1 - e^{y^2} \operatorname{erfc} y)$$

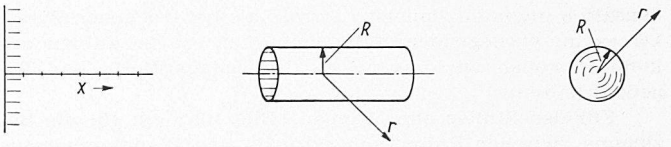
Man beachte, dass der Ausdruck $e^{y^2} \operatorname{erfc} y$ tabelliert ist. Für y ist $(\alpha/\lambda + 1/R)\sqrt{a\,t}$ einzusetzen. (6) geht für $R = 0$ in (5) über.

Künzler löste diese Aufgaben graphisch mittels dem Schmidtschen Differenzverfahren, das für diese Zwecke — gegenüber der analytischen Methode — sicher umständlicher ist. Die Kontrolle einiger Punkte hat allerdings gezeigt, dass auch mit der graphischen Methode eine bemerkenswerte Genauigkeit erlangt werden kann.

E. Die Rolle der Feuchtigkeit

Wie im Tunnelbau, so beeinflusst auch im Luftschutzstollen das Wasser, das vom Berg her eindringt, das Raumklima. Ob die Gefahr besteht, dass beim Bau des Stollens eine Quelle angeschlagen wird, ist Sache des Geologen. Ist der Baugrund sicher trocken, so wird meist die Bauweise ohne Einbau vorgezogen. Wird hingegen Wasser erwartet, so ist ein Einbau (z. B. nach Bild 10b) angezeigt, weil hier an der äusseren Umhüllung des Bauwerkes, das in den Tunnel gestellt wird, eine wasserundurchdringliche Schicht zuverlässig aufgebracht werden kann. Im Stollen ohne Einbau könnte zwischen Fels und Ummantelung natürlich auch eine Feuchtigkeitssperre eingebracht werden, nur ist diese Arbeit offensichtlich sehr teuer. In der Praxis hat sich gezeigt, dass das System nach Bild 10b weniger aufwendig ist. Bei ihm kann zudem die Feuchtigkeitssperre jederzeit überwacht und ausgebessert werden. Dringt beim Stollen ohne Einbau an etlichen Stellen Wasser ein, so wird die Luftfeuchtigkeit allerdings nicht unbedingt erhöht. Gelingt es nämlich, das Wasser zu fassen und abzuleiten, so dass keine grossen Flächen der Innenauskleidung feucht werden, so ist diese Gefahr gebannt.

Die schwedischen Vorschriften [9] (Abschnitt 19/1) verlangen folgende Massnahmen: «Die Auskleidung der Stollenwände soll möglichst wasserdicht sein, wobei eine Wärmeisolierung nicht erforderlich ist. Dach und Wände können aus Stahlblech, Eternit, Beton oder Mauerwerk bestehen. Die Oberfläche gegen den Berg zu ist mit einer zusammenhängenden Asphaltschicht zu versehen. Weiterhin ist von grosser Wichtigkeit, dass Ritze zwischen den Blechen bzw. den Eternitplatten sorgfältig abgedichtet werden. Der Boden, der aus armiertem Beton auszuführen ist, soll auf einem gut drainierten Bett liegen und so ausgeführt werden, dass kein Wasser vom Beton aufgesaugt werden kann.»



Ebene Wand Zylinder Kugel

Bild 9. Einseitig unendlich ausgedehnte Körper

Anderer Art, aber nicht weniger wichtig, ist die Feuchtigkeit, die von den Personen abgegeben wird. Die Hautdrüsen scheiden Wasser in flüssiger Form aus, das die Hautoberfläche und die Kleider benetzt. Eine dünne Luftschicht auf der Haut — die Grenzschicht — ist demzufolge mit Wasserdampf gesättigt und weist annähernd die Temperatur der Oberfläche auf, also z. B. im Extremfall 37 ° C. Weil der Dampfdruck der Raumluft kleiner als jener in der Grenzschicht ist, diffundiert der Wasserdampf in die Umgebung. Zur Speisung der Grenzschicht mit Dampf muss andauernd Wasser verdunstet werden. Der Wechsel des Aggregatzustandes erfordert Wärme, die dem Körper entzogen wird. Wegen dem geringen Frischluftwechsel — einmal pro Stunde bei Filterbetrieb — steigt bei besetztem Stollen der Feuchtigkeitsgehalt rasch an, so dass an jenen Orten, deren Temperatur unterhalb dem Taupunkt der Raumluft liegt — dies sind hauptsächlich die Umwandungen — bald Kondensation eintritt.

Beim Kondensieren vollzieht sich der umgekehrte Vorgang wie beim Verdampfen, die Kondensationswärme wird an den Fels übertragen und addiert sich zu jener, die infolge des Temperaturgefälles zwischen Raumluft und Wand abgeleitet wird und mengenmässig der «fühlbaren Wärme» von Bild 3 entspricht.

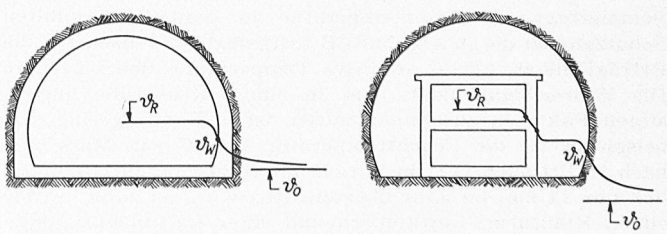
Als quantitatives Mass der Wärme- und Feuchtigkeitsabgabe der Personen sind wir auf die Kurven von Bild 3 angewiesen, die aus dem Jahre 1932 stammen, aber immer noch in die Fachliteratur aufgenommen werden (s. z. B. *Rietschel-Raiss:* Heiz- und Lüftungstechnik, 13. Aufl., 1958). Die Gesamtwärmeabgabe, die glücklicherweise zwischen 20 bis 32° C konstant verläuft und rd. 100 kcal/h beträgt, ist demzufolge im nicht belüfteten Stollen voll an das Erdreich abzuleiten.

F. Der Wärmeübergang von der Raumluft an die Stollenwand

Das Mass der relativen Feuchtigkeit der Raumluft hängt hauptsächlich von der Wärmeübergangszahl ab. Ist diese klein, so ist eine grosse Temperaturdifferenz notwendig, damit die erzeugte Wärmemenge abgeführt werden kann. Dies hat zur Folge, dass die Raumtemperatur rasch ansteigt, was nicht erwünscht ist. Auch aus diesem Grunde ist für eine gute Umwälzung der Raumluft zu sorgen, denn dadurch wird der Wärmeübergang von der Luft an den Fels gefördert. Die Wärmeübergangszahl α ist im Falle von Kon-

Tabelle 3. Wärmeübergangszahlen in kcal/m², h, °C (genaue Werte siehe [10])

	ruhende Luft	Luftgeschwindigkeit 2 m/s
mit Kondensation	10	40
ohne Kondensation	5	20



a) ohne Einbau b) mit Einbau

Bild 10. Temperaturverlauf für die beiden Stollenbauarten

densation ungefähr doppelt so gross als bei trockener Wand. Da es im vorliegenden Falle nicht auf exakte Zahlen ankommt, wollen wir uns an die Näherungs-Werte der Tabelle 3 halten:

Für den Stollen ohne Einbau (Bild 10a) gilt für die Beziehung zwischen Raumtemperatur δ_R und Wandtemperatur δ_W

$$(7) \quad \vartheta_R - \vartheta_W = \frac{q}{\alpha}$$

(7) in (3) eingesetzt ergibt

$$(8) \quad \vartheta_R = \frac{q}{\alpha} + \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{q}{b} \sqrt{t} + \vartheta_0$$

Dies ist die Gleichung, die *L. Nisolle* [11] für Anheizvorgänge angibt. Dabei muss man sich aber immer bewusst sein, das die Formel strenggenommen nur für unendlich dicke Mauern gilt.

Für einen Stollen mit Einbau ist angenähert:

$$(9) \quad \vartheta_R - \vartheta_W = q \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{\alpha} \right)$$

und (9) in (3) eingesetzt:

$$(10) \quad \vartheta_R = q \left(\frac{1}{k} + \frac{1}{\alpha} + \frac{2}{b\sqrt{\pi}} \sqrt{t} \right) + \vartheta_0$$

Dabei bedeutet k die Wärmedurchgangszahl der Mauer des Innenausbaues. In Gleichung (10) ist die Verzögerung nicht berücksichtigt, welche sich einstellt, weil ein gewisser Anteil der erzeugten Wärme zum Aufheizen der Einbaumauer aufgefangen wird. Die Formel gibt also zu hohe Raumtemperaturen und zwar um so mehr, je dicker die Mauern des Einbaues und je kürzer die Zeit t ist.

G. Künstliche Kühlung

Wird der Temperaturanstieg im Luftschutzstollen als unzumutbar hoch empfunden, d. h. erreicht der Luftzustand vor einer bestimmten (vorerst leider noch nicht festgelegten) Zeitdauer — z. B. 72 Stunden — den kritischen Wert, der einer effektiven Temperatur von 25° C entspricht, so muss entweder der Frischluftanteil erhöht, oder eine Kälteanlage vorgesehen werden. Erstere Massnahme scheitert an der Tatsache, dass sehr grosse Luftmengen eingeführt werden müssten, um während heissen Tagen eine nutzbringende Kühlung zu bewirken. Dabei ist zu bedenken, dass die Aussenluftmenge wegen der Filtrierung eng begrenzt ist. Daher bleibt nur das Aufstellen einer Kälteanlage übrig, deren Leistung so gross sein muss, dass folgende Wärmeanfälle abgeführt werden können:

1. Wärmeerzeugung der Schutzsuchenden;
2. Leistung der Beleuchtung und der Ventilatoren;
3. Allfällige zusätzliche Wärmemengen zum Kondensieren von Feuchtigkeit, die durch die Wände eindringt.

Als Kühlvorrichtung werden verwendet: entweder kaltes Wasser von Quelle, Bach, See, oder Grundwasser. Der Austausch an die Luft erfolgt mittels Rippenrohren, oder eine Kältemaschine mit Wärmeabgabe an Wasser oder Luft oder ein Kühlturm mit Rippenrohr-Luftkühler. Die Lösung mit dem Kühlturm ist den vorliegenden Bedingungen am besten angepasst. Ein Kühlturm besteht zur Hauptsache aus Pumpe, Ventilator, Füllmaterial und Wasserleitungen, braucht keine Regulierung und ist von aussen unabhängig, weil er nur relativ wenig Wasser braucht, für das ein Reservoir vorgesehen werden kann. Zugegebenermassen wird für heisse Sommertage die Raumtemperatur in derartig gekühlten Schutzstollen die in Abschnitt B festgelegten Grenzen für die Erträglichkeit (25° C effektive Temperatur) überschreiten. Die Wahrscheinlichkeit, dass in einem Krieg alle ungünstigen Faktoren zusammentreffen, ist aber nur gering. Sei beispielsweise die Feuchttemperatur 18,5° C, ein Mass, das nach H. Uttinger [12] in Zürich um 13.30 Uhr durchschnittlich nur 14 mal im Jahr überschritten wird, so kann mittels einem Kühlturm, Luftkühlern und einer Luftumwälzanlage eine Raumtemperatur von 30° C noch eingehalten werden. Die relative Feuchtigkeit wird dann allerdings etwa 80 % betragen und somit der Luftzustand einer effektiven Temperatur von 28° C und nicht 25° C entsprechen.

H. Beispiel

Ein Stollen mit Querschnitt nach Bild 10a weise folgende Daten auf:

Umfang	22,3	m	Grundfläche	278	m²
Länge	36	m	Oberfläche	804	m²
Querschnitt	33	m²	Volumen	1186	m³

Die darin erzeugte Wärme setze sich aus folgenden Beträgen zusammen: 500 Personen zu je 100 kcal/h = 50 000 kcal/h, Beleuchtung 6 Watt/m² = 1400 kcal/h, Ventilation 3 PS = 1900 kcal/h, total 53 300 kcal/h. Der Wärmefluss ist

$$q = \frac{53\,300}{804} = 66{,}4 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$$

Die Dicke der Ausmauerung betrage 40 cm; für die Ausmauerung werden die Wärmeleit-Stoffwerte von Beton gewählt. Dies ist berechtigt, weil der Temperaturverlauf in tieferen Schichten das Raumklima während der kurzen Zeit, die uns hier interessiert, nicht stark beeinflusst, Bild 8. Nach Tabelle 2 kann $b = 24{,}5$ kcal/°C, m², $\sqrt{h}$ gesetzt werden. Wird nicht künstlich gekühlt, so stellen sich bei Filterbetrieb, d. h. einer praktisch nicht ins Gewicht fallenden Frischluftzufuhr die in Tabelle 4 angegebenen Verhältnisse ein. Im Falle stagnierender Raumluft (Luftgeschwindigkeit = 0) — natürlich ein idealisierter Fall, der in Wirklichkeit kaum je auftritt — wird der kritische Zustand — d. h. Ueberschreitung der Linie mit 25° C effektiver Temperatur — nach 15 Stunden erreicht, während dies bei bewegter Raumluft erst nach 23 Stunden der Fall sein wird. Da Kondensation an Wänden, Decken und Boden schon bald nach der Belegung eintritt, soll eine Zwischendecke zum Auffangen der Wassertropfen eingebaut werden.

Tabelle 4

Zeit h	Wandtemperatur Anstieg	Wert	Raumluft-Zustand Luftgeschw. = 0		Luftgeschw. 2 m/s	
t	$\Delta\vartheta_W$ [°C]	ϑ_W [°C]	ϑ_R [°C]	φ^*) [%]	ϑ_R [°C]	φ^*) [%]
0	0	9	9	90	9	90
1	3	12	18,6	65	13,7	89
2	4,3	13,3	20,0	67	15,0	89
5	6,8	15,8	22,4	67	17,5	89
10	9,7	18,7	25,3	68	20,4	90
15	11,9	20,9	27,5	68	22,6	91
20	13,8	22,8	29,4	68	24,5	91
30	16,8	25,8	32,4	68	27,5	91
40	19,4	28,4	35,0	70	30,1	92

Literaturverzeichnis

[1] Bundesbeschluss betreffend den baulichen Luftschutz, 21. Dezember 1950.

[2] Civil Defence Technical Bulletin, Mai 1958. U. S. Government Printing Office, Washington 25, D. C.

[3] Prof. *Gröber:* Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse in Schutzräumen, «Draeger-Heft» Nr. 188, 1937.

[4] Ueber die Luftverhältnisse in Luftschutzräumen in Verbindung mit Grobsandfiltern, «Schriftenreihe über zivilen Luftschutz», Heft 2. Verlag Gasschutz und Luftschutz Dr. Ebeling, Koblenz.

[5] *C. E. A. Winslow* and *L. P. Herrington:* Temperature and human life. 1949, Princetow University Press.

[6] Merkblatt 6 und 6bis des EMD vom 28. 10. 1953.

[7] *H. S. Carslaw* and *J. C. Jaeger:* Conduction of heat in solids, Oxford, Clarendon Press 1959.

[8] *Hans Künzler:* Die Bestimmung der Lüftungsbedingungen bei nicht klimatisierten Untertagbauten, SBZ 1959, Heft 4, S. 43.

[9] Vorschriften für den Bau von Schutzräumen des Königlichen Zivilverteidigungsamtes, Stockholm, 1. Sept. 1950.

[10] *J. S. Cammerer:* Wärme- und Kälteschutz in der Industrie. Berlin, Göttingen, Heidelberg 1959, Springer.

[11] *L. Nisolle:* Anheizbedarf nach längeren Betriebsunterbrechungen für Grossräume, «Gesundheitsingenieur» 1936, Nr. 12, Seiten 163—166.

[12] *H. Uttinger:* Relative Feuchtigkeit, Wasserdampfgehalt und Wärmeinhalt der Luft an warmen Tagen in Zürich, «Annalen der Schweiz. Meteorologischen Zentralanstalt», 1957.

Adresse des Verfassers: *Emil Bader,* dipl. Ing., Ingenieurbüro, Gubelstrasse 59, Zürich 11/50.