

Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe  
Standort Detmold  
Fachbereich 1  
Studiengang Architektur

NACHHALTIGES MUSEUM DETMOLD -  
POTENZIALE DES ERDREICHS ALS THERMISCHER  
SPEICHER



Stefan Jättkowski  
Bachelor-Thesis

Prof. ' in Dr. - Ing. Susanne Schwickert (Erstprüferin)  
Prof. Dr. rer. nat. Johannes Üpping (Zweitprüfer)

# Einleitung

## Einführung

- Zunehmendes Interesse an Umwelt- und Naturschutz
- Es braucht passive Konditionierungsmethoden, welche den erforderlichen Energieaufwand so gering wie möglich halten
- Betrachtung der thermischen Speichermasse des Erdreichs als Beitrag zu einer passiven Konditionierung
- Wie müssen erdberührte Bauteile ausgeführt werden, um die Potenziale des Erdreichs zu berücksichtigen?
- Dreidimensionale, dynamische Gebäudesimulation am Beispiel des Ausstellungsgebäudes am Detmolder Freilichtmuseums

## Aufgabenstellung

- Wo ist eine Reduzierung der wärmeschutztechnischen Maßnahmen an erdberührten Bauteilen sinnvoll?
- Zusammentragen von theoretischen Vorgaben und Ergebnissen aus (inter-) nationalen Monitoring-Projekten
- Normkonforme, numerische Berechnungen mithilfe der Software PHYSIBEL VOLTRA mit dem Ziel einer Sensibilitätsanalyse
- Abschließende Empfehlungen in Bezug auf die wärmeschutztechnische Ausführung von Museumsbauten sowie in Bezug auf das in Detmold geplante Ausstellungsgebäude

# Theoretische Grundlagen

## Allgemeine Anforderungen

- EnEV 2016 – maximaler Wärmedurchgangskoeffizient von  $0.28\text{W/m}^2\text{K}$  für opake Außenbauteile (Solltemperatur mind.  $19^\circ\text{C}$ )
- KFW-Vorgaben, Energieeffizient Bauen – maximaler Wärmedurchgangskoeffizient von  $0.25\text{W/m}^2\text{K}$  bei erdberührten Bauteilen
- Passivhausstandard – maximaler Wärmedurchgangskoeffizient von  $0.15\text{W/m}^2\text{K}$
- ASHRAE – Temperaturwerte zwischen  $10^\circ\text{C}$  und  $25^\circ\text{C}$ , kurzfristige Änderung (7 Tage) von  $\pm 2\text{K}$  erlaubt, saisonale Änderung (30 Tage) von  $\pm 5\text{K}$  erlaubt

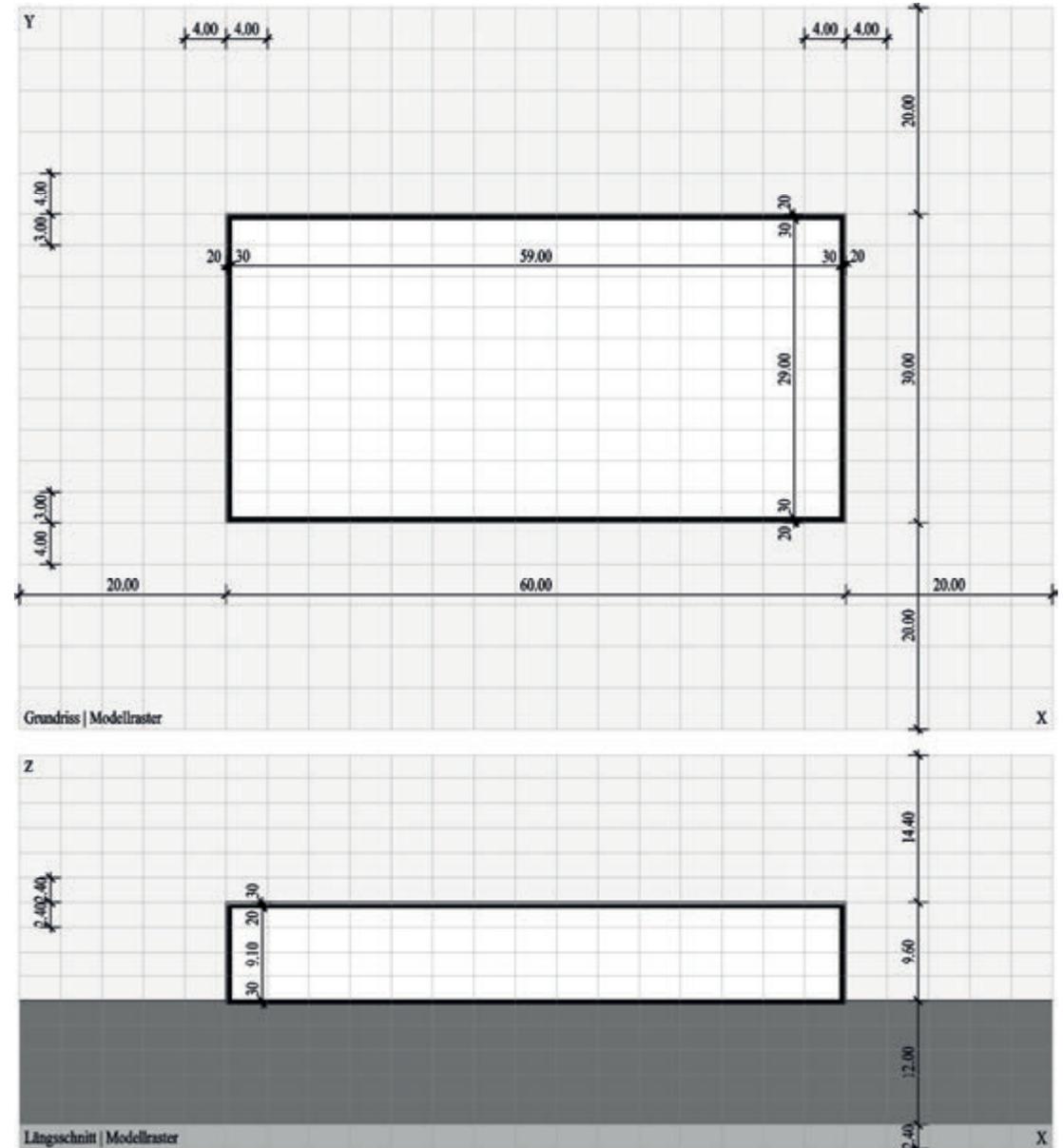
## Normative Vorgaben

- Abbildung von Wärmebrücken gemäß DIN EN ISO 10211: Annahme adiabatischer Verhältnisse an allen Modellgrenzen, Erdabmessungen –  $2,5 \cdot b$  (Gebäudeschmalseite)
- Annahme einer konstanten Temperatur in 10-15m Tiefe entspricht den realistischen Verhältnissen eines temperierten Erdreichs,  $10^\circ\text{C}$  in einer Tiefe von 10m /  $11^\circ\text{C}$  in einer Tiefe von 12m
- Berechnung effektiv resultierender U-Werte von erdberührten Bauteilen gemäß DIN EN ISO 13370
- Temperaturkorrekturfaktoren für Randdämmungen an Bodenplatten gemäß DIN V 4108-6: 2m vertikale, 5m horizontale Randdämmung
- Berechnungsrandbedingungen für thermische Gebäudesimulationen gemäß DIN 4108-2: Nutzungszeiten von 7:00 bis 18:00Uhr, mittlerer Wärmeeintrag von  $144\text{W/m}^2\text{d}$ , Berechnungsstart an einem Montag, 01. Januar um 0:00Uhr

# Aufbau und Einstellungen

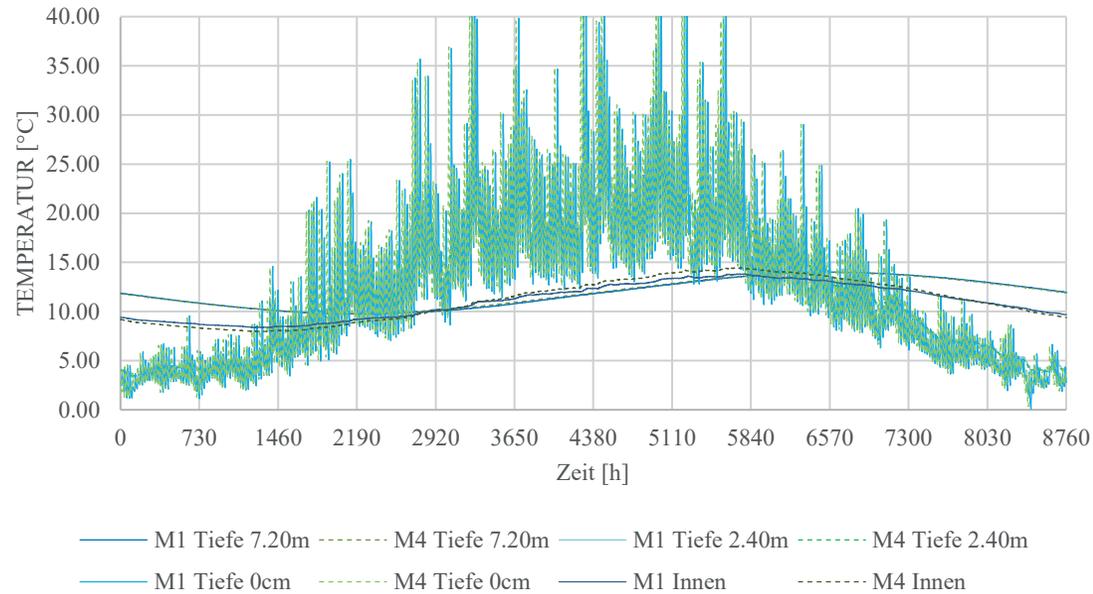
## Modelldefinition und Eingabedaten

- Abstrahierter Gebäudekörper L/B/H = 60 · 30 · 9.60m
- Erdreich mit  $\lambda = 2.0\text{W/mK}$  (DIN EN ISO 10456)
- 50cm Außenwandaufbau, 30cm Stahlbeton, 20cm Dämmung,  $\lambda = 0.035\text{W/mK}$ , U-Wert =  $0.167\text{W/m}^2\text{K}$
- 50cm Deckenaufbau, 20cm Stahlbeton, 30cm Dämmung,  $\lambda = 0.035\text{W/mK}$ , U-Wert =  $0.114\text{W/m}^2\text{K}$
- Innenvolumen  $V = 15.570\text{m}^3$
- Klimadaten des TRY Normaljahr 2015
- Verschattungswinkel von  $5^\circ$
- Maschenweiten in horizontaler Ebene (X/Y) i.d.R. 4m, in vertikaler Richtung i.d.R. 2.40m
- Einstellungsberechnungsdauer von 2 Jahren
- Ausgabeknoten in Innenraum (Raumecke, Raummitte) und im Erdreich (Modellecke, 12m, 4m, Gebäudeecke, Gebäudemitte)

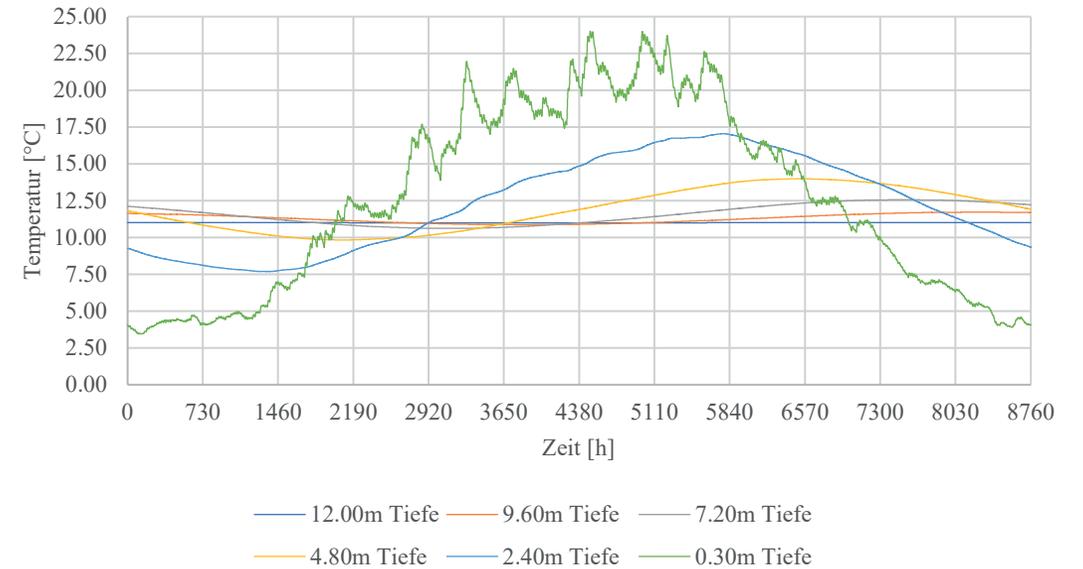


# Voruntersuchung

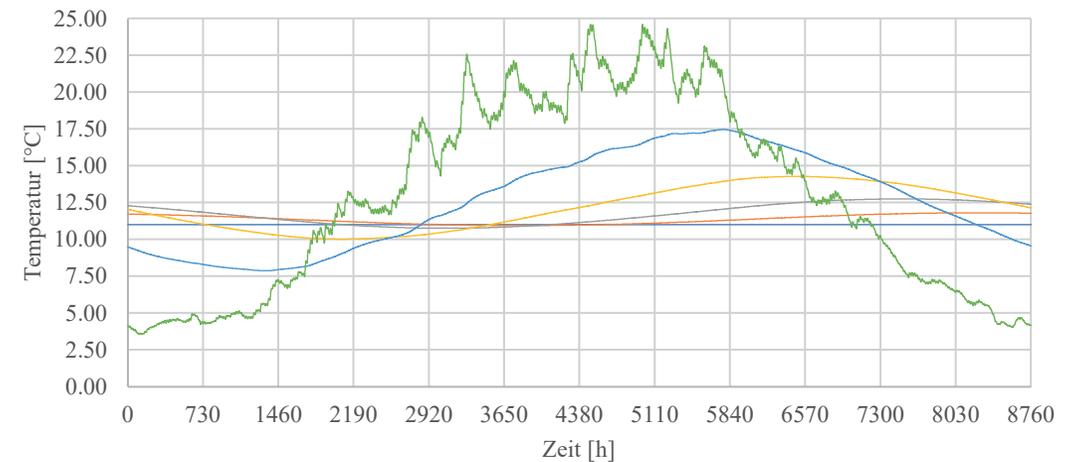
VERGLEICH DER ERGEBNISSE FÜR VERSCHIEDENE MASCHENWEITEN - 1m | 4m



TIEFENPROFIL AM AUSGANGSMODELL - ABSTAND 20m



TIEFENPROFIL ERDBLOCK OHNE GEBÄUDE 180m\*210m\*75m - UNIVERSAL



Untersuchung der Maschenweiten sowie der Erdreichabbildung

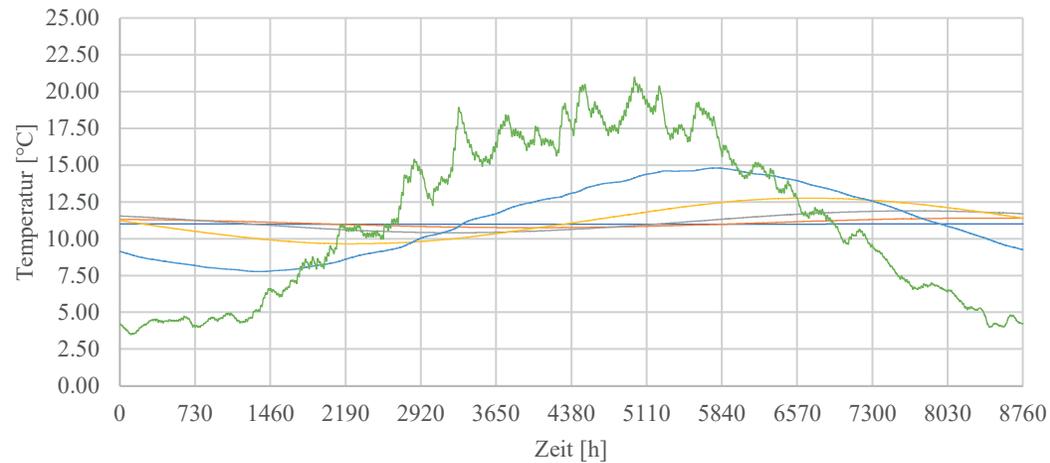
- Die Erdtemperaturen sind für die verschiedenen Maschenweiten (1m bzw. 4m) identisch, nur geringe Abweichungen im Innenraum
- Maschenweiten von 4m können also verwendet werden
- Die Erdtemperaturen an einer Modellecke (Abstand 20m) zeigen nur eine geringfügige Abweichung zu den an einem monolithischen Erdblock berechneten ungestörten Temperaturen
- Ein seitliches Erdvolumen von 20m ist also ausreichend

# Ausgangsmodellberechnung



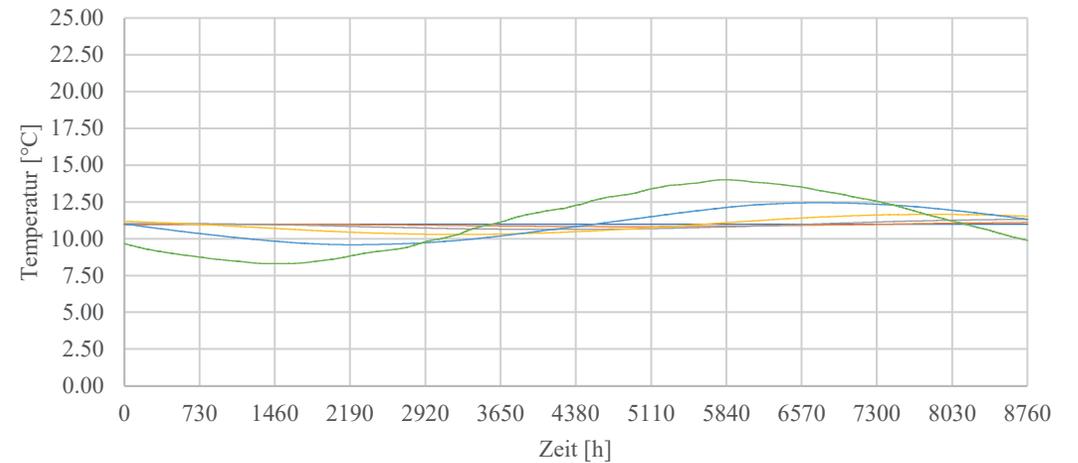
- Bei Annäherung an die Gebäudemitte fallen die Temperaturbereiche unterhalb des Gebäudes immer enger aus
- Die Extremtemperaturen fallen an den Gebäudeecken Ende Juli, unterhalb des Gebäudes Ende August an
- Je größer das Gebäude, desto größer die Phasenverschiebung zwischen den an den Gebäudeecken bzw. den unter der Gebäudemitte anfallenden Temperaturen

AUSGANGSMODELL - TIEFENPROFIL IM BEREICH DER GEBÄUDEECKEN



— Tiefe 12.00m — Tiefe 9.60m — Tiefe 7.20m  
— Tiefe 4.80m — Tiefe 2.40m — Tiefe 0.30m

AUSGANGSMODELL - TIEFENPROFIL IM BEREICH DER GEBÄUDEMITTE



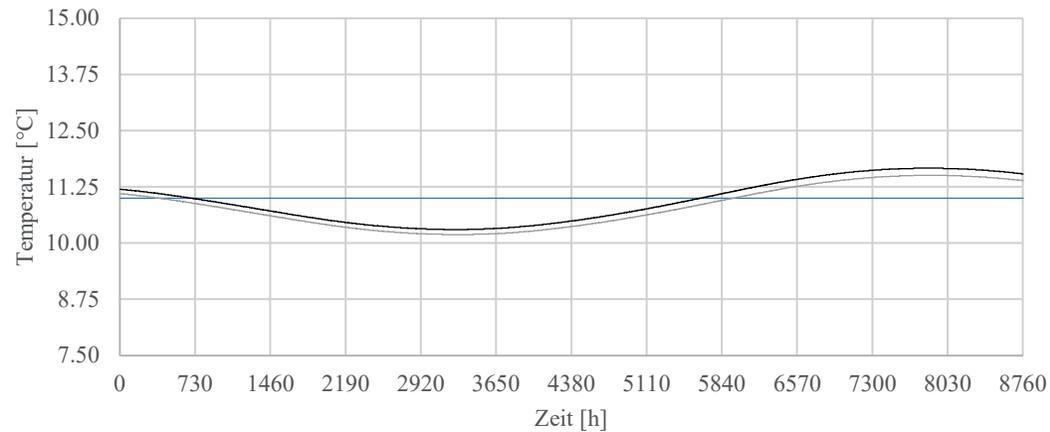
— Tiefe 12.00m — Tiefe 9.60m — Tiefe 7.20m  
— Tiefe 4.80m — Tiefe 2.40m — Tiefe 0.30m

# Temperaturrendbedingung im Erdreich



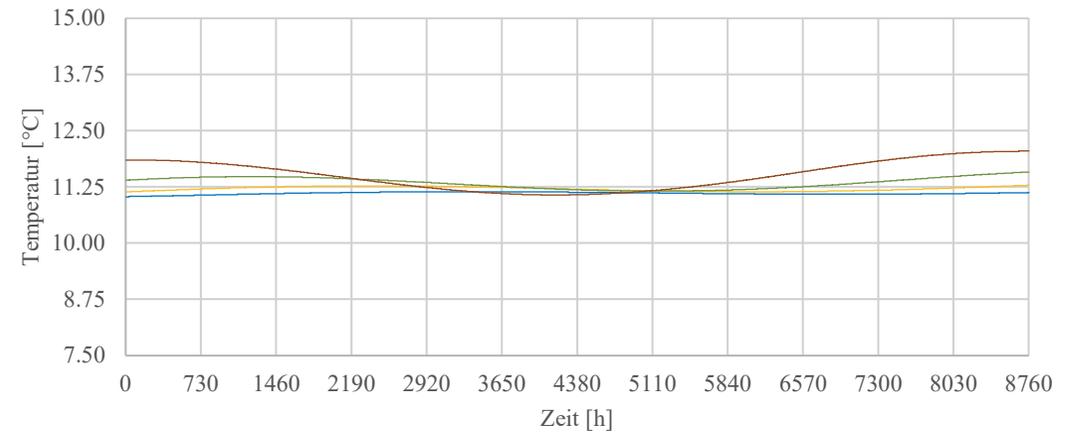
- Die Tiefenlage einer angenommenen Randbedingung hat ab einer Tiefe von 12m nur geringfügige Auswirkungen
- Abweichung von 0.2K bei 4.80m Tiefe (12m bzw. 20m)
- Schwankung von 0.40K um 11.40°C in 12m Tiefe(20m)
- „konstante“ Temperatur von circa 11.10°C bei 16.80m Tiefe
- Annahme von 11°C in 12m Tiefe angemessen

RANDBEDINGUNG - TEMPERATUR IM ERDREICH BEI 4.80m TIEFE



— 11°C bei 4.80m Tiefe    — 11°C bei 12.00m Tiefe    — 11°C bei 20.00m Tiefe

20m-LINIE - EINFLUSS DES AUSSENKLIMAS - TEMPERATURKONSTANZ



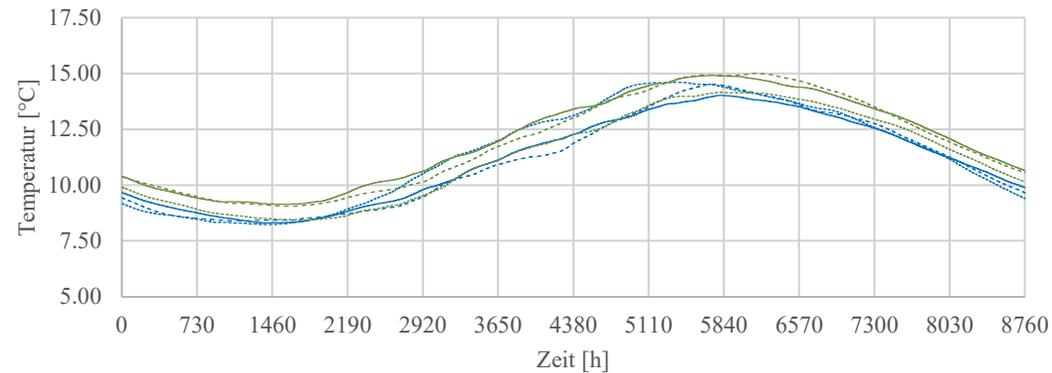
— 16.80m Tiefe    — 14.40m Tiefe    — 12.00m Tiefe    — 9.60m Tiefe

# Klimaeinflüsse



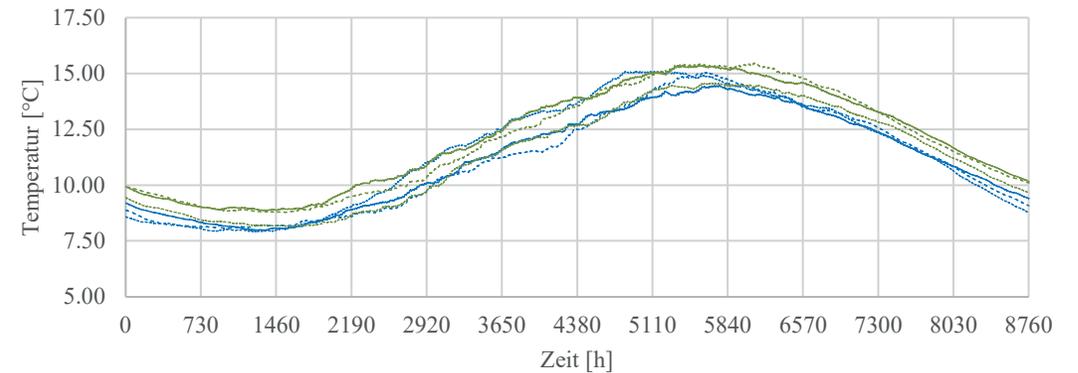
- Innentemperaturen liegen im Frühjahr knapp unter, im Herbst knapp über den Temperaturen im Erdreich
- Wärmeaustausch somit erkennbar
- Die kältesten Werte gehen vom TRY Normal 2015 aus
- Die wärmsten Werte gehen vom TRY Normal 2045 aus
- Ergebnisse dieser Datenreihen sind zu betrachten

KLIMA - ERDTEMPERATUR, ZENTRAL IN 30cm TIEFE



— TRY Normal 2015    - - - TRY Ex So 2015    ····· TRY Ex Wi 2015  
— TRY Normal 2045    - - - TRY Ex So 2045    ····· TRY Ex Wi 2045

KLIMA - INNENRAUMTEMPERATUREN



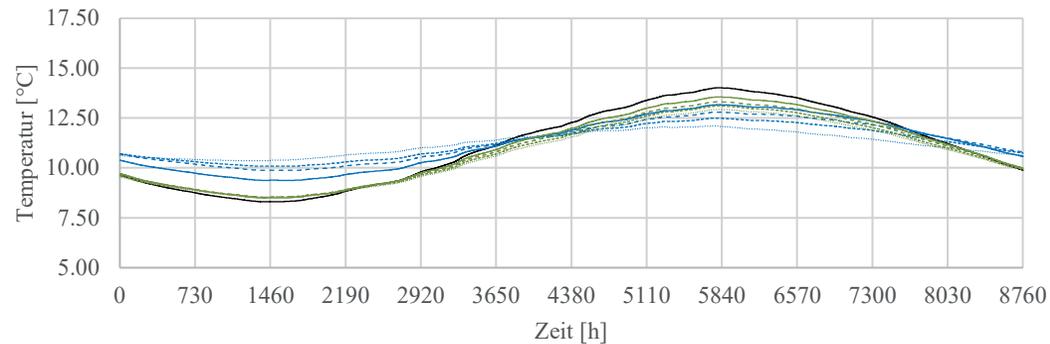
— TRY Normal 2015    - - - TRY Ex So 2015    ····· TRY Ex Wi 2015  
— TRY Normal 2045    - - - TRY Ex So 2045    ····· TRY Ex Wi 2045

# Tiefenlage im Erdreich



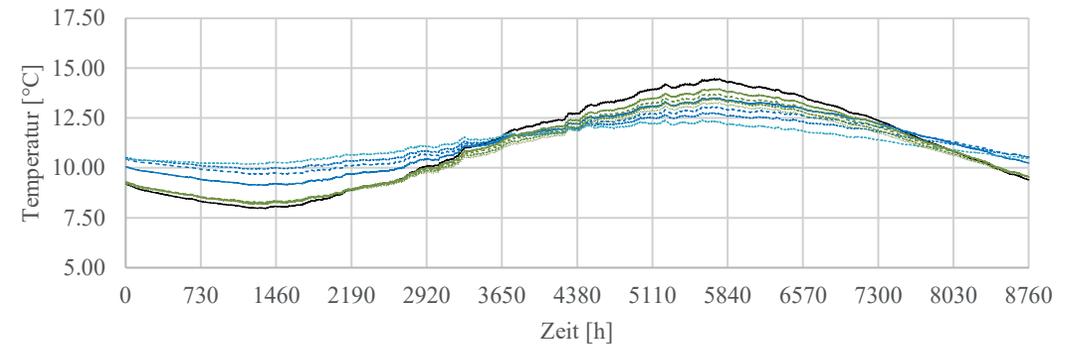
- Nur Kühleffekt bei einseitigem Anschluss ( $z = 2.40\text{m}$ )
- Absenkung um 2K bei allseitigem Anschluss ( $z = 2.40\text{m}$ )
- Absenkung um 3K bei allseitigem Anschluss ( $z = 3.60\text{m}$ )
- Absenkung um 4K bei allseitigem Anschluss ( $z = 9.60\text{m}$ )
- Kühleffekt im Sommer sowie Heizeffekt im Winter bei Gebäuden, die allseitig im Erdreich stehen

ERDREICHTIEFE - ERDTEMPERATUR, ZENTRAL IN 0.30m TIEFE



— auf dem Erdreich    — allseitig 2.40m tief    - - - allseitig 4.80m tief  
 ····· allseitig 7.20m tief    ····· allseitig 9.60m tief    — langseitig 2.40m tief  
 - - - langseitig 4.80m tief    ····· langseitig 7.20m tief    ····· langseitig 9.60m tief

ERDREICHTIEFE- INNENRAUMTEMPERATUREN



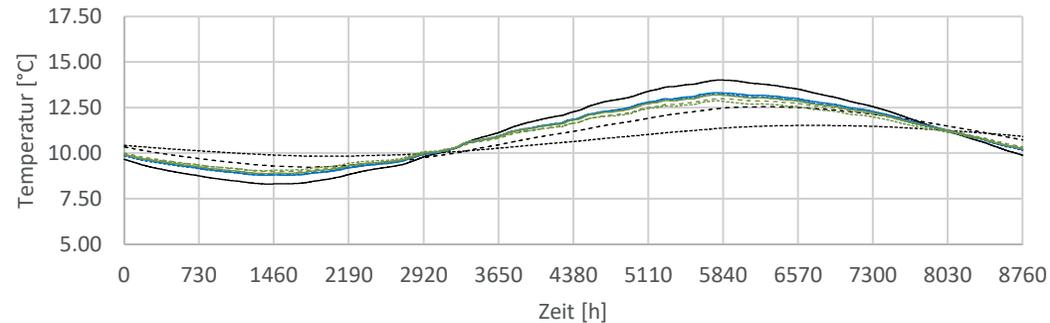
— auf dem Erdreich    — allseitig 2.40m tief    - - - allseitig 4.80m tief  
 ····· allseitig 7.20m tief    ····· allseitig 9.60m tief    — langseitig 2.40m tief  
 - - - langseitig 4.80m tief    ····· langseitig 7.20m tief    ····· langseitig 9.60m tief

# Erdberührte Bodenplatte



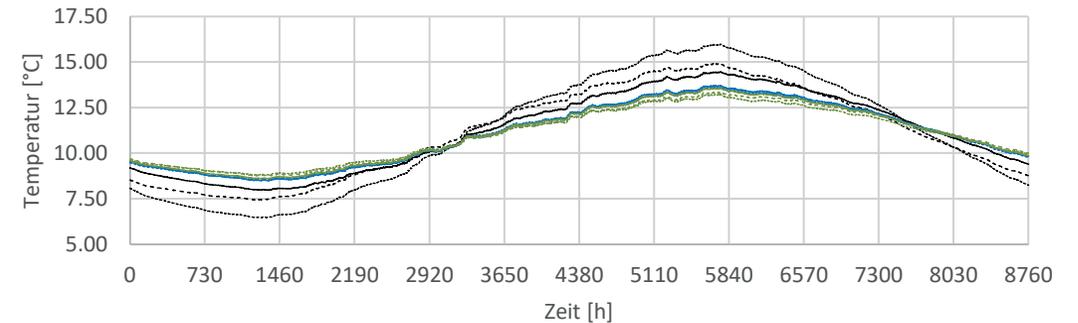
- Optimale horizontale Dämmtiefe bei 3.60m
- Horizontaldämmung > 3.60m – größere Schwankung innen
- Optimale vertikale Dämmtiefe bei 1.20m bis 2.40m, Schwankung innen kleiner als bei horizontaler Dämmung
- Vertikale Dämmung > 1.20m – i.d.R. unwirtschaftlich
- Vollflächige Dämmung – größere Schwankung innen

BODENDÄMMUNG - ERDTEMPERATUR ZENTRAL, 0.30m TIEFE



— ohne Dämmung      - - - - - 5cm Dämmung      ······· 20cm Dämmung  
 — 1.20m Randdämmung      - - - - - 2.40m Randdämmung      ······· 3.60m Randdämmung  
 — 1.20m Dämmschürze      - - - - - 2.40m Dämmschürze      ······· 3.60m Dämmschürze

BODENDÄMMUNG - INNENTEMPERATUR



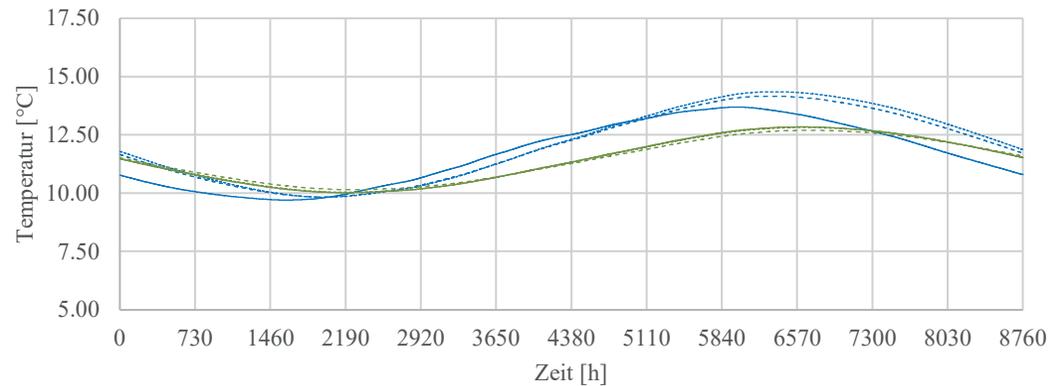
— ohne Dämmung      - - - - - 5cm Dämmung      ······· 20cm Dämmung  
 — 1.20m Randdämmung      - - - - - 2.40m Randdämmung      ······· 3.60m Randdämmung  
 — 1.20m Dämmschürze      - - - - - 2.40m Dämmschürze      ······· 3.60m Dämmschürze

# Erdberührte Außenwände



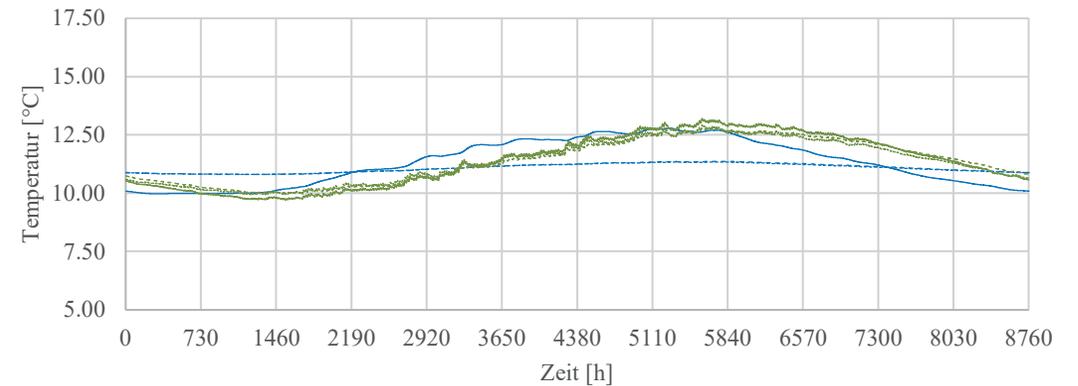
- Vollflächige Dämmung – größeren Schwankungen innen
- Optimale Dämmtiefe bei 3.60m (teilweise im Erdreich)
- Dämmtiefe über 3.60m – größere Schwankung innen
- Betrachtung eines vollständig im Erdreich liegenden Gebäudes unvorteilhaft wg. anschließender Randbedingung
- Innentemperatur daher nahezu konstant bei 11°C

WANDDÄMMUNG - ERDTEMPERATUR, GEBÄUDEKANTE IN 4.80m TIEFE



— 0cm Dämmung    - - - 10cm Dämmung    ····· 20cm Dämmung  
— Dämmtiefe 2.40m    - - - Dämmtiefe 3.60m    ····· Dämmtiefe 4.80m

WANDDÄMMUNG - INNENTEMPERATUR



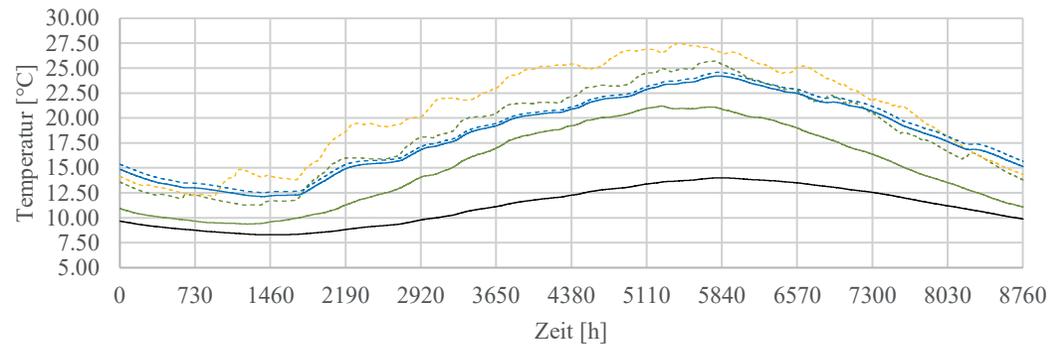
— 0cm Dämmung    - - - 10cm Dämmung    ····· 20cm Dämmung  
— Dämmtiefe 2.40m    - - - Dämmtiefe 3.60m    ····· Dämmtiefe 4.80m

# Solare Wärmeerträge



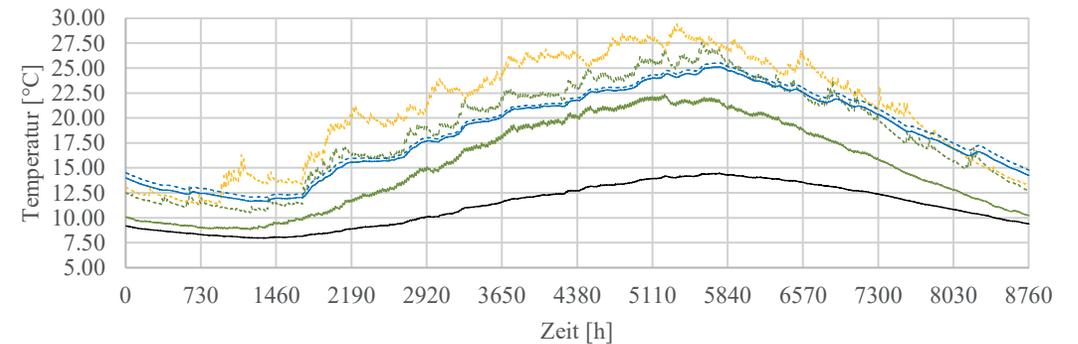
- Temperaturniveau fällt grundsätzlich deutlich wärmer aus
- Extreme Temperaturschwankungen bis 8K bei Südfenstern
- Temperaturänderungen im Erdreich abgemindert
- Innentemperaturen von 20°C bis 30°C bei Südfenstern, Verbesserungsmaßnahmen sind für Südfenster unerlässlich
- Eine Innenwand kann die Temperaturänderung abmindern

SOLARE ERTRÄGE - ERDTEMPERATUR, ZENTRAL 30cm TIEFE



— ohne Fenster  
 - - - - - Südfenster TRY 2015  
 — eine Betonwand - Südf. TRY 2015  
 — Nordfenster TRY 2015  
 - - - - - Südfenster TRY 2045  
 - - - - - zwei Betonwände - Südf. TRY 2015

SOLARE ERTRÄGE - INNENTEMPORATUREN



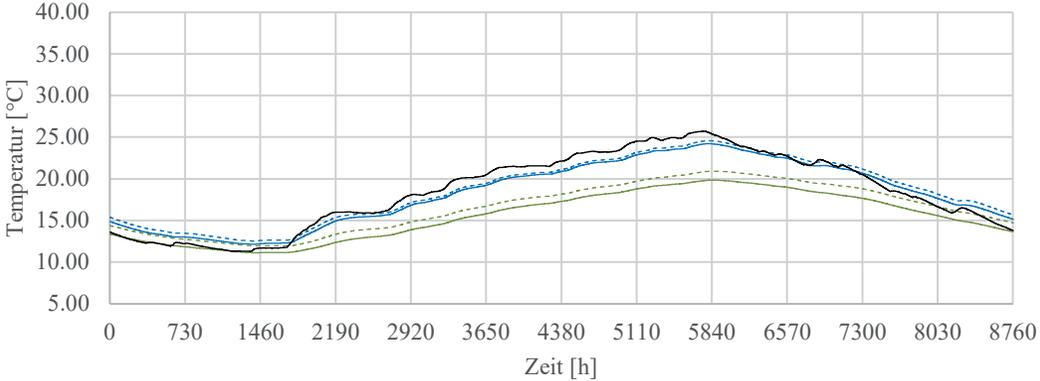
— ohne Fenster  
 - - - - - Südfenster TRY 2015  
 — eine Betonwand - Südf. TRY 2015  
 — Nordfenster TRY 2015  
 - - - - - Südfenster TRY 2045  
 - - - - - zwei Betonwände - Südf. TRY 2015

# Thermische Speichermasse



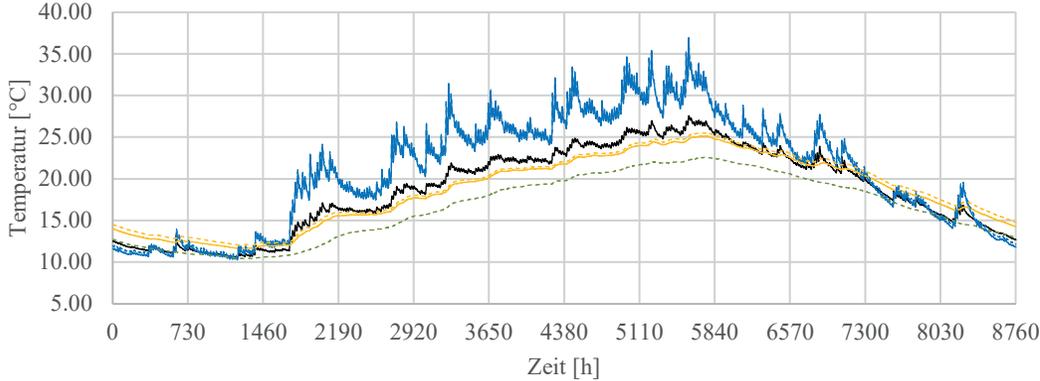
- Begrenzung der Schwankungen durch schwere Wände
- Abschirmen der Temperaturen durch leichte Wände
- Extreme Temperaturschwankungen in kleinen Pufferzonen, hohe Temperaturen können nur verlagert werden
- Keine Empfindlichen Nutzungen in Pufferzonen
- Geringfügige Absenkung des Temperaturniveaus insgesamt

INNENWÄNDE - ERDTEMPERATUR, ZENTRAL 30cm TIEFE



— 1 Betonwand    - - - 2 Betonwände    — 1 Holzwand  
 - - - 2 Holzwände    — ohne Innenwand

INNENWÄNDE - INNENRAUMTEMPERATUREN IN DEN RÄUMEN A | B | C



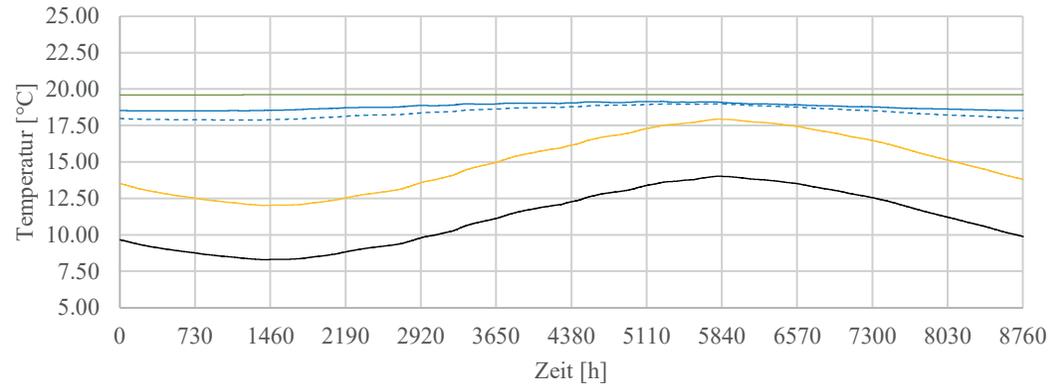
— ohne Innenwände    — 1 Beton A (Fenster)    — 1 Beton B  
 - - - 2 Beton A (Fenster)    - - - 2 Beton B    - - - 2 Beton (Erdreich)

# Temperierung und interne Wärmeerträge



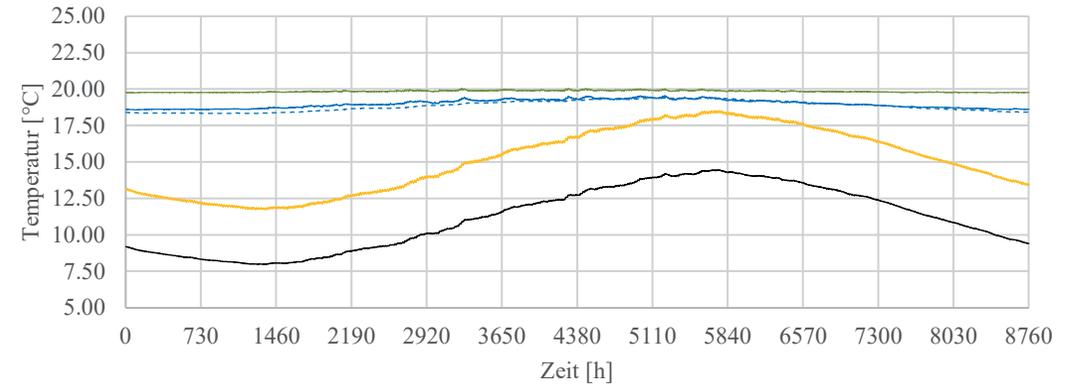
- Anstieg des Temperaturniveaus durch Besucher um 4K
- Extremwerte Ende Februar / Ende August
- Beheizte Nachbarräume führen zu „konstanten“ 20°C
- Nutzungen zwischen beheizten Räumen müssen daher bei ungedämmten Wänden Temperaturen um 20°C erlauben
- Alternative Kompensation durch Dämmmaßnahmen möglich

TEMPERIERUNG - ERDTEMPERATUR, ZENTRAL IN 30cm TIEFE



— keine Erträge    — vierseitig 20°C    - - - oberhalb 20°C  
 — konstant 20°C    — Besucher DIN 4108

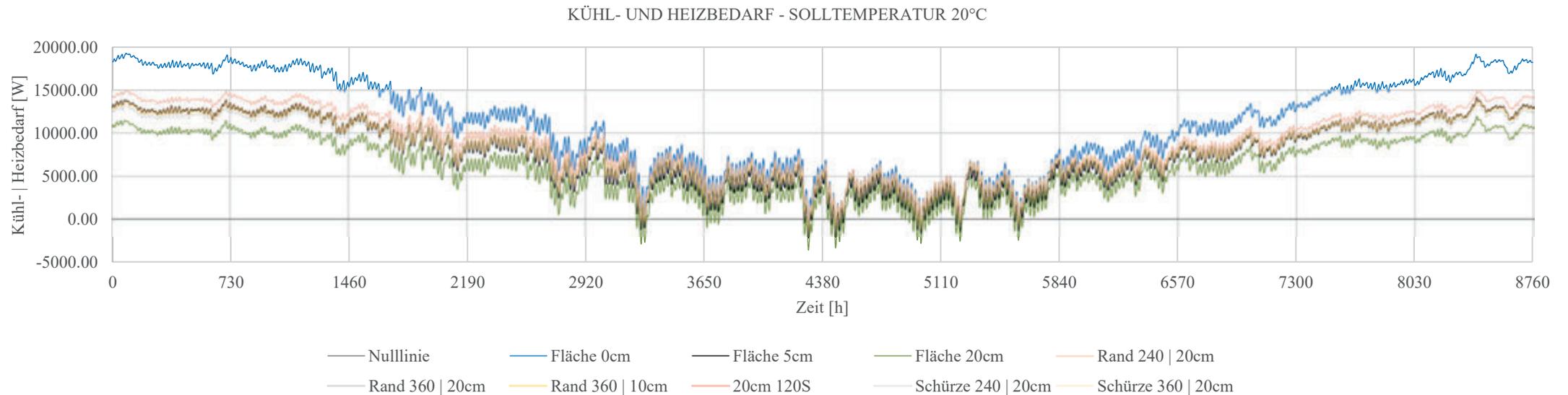
TEMPERIERUNG - INNENRAUMTEMPERATUREN



— keine Erträge    — vierseitig 20°C    - - - oberhalb 20°C  
 — konstant 20°C    — Besucher DIN 4108

# Energiebilanzierung

- Fensterloses Gebäude - Gründungsvarianten im Vergleich
- Enormer Energiebedarf bei ungedämmter Bodenplatte (blau)
- Gemäßigter Energiebedarf einer vollflächig 5cm stark gedämmten Bodenplatte als Zielwert (schwarz)
- Geringer Energiebedarf einer vollflächig 20cm stark gedämmten Bodenplatte (bei jedoch großen Temperaturschwankungen)
- Nur effiziente Maßnahmen im Diagramm dargestellt
- Randdämmung horizontal, 3.60m tief, 20cm stark optimal
- Randdämmung horizontal 2.40m tief, 20cm stark bzw. 3.60m tief, 10cm stark mit 5cm Flächendämmung vergleichbar
- Randdämmung vertikal (Dämmschürze) 1.20m tief führt zu einem höheren Energiebedarf als eine 5cm Flächendämmung
- Randdämmung vertikal (Dämmschürze) 2.40m bzw. 3.60m tief führt zu einem geringen Energiebedarf
- Solche Dämmtiefen sind aufgrund der Wirtschaftlichkeit nur bei ohnehin in die Tiefe geführten Gründungen zu empfehlen



# Maßnahmenempfehlungen

## Begrenzung der Temperaturschwankung

- Mindestens 3 Seiten sollten mit  $z = 2.40\text{m}$  im Erdreich stehen
- Optimal sind 4 Seiten im Erdreich, wobei ein barrierefreier Zugang zum Gebäude jedoch unmöglich würde
- Außenwandöffnungen sollten im Optimalfall in Richtung nordn ausgerichtet werden
- Tür- und insbesondere Fensteröffnungen sollten wenn möglich nicht in Richtung Süden orientiert werden
- Lassen sich Südfenster nicht vermeiden, sollten Pufferzonen (bei möglichst großem Raunvolumen) an der Fassade angeordnet werden
- Innenwände zwischen Pufferzone und Ausstellungsraum sollten eine große thermische Speichermasse vorweisen
- Innenwände zwischen Warmräumen und Lagerbereichen sollten möglichst leicht ausgeführt werden

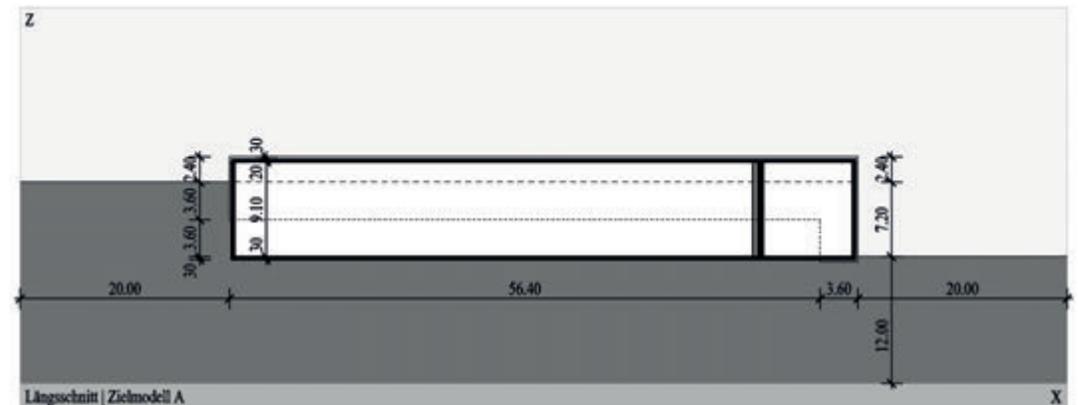
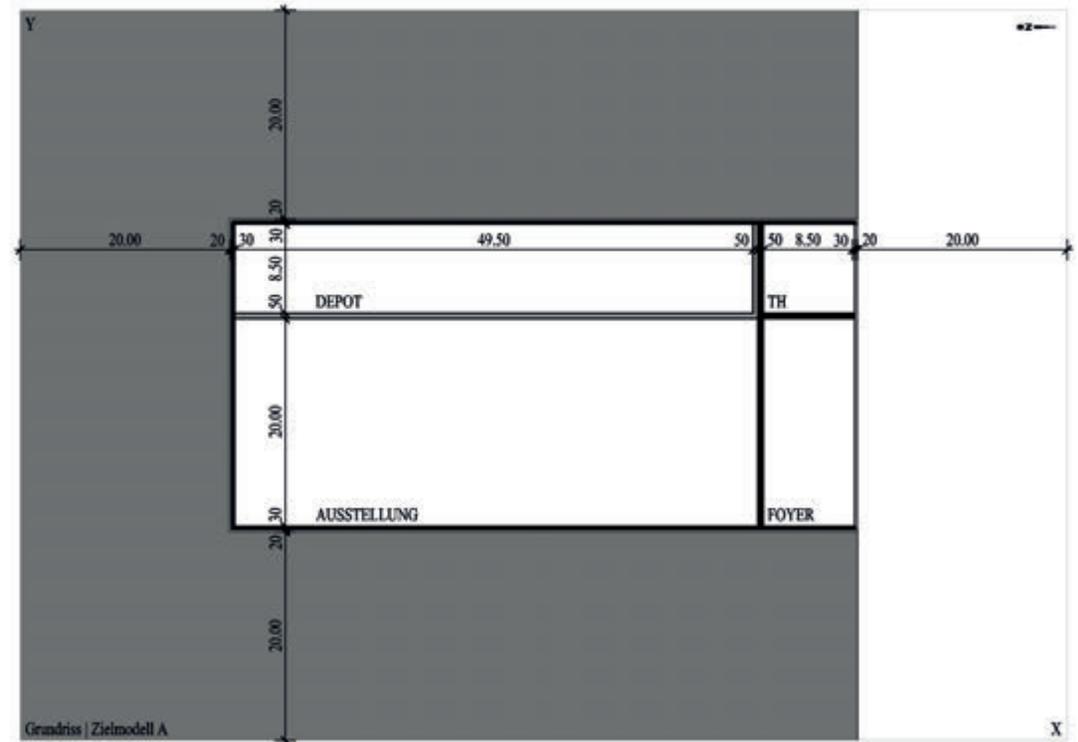
## Begrenzung der Energieverluste

- Bei der Gründung einer Bodenplatte auf Erdreich sollte eine 20cm starke, horizontale Randdämmung bis in eine Tiefe von 3.60m unter das Gebäude geführt werden
- Alternativ kann eine 20cm starke, mindestens 2.40m tiefe vertikale Randdämmung eingesetzt werden, wenn ohnehin tiefgreifende Fundamente erforderlich sind
- Teilweise im Erdreich stehende Außenwände sollten mit einer 20cm starken Dämmung bis in 3.60m Tiefe ab Geländeoberkante versehen werden
- Gebäudeecken, die an einem Geländeversatz liegen, sollten zudem auf ganzer Höhe mit einer 20cm starken Dämmung bis in 3.60m Tiefe ins Erdreich (parallel zur Außenwand) versehen werden
- Die verbleibende erdberührte Außenfläche sollte hingegen ungedämmt bleiben, um einen maximalen Wärmeaustausch zwischen Erdreich und Innenraum zu bewirken

# Zielmodell A – Allgemeines Museumsgebäude

## Modelldefinition

- Das Gebäude wird in Längsrichtung in einen 7.20m hohen Hang geschoben, bis die Kurzseite mit dem Höhenversatz bündig ist
- Damit stehen 3 Seiten mit  $z = 7.20\text{m}$  im Erdreich
- Die freie Kurzseite ist in Richtung Norden orientiert und mit einer raumhohen Glasfront,  $U = 1.00\text{W/m}^2\text{K}$  versehen
- Depot und Ausstellungsraum erhalten keine Fenster
- Der Innenraum wird durch mithilfe von 50cm starken Innenwänden in 4 Räume unterteilt
- Der Ausstellungsraum ist durch Betonwände vom Eingangsbereich abgetrennt, Holzwände grenzen den Depotbereich ab
- Horizontale Randdämmung, 20cm stark, 3.60m tief unter der freien Eingangsseite
- Vertikale Außenwanddämmung, 20cm stark, 3.60m tief im Erdreich
- Dämmung des Eckbereichs, 20cm stark, 3.60m tief in den Hang
- Berechnung bei TRY Normal 2015 sowie TRY Normal 2045

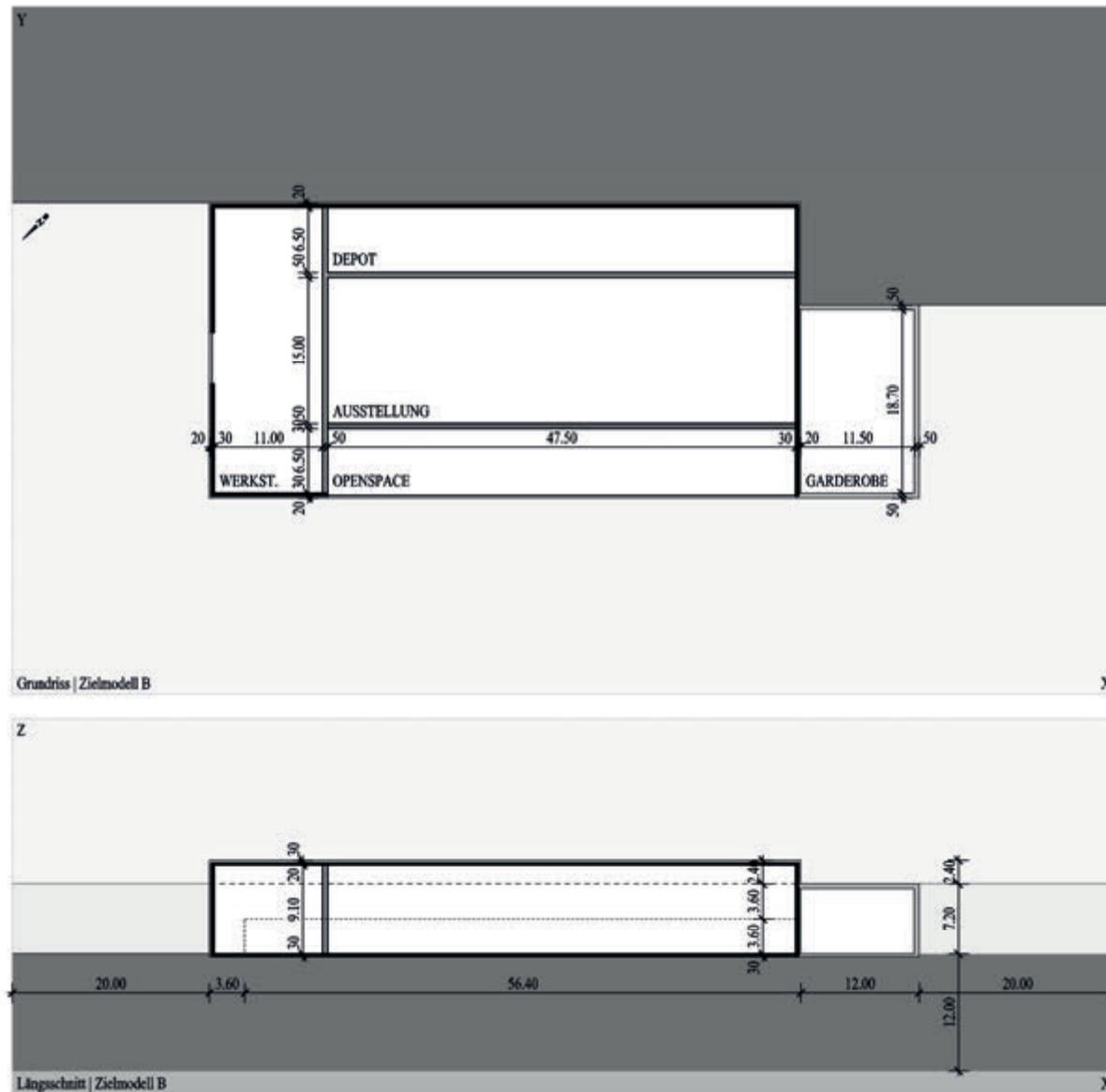




# Zielmodell B – Ausstellungsgebäude am Standort Detmold

## Modelldefinition

- Raumhohe Fensterfront mit Nordwestausrichtung
- Garderobe als angrenzender Warmraum (20°C), Höhe  $z = 7.20\text{m}$ , sämtliche Außenbauteile als Dämmung angenommen
- Gebäude langseitig an Erdreich (zzgl. Eckbereich),  $z = 7.20\text{m}$
- Raumzonen: Werkstatt, Depot, Ausstellung, OpenSpace, Garderobe
- Lehmwand zwischen OpenSpace und Ausstellung
- Holzwände zwischen Ausstellung und Depot bzw. Werkstatt
- Beton- und Lehmwand zwischen Ausstellung und Garderobe
- Berücksichtigung des Tores in Richtung Nordost,  $U = 1.00\text{W/m}^2\text{K}$
- Horizontale Randdämmung, 20cm stark, 3.60m tief unter den freien Gebäudeseiten (Nordwest und Nordost)
- Vertikale Außenwanddämmung, 20cm stark, 3.60m tief im Erdreich
- Dämmung des Eckbereichs, 20cm stark, 3.60m tief in den Hang
- Berechnung bei TRY Normal 2015 sowie TRY Normal 2045





# Zielmodelle - U-Wert-Berechnung gemäß DIN EN ISO 13370

## U-Wert Berechnung, Modell A (Bodenplatte auf Erdreich)

- Charakteristisches Bodenplattenmaß  $B = A / 0.5 \cdot P = 20\text{m}$
- Wirksame Gesamtdicke  $d_f = d_{w;e} + \lambda_g \cdot (R_{si} + R_{f;sog} + R_{se}) = 1.08\text{m}$
- $U_{f;sog} = 2 \cdot \lambda_g / \pi \cdot B + d_f \cdot \ln(\pi \cdot B / d_f + 1) = 0.255\text{W} / \text{m}^2\text{K}$
- Berücksichtigung der 3.60m tiefen Randdämmung, 20cm Stärke:  
 $R' = R_n - d_n / \lambda_g = 5.59\text{ m}^2\text{K} / \text{W} \mid d' = R' \cdot \lambda_g = 11.19\text{m}$
- $\psi_{g;ed} = -\lambda_g / \pi \cdot [\ln(D / d_f + 1) - \ln((D / (d_f + d')) + 1)] = -0.7697\text{W/mK}$
- $U_{f;sog} = U_{f;sog;0} + 2 \cdot \psi_{g;ed} / B = 0.178\text{ W} / \text{m}^2\text{K}$

## U-Wert Berechnung, Modell A (beheiztes Kellergeschoss $z_m = 2.40\text{m}$ )

- $U_{fg;b} = 0.206\text{ W} / \text{m}^2\text{K}$  (Bodenplatte)
- Berücksichtigung des einseitig anschließendem Erdreich durch Bildung eines Mittelwertes für  $z$  führt zu einem höheren U-Wert
- Es bleibt daher fraglich, ob die Formel eines beheizten Kellergeschosses für einen solchen Fall verwendet werden kann

## U-Wert Berechnung, Modell B (beheiztes Kellergeschoss $z_m = 6.00\text{m}$ )

- Charakteristisches Bodenplattenmaß  $B = A / 0.5 \cdot P = 20\text{m}$
- Wirksame Gesamtdicke  $d_f = d_{w;e} + \lambda_g \cdot (R_{si} + R_{f;sog} + R_{se}) = 1.08\text{m}$
- $U_{fg;b} = 2 \cdot \lambda_g / (\pi \cdot B + d_f + 0.5 \cdot z) \cdot \ln(\pi \cdot B / (d_f + 0.5 \cdot z) + 1)$
- $U_{fg;b} = 0.167\text{ W} / \text{m}^2\text{K}$  (Bodenplatte)
- $U_{wg;b} = 2 \cdot \lambda_g / \pi \cdot z \cdot (1 + 0.5 \cdot d_f / (d_f + z)) \cdot \ln(z / d_{w;b} + 1)$
- $d_{w;b} = \lambda_g \cdot (R_{si} + R_{w;b} + R_{se}) = 0.50\text{m}$  ( $R_{w;b} = 0.12\text{m}^2\text{K} / \text{W}$ )
- $U_{wg;b} = 0.586\text{ W} / \text{m}^2\text{K}$  (ungedämmter Außenwandbereich)
- $d_{w;b} = \lambda_g \cdot (R_{si} + R_{w;b} + R_{se}) = 0.50\text{m}$  ( $R_{w;b} = 5.83\text{m}^2\text{K} / \text{W}$ )
- $U_{wg;b} = 0.093\text{ W} / \text{m}^2\text{K}$  (gedämmter Außenwandbereich)
- $U_{bg;eff} = A \cdot U_{f;b} + z \cdot P \cdot U_{w;b} / (A + z \cdot P)$
- $U_{bg;eff} = 0.232\text{ W} / \text{m}^2\text{K}$  (Kellergeschoss insgesamt)

# Gesamtauswertung

## Auswertung - Parameterstudie

- Grundsätzlich kann das Erdreich unter optimalen Bedingungen einen großen Beitrag zu einem stabilen Innenraumklima leisten
- Ein optimales Gebäude existiert in der Regel jedoch nicht
- Erdberührte Bauteile sollten im Allgemeinen ungedämmt ausgeführt werden, jedoch im Randbereich mit einer 3.60m tiefen sowie 20cm starken Randdämmung optimiert werden
- Für eine passive Konditionierung müssen die wesentlichen Parameter schon bei der Vorentwurfsphase berücksichtigt werden
- Eine passive Konditionierung der Lagerräume lässt sich hingegen auch für einseitig am Erdreich errichtete Gebäude realisieren
- Die effektiv entsprechend der DIN EN ISO 13370 resultierenden U-Werte entsprechen dabei mindestens den Vorgaben des KfW-Programms Energieeffizient Bauen ( $U_{\max} = 0.25 \text{ W /m}^2\text{K}$ )

## Auswertung - Recherche

- Recherche – der Kellerboden sollte mindestens 3.00m unterhalb des anschließenden Geländeniveaus liegen
- Parameterstudie – positive Effekte lassen sich bereits bei einer Tiefe im Erdreich mit  $z = 2.40\text{m}$  erkennen
- Recherche – Außenwände sollten bis in eine Tiefe von 2.40m mit Dämmung versehen werden
- Parameterstudie – Die optimale Dämmtiefe an erdberührten Außenwänden liegt bei 3.60m, eine darüber hinausgehende Dämmtiefe hat wieder größere Innentemperaturschwankungen zur Folge
- Recherche – Die thermischen Eigenschaften des Erdreichs bleiben im Rahmen geothermischer Untersuchungen meist unbeachtet
- Ausblick – diese Eigenschaften sollten unbedingt mituntersucht werden, weil nur ein geringfügiger Mehraufwand entsteht, der erhebliche Auswirkungen auf die Genauigkeit von Simulationsberechnungen haben kann