



- Infraleichtbeton – Eigenschaften und Referenzbauwerke
- Berechnung des sommerlichen Wärmeschutzes
- Dynamische CO₂-Emissionsfaktoren für den deutschen Strom-Mix
- Darstellung diverser Fensteröffnungsmodelle für Gebäudesimulationen
- Ansätze zur ökonomischen Bewertung vertikaler Begrünungssysteme
- Baukosten und Energieeffizienz von Mehrfamilienhäusern
- Einsatz passiver Erdreichkühlung zur Konditionierung von Lagerhäusern
- Tageslichtnutzung in einem transluzenten Membrandachbau, mit Fallbeispiel

Einsatz passiver Erdreichkühlung zur Konditionierung von Lagerhäusern

Anwendung in der modernen Schaumweinproduktion

Für den Neubau der Produktionsstätte eines Getränkeherstellers war es erforderlich, ein Lagervolumen für rund fünf Millionen Flaschen als gekühltes Rohsektlager bereitzustellen. Die maximalen Temperaturen durften aufgrund der Qualitätsanforderungen im Produktionsprozess 14 °C während der Sommermonate nicht überschreiten. Um möglichst hohe Energieeffizienz zu erzielen und eine ganzjährige Beheizung beziehungsweise Kühlung zu vermeiden, sollte das Lager natürlich konditioniert werden: Durch explizite Kopplung des Gärlagers mit dem angrenzenden Erdreich wurde dessen Pufferwirkung über ungedämmte erdberührte Wand- und Bodenbauteile aktiviert. Auch das Lagergut selbst wurde als thermische Speichermasse in der Auslegung berücksichtigt. Gleichzeitig wurde die verbliebene thermische Gebäudehülle dahingehend optimiert, dass die auftretenden Wärmegewinne und Wärmeverluste zur Außenluft auf ein Minimum reduziert sind. Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit erfolgte mittels gekoppelter transientscher Gebäudesimulation. Es konnte gezeigt werden, dass – selbst unter Annahme erhöhter Außenluft- und Erdreichtemperaturen aufgrund des Klimawandels – bei Ausführung von Außenwänden und Dächern in höchster thermischer Qualität auf eine aktive Konditionierung des Lagers vollständig verzichtet werden kann.

Stichworte Thermische Speichermasse; Erdberührte Bauteile; Passive Kühlung; Lagerhauskühlung; Gebäudesimulation

1 Hintergrund

Die Sektproduktion nach der Jahrhunderte alten „Méthode traditionnelle“ (Champagnermethode) ist geprägt durch die zweite Phase des Gärprozesses, die als Flaschengärung stattfindet. Im Anschluss an die alkoholische Gärung vom Traubenmost zum Grundwein wird dieser in Flaschen abgefüllt und nach der rund drei Wochen dauernden eigentlichen Gärphase für mindestens 15 Monate zur Reife „auf der Hefe“ gelagert [2]. Ein wesentlicher Faktor für die optimale Lagerung während der Reifezeit ist die Lagertemperatur von rund 10 bis 12 °C. Dabei darf der Grenzwert von 14 °C nicht überschritten werden, während eine zeitweilige Unterschreitung bis 8 °C keine nachteilige Auswirkung zeigt. Bedeutet dies für südliche Produktionsstandorte (Frankreich, Spanien, Italien) zumeist ein nahezu durchgehendes Kühlerfordernis, entsteht im gemäßigten Klima Mitteleuropas während der Wintermonate Heiz- und im Sommer erheblicher Kühlbedarf.

Use of passive ground cooling for the conditioning of warehouses. Application in modern sparkling wine production: A new production facility for a beverage manufacturer has to provide a storage volume for around 5 million bottles as a refrigerated warehouse. The maximum temperatures were not allowed to exceed 14 °C due to the quality requirements in the production process. To achieve highest energy efficiency and to avoid year-round heating and cooling, the warehouse should be passively conditioned: by explicitly coupling it with adjacent soil, its buffering effect was activated via uninsulated wall and floor components in contact with the ground. The warehouse stock was also integrated into the concept as thermal mass. Furthermore, the remaining building envelope was optimized to reduce heat gains and losses to external air to a minimum. The serviceability was demonstrated with a coupled thermal building simulation. It was shown that even with higher outdoor air and ground temperatures due to climate change, an active conditioning of the warehouse can be avoided when designing exterior walls and roofs of highest thermal quality.

Keywords Thermal mass; Soil contact components; Passive cooling; Warehouse cooling; Building energy simulation

Dabei liegen die Jahresmitteltemperaturen der Lufttemperatur in Österreich je nach Standort im Bereich von rund 8 bis 10 °C – im Mittel gesehen also beste Lagerbedingungen. Durch jahreszeitliche und tägliche Schwankungen der Außenlufttemperatur und den Einfluss der Solarstrahlung kann in oberirdischen Lagerbereichen dieses Potenzial jedoch nicht genutzt werden. Bei unterirdischen Lagerräumen verhält es sich anders: Die Jahresmitteltemperatur beträgt ebenfalls zwischen 8 und 10 °C, der Einfluss jahreszeitlicher und täglicher Temperaturschwankungen nimmt jedoch mit zunehmender Tiefe stetig ab, die Temperaturamplitude im Jahresverlauf wird geringer. Gleichzeitig stellt sich eine mit der Tiefe zunehmende Phasenverschiebung ein, indem die Temperaturspitzen im Erdreich verzögert auftreten [2]. Dieser Zusammenhang ist in Bild 1 dargestellt.

Aus diesem Grund werden seit jeher Lagerräume häufig unterirdisch errichtet. Dabei reichte der Einsatzzweck vom Erdkeller zur Aufbewahrung von Lebensmitteln über den Bierlagerkeller bis hin zum Eiskeller zur Lagerung von

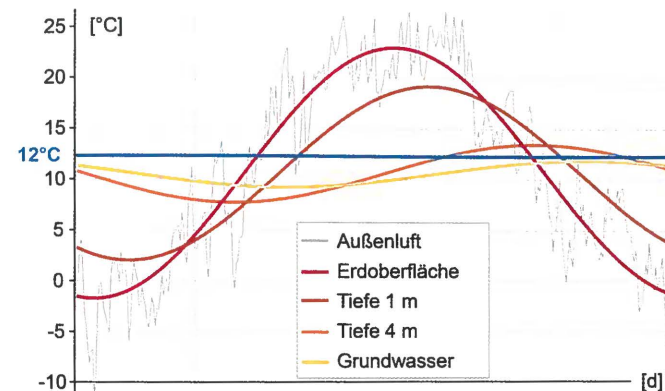


Bild 1. Jahrestemperaturverlauf der Außenluft (Tagesmittelwerte), an der Erdoberfläche, im Erdreich und im Grundwasser im Vergleich zur geforderten Lagertemperatur (Ingenieurbüro Gratzl)

Fig. 1. Annual temperature profile of outside air (daily average), surface, soil and groundwater compared to required storage temperature (Ingenieurbüro Gratzl)

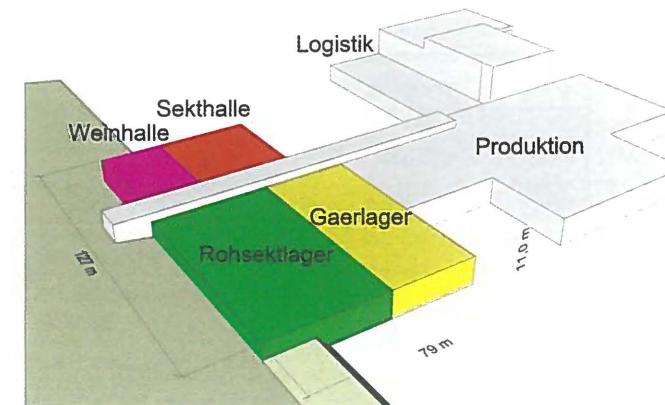


Bild 2. Übersichtsdarstellung Produktionsgebäude und untersuchte Zonen (Ingenieurbüro Gratzl, Architekt Zieser)
Fig. 2. Overview of production building and investigated zones (Ingenieurbüro Gratzl, Architekt Zieser)

Natureis. Eine der häufigsten Anwendungsformen ist allerdings der klassische Weinkeller, der bis vor einigen Jahrzehnten auch in der großtechnischen Wein- und Sektproduktion unverzichtbar war. In den vergangenen Jahren setzten sich jedoch vermehrt oberirdische Lagerstätten durch, die eine Vielzahl an Vorteilen vereinen: einfachere Zugänglichkeit ohne Höhendifferenz zum Produktionsbereich, Realisierbarkeit größerer Lagerhöhen, unkomplizierte Errichtung. Demgegenüber steht hauptsächlich der Nachteil höheren Energiebedarfs aufgrund der ganzjährig erforderlichen Konditionierung.

1.1 Fragestellung

Beim Neubau der Produktionsstätte (siehe Bild 2) eines führenden österreichischen Sekt- und Schaumweinherstellers (Standort: Burgenland; Klimaregion Südost-südlicher Teil (S/SO) gem. [3]) sollten die Vorteile der oberirdischen mit jener der Kellerbauweise verknüpft werden. Die Lagerkapazitäten für rund 5,5 Millionen Flaschen Schaumwein im Rohsektlager und circa 7,5 Millionen Liter Most, Wein und Sekt in Wein- und Sekthalle sollten allesamt auf einem Niveau mit dem zentralen Produktionsbereich angeordnet werden. Durch die oberirdische Bauweise sollten geringe Errichtungskosten erzielt werden. Der entscheidende Unterschied zu einem herkömmlichen Lagergebäude bestand in der direkten Kopplung der komplett ohne Dämmung ausgeführten erdberührten Bauteile mit den enormen Speicherkapazitäten des angrenzenden Erdreichs. Dadurch sollte – kombiniert mit der erheblichen Speichermasse des Lagerguts – vollständig auf Heizung und Kühlung verzichtet werden können.

Um die ausgleichende Wirkung des Erdreichs zu erhöhen und eine maximale Einsenkung realisieren zu können, war ein Massenausgleich zwischen Aushub und Anschüttung am Grundstück vorgesehen. Als Resultat konnten die ungedämmten erdberührten Bauteile im tieferliegenden Erdreich zur passiven Erdreichkühlung herangezogen werden. Zu klären blieb allerdings eine zentrale Fragestellung als Voraussetzung für die Realisierbarkeit des geplanten Konzepts: Ist es möglich, die Lagerbereiche einer groß-

technischen Sekt- und Schaumweinproduktion trotz oberirdischer Bauweise ohne aktive Heizung und Kühlung zu betreiben? Daran anknüpfend war außerdem zu überprüfen, wie groß die optimale Einschütttiefe unter wirtschaftlichen Randbedingungen ist und welche thermische Qualitätsanforderung an die übrige oberirdische Gebäudehülle gestellt werden musste, um das Ziel natürlicher Konditionierung der Lagerbereiche zu erreichen. Dabei war auch sicherzustellen, dass die Anforderungen an die Lagerbedingungen auch bei steigenden mittleren Außenbedingungen aufgrund des Klimawandels weiterhin eingehalten werden können.

1.2 Systematik

Im Vergleich zu üblichen Hochbauten kommt beim vorliegenden Objekt mit einer Solltemperatur von 10 bis 12 °C den solaren Wärmegewinnen durch sehr wenige Fensterflächen und den Lüftungswärmeverlusten durch lediglich kurze Zeiträume gezielten Luftaustauschs nur sehr geringe Bedeutung zu. Die internen Wärmegewinne sind geprägt durch die Produktionsprozesse: In Wein- und Sekthalle finden in großvolumigen Lager- und Produktionsstanks Gärprozesse statt, die Wärmeeinträge in die Zonen bewirken. Zusätzliche Wärmeeinträge werden speziell in der Weinhalle auch durch die Anlieferung des Traubenmosts hervorgerufen, der im Herbst mit Temperaturen bis zu 25 °C aus den Pressen der Winzer angeliefert wird. Im Unterschied dazu findet im Rohsektlager nur noch die Reifung in den Flaschen statt, die Flaschengärung erfolgt bereits zuvor im Gärlager. Von dort werden die Sektflaschen mit einer Temperatur von rund 17 °C in das Rohsektlager eingelagert. Insgesamt finden die Produktionsprozesse und damit die Wärmeeinträge nicht kontinuierlich im ganzen Jahr statt, sondern sind stark auf einzelne Phasen im Jahr beschränkt: Im Anschluss an die Weinlese erfolgt in mehreren Chargen die erste Gärung zum Grundwein, daran anschließend wird die Flaschengärung und die Einlagerung in das Rohsektlager vorgenommen.

Neben den internen Gewinnen kommt einerseits den Transmissionswärmeverlusten und -gewinnen sowie andererseits der Wärmespeicherung zentrale Bedeutung für die Wärmebilanz des Gebäudes zu. Bei der Transmission kön-

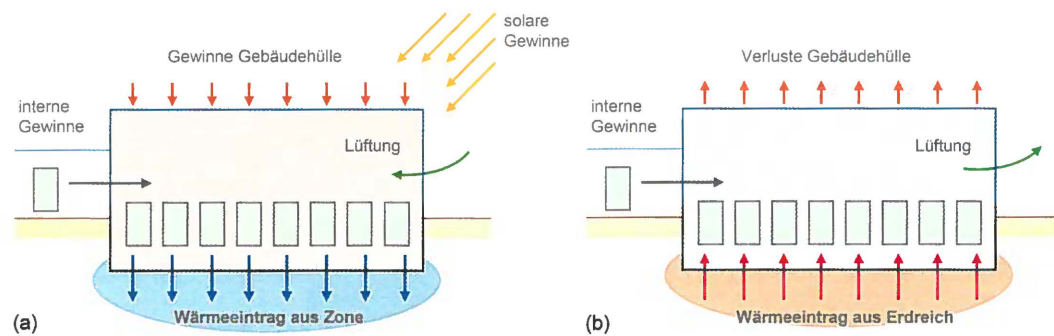


Bild 3. Wärmeströme am Gebäude im a) Sommerfall und b) Winterfall (Ingenieurbüro Gratzl)
Fig. 3. Heat flows at the building in the summer (a) or winter case (b) (Ingenieurbüro Gratzl)

nen Wärmeströme über oberirdische beziehungsweise über erdberührte Bauteile unterschieden werden. Während jene über erdberührte Bauteile vorrangig der Aktivierung des großen Wärmespeichervermögens des Erdreichs dienen, können Wärmeverluste über die restliche Gebäudehülle mittels guter Dämmung erforderlichenfalls gering ausfallen. Die Wirkung der Wärmespeicherung des angrenzenden Erdreichs und des Lagerguts sorgen dafür, dass das in Bild 3 dargestellte grundsätzliche Wirkprinzip der passiven Konditionierung der Lagerkapazitäten funktionieren soll:

- Im Sommerfall werden Wärmeeinträge kurzfristig von der großen Speichermasse des Lagerguts ausgeglichen. Längerfristig wirkt das angrenzende kühle Erdreich als Wärmespeicher, wohin große Wärmemengen abgegeben werden können. Kurzfristig werden Temperaturspitzen bis zu 14°C zugelassen.
- Im Winterfall soll neben der ohnehin vorteilhaften Jahresmitteltemperatur des Erdreichs von rund 8 bis 10°C auch die Phasenverschiebung genutzt werden, wodurch die geringsten Erdreichtemperaturen erst im Frühling auftreten – hier wirken bereits wieder Wärmegewinne einer zu starken Auskühlung entgegen.

2 Methodik

Zur Sicherstellung der Einhaltung der Anforderung an die Lagerbedingungen war nachzuweisen, dass mit dem vorgesehenen Konzept der passiven Erdreichkühlung die vorgegebenen Grenztemperaturen dauerhaft eingehalten werden können. Dazu wurde eine thermische Gebäudesimulation durchgeführt, in der neben der Abbildung des mehrzonigen Gebäudemodells die Berücksichtigung dreier zentraler Elemente von besonderer Bedeutung war:

- ein detailliertes Erdreichmodell, das nicht nur eine Randbedingung darstellt, sondern die Wechselwirkung mit den Wärmeströmen zu den angrenzenden Gebäudezonen realitätsnah berücksichtigt und die Eingabe spezifischer Erdreichparameter zulässt;
- Speichermassen innerhalb der Gebäudezone, unabhängig von den Konstruktionsmaterialien, die entsprechend der Belegung des Lagers beziehungsweise den Produktionsprozessen in unterschiedlichem Maß in das Modell eingebunden werden können;
- die Modellierung von Wärmeeinträgen, die nicht ausschließlich in die Gebäudezone, sondern primär direkt in die Speichermassen und dann erst sekundär auf die Raumluft wirken.

Als Simulationssoftware wurde TRNSYS eingesetzt [4], die gekoppelte Simulation aus Gebäude-, Erdreich- und Speichermassenmodell erfolgt durch die Kombination spezieller Komponenten, deren Kopplung miteinander in den folgenden Abschnitten erläutert wird.

2.1 Erdreichmodell

Von essentieller Bedeutung für die Modellierung der vorliegenden Problemstellung war es, ein ausreichend detailliertes Erdreichmodell einzusetzen. Die üblichen Modelle, wie beispielsweise in ISO 13370 [5], berücksichtigen ausschließlich eine sinusförmige Schwingung mit vorgegebener Mitteltemperatur und Amplitude [6, 7]. Wärmeströme vom Gebäude zum Erdreich entstehen ausschließlich aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen den beiden Bereichen, die Temperatur des angrenzenden Erdreichs wird durch diese Wärmeströme aber nicht beeinflusst. Insbesondere diese Wechselwirkung und die Wärmeausbreitung im Erdreich stellt jedoch eine essentielle Voraussetzung für diese Untersuchung dar [8]. Die Modellierung erfolgte daher mit dem „TESS Basement Model“ (TRNSYS Type 1244) [9]. Dabei werden zonenweise Wärmeströme vom Gebäude in das Erdreich über die angrenzenden Bauteiloberflächen in einem Finite-Elemente-Modell nachgebildet.

Neben der Modellierung im Finite-Elemente-Modell kommt der Definition der Randbedingungen große Bedeutung zu. Speicherkapazität, Dichte und Wärmeleitung des Erdreichs bewirken maßgebliche Unterschiede in den Ergebnissen, werden aber üblicherweise in geotechnischen Gutachten nicht näher untersucht. Für das gegenständliche Objekt wurde daher die Geologische Bundesanstalt hinzugezogen, um aus den allgemeinen geologischen Verhältnissen im Großraum des Bauplatzes [10] und den Aussagen des geologischen Gutachtens zu Schichtaufbau, Bodenarten und Grundwasserführung konkrete Annahmen für die Erdreichparameter treffen zu können. Diese wurden in weiterer Folge mit einer Sensitivitätsanalyse untersucht, um im möglichen Schwankungsbereich den Worst Case zu eruieren und diesen als Randbedingung festzulegen.

2.2 Speichermassenmodell

Als Speichermassen in den Gebäudezonen wirken im Rohsekt- und Gärlager die abgefüllten und in Gitterkäfigen gelagerten Flaschen (Sektkäfige) und bereits in Kartonagen verpackte und folierte Paletten für den Wareneingang im Logistikkeller. In Wein- und Sekthalle sind die gedämmten

oder ungedämmten Lager- und Produktionstanks mit unterschiedlichen Füllzuständen zu berücksichtigen. Diese Tanks unterliegen unterschiedlichen Produktionsprozessen (bis hin zu Eistanks, deren Inhalt kurzfristig auf unter 6°C abgekühlt wird) und werden zu unterschiedlichen Zeiten im Jahresverlauf befüllt und wieder entleert. Als Speichermassenmodell wurde das „Lump Capacitance Model“ (TRNSYS Type 963) [11] herangezogen, das als wesentliche Ausgangsgröße neben der mittleren Temperatur den Wärmestrom zwischen Speichermasse und umgebender Zone angibt.

Das Speichermassenmodell gewährleistet sehr spezifische Eingangsparameter zu Wärmespeicherkapazität, Oberfläche und Wärmedurchgangskoeffizient und kann beliebig aktiviert und deaktiviert werden. Besonders sensibel ist hier die Festlegung des Wärmedurchgangswiderstand: Ausgehend davon, dass in Flaschen geringe Strömungen (guter Wärmeübergang), in den Edelstahltanks aber vergleichsweise große Strömungen (schlechter Wärmeübergang) auftreten, können die Wärmedurchgangskoeffizienten festgelegt werden. Bei den Wareneingangspaletten besteht aufgrund des Zusammenwirkens aus Folierung, Kartonagen, Glasflaschen und zwischenliegendem Luftraum die Schwierigkeit ebenfalls in der Ermittlung des Wärmedurchgangswiderstands. Aus einem eigenen Simulationsmodell (Karton und Folie als Hüllfläche, Flaschen als Speichermassen im Hüllvolumen) konnte ein äquivalenter U-Wert ermittelt werden. Die Wärmeleitfähigkeit von Karton wurde gemäß Frick gewählt [12]. Alle gewählten Eingangsparameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

2.3 Wärmeeinträge

Neben den üblichen – bei der vorliegenden Untersuchung jedoch untergeordneten – Wärmelasten wie Beleuchtung, Personen und Geräte (z. B. Rührwerke der Tanks, Stapler im Rohsektlager) treten in den untersuchten Lagerbereichen erhebliche Wärmeeinträge durch den Produktionsprozess auf. Die untersuchten Prozesse beginnen mit der Anlieferung des unvergorenen Traubenmosts und enden mit der Auslagerung der Sektkäfige aus dem Rohsektlager zu den Rüttelpulpen und dem anschließenden Degorgieren. In diesem Zeitraum finden zahlreiche produktionsbedingte Temperaturänderungen und damit Wärmeeinträge im Lagergut statt, die gemeinsam mit dem Kellermeister im Detail erhoben wurden. Dabei war zu berücksichtigen, dass die Produktion, beginnend mit der Anlieferung, in unterschiedlichen Chargen stattfindet. Somit musste neben der zeitlichen Wirkung der Speichermassen auch die Wärmeentwicklung in den verschiedenen Chargen getrennt voneinander nachgebildet werden.

Die Wärmeentwicklung in den Chargen wurde in vier Phasen unterteilt: (1) die Wareneingangsphase mit einer bestimmten Initialtemperatur bei Eintritt in die jeweilige Zone; (2) die Produktionsphase, in der das Lagergut Temperaturänderungen aufgrund des aktiven Produktionsprozesses und daraus Wärmeeinträgen unterworfen ist; (3) die Lagerphase, in der eine kontinuierliche Anpassung der Temperatur des Lagerguts an die Lufttemperatur in der jeweiligen Zone erfolgt; (4) die Regenerationsphase nach der Auslagerung der Charge aus der Zone, in der sich die Temperatur des Lagerguts wieder an die Initialtemperatur bei Wareneingang anpasst. Die Wärmeeinträge in die Spei-

Tabelle 1. Zusammenfassung der Eingabeparameter zur Beschreibung der Speichermassen

Table 1. Summary of the input parameters for describing the storage masses

Bezeichnung	Wärmekapazität [kJ/K]	Oberfläche [m ²]	U-Wert [W/m ² ·K]
Sektkäfig (je Käfig)	1530	27,0	7,0
Produktionstank gedämmt (500 hl)	194000	83,5	0,37
Lagertank ungedämmt (1000 hl)	194000	118,9	3,3
Palette Wareneingang (je Palette)	1350	8,0	3,0

chermasse werden dementsprechend in der Wareneingangsphase durch die Initialtemperatur und während der Produktionsphase durch die aktiven produktionsbedingten Temperaturänderungen definiert. Die Auskühlgeschwindigkeiten während der Lagerphase wurden zudem mit Erfahrungswerten des Kellermeisters abgeglichen, wodurch die getroffenen Annahmen zu U-Werten von Tanks und Flaschen verifiziert werden konnten.

3 Ergebnisse

Die zentrale Fragestellung dieser Untersuchung lautete, ob der Betrieb einzelner Bereiche einer großtechnischen Schaumweinproduktion ohne aktive Heizung und Kühlung ausschließlich mit passiver Konditionierung über das Erdreich gewährleistet werden kann. Dazu sollten erdberührter Boden und Wände vollständig ohne Dämmung ausgeführt werden.

3.1 Gesamtergebnis

Die grundsätzliche Beantwortung der Fragestellung ist in den Bildern 4 und 5 dargestellt. Sie zeigen die Temperaturentwicklung im Jahresverlauf (beginnend mit der Weineinlagerung im September) für die Lufttemperatur (T_{AIR}), ausgewählte Chargen des Lagerguts (T_{BOTTLE} bzw. T_{TANK}) und das Erdreich direkt angrenzend an die Bodenplatte (T_{EARTH}) in den Zonen Weinhalle (Bild 4) und Rohsektlager (Bild 5).

In der Zone Weinhalle erfolgt nach der Einlagerung des Traubenmosts mit einer Temperatur von rund 20°C in der Wareneingangsphase Ende August (Charge 1) und Mitte September (Charge 2) eine Abkühlung des Lagerguts bei gleichzeitigem Anstieg der Raum- und Erdreichtemperaturen. Daran anschließend beginnt in der Produktionsphase die alkoholische Gärung, der bei Charge 1 eine rund zweiwöchige Abkühlung auf 6°C (zur Weinstein-Stabilisierung, in ungedämmten Tanks) folgt. Nach der Lagerphase werden die beiden Chargen Anfang Jänner (Charge 1) bzw. Anfang März (Charge 2) in Flaschen abgefüllt und verlassen damit die untersuchte Zone. Bis zur neuerlichen Einlagerung regenerieren sich die Speichermassen während der Regenerationsphase auf die Initialtemperatur. In dieser Phase ist in der Weinhalle lediglich rund ein Drittel der Kapazität mit gelagertem Altwein belegt, der im Dezember mit 17°C aus der Sekthalle überstellt und längerfristig gelagert wird.

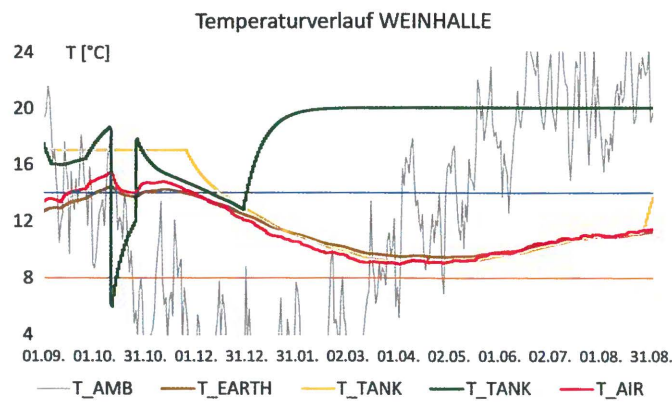


Bild 4. Jahresverlauf ausgewählter Temperaturwerte für die Zone „Weinhalle“ (Ingenieurbüro Gratzl)
Fig. 4. Annual course of selected temperature values for the zone „Weinhalle“ (Ingenieurbüro Gratzl)

Die Lufttemperatur der Zone wird maßgeblich von der Temperatur des Lagerguts bestimmt. Sie liegt im Winterhalbjahr geringfügig unter, während der Sommermonate geringfügig über der Temperatur der Speichermassen. Geringfügige Schwankungen werden durch die Lüftung, Sonneneinstrahlung und andere Wärmeeinträge (Rührwerke) hervorgerufen. Während der Wareneingangsphase überschreitet die Lufttemperatur kurzfristig den vorgegebenen Grenzwert von 14°C, was jedoch auf den Produktionsprozess zurückzuführen ist und dementsprechend unkritisch zu betrachten ist. Im weiteren Jahresverlauf wird der Vorgabewert von 12°C dauerhaft unterschritten. Die minimalen Temperaturen liegen bei rund 9°C. Eindeutig zu erkennen ist die durch die Speichermassen des Erdreichs und des Lagerguts hervorgerufene Phasenverschiebung: Während die minimalen Außenlufttemperaturen im Jänner auftreten, folgen die tiefsten Lufttemperaturen von Zone und Lagergut erst im April.

Die Erkenntnisse aus der Weinhalle lassen sich weitgehend auch auf das Rohsektlager in Bild 5 übertragen, unterscheiden sich aber in einem wesentlichen Punkt: Durch die geringe Speichermasse und große Oberfläche der in den Sektkäfigen gelagerten Flaschen folgt die Temperatur des Lagerguts (BOTTLES-1 bzw. BOTTLES-2 direkt aus dem Gärlager) sehr rasch jener der Lufttemperatur, beziehungsweise umgekehrt. Unterbleibt während der Weihnachtsferien oder am Ende des Wareneingangs im Juli die Einlagerung neuer Sektkäfige mit einer Initialtemperatur von 17°C aus dem Gärlager als maßgeblicher Wärmeeintrag, so ist vergleichsweise abrupt ein rascheres Absinken (Winter) beziehungsweise ein langsamerer Anstieg (Sommer) der Lufttemperatur in der Zone zu erkennen. Dementsprechend entfaltet sich die Wirkung der Speichermassen des Lagerguts im Rohsektlager deutlich kurzfristiger als jene des Erdreichs. Auch die Phasenverschiebung ist mit den niedrigsten Temperaturen Anfang März deutlich weniger stark ausgeprägt als in der Weinhalle mit etwa gleich großen eingelagerten Speichermassen, jedoch viel geringerem Oberflächen-Volumen-Verhältnis der Tanks im Vergleich zu den Flaschen in den Sektkäfigen des Rohsektlagers.

Die Obergrenze der Solltemperatur von 12°C wird im Spätsommer und im Herbst temporär überschritten. Die Maximaltemperatur von 14°C kann das gesamte Jahr über

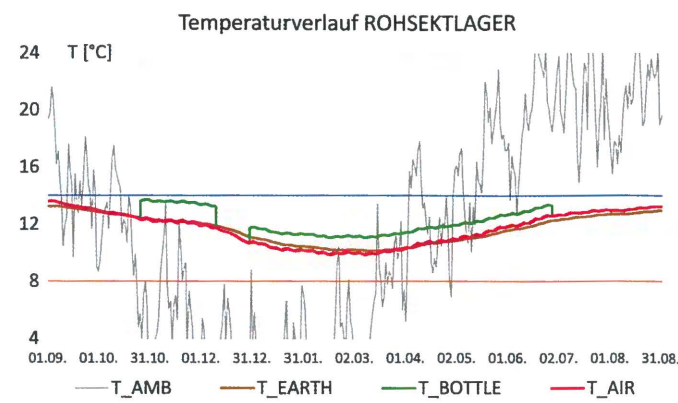


Bild 5. Jahresverlauf ausgewählter Temperaturwerte für die Zone „Rohsektlager“ (Ingenieurbüro Gratzl)
Fig. 5. Annual course of selected temperature values for the zone „Rohsektlager“ (Ingenieurbüro Gratzl)

eingehalten werden. Um diese Vorgabe zu erfüllen, sind jedoch die von Außenluft berührten Teile

der thermischen Gebäudehülle in sehr hoher thermischer Qualität auszuführen: Flachdach ($U = 0,12 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) und Außenwand ($0,15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) müssen sehr hohe thermische Anforderungen erfüllen, um eine passive Erdreichkühlung zu ermöglichen. Mit diesen Anforderungen können die Vorgaben an die Lagerbedingung auch bei einem absehbaren Klimawandel in den nächsten dreißig Jahren sichergestellt werden. Ohne den absehbaren Anstieg der mittleren Außenluft- und dementsprechend auch Erdreichtemperatur könnten die Anforderungen an die thermische Gebäudehülle etwas reduziert werden.

Bei der Sekthalle mit einer vorgegebenen Raumsolltemperatur von 17°C zeigte die Untersuchung, dass ohne Dämmung der erdberührten Bauteile die auftretenden Wärmeverluste den positiven Effekt der passiven Kühlung deutlich übersteigen würden. Dementsprechend wurden die erdberührten Bauteile der Sekthalle mit ausreichender Wärmedämmung ausgestattet. Es verbleibt dennoch ein Heizbedarf am Winterende und ein Kühlbedarf im Spätsommer.

3.2 Wirkung Erdreich

Ob die direkte Kopplung an das Erdreich über ungedämmte Bauteile im vorliegenden Fall als „passive Erdreichkühlung“, „Nutzung des Erdreichs als Pufferspeicher“ oder lediglich „erhöhte Wärmeverluste zum Erdreich“ bezeichnet wird, hängt von den Verhältnissen in der zu konditionierenden Zone ab:

- Werden in die Zone durchgehend Wärmelasten eingetragen, können diese auch kontinuierlich an das Erdreich abgeführt werden, die Bezeichnung „passive Erdreichkühlung“ trifft zu. Der erzielbare Kühleffekt liegt bei rund 2 bis 3 W/m^2 .
- Werden keine relevanten Wärmelasten eingetragen, kommt es zu einem Temperaturengleich im Jahresverlauf im Sinne der „Nutzung des Erdreichs als Pufferspeicher“: Während der Wintermonate entsteht ein minimaler Heizeffekt, im Sommer wird geringfügig gekühlt.
- Sind höhere Raumsolltemperaturen als 10 bis 12°C gefordert und muss dementsprechend geheizt werden, tre-

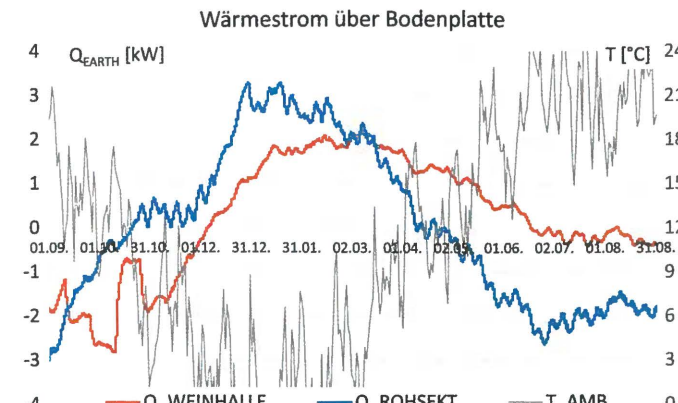


Bild 6. Jahresverlauf der Wärmeströme über die Bodenplatte in den Zonen „Weinhalle“ und „Rohsektlager“ (Ingenieurbüro Gratzl)
Fig. 6. Annual course of heat flows to the ground „Weinhalle“ and „Rohsektlager“ (Ingenieurbüro Gratzl)

ten durchgehend „erhöhte Wärmeverluste zum Erdreich“ auf. In diesem Fall ist eine ausreichende Dämmung der erdberührten Bauteile erforderlich.

Hinsichtlich der optimalen Einschütttiefe – also der Lage der Bodenplatte unter dem Niveau des angrenzenden Erdreichs – gilt, dass bis zu einer Einschütttiefe von drei Metern keine ausreichende Wirkung erzielt wird. Erst ab dieser Mindesttiefe ist es für das untersuchte Objekt möglich, überhaupt auf aktive Kühlung zu verzichten. Eine gute Wirkung entsteht ab einer Einschütttiefe von vier Metern, ab einer Tiefe von fünf Metern hingegen entsteht kein nennenswerter weiterer Vorteil mehr.

In Bezug auf die erforderliche Dämmung der erdberührten Wände sind die Ergebnisse zweigeteilt: Während in tieferen Erdreichsschichten ohne Wärmedämmung eine positive Wirkung analog zur ungedämmten Bodenplatte erzielt werden kann, treten in den oberen zwei Metern sogar ungünstige Ergebnisse auf. Die Erdreichtemperatur wird noch zu stark von den Oberflächentemperaturen beeinflusst und weist nur jeweils geringe Amplitudendämpfung und Phasenverschiebung auf. Dementsprechend wird eine Dämmung der erdberührten Wände im oberen Bereich vorgesehen, ab einer Tiefe von zwei Metern werden die erdberührten Wände ungedämmt ausgeführt.

Die Frage nach der Wirkung einer Überschüttung des Objekts im Sinne des „Eingrabens“ des gesamten Baukörpers kann grundsätzlich positiv beantwortet werden. Dieses Ergebnis beruht aber nicht vorrangig auf der ausgleichenden Wirkung des überschütteten Erdreichs, sondern kann auf andere Effekte zurückgeführt werden:

- Wie das Erdreich der Überschüttung selbst wirkt, hängt vom Schichtaufbau der darunterliegenden Decke ab: Ist eine Wärmedämmung vorhanden, bewirkt eine Überschüttung keine positiven Effekte. Wird die Decke ohne Wärmedämmung ausgeführt, gelten die analogen Grundsätze wie für ungedämmte erdberührte Wände und Böden in diesem Zusammenhang: Ab einer Tiefe von zwei Metern ist ein positiver Einfluss vorhanden und nimmt mit zunehmender Einschütttiefe zu, bei einer geringeren Überschüttung ist keine positive Wirkung zu erzielen.

- Wird der gesamte Baukörper überschüttet, bedeutet dies automatisch eine tiefere Einschüttung. Dies wirkt sich positiv auf die verstärkte Amplitudendämpfung und Phasenverschiebung im Erdreich angrenzend an die erdberührten Wand- und Bodenbauteile aus.
- Durch die Überschüttung wird die solare Einstrahlung auf die Wand- und Deckenbauteile unterbunden. Die (geringen) solaren Wärmeeinträge über opake Wände und Decken fallen weg.

3.3 Wirkung Speichermassen

Entscheidend für die Wirkung der Speichermassen ist das Verhältnis von Oberfläche zu Wärmespeicherkapazität beziehungsweise ihrem Volumen. Je größer dieses Verhältnis ausfällt, umso intensiver ist der Wärmeaustausch zwischen der Speichermasse und der umgebenden Luft. So kann auch bei sehr hoher Speichermasse im Rohsektlager (in den Sektkäfigen) ein rascher Temperaturengleich zwischen Raumluft und Lagergut erfolgen – Voraussetzung dafür sind jedoch hohe Wärmeeinträge in die Zone im Vergleich zur absoluten Wärmespeicherkapazität des Lagerguts. Während Oberfläche und Volumen geometrische Kenngrößen sind, die üblicherweise durch die Speicherbehältnisse (Flaschen, Tanks, Warenpaletten) definiert sind, kommt dem Wärmedurchgangskoeffizienten in diesem Zusammenhang besondere Bedeutung zu: Der Wärmeaustausch verhält sich direkt proportional zum U-Wert und beeinflusst dementsprechend stark auch die Wechselwirkung zwischen Speichermasse und Raumluft. Nachdem es sich bei den Wandbauteilen häufig um ungedämmte Konstruktionen mit geringer Wandstärke und damit geringem Wärmedurchgangswiderstand handelt, wird der U-Wert in erheblichem Maße vom äußeren (zur Raumluft) und inneren (zum Lagergut) Wärmeübergangswiderstand bestimmt. Während sich der äußere Wärmeübergangswiderstand zumeist ähnlich verhält wie jener von Raumluft auf ein Bauteil, wird der innere Wärmeübergangswiderstand als Übergang vom Bauteil auf das (flüssige) Lagergut maßgeblich von der Strömung darin definiert. Ist die Strömung im Medium größer, so ist auch der Übergangswiderstand größer, eine geringere Strömung hingegen bewirkt besseren Wärmeübergang und damit in weiterer Folge einen schlechteren U-Wert.

4 Diskussion

Der Einsatz passiver Erdreichkühlung für die Konditionierung von Lager- und Produktionsbereichen stellt eine sinnvolle Ergänzung zu sonstigen passiven Kühlmaßnahmen in diesem Zusammenhang dar. Der vorgestellte Ansatz, im Rohsektlager und in der Weinhalle einer modernen Schaumweinproduktion durch eine ungedämmte Bodenplatte und weitgehend ungedämmte erdberührte Wände auf aktive Heizung und Kühlung vollständig verzichten zu können, konnte durch die Untersuchung bestätigt werden. Durch das Zusammenwirken der Speicherwirkung des Lagerguts und des angrenzenden Erdreichs können die aus den Produktionsprozessen eingebrachten Wärmeeinträge ausgeglichen und die Vorgaben an die Lagerbedingungen ausreichend erfüllt werden.

Bei der vorliegenden Untersuchung handelt es sich um eine Einzelfallstudie. Dementsprechend sind die dar-

aus abgeleiteten Ergebnisse in erster Linie auf die vorherrschenden Randbedingungen zu Nutzung, Klimadaten, Bodenverhältnisse und Gebäudegeometrie beschränkt. Allerdings konnten aus einer nachfolgend vorgenommenen Untersuchung mit einer ähnlichen Aufgabenstellung, jedoch mit anderer Geometrie und an einem anderen Standort in Österreich, die erzielten Ergebnisse dem Grunde nach bestätigt werden. Dementsprechend sollten einzelne Grundaussagen auch auf andere Projekte umgelegt werden können. Dabei ist es jedoch jedenfalls notwendig, verschiedene Randbedingungen einzuhalten:

- Die Beschränkung auf passive Kühlung ist nur dann möglich, wenn die geforderten Raumsolltemperaturen eine Schwankungsbreite von in etwa 8 bis 14 °C zulassen. Werden die Grenzen enger gesetzt, ist zu berücksichtigen, dass die eingebrachten Wärmeeinträge begrenzt werden müssen.
- Es sind hohe Anforderungen an die thermische Qualität der Gebäudehülle zu stellen. Ohne ausreichende Wärmedämmung der Außenwände und des Flachdachs können die Wärmeeinträge während der Sommermonate nicht soweit reduziert werden, dass bei den niedrigen Solltemperaturen der Kühleffekt des Erdreichs ausreichende Wirkung entfaltet.
- Das Niveau der Bodenplatte muss mindestens drei Meter unterhalb des angrenzenden Erdreichs liegen. Andernfalls ist die Wirkung der passiven Erdreichkühlung nicht ausreichend, um zufriedenstellende Ergebnisse zu erzielen. Erdberührte Wände sind dementsprechend bis zu einer Tiefe von zwei Meter mit einer Dämmung zu versehen, da andernfalls in diesem Bereich zeitweise ungünstige Wärmeeinträge erfolgen würden.
- Die Wirksamkeit großer Wärmespeicherkapazitäten von Lagergütern ist maßgeblich von einerseits deren Oberflächen-Volumen-Verhältnis und andererseits dem Wärmedurchgangswiderstand der Hüllelemente abhängig. Je größer die Oberfläche in Bezug auf die Wärmespeicherkapazität ist, umso rascher wird die Speicher-masse erwärmt beziehungsweise abgekühlt. Dementsprechend unterscheidet sich auch der Zeitraum, über den der Wärmespeicher aktiv wird: Während großvolumige Speicher (Produktionstanks) sich über einen Zeitraum von mehreren Wochen an die Raumtemperaturen angleichen, nehmen einzelne Flaschen (auch bei einer großen Anzahl) Temperaturänderungen binnen weniger Stunden auf.

Insbesondere der hohe Einfluss des Wärmedurchgangswiderstands der Hüllelemente von Lagergütern auf deren Wirksamkeit als Wärmespeicher führt dazu, dass dieser genau betrachtet werden muss. Nachdem es sich meist um Materialien mit geringem Wärmedurchlasswiderstand handelt, kommt den Wärmeübergangswiderständen – und dabei vor allem jenem zum Speichermedium hin – hoher Stellenwert für die gesamte Wirksamkeit zu. Dabei beeinflussen auch die Strömungsverhältnisse im Lagergut den Wärmeübergang und damit die gesamte Wirksamkeit. Dieser Aspekt der Untersuchung wurde in der vorliegenden Studie nur am Rande betrachtet.

Der Einsatzbereich passiver Erdreichkühlung als alleinige Kühlmaßnahme ist auf reine Lagerbereiche ohne nennenswerte Wärmeeinträge und auf Produktionsbereiche

mit nur minimalen Wärmeeinträgen von unter 2 bis 3 W/m² im Jahresdurchschnitt beschränkt, wenn die maximalen Temperaturen 12 °C nicht überschreiten dürfen. Als ergänzende passive Kühlmaßnahme – beispielsweise auch zur Reduktion des aktiven Kühlerfordernisses – ist sie jedoch jedenfalls sinnvoll, wenn dadurch keinen Komfort- oder Hygieneanforderungen widersprochen wird.

Literatur

- [1] *Liger-Belair, G.*: Wines: Champagne and Sparkling Wines – Production and Effervescence. Encyclopedia of Food and Health, 2016, S. 526–533.
- [2] *Tinti, F.; Barbaresi, A.; Benni, S.; Torreggiani, D.; Bruno, R.; Tassinari, P.*: Experimental analysis of thermal interaction between wine cellar and underground. Energy and Buildings, 104 (2015), S. 275–286.
- [3] *ÖNORM B 8110-5:2011*: Wärmeschutz im Hochbau – Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile.
- [4] *Klein, S. A.*: TRNSYS-A transient system simulation program. University of Wisconsin-Madison, 1988, Engineering Experiment Station Report, 38-12.
- [5] *ÖNORM EN ISO 13370:2018*: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Wärmeübertragung über das Erdreich – Berechnungsverfahren (ISO 13370:2017).
- [6] *Medved, S.; Černe, B.*: A simplified method for calculating heat losses to the ground according to the EN ISO 13370 standard. Energy and buildings, 34 (2002), 5, S. 523–528.
- [7] *Ackermann, T.*: Neue Berechnungsmöglichkeiten und Anforderungen an Wärmeverluste über das Erdreich nach DIN EN ISO 13370 am Beispiel von Bodenplatten auf Erdreich. Bauphysik, 23 (2001), 3, S. 152–155.
- [8] *Mazarron, F. R.; Canas, I.*: Exponential sinusoidal model for predicting temperature inside underground wine cellars from a Spanish region. Energy and Buildings, 40 (2008), 10, S. 1931–1940.
- [9] *McDowell, T. P.; Thornton, J. W.; Duffy, M. J.*: Comparison of a ground-coupling reference standard model to simplified approaches. In: Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland, 2009.
- [10] *Götzl, G.; Ostermann, V.; Kalasek, R.; Heimrath, R.; Steckler, P.; Zottl, A.; Reitner, H.*: GEO-Pot: Seichtes Geothermie Potenzial Österreichs. Überregionale, interdisziplinäre Potenzialstudie zur Erhebung und Darstellung des oberflächennahen geothermischen Anwendungspotenzials auf Grundlage eines regelmäßigen Bearbeitungsrasters. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 62 (2010), 5–6, S. 120–129.
- [11] *Thornton, J.W.; Bradley, D.E.; McDowell, T.P.; Blair, N.J.; Duffy, M.J.; LaHam, N.D.; Naik, A.V.*: TESSlibs 17 vol. 8: Loads and Structures Component Library. Mathematical Reference. Wisconsin, 2012.
- [12] *Frick, R.*: Die Wärmeleitfähigkeit von Karton und Pappe. Papier und Druck 15/5 (1966), S. 76–78.

Autoren dieses Beitrages:

FH-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Markus Gratzl, markus.gratzl@gratzl.co.at
Ingenieurbüro Gratzl e.U.
Reischau 5
A-4715 Taufkirchen/Tr.

Arch. Dipl.-Ing. Johannes Zieser, johannes.zieser@zieserarchitekt.com
Architekt Zieser Ziviltechniker GmbH
Marc Aurel-Straße 3
A-1010 Wien

Dipl.-Ing. Philipp Retter, MSc, p.retter@ib-retter.at
Retter & Partner Ziviltechniker GesmbH.
Kremstalstraße 49
A-3500 Krems/D.