

Ein neues Berechnungsverfahren für den Wärmeverlust erdreichberührter Bauteile zum Grundwasser

Autor : Dr.-Ing. Karl-Heinz Dahlem, wiss. Mitarbeiter im Fachgebiet Bauphysik der Universität Kaiserslautern

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. Der Anteil des durch Grundwasser verursachten Wärmestroms wird hier genauer beschrieben. Das hier dargestellte ist eine Zusammenfassung der vom Autor veröffentlichten Dissertation /2/. Die gezeigten Abhängigkeiten und das daraus hergeleitete Berechnungsverfahren sind das Resultat einer umfangreichen Untersuchung mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode. Zuerst wird eine Einführung in die Problemstellung gegeben. Danach werden die oberen Grenzen des Einflußfaktors Grundwasser dargestellt. Dabei wird immer die Differenz zum ungestörten Fall (ohne Grundwasser) betrachtet. Als wichtigste Einflußparameter sind hier die Grundwasserfließgeschwindigkeit und der Abstand des Grundwassers zum Kellerboden zu nennen. Das neu hergeleitete Berechnungsverfahren wird dargestellt und erläutert und eine Vergleichsberechnung zu Normverfahren durchgeführt und deren Mangel aufgewiesen.

1 Einleitung

Beheizte Gebäude geben über ihre gesamte Außenfläche Energie in Form von Wärme ab, wenn die Außentemperatur geringer ist als die Innentemperatur. Dabei steht ein Teil der Außenflächen mit der Umgebungsluft in Kontakt, ein Teil jedoch auch mit dem Erdreich.

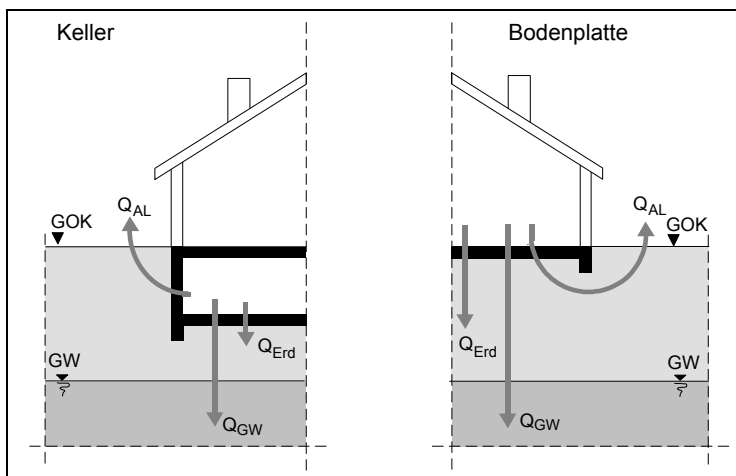


Bild 1 : Wärmeverluste erdreichberührter Bauteile

Die Wärmeverluste der erdreichberührten 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 teilweise 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. Ein in neuerer Zeit hergeleitetes umfangreiches Berechnungsverfahren wurde von Mrziglod-Hund /6/ dargestellt. Damit wird aber die durch das fließende Grundwasser erzwungene Konvektion nicht berücksichtigt.

Am realen Gebäude 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. Die bedeutendsten Faktoren bezüglich des Wärmestroms, der durch das Grundwasser verursacht wird, sind hierbei die Grundwasserfließgeschwindigkeit und der Abstand des Grundwassers zum Gebäude.

2 Temperaturen in 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 eine Rolle, welcher etwa 1,5 bis 4 K pro 100 m Tiefenänderung beträgt. Dieser wirkt sich 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 beeinflussen lediglich die oberen 50 bis 100 cm. Die jährlichen hingegen 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 halbunendlichen

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

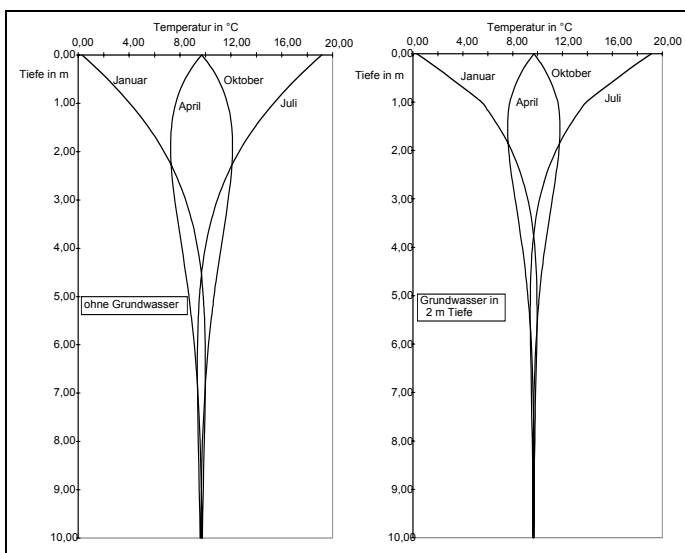


Bild 2 : Temperaturverläufe im Erdreich für unterschiedliche Monate

sondern auch der Feuchtegehalt oder vorhandenes Grundwasser von Bedeutung sind.

In Bild 2 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 unter-

schiedlichen 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 Ein-

flußbereich 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.

Der Unterschied des Temperaturverlaufs im Erdreich gegenüber der Außenlufttemperatur ist hier klar zu erkennen. Die Temperatur des Grundwassers ist in größeren Tiefen (> 7m) übers Jahr fast konstant. Dies ist der Grund, weshalb in der Literatur oft von einer konstanten Grundwassertemperatur ausgegangen wird und die meisten Berechnungsverfahren für die Wärmeverluste erdreichberührter Bauteile dies ebenfalls so ansetzen, was eigentlich nur für den ungestörten Fall gilt.

3 Temperaturen im Erdreich unter beheizten Gebäuden

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 ist in der Realität nicht gegeben und bedingt als Ansatz in einem Berechnungsverfahren zu hohe Wärmeströme. Besonders die Fälle mit geringer Grundwassertiefe und geringer Grundwasserfließgeschwindigkeit zeigen deutlich geringere Temperaturgradienten vom Gebäude zum Grundwasser.

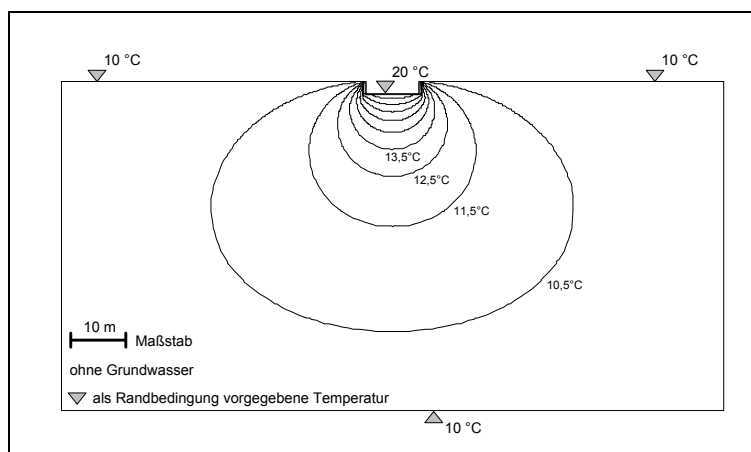


Bild 3 : Isothermen im Erdreich unter einem Keller - ohne Grundwasser

Die Bildern 3 und 4 zeigen die Isothermenverläufe im Erdreich für zwei unterschiedliche Fälle. Diese wurden mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode berechnet.

In den gezeigten Isothermenbildern ist deutlich der Einfluß der beheizten Gebäude zu sehen, auch im

Bereich des Grundwassers. Die Untersuchungen anderer Autoren /1/ haben den Einfluß anthropogener Effekte auf die Grundwassertemperatur ebenso gezeigt. Im Fall geringer Grundwasserfließgeschwindigkeiten bedeutet dies eine Erhöhung der

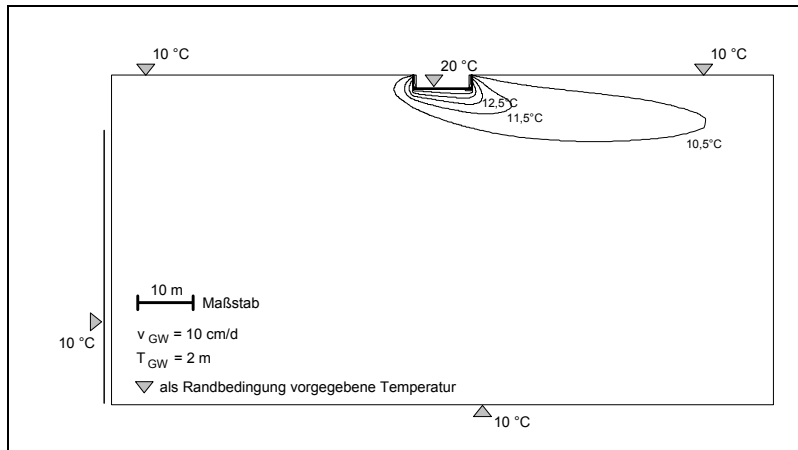


Bild 4 : Isothermen im Erdreich unter einem Keller - mit Grundwasser

Grundwassertemperatur und deutlich geringere Wärmeverluste gegenüber dem Extremfall der konstanten Grundwassertemperatur.

4 Grenzwertbetrachtung

Die Wärmeverluste erdreichberührter Bauteile zum Grundwasser können als Erhöhung der Wärmeverluste erdreichberührter Bauteile ins Erdreich (ohne Grundwasser) betrachtet werden. Um die Größenordnung dieser Erhöhung zu beschreiben kann man einen dimensionslosen Faktor f_{GW} einführen. Dieser Faktor ist anzuwenden auf den ungestörten Fall, also den Fall ohne Grundwasser. Die ohne Grundwasser berechneten Wärmeströme werden mit f_{GW} multipliziert, um den gesamten Wärmestrom zu ermitteln. Man erhält:

$$\dot{Q}_{\text{gesamt}} = f_{GW} \cdot \dot{Q}_{\text{ohne Grundwasser}}$$

Diese Darstellungsweise wird hier verwendet um die Größenordnung des Einflusses zu verdeutlichen und auch die Bedeutung der einzelnen Parameter herauszuheben, nicht jedoch zur Herleitung des neuen Berechnungsverfahrens.

Es ist zu beachten, daß dieser Faktor aus Ergebnissen stationärer Berechnungen hergeleitet wurde und deshalb nur für den stationären Anteil des Wärmestromes anwendbar ist. Der instationäre Anteil, durch die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen verursacht, muß anders behandelt werden (vgl. /2/).

Für den Kellerboden kann f_{GW} im Extremfall Werte bis 30 annehmen, für die Kellerwand ist er immer kleiner als 2. Grundsätzlich ist festzustellen, daß durch die Betrachtungsweise als Faktor der mögliche starke Einfluß des Grundwassers auf den Wärmestrom erdreichberührter Bauteile verdeutlicht wird, da ein direkter Vergleich zum Fall ohne Grundwasser vorliegt. Es können jedoch auch leicht Fehlinterpretationen entstehen. Im Berechnungsfall ohne Grundwasser zeigt sich mit zunehmender

Kellertiefe eine Abnahme der Wärmeströme für den Kellerboden. Betragsmäßig gleiche Wärmeströme bedingt durch das Grundwasser erzeugen dann sehr unterschiedliche Faktoren. Dies erklärt auch den großen Unterschied der Faktoren für Kellerwände und Kellerböden, da bedingt durch den größeren Einfluß der Außenlufttemperatur die Wärmeströme der Wände immer höher als die des Kellerbodens sind und dadurch die Faktoren für die Wände zwangsläufig kleiner ausfallen. Aus diesen Gründen wurde das neu entwickelte Berechnungsverfahren nicht auf solchen Faktoren aufgebaut.

Die Betrachtungsweise als Faktor ist auch im Berechnungsverfahren nach DIN EN ISO 13370 /7/ kritisch zu sehen. Dort wird mit solchen Faktoren gearbeitet, die von Hagentoft /4, 5/ für die Bodenplatte ermittelt wurden und in der Norm auf den gesamten Keller angewandt werden.

Es sind im folgenden 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 Grundwasserfließgeschwindigkeit, die geometrischen Parameter Höhe und Breite des Kellers und schließlich die wärmetechnischen Parameter Wärmedurchlaßwiderstand der Bauteile und Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs.

4.1 Grundwasserparameter

Die Grundwasserfließgeschwindigkeit v_{GW} und der Abstand des Grundwasserspiegels zur Kellersole T_{GW} üben den stärksten Einfluß auf den Faktor f_{GW} aus. Bild 5 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 Grundwasserfließgeschwindigkeit besonders bei kleinen Geschwindigkeiten. Die Kurven zeigen etwa eine logarithmische Form. Ebenso ist zu sehen, daß auch der Abstand des Grundwassers zur

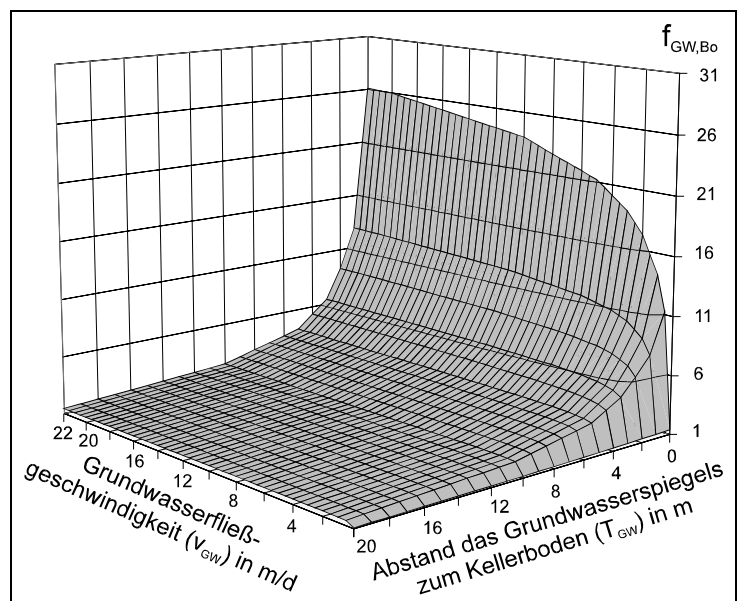


Bild 5 : Faktor $f_{GW,Bo}$ für den Kellerboden in Abhängigkeit der Grundwasserparameter

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. Der Einflußparameter Abstand des Grundwassers zur Kellersohle kann durch eine Hyperbelfunktion dargestellt werden.

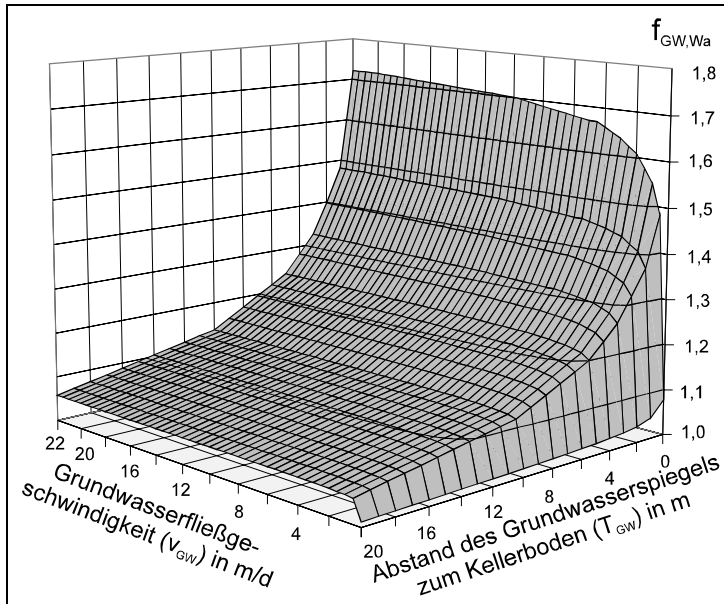


Bild 6 : Faktor $f_{GW,Wa}$ für die Kellerwand in Abhängigkeit der Grundwasserparameter

Bild 6 zeigt den Faktor $f_{GW,Wa}$ für Kellerwände. Die Form der Abhängigkeit von den Grundwasserparametern ist in etwa die gleiche wie für den Kellerboden, 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.

Aufgrund der großen Unterschiede für Kellerboden und

Kellerwand muß hier der Gesamteinfluß auf den gesamten Keller betrachtet werden (Bild 7). 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 (dunkler Bereich) so werden immerhin noch Werte größer als 4 erreicht.

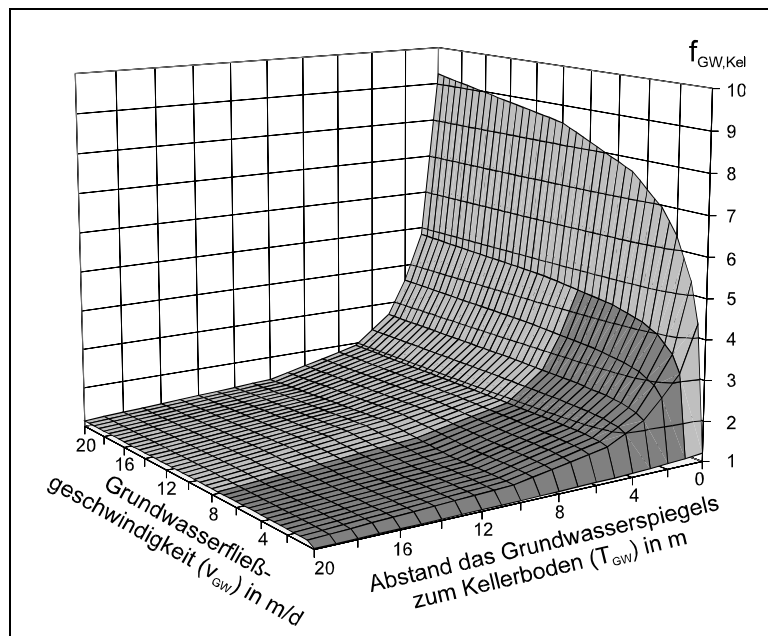
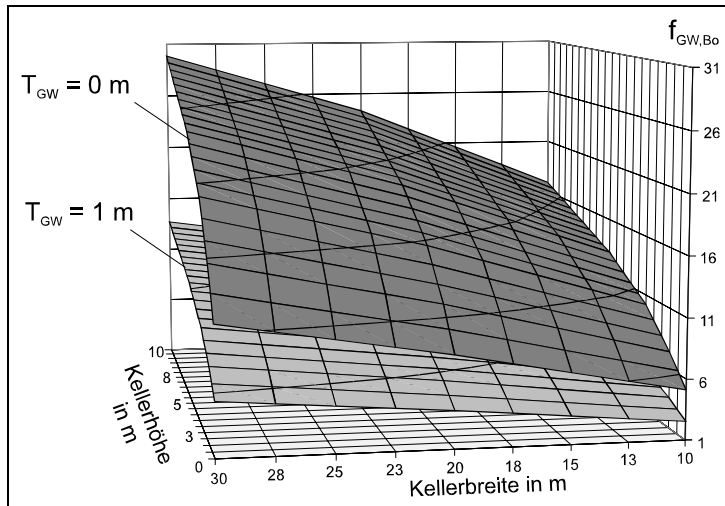


Bild 7 : Faktor $f_{GW,Kel}$ für den gesamten Keller in Abhängigkeit der Grundwasserparameter

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 8 wieder 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.

Bild 8 : Faktor $f_{GW,Bo}$ für den Kellerboden in Abhängigkeit der Geometrieparameter

Es ist deutlich zu sehen, daß für Bauteile mit direktem Grundwasserkontakt ($T_{GW} = 0$ m) der Einfluß betrachtet werden muß, für größere Grundwasserabstände, selbst schon bei $T_{GW} = 1$ m, dieser jedoch fast verschwindet.

Den Einfluß der Geometrieparameter auf den Kellerwandwärmeverlust zeigt für den obersten Extremfall Bild 9. Dieser Einfluß im Wandbereich ist zu vernachlässigen.

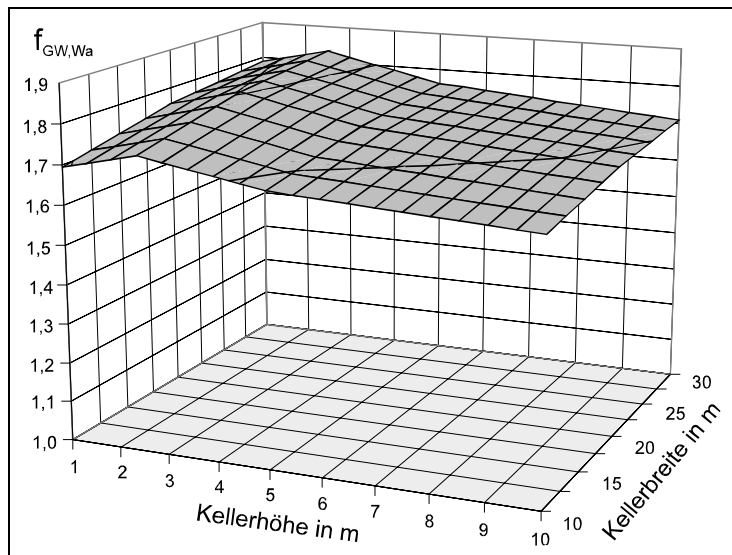


Bild 9 : Faktor $f_{GW,Wa}$ für die Kellerwand in Abhängigkeit der Geometrieparameter

4.3 Wärmetechnische Parameter

Als wärmetechnische Parameter werden hier der Wärmedurchgangswiderstand der Konstruktion und die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs betrachtet. Der Einfluß dieser

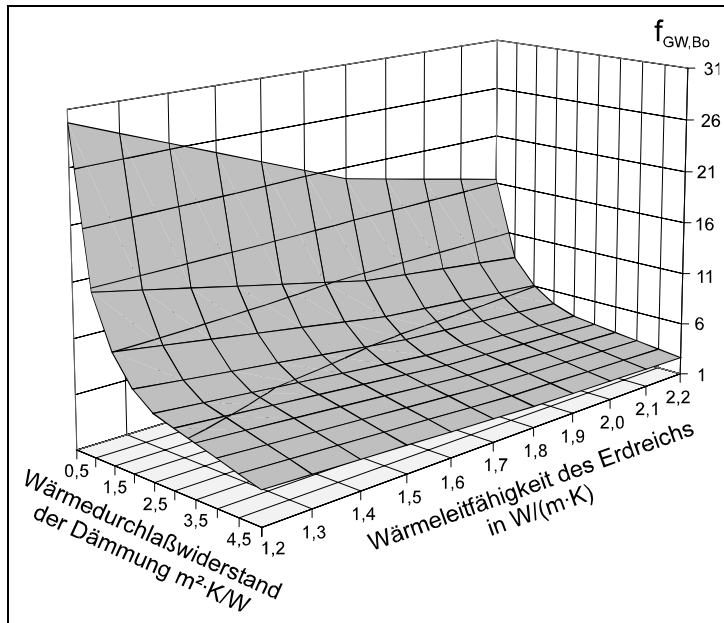


Bild 10 : Faktor $f_{GW,Bo}$ für den Kellerboden in Abhängigkeit der wärmetechnischen Parameter

Parameter auf die oberen Grenzwerte des Faktors f_{GW} ist in den Bildern 10 und 11 dargestellt. Es sind wiederum nur die oberen Grenzwerte, welche für die Fälle $T_{GW} = 0$ m und $v_{GW} > 20$ m/d auftreten, gezeigt.

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 $2 m^2 \cdot K/W$ liegt. In diesen Bereichen ist dann jedoch wieder nur ein relativ kleiner Einfluß festzustellen.

Bild 11 zeigt, daß für die Kellerwand auch die wärmeschutztechnischen Parameter von sehr geringer Bedeutung sind.

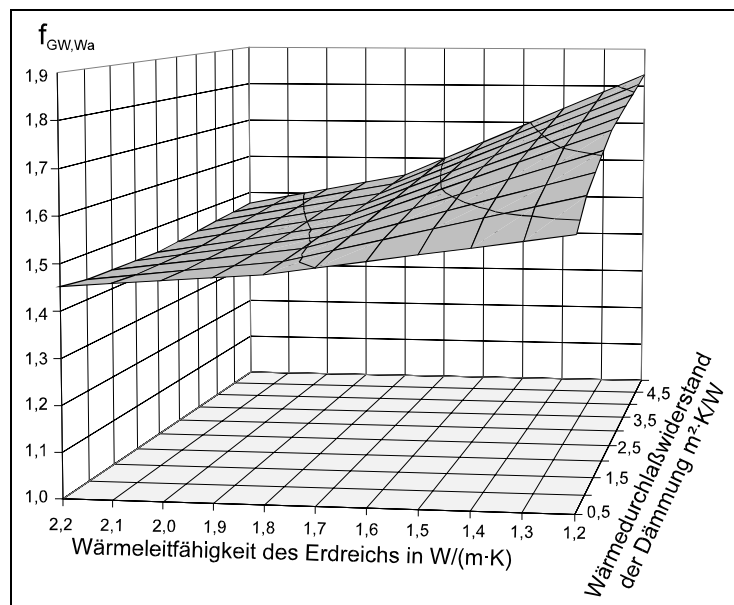


Bild 11 : Faktor $f_{GW,Wa}$ für die Kellerwand in Abhängigkeit der wärmetechnischen Parameter

4.4 Vergleich mit DIN EN ISO 13370

Nach den Angaben in DIN EN ISO 13370 /7/ hat das Grundwasser einen so geringen Einfluß auf die Wärmeverluste, daß es vernachlässigt werden darf. Will man es trotzdem berücksichtigen, so wird im Anhang H der Norm ein Berechnungsansatz für einen Faktor G_W gegeben. Mit diesem Faktor G_W soll der stationäre Wärmestrom ohne Grundwassereinfluß multipliziert werden, um den gesamten Wärmestrom ins Erdreich zu ermitteln. Sinngemäß entspricht G_W somit dem Faktor $f_{GW,Bo}$, weshalb hier ein Vergleich dieser beiden Faktoren durchgeführt wird.

Zuerst müssen hierbei jedoch noch einige Mängel der DIN EN ISO 13370 /7/ zur Bestimmung und Anwendung dieses Faktors G_W aufgezeigt werden:

- Zur Bestimmung des Faktors G_W muß nach DIN EN ISO 13370 /7/ zuerst eine Größe ℓ bestimmt werden. Diese soll in der Einheit mm für die weitere Berechnung eingesetzt werden. Damit kann man den Faktor G_W bestimmen. Folgt man dieser Anweisung, so ergeben sich Werte mit denen der Faktor G_W nicht bestimmbar ist. Eigentlich müßte an dieser Stelle die Vergleichsberechnung damit abgebrochen werden.

Durch das Studium der Arbeiten von Hagentoft /4, 5/ erkennt man, daß ℓ eigentlich in der Einheit m einzusetzen ist. Damit kann die Berechnung fortgesetzt werden und man erreicht die nächsten Unzulänglichkeiten des Verfahrens:

- Als Eingangsgrößen zur Bestimmung des Faktors G_W werden nur Parameter verwendet, die sich auf den Boden beziehen. Ob und wie der Faktor G_W für Kellerwände anzuwenden ist wird in der Norm nicht angegeben.
- Zur Bestimmung des Faktors G_W wird z_W (die Tiefe des Grundwasser unterhalb der Erdreichoberkante) berücksichtigt. Dies hat zur Folge, daß der Faktor eigentlich nur sinnvoll für Bodenplatten anwendbar ist. Andernfalls wird beispielsweise ein Keller mit der Kellerhöhe $h = 5\text{m}$ und $T_{GW} = 0\text{m}$, also nach Norm $z_{GW} = 5\text{m}$, gleich behandelt wie eine Bodenplatte mit $T_{GW} = 5\text{m}$. Dieser Ansatz rührt daher, daß in der Norm das Verfahren von Hagentoft für Bodenplatten ohne Veränderung auf Kellerböden übertragen wurde. Beim Vergleich von $f_{GW,Bo}$ mit G_W stellt man fest, daß im Normverfahren eine sehr große Unterbestimmung des Grundwassereinflusses auf die Wärmeverluste von Kellern gegeben ist.

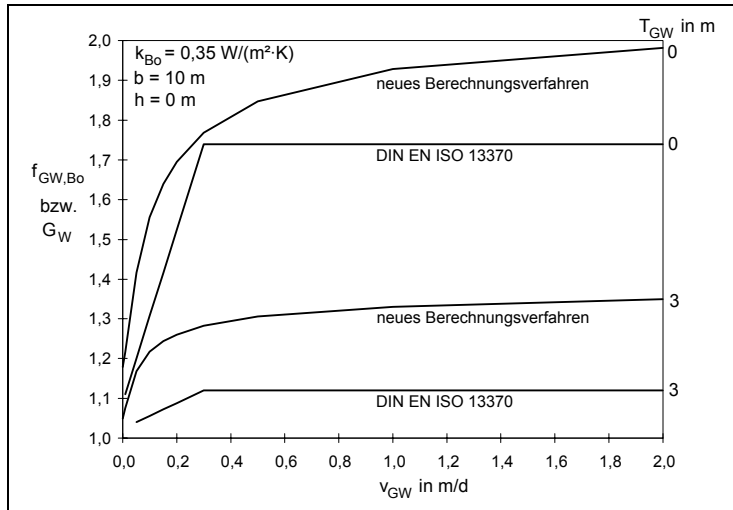


Bild 12 : „Faktor G_W “ nach DIN EN ISO 13370 und Faktor $f_{GW,Bo}$

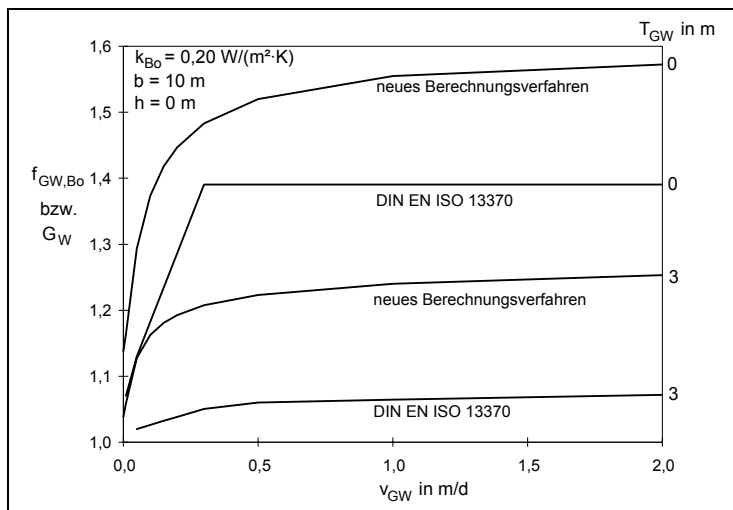


Bild 13 : „Faktor G_W “ nach DIN EN ISO 13370 und Faktor $f_{GW,Bo}$

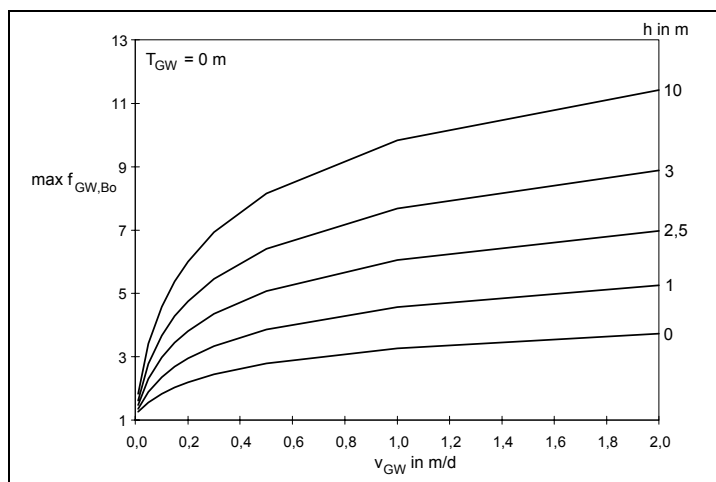


Bild 14 : Maximalwerte von $f_{GW,Bo}$ für Keller unterschiedlicher Höhe und $T_{GW} = 0$ m

Einige Vergleichsfälle, die mit dem Norm-Verfahren berechnet werden konnten unter Zuhilfenahme von /4, 5/, sind mit den zuvor dargestellten Ergebnissen für $f_{GW,Bo}$ für Bodenplatten in den Bildern 12 und 13 aufgezeigt in Abhängigkeit von der Grundwasserfließgeschwindigkeit v_{GW} .

Nach dem Norm-Verfahren ergibt sich für die Bodenplatte zum Teil eine erhebliche Unterbewertung des Grundwassereinflusses. Die Werte für den Faktor G_W liegen für die meisten Fälle weit unter den Werten, wie sie für $f_{GW,Bo}$ ermittelt wurden.

Für die Betrachtung des Kellers im Gegensatz zur Bodenplatte bleibt der Faktor G_W entsprechend den Bildern 12 und 13 erhalten. Wie sich dieser Faktor $f_{GW,Bo}$ in Abhängigkeit der Kellerhöhe tatsächlich verändert zeigt Bild 14. Hierin sind für verschiedene Kellerhöhen und Abstand des Grundwassers zur Kellersohle $T_{GW} = 0$ m die maximal auftretenden Faktoren $f_{GW,Bo}$ zu sehen. Vergleicht man diese Kurven mit den Kurven nach DIN EN ISO 13370 /7/ (Bilder 12 und 13), so erkennt

man erhebliche Unterschiede, also eine extreme Unterbewertung des Einflusses vom Grundwasser in DIN EN ISO 13370 /7/.

5 Neues Berechnungsverfahren

Aus den Ergebnissen der durchgeführten FE-Berechnungen wurde ein Rechenverfahren entwickelt, um für Gebäude den Transmissions-Wärmestrom zu ermitteln, welcher - bedingt durch vorhandenes Grundwasser - zusätzlich zum Wärmestrom ins Erdreich an erdreichberührten Bauteilen auftritt.

Da in der Bauphysik die Wärmeströme üblicherweise mit

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta \quad (2)$$

berechnet werden, wird diese Formel als Grundlage für das neue Berechnungsverfahren verwendet. Es werden dabei folgende Festlegungen und Vorgaben getroffen:

- Im Berechnungsverfahren wird unterschieden zwischen dem Wärmestrom durch den Boden \dot{Q}_{Bo} und dem Wärmestrom durch die Wand \dot{Q}_{Wa} .
- Das Berechnungsverfahren soll leicht handhabbar sein und die Genauigkeit soll den üblicherweise bekannten Gegebenheiten (Erdreichparameter, Grundwasserverhältnisse) entsprechen.
- Ein äquivalenter Wärmedurchgangskoeffizient $k_{aq.,GW}$ wird definiert, mit welchem der zusätzliche Transmissions-Wärmestrom, der durch das Grundwasser verursacht wird, berechnet werden kann.
- Als Grundlage für die Berechnungen wird für die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ gewählt:

$$\Delta\vartheta = \vartheta_{Li} - \vartheta_{GW}$$

mit :

ϑ_{Li}	Rauminnenlufttemperatur	°C
ϑ_{GW}	Temperatur des Grundwassers	°C

Die Herleitung des sogenannten äquivalenten Wärmedurchgangskoeffizienten $k_{aq.,GW}$ erfolgte aus dem Wärmestrom \dot{Q}'_{GW} , welcher aus den FE-Berechnungen hervorging.

5.1 Heizlastberechnungen

Da die äquivalenten Wärmedurchgangskoeffizienten $k_{\text{äq.,GW}}$ zweidimensionalen FE-Berechnungen entstammen ist es notwendig einen Faktor einzuführen, der die

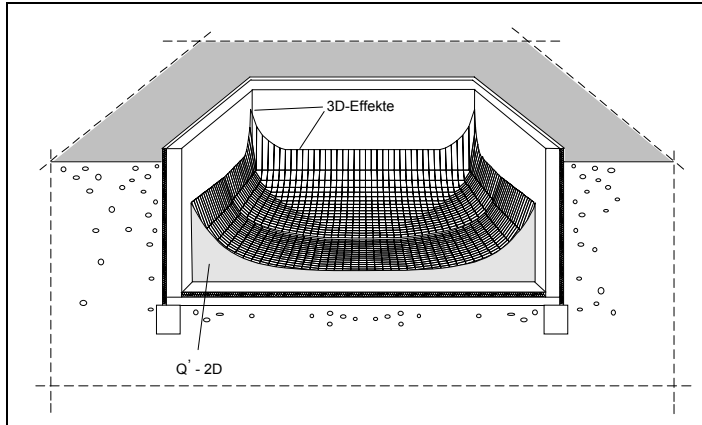


Bild 15 : Verteilung der Wärmestromdichte über die Kellerbodenfläche - Rand- und ECKEINFLUSS

Rand- und ECKEeffekte, also die dreidimensionalen Gegebenheiten, mit berücksichtigt (vgl. Bild 15). Es zeigte sich, daß die „Geometriefaktoren g_{s1} und g_{s2} “, wie sie von Mrziglod-Hund /6, 9/ verwendet wurden, auch hier anwendbar sind.

Den FE-Berechnungen lag eine Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs von $\lambda_E = 1,2 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ zugrunde. Für abweichende λ_E muß der Faktor $f_{\lambda,Bo}$ nach /2/ bestimmt werden.

Führt man diese Faktoren zur Berücksichtigung der Dreidimensionalität und der Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs ein, so erhält man die im folgenden dargestellten Formeln zur Heizlastberechnung.

5.1.1 Kellerboden und Bodenplatte

Für den Kellerboden bzw. die Bodenplatte ergibt sich:

$$\dot{Q}_{Bo, GW} = f_{\lambda,Bo} \cdot g_{Bo, GW} \cdot k_{\text{äq.,Bo, GW}} \cdot A_{Bo} \cdot (\vartheta_{Li} - \vartheta_{GW})$$

mit :

$\dot{Q}_{Bo, GW}$	durch Grundwasser verursachte zusätzliche Heizlast	W
$f_{\lambda,Bo}$	Faktor für die Berücksichtigung der Erdreichwärmeleitfähigkeit λ_E /2/	-
$g_{Bo, GW}$	Geometriefaktor nach Mrziglod-Hund /6, 9/ oder /2/	-
$k_{\text{äq.,Bo, GW}}$	äquivalenter k-Wert nach /2/ mit T_{GW} entsprechend dem obersten Grundwasserspiegel im Jahresverlauf für Keller im Grundwasser wird angenommen: $T_{GW} = 0 \text{ m}$ Bilder 16 bis 19	W/(m ² ·K)
A_{Bo}	Fläche des Kellerbodens bzw. der Bodenplatte	m ²
ϑ_{Li}	Rauminnenlufttemperatur	°C

ϑ_{GW} Jahresmitteltemperatur des Grundwassers °C
 ≈ Jahresmittel der Geländeoberflächentemperatur
 ≈ 1 K über dem Jahresmittel der Außenlufttemperatur

In den Bildern 16 bis 19 sind Diagramme für $k_{\text{aq.,Bo,GW}}$ zu sehen. $k_{\text{aq.,Bo,GW}}$ zeigt eine deutliche Abhängigkeit vom Wärmedurchgangskoeffizienten der Konstruktion und von den Grundwasserparametern Fließgeschwindigkeit und Abstand des Grundwasserspiegels zur Gründungssohle.

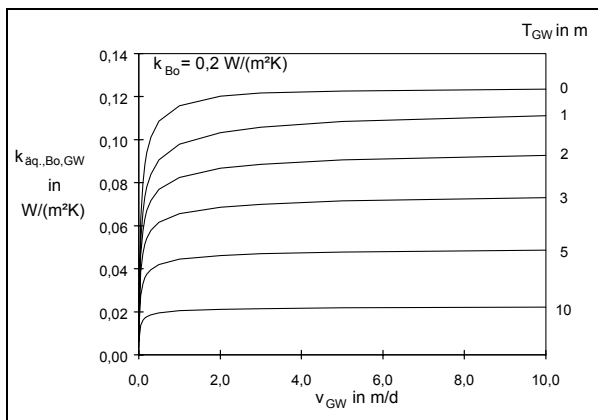


Bild 16 : $k_{\text{aq.,Bo,GW}}$ in Abhängigkeit von v_{GW} für $k_{\text{Bo}} = 0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

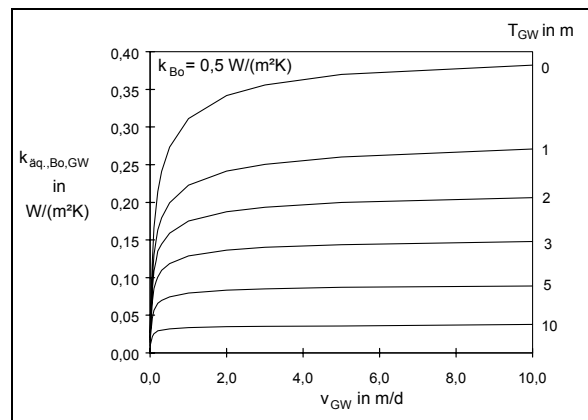


Bild 17 : $k_{\text{aq.,Bo,GW}}$ in Abhängigkeit von v_{GW} für $k_{\text{Bo}} = 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

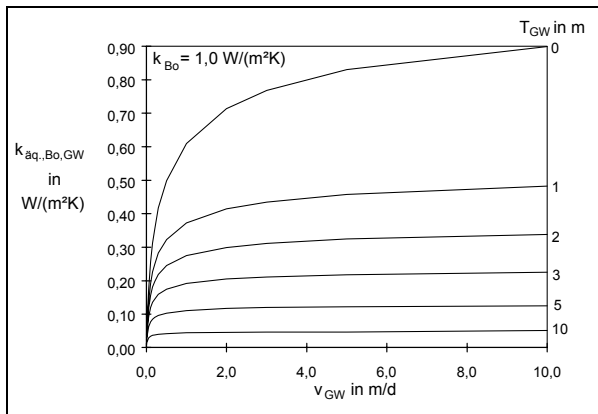


Bild 18 : $k_{\text{aq.,Bo,GW}}$ in Abhängigkeit von v_{GW} für $k_{\text{Bo}} = 1,0 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

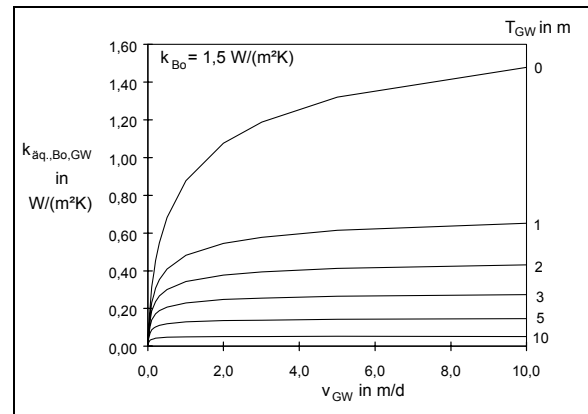


Bild 19 : $k_{\text{aq.,Bo,GW}}$ in Abhängigkeit von v_{GW} für $k_{\text{Bo}} = 1,5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

5.1.2 Kellerwand

Bei der Kellerwand muß zwischen zwei Fällen unterschieden werden. Bei einem im Grundwasser gegründeten Gebäude hat ein Teil der Wand direkten Kontakt zum Grundwasser, wird also vom Grundwasser umspült, und gibt deshalb die Wärme direkt ans Grundwasser ab. Beim Rest der Wand erfolgt der Wärmestrom zum Grundwasser indirekt über das Erdreich. Bei Gebäuden, die oberhalb des Grund-

wasserspiegels gegründet sind, erfolgt der gesamte Wärmestrom zum Grundwasser über das Erdreich.

Keller oberhalb des Grundwasserspiegels

$$\dot{Q}_{Wa, GW} = f_{\lambda, Wa} \cdot g_{Wa, GW} \cdot k_{\ddot{a}q., Wa, GW} \cdot A_{Wa} \cdot (\vartheta_{Li} - \vartheta_{GW})$$

mit :

$\dot{Q}_{Wa, GW}$	durch Grundwasser verursachte zusätzliche Heizlast	W
$f_{\lambda, Wa}$	Faktor zur Berücksichtigung der Erdreichwärmeleitfähigkeit λ_E /2/	-
$g_{Wa, GW}$	Geometriefaktor nach Mrziglod-Hund /6, 9/ oder /2/	-
$k_{\ddot{a}q., Wa, GW}$	äquivalenter k-Wert nach /2/ mit T_{GW} entsprechend dem obersten Grundwasserspiegel im Jahresverlauf Bilder 20 bis 23	W/(m ² ·K)
A_{Wa}	Fläche der Kellerwand	m ²
ϑ_{Li}	Rauminnenlufttemperatur	°C
ϑ_{GW}	Jahresmitteltemperatur des Grundwassers ≈ Jahresmittel der Geländeoberflächentemperatur ≈ 1 K über dem Jahresmittel der Außenlufttemperatur	°C

Keller im Grundwasser

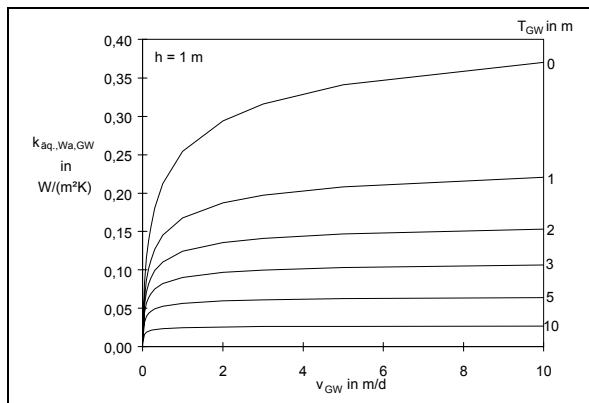
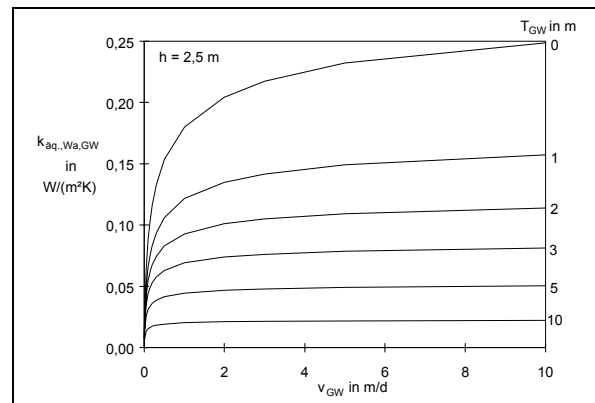
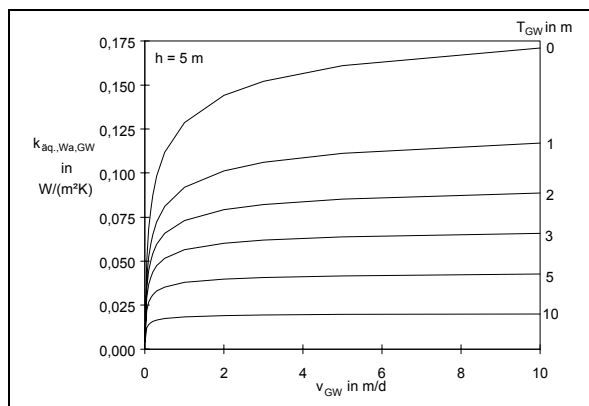
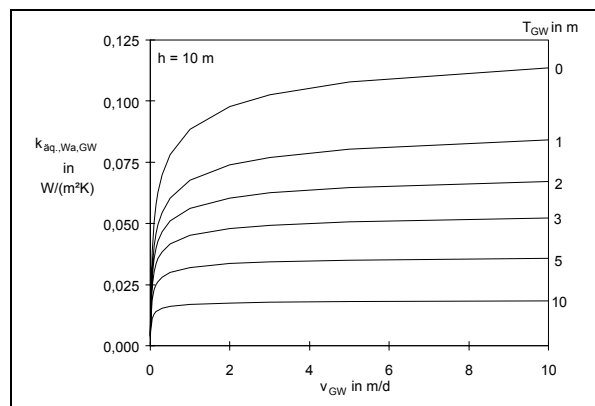
$$\dot{Q}_{Wa, GW} = f_{\lambda, Wa} \cdot g_{Wa, GW} \cdot (k_{\ddot{a}q., Wa, GW} \cdot A_{Wa,1} + k_{\ddot{a}q., Bo, GW, T_{GW}=0m} \cdot A_{Wa,2}) \cdot (\vartheta_{Li} - \vartheta_{GW})$$

mit :

$\dot{Q}_{Wa, GW}$	durch Grundwasser verursachte zusätzliche Heizlast	W
$f_{\lambda, Wa}$	Faktor zur Berücksichtigung der Erdreichwärmeleitfähigkeit λ_E /2/	-
$g_{Wa, GW}$	Geometriefaktor nach Mrziglod-Hund /6, 9/ oder /2/	-
$k_{\ddot{a}q., Wa, GW}$	äquivalenter k-Wert nach /2/ mit $T_{GW} = 0$ m Bilder 20 bis 23	W/(m ² ·K)
$k_{\ddot{a}q., Bo, GW}$	äquivalenter Wärmedurchgangskoeffizient für den Boden mit $T_{GW} = 0$ m nach /2/ Bilder 16 bis 19	W/(m ² ·K)
$A_{1Wa,1}$	Bereich der Wand ohne Grundwasserkontakt	m ²
$A_{1Wa,2}$	Bereich der Wand mit Grundwasserkontakt	m ²
ϑ_{Li}	Rauminnenlufttemperatur	°C
ϑ_{GW}	Jahresmitteltemperatur des Grundwassers ≈ Jahresmittel der Geländeoberflächentemperatur ≈ 1 K über dem Jahresmittel der Außenlufttemperatur	°C

Es zeigte sich auch hier eine deutliche Abhängigkeit für $k_{\ddot{a}q., Wa, GW}$ von der Grundwasserfließgeschwindigkeit und dem Abstand des Grundwasserspiegels zur Gründungs-

sole. Der Wärmedurchgangskoeffizient der Konstruktion hat ebenfalls einen Einfluß. Im genauen Verfahren /2/ ergeben sich dadurch eine große Anzahl von Diagrammen. Da der Einfluß des Wärmedurchgangskoeffizienten der Konstruktion gegenüber den anderen Parametern eine deutlich geringere Auswirkung hat, kann ein vereinfachtes Verfahren definiert werden, in welchem dieser Einfluß vernachlässigt ist. Für die meisten in der Praxis vorkommenden Fälle ist dies so ausreichend, da ohnehin die Parameter des Erdreichs und des Grundwassers oft nur geschätzt werden können. Die Diagramme dieses vereinfachten Verfahrens sind in den Bildern 20 bis 23 dargestellt.

Bild 20 : $k_{aq.,Wa,GW}$ in Abhängigkeit von v_{GW} für $h = 1$ mBild 21 : $k_{aq.,Wa,GW}$ in Abhängigkeit von v_{GW} für $h = 2,5$ mBild 22 : $k_{aq.,Wa,GW}$ in Abhängigkeit von v_{GW} für $h = 5$ mBild 23 : $k_{aq.,Wa,GW}$ in Abhängigkeit von v_{GW} für $h = 10$ m

5.2 Heizwärmebedarf für einen zusammenhängenden Zeitraum

Das hier gezeigte neue Berechnungsverfahren kann ebenfalls benutzt werden zur Berechnung des Heizwärmebedarfs für einen zusammenhängenden Zeitraum Δt (z.B. Jahresheizwärmebedarf $\Delta t = 1a = 8760$ h). Hierbei wird die mittlere Heizlast für den zu untersuchenden Zeitraum bestimmt und mit Δt multipliziert:

$$Q_{GW, \Delta t} = \dot{Q}_{GW, \text{mittel}, \Delta t} \cdot \Delta t$$

Im Gegensatz zur Heizlastberechnung muß hier zur Bestimmung des äquivalenten Wärmedurchgangskoeffizienten $k_{\text{äq.,GW}}$ mit einem mittleren Grundwasserspiegel für den zu untersuchenden Zeitraum der Abstand des Grundwasserspiegels zur Keller-sole T_{GW} bestimmt werden.

6 Berechnungsbeispiele

6.1 Heizlast eines Gebäudes

Zur Verdeutlichung der Größenordnung der Wärmeverluste erdreichberührter Bauteile zum Grundwasser werden hier die Ergebnisse einer Beispielberechnung dargestellt. Es wurde dazu die Normheizlast eines einfach konzipierten Gebäudes überschlägig ermittelt. Das Gebäude hat eine Grundfläche von 100 m^2 , zwei beheizte Geschosse befinden sich oberhalb des Erdreichs (1. und 2.OG), ein beheiztes Geschos im Erdreich (1.UG). Der mittlere k -Wert der Bauteile, die an die Außenluft grenzen beträgt $k_m = 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, der k -Wert der an das Erdreich grenzenden Bauteile beträgt $k = 0,35 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Es wird von einer Luftwechselzahl $\beta = 0,5 \text{ 1/h}$ im gesamten Gebäude ausgegangen. Als Temperaturdifferenz zwischen innen und außen wird im Berechnungsbeispiel 30 K gewählt.

Zur Auslegung der Heizungsanlage eines beheizten Gebäudes errechnet man in Deutschland dessen Heizlast nach DIN 4701 /11/. Zur Begriffsbestimmung sei hier gesagt, daß in DIN 4701 /11/ die Heizlast als Norm-Wärmebedarf bezeichnet wird. Da der Begriff Wärmebedarf üblicherweise mit der Wärmemenge verknüpft ist (z.B. Jahresheizwärmebedarf), wird hier im folgenden von Heizlast gesprochen. Die Heizlast eines Gebäudes \dot{Q}_N setzt sich aus zwei Teilen zusammen, dem Lüftungsanteil \dot{Q}_L und dem Transmissionsanteil \dot{Q}_T :

$$\dot{Q}_N = \dot{Q}_T + \dot{Q}_L$$

\dot{Q}_N	Normheizlast	W
\dot{Q}_T	Transmissionsheizlast	W
\dot{Q}_L	Lüftungsheizlast	W

Die Lüftungsheizlast \dot{Q}_L wird verursacht durch Undichtigkeiten in der Gebäudehülle und durch einen Mindestluftwechsel aus hygienischen Gründen. In beiden Fällen wird Innenluft mit einer Temperatur ϑ_{Li} durch eindringende Außenluft mit geringer

Temperatur ϑ_{La} ersetzt und muß vom tieferen Temperaturniveau auf das höhere der Innenluft angehoben werden.

Die Transmissionsheizlast \dot{Q}_T entsteht durch den Wärmetransport durch Wärmeleitung durch die Bauteile. Es findet ein Wärmetransport von der warmen Seite (innen) zur kalten Seite (außen) statt. Dieser Wärmetransport der an Außenluft grenzenden Bauteile kann näherungsweise mit einem über alle Bauteile gemittelten Wärmedurchgangskoeffizienten k_m bestimmt werden.

Für die Gebäudeteile oberhalb des Erdreichs wird im Beispiel sowohl die Lüftungs- als auch die Transmissionsheizlast nach DIN 4701 /11/ berechnet. Für die erdreichberührten Gebäudeteile wird die Lüftungsheizlast ebenfalls nach DIN 4701 /11/ berechnet, als Transmissionsheizlast werden die Ergebnisse der FE-Berechnungen, die dem neuen Berechnungsverfahren zugrunde liegen, angenommen.

Für den Keller wurden folgende Fälle berechnet :

- ⇒ Fall 1 : kein Grundwasser vorhanden
- ⇒ Fall 2 : Grundwasser im Abstand zur Kellersohle $T_{GW} = 1$ m und einer Grundwasserfließgeschwindigkeit $v_{GW} = 0,1$ m/d
- ⇒ Fall 3 : Grundwasser im Abstand zur Kellersohle $T_{GW} = 1$ m und einer Grundwasserfließgeschwindigkeit $v_{GW} = 2$ m/d

Man erhält für die verschiedenen Fälle des Berechnungsbeispiels:

Fall		$\dot{Q}_{T,1.UG}$	$\dot{Q}_{T,1.u.2.OG}$	$\dot{Q}_{L,1.UG}$	$\dot{Q}_{L,1.u.2.OG}$	$\dot{Q}_{N,Keller}$	$\dot{Q}_{N,gesamt}$
		kW	kW	kW	kW	kW	kW
1	ohne GW	2,6	4,5	1,3	2,6	3,9	11,0
2	$v_{GW} = 0,1$ m/d	4,1	4,5	1,3	2,6	5,4	12,4
3	$v_{GW} = 2$ m/d	5,1	4,5	1,3	2,6	6,4	13,4

Tab. 1 : Heizlasten im Berechnungsbeispiel

Für die Heizlast des Kellerbereichs im Berechnungsbeispiel ergibt sich, ausgehend vom Grundfall ohne Grundwasser, bei einem Abstand des Grundwassers zur Gebäudesohle $T_{GW} = 1$ m und $v_{GW} = 0,1$ m/d eine Erhöhung der Heizlast um 38%, bei

einem Abstand des Grundwassers zur Gebäudesohle $T_{GW} = 1$ m und $v_{GW} = 2$ m/d

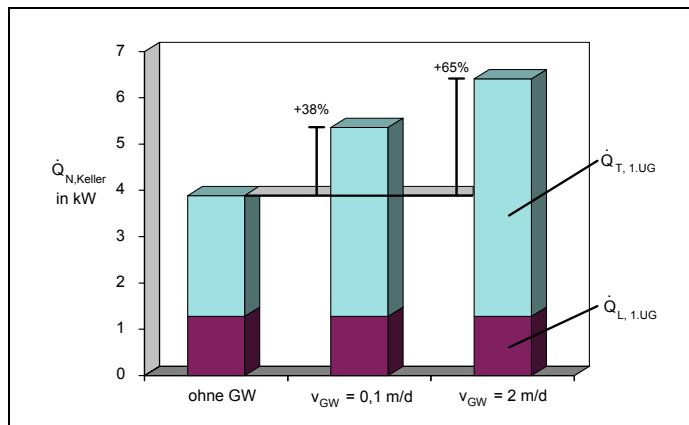


Bild 24 : Berechnete Heizlast für den Keller

eine Erhöhung der Heizlast um 65% (Bild 24).

Für die Heizlast des gesamten Gebäudes ergibt sich, wiederum ausgehend vom Grundfall ohne Grundwasser, bei einem Abstand des Grundwassers zur Gebäudesohle $T_{GW} = 1$ m und $v_{GW} = 0,1$ m/d eine Erhöhung der Heizlast um 14%, bei einem Ab-

stand des Grundwassers zur Gebäudesohle $T_{GW} = 1$ m und $v_{GW} = 2$ m/d eine Erhöhung der Heizlast um 23%

(Bild 25).

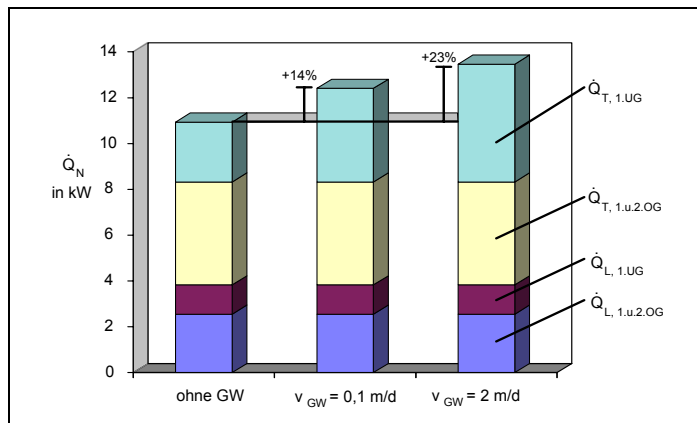


Bild 25 : Berechnete Heizlast für das gesamte Gebäude

Man erkennt an dem gewählten Beispiel, bei dem sich lediglich 1/3 des gesamten beheizten Gebäudevolumens im Erdreich befindet, daß sich deutliche Erhöhungen der berechneten Heizlast ergeben, wenn Grundwasser in Kellernähe vorhanden ist.

6.2 Heizungsregelung

Moderne Heizungsanlagen für Gebäude werden mit Außentemperaturfühlern geregelt. In Abhängigkeit von der Außentemperatur wird eine bestimmte Vorlauftemperatur vom Heizkessel bereitgestellt. Mit einer solchen Regelung wird so die Vorlauftemperatur der aktuellen Heizlast des Gebäudes angepaßt.

Für Gebäudeteile, die an Außenluft grenzen, ist diese Vorgehensweise sinnvoll, da die Heizlast mit der Außentemperatur direkt zusammenhängt. Für Gebäudeteile im Erdreich stellt sich dies nicht so dar. Einerseits tritt für die Transmission eine Phasenverschiebung auf, also eine zeitliche Verschiebung der maximalen Heizlast. Andererseits bewirkt die große Masse im Erdreich eine Dämpfung, da sich die Tempe-

ratur im Erdreich nicht dem Tagesgang der Außentemperatur anpaßt. Somit wirken sich Temperaturspitzen der Außenluft nicht aus, die Heizlast im Winter reduziert sich, in den anderen Jahreszeiten jedoch erhöht sie sich.

Zur Verdeutlichung wurde für ein Gebäude mit einem Geschöß im Erdreich und zwei oberirdischen Geschossen die Heizlast im Jahresverlauf bestimmt. Die Transmissionsheizlast der oberirdischen Geschosse und die Lüftungsheizlast des gesamten Gebäudes wurde in Anlehnung an DIN 4701 /11/ berechnet wobei als Außenlufttemperatur die Tagesmittelwerte des Testreferenzjahres Holzkirchen angenommen wurden. Die Transmissions-Heizlastberechnung der erdreichberührten Bauteile erfolgte nach den Verfahren von Mrziglod-Hund /6, 9/ und Dahlem /2/. Für das Grundwasser

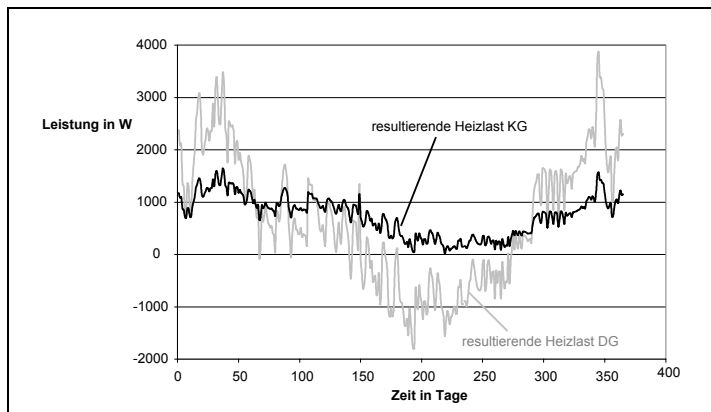


Bild 26 : Heizlasten unter Berücksichtigung der Gewinne ohne Grundwasser

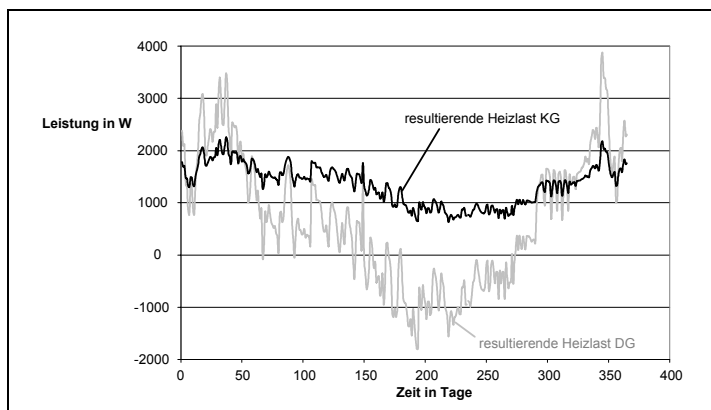


Bild 27 : Heizlasten unter Berücksichtigung der Gewinne mit Grundwasser

wurde $T_{GW} = 0 \text{ m}$ und $v_{GW} = 4 \text{ m/d}$ angesetzt. Weiterhin wurden nutzbare solare und interne Gewinne gemäß DIN EN 832 /10/ ermittelt, da diese besonders von Frühling bis Herbst ausschlaggebend für die Heizgrenze sind.

Zwei Heizlastkurven der durchgeführten Berechnungen /8/ sind in den Bildern 26 und 27 dargestellt.

In den Bildern ist vor allem zu erkennen, daß sich Temperaturspitzen im Erdreich viel geringer auswirken und daß sich für die erdreichberührten Bauteile ganz andere Heizgrenzen einstellen. In den dargestellten Kurven ergibt sich auch für den gesamten

Sommer eine Heizlast. Dies ist wahrscheinlich auf das hier nur näherungsweise geeignete Verfahren nach DIN EN 832 /10/ zurückzuführen.

Aus diesen Bildern erkennt man weiterhin, daß ein übliches Regelungssystem über Außentemperaturfühler, welches die Heizlast der außenluftberührten Bauteile gut annähert, für das beheizte Kellergeschoß ungeeignet ist. Bei größeren beheizten Flächen im Erdreich empfiehlt es sich deshalb, ein getrenntes Regelungssystem einzusetzen.

Literatur

- /1/ Balke, K.-D.: Die Grundwassertemperaturen in Ballungsgebieten, Forschungsbericht BMFT-FB-T 81-028, Fachinformationszentrum Karlsruhe, 1981
- /2/ Dahlem, K.-H.: Der Einfluß des Grundwassers auf den Wärmeverlust erdreichberührter Bauteile, Dissertation, Verlag Universitätsbibliothek Kaiserslautern, Kaiserslautern 2000
- /3/ Erk/ Gröber/ Grigull: Wärmeübertragung. Springer - Verlag, 3. Auflage, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1963
- /4/ Hagentoft, C.-E.: Heat loss and temperature under a building with and without ground water flow. Part I: Infinite ground water flow rate. Department of Building Physics, Lund University, Januar 1994
- /5/ Hagentoft, C.-E.: Heat loss and temperature under a building with and without ground water flow. Part II: Finite ground water flow rate. Department of Building Physics, Lund University, Januar 1994
- /6/ Mrziglod-Hund, M.: Berechnungsverfahren für den Wärmeverlust erdreichberührter Bauteile, Dissertation, Kaiserslautern 1995
- /7/ DIN EN ISO 13370: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Wärmeübertragung über das Erdreich - Berechnungsverfahren, Ausgabe:1998-12
- /8/ Denig, F.: Strategien zur Auslegung der Heizungsanlage bei Gebäuden mit beheizten erdreichberührten Räumen, Diplomarbeit. Universität Kaiserslautern, Januar 2000
- /9/ Mrziglod-Hund, M.: Ein neues Berechnungsverfahren für den Wärmeverlust erdreichberührter Bauteile, Gesundheitsingenieur (1995), Heft 2, S. 65-73 und Heft 3, S.139-145
- /10/ DIN EN 832: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung des Heizenergiebedarfs; Wohngebäude, Ausgabe:1998-12
- /11/ DIN 4701: Teil 1 und 2, Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden, Ausgabe März 1983