

Dr hab. inż. Tomasz Kisilewicz
ul. Waleczna 7
31-348 Kraków

Analiza cieplno-wilgotnościowa oraz propozycja modyfikacji przegród tunelu TA2 w budynku Laboratorium Aerodynamiki Środowiskowej PK

1. Podstawy formalne obliczeń:

- 1.1. Zlecenie firmy POLBAU z dnia ...
- 1.2. Informacje techniczne przekazane w korespondencji mailowej przez biuro APA Architektura Sp. z o.o. Czech, Duliński, Wróbel, w tym projektowane uwarstwienie obudowy tunelu.
- 1.3. Projekt budowlany zamienny LAŚ sporządzony przez GPVT Pracownia Architektoniczna S.C.
- 1.4. PN-EN ISO 6946 : 2017-10 Komponenty budowlane i elementy budynku – Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła – Metoda obliczania.
- 1.5. PN-EN 12524 : 2002 Materiały i wyroby budowlane – Właściwości cieplno-wilgotnościowe - Tabelaryczne wartości obliczeniowe.
- 1.6. PN-EN ISO 13788 : 2013-05 Ciepłno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku – temperatura powierzchni wewnętrznej konieczna dla uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacja międzywarstwowa – Metody obliczania.
- 1.7. Rozporządzenie rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, wraz z późniejszymi zmianami, tekst jednolity z 7 czerwca 2019 roku.

2. Przedmiot i cel opracowania oraz przyjęte założenia

Przedmiotem opracowania są przegrody tunelu TA2, w projektowanym budynku Laboratorium Aerodynamiki Środowiskowej Politechniki Krakowskiej. Celem niniejszego opracowania jest ocena poprawności pod kątem cieplno-wilgotnościowym projektowanych rozwiązań przegród oraz sugestie ewentualnej korekty ich uwarstwienia. Ze względu na przeznaczenie tej części budynku i planowane tam badania, wiążące się ze znacznymi

zmianami oraz wilgotności we wnętrzu tunelu, jego obudowa będzie poddana nietypowym oddziaływaniom. Silne schłodzenie wnętrza w stosunku do otoczenia powoduje odwrócenie gradientu temperatury i kierunku dyfuzji pary wodnej, a także może powodować występowanie kondensacji we wnętrzu przegrody i w efekcie wzrost zawilgocenia materiałów. Celem analiz jest więc ocena projektowanych rozwiązań, wskazanie sposobu ich ewentualnej modyfikacji lub innych rozwiązań poprawnych, a także warunków eksploatacji tunelu, umożliwiających utrzymanie właściwego stanu wilgotnościowego przegród obiektu.

Przyjęte założenia dotyczą warunków środowiska wewnętrznego. Na podstawie informacji przekazanych przez biuro APA Architektura [1.2], tab. 1, przyjęto, że najniekorzystniejsze warunki termiczne (-10°C) we wnętrzu tunelu wystąpią podczas badań symulacyjnych oblodzenia. W podanych warunkach nie sprecyzowano wilgotności względnej powietrza w tunelu, do obliczeń przyjęto więc bardzo wysoką, ale realną średnią wilgotność względną powietrza 90%, jaka może towarzyszyć tym badaniom. Natomiast warunki stosowane w innych rodzajach badań, np. wzrost temperatury w tunelu powyżej zwykłych warunków eksploatacji i bez zwiększenia wilgotności powietrza, nie pociągają za sobą wilgotnościowych zagrożeń dla trwałości przegrody.

Tabela 1. Przewidywane warunki eksploatacyjne w tunelu TA2, [1.2]

Typ badania	Prędkość średnia strumienia powietrza V_{sr}	czas realizacji cyklu badań	Strumień	Zakres temp. (wartość stała z przedziału)
- badania symulacji opadu deszczu	0-18m/s	ok. 5 dni po 2h	zmienny	od $+5^{\circ}\text{C}$ do $+25^{\circ}\text{C}$ (sporadycznie $+40^{\circ}\text{C}$)
- badania symulacji oblodzenia	0-7m/s	ok. 7-10 dni po 24h	stały	od -10°C do -1°C
- badania symulacji opadu śniegu (styropian)	0,7-5m/s	ok. 7 dni po 2h	stały	$+20^{\circ}\text{C}$
- badania przewietrzania miast	0-5m/s	ok. 5 dni po 4h	zmienny	$+20^{\circ}\text{C}$ (sporadycznie od -5°C do $+35^{\circ}\text{C}$)
- badania eksperymentalne (np. elewacje, symulacje piaskowe, etc.)	1-18m/s	ok. 5 dni po 4h	zmienny	od $+5^{\circ}\text{C}$ do $+40^{\circ}\text{C}$

*Badania z symulacją opadu nie występują jednocześnie z maksymalnymi prędkościami (!) Prędkości maksymalne są osiągnane „chwilowo” (max 15min.)

Do początkowych obliczeń symulacyjnych przyjęto dwa obliczeniowe okresy klimatyczne, charakteryzujące się skrajnymi warunkami w skali całego roku: pierwsze 10 dni lutego oraz pierwsze 10 dni lipca.

Obliczenia ciepłno-wilgotnościowe dla typowych warunków we wnętrzach budynków można wykonać, zgodnie z normą europejską [1.6]. Wg uproszczonego, stacjonarnego algorytmu tej normy obliczenia są wykonywane z krokiem miesięcznym. Dla tego okresu przyjmowane są średnie warunki klimatyczne obydwu środowisk i na tej podstawie obliczany jest niezmienny w czasie transport ciepła i wilgoci. W analizowanym, bardzo masywnym obiekcie, warunki powstające podczas badań mają silnie niestacjonarny charakter, wymagają więc zastosowania dynamicznej procedury obliczeniowej. Narzędziem użytym do oceny przegród w tych warunkach jest program symulacyjny WUFI 5 Pro, służący do obliczania jednowymiarowego, niestacjonarnego transportu ciepła i masy w przegrodach budowlanych. W programie wykorzystano do obliczeń kompletne dane klimatyczne roku referencyjnego dla Krakowa. Program uwzględnia w obliczeniach także opady deszczu skojarzonego z działaniem wiatru, co w istotny sposób wpływa na zmiany wilgotności zewnętrznej warstwy przegrody. Warunki wewnętrzne są kształtowane zgodnie z EN 15026, w zimie $+20^{\circ}\text{C}$, w lecie zmienne w przedziale $20\text{-}25^{\circ}\text{C}$. Wilgotność względna powietrza we wnętrzu zmienia się w zakresie 30-60% w skali roku, stosownie do warunków zewnętrznych.

Zgodnie z założeniami użytkowymi przyjęto, że podczas prowadzenia badań w tunelu obniżana jest temperatura powietrza wewnętrznego do poziomu -10°C , a wilgotność względna powietrza wzrasta do wartości 90%. Takie warunki są utrzymywane na jednakowym poziomie przez 10 dni, po czym warunki we wnętrzu ponownie wracają do stanu wyjściowego, a przegrody tunelu powoli reagują na zmiany temperatury i wilgotności.

Wilgotnościowe warunki początkowe materiałów przegród przyjęto na podstawie bazy danych zawartych w programie, a następnie wykonano dla każdej analizowanej przegrody 3-letnie obliczenia symulacyjne. Dopiero otrzymany z tych obliczeń rozkład wilgoci w przegrodach w odpowiednim dniu roku przyjęto jako warunki początkowe do dalszych symulacji. W ten sposób unika się wpływu założeń na wynik powolnego procesu dyfuzji pary wodnej. Właściwości ciepłno-wilgotnościowe materiałów przyjęto z bazy danych Fraunhofer-IBP Holzkirchen oraz Lund University, załączonych do programu WUFI Pro. W bazach zawarte są informacje potrzebne do symulowania wszystkich złożonych zjawisk wilgotnościowych zgodnie z modelem obliczeniowym. W przypadku materiałów oferowanych na rynku budowlanym tak obszerne i szczegółowe informacje nigdy nie są dostępne. Stąd więc konieczne jest korzystanie ze specjalistycznych baz danych.

Przedmiotem analiz są przegrody wskazane w korespondencji mailowej przez projektantów biura APA Architektura: ściany zewnętrzne, ściany wewnętrzne oddzielające tunel od pozostałej części budynku, stropodach nad budynkiem oraz stropy między tunelem a pomieszczeniami o innej funkcji użytkowej. Przegrody stykające się z gruntem nie są poddane tak znacznym wahaniom warunków cieplnych i wilgotnościowych jak pozostałe. Dodatkowo, projektowana warstwa izolacji termicznej w postaci styropianu ekstrudowanego, izolacja kubełkowa i pozioma izolacja w przypadku podłogi charakteryzują się bardzo wysokim oporem dyfuzyjnym, co ogranicza praktycznie do zera transport pary do lub z otoczenia. Z tych względów nie jest konieczne odrębne analizowanie wpływu okresowego obniżenia temperatury na te przegrody.

3. Ściany zewnętrzne

3.1 Ściana zewnętrzna nr 1

Opis warstw w kolejności od zewnątrz do wnętrza. Ściana zewnętrzna nr 1 (24 cm żelbetu):

- silikonowy tynk zewnętrzny: $d = 0,5 \text{ cm}$, $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,7 \text{ W/mK}$, $\mu = 215$
- wełna mineralna: $d = 20 \text{ cm}$, $\rho = 60 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$, $\mu = 1,3$
- żelbet: $d = 24 \text{ cm}$, $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 1,7 \text{ W/mK}$, $\mu = 130$
- tynk wewnętrzny c-w: $d = 2 \text{ cm}$, $\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,8 \text{ W/mK}$, $\mu = 19$

Tab.2 Początkowa zawartość wilgoci (1 lipca) i roczne wahania wilgotności w ścianie zewnętrznej nr 1 bez okresu chłodzenia

Warstwa przegrody	Wilgotność początkowa	Względna masowa wilgotność początkowa	Roczne wahania wilgotności
	kg/m ³	%	kg/m ³
tynk silikonowy	14.10	0.78	3.15-75.78
wełna mineralna	0.56	0.93	0.27-1.06
żelbet	38.40	1.53	37.37-39.12
tynk wewnętrzny	32.59	1.72	20.56-34.69
Całkowita zawartość wilgoci w ścianie [kg/m ²]	10.05	-	9.97-10.46

W tabeli 2 zawarto wyniki wstępnej 3-letniej symulacji warunków wilgotnościowych w analizowanej ścianie np. przy użytkowaniu biurowym, czyli bez zmian związanych z badaniami w tunelu. Zmiany wilgotności poszczególnych materiałów są związane z

naturalnym, rocznym rytmem zmian klimatycznych w otoczeniu budynku. Te warunki i uzyskane na ich podstawie wyniki obliczeń są traktowane dalej jako punkt odniesienia służący do porównań. Jeśli bowiem zmiany wilgotności materiałów, wywołane szczególnymi warunkami badań w tunelu, nie będą wykraczały poza zakres typowych zmian wilgotności spowodowanych wahaniami temperatury i wilgotności w otoczeniu budynków, to łatwo potwierdzić, że nie będą one stanowiło także zagrożenia dla trwałości projektowanych przegród.

W tabeli 3 zestawiono wyniki symulacji po 10-dniowym (od 1.VII-11.VII) okresie niskiej temperatury i wysokiej wilgotności względnej powietrza w tunelu.

Tab. 3 Wilgotność materiałów po 10-dniowym okresie chłodzenia tunelu w lipcu

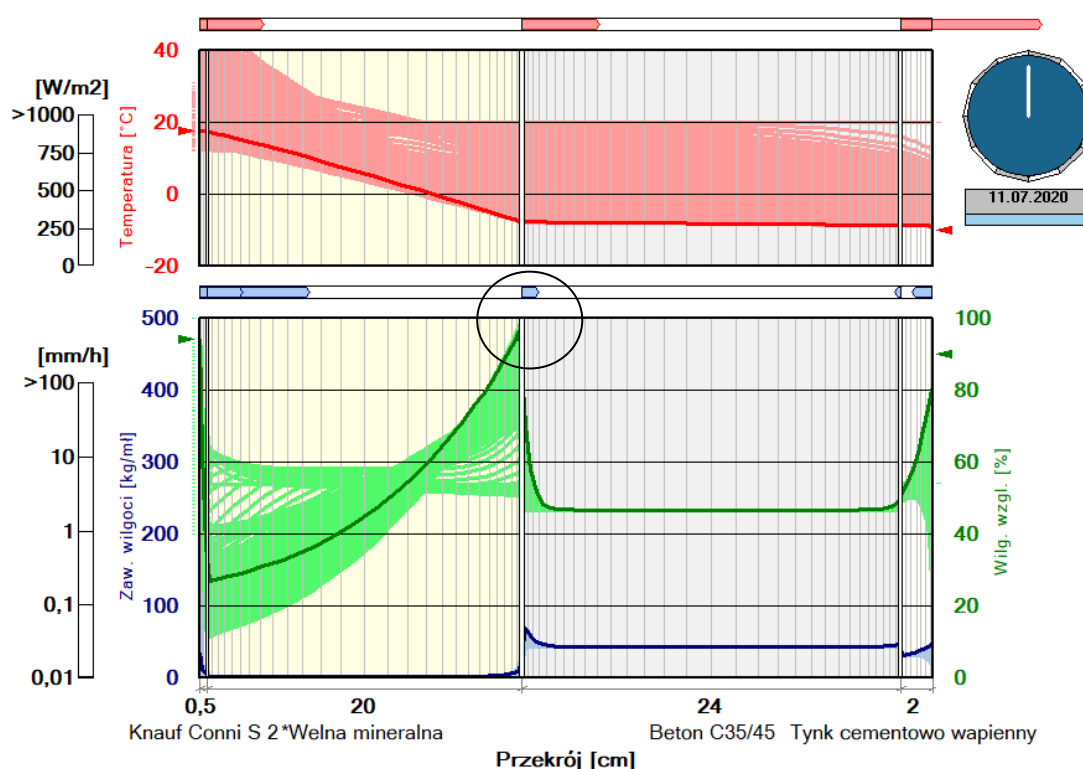
Warstwa przegrody	Wilgotność po chłodzeniu	Względna masowa wilgotność po chłodzeniu
	kg/m ³	%
tynk silikonowy	13.41	0.75
wełna mineralna	1.35	2.25
żelbet	38.83	1.55
tynk wewnętrzny	36.86	1.94
Całkowita zawartość wilgoci w ścianie [kg/m ²]	10.39	-

Schłodzenie wnętrza tunelu połączone z wysoką wilgotnością spowodowało zmiany wilgotności materiałów przegrody. Wilgotność wełny mineralnej wykracza poza zakres zwykłych wahań pokazany w tabeli 2, ale krótkotrwały i ograniczony do 2.25% wzrost wilgotności nie powinien stanowić zagrożenia dla trwałości tego materiału. Należy jednak, specyfikując w projekcie rodzaj materiału, dobrać odmianę odporną na okresowy wzrost wilgotności w tym zakresie.

Zmiany wilgotności pozostałych materiałów mieszczą się w zakresie rocznych wahań wilgotności, podanych w tabeli 2. Tej wielkości wahania wilgotności warstw ściany pojawiają się w każdym budynku ze ścianami o takiej konstrukcji. Masowa wilgotność żelbetu i tynku wewnętrznego podana w tabeli 3 mieści się w zakresie bezpiecznej wilgotności sorpcyjnej w przeciętnych warunkach.

Inny aspekt przebiegu zjawisk wilgotnościowych w tej ścianie to możliwa kondensacja kapilarna pary wodnej w obszarze styku wełny mineralnej i żelbetu (miejsce oznaczone kółkiem na rys. 1). Takie zjawisko zachodzi zwykle w bardzo drobnych porach materiałów budowlanych przy wilgotności powietrza w porach powyżej 80% i poniżej 100%.

W wyniku tego zjawiska obserwuje się lokalny wzrost wilgotności wełny i żelbetu. Jest to jednak zjawisko krótkotrwałe, które nie jest groźne dla żelbetu i nie powinno być groźne dla skutecznie hydrofobizowanej wełny mineralnej. Podobny efekt może też wystąpić na wewnętrznej powierzchni tynku wewnętrznego. Jednak w planowanych warunkach badań, w których wilgotność względna we wnętrzu osiąga poziom 90 %, a może nawet okresowo rosnąć do 100%, kondensacja pary wodnej w tynku, zwykła i kapilarna, jest oczywista i musi być brana pod uwagę przy doborze materiału. W tych trudnych warunkach wskazane jest zastosowanie jako tynku lub okładziny wewnętrznej mrozoodpornego i zmywalnego materiału o bardzo niskiej ogólnej porowatości i małej zawartości drobnych porów.



Rys. 1 Zakres zmian temperatury i wilgotności względnej powietrza w ścianie w trakcie 10-dniowego okresu schłodzenia tunelu.

Kolejną serię obliczeń wykonano dla warunków zimowych, od 1 do 11 lutego. Wyniki obliczeń symulacyjnych zestawiono w tabeli 4. Zmiana całkowitej zawartości wilgoci w przegrodzie po okresie chłodzenia jest niewielka, wyraźnie mniejsza niż w okresie letnim. Zmiany wilgotności materiałów również mieszczą się całkowicie w przedziale naturalnych wahań, które występują w takiej przegrodzie w cyklu rocznym, tabela 2. Wyraźniejsza zmiana

wilgotności w tym okresie dotyczy tylko warstwy tynku wewnętrznego, ale i tak pozostaje ona w zakresie przeciętnej wilgotności sorpcyjnej tego materiału.

Tab. 4 Wilgotność materiałów przed i po 10-dniowym okresie chłodzenia tunelu w lutym

Warstwa przegrody	Wilgotność początkowa	Wilgotność po chłodzeniu	Względna masowa wilgotność po chłodzeniu
	kg/m ³	kg/m ³	%
tynk silikonowy	18.05	15.00	0.83
wełna mineralna	0.88	0.91	1.52
żelbet	37.75	37.85	1.51
tynk wewnętrzny	23.50	35.36	1.86
Całkowita zawartość wilgoci w ścianie [kg/m ²]	9.80	10.05	-

Należy więc stwierdzić, że chłodzenie tunelu w warunkach zimowych nie stwarza większego zagrożenia dla trwałości przegrody niż trudniejsze pod tym względem warunki letnie.

Przeprowadzono także obliczenia symulacyjne zachowania się przegród po okresie chłodzenia, w czasie powrotu do normalnych warunków temperatury i wilgotności. Jak pokazano wcześniej, zmiany wilgotności wynikające z krótkiego pojedynczego cyklu badawczego są niewielkie, ale w bardzo masywnej warstwie żelbetowej lekko podwyższona wilgotność jest jeszcze widoczny po relatywnie długim okresie czasu, nawet przez 2 miesiące. O ile więc pojedynczy okres obniżonej temperatury nie stanowi żadnego zagrożenia dla warstwy konstrukcyjnej, to powtarzanie takich badań częściej niż co 3 miesiące może prowadzić do kumulowania się niewielkich pojedynczych wzrostów i w efekcie do trwałych zmian wilgotności.

Odrębny aspekt natury cieplnej jest związany z chłodzeniem pojemności cieplnej obudowy tunelu. Zmiana temperatury we wnętrzu o 30 K wiąże się z powolnym chłodzeniem całej pojemności bardzo masywnej warstwy konstrukcyjnej, pozostającej w dobrym kontakcie termicznym z wnętrzem. Pełne schłodzenie 1 m² żelbetowej warstwy konstrukcyjnej ściany o grubości 24 cm wymaga odebrania 3.77 kWh. W przypadku warstwy o grubości 35 cm jest to 5.50 kWh. Przy ponownym podgrzaniu ta ilość energii musi być zwrócona. Zmiana temperatury tak masywnej obudowy wymaga zastosowania urządzeń o zwiększonej mocy, a proces stabilizowania warunków w ścianie trwa długo (2-3 dni). Wyeliminowanie tych efektów jest możliwe poprzez termiczne odseparowanie wnętrza od warstwy konstrukcyjnej przy użyciu dodatkowej warstwy wewnętrznej izolacji termicznej w paroszczelnej osłonie.

3.2 Ściana zewnętrzna nr 2

Ściana zewnętrzna nr 2 (35 cm żelbetu):

- silikonowy tynk zewnętrzny: $d = 0,5 \text{ cm}$, $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,7 \text{ W/mK}$, $\mu = 215$
- wełna mineralna: $d = 20 \text{ cm}$, $\rho = 60 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$, $\mu = 1,3$
- żelbet: $d = 35 \text{ cm}$, $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 1,7 \text{ W/mK}$, $\mu = 130$
- tynk wewnętrzny c-w: $d = 2 \text{ cm}$, $\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,8 \text{ W/mK}$, $\mu = 19$

W tabeli 5, tak jak poprzednio, pokazano wyniki 3-letniej symulacji warunków wilgotnościowych w nowym wariancie ściany, związanych z naturalnym rytmem zmian klimatycznych w otoczeniu, bez dodatkowego chłodzenia lub podgrzewania. Wynikowe wilgotności poszczególnych materiałów są podobne jak w przypadku ściany z warstwą konstrukcyjną 24 cm. Całkowita zawartość wilgoci, odnoszona do powierzchni przegrody, ma jednak zdecydowanie inną wartość w związku ze znacznie większą grubością masywnej warstwy.

Tab. 5 Początkowa zawartość wilgoci (1 lipca) i roczne wahania wilgotności w ścianie zewnętrznej nr 2 bez okresu chłodzenia

Warstwa przegrody	Wilgotność początkowa	Względna masowa wilgotność początkowa	Roczne wahania wilgotności
	kg/m ³	%	kg/m ³
tynk silikonowy	14.14	0.74	3.13-75.69
wełna mineralna	0.56	0.93	0.28-1.05
żelbet	38.32	1.53	37.59-38.80
tynk wewnętrzny	32.53	1.71	20.53-34.84
Całkowita zawartość wilgoci w ścianie [kg/m ²]	14.25	-	13.77-14.62

W tabeli 6 zestawiono wyniki symulacji 10-dniowego okresu niskiej temperatury i wysokiej wilgotności względnej powietrza. Ponownie należy zauważyć istotniejszy wzrost wilgotności wełny mineralnej i tylko symboliczne zmiany wilgotności pozostałych warstw.

Tab. 6 Wilgotność materiałów po 10-dniowym okresie chłodzenia tunelu w lipcu

Warstwa przegrody	Wilgotność po chłodzeniu	Względna masowa wilgotność po chłodzeniu
	kg/m ³	%
tynk silikonowy	13.42	0.75
wełna mineralna	1.30	2.17
żelbet	38.60	1.54
tynk wewnętrzny	35.94	1.89
Całkowita zawartość wilgoci w ścianie [kg/m ²]	14.55	-

Wszystkie poprzednie uwagi dotyczące funkcjonowania tej ściany oraz doboru materiałów dotyczą w tym stopniu ściany z warstwą konstrukcyjną o grubości 35 cm.

Znacznie powiększona pojemność cieplna i wilgotnościowa warstwy żelbetowej sprawia jednak, że wszystkie zmiany warunków w czasie odbywają się w tej przegrodzie jeszcze wolniej. M.in. dopiero po 6 dniach od momentu obniżenia temperatury w tunelu warstwa konstrukcyjna schładza się na całej grubości.

3.3 Ściana wewnętrzna nr 1, żelbet 24 cm

Ściana wewnętrzna nr 1, warstwy opisane w kolejności od strony tunelu do wnętrza budynku:

- płyty gipsowo-kartonowe: $d = 1,25$ cm, $\rho = 850$ kg/m³, $\lambda = 0,2$ W/mK, $\mu = 8,3$
- wełna mineralna: $d = 20$ cm, $\rho = 60$ kg/m³, $\lambda = 0,04$ W/mK, $\mu = 1,3$
- żelbet: $d = 24$ cm, $\rho = 2220$ kg/m³, $\lambda = 1,6$ W/mK, $\mu = 248$
- tynk wewnętrzny c-w: $d = 2$ cm, $\rho = 1900$ kg/m³, $\lambda = 0,8$ W/mK, $\mu = 19$

W tabeli 7 znajdują się wyniki 3-letniej symulacji warunków wilgotnościowych w ścianie wewnętrznej pomiędzy dwoma środowiskami o identycznych warunkach wewnętrznych, tak jak w przypadku zwykłej ściany wewnętrznej.

Tab. 7 Początkowa zawartość wilgoci (1 lipca) i roczne wahania wilgotności w ścianie wewnętrznej nr 1 bez okresu chłodzenia

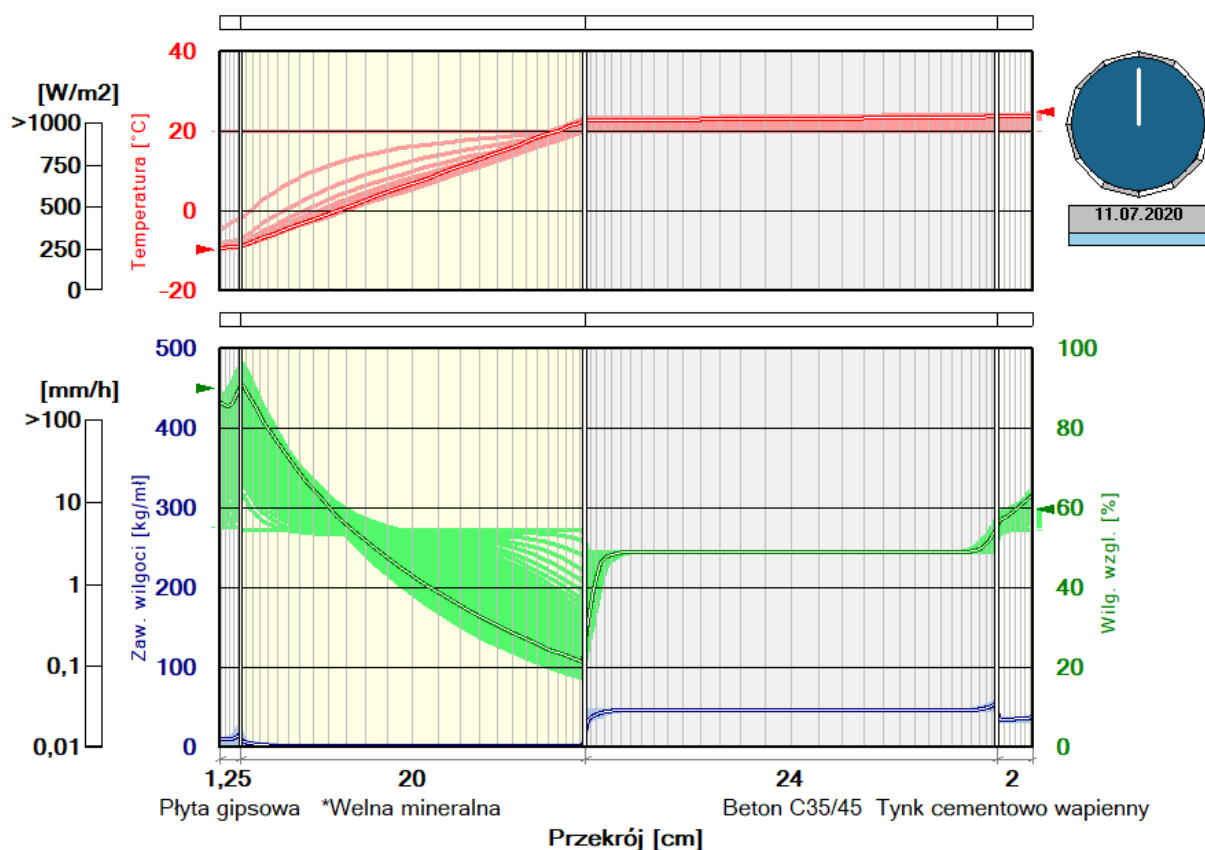
Warstwa przegrody	Wilgotność początkowa	Względna masowa wilgotność początkowa	Roczne wahania wilgotności
	kg/m ³	%	kg/m ³
płyty g-k	4.14	0.48	2.19-14.00
wełna mineralna	0.57	0.95	0.22-0.69
żelbet	40.00	1.60	38.00-40.46
tynk wewnętrzny	32.47	1.71	19.89-34.69
Całkowita zawartość wilgoci w ścianie [kg/m ²]	10.42	-	9.61-10.60

W tabeli 8 zestawiono wartości wilgotności materiałów izolowanej ściany wewnętrznej po symulacji 10-dniowego okresu niskiej temperatury i wysokiej wilgotności względnej powietrza w tunelu. Wzrost wilgotności całej przegrody po tym okresie wynika głównie ze wzrostu wilgotności płyty gipsowo-kartonowej i tynku wewnętrznego. Zmiany obserwowane w wyniku chłodzenia tunelu wykraczają tu w niewielkim stopniu poza zakres naturalnych rocznych wahań wilgotności tych materiałów w ścianie wewnętrznej.

Tab. 8 Wilgotność materiałów po 10-dniowym okresie chłodzenia tunelu w lipcu, ściana wewnętrzna nr 1

Warstwa przegrody	Wilgotność po chłodzeniu	Względna masowa wilgotność po chłodzeniu
	kg/m ³	%
płyty g-k	14.28	1.68
wełna mineralna	0.71	1.18
żelbet	40.01	1.60
tynk wewnętrzny	35.88	1.89
Całkowita zawartość wilgoci w ścianie [kg/m ²]	11.94	-

W przypadku gipsu wzrost wykracza nieco poza zakres sorpcyjny dla zwykłej odmiany tego materiału, w przypadku pozostałych materiałów zmiany nie mają istotnego znaczenia praktycznego.



Rys. 2 Zakres zmian temperatury i wilgotności względnej powietrza w ścianie wewnętrznej w trakcie 10-dniowego okresu chłodzenia tunelu.

Na rys. 2 pokazano historię zmian temperatury i wilgotności względnej powietrza w analizowanej ścianie wewnętrznej w trakcie 10 dni chłodzenia tunelu. Różnica oporu dyfuzyjnego wełny mineralnej i płyt gipsowych sprawia, że na styku płyt i wełny powstają odpowiednie warunki do kondensacji kapilarnej. Ten niekorzystny efekt można wyeliminować poprzez np. zmianę izolacji termicznej na materiał o znacznie niższej przepuszczalności pary wodnej lub wentylowanie okładziny. Płyty gipsowe wodoodporne mają podwyższoną odporność na działanie wody, jednak podwyższona zawartość wilgoci w wyniku kondensacji oraz możliwość bezpośredniego zalewania okładzin ściennych podczas badań stwarzają trudne warunki do stosowania tego materiału. Dobór płyt powinien być oparty na szczegółowej specyfikacji technicznej producenta, dotyczącej maksymalnej wilgotności masowej dopuszczanej dla materiału, jego odporności na zalewanie i co w tym przypadku bardzo istotne ich mrozoodporności.

3.4 Ściana wewnętrzna nr 2, żelbet 35 cm

Ściana wewnętrzna nr 2, warstwy opisane w kolejności od strony tunelu do wnętrza budynku:

- płyty gipsowo-kartonowe: $d = 1,25 \text{ cm}$, $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,2 \text{ W/mK}$, $\mu = 8,3$
- wełna mineralna: $d = 20 \text{ cm}$, $\rho = 60 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$, $\mu = 1,3$
- żelbet: $d = 35 \text{ cm}$, $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 1,7 \text{ W/mK}$, $\mu = 130$
- tynk wewnętrzny c-w: $d = 2 \text{ cm}$, $\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,8 \text{ W/mK}$, $\mu = 19$

Tab. 9 Początkowa zawartość wilgoci (1 lipca) i roczne wahania wilgotności w ścianie wewnętrznej nr 2 bez okresu chłodzenia

Warstwa przegrody	Wilgotność początkowa	Względna masowa wilgotność początkowa	Roczne wahania wilgotności
	kg/m ³	%	kg/m ³
płyty g-k	4.15	0.49	2.19-14.00
wełna mineralna	0.56	0.93	0.22-0.69
żelbet	39.48	1.58	38.00-39.76
tynk wewnętrzny	32.42	1.71	19.88-34.75
Całkowita zawartość wilgoci w ścianie [kg/m ²]	14.63	-	13.79-14.80

Tab. 10 Wilgotność materiałów po 10-dniowym okresie chłodzenia tunelu w lipcu, ściana wewnętrzna nr 2

Warstwa przegrody	Wilgotność po chłodzeniu	Względna masowa wilgotność po chłodzeniu
	kg/m ³	%
płyty g-k	13.50	1.59
wełna mineralna	0.69	1.15
żelbet	39.48	1.58
tynk wewnętrzny	35.88	1.89
Całkowita zawartość wilgoci w ścianie [kg/m ²]	14.78	-

W tabeli 9 podano wyniki 3-letniej symulacji warunków wilgotnościowych w ścianie wewnętrznej nr 2 pomiędzy dwoma środowiskami o identycznych warunkach wewnętrznych, a w tabeli 10 wyniki symulacji 10 dniowego okresu chłodzenia tunelu.

Ściana wewnętrzna z bardzo grubą warstwą konstrukcyjną (35 cm żelbetu) tylko w niewielki sposób reaguje na 10-dniowe zmiany warunków w tunelu. Całkowita wilgotność w przegrodzie zmienia się zaledwie o 1% wartości początkowej i nie przekracza zakresu zmian wilgotności, które powstają w wyniku rocznych zmian warunków we wnętrzu budynków. Tak jak poprzednio, wyraźnej względnej zmianie ulega wilgotność samych płyt gipsowych. Wartość zawilgocenia jest tu jednak nieco niższa niż w przypadku cieńszej ściany, dlatego wskazanie materiału okładziny powinno być oparte na wynikach dla ściany cieńszej.

4. Przegrody poziome

W projektowanym budynku laboratorium zastosowano do przekrycia budynku stropodach pełny z paroizolacją. W przegrodzie tego typu warstwa o największym oporze dyfuzyjnym, czyli ciężkie pokrycie wodochronne, znajduje w zimie się po stronie środowiska o niskiej temperaturze. W związku z tym para wodna dyfundująca przez stropodach z wnętrza budynku na zewnątrz natrafia na szczelną warstwę pokrycia i ulega w tych warunkach okresowej kondensacji. Zastosowanie paroizolacji, której opór dyfuzyjny jest zawsze mniejszy od oporu warstwy pokryciowej nie eliminuje całkowicie tego zjawiska. W konsekwencji, w normalnie użytkowanych budynkach mieszkalnych czy biurowych, w warstwie izolacji termicznej występują bardzo silne wahania wilgotności w trakcie roku i generalnie wyższa średnia roczna wilgotność tego materiału niż w innych przegrodach.

4.1 Stropodach

Stropodach, warstwy opisane w kolejności od strony zewnętrznej do wnętrza budynku:

- 2 x papa termozgrzewalna: $s_d = 300$ m, współczynnik absorpcji promieniowania krótkofalowego 0.6.
- wełna mineralna twarda: $d = 20$ cm, $\rho = 140$ kg/m³, $\lambda = 0,04$ W/mK, $\mu = 1,3$
- wełna mineralna półtwarda: $d = 10$ cm, $\rho = 100$ kg/m³, $\lambda = 0,04$ W/mK, $\mu = 1,3$
- folia paroszczelna PE: $s_d = 100$ m
- żelbet: $d = 30$ cm, $\rho = 2500$ kg/m³, $\lambda = 1,7$ W/mK, $\mu = 130$

Do obliczeń przyjęto, że sufit podwieszany nie stanowi szczelnej bariery dla promieniowania cieplnego, ruchu powietrza i dyfuzji pary wodnej. Takie założenie jest zgodne z praktyką, bo

wykonanie ciągłej, paroszczelnej podwieszanej powłoki jest bardzo trudne. Takie założenie jest również korzystniejsze ze względu na warunki wysokiej wilgotności jakie będą okresowo istnieć w tunelu. Zablokowanie lub ograniczenie dopływu ciepła do przestrzeni nad sufitem podwieszonym, przy jednoczesnym dopływie i wysokim ciśnieniu pary wodnej, może prowadzić do intensywnej kondensacji w tej przestrzeni i następstw w postaci rozwoju pleśni.

Tab. 11 Początkowa zawartość wilgoci (1 lipca) i roczne wahania wilgotności w warstwach stropodachu nr 1 (bez okresu chłodzenia podczas badań w tunelu)

Warstwa przegrody	Wilgotność początkowa	Względna masowa wilgotność początkowa	Roczne wahania wilgotności
	kg/m ³	%	kg/m ³
wełna min. twarda	2.33	1.66	1.39-3.51
wełna min. półtwarda	2.17	2.17	0.14-4.38
żelbet	41.62	1.66	41.18-41.98
Całkowita zawartość wilgoci w stropodachu [kg/m ²]	13.17	-	13.05-13.31

W tabeli 11 podano wyniki 3-letniej symulacji warunków wilgotnościowych w stropodachu nr 1. W cyklu rocznym obserwowane są niewielkie wahania całkowitej wilgotności masywnej przegrody. Natomiast zmiany wilgotności w porowatych materiałach izolacji termicznej są już znaczne, zwłaszcza w przypadku dolnej, półtwardej wełny mineralnej, ułożonej na paroizolacji: od 0.14% w zimie do 4.38% w lecie (przy gęstości wełny równej 100 kg/m³ liczbowe wartości wilgotności bezwzględnej i procentowej są takie same). Najwyższa wilgotność tej warstwy w lecie wynika z odwrócenia strumienia dyfuzji pary wodnej pod wpływem wysokiej temperatury pokrycia dachowego. Zmiany wilgotności wełny znajdującej się bezpośrednio pod pokryciem mają odwrotny rytm: maksimum w zimie, minimum w lecie. Podawane tutaj wyniki są odnoszone do całej grubości warstw, w rzeczywistości zawilgocenie nie jest rozłożone równomiernie w całej warstwie, miejscowa wilgotność może być kilka razy wyższa. Stosowane materiały muszą być na takie zmiany warunków odporne. Realizuje się to m.in. poprzez hydrofobizację izolacji termicznej. Należy podkreślić ponownie, że informacje podane w tabeli 11 nie mają związku ze specjalnymi warunkami jakie mogą się pojawić w tunelu badawczym LAŚ. Podane zakresy wahań wilgotności występują w budynkach normalnie użytkowanych. Dla takich warunków zwykle nie prowadzi się badań czy specjalnych symulacji, rozwiązania są powielane na zasadzie powszechnej praktyki, a projektanci i użytkownicy nie są świadomi zjawisk jakie zachodzą w tych przegrodach.

Tab. 12 Wilgotność materiałów po 10-dniowym okresie chłodzenia tunelu w lipcu, stropodach nr 1

Warstwa przegrody	Wilgotność po chłodzeniu	Masowa wilgotność po chłodzeniu
	kg/m ³	%
wełna min. twarda	0.19	0.14
wełna min. półtwarda	6.48	6.48
żelbet	41.89	1.68
Całkowita zawartość wilgoci w stropodachu [kg/m ²]	13.25	-

W tabeli 12 zestawiono wyniki wilgotnościowe symulacji 10 dniowego okresu chłodzenia tunelu. Znaczne schłodzenie stropu budynku spowodowało przemieszczenie pary wodnej z górnej warstwy izolacji termicznej do dolnej, kondensację pary wodnej w izolacji termicznej ułożonej bezpośrednio na paroizolacji i w efekcie okresowy wzrost jej wilgotności masowej aż do 6.48%. Nie są to warunki korzystne dla trwałości tego materiału i jego izolacyjności termicznej.

4.2 Strop wewnętrzny poziomu 0.0

Strop rozdziela tunel badawczy (poniżej stropu) i pomieszczenia techniczne (powyżej stropu), w których utrzymywane są normalne warunki cieplno-wilgotnościowe, warstwy opisane od dołu, od strony tunelu:

- tynk systemowy na siatce: $d = 1\text{ cm}$, $\rho = 2000\text{ kg/m}^3$, $\lambda = 1,2\text{ W/mK}$, $\mu = 25$
- wełna mineralna twarda: $d = 20\text{ cm}$, $\rho = 140\text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,04\text{ W/mK}$, $\mu = 1,3$
- żelbet: $d = 20\text{ cm}$, $\rho = 2500\text{ kg/m}^3$, $\lambda = 1,7\text{ W/mK}$, $\mu = 130$
- wylewka wyrównawcza: $d = 5\text{ cm}$, $\rho = 1970\text{ kg/m}^3$, $\lambda = 1,6\text{ W/mK}$, $\mu = 69$
- posadzka cienkowarstwowa z żywicy epoksydowych: $d = 0.3\text{ cm}$, $\rho = 1100\text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,7\text{ W/mK}$, $\mu = 10000$,

W tablicy 13 pokazano zakres rocznych wahań wilgotności poszczególnych warstw materiałowych analizowanej przegrody w zwykłym, tzw. powietrzno-suchym trybie użytkowania pomieszczeń po obydwu stronach stropu. W tablicy 14 zmiany wilgotności po 10-dniowym okresie chłodzenia tunelu.

Tab. 13 Początkowa zawartość wilgoci (1 lipca) i roczne wahania wilgotności w warstwach stropu wewnętrznego poziomu 0.0 (bez okresu chłodzenia podczas badań w tunelu)

Warstwa przegrody	Wilgotność początkowa	Masowa wilgotność początkowa	Roczne wahania wilgotności
	kg/m ³	%	kg/m ³
tynek systemowy	12.02	0.60	4.54-14.02
wełna min. twarda	0.57	0.41	0.24-0.65
żelbet	41.19	1.65	40.77-42.19
wylewka wyrównawcza	22.33	1.13	21.38-23.50
posadzka z żywicy	3.07	0.28	1.83-3.98
Całkowita zawartość wilgoci w stropie [kg/m ²]	9.6	-	9.36-9.90

Tab. 14 Wilgotność materiałów po 10-dniowym okresie chłodzenia tunelu w lipcu, strop wewnętrzny, poziom 0.0.

Warstwa przegrody	Wilgotność po chłodzeniu	Masowa wilgotność po chłodzeniu
	kg/m ³	%
tynek systemowy	43.66	2.18
wełna min. twarda	0.51	0.36
żelbet	40.44	1.62
wylewka wyrównawcza	22.77	1.16
posadzka z żywicy	4.10	0.37
Całkowita zawartość wilgoci w stropie [kg/m ²]	9.79	-

Strop jest osłonięty od strony tunelu grubą warstwą izolacji termicznej. Dzięki temu jedyny efekt wilgotnościowy, jaki można obserwować po okresie chłodzenia tunelu pod analizowanym stropem, to zmiana wilgotności tynku systemowego, bezpośrednio wyeksponowanego na zmiany warunków w tunelu. Jednak krótkotrwały wzrost wilgotności mineralnej warstwy tynkowej do poziomu 2.18% nie stanowi zagrożenia dla tej warstwy.

4.3 Strop wewnętrzny poziomu 3.64

Strop rozdziela tunel badawczy (powyżej stropu) i pomieszczenia techniczne (poniżej stropu), warstwy opisane są od góry, od strony tunelu:

- posadzka cienkowarstwowa z żywicy epoksydowych: $d = 0.3 \text{ cm}$, $\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,7 \text{ W/mK}$, $\mu = 10000$,
- wylewka wyrównawcza: $d = 7.5 \text{ cm}$, $\rho = 1970 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 1,6 \text{ W/mK}$, $\mu = 69$,

- styropian XPS: $d = 15 \text{ cm}$, $\rho = 40 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,03 \text{ W/mK}$, $\mu = 100$,
- żelbet: $d = 20 \text{ cm}$, $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 1,7 \text{ W/mK}$, $\mu = 130$.

W opisie przegród [1.2] podano, że nad posadzką znajduje się jeszcze podniesiona podłoga techniczna o nieznannej konstrukcji. W obliczeniach przyjęto, że nie stanowi ona szczelnej bariery dla ciepła i pary wodnej i może być w symulacjach pominięta.

W tablicy 15 pokazano zakres rocznych wahań wilgotności poszczególnych warstw materiałowych w zwykłych warunkach, a w tablicy 16 zmiany wilgotności po 10-dniowym okresie chłodzenia tunelu.

Podobnie jak w przypadku stropu na poziomie 0.0, niewielka zmiana wilgotności pojawia się tylko w warstwie bezpośrednio narażonej na zmienne warunki w tunelu, warstwy pozostałe są osłonięte od tego oddziaływania posadzką i izolacją termiczną. Wzrost wilgotności posadzki żywicznej mieści się w zakresie występującym podczas naturalnych wahań warunków we wnętrzu i nie ma żadnego znaczenia dla trwałości tej warstwy.

Tab. 15 Początkowa zawartość wilgoci (1 lipca) i roczne wahania wilgotności w warstwach stropu wewnętrznego poziomu 3.64 (bez okresu chłodzenia podczas badań w tunelu)

Warstwa przegrody	Wilgotność początkowa	Masowa wilgotność początkowa	Roczne wahania wilgotności
	kg/m^3	%	kg/m^3
posadzka z żywicy	3.14	0.29	1.7-3.71
wylewka wyrównawcza	21.68	1.10	20.82-22.75
styropian XPS	0.42	1.05	0.4-0.44
żelbet	45.00	1.8	44.88-46.43
Całkowita zawartość wilgoci w stropie [kg/m^2]	13.24	-	12.87-13.37

Tab. 16 Wilgotność materiałów po 10-dniowym okresie chłodzenia tunelu w lipcu, strop wewnętrzny, poziom 3.64.

Warstwa przegrody	Wilgotność po chłodzeniu	Masowa wilgotność po chłodzeniu
	kg/m^3	%
posadzka z żywicy	12.87	1.17
wylewka wyrównawcza	22.24	1.13
styropian XPS	0.5	1.25
żelbet	46.50	1.86
Całkowita zawartość wilgoci w stropie [kg/m^2]	13.41	-

5 Dodatkowa izolacja termiczna przegród tunelu

Znaczne obniżenie temperatury w tunelu doświadczalnym LAŚ podczas planowanych 10-dniowych okresów badań nie powoduje destrukcyjnych zagrożeń wilgotnościowych dla całych przegród, ale może niekorzystnie oddziaływać na niektóre warstwy. Masywna obudowa tunelu będzie się też wiązać z trudnościami w szybkiej zmianie temperatury i dużymi ilościami energii potrzebnymi do zrealizowania tych zmian. Dlatego też zaproponowano wewnętrzne docieplenie obudowy tunelu, zgodnie z podanymi niżej wytycznymi.

5.1 Ściany zewnętrzne (warstwa konstrukcyjna z żelbetu o grubości 24 cm i 35 cm)

Biuro APA Architektura zaproponowało modyfikację przegród tunelu poprzez dołożenie odsuniętej od ściany głównej osobnej ścianki wewnętrznej, zamocowanej na podkonstrukcji stalowej i z przestrzenią wentylowaną pomiędzy nimi. Do wykonania ścianki dodatkowej zaproponowano szkieletowy system firmy Knauf z izolacją z wełny mineralnej, dwustronną okładziną z cementowych płyty Aquapanel Outdoor, tynkiem cienkowarstwowym oraz wiatroizolacją. Ideą tego rozwiązania było odseparowanie od obudowy tunelu wpływu zmiennych warunków w tunelu w trakcie prowadzenia w nim badań.

Jednak na bazie wyników uzyskanych z poprzednich obliczeń symulacyjnych zaproponowano rozwiązanie znacznie prostsze, wykorzystujące elementy składowe systemu Aquapanel Outdoor.

W przypadku ściany zewnętrznej proponowane jest dołożenie od strony tunelu na całej jej wysokości (włącznie ze ścianami zagłębionymi w gruncie) następujących dodatkowych warstw (w kolejności układania na ścianie):

- ruszt konstrukcyjny wypełniony wełną mineralną: $d = 10 \text{ cm}$, $\rho = 60 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$, $\mu = 1,3$,
- płyta cementowa Aquapanel Outdoor, $d = 1,25 \text{ cm}$, $\rho = 1150 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,35 \text{ W/mK}$, $\mu = 66$ (wg informacji technicznej producenta),
- silikonowy tynk cienkowarstwowo : $d = 0,2 \text{ cm}$, $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,7 \text{ W/mK}$, $\mu = 215$.

Izolowanie przegród budynków od wnętrza nie jest rozwiązaniem korzystnym w przypadku kiedy izolacja wewnętrzna jest jedyną lub dominującą warstwą termoizolacyjną. W analizowanym przypadku sytuacja jest jednak zdecydowanie inna. Zewnętrzna warstwa

izolacyjna ma dwukrotnie większy opór cieplny niż warstwa wewnętrzna, dlatego też w tej przegrodzie nie powinno dochodzić do kondensacji pary wodnej.

W tabeli 17 podano tym razem maksymalne wartości zawilgocenia materiałów zmodyfikowanej obudowy tunelu w warunkach normalnej eksploatacji budynku (bez zmian temperatury wywołanych badaniami). Wybrano wartości maksymalne, aby sprawdzić czy dołożona od wewnątrz izolacja nie spowoduje okresowego wzrostu zawilgocenia. W porównaniu z wartościami maksymalnymi podanymi w rozdz. 3.1 i 3.2 różnice są niewielkie (głównie lekki wzrost wilgotności żelbetu). Maksymalna roczna wilgotność wewnętrznej warstwy wełny mineralnej mieści się w ramach bezpiecznego zakresu wilgotności sorpcyjnej. Deklarowany przez producenta opór dyfuzyjny płyt Aquapanel jest zupełnie wystarczający, aby ograniczyć strumień pary dyfundujący w trakcie zimy w głąb przegrody. Dzięki obustronnej warstwie termoizolacji nie dochodzi do kondensacji pary wodnej na styku wewnętrznej warstwy izolacji i żelbetu. Nie są potrzebne dodatkowe warstwy paroszczelne ani wiatroszczelne. Nie jest potrzebna grubsza warstwa wewnętrznej izolacji termicznej.

Tab. 17 Maksymalna roczna wilgotność materiałów zmodyfikowanej ściany w warunkach normalnych

Warstwa przegrody	Wilgotność maksymalna	Względna masowa wilgotność maksymalna
	kg/m ³	%
tynk silikonowy zewn.	74.33	4.13
wełna mineralna zewn.	1.14	1.9
żelbet	43.02	1.72
wełna mineralna wewn.	0.65	1.08
płyta Aquapanel	5.91	0.51
tynk silikonowy wewn.	10.10	0.56
Maksymalna całkowita zawartość wilgoci w ścianie [kg/m ²]	10.9	-

Następnie, zmodyfikowany układ warstw ściany zewnętrznej symulowano w warunkach 10-dniowego okresu obniżonej temperatury. W trakcie okresu chłodzenia tunelu w warstwie dodatkowej izolacji termicznej dochodzi do odwrócenia kierunku dyfuzji pary wodnej i w jej wyniku do wzrostu wilgotności wewnętrznej izolacji termicznej oraz pyty okładzinowej. Są to jednak zmiany niewielkie: w przypadku wełny wzrost wilgotności masowej z 1% do 1.6%, a płyty Aquapanel Outdoor z 0.47% do 0.95%. Zmiany w warstwach powierzchniowych zanikają w ciągu 2-3 tygodni po powrocie do normalnych warunków

eksploatacji budynku. Zaproponowane rozwiązanie jest więc poprawne pod względem cieplno-wilgotnościowym, pozwala też uprościć konstrukcję i zminimalizować straty powierzchni i kubatury tunelu.

W przypadku warstwy konstrukcyjnej o grubości 35 cm, uzyskiwane wyniki wilgotnościowe są niemal identyczne. Proponowane rozwiązanie jest więc także i w tym przypadku poprawne.

Wykonano dodatkowe obliczenia kontrolne zmian wilgotnościowych wywołanych badaniami w tunelu w temperaturze +40°C. Przyjęto, że takie badania będą trwały również 10 dni, tj. znacznie dłużej niż w zakładano w tabeli 1 oraz, że zadana temperatura będzie utrzymywana w sposób ciągły. Krótkie zmiany temperatury nie mają znaczenia dla rozkładu wilgoci. Kontrolne obliczenia wykonano dla warunków letnich (1-11 lipca) i zimowych (1-11 lutego). W obydwu przypadkach zmiany wilgotności są mniejsze niż te wywołane chłodzeniem tunelu. Nie są to więc warunki istotne dla kształtowania przegrody.

Płyty Aquapanel powinny być precyzyjnie montowane, a ich styki powinny być wypełnione zalecanym przez producenta materiałem do fugowania, aby uzyskać jednolitą pod względem dyfuzyjnym warstwę wewnętrzną.

Płyty Aquapanel Outdoor są przeznaczone do stosowania zewnętrznego i wg informacji producenta są one „odporne na warunki atmosferyczne i wodoodporne” oraz „wytrzymują ekstremalne warunki pogodowe”. Warto się jednak upewnić czy i jaką odporność na bezpośrednie działanie wody w połączeniu z niską temperaturą (mrozoodporność) gwarantuje producent.

5.2 Ściany wewnętrzne (warstwa konstrukcyjna z żelbetu o grubości 24 cm i 35 cm)

Ściany wewnętrzne, oddzielające tunel od innych pomieszczeń, zgodnie z propozycją projektantów [1.2] posiadają już izolację termiczną. Wyniki ich symulacji zestawiono i analizowano w rodz. 3.3 i 3.4. Jedyna modyfikacja jaka jest sugerowana w ich przypadku, to zastąpienie wodoodpornych płyt gipsowo-kartonowych płytami Aquapanel Outdoor, jak w przypadku ścian zewnętrznych.

5.3 Stropodach

Proponowana modyfikacja warstw w stropodachu nad tunelem jest identyczna jak w przypadku ścian. Dodatkowe warstwy (w kolejności mocowania do żelbetowej warstwy konstrukcyjnej od strony wnętrza tunelu):

- ruszt konstrukcyjny wypełniony wełną mineralną: $d = 10 \text{ cm}$, $\rho = 60 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$, $\mu = 1,3$,
- płyta cementowa Aquapanel Outdoor, $d = 1.25 \text{ cm}$, $\rho = 1150 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,35 \text{ W/mK}$, $\mu = 66$ (wg informacji technicznej producenta),
- silikonowy tynk cienkowarstwowy : $d = 0,2 \text{ cm}$, $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,7 \text{ W/mK}$, $\mu = 215$.

W tabeli 18, tak jak poprzednio, podano maksymalne roczne wartości wilgotności poszczególnych warstw przegrody po jej dociepleniu od strony wnętrza. W stosunku do rocznych maksymalnych wartości wilgotności materiałów stropodachu zwykłego, podanych w rozdziale 4.1, tab. 11, niewielki wzrost wilgotności można obserwować w przypadku żelbetu i wełny półtwardej. Jest on w przypadku żelbetu związany z obniżeniem temperatury w tej warstwie i związanym z tym wzrostem zawilgocenia sorpcyjnego, a w przypadku wełny dyfuzją pary z górnej warstwy izolacji termicznej. Wilgotność wewnętrznej warstwy izolacji termicznej jest niska, w tej części przegrody nie występuje kondensacja pary wodnej w żadnym okresie roku. Tak zmodyfikowana przegroda jest więc poprawna pod względem wilgotnościowym w warunkach normalnej eksploatacji wnętrza.

Tab. 18 Maksymalna roczna wilgotność materiałów zmodyfikowanego stropodachu w warunkach normalnych

Warstwa przegrody	Wilgotność maksymalna	Względna masowa wilgotność maksymalna
	kg/m ³	%
wełna mineralna twarda	3.47	2.48
wełna mineralna półtwarda	4.88	4.88
żelbet	44.13	1.77
wełna mineralna wewn.	0.63	1.05
płyta Aquapanel	5.85	0.51
tynk silikonowy wewn.	10.09	0.56
Maksymalna całkowita zawartość wilgoci w stropodachu [kg/m ²]	14.08	-

Zmiany wilgotności warstw materiałowych w wyniku chłodzenia tunelu wynikają z odwrócenia dyfuzji w wewnętrznej warstwie izolacji termicznej i półtwardej izolacji na stropie. Po 10 dniach obniżonej temperatury wilgotność względna wewnętrznej warstwy izolacji wynosi 1.75 %, wykracza poza zakres zwykłych wahań dla tego materiału pokazanych w tabeli 18, ale jest to wciąż poziom bezpiecznej wilgotności sorpcyjnej dla tego materiału. Dodanie wewnętrznej izolacji termicznej nie spowodowało pogorszenia warunków w pozostałych warstwach w stosunku do sytuacji w standardowym stropodachu pełnym. Chwilowe zawilgocenie warstwy wełny półtwardej (5.61%) jest tu z kolei nieco niższe niż w stropodachu bez dodatkowego docieplenia, pokazane w tab. 12.

Obustronne osłonięcie masywnej warstwy żelbetowej izolacją termiczną ograniczyło zmiany temperatury w tej warstwie. Po 10 dniach chłodzenia tunelu do -10°C temperatura warstwy konstrukcyjnej obniżyła się niemal równomiernie na całej grubości, ale tylko do ok. $+11^{\circ}\text{C}$. W podobny sposób odbywa się proces powrotu tej warstwy do warunków początkowych. Dopiero po kilkunastu dniach jej temperatura wraca do wartości wyjściowej. Pełne wysychanie przegrody do warunków wyjściowych to proces jeszcze dłuższy, dlatego też badania prowadzone w tunelu powiązane z intensywnym chodzeniem nie powinny być powtarzane częściej niż w odstępach 1 miesiąca.

Podobnie jak w przypadku docieplonych ścian wewnętrznych, wykonano kontrolne obliczenia symulacyjne stropodachu z dodatkową warstwą izolacji termicznej w warunkach wysokiej temperatury we wnętrzu. Także i w tym przypadku zmiany wilgotnościowe wywołane znacznym podgrzaniem wnętrza tunelu nie są istotne dla decyzji projektowych.

5.4 Stropy wewnętrzne

Izolowane termicznie stropy wewnętrzne pomiędzy tunelem a innymi pomieszczeniami tego budynku analizowano wcześniej, rozdz. 4.2 i 4.3 i potwierdzono poprawność projektowanego układu warstw w tych przegrodach.

6. Podsumowanie

- Do obliczeń symulacyjnych wybrano najtrudniejsze warunki eksploatacji tunelu, t.j. 10-dniowy okres temperatury obniżonej do -10°C i wilgotności względnej powietrza 90%. Dodatkowo przyjęto, że tego typu badania są prowadzone w tunelu w okresie ekstremalnych warunków w otoczeniu budynku, tj. w najgorętszym okresie roku (1-11.VII) oraz najchłodniejszym okresie (1-11.II).
- Do obliczeń użyto programu komputerowego WUFI Pro, pozwalającego na symulowanie warunków o silnej zmienności i uwzględniającego złożone mechanizmy transportu wody w materiale budowlanym. Uproszczone, stacjonarne metody obliczeń wilgotnościowych nie mają w tym przypadku sensu.
- Przedmiotem analiz symulacyjnych były następujące elementy obudowy tunelu: ściany zewnętrzne z żelbetową warstwą konstrukcyjną o grubości 24 i 35 cm, ściany wewnętrzne z żelbetową warstwą konstrukcyjną o grubości 24 i 35 cm, stropodach oraz stropy wewnętrzne poziomu 0.0 i +3.64 m.
- **Ściana zewnętrzna, żelbet 24 cm.** Chłodzenie tunelu w gorącym okresie letnim (początek lipca) powoduje okresowy wzrost wilgotności masowej warstwy wełny mineralnej do poziomu 2.25%, co nie powinno stanowić zagrożenia dla trwałości tego materiału. Miejscowe zawilgocenie w tej warstwie może być kilkukrotnie wyższe. Zmiany wilgotności innych warstw są nieznaczne.
- Mimo relatywnie niewielkich zmian wilgotności, pełny powrót materiałów ściany do warunków początkowych, zwłaszcza warstwy konstrukcyjnej, wymaga długiego okresu czasu. Zaleca się więc, aby tego typu badania nie były prowadzone w tunelu częściej niż co 3 miesiące.
- Skrajnie trudne warunki cieplno-wilgotnościowe w tunelu wymagają zastosowania mrozoodpornych warstw na wszystkich powierzchniach wewnętrznych obudowy tunelu.
- Chłodzenie tunelu w trakcie zimy (początek lutego) powoduje mniejsze zmiany wilgotności warstw ściany niż chłodzenie tunelu w lecie. Dlatego dalsze analizy wykonano już tylko dla okresu letniego.
- Bardzo masywne warstwy konstrukcyjne ścian schładzają się bardzo powoli (3-4 dni) i równie długo nagrzewają się. Ich ogromna pojemność cieplna utrudnia szybkie

zmiany temperatury w tunelu oraz wymaga większej niż w przypadku lekkiej obudowy ilości energii i mocy urządzeń chłodniczych.

- **Ściana zewnętrzna, żelbet 35 cm.** Wszystkie poprzednie obserwacje wilgotnościowe odnoszą się również do ściany z pogrubioną warstwą konstrukcyjną. Natomiast znacznemu wydłużeniu, nawet do 6 dni, ulega w tym przypadku okres pełnego schłodzenia tej warstwy i jej powrotu do stanu wyjściowego.
- Kilkudniowe podgrzewanie tunelu do poziomu $+40^{\circ}\text{C}$ nie powoduje istotnych zmian wilgotnościowych w przegrodach. Te warunki nie są więc dalej traktowane jako decydujące kryterium projektowe dla układu warstw w przegrodach.
- Dobierając rodzaj tynku zewnętrznego na ścianach zewnętrznych należy zwrócić uwagę na jego opór dyfuzyjny. Korzystne dla przegrody z wełną mineralną są tynki o wysokiej paro-przepuszczalności (tynk mineralny ew. tynk silikonowy).
- **Ściany wewnętrzne, żelbet 24 i 35 cm.** W tym przypadku najtrudniejsze warunki po chłodzeniu tunelu występują w warstwie płyt gipsowo-kartonowych, zawilgacanych z obydwu stron i poddanych zamrażaniu. Decydując o stosowaniu tego rodzaju płyt należy mieć potwierdzenie producenta, że jest to materiał odporny na całkowite nasycenie wodą i jednocześnie działanie niskiej temperatury.
- **Stropodach.** W każdym stropodachu pełnym z ciężkim bitumicznym pokryciem wodochronnym i paroizolacją okresowo występuje kondensacja pary wodnej, także przy normalnych warunkach eksploatacyjnych. Podczas realizacji stropodachu należy więc zadbać, aby izolacja termiczna nie uległa zamoczeniu przed ułożeniem pokrycia, Woda zamknięta pomiędzy dwiema szczelnymi warstwami pozostanie tam przez bardzo długi czas.
- Intensywne chłodzenie tunelu przekrytego stropodachem pełnym powoduje znaczący wzrost wilgotności dolnej warstwy termoizolacji (wełny półtwardej) w tej przegrodzie.
- **Strop wewnętrzny poziomu 0.0.** W przypadku tego stropu istotne zmiany wilgotności wywołane chłodzeniem tunelu dotyczą jedynie tynku systemowego, osłaniającego izolację termiczną. Wskazany w projekcie tynk systemowy powinien być dopuszczony przez producenta do stosowania w wymagającym środowisku zewnętrznym.
- **Strop wewnętrzny poziomu +3.64.** Brak istotnych zmian i zagrożeń wywołanych chłodzeniem.

- **Dodatkowa izolacja wewnętrzna.** Zaproponowano alternatywną modyfikację ścian zewnętrznych i stropodachu poprzez dołożenie od strony tunelu bezpośrednio do warstwy konstrukcyjnej: izolacji termicznej (wełna mineralna) o grubości 10 cm i otynkowanych płyt cementowych Aquapanel Outdoor.
- W przypadku obydwu rodzajów ścian zewnętrznych taka modyfikacja jest poprawna, nie powoduje kondensacji węgłnej w przegrodzie w zwykłych warunkach eksploatacji. W okresie chłodzenia tunelu zmiany wilgotności we wszystkich warstwach są niewielkie i szybko (2-3 tygodnie) zanikają po powrocie do warunków normalnych.
- Warunki intensywnego podgrzewania ścian tunelu z wewnętrznym dociepleniem do temperatury $+40^{\circ}\text{C}$, zarówno w zimie jak i w lecie, także nie powodują istotnych zmian ich wilgotności.
- Dodatkowe docieplenie od wnętrza stropodachu pełnego warstwą izolacji termicznej o grubości 10 cm jest rozwiązaniem poprawnym w warunkach normalnych. W okresie chłodzenia tunelu wzrost wilgotności warstwy izolacji wewnętrznej jest nieznaczny, a w ciągu 2-3 tygodni materiał powraca do wilgotności wyjściowej. Także intensywne podgrzewanie tunelu nie powoduje niekorzystnych zmian.
- W przypadku ścian i stropów wewnętrznych zmiana układu warstw nie jest potrzebna. Te przegrody są już osłonięte termicznie od strony tunelu, czyli środowiska o dużych zmianach warunków wewnętrznych.
- Lekkie warstwy izolacyjne na całej obudowie tunelu skracają okres wysychania przegród po badaniach w niskiej temperaturze i umożliwiają częstsze ich powtarzanie w razie takiej potrzeby.
- Nie należy wydłużać w istotny sposób 10-dniowego okresu chłodzenia tunelu. Jeśli to się jednak zdarzy, to należy przedłużyć także okres powrotu przegród do stanu wyjściowego.
- Obustronne izolowanie przegród na budowie powinno być zrealizowane dopiero po uprzednim wyschnięciu warstw konstrukcyjnych do poziomu wilgotności sorpcyjnej. Jeśli to nie będzie możliwe, to badania związane z intensywnym chłodzeniem tunelu należy przeprowadzać nie wcześniej niż po upływie roku normalnej eksploatacji budynku.

- Należy zwrócić uwagę na izolacyjność termiczną stolarki okiennej i drzwiowej pomiędzy tunelem a innymi pomieszczeniami oraz na osadzenie tej stolarki w warstwie izolacji lub bezpośrednio przy niej.
- Metalowa konstrukcja wsporcza elementów dekoracyjnych elewacji, mocowana do konstrukcyjnej warstwy żelbetowej ścian i przebijająca warstwy izolacji termicznej spowoduje powstanie istotnych mostków liniowych lub punktowych i zmianę współczynnika przenikania ciepła całej obudowy budynku. Wpływ tych mostków powinien być policzony (obliczenia 2D i 3D) i uwzględniony w obliczeniach izolacyjności termicznej ścian.