

Einfluß des Grundwassers auf den Wärmeverlust beheizter Keller

*Dipl.-Ing. Karl-Heinz Dahlem / Prof. Dr. rer. nat. Hermann Heinrich
Universität Kaiserslautern
Bauphysik - Technische Gebäudeausrüstung - Baulicher Brandschutz
Postfach 3049, D 67653 Kaiserslautern
Tel. +49 631 205 4274
Fax. +49 631 205 4131
e-mail dahlem@rhrk.uni-kl.de*

Zusammenfassung

Der Wärmeverlust erdreichberührter Bauteile findet zum Teil über das Erdreich an die Außenluft statt, zum Teil jedoch in die tieferen Erdschichten beziehungsweise in gegebenenfalls vorhandenes Grundwasser. In dieser Arbeit wird der Einfluß des Grundwassers auf diese Wärmeverluste genauer beschrieben. Die hier gezeigten Abhängigkeiten sind das Resultat einer umfangreichen Untersuchung mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode. Hier sind die oberen Grenzen dieses Einflußfaktors dargestellt. Dabei wird immer die Differenz zum ungestörten Fall (ohne Grundwasser) betrachtet. Als wichtigste Einflußparameter sind hier die Grundwassergeschwindigkeit und der Abstand des Grundwassers zum Kellerboden zu nennen. Die Kellergeometrie und die wärmeschutztechnischen Eigenschaften zeigen ebenfalls einen Einfluß, sind jedoch von geringerer Bedeutung. Im Vergleich zum ungestörten Fall ohne Grundwasser können für den gesamten Keller Erhöhungen der Wärmeverluste um den Faktor 10 auftreten.

1. Einleitung

Die Wärmeverluste erdreichberührter Bauteile setzen sich zusammen aus einem Teil durch den Boden zur Außenluft Q_{AL} , einen Teil ins tiefe Erdreich Q_{Bo} und einen Teil ins Grundwasser Q_{GW} (Bild 1). Diese einzelnen Anteile treten meist gleichzeitig auf. Grundsätzlich sind die Wärmeströme der erdreichberührten Bauteile als zwei- und dreidimensional zu betrachten.

Eine allgemeine analytische Lösung für diese Problemstellung existiert nicht. Lediglich für wenige Fälle mit speziellen Geometrien und Randbedingungen sind solche analytischen Lösungen vorhanden. Diese in der Literatur bisher gegebenen Lösungen gelten jedoch meist nur für den Fall ohne strömendes Grundwasser, also nur für Wärmetransport ohne Berücksichtigung des gleichzeitigen Stofftransportes. Damit wird aber die durch das fließende Grundwasser erzwungene Konvektion nicht berücksichtigt. Die Kritik an den einzelnen Verfahren ist näher beschrieben in /2,4,6/.

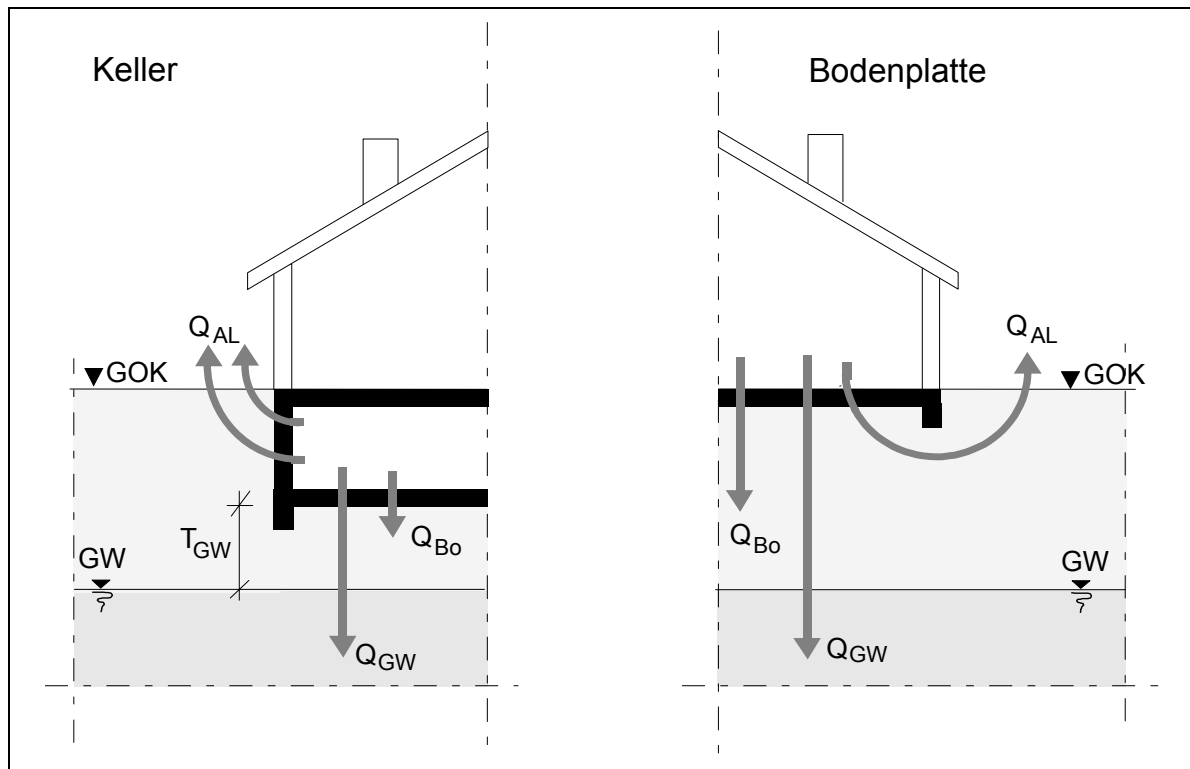


Bild 1 : Wärmeverlust erdreichberührter Bauteile

Im realen Fall sind die Anteile des Wärmestroms an die Außenluft, ins tiefe Erdreich und ins Grundwasser miteinander gekoppelt. Die Größe und Aufteilung dieser Einzelkomponenten sind sehr stark von der Beschaffenheit des Erdreichs abhängig. Der bedeutendste Faktor bezüglich des Wärmestroms, der durch das Grundwasser verursacht wird, ist hierbei die Grundwassergeschwindigkeit.

2. Temperaturverlauf im ungestörten Erdreich

Die Temperatur im ungestörten Erdreich ist beeinflusst durch den Temperaturgang an der Erdoberfläche und die Temperatur im tiefen Erdreich. In größeren Tiefen spielt der geothermische Gradient noch eine Rolle, welcher etwa 1,5 bis 4 K pro 100 m Tiefenänderung beträgt. Dieser wirkt sich also nur in großen Tiefen aus und spielt deshalb für Probleme, die mit dem Wärmestrom von Gebäuden zusammenhängen, keine Rolle.

Die Außenlufttemperatur hingegen wirkt sich nur auf die oberen Erdbodenschichten aus. Dabei ist zwischen den täglichen und den jährlichen Schwankungen zu unterscheiden. Die täglichen Temperaturgänge wirken sich lediglich auf die oberen 50 bis 100 cm aus. Die jährlichen zeigen eine Einflusstiefe von 10 bis 20 m, je nach Bodenart und Vegetation. Deshalb sind nur die jährlichen Temperaturgänge für die Wärmetransportphänomene der Gebäude von Interesse.

Aufgrund der jährlichen Außenlufttemperaturschwankungen, kann die Erdoberflächentemperatur im jährlichen Verlauf als Sinusfunktion angegeben werden. Für den ungestörten Fall kann damit die mathematische Lösung für den halbbunendlichen Raum, ergänzt um den geothermischen

Gradienten, benutzt werden, um den Temperaturgang im Erdreich zu berechnen /3/. Damit ergibt sich:

$$\vartheta_{E(z,t)} = \vartheta_0 + G \cdot z + \vartheta_1 \cdot e^{-z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a \cdot t_0}}} \cos\left(z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{a \cdot t_0}} - 2\pi \cdot \frac{t}{t_0}\right) \quad (1)$$

$\vartheta_{E(z,t)}$ Erdreichtemperatur in der Tiefe z zum Zeitpunkt t

G geothermischer Gradient

ϑ_0 jährliche mittlere Erdreichoberflächentemperatur

ϑ_1 Amplitude der Erdreichoberflächentemperatur

t_0 Periode der Sinusfunktion - hier 1 Jahr

a Temperaturleitfähigkeit des Bodens $a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$

λ Wärmeleitfähigkeit des Bodens

c spez. Wärmekapazität des Bodens

ρ Dichte des Bodens

In dieser Formel ist der Einfluß der Temperaturleitfähigkeit deutlich zu erkennen, also die Abhängigkeit vom Bodentyp. Die Eindringtiefe kann im Bereich von etwa 10 m bis 25 m liegen. Dabei muß jedoch gesehen werden, daß nicht der Bodentyp allein sondern auch der Feuchtegehalt oder vorhandenes Grundwasser von Bedeutung sind.

Die jährlichen Bodentemperaturkurven für einen ungestörten Fall ohne Grundwasser sind für unterschiedliche Tiefen in Bild 2 dargestellt.

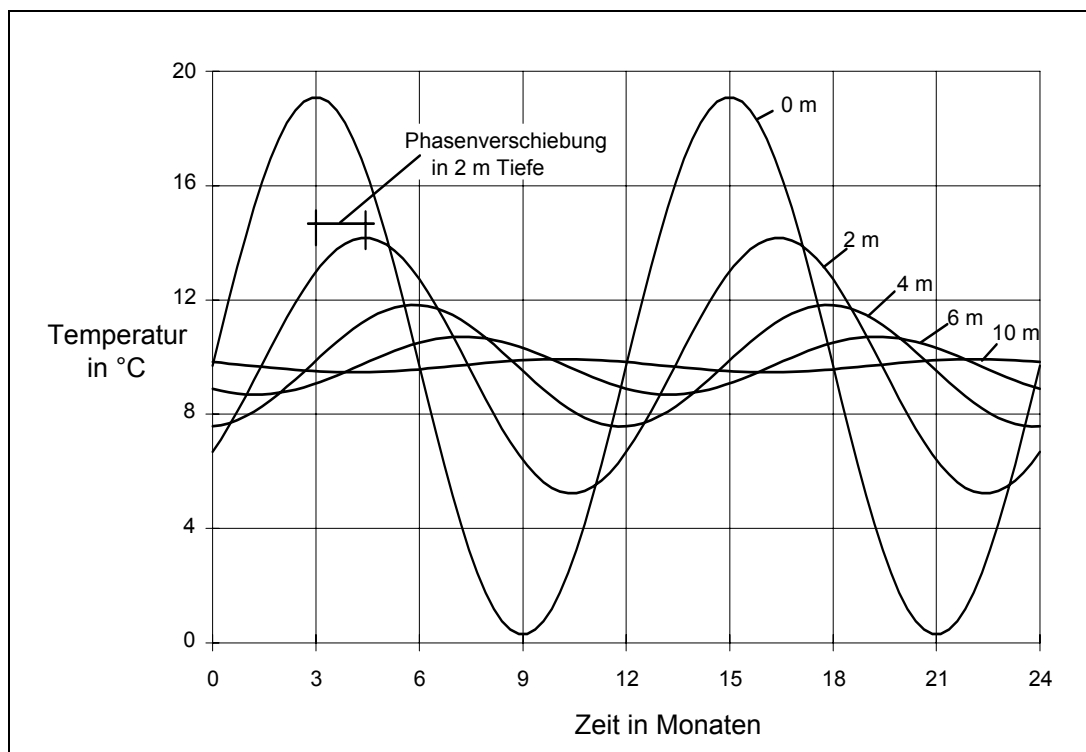


Bild 2 : Jahresgang der Temperatur im ungestörten Erdreich für bestimmte Tiefen

Diese Kurven zeigen deutlich die Abnahme der Amplitude und die Phasenverschiebung mit zunehmender Tiefe. Diese Effekte bewirken eine

Reduzierung und eine Phasenverschiebung der Wärmeströme erdreichberührter Bauteile im Gegensatz zu Bauteilen, die mit der Außenluft in Kontakt stehen.

In Bild 3 sind die tiefenabhängigen Temperaturen für ausgewählte Monate aufgetragen. Diese Verläufe sind mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode simuliert, da mit Formel (1) nur der Fall für homogenes Material berechnet werden kann. Bei vorhandenem Grundwasser muß jedoch mit unterschiedlichen wärmetechnischen Parametern gerechnet werden, also mit inhomogenem Material. Der gesättigte Bereich weist eine größere Wärmeleitfähigkeit und ein höheres Wärmespeichervermögen auf. Das Grundwasser bedingt in seinem Einflußbereich geringere Temperaturamplituden, da die Eindringtiefe der Außenlufttemperatur verringert wird. Trotzdem ist immer noch ein deutlicher Einfluß des Jahresganges der Außenlufttemperatur zu erkennen, auch in der Grundwassertemperatur.

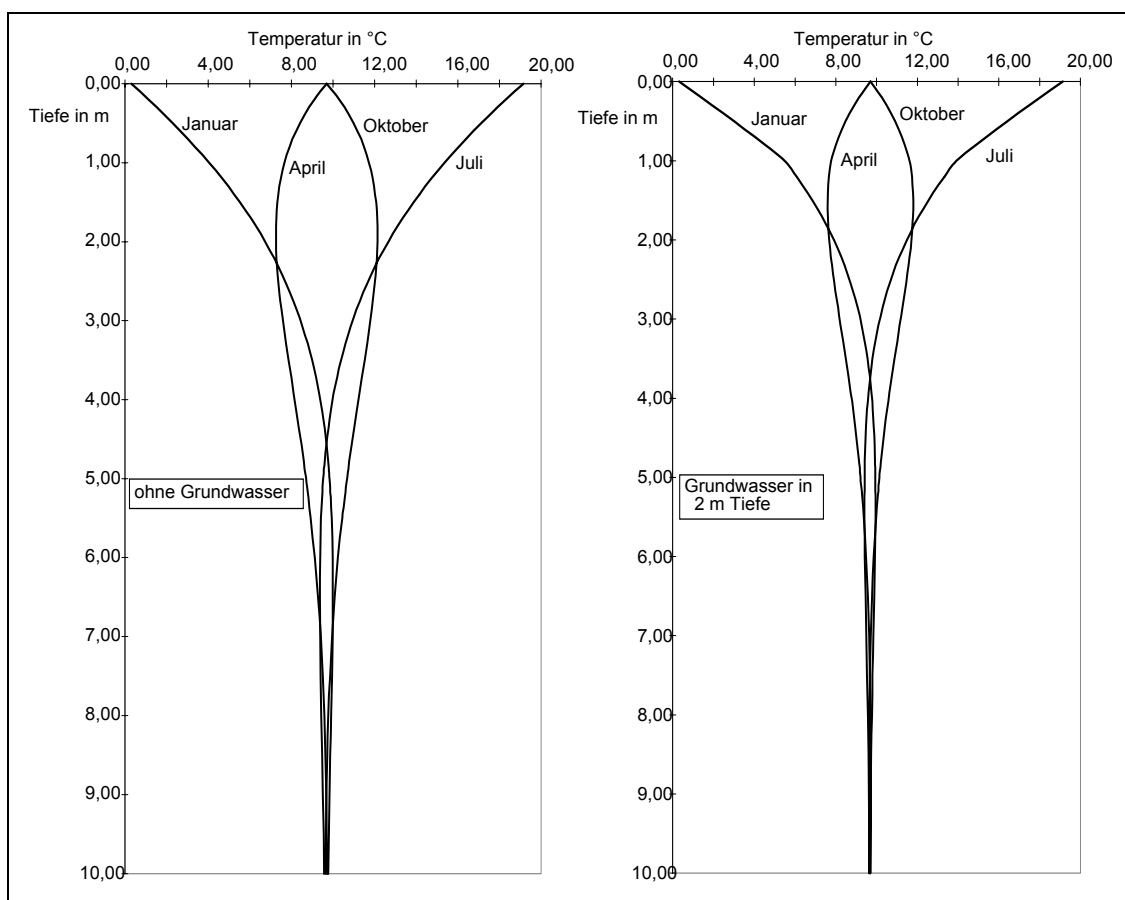


Bild 3 : Temperaturverläufe im Erdreich für unterschiedliche Monate

Wie hier gezeigt ist die Temperatur des Grundwassers in größeren Tiefen (> 7m) übers Jahr fast konstant. Dies ist der Grund, weshalb die meisten Berechnungsverfahren für die Wärmeverluste erdreichberührter Bauteile von einer konstanten Grundwassertemperatur ausgehen, was eigentlich nur für den ungestörten Fall gilt.

3. Temperaturen im Erdreich unter dem Einfluß beheizter Gebäude

Die zuvor beschriebenen Temperaturverläufe gelten nur für das ungestörte Erdreich. Durch anthropogene Einflüsse, insbesondere beheizte Gebäude, wird das Temperaturfeld im Erdreich jedoch verändert. Der Boden und das Grundwasser erfahren eine Temperaturerhöhung. Die Annahme einer konstanten Grundwassertemperatur in der Nähe der beheizten Gebäudeteile bedingt dadurch zu hohe Wärmeströme. Besonders die Fälle mit geringer Grundwassertiefe und geringer Grundwassergeschwindigkeit zeigen deutlich geringere Temperaturgradienten.

In den Bildern 4 und 5 sind die Isothermenverläufe im Erdreich für zwei unterschiedliche Fälle dargestellt, welche mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode berechnet wurden.

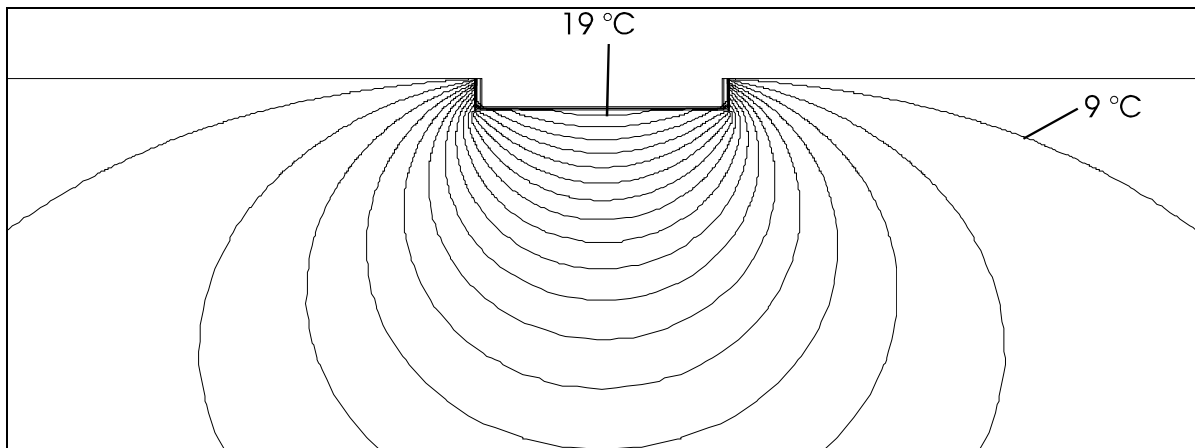


Bild 4 : Isothermen im Erdreich unter einem Keller - ohne Grundwasser

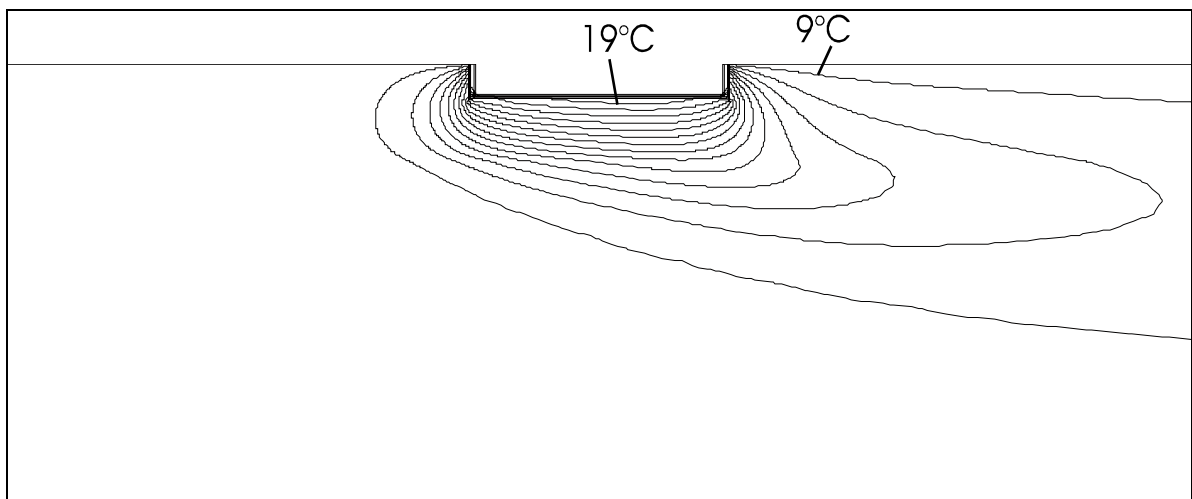


Bild 5 : Isothermen im Erdreich unter einem Keller - mit Grundwasser

In den gezeigten Isothermenbildern ist deutlich der Einfluß der beheizten Gebäude zu sehen, auch im Bereich des Grundwassers. Auch die Untersuchungen anderer Autoren /1/ haben den Einfluß anthropogener Effekte auf die Grundwassertemperatur gezeigt. Im Fall geringer Grundwassergeschwindigkeiten bedeutet dies eine deutliche Reduzierung der

Wärmeverluste gegenüber dem Extremfall der konstanten Grundwassertemperatur (siehe hierzu auch /5/).

4. Der Einfluß des Grundwassers auf die Wärmeverluste des Gebäudes

Im Bereich des fließenden Grundwassers ist der Wärmetransport nicht nur durch Transmission sondern auch durch erzwungene Konvektion verursacht. Im Grundwasser tritt immer ein gekoppelter Wärmeleit- und Konvektionsvorgang statt. Das vom Gebäude erwärmte Grundwasser fließt ab und kälteres Grundwasser fließt nach, sofern dieses nicht durch Nachbarbebauung erwärmt wurde. Dadurch wird eine Veränderung des Isothermenverlaufs im Erdreich bewirkt (Bild 5) und ebenfalls eine Variation des Wärmestromes.

Es ist notwendig die Größenordnung dieses Einflusses genauer zu betrachten und zu untersuchen. Um diese Effekte zu berechnen wurde die Finite-Elemente-Methode angewandt. Es wurden eine Reihe von FE-Berechnungen durchgeführt mit mehreren Parametervariationen. Das Ergebnis dieser numerischen Berechnungen ist eine Parameterstudie zum Einfluß des Grundwassers auf den Wärmestrom erdreichberührter Bauteile.

Die durch das fließende Grundwasser verursachte Erhöhung der Wärmeverluste wird hier durch einen Faktor f_{GW} beschrieben. Dieser Faktor ist anzuwenden auf den ungestörten Fall, also den Fall ohne Grundwasser. Die ohne Grundwasser berechneten Wärmeströme können mit f_{GW} multipliziert werden, um den gesamten Wärmestrom zu ermitteln. Dabei ist zu beachten, daß sich dies nur auf den stationären Anteil des Wärmestromes bezieht. Der instationäre Anteil, welcher durch die jahreszeitlichen Schwankungen verursacht wird, ist nicht zu erhöhen. Für den Kellerboden kann f_{GW} in Extremfällen Werte bis 30 annehmen, für die Kellerwand ist er immer kleiner als 2. Hierbei ist grundsätzlich zu beachten, daß die Betrachtungsweise als Faktor den Vorteil hat, daß man den möglichen starken Einfluß des Grundwassers erkennt, da ein direkter Vergleich zum Fall ohne Grundwasser vorliegt. Es können jedoch auch leicht Fehlinterpretationen entstehen, da beispielsweise eine mit zunehmender Kellertiefe einhergehende Abnahme der Wärmeströme im Fall ohne Grundwasser bei betragsmäßig gleichen durch das Grundwasser bedingten Wärmeströmen unterschiedliche Faktoren verursacht. Dies erklärt zum Beispiel auch den großen Unterschied der Faktoren für Kellerwände und Kellerböden, da bedingt durch den größeren Einfluß der Außenlufttemperatur die Wärmeströme der Wände immer höher sind und dadurch die Faktoren für die Wände zwangsläufig kleiner ausfallen.

In dieser Arbeit sind nur die oberen Grenzwerte für den Faktor f_{GW} dargestellt, um die generell mögliche Größenordnung zu verdeutlichen. Diese werden dabei nach verschiedenen Abhängigkeiten dargestellt. Diese Abhängigkeiten sind unterteilt in die Grundwasserparameter Abstand des Grundwasserspiegels zum Kellerboden und Grundwassergeschwindigkeit, die geometrischen Parameter Höhe und Breite des Kellers und schließlich die wärmetechnischen Parameter Wärmedurchlaßwiderstand der Bauteile und

Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs.

4.1 Grundwasserparameter

Die Grundwassergeschwindigkeit v_{GW} und der Abstand des Grundwasserspiegels zur Kellersohle T_{GW} üben den stärksten Einfluß auf den Faktor f_{GW} aus. Bild 6 zeigt die oberen Grenzwerte des Faktors $f_{GW,Bo}$ für den Kellerboden in Abhängigkeit dieser Parameter. Man erkennt, den sehr starken Einfluß der Zunahme der Grundwassergeschwindigkeit besonders bei kleinen Geschwindigkeiten. Die Kurven zeigen etwa eine logarithmische Form. Ebenso ist zu sehen, daß auch der Abstand des Grundwassers zur Kellersohle einen sehr großen Einfluß hat. Man sieht beispielsweise daß ein Abstand T_{GW} von 1 m im Gegensatz zum Fall des direkten Grundwasserkontaktes ($T_{GW} = 0$ m) eine Halbierung des Faktors $f_{GW,Bo}$ zur Folge hat. Dieser Einflußparameter kann durch eine Hyperbelfunktion dargestellt werden.

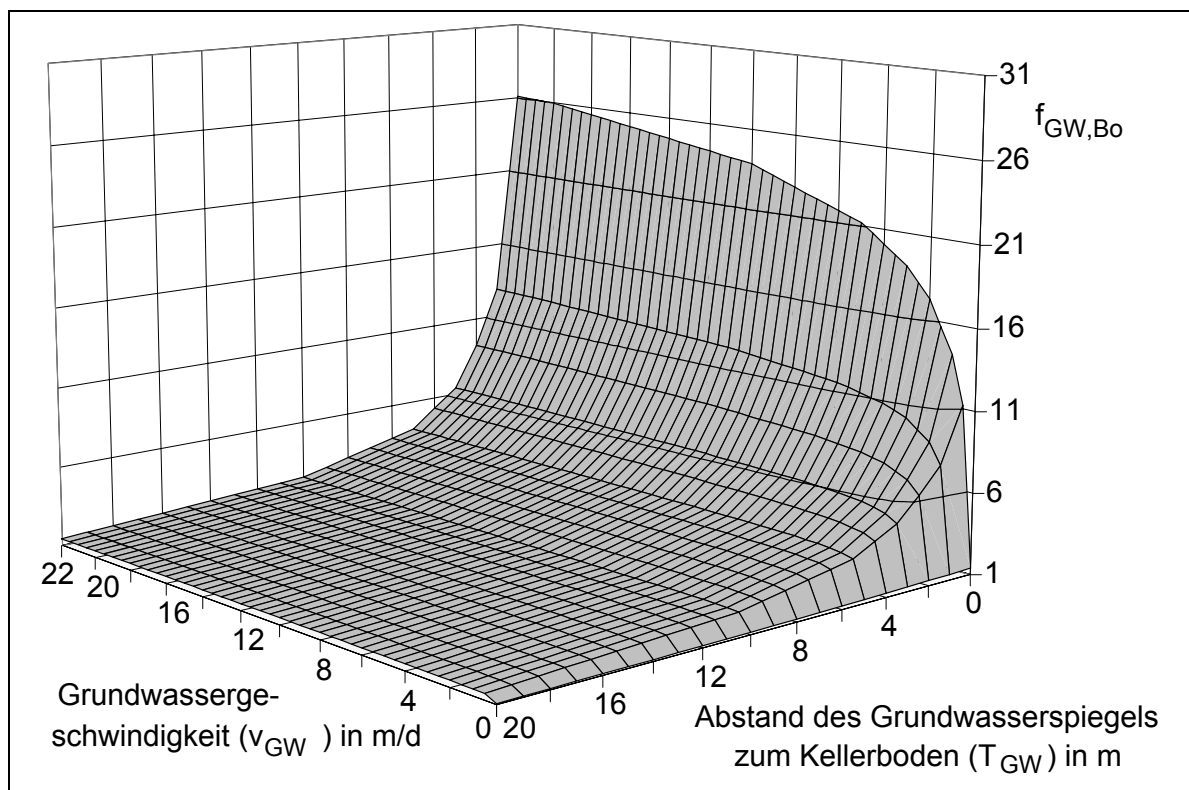


Bild 6 : Faktor $f_{GW,Bo}$ für den Kellerboden in Abhängigkeit der Grundwasserparameter

Bild 7 zeigt den Faktor $f_{GW,Wa}$ für Kellerwände. Man erkennt, daß die Form der Abhängigkeit von den Grundwasserparametern Geschwindigkeit v_{GW} und Abstand zur Kellersohle T_{GW} in etwa die gleiche ist, lediglich die Größenordnung ist hier eine andere. Dies ist jedoch wie zuvor schon erwähnt durch die höheren Absolutwerte der Wärmeströme im Wandbereich durch den größeren Außenlufteinfluß bedingt.

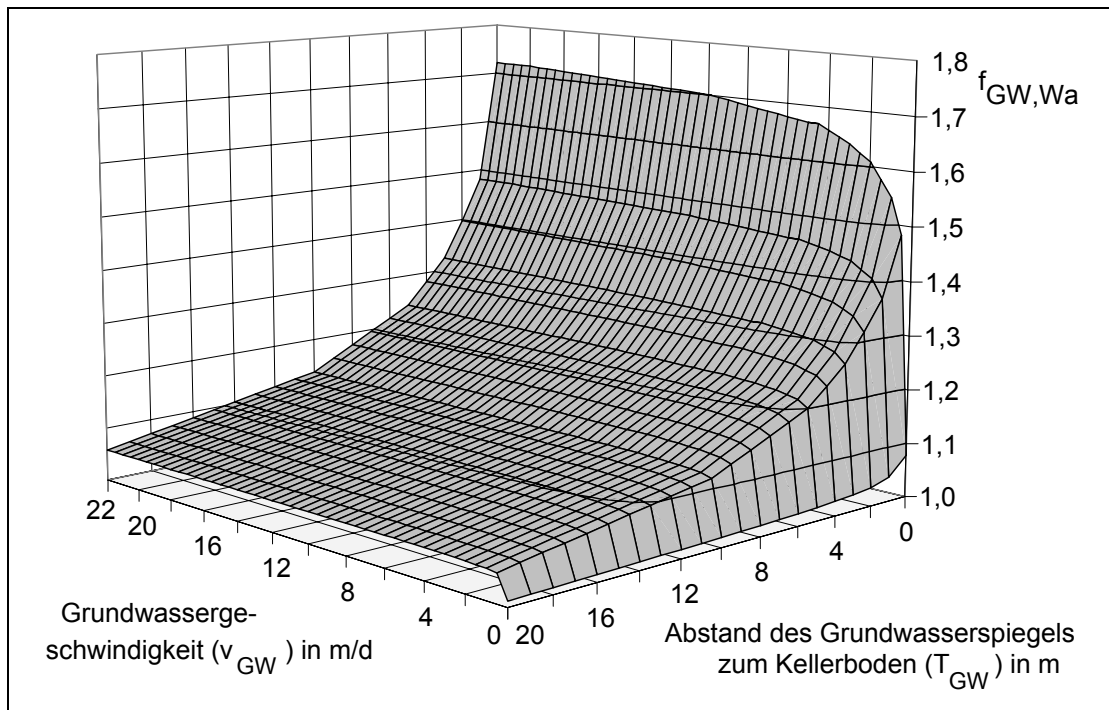


Bild 7 : Faktor $f_{GW,Wa}$ für die Kellerwand in Abhängigkeit der Grundwasserparameter

Aufgrund der großen Unterschiede für Kellerboden und Kellerwand muß hier der Gesamteinfluß auf den gesamten Keller betrachtet werden. Dieser ist in Bild 8 dargestellt. Man erkennt hier die gleiche Form wie für die Einzelbetrachtungen. Es ist jedoch beachtlich, daß dieser Wert für den gesamten Keller immerhin noch Werte knapp unter 10 annehmen kann. Dies sind jedoch die absoluten Extremwerte mit sehr großen Geschwindigkeiten und sehr geringem Abstand des Grundwassers von der Kellersohle. Betrachtet man jedoch die realistisch vorkommenden Fällen so werden immerhin noch Werte größer als 4 erreicht.

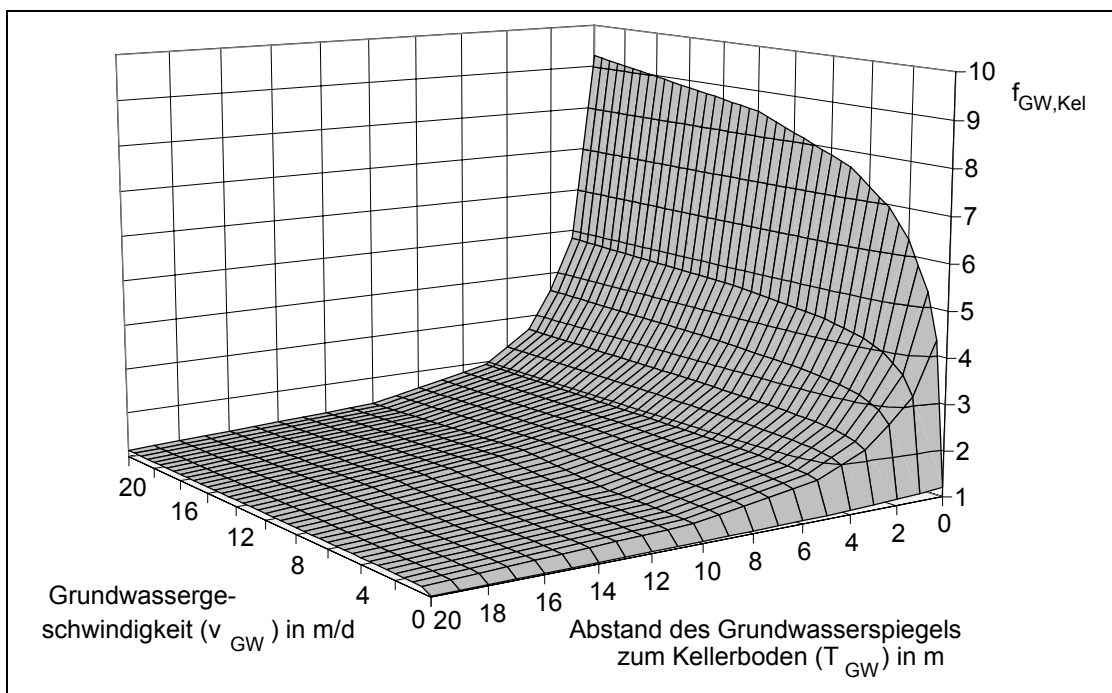


Bild 8 : Faktor $f_{GW,Kel}$ für den gesamten Keller in Abhängigkeit der Grundwasserparameter

4.2 Geometrieparameter

Die Geometrie des Kellers hat ebenfalls einen Einfluß auf den Faktor f_{GW} . Mit Geometrie ist hierbei die Kellerhöhe und -breite gemeint. Beispielhaft für den Kellerboden sind in Bild 9 wieder als die Extremfälle dargestellt. Hier sind zur Verdeutlichung die Werte für $v_{GW} > 20$ m/d jedoch zum einen $T_{GW} = 0$ m und zum anderen $T_{GW} = 1$ m dargestellt. Die Geometrieparameter zeigen einen nahezu linearen Verlauf auf die Wärmeverluste des Kellerbodens. Es ist deutlich zu sehen, daß für kontaktierendes Grundwasser $T_{GW} = 0$ m der Einfluß betrachtet werden muß, für größere Grundwasserabstände, selbst schon bei $T_{GW} = 1$ m dieser jedoch fast verschwindet.

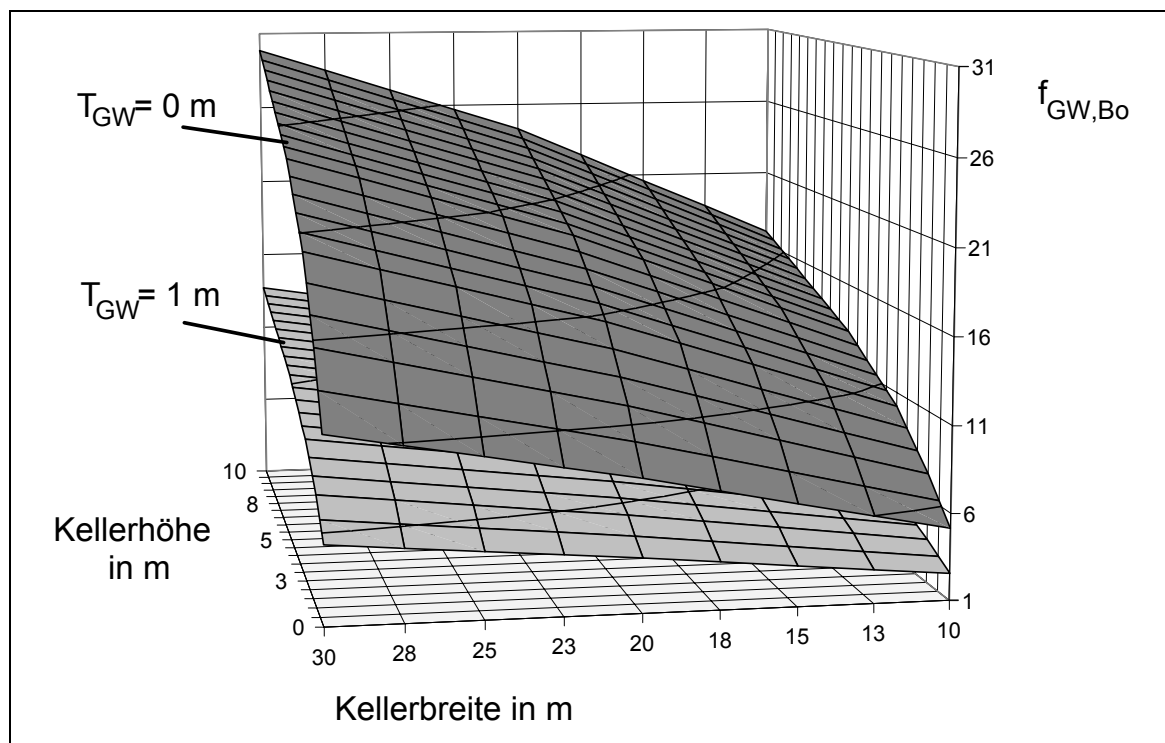


Bild 9 : Faktor $f_{GW,Bo}$ für den Kellerboden in Abhängigkeit der Geometrieparameter

Den Einfluß der Geometrieparameter auf den Kellerwandwärmeverlust zeigt für den obersten Extremfall Bild 10. Man erkennt, daß dieser Einfluß im Wandbereich zu vernachlässigen ist.

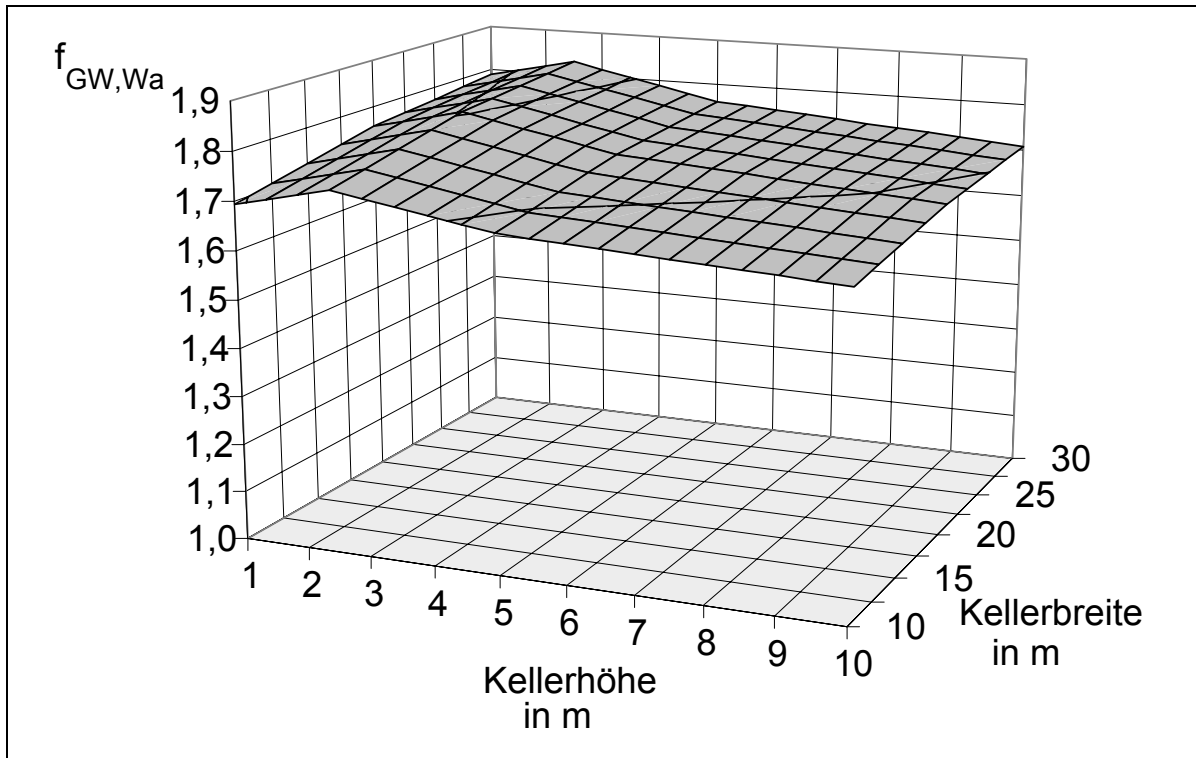


Bild 10 : Faktor $f_{GW,Wa}$ für die Kellerwand in Abhängigkeit der Geometrieparameter

4.3 Wärmetechnische Parameter

Als wärmetechnische Parameter werden hier der Wärmedurchgangswiderstand der Konstruktion und die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs betrachtet. Der Einfluß dieser Parameter auf die oberen Grenzwerte des Faktors f_{GW} ist in den Bildern 11 und 12 dargestellt. Es sind wiederum nur die oberen Grenzwerte, welche für die Fälle $T_{GW} = 0$ m und $v_{GW} > 20$ m/d auftreten, gezeigt.

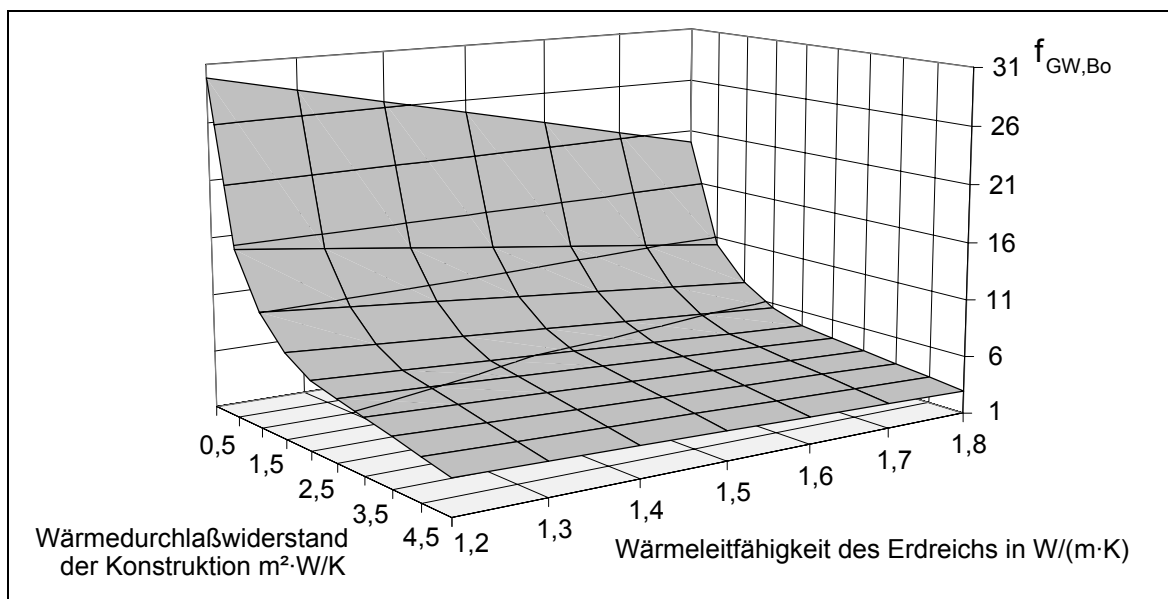


Bild 11 : Faktor $f_{GW,Bo}$ für den Kellerboden in Abhängigkeit der wärmetechnischen Parameter

Für den Kellerboden spielt der Wärmedurchlaßwiderstand der Konstruktion einen nicht unerheblichen Einfluß. Mit abnehmendem Wärmedurchlaßwiderstand wächst der Faktor sehr stark an. Dies kann vor allem für bestehende ältere Gebäude von Bedeutung sein. Für Neubauten hingegen sollte davon ausgegangen werden, daß der Wärmedurchlaßwiderstand dieser Bauteile über $2 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ liegt. In diesen Bereichen ist dann jedoch wieder nur ein relativ kleiner Einfluß festzustellen. Bild 12 zeigt, daß für die Kellerwand auch die wärmeschutztechnischen Parameter von sehr geringer Bedeutung sind.

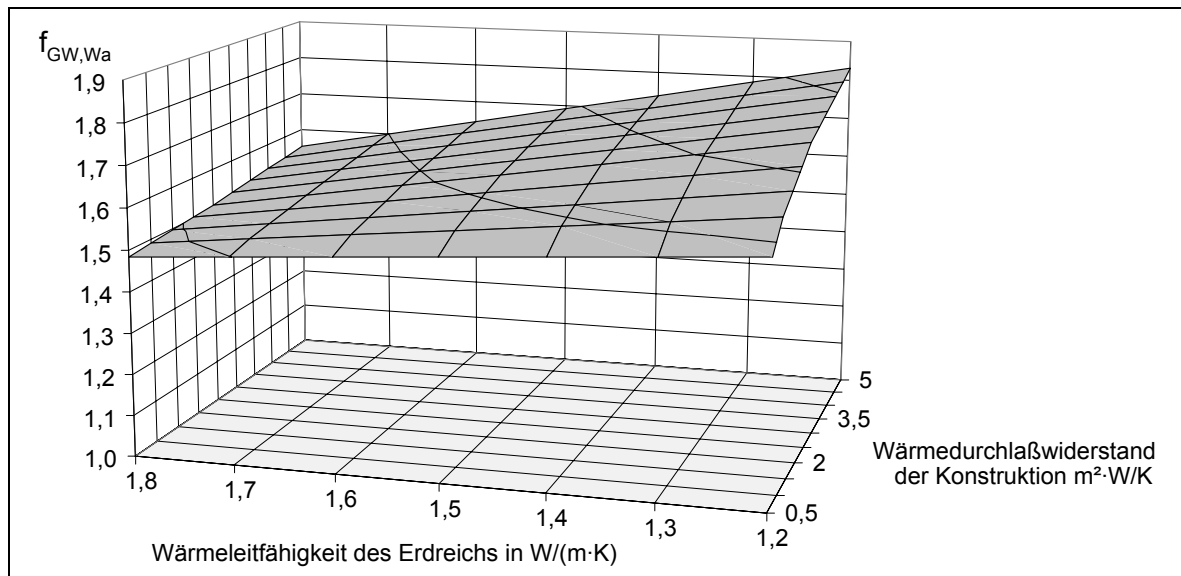


Bild 12 : Faktor $f_{\text{GW,Wa}}$ für die Kellerwand in Abhängigkeit der wärmetechnischen Parameter

Literaturverzeichnis

- /1/ Balke, K.-D.: Die Grundwassertemperaturen in Ballungsgebieten, Forschungsbericht BMFT-FB-T 81-028, Fachinformationszentrum Karlsruhe, 1981
- /2/ Dahlem, K.-H.: Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Transmissions-Heizlast über erdreichberührte Bauteile im Vergleich, Gesundheits-Ingenieur 119 (1998), H. 5, S. 266-269
- /3/ Erk/ Gröber/ Grigull: Wärmeübertragung. Springer - Verlag, 3. Auflage, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1963
- /4/ Mrziglod-Hund, M.: Berechnungsverfahren für den Wärmeverlust erdreichberührter Bauteile, Dissertation, Kaiserslautern 1995
- /5/ OTTEL, M.: Das thermische Verhalten erdberührter Bauteile, dreidimensional und instationär betrachtet. Dissertation, Wien 1987
- /6/ Usemann, K.W. / Mrziglod-Hund, M. / Dahlem, K.-H.: Wärmeverlust erdreichberührter Bauteile, Endbericht zum DFG-Forschungsprojekt US 11/2 - 1...3, September 1995