

## Anhang 2

### **Arbeitspaket 2: Untersuchung der temperaturstabilisierenden Wirkung der Erdmasse**

Technische Hochschule Ostwestfalen Lippe

iFE – Institut für Energieforschung

Prof.'in Dr.-Ing. Susanne Schwickert (Bauklimatik, Bauphysik, Akustik, Monitoring)

Emilienstraße 45; 32756 Detmold

+49 (0)5231 769-6182 | [susanne.schwickert@th-owl.de](mailto:susanne.schwickert@th-owl.de)

#### **Autoren**

Prof.'in Dr.-Ing. Susanne Schwickert

B.A., B.Eng. Kim Kristin Blaschke

M.Sc. Markus Götde

## Inhalt

1.	Temperaturstabilisierende Wirkung der Erdmasse.....	5
1.1	Einleitung.....	5
1.2	Bisherige Untersuchungen.....	5
1.2.1	Zonierung des Ausstellungsbereichs allgemein.....	5
1.2.2	Empfehlungen zu Zonierung, Konstruktion und Lage.....	6
1.3	Umformulierung der Zielsetzung.....	9
2	Grundlegendes zur durchgeführten Untersuchung.....	9
2.1	Simulationsprogramm.....	9
2.2	Modellierung des Gebäudes.....	10
2.3	Einschwingzeit und Wetterdaten.....	13
3	Basisvariante.....	13
3.1	Allgemeines.....	13
3.2	Ergebnisse.....	13
3.3	Diskussion der ersten Versuchsreihe.....	16
4	Mehrzonenmodell mit Besucherverkehr.....	16
4.1	Gebäudemodell.....	16
4.2	Randbedingungen Nutzung.....	18
4.3	Auswertung.....	19
4.3.1	Ergebnisse der Simulationen.....	19
4.3.2	Auswertung bzgl. langfristiger Grenzen und saisonaler Schwankungen.....	19
4.3.3	Kurzzeitschwankungen.....	21
4.4	Fazit.....	22

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Außenansicht des implementierten 3D-Modells in der hygrothermischen Simulationssoftware Wufi Plus ohne Vorzone .....	5
Abbildung 2: Zielmodell, Grundriss- und Schnittzeichnung - Depot, Treppenhaus, Foyer, Ausstellung .....	7
Abbildung 3: Zielmodell A: sich frei einstellende Innentemperaturen im Vergleich.....	8
Abbildung 4: Übersichtsmodell Gebäudeversion 1 .....	10
Abbildung 5: X-Z Schnitt Gebäudeversion 1; vollgedämmte Bodenplatte .....	12
Abbildung 6 Y-Z Schnitt Gebäudeversion 1; vollgedämmte Bodenplatte .....	12
Abbildung 7 X-Z Schnitt Gebäudeversion 2; 6 m horizontale Randdämmung, 2 m vertikale Randdämmung .....	12
Abbildung 8 Y-Z Schnitt Gebäudeversion 2; 6 m horizontale Randdämmung, 2 m vertikale Randdämmung .....	12
Abbildung 9: Vergleich der Innenraumtemperatur im Grundmodell der Modelle 1 bis 3.....	14
Abbildung 10: Vergleich der Innenraumtemperatur in der Basisvariante der Modelle 4 – 6 ..	15
Abbildung 11 Vergleich der Innenraumtemperatur Grundvariante Modelle 1 und 4 .....	16
Abbildung 12: Y-Z Schnitt Gebäudevariante 1, vollgedämmte Bodenplatte 4 Räume.....	17
Abbildung 13: X-Z Schnitt Gebäudevariante 1, vollgedämmte Bodenplatte 4 Räume.....	17
Abbildung 14: Y-Z Schnitt Gebäudevariante 5, 6m Horizontale Randdämmung, 2 m vertikale Randdämmung .....	17
Abbildung 15: X-Z Schnitt Gebäudevariante 5, 6m Horizontale Randdämmung, 2 m vertikale Randdämmung .....	17
Abbildung 16: Vergleich Innenraumtemperaturen bei unterschiedlichen Dämmmaßnahmen, Variante 1 bis 3.....	19
Abbildung 17: Vergleich Innenraumtemperaturen bei unterschiedlichen Dämmmaßnahmen, Variante 4 bis 6.....	19
Abbildung 18: Temperaturverlauf Modell 1 und Kriterien ASHRAE Klasse A1 .....	21
Abbildung 19: Temperaturverlauf Modell 2 und Kriterien ASHRAE Klasse A1 .....	21
Abbildung 20: Temperaturverlauf Modell 3 und Kriterien ASHRAE Klasse A1 .....	21
Abbildung 21: Temperaturverlauf Modell 4 und Kriterien ASHRAE Klasse A1 .....	21
Abbildung 22: Temperaturverlauf Modell 5 und Kriterien ASHRAE Klasse A1 .....	21
Abbildung 23: Temperaturverlauf Modell 6 und Kriterien ASHRAE Klasse A1 .....	21

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Aufbau der Bodenplatte (innen nach außen) .....	11
Tabelle 2: Deckenaufbau von außen nach innen .....	11
Tabelle 3: Erdberührter Wandaufbau von außen nach innen .....	11
Tabelle 4: Temperaturbereiche je Modell nach Art der Dämmung .....	15
Tabelle 5: Beschreibung der Dämmvarianten .....	20
Tabelle 6: Einhaltung der Kriterien (Kategorie A1) nach ASHREA.....	20

# 1. Temperaturstabilisierende Wirkung der Erdmasse

## 1.1 Einleitung

Hervorragender Wärmeschutz und große Masse sind Voraussetzungen für möglichst klimakonstante Gebäude. Innerhalb der Projektphase 1 wurden Maßnahmen zum energieeffizienten Museumsgebäudebetrieb identifiziert und z.T. quantifiziert. Die Größe und Grundfläche des geplanten Gebäudes sowie die Hanglage bieten ideale Voraussetzungen, die raumklimastabilisierende Wirkung des Erdreichs zu erforschen, so sollten theoretisch wie auch messtechnisch die Temperaturverhältnisse und die Wärmeströme im Erdreich untersucht werden. Hiermit kann der Frage nach einem primärenergetisch sinnvollen Einsatz von Dämmstoffen im erdberührten Bereich gerade vor dem Hintergrund der geforderten Klimakonstanz im Gebäude nachgegangen werden, zumal es in der Fachliteratur kaum dokumentierte seriöse Messungen gibt und in verschiedenen Gebäudestandards/-zertifizierungen immer noch die zweifelhafte Strategie eines maximalen Dämmstoffeinsatzes verfolgt und belohnt wird.

## 1.2 Bisherige Untersuchungen

### 1.2.1 Zonierung des Ausstellungsbereichs allgemein

Der Ausstellungsbereich muss ein Ort hoher Klimakonstanz sein, welche mit möglichst geringem energetischen Zusatzaufwand hergestellt werden soll. Der Raum und das vorherrschende Raumklima dienen dem Schutz der dortigen Ausstellungsstücke. Der gesellschaftliche Auftrag eines Museums ist es aber auch, Menschen an den dort aufbewahrten Kulturgütern teilhaben zu lassen, zumindest visuell. Damit verbunden ist die willkommen heißende Geste, die ein Museumsgebäude innehaben sollte. Besucher wünschen sich Transparenz und Licht und möglichst direkten Zugang.

Innerhalb einer Parameterstudie wurden die raumklimatischen Auswirkungen einer großflächigen Glasfassade (ca. 250 m<sup>2</sup>; U=0,8 W/m<sup>2</sup>K, g =0,4) als Raumabschluss der Ausstellung im Vergleich zu einem Ausstellungsraum aus gänzlich opaken Umschließungsbauteilen mit vorgeschalteter Pufferzone durch Einzug einer massiven Trennwand aus 60cm Stampflehm (siehe Kapitel 5.1) beleuchtet.

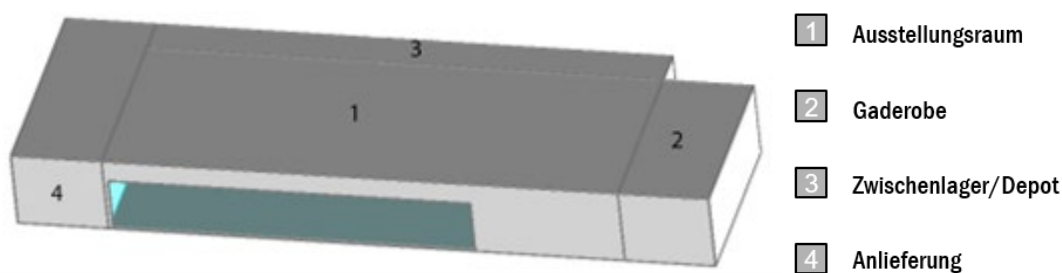


Abbildung 1: Außenansicht des implementierten 3D-Modells in der hygrothermischen Simulationssoftware Wufi Plus ohne Vorzone

Als interne Lasten werden durchgängig 20 Personen mit personenbezogenem Außenluftvolumenstrom von 400 m<sup>3</sup>/h während der Öffnungszeiten modelliert. Die Untersuchung erfolgte unter Verwendung des Testreferenzjahres Kassel - Extremer Sommer.

Die Jahresverläufe machen deutlich, dass die Abspaltung einer puffernden Vorzone, dem sog. Open Space, in erheblichem Maße zur Reduzierung deutlich überhöhter Innentemperaturen im eigentlichen Ausstellungsbereich beiträgt. Im Ausstellungsbereich ohne vorgeschaltete

Pufferzone liegen die sommerlichen Höchsttemperaturen mit bis zu 29°C um bis zu 5K höher als mit Open Space. Hier liegen Maximalwerte bei gut 24°C. Zudem schwanken die Temperaturen ohne Vorzone dann über den Tag um ca. 2K, mit Vorzone sind die Schwankungen kaum nennenswert.

Dies ist damit zu erklären, dass bei Abspaltung der Vorzone die solaren Lasten den hochwertigen Ausstellungsbereich nur untergeordnet tangieren. Außerdem wirkt die eingebrachte Stampflehmwand aufgrund ihrer Massivität zusätzlich in thermischer und hygrischer Hinsicht stabilisierend auf das Raumklima ein.

Bei gleichhohen Feuchtelasten in beiden Varianten und reduziertem Luftwechsel bewirken die hohen Lufttemperaturen im nicht unterteilten Ausstellungsraum vergleichsweise niedrige relative Raumluftfeuchten im Sommer.

### **1.2.2 Empfehlungen zu Zonierung, Konstruktion und Lage**

Für die Entwurfs- und Ausführungsplanung von Depots, Archiven und Museen ähnlicher Größe lassen sich unter bauklimatischen Gesichtspunkten die folgenden (theoretischen) Empfehlungen festhalten, die abschließend simulatorisch überprüft werden sollen.

Um einer großen Temperaturschwankung entgegenzuwirken, sollte das Gebäude idealerweise, sofern es die örtliche Topografie zulässt, mit mindestens drei Gebäudeseiten in einer Mindesthöhe von 2 bis 3 m im Erdreich stehen. Ein insgesamt im Erdreich abgesenkter Gebäudekörper würde zwangsläufig eine stufenlose Erschließung der Innenräume unmöglich machen, wäre aber bzgl. der Klimakonstanz ideal. Diese Ausführung kommt demnach insbesondere für nicht öffentlich zugänglichen Lagerräume in Betracht.

Weiterhin sollte die Südausrichtung von Öffnungen vermieden werden, um ausgeprägte, kurzfristige Temperaturschwankungen zu vermeiden. Wenn sich Südfenster aufgrund der örtlichen Situation nicht vermeiden lassen, sollte eine Pufferzone mit möglichst großem Raumvolumen an der Außenseite angeordnet und durch massive Bauteile mit einer hohen thermischen Speichermasse von dahinterliegenden Ausstellungsbereichen abgetrennt werden. Diese können dabei beispielsweise als großzügige Eingangsbereiche dienen, in denen Temperaturschwankungen bis zu einem gewissen Maß unproblematisch sind. Kleine Pufferzonen sind hingegen unvorteilhaft, weil die einfallenden Wärmeerträge hier zu erheblichen Temperaturspitzen führen können. Im Hinblick auf großzügige Fensterflächen wird stattdessen eine Nordorientierung empfohlen. Die aus dieser Richtung einfallende, diffuse Sonnenstrahlung hat dabei im Innenraum nur eine mäßige Temperaturschwankung zur Folge.

In Bezug auf die Bodenplatte wird unter Berücksichtigung der dargelegten Energiebilanzierung eine unterseitige, mehrere Meter breite, horizontale Randdämmung empfohlen. Eine vertikal ausgeführte Randdämmung mit einer Mindesthöhe von 2 m kann ebenfalls in Erwägung gezogen werden, wenn ohnehin tiefgreifende Fundamente erforderlich sind. Andernfalls hätte eine solche Ausführung einen unverhältnismäßigen Mehraufwand zur Folge. Weiterhin sollten erdberührte Außenwände außenseitig mit einer 3 m in das Erdreich einbindenden Dämmung versehen werden. Die verbleibende Oberfläche der erdberührten Bodenplatte sowie der erdberührten Außenwände sind - sofern keine Fußbodenheizung geplant ist - ungedämmt auszuführen und ermöglichen somit einen natürlichen Wärmeaustausch zwischen Innenraum und Erdreich, welcher einen nennenswerten passiven Beitrag zur Klimatisierung im Winter sowie im Sommer darstellt.

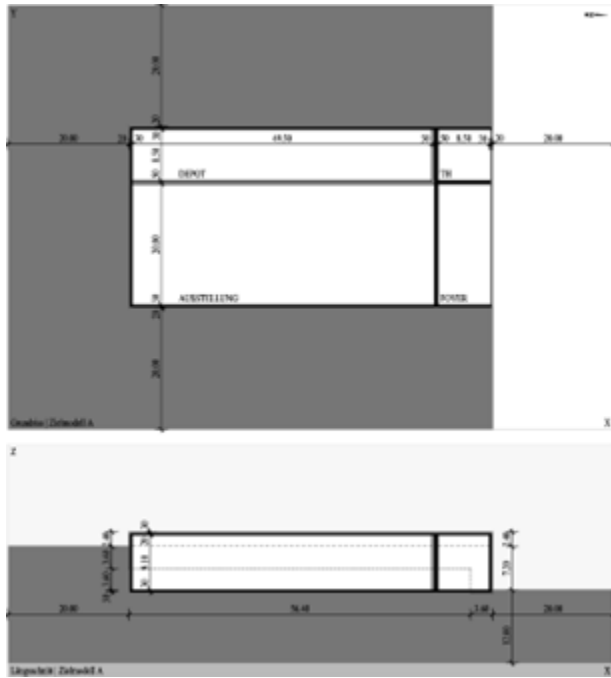


Abbildung 2: Zielmodell, Grundriss- und Schnittzeichnung - Depot, Treppenhaus, Foyer, Ausstellung

Im Rahmen dieser Annahme kann die Erschließung nur über die beschriebene Nordseite erfolgen. Für den Innenbereich werden vier Raumzonen definiert, die durch ein Foyer mit seitlich angeordnetem, abgeschlossenen Treppenraum, durch einen dahinter befindlichen Ausstellungsraum sowie durch ein an den Ausstellungsraum grenzendes Depot gebildet werden.

Durch Annahme eines unverändert 9,6 m hohen Ausstellungsgebäudes, welches auf einer Höhe von 7,2 m an Ost-, Süd- und Westwänden erdberührt ist, soll eine thermische Stabilität insbesondere in den Depot- und Ausstellungsräumen erreicht werden. Sämtliche erdberührten Außenwände sind mit 3,6 m tief in das umliegende Erdreich einbindende Wärmedämmung versehen. Der seitliche und untere Randbereich der Nordfassade (d.h. in Ost- und Westorientierung sowie Bodenplatte) ist ebenfalls mittels einer 3,6 m breiten vertikalen bzw. horizontalen Randdämmung gedämmt. Die übrige erdberührte Bauteiloberfläche der Bodenplatte verbleibt wie die unteren Bereiche der erdberührten Außenwände ungedämmt.

Außenwände und Dach bilden eine wärmeschutztechnisch hochwertige Hülle gegen Außenluft ( $U = 0,17$  bzw.  $0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Im Innenraum grenzt eine 50 cm starke Betonwand den Eingangsbereich von den dahinterliegenden Depot- und Ausstellungsraum ab. Der Depotbereich erhält zusätzlich eine Holzwand (50 cm Vollholz,  $\lambda = 0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).

Alle Simulationen am Kombinationsmodell erfolgen unter Berücksichtigung des TRY Normaljahrs 2015 sowie des TRY Normaljahrs 2045 bei Annahme einer sich frei einstellenden Innentemperatur sowie eines internen Wärmeeintrags nach DIN 4108-2 von  $144 \text{ Wh}/(\text{m}^2\text{d})$ . Sie ergeben bei klimatischen Bedingungen gemäß TRY Normaljahr 2045 wärmere Temperaturen im Innenraum. Die Temperaturen im Depot verhalten sich aufgrund seiner Wärmedämmung und „Abschottung“ unabhängig vom gewählten Klimadatensatz, die sich frei einstellende Innentemperatur bewegt sich zwischen  $12,2 \text{ °C}$  Ende Februar und  $16,3 \text{ °C}$  Ende August.

Die Innentemperatur im Ausstellungsraum bewegen sich im Jahresverlauf unter den Klimabedingungen sowohl des TRY 2015 als auch des TRY 2045 innerhalb einer Spanne von rund 6 K. Für das TRY 2015 ergeben sich Temperaturen zwischen 14,9 °C und 20,1 °C. Für Treppenhaus und Foyer ergeben sich im Jahresverlauf Temperaturwerte zwischen 10,5 °C und 25,5 °C.

Insgesamt lässt sich anhand der Innenraumtemperaturen erkennen, dass die Berücksichtigung sehr günstiger bauklimatischer Randbedingungen die gewünschten Ergebnisse bzgl. Klimakonstanz und Temperaturniveau und damit auch Heiz- und Kühlenergiebedarf bringen. So können die an der Nordfassade gelegenen Räume die im Außenraum auftretenden Temperaturen abpuffern, sodass in den dahinterliegenden Räumen deutlich geringere Temperaturschwankungen resultieren. Dabei spielen auch die massiven Innenwände, welche über den Tag gespeicherte Wärmeerträge bei Nacht wieder an den Raum abgeben, eine entscheidende Rolle. Gleichzeitig sind den Leichtbauwänden aus Holz die hohe thermische Stabilität im Depot zu verdanken, die für die langfristige Lagerung von Ausstellungsgütern unerlässlich ist.

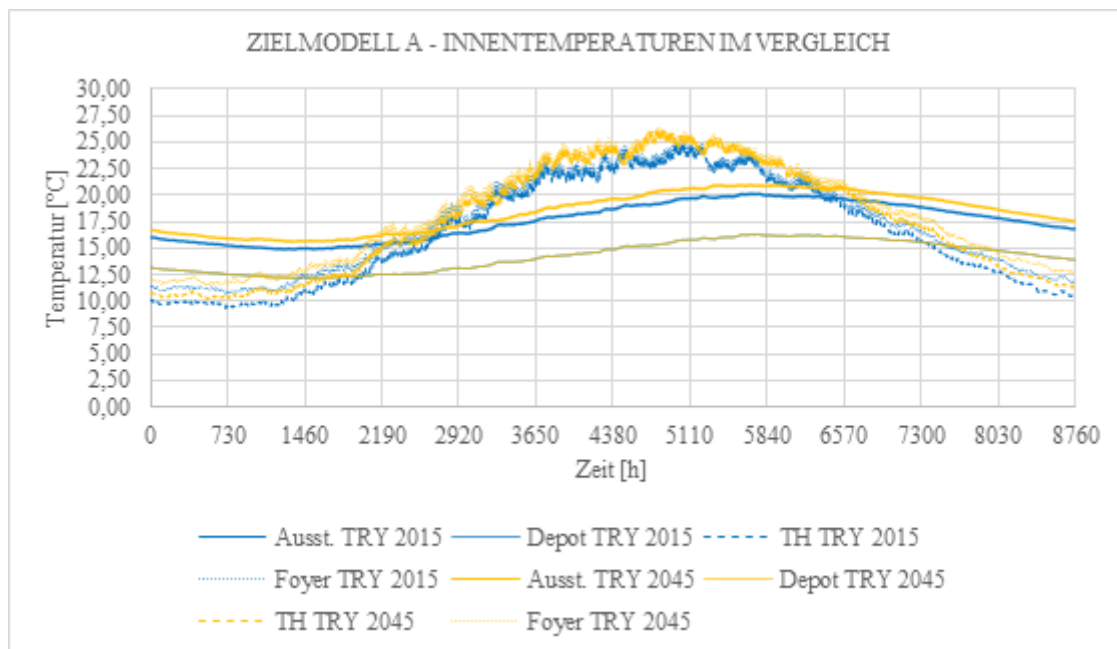


Abbildung 3: Zielmodell A: sich frei einstellende Innentemperaturen im Vergleich

Als Quintessenz lässt sich allgemein zusammenfassen, dass mit dem folgenden Maßnahmenbündel hohes Maß an Kompaktheit, hohes Maß an Erdkontakt mit lediglich im Randbereich gedämmten erdberührten Bauteilen, hohes wärmeschutztechnisches Niveau der Gebäudehülle gegen Außenluft, nordorientierte Verglasungsflächen, Innenbauteile in sehr schwerer Bauweise und Vorschalten einer voluminösen Pufferzone ein Museumsbetrieb im normalen Modus (keine nennenswerten Besucherspitzenzeiten) ohne jegliche Art von Beheizung oder Kühlung bei Lüftung mit unkonditionierter Außenluft möglich ist, der die Klimabedingungen nach ASHRAE A1 mit den dort definierten Kurz- und Langzeitschwankungen bezüglich der sich gänzlich frei einstellenden Innentemperaturen erfüllt. Um Spitzenzeiten und zukünftigen Hitzeperioden sicher angesichts des konservatorischen Anspruchs begegnen zu können, erscheint eine Klimatisierung dennoch angezeigt. Durch Umsetzen der bauklimatischen Grundempfehlungen kann diese dann deutlich kleiner dimensioniert werden.



Dass sich diese unter rein bauklimatischen Gesichtspunkten identifizierten Idealbedingungen aufgrund vielfältiger örtlicher Zwangspunkte wohl nur selten in genau dieser Form realisieren lassen, ist allerdings ebenfalls ersichtlich.

### 1.3 Umformulierung der Zielsetzung

Untersucht wird die temperaturstabilisierende Wirkung der Erdmasse unterhalb und neben dem Gebäudekomplex. Die Größe, die Grundfläche und die Kompaktheit des neuen Eingangs- und Ausstellungsgebäudes des Freilichtmuseums Detmold sowie die geplante Hanglage bieten ideale Voraussetzungen, die temperaturstabilisierende Wirkung der Erdmasse anhand von Simulationen, die die Wärmeströme im Erdreich untersuchen, zu beleuchten.

Im Zuge der weiteren Gebäudeplanung wurde von Auftraggeberseite und Planenden die Entscheidung getroffen, statt einer Wandtemperierung eine Flächenheizung im Fußbodenaufbau vorzusehen. Damit ist die Empfehlung, die Bodenfläche auf großen Teilen wenig oder ungedämmt zu belassen, um möglichst großen Kontakt des Baukörpers zur thermischen Speichermasse des Erdreichs herzustellen, obsolet. Im Gegenteil ist jetzt eine Wärmedämmung unterhalb der Ebene der Fußbodenheizung angezeigt, damit die im Bodenaufbau eingebrachte Heizwärme nicht direkt ins Erdreich geleitet wird.

Die differenzierte Betrachtung der optimalen Wärmedämmschichtdicke und -lage sowie die Messung der unter der Bodenplatte vorherrschenden Temperaturen ist darum zugunsten anderer Betrachtungen in Phase 2 unterblieben. Die Hautfragstellung richtete sich in diesem Kapitel nach einem primärenergetisch sinnvollen Einsatz von Dämmstoffen im erdberührten Bereich vor dem Hintergrund der geforderten Klimakonstanz in Museumsgebäuden.

## 2 Grundlegendes zur durchgeführten Untersuchung

### 2.1 Simulationsprogramm

Für die Erstellung der Simulationen ist das Simulationsprogramm VOLTRA des Anbieters Physibel verwendet worden. VOLTRA ist ein numerisches, dreidimensionales, dynamisches Simulationsprogramm, welches sich dadurch auszeichnet, dass der Wärmeübergang in konvektiven Lufträumen unter Berücksichtigung sämtlicher normativer Vorgaben detailliert berechnet wird. Die Software, die in der Regel im Zusammenhang der Wärmebrückenmodellierung verwendet wird, bildet dabei ausschließlich rechteckige Bauteile und Gebäude ab. Die Modelleingabe erfolgt durch die Erstellung eines Rasters, welches die Modellabmessungen in Form von Koordinaten in den drei Raumrichtungen X, Y und Z beschreibt. Auf Grundlage dieses Rasters werden anschließend rechteckige Blöcke definiert, die die Volumina des Bauteils bilden. Jeder Block ist durch sechs Koordinaten definiert. Jedem definierten Block wird eine „Farbe“ zugeteilt, die Farbe beschreibt, ob es sich bei dem Volumen um ein Material oder eine Randbedingung handelt. Materialien werden als Festkörper erkannt, Randbedingungen als leeres Volumen. Im passenden Eingabefenster lassen sich den definierten Farben die entsprechenden thermischen Eigenschaften zuweisen. Für Materialien sind insbesondere die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmespeicherkapazität sowie die Trockenrohdichte von Bedeutung. Weiterhin kann den Randbedingungen und Materialien beispielsweise eine festgelegte Temperatur sowie ein Wärmeübergangswiderstand zugewiesen werden. Das Programm verwendet an vielen Stellen Standardwerte, die teilweise auch iterativ errechnet

werden. Neben der Eingabe von konstanten Werten, für beispielsweise die Temperatur, lassen sich auch zeitabhängige Funktionen implementieren. Die Erstellung dieser Funktionen kann mithilfe von Microsoft Excel durchgeführt werden. Zur Durchführung der Berechnung sind neben der Eingabe der Gebäudeparameter weitere Berechnungseinstellung, wie zum Beispiel die örtliche Himmelsrichtung, notwendig und bei Berücksichtigung von Sonneneinstrahlung auch die Funktionen der direkten und diffusen Solarstrahlung für den entsprechenden Standort. Nach der Definition eines Berechnungszeitraums kann die iterative Berechnung zur Ermittlung der Wärmeströme und Temperaturen an dem Gebäudemodell gestartet werden. Die Ergebnisse werden in Form eines Datenberichts und einer graphischen Ausgabe präsentiert.

## 2.2 Modellierung des Gebäudes

Der Neubau des Eingangs- und Ausstellungsgebäude ist als Vieleck-Gebäude geplant; da das Simulationsprogramm nur rechteckige Gebäudemodelle abbilden kann, muss zunächst ein angemessenes abstraktes Gebäudemodell erstellt werden. Das entstandene Gebäudemodell hat eine Länge von 60 m, eine Breite von 30 m und eine Gesamthöhe ohne Bodendämmung von 9,96 m. Daraus resultiert eine Bruttogeschossfläche von 1800 m<sup>2</sup>. Die geplanten Räume im Ausstellungsgebäude weisen eine Innenraumfläche von 1650 m<sup>2</sup> zzgl. der Wände auf, sodass das Modell aus Sicht der Grundfläche hinreichend genau ist. Das Gebäudemodell verfügt nicht über Fenster.

Das Simulationsmodell beinhaltet neben dem Gebäudemodell die Erdmassen unterhalb sowie seitlich des Gebäudemodells, sodass sich für das Simulationsmodell die Gesamtabmessungen von 100 m x 70 m x 33,60 m (L x B x H) ergeben. Das Vieleck-Gebäude grenzt einseitig an das vorhandene Erdreich an, sodass auch im Simulationsmodell das angenäherte Gebäudemodell an einen Erdwall angrenzt. Die Temperatur im Erdreich wird durch die angrenzenden Randbedingungen bestimmt; dies ist zum einen der Temperaturverlauf der Außenluft sowie die Solarstrahlung über den Jahresverlauf zum anderen eine Temperaturrandbedingung in 12 m Tiefe. Die angenommene Temperatur in 12 m Tiefe beträgt 11 °C<sup>1</sup>.

Der Aufbau von Boden und Decke des Modellgebäudes ist dem Dokument „Detail Regelaufbauten Boden“ vom 24.09.2021 entnommen; der Aufbau der Wände entstammt dem Dokument „Detail Regelaufbauten opake Wand“ vom 24.02.2022.

Die Bodenplatte besteht von oben nach unten aus Estrichbeton, EPS-Hartschaumplatte, Beton und Schaumglasschotter (Tabelle 1). Die Aufbauten von Wand und Decke finden sich in Tabelle 2 und Tabelle 3.

Abbildung 4 zeigt die Außenansicht des Gebäudemodells im Simulationsmodell. Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen Schnitte des Simulationsmodells mit gedämmter Bodenplatte und die dazugehörigen Abmessungen. Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigen Schnitte des Simulationsmodells mit horizontaler und vertikaler Randdämmung sowie den dazugehörigen Abmessungen.

---

<sup>1</sup> Quelle: Klimastatusbericht 2011, Auswertung der Messreihe der Säkularstation Potsdam

Tabelle 1: Aufbau der Bodenplatte (innen nach außen)

Stärke: [m]	Material:	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmeka- pazität c [J/kgK]
0,18	Estrichbeton	1,200	2000	1000
0,05	EPS-Platte WLG 035	0,035	25	1450
0,25	Beton	2,500	2400	1000
0,28	Schaumglas- schotter	0,040	140	1000

Tabelle 2: Deckenaufbau von außen nach innen

Stärke: [m]	Material:	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmeka- pazität c [J/kgK]
0,08	Brettstapelholz	0,130	500	1600
0,24	Holzfaserdäm- mung WLS 040	0,040	160	2100
0,02	DHF Platte	0.100	600	1700

Tabelle 3: Erdberührter Wandaufbau von außen nach innen

Stärke: [m]	Material:	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	Rohdichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmeka- pazität c [J/kgK]
0,2	XPS Dämmung	0.040	40	1450
0,4	Beton	2,500	2400	1000

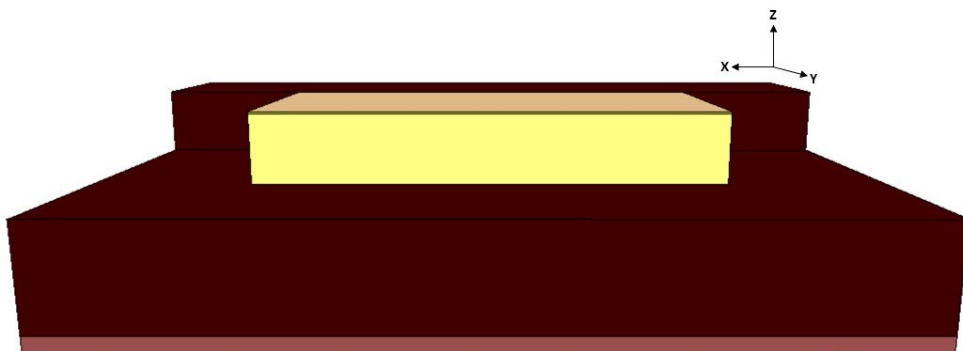


Abbildung 4: Übersichtsmodell Gebäudeversion 1

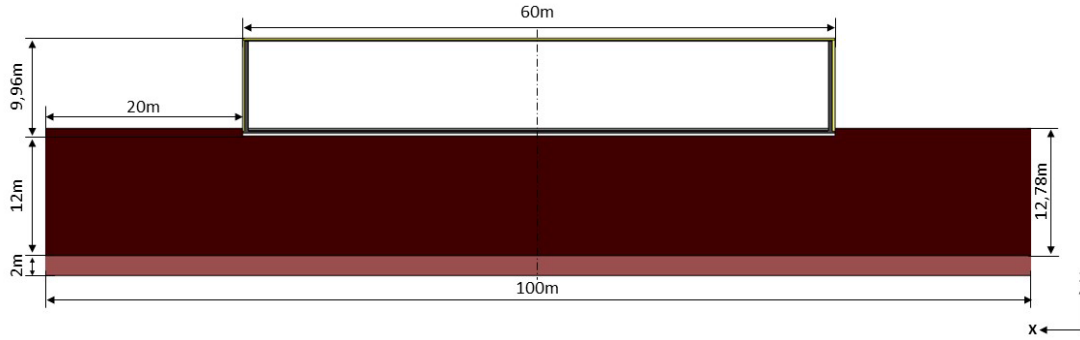


Abbildung 5: X-Z Schnitt Gebäudeversion 1; vollgedämmte Bodenplatte

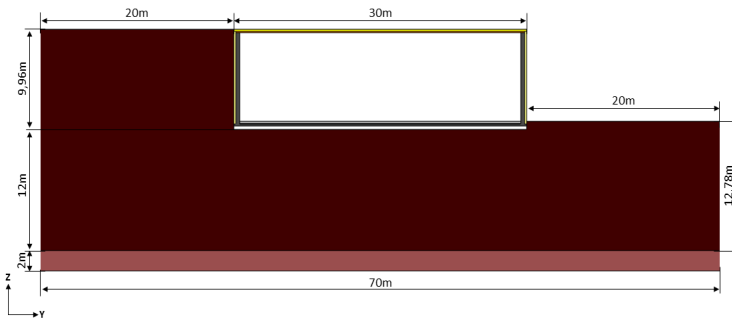


Abbildung 6 Y-Z Schnitt Gebäudeversion 1; vollgedämmte Bodenplatte

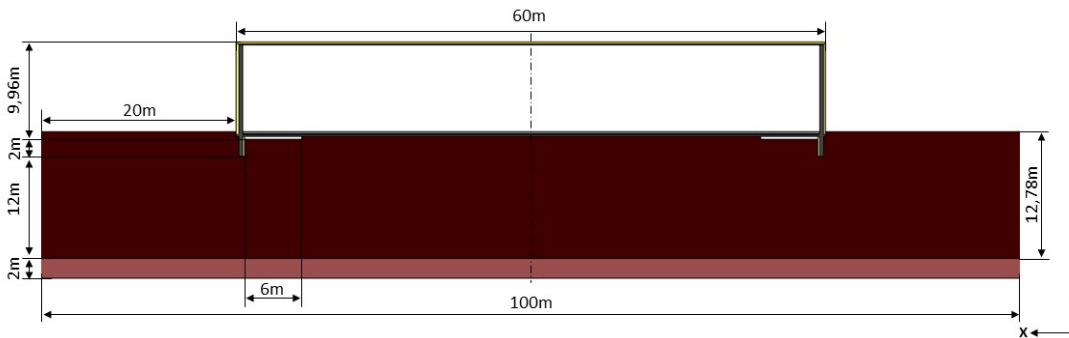


Abbildung 7 X-Z Schnitt Gebäudeversion 2; 6 m horizontale Randdämmung, 2 m vertikale Randdämmung

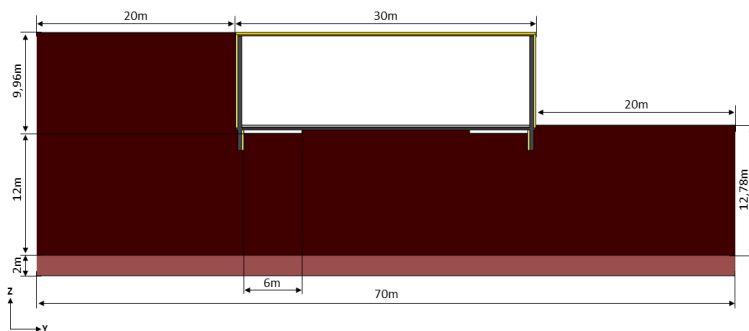


Abbildung 8 Y-Z Schnitt Gebäudeversion 2; 6 m horizontale Randdämmung, 2 m vertikale Randdämmung

## 2.3 Einschwingzeit und Wetterdaten

Zur Ermittlung der erforderlichen Einschwingberechnungszeit ist zunächst eine Simulation über einen Zeitraum von 5 Jahren durchgeführt worden, um zu ermitteln, ab welchem Zeitpunkt die Einschwingberechnung abgeschlossen ist. Die Auswertung der Simulation zeigt, dass die Einschwingdauer 2 Jahre beträgt; die ersten beiden Jahre unterscheiden sich deutlich von den folgenden. Ab dem 3. Jahr beträgt die Differenz in der sich einstellenden Temperatur im Maximum 0,1 K, sodass als Berechnungszeit ein Zeitraum von 3 Jahren festgelegt wurde. Bei der Auswertung werden lediglich die Daten des 3. Jahres betrachtet.

Die Wetterdaten zur Durchführung der dynamischen Simulation entstammen Daten des Deutschen Wetterdienst. Die Testreferenzjahre (TRJ oder TRY) enthalten alle für die Simulation notwendigen Klimadaten für jede Stunde eines Jahres und bieten eine räumliche Auflösung von 1 km<sup>2</sup>, sodass die genauen Daten für den Standort des Freilichtmuseums zur Simulation herangezogen werden konnten.

## 3 Basisvariante

### 3.1 Allgemeines

Es wurden verschiedene Strategien zur Dämmung der Bodenplatte in Modelle umgesetzt, um deren Auswirkung auf die sich einstellende Innenraumtemperatur herauszufinden. Die betrachteten Strategien waren:

- vollständige Dämmung der Bodenplatte
- horizontale Randdämmung der Bodenplatte
- keine Dämmung der Bodenplatte

Diese drei Strategien sind innerhalb der Simulation jeweils noch in Kombination mit einer vertikalen Randdämmung der Bodenplatte betrachtet worden, sodass sich die folgenden 6 Modellvarianten ergeben haben (siehe hierzu Tabelle 4).

### 3.2 Ergebnisse

Beim Vergleich der sich einstellenden Innenraumtemperatur der drei Modellvarianten des Basismodells ohne zusätzliche vertikale Randdämmung und über den Zeitraum des 3. Simulationsjahres (Abbildung 9) zeigt sich, dass der Temperaturverlauf des Modells 1 deutlich von den Temperaturverläufen der Modell 2 und 3 abweicht. Der Temperaturverlauf des Modell 1 zeigt eine größere Amplitude über den Jahresverlauf als der der Modelle 2 und 3. Die Temperaturverläufe der Modelle 2 und 3 ergeben sich annähernd deckungsgleich über den Jahresverlauf, jedoch lässt sich erkennen, dass bei Modell 3 - ohne gedämmte Bodenplatte - die Amplitude des Temperaturverlaufs minimal geringer ist. Die der Wertetabelle entnommenen Minimal- und Maximalwerte der jeweiligen Temperaturverläufe reichen bei Modell 1 von 5,2°C bis 17,04°C, bei Modell 2 von 6,52°C bis 15,38°C und bei Modell von 3 6,58°C bis 15,16°C.

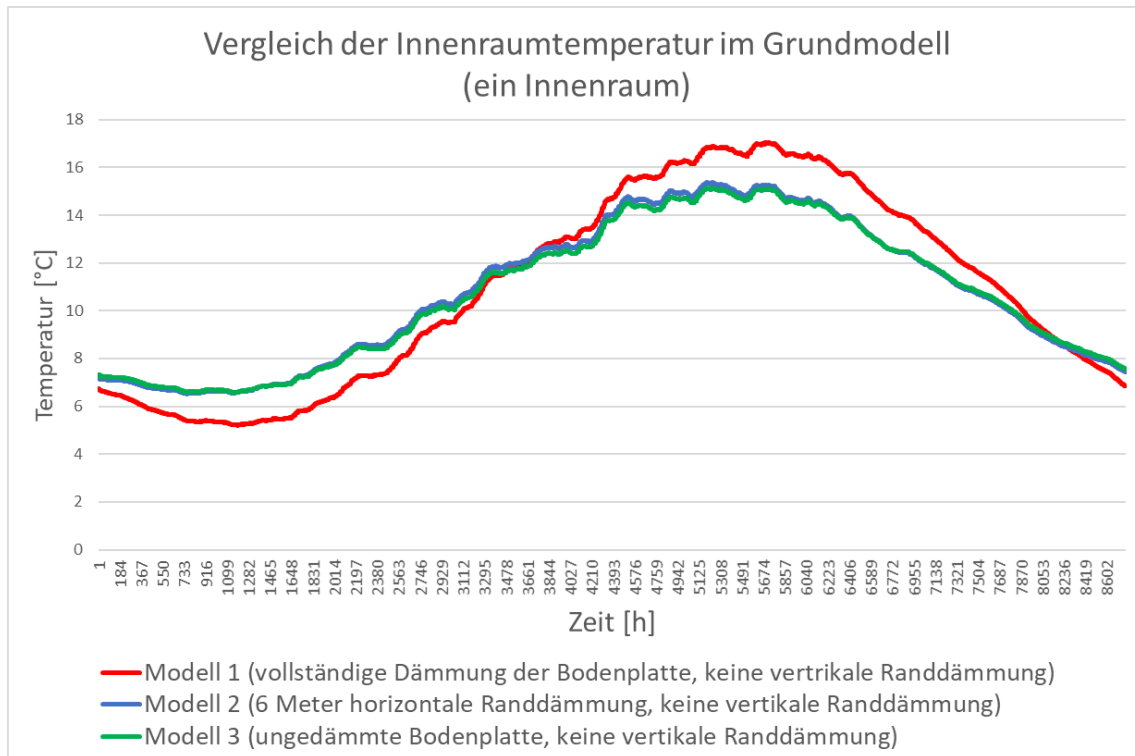


Abbildung 9: Vergleich der Innenraumtemperatur im Grundmodell der Modelle 1 bis 3

Den Verlauf der Innenraumtemperatur in der Basisvariante der Modelle 4, 5 und 6 über das 3. simulierte Jahr sind in Abbildung 10 abgebildet. Auch bei diesem Diagramm lässt sich erkennen, dass der Temperaturverlauf des Modells mit der vollständig gedämmten Bodenplatte deutlich von dem der anderen beiden Modelle abweicht, diese verlaufen ebenfalls annähernd deckungsgleich. Ebenso bei den Modellen mit vertikaler Randdämmung zeigt der Temperaturverlauf des Modells mit vollständig gedämmter Bodenplatte (Modell 4) eine höhere Amplitude sowohl in der Winter- als auch in der Sommerperiode. Der Unterschied zwischen den Verläufen der Modelle 5 und 6 fällt mit der zusätzlichen vertikalen Randdämmung minimal größer aus als ohne diese. Mit vertikaler Randdämmung ergibt die Simulation ebenfalls für das Modell mit horizontaler Randdämmung eine leicht höhere Amplitude aus als für das Modell ohne Dämmung der Bodenplatte. Dabei stellen sich beim Modell 4 Werte zwischen 5,34°C und 16,97°C ein, beim Modell 5 reichen sie von 5,47°C bis 15,4°C und bei Modell 6 von 6,8°C bis 14,98°C.

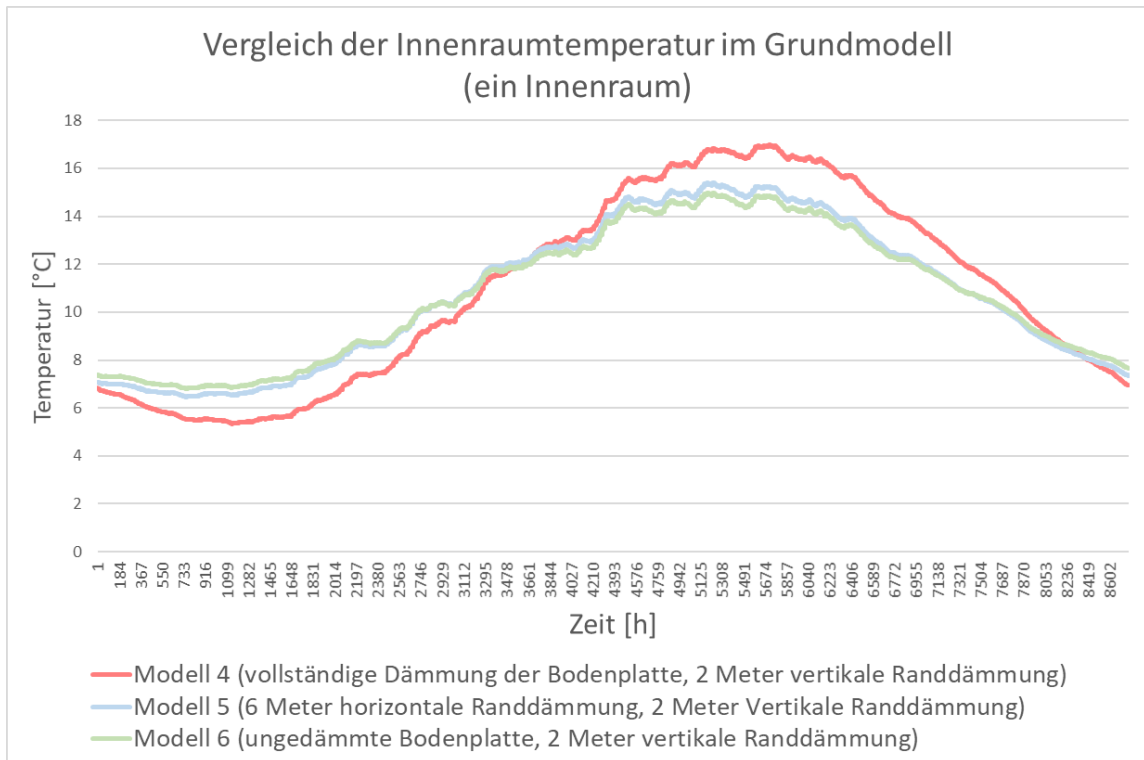


Abbildung 10: Vergleich der Innenraumtemperatur in der Basisvariante der Modelle 4 – 6

Tabelle 4: Temperaturbereiche je Modell nach Art der Dämmung

	Vollständige Dämmung der Bodenplatte	Horizontale Dämmung der Bodenplatte	Ohne Dämmung der Bodenplatte
Ohne vertikale Randdämmung	Modell 1	Modell 2	Modell 3
	5,2 °C - 17,04 °C	6,52 °C - 15,38 °C	6,58 °C - 15,16 °C
Mit vertikaler Randdämmung	Modell 4	Modell 5	Modell 6
	5,34 °C - 16,97 °C	5,47 °C - 15,4 °C	6,8 °C - 14,98 °C

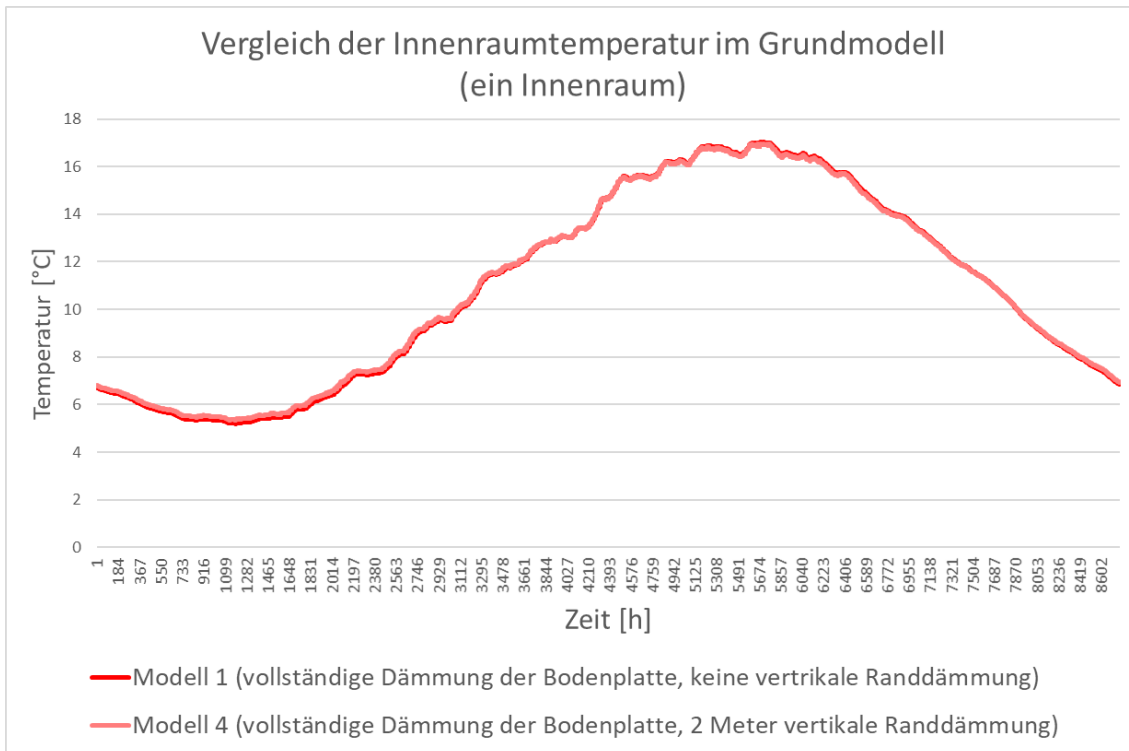


Abbildung 11 Vergleich der Innenraumtemperatur Grundvariante Modelle 1 und 4

Die Temperaturverläufe der Modelle 1 und 4 laufen über das gesamte Jahr nahezu deckungsgleich. Die Amplitude des Verlaufs von Model 1 ist minimal größer. Die Minimalwerte unterscheiden sich um 0,14K und die Maximalwerte unterscheiden sich um 0,07K. Ähnliche Unterschiede treten beim Vergleich der Modelle 2 und 5 sowie 3 und 6 auf.

### 3.3 Diskussion der ersten Versuchsreihe

Durch die Dämmung der Bodenplatte gegenüber dem Erdreich steigt der Einfluss der Außentemperatur auf die Innenraumtemperatur. Die Speicherefähigkeit des Erdreichs unterhalb der großen Bodenplatte des geplanten Gebäudes dämpft den Einfluss der Außentemperatur auf die Innenraumtemperatur, sodass die jährliche Schwankung der Innenraumtemperatur geringer ausfällt. In Bezug auf die angestrebte Nutzung des Gebäudes u.a. als Ausstellungsraum ist eine geringe Schwankung der Innenraumtemperatur von Vorteil. (Vergleiche Anforderungen ASHRAE Handbook – HVAC Applications, Chapter 24 MUSEUMS, GALLERIES, ARCHIVES, AND LIBRARIES). Die Dämpfung des Temperaturverlaufs resultiert aus der Phasenverschiebung der Temperatur im Erdreich unterhalb der Bodenplatte

## 4 Mehrzonenmodell mit Besucherverkehr

### 4.1 Gebäudemodell

Für die Betrachtung nach den ASHREA-Kriterien ist das Gebäudemodell an die geplante Aufteilung des Innenraums des Museumsgebäudes angepasst worden. Das spätere Museumsgebäude verfügt grob unterteilt über vier verschiedene Nutzungseinheiten, nämlich die für die Besucher zugänglichen Bereiche Open Space und Ausstellungsraum und die für Besucher nicht zugänglichen Bereiche Zwischenlager und Anlieferung.



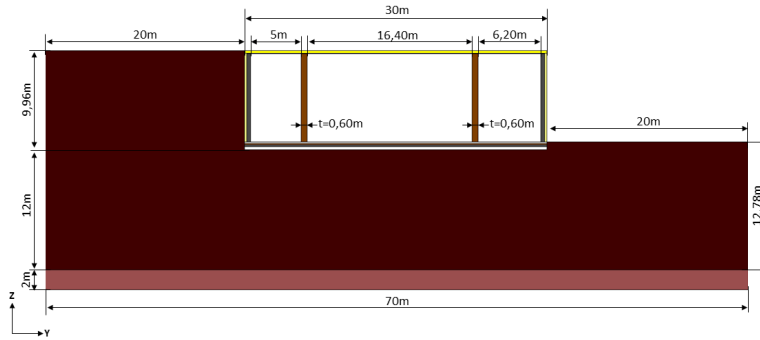


Abbildung 12: Y-Z Schnitt Gebäudevariante 1, vollgedämmte Bodenplatte 4 Räume

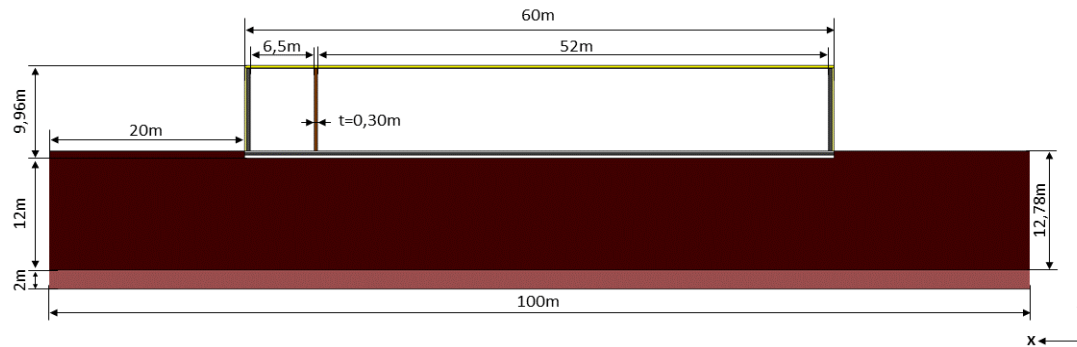


Abbildung 13: X-Z Schnitt Gebäudevariante 1, vollgedämmte Bodenplatte 4 Räume

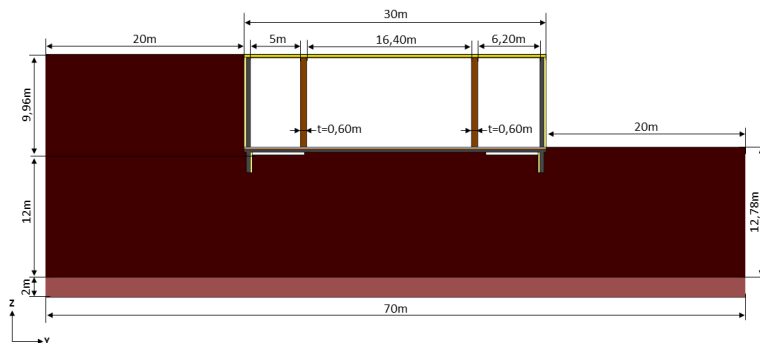


Abbildung 14: Y-Z Schnitt Gebäudevariante 5, 6m Horizontale Randdämmung, 2 m vertikale Randdämmung

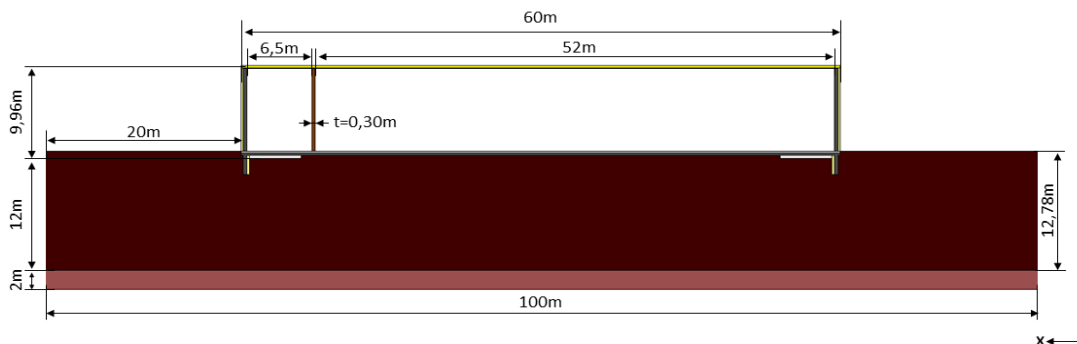


Abbildung 15: X-Z Schnitt Gebäudevariante 5, 6m Horizontale Randdämmung, 2 m vertikale Randdämmung

Im Bereich des Zwischenlagers befindet sich ein Technikraum sowie ein Treppenhaus, der Anlieferung sind Büroräume angegliedert. Diese werden im Simulationsmodell nicht dargestellt und sind den Bereichen Zwischenlager und Anlieferung zugeordnet. Der Ausstellungsraum liegt zwischen Zwischenlager und Open Space und ist von diesen durch 60 cm starke Stampflehmwände getrennt. Die kurzen Stirnwände bestehen mehrheitlich aus Beton.

Im Museumsgebäude teilt sich die Grundfläche wie folgt zwischen den Nutzungseinheiten auf:

- Ausstellung: 882,23m<sup>2</sup>, entspricht 53,3% der Grundfläche
- Open Space: 323,59m<sup>2</sup>, entspricht 19,7% der Grundfläche
- Anlieferung und Büros: 185,95m<sup>2</sup>, entspricht 11,25% der Grundfläche
- Zwischenlager, Technik und Treppenhaus: 262,17m<sup>2</sup>, entspricht 15,75% der Grundfläche.

Anhand des Flächenverhältnisses wurde für das rechteckige Simulationsmodell folgende Aufteilung gewählt, die Abmessungen können den folgenden Abbildungen entnommen werden:

- Ausstellung: 852,80m<sup>2</sup>, entspricht 52,6% der Grundfläche
- Open Space: 322,40m<sup>2</sup>, entspricht 19,9% der Grundfläche
- Anlieferung und Büros: 187,20m<sup>2</sup>, entspricht 11,5% der Grundfläche
- Zwischenlager, Technik und Treppenhaus: 260,00m<sup>2</sup>, entspricht 16,0% der Grundfläche

## 4.2 Randbedingungen Nutzung

Hier soll das Verhalten des Gebäudemodells bei Besucherverkehr betrachtet werden. Dazu wurden die folgenden Überlegungen und Annahmen getätigt:

- Die Anwesenheit der Besucher wird sich auf den Zeitraum der Öffnungszeiten des Ausstellungsgebäudes zwischen 08:00 und 18:00 beschränken.
- Die Anzahl der zeitgleich anwesenden Personen im Gebäude lässt sich nur schwer eingrenzen, in einem ersten Ansatz wird von einer Personenzahl von zeitgleich 80 Besuchern in der Ausstellung ausgegangen.
- Die Besucher haben vor allem einen Einfluss auf die Innenraumtemperatur und die Luftfeuchtigkeit. Im gewählten Simulationsprogramm lässt sich nur die Innenraumtemperatur betrachten, sodass die Luftfeuchtigkeit hier keine weitere Beachtung findet. Die Wärmeleistung einer Person ist unter anderem von Umgebungstemperatur sowie dem Aktivitätsgrad abhängig. Nach DIN EN ISO 7730 liegt die Wärmeleistung einer Person bei 20°C Umgebungstemperatur und einem Aktivitätsgrad von II (sehr leichte körperliche Tätigkeit im Stehen) bei 158 Watt (104 Watt trocken, 54 Watt feucht).
- Ein weiterer Ansatz zur Ermittlung der Wärmeeinträge in das Gebäude kann mithilfe der DIN 4108-2 erstellt werden. Die internen Wärmeeinträge für ein Nichtwohngebäude bezogen auf die Nettogrundfläche betragen 144 Wh/m<sup>2</sup>d. Beide Ansätze ergeben einen ähnlichen Wärmeeintrag für den Ausstellungsraum. Für die Simulation ist der Ansatz der anwesenden Besucher verfolgt worden und mithilfe einer Funktion realisiert worden. Die Funktion wurde als interne Last an die Randbedingung der sich einstellenden Innenraumtemperatur zugefügt.

## 4.3 Auswertung

### 4.3.1 Ergebnisse der Simulationen

Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen den Vergleich der sich in der Simulation eingestellten Temperaturen des Innenraums im Betrachtungszeitraum. Zu erkennen ist, dass die Innenraumtemperaturen im Vergleich zur Basisvariante ohne Besucherverkehr deutlich angestiegen sind. Die Temperaturkurven zeigen jetzt einen breiteren Verlauf (Temperaturband), da der Innenraum zwei Lastniveaus, nämlich mit und ohne Besucherverkehr, über den Tagesverlauf durchläuft.

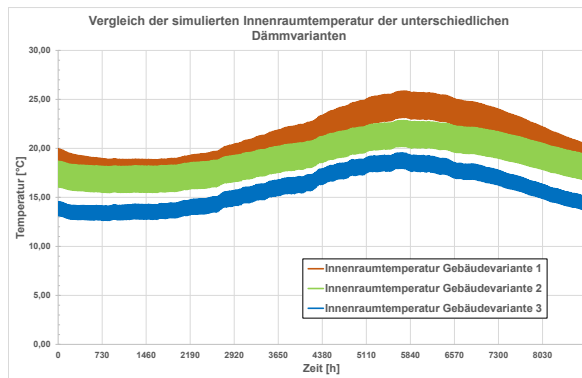


Abbildung 16: Vergleich Innenraumtemperaturen bei unterschiedlichen Dämmmaßnahmen, Variante 1 bis 3

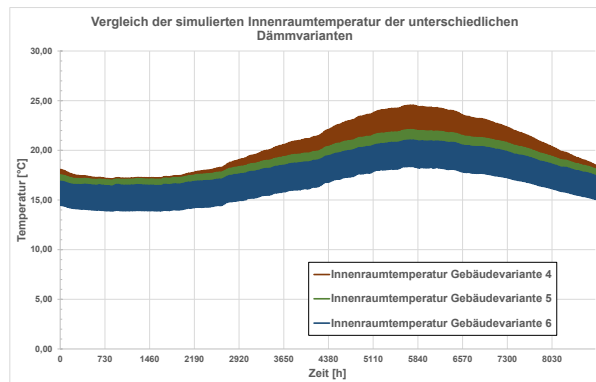


Abbildung 17: Vergleich Innenraumtemperaturen bei unterschiedlichen Dämmmaßnahmen, Variante 4 bis 6

### Anforderungen gemäß ASHREA A1

Der Ausstellungsraum des geplanten Gebäudes soll den ASHREA-Kriterien A1 gerecht werden.

Die ASHREA Kriterien geben für jede Kategorie zulässige Schwankungen der Innenraumtemperatur sowie der relativen Luftfeuchtigkeit vor, um die Ausstellungsstücke vor Schäden zu bewahren. Je empfindlicher die Ausstellungsstücke auf Schwankungen reagieren, desto geringer fallen die zulässigen Schwankungen aus. Bei der Kategorie A1 gibt es bezogen auf die Innenraumtemperatur die folgenden Einschränkungen:

- Langfristige Grenzen für die Lufttemperatur: min. 10 °C; max. 25 °C
- Saisonale Schwankung auf Grundlage der Jahresmitteltemperatur des Innenraums:  $x$ =Jahresmitteltemperatur; min.  $x-10$  K, max.  $x+5$  K aber nicht kleiner oder größer als die langfristigen Grenzen. Maximale Anpassung der kurzfristigen Schwankung alle 7 Tage.
- Kurzfristige Schwankungen: min. -2 K; max. +2 K. Eine kurzfristige Überschreitung der Langzeitgrenzen ist dabei zulässig.

### 4.3.2 Auswertung bzgl. langfristiger Grenzen und saisonaler Schwankungen

Für eine erste Auswertung nach den Kriterien der Kategorie A1 ist die Einhaltung der langfristigen Grenzen und der saisonalen Anpassung ohne zeitlichen Aspekt durchgeführt worden.

Tabelle 5: Beschreibung der Dämmvarianten

Dämm- variante	Bodendämmung		Randdämmung		
	Voll	Keine	6 m horizontal	2 m vertikal	Keine
1	X				X
2			X		X
3		X			X
4	X			X	
5			X	X	
6		X		X	

Tabelle 6: Einhaltung der Kriterien (Kategorie A1) nach ASHREA

Dämm- variante	Eingehalten		Überschritten		Unterschritten		Saisonale Anpassung		
	Langfristig	Saisonal	Langfristig	Saisonal	Langfristig	Saisonal	Jahreswert	Maximum	Minimum
1	8364	8364	397	397	0	0	20,43	25,00	10,43
2	8761	8761	0	0	0	0	18,70	23,70	10,00
3	8761	8761	0	0	0	0	15,74	20,74	10,00
4	8761	8571	0	190	0	0	18,95	23,95	10,00
5	8761	8761	0	0	0	0	17,77	22,77	10,00
6	8761	8761	0	0	0	0	16,97	21,97	10,00

Die Auswertung nach ASHREA-Kriterien zeigt, dass bei den Modellvarianten mit vollständiger Bodendämmung aufgrund des Wärmestroms infolge 80 anwesender Personen die Vorgaben nicht einhalten werden. An 379 Messzeitpunkten werden die langfristigen Grenzen bei Variante 1 überschritten, die saisonalen Grenzen werden ebenfalls an 379 Messpunkten überschritten. Bei Variante 4 werden die langfristigen Grenzen eingehalten, jedoch kommt es an 190 Messzeitpunkten zur Überschreitung der saisonalen Grenzen.

Die Varianten 2 und 3 sowie 5 und 6 zeigen keine Überschreitung der langfristigen oder saisonalen Grenzen. Auch hier zeigt sich die temperaturstabilisierende Wirkung des Erdreichs bei Varianten, bei denen auf eine vollflächige Dämmung verzichtet wurde.

### 4.3.3 Kurzzeitschwankungen

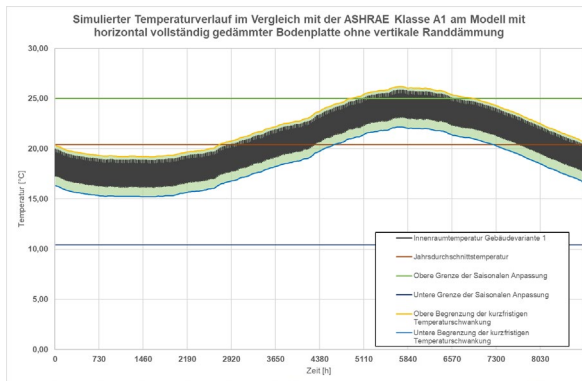


Abbildung 18: Temperaturverlauf Modell 1 und Kriterien ASHRAE Klasse A1

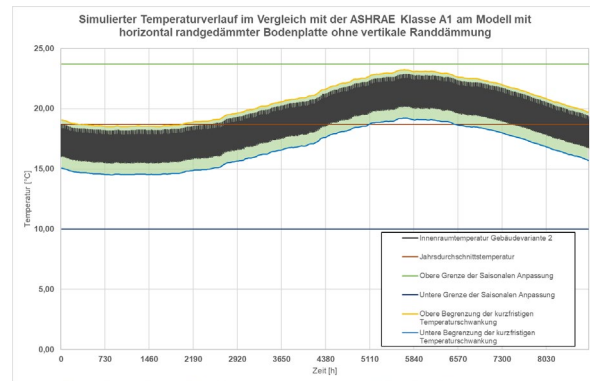


Abbildung 19: Temperaturverlauf Modell 2 und Kriterien ASHRAE Klasse A1

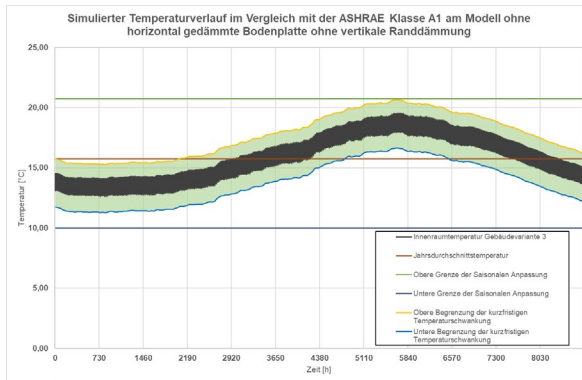


Abbildung 20: Temperaturverlauf Modell 3 und Kriterien ASHRAE Klasse A1

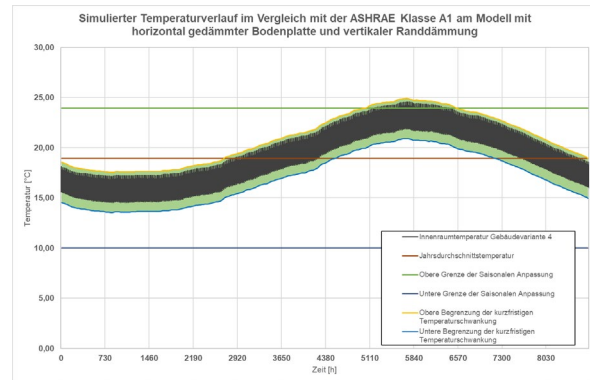


Abbildung 21: Temperaturverlauf Modell 4 und Kriterien ASHRAE Klasse A1

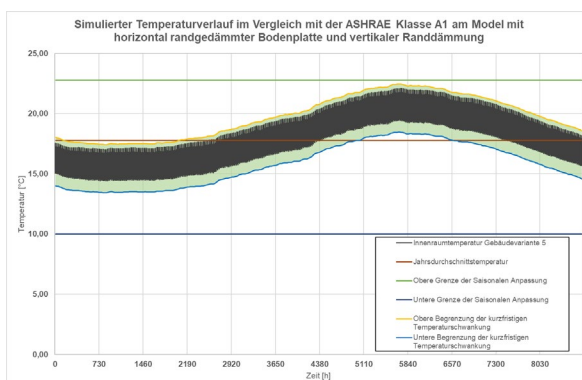


Abbildung 22: Temperaturverlauf Modell 5 und Kriterien ASHRAE Klasse A1

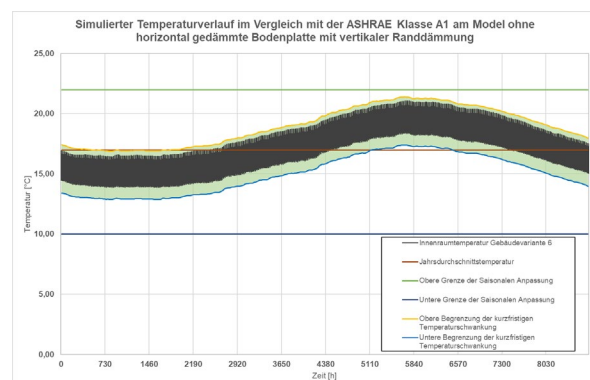


Abbildung 23: Temperaturverlauf Modell 6 und Kriterien ASHRAE Klasse A1

Die stundenweise Auswertung zeigt, dass alle Varianten die Kriterien für Kurzzeitschwankungen der ASHRAE Kategorie A1 einhalten.

In den Gebäudevarianten 1 und 4, jeweils mit vollgedämmter Bodenplatte, kommt es innerhalb der erlaubten Grenzen zu einer Überschreitung der oberen Grenztemperatur. Da es sich hierbei jedoch um kurzfristige Schwankungen handelt, sind die Temperaturen gemäß ASHRAE zulässig.

#### **4.4 Fazit**

Die hier dargestellten Untersuchungen wurden unter der Prämisse durchgeführt, eine für möglichst große Klimastabilität passende Dämmstrategie des unteren Gebäudeabschlusses ohne Berücksichtigung der Ansprüche der Besucher in einem nicht-temperierten Gebäude zu identifizieren. Kriterien der menschlichen Behaglichkeit außer Acht gelassen lässt sich feststellen, dass für die sichere, klimastabile Ausstellung und Aufbewahrung der Archivalien ein Gebäudeentwurf ohne vollflächige Wärmedämmung des unteren Gebäudeabschlusses besser eignet, da Temperaturschwankungen sowohl über einen kurzen Betrachtungszeitraum, wie z.B. einen Tag, aber auch über einen längeren Zeitraum, wie eine Saison, mit Erdkontakt geringer ausfällt.

Da im vorliegenden Planungsstand aber eine Beheizung in Form einer Fußbodenheizung zum Einsatz kommt, kann unterstellt werden, dass - unter Aufwendung entsprechender Energiemengen für die Raumtemperierung mittels Fußbodenheizung - ebenfalls hohe Ansprüche an die Klimakonstanz erfüllt werden können.