

Akustyka wnętrz

Projektowanie pomieszczeń
zgodnie z normą PN-B 02151-4 (2015 r.)

Andrzej K. Kłosak



SŁOWO WSTĘPNE

Zeszyt nr 3 stanowi kontynuację naszych planów związanych z dokumentowaniem problematyki poruszanej podczas szkoleń realizowanych w naszej Izbie.

Akustyka wewnątrz i budowli to dział akustyki architektonicznej obejmujący zagadnienia rozchodzenia się dźwięku w pomieszczeniach zamkniętych oraz zagadnienia izolacji dźwiękowej przegród budowlanych.

Akustyka wewnątrz bada, jaki wpływ na planowane przeznaczenie pomieszczenia ma jego wyposażenie. Użytkownicy pomieszczeń najczęściej oczekują albo dobrego, zrozumiałego brzmienia mowy, albo dobrych warunków dla odtwarzania muzyki. Jeśli pomieszczenie ma spełniać obie te funkcje równocześnie, wówczas konieczne będzie rozwiązanie kompromisowe.

Przy planowaniu pomieszczeń pod względem akustycznym należy, oprócz rozmiarów elementów absorbujących dźwięk, zwrócić uwagę na rozmieszczenie powierzchni odbijających i absorbujących. Jeśli zależy nam np. na dobrym i wyraźnym brzmieniu mowy w pomieszczeniu należy pamiętać, że decyduje o tym jakość dźwięku bezpośredniego, a przede wszystkim stosunek między szybciej i później odbijanym dźwiękiem oraz przez kierunek padania dźwięku.

Problematyka akustyki wewnątrz jest zagadnieniem istotnym przy projektowaniu i użytkowaniu obiektu.

W Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury w sprawie Warunków Technicznych (WT), jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie zawarte są ogólne wymagania dotyczące akustyki.

Zeszyt architekta, który przekazujemy w Wasze ręce, opisuje min. zagadnienia związane z eliminowaniem lub ograniczaniem poziomu hałasu oraz ze zmniejszaniem stopnia przenikania hałasu do pomieszczeń podlegających ochronie przeciwdźwiękowej.

Odpowiednie parametry akustyczne kształtuje m.in. poprzez:









- wybór właściwego dla danej lokalizacji systemu konstrukcyjnego budynków,
- układu rozplanowania pomieszczeń w stosunku do zewnętrznych i wewnętrznych źródeł hałasu,
- ograniczanie dróg rozprzestrzeniania się dźwięków materiałowych poprzez konstrukcję budynku (stosowanie dylatacji lub przekładek elastycznych – wibroizolatorów),
- ograniczanie rozprzestrzeniania dźwięków rozchodzących się w powietrzu – przez stosowanie przegród budowlanych o odpowiedniej izolacyjności akustycznej,
- izolowanie hałaśliwych maszyn lub urządzeń oraz stosowanie materiałów i ustrojów dźwiękochłonnych do zmniejszania poziomu hałasu w pomieszczeniach wymagających ciszy.

Celem ochrony przeciwhałasowej jest zmniejszenie poziomu hałasu do poziomów dopuszczalnych, określonych normami lub założeniami projektowymi.

Nowy Zeszyt zawiera zbiór przepisów dotyczących projektowania wewnątrz z uwzględnieniem obowiązujących przepisów. Mamy nadzieję, że zawarte tu informacje będą przydatne w codziennej pracy projektowej.

arch. **Witold Zieliński**
Rada Małopolskiej Okręgowej
Izby Architektów RP

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie	3	
2. Hałas pogłosowy, pogłos i czas pogłosu	5	
3. Zrozumiałość mowy	11	
4. Wymagania normy PN-B 02151-4 dla pomieszczeń do komunikacji słownej	12	
5. Wymagania normy PN-B 02151-4 dla pozostałych pomieszczeń (nie przeznaczonych zasadniczo do komunikacji słownej) gdzie celem jest ograniczanie hałasu pogłosowego	12	
6. Wpływ czasu pogłosu i tła akustycznego na poziom zrozumiałości mowy w pomieszczeniach	14	
7. Projektowanie pomieszczeń dla komunikacji słownej w celu zapewnienia dobrej zrozumiałości mowy	19	
8. Projektowanie pomieszczeń z uwagi na ograniczenie hałasu pogłosowego	24	

© Copyright by Andrzej K. Kłosak, ROCKFON, Małopolska Okręgowa Izba Architektów RP,
Kraków 2017

All rights reserved

Niniejsza publikacja ani żaden jej fragment nie może być reprodukowany, przetwarzany i rozpowszechniany w jakikolwiek sposób za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych oraz nie może być przechowywany w żadnym systemie informatycznym bez uprzedniej pisemnej zgody Wydawcy.

1. Wprowadzenie

W Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury w sprawie Warunków Technicznych (WT), jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie zawarte są ogólne wymagania dotyczące akustyki. Do projektowania pomieszczeń w kontekście akustyki wewnątrz odnoszą się głównie dwa z tych wymagań, zapisane w art. 323 w pkt 2, lit 4 oraz art. 262 w pkt 5, lit 4.

Artykuł 323, pkt 2:

„**Pomieszczenia** w budynkach mieszkalnych, zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej **naależy chronić przed hałasem:**

- 1) zewnętrznym przenikającym do pomieszczenia spoza budynku;
- 2) pochodzącym od instalacji i urządzeń stanowiących techniczne wyposażenie budynku;
- 3) powietrznym i uderzeniowym, wytwarzanym przez użytkowników innych mieszkań, lokali użytkowych lub pomieszczeń o różnych wymaganiach użytkowych;
- 4) **pogłosowym, powstającym w wyniku odbić fal dźwiękowych od przegród ograniczających dane pomieszczenie.**”

Artykuł 323, pkt. 2 dotyczy potrzeby ochrony pomieszczeń przed hałasem, w tym również przed jedną ze składowych hałasu – hałasem pogłosowym. Czym jest hałas pogłosowy można przedstawić na następujących przykładzie. Hałas pogłosowy pojawia się we wnętrzu w momencie, jeśli pojawi się w nim jakieś źródło hałasu – rozmowa, muzyka, szum wentylatora, odgłos kroków czy też dowolny inny dźwięk będący skutkiem emisji przez elementy wyposażenia technicznego znajdujące się w pomieszczeniu albo samego użytkownika pomieszczenia przez jego użytkowników. Hałas źródła zostaje

wyemitowany do pomieszczenia, lecz to jak głośno będzie odczuwalny w danym pomieszczeniu, zależy od poziomu hałasu pogłosowego tego pomieszczenia, a poziom ten zależny jest od kubatury pomieszczenia i czasu pogłosu pomieszczenia. Przykładowo, w pokoju hotelowym odgłos trzaśnięcia drzwiami jest słyszalny jedynie przez krótką chwilę. Ten sam odgłos w obszernym hallu budynku sądu może trwać nawet kilka sekund. Efekt ten nazywamy pogłosem. Można go zmierzyć, mierząc czas zanikania dźwięku w pomieszczeniu – tzw. czas pogłosu – czyli czas od momentu wyemitowania w pomieszczeniu krótkiego dźwięku (np. klaśnięcie albo wystrzał z dmuchanego balonika) do momentu jak ten dźwięk przestanie być słyszalny (a dokładnie do momentu kiedy poziom głośności tego dźwięku spadnie o 60 dB). Im dłuższy czas pogłosu wewnątrz – tym bardziej odczuwalny będzie w nim hałas pogłosowy. Artykuł 323 WT nakazuje chronić pomieszczenia przed hałasem pogłosowym, czyli innymi słowy nakazuje wprowadzić ograniczenia w wartości czasu pogłosu we wnętrzach. Czas pogłosu pomieszczenia zależy wyłącznie od samego pomieszczenia, a właściwie od jego kubatury i sposobu wykończenia wnętrza. Im większa kubatura, tym dłuższy czas pogłosu, a co za tym idzie mocniejszy hałas pogłosowy. Im bardziej surowy sposób wykończenia wnętrza, czyli z akustycznego punktu widzenia im twardsze materiały zastosowano we wnętrzu (beton, stal, szkło), tym dłuższy będzie tam czas pogłosu, i mocniejszy hałas pogłosowy. Ochrona pomieszczeń przed hałasem pogłosowym polega przede wszystkim na działaniach architektonicznych – ograniczeniu kubatury projektowanych wnętrz z równoczesnym stosowaniem w pomieszczeniach materiałów wykończeniowych, które posiadają właściwości dźwiękochłonne.

Drugie wymaganie zapisano w art. 262 w pkt 5, lit 4:

Artykuł 262, pkt 5:

„W pomieszczeniach budynków użyteczności publicznej, których funkcja związana jest z odbiorem mowy lub innych pożądaných sygnałów akustycznych, należy stosować takie rozwiązania budowlane oraz dodatkowe adaptacje akustyczne, które zapewnią uzyskanie w pomieszczeniach odpowiednich warunków określonych odrębnymi przepisami. (...)”

Wymaganie to dotyczy wszelkich pomieszczeń w budynkach użyteczności publicznej, w których istotny jest odbiór mowy (klasy szkolne, sale wykładowe, sale konferencyjne, etc) albo wszelkiego innego rodzaju sygnałów dźwiękowych (czyli muzyki, sygnałów alarmowych, komunikatów dźwiękowych systemów ostrzegawczych (DSO)). WT odwołują się w tym artykule do wymagań określonych odrębnymi przepisami, których w momencie pisania treści samych Warunków Technicznych jeszcze nie było.

Inne szczegółowe wymagania wiążące się z ochroną przed hałasem środowiskowym, instalacyjnym i bytowym (§323, pkt 2, podpunkty 1–3) zawarte są w dwóch normach powołanych w WT: PN-B-02151-02:1987 oraz PN-B-02151-3:1999. Należy zwrócić uwagę na fakt, że powołania w WT są powołaniami datowanymi, czyli pomimo wydania nowej wersji danej normy (np. w Październiku 2015 została wydana aktualizacja normy PN-B 02151-3:2015-10), do momentu zmiany powołania w treści WT, obowiązuje cały czas stara norma. Obecnie na stronach internetowych Ministerstwa opublikowano projekt nowelizacji WT, w którym zaktualizowano już datowanie normy PN-B 02151-3:2015, zatem jeśli nic się nie zmieni, od kolejnej edycji WT będzie już obowiązywać ta wersja normy. Do czerwca 2015 roku nie było natomiast żadnego dokumentu, który by określał wymagania dotyczące warunków pogłosowych (§323, pkt 2, podpunkt 4) oraz zrozumiałości mowy (§326, pkt 5).

Na podstawie między innymi tych dwóch wymagań, w 2010 r. Komitet Techniczny nr. 253 ds. Akustyki Architektonicznej przy PKN, którego Autor jest członkiem, rozpoczął prace nad stworzeniem normy podającej szczegółowe wymagania dla projektowania pomieszczeń. Efektem tych prac jest wydana w 2015 roku norma PN-B 02151-4:2015-06 „Akustyka budowlana. Ochrona przed hałasem w budynkach. Część 4: Wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach oraz wytyczne prowadzenia badań” („Norma”).

Norma PN-B 02151-4 dotyczy wybranych grup pomieszczeń w budynkach zamieszkania zbiorowego oraz użyteczności publicznej i zgodnie z zapisami w treści Normy, powinna być stosowana przy ich projektowaniu, wznoszeniu, modernizacji oraz przebudowie. Norma z założenia nie dotyczy wnętrz o akustyce kwalifikowanej, takich jak sale koncertowe, teatralne, kinowe, sale prób w szkołach muzycznych, etc, które to pomieszczenia wymagają zwykle bardzo indywidualnego podejścia, a określenie wymagań powinno zawsze następować z pomocą specjalisty, zajmującego się akustyką wewnątrz.

Wymagania zawarte w Normie zostały zdefiniowane niezależnie dla dwóch zasadniczych grup pomieszczeń:

- pomieszczenia w których celem nadrzędnym jest zapewnienie dobrej zrozumiałości mowy;
- pomieszczenia w których celem nadrzędnym jest ograniczenie hałasu pogłosowego.

W pierwszej grupie (Tablica 1 w Normie) znajdują się pomieszczenia przeznaczone do komunikacji słownej, i to głównie prowadzonej przy znacznej odległości mówca-słuchacz: klasy, sale i pracownie szkolne, sale wykładowe (w tym audytoryjne), sale konferencyjne, sale rozpraw sądowych i inne pomieszczenia o podobnej funkcji. Dla tych pomieszczeń określone są dwa rodzaje wymagań, które powinny być spełnione łącznie: maksymalny dopuszczalny czas pogłosu T oraz minimalna wymagana wartość wskaźnika transmisji mowy STI.

W drugiej grupie (Tablice 2 i 3 w Normie) znajdują się pozostałe pomieszczenia, w których komunikacja słowna nie jest wiodącą funkcją, lub jeśli nią jest to odległość mówca-słuchacz jest niewielka (np. biura obsługi klienta, rozmowa przy recepcji w dużym hallu, etc). Głównym celem jest ograniczenie hałasu pogłosowego. Dla tych pomieszczeń wymagania sformułowano na dwa sposoby. Dla większości pomieszczeń z tej grupy (Tablica 2 w normie) wymagania określono przez określenie maksymalnego dopuszczalnego czasu pogłosu, natomiast dla niewielkiej grupy pomieszczeń (Tablica 3 w normie) – przez określenie minimalnej wymaganej chłonności akustycznej pomieszczenia.

2. Hałas pogłosowy, pogłos i czas pogłosu

W celu wyjaśnienia, czym jest hałas pogłosowy, w niniejszym rozdziale omówiono kilka przykładów pomieszczeń, oraz pokazano, jaki wpływ ma zastosowanie materiałów dźwiękochłonnych oraz kubatura pomieszczenia na odczuwany poziom hałasu pogłosowego. Aby móc zrozumieć relacje pomiędzy pomieszczeniem, a hałasem należy najpierw wyjaśnić jak należy rozumieć termin **decybel**, co to jest chłonność akustyczna pomieszczenia oraz omówić dwa bardzo często mylone ze sobą pojęcia: mocy akustycznej źródła i poziomu dźwięku źródła.

Aby zrozumieć różnicę pomiędzy mocą akustyczną, a poziomem dźwięku (inaczej określanym poziomem ciśnienia akustycznego), posłużmy się przykładem żarówki. Moc żarówki podajemy zwykle w Watach. Typowa żarówka ma moc 100 W. Obojętne, czy patrzymy na tą żarówkę z odległości 1 m, czy też ze 100 m, żarówka ma cały czas moc 100 W. Natomiast to, co się zmienia wraz z odległością, to jasność żarówki. Jasność 100 W żarówki odczuwana z odległości 1 m jest bardzo duża, natomiast ta

sama 100 W żarówka, obserwowana z odległości 100 m jest jedynie małym światełkiem, o niewielkiej jasności. W akustyce analogiczna zależność jak przy mocy i jasności żarówki, zachodzi przy źródłach hałasu, gdzie odpowiednikiem mocy żarówki – jest moc akustyczna źródła hałasu, natomiast odpowiednikiem odczuwalnej jasności żarówki – jest poziom dźwięku (poziom ciśnienia akustycznego) źródła hałasu. Moc akustyczna źródła hałasu jest stała i nie zależy od odległości (analogicznie jak moc 100 W żarówki). Poziom dźwięku od źródła jest zależy od odległości, malejąc wraz ze wzrostem odległości od źródła hałasu (analogicznie jak jasność żarówki maleje wraz z odległością, z której na nią patrzymy).

Podstawową miarą wykorzystywaną w akustyce jest **decybel**, oznaczany jako dB. Bez wchodzenia w szczegółowe definicje matematyczne i przy dużym uproszczeniu koniecznym dla zrozumienia dalszych rozdziałów przyjmijmy, że **decybel** jest umowną miarą określającą głośność. Może on być użyty zarówno w kontekście mocy akustycznej urządzenia, jak i poziomu dźwięku. Sposób wyliczania **decybeli** został tak ustawiony, aby typowy zakres głośności możliwej do usłyszenia przez człowieka zawierał się w przedziale od 0 do ok. 120~130 dB(A). Najcichszy dźwięk, jaki człowiek może usłyszeć to ok. 0 dB(A). Najgłośniejszy hałas, jaki człowiek może znieść (przez krótki czas) to 120–130 dB(A). Powyżej granicy ok. 130 dB(A) przestajemy odczuwać dźwięki jako dźwięki, a zaczynamy je odczuwać jako ból. W celach poglądowych, w tabeli 1 poniżej podano typowe wartości poziomu dźwięku dla różnych sytuacji/źródeł.

Prawo pracy uznaje, maksymalny poziom hałasu, na który pracownik może być narażony w sposób ciągły (przez 8 h dziennie) to 85 dB(A). Powyżej tej wartości należy stosować ochronniki słuchu (nauszniki, stopery do uszu), albo ograniczać czas ekspozycji pracownika na hałas. Dla pracy biurowej prawo pracy przyjmuje, że maksymalny poziom ekspozycji na hałas na stanowisku pracy to 55 dB(A) (analogicznie odniesiony do 8 h pracy).

Tabela 1. Jak odczuwamy „decybele – typowe szacunkowe wartości poziomu dźwięku dla różnych sytuacji/źródeł

130 dB(A)	Próg bólu człowieka
120 dB(A)	Samolot z bliska
80 dB(A)	Ruchliwa ulica z bliska
70 dB(A)	Towarzyska konwersacja kilku osób
60 dB(A)	Osoba mówiąca normalnym głosem w odległości 1 m
50 dB(A)	Typowe niewielkie biuro
30–40 dB(A)	Typowa sypialnia
20 dB(A)	Cisza w teatrze/Sali koncertowej
0 dB(A)	Próg słyszalności człowieka

Wartym zapamiętania jest fakt, że **decybel** jest skalą logarytmiczną, co oznacza, że różnica 1 dB jest na granicy odczuwalności, różnica 3 dB jest wyraźnie odczuwalna, a 10 dB jest odczuwalne jako dwukrotna zmiana poziomu dźwięku (czyli dwa razy głośniejsze albo ciszsze w zależności od kierunku tej zmiany).

Chłonność akustyczna pomieszczenia, określana często przedrostkiem „całkowita” i oznaczana literką **A**, jest miarą określającą jak duża powierzchnia materiałów dźwiękochłonnych, przeliczonych na 100% pochłaniające materiały, znajduje się w pomieszczeniu. Innymi słowy, jeśli pomnożymy powierzchnię każdego materiału przez jego współczynnik pochłaniania dźwięku, a wszystkie te wartości zsumujemy, otrzymamy chłonność akustyczną pomieszczenia. Przykładowo dla pomieszczenia o kubaturze 480 m³ (15 m x 8 m, wys. 4 m) w którym wszystkie ściany, sufit i podłoga są betonowe, chłonność akustyczna wynosi $A = 12,72 \text{ m}^2$, gdyż sumaryczna powierzchnia sufitu, podłogi i ścian równa się 424 m², co pomnożone przez współczynnik pochłaniania betonu wynoszący ok. 0,03 daje właśnie 12,72 m² całkowitej chłonności akustycznej. Znając chłonność akustyczną pomieszczenia możemy w prosty sposób oszacować o ile spadnie poziom hałasu pogłosowego w pomieszczeniu ($\Delta_{\text{HAŁAS POGŁOSOWY}}$), po wykonaniu adaptacji akustycznej pomieszczenia przez zastosowanie

w nim dodatkowych materiałów dźwiękochłonnych. Wystarczy wyliczyć chłonność akustyczną pomieszczenia po adaptacji ($A_{\text{PO ADAPTACJI}}$) oraz chłonność akustyczną tego samego pomieszczenia przed adaptacją ($A_{\text{PRZED ADAPTACJĄ}}$) i wstawić te wartości do prostego wzoru:

$$\Delta_{\text{HAŁAS POGŁOSOWY}} = 10 * \log (A_{\text{PO ADAPTACJI}} / A_{\text{PRZED ADAPTACJĄ}}) \text{ [dB]} \text{ (wzór 1)}$$

Dla wspomnianego wcześniej pomieszczenia, o kubaturze 480 m³ (15 m x 8 m, wys. 4 m) w którym wszystkie ściany, sufit i podłoga są betonowe, a chłonność akustyczna przed adaptacją wynosi $A_{\text{PRZED ADAPTACJĄ}} = 12,72 \text{ m}^2$, po ułożeniu na całym suficie (15 x 8 m = 120 m²) płyt **Rockfon**, których współczynnik pochłaniania dźwięku jest równy 1,0, chłonność akustyczna wzrośnie o 120 m², i będzie wynosić $A_{\text{PO ADAPTACJI}} = 132,72 \text{ m}^2$. Dla takich założeń, wynik obliczeń ze wzoru (1) pokazuje, że możemy spodziewać się redukcji hałasu pogłosowego o ok. 10 dB. Są to oczywiście tylko wyniki przybliżone. Dokładniejsze obliczenia omówiono poniżej.

Na wykresie 1 pokazano jak zmienia się wraz z odległością poziom dźwięku od hałasującego urządzenia o mocy akustycznej 100 dB(A) w trzech sytuacjach:

- kiedy urządzenie stoi w terenie otwartym (na zewnątrz);
- kiedy to samo urządzenie wstawimy do pomieszczenia o kubaturze 480 m³ (15 m x 8 m, wys. 4 m) w którym wszystkie ściany, sufit i podłoga są betonowe;
- kiedy na całym suficie pomieszczenia opisanego w punkcie B umieścimy materiał dźwiękochłonny, np. płyty **Rockfon** klasy A, o współczynniku $\alpha_w = 1,0$.

Na wykresie 1 pokazano jak głośno osoba będzie słyszeć hałasujące urządzenie stojąc kolejno w odległości od 1 m do 10 m od tego urządzenia. Głośność urządzenia wyrażono przez poziom dźwięku. Trzy opisane powyżej przypadki oznaczono różnymi kolorami. Pierwszy (A), oznaczony czarnymi kwadratami, pokazuje jak zmienia się poziom dźwięku od urządzenia stojącego w otwartym terenie (na zewnątrz), gdzie

czas pogłosu wynosi 0 sekund (brak pogłosu). Następnie czerwonymi kółkami zaznaczono jak zmienia się poziom dźwięku od tego samego urządzenia wstawionego do pomieszczenia (B), w którym czas pogłosu wyniesie ok. 4,5 sekundy. Na końcu zielonymi trójkątami pokazano jak obniży się odczuwalny poziom dźwięku od tego samego urządzenia po zastosowaniu na całym suficie pomieszczenia (120 m²) materiału dźwiękochłonnego (C), co przełoży się na obniżenie czasu pogłosu do wartości ok. 1,7 sekundy.

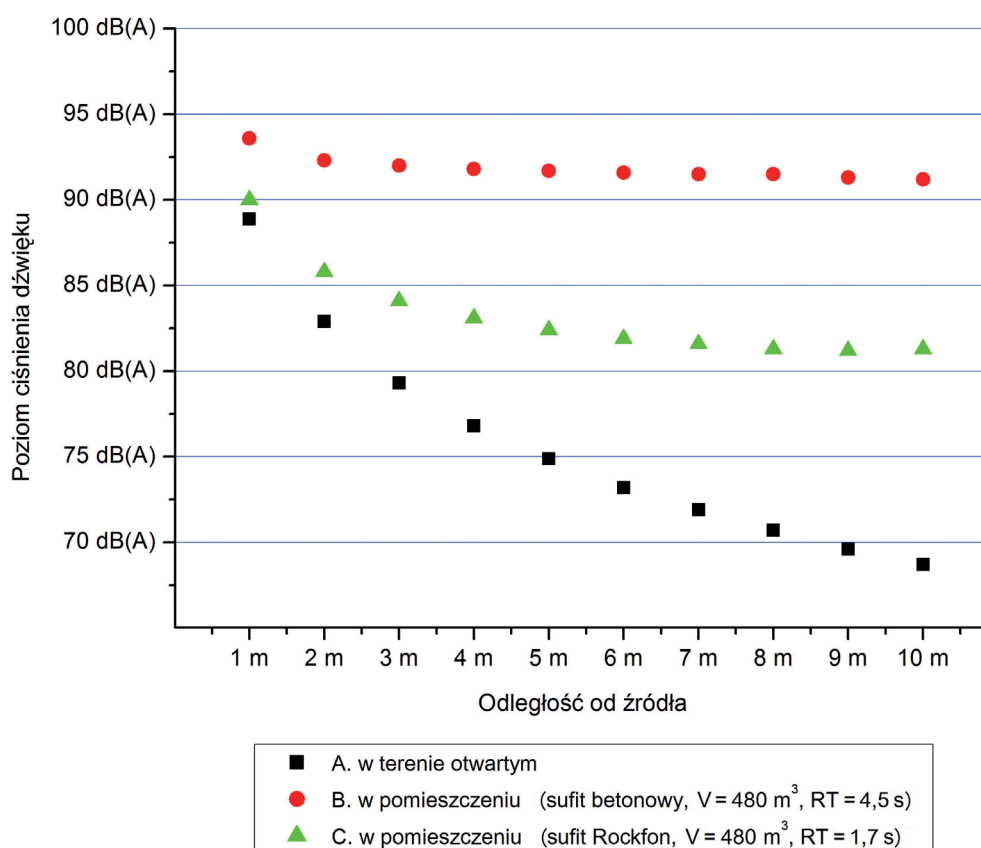
Analizując wykres 1 warto zwrócić uwagę na kilka istotnych zależności.

Po pierwsze moc akustyczna hałasującego urządzenia, równa 100 dB(A) przekłada się na dużo niższą wartość poziomu dźwięku, i wartość ta zależy od odległości z jakiej słyszymy to urządzenie. W terenie otwartym w odległości 1 m jest to niecałe 89 dB(A) poziomu dźwięku. Warto zapamiętać, że przeliczając moc akustyczną urządzenia na odbierany w odległości

1 m poziom dźwięku, należy zwykle odjąć ok. 10 dB, przy założeniu, że urządzenie stoi w terenie otwartym.

Po drugie, w terenie otwartym poziom dźwięku wyraźnie maleje wraz ze wzrostem odległości – dokładnie przy każdym podwojeniu odległości spadek ten wynosi 6 dB(A). Oznacza to, że nawet głośne urządzenie postawione w otwartym terenie w wystarczająco dużej odległości może nam nie przeszkadzać (znając wartość poziomu dźwięku w odległości 1 m od urządzenia, możemy łatwo wyliczyć o ile zmniejszy się on przy większej odległości).

Po trzecie porównując poziom dźwięku od urządzenia umieszczonego w terenie otwartym (A) do przypadku tego samego urządzenia wstawionego do pomieszczenia (B) widać, że poziom dźwięku jest dużo wyższy w pomieszczeniu niż w terenie otwartym. W pobliżu urządzenia (w odległości 1 m) poziom dźwięku wynosi niecałe 94 dB(A), czyli o 5 dB więcej niż było



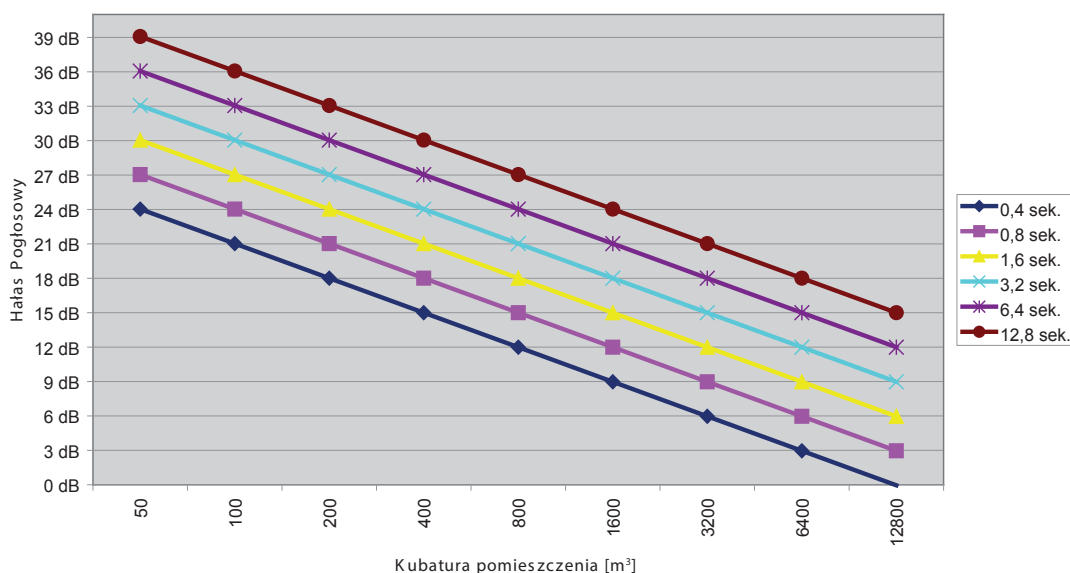
Wykres 1. Wpływ czasu pogłosu na głośność urządzenia, w zależności od odległości odbiorcy od urządzenia

to w terenie otwartym w analogicznej odległości. Równocześnie widać, że w betonowym pomieszczeniu nie występuje tak wyraźny spadek poziomu dźwięku wraz z odległością, jak to miało miejsce w terenie otwartym. Wartość poziomu dźwięku stabilizuje się w odległości ok. 2–3 m i wynosi niecałe 92 dB(A) bez względu na to, jak daleko od urządzenia będzie człowiek. Różnica pomiędzy czarnym wykresem (teren otwarty) a czerwonym wykresem (pomieszczenie) to właśnie hałas pogłosowy, powodowany przez długi czas pogłosu w tym pomieszczeniu. Z wykresu widać, że w odległości 10 m od urządzenia hałas pogłosowy odpowiedzialny jest za wzrost odczuwalnego poziomu dźwięku o 22,5 dB(A) w stosunku do analogicznego urządzenia stojącego w takiej samej odległości, ale w terenie otwartym.

Po czwarte porównując poziom dźwięku od urządzenia umieszczonego w pomieszczeniu betonowym (B) do sytuacji kiedy w pomieszczeniu zastosowano sufit dźwiękochłonny **Rockfon** (C) widać, że redukcja czasu pogłosu z 4,5 sekundy (B) do 1,7 sekundy (C) uzyskana dzięki zastosowaniu sufitu **Rockfon** spowodowała wyraźne obniżenie poziomu dźwięku od urządzenia. W pobliżu urządzenia (w odległości 1 m) poziom dźwięku wynosi w pomieszczeniu z sufitem dźwiękochłonnym 90 dB(A), czyli o 4 dB mniej niż bez sufitu, i jedynie o 1 dB więcej niż

było to w terenie otwartym w analogicznej odległości. Równocześnie widać, że zastosowanie sufitu dźwiękochłonnego daje największe korzyści w dalszej odległości od urządzenia. Przez pierwsze 5–6 m wartość poziomu dźwięku cały czas spada i stabilizuje się dopiero w odległości ok. 6 m na poziomie ok. 81 dB(A). Oznacza to, że dzięki zastosowaniu sufitu dźwiękochłonnego **Rockfon** poziom hałasu pogłosowego obniżył się o ok. 11 dB w stosunku do pomieszczenia w pełni betonowego. Jak widać jest to wartość bardzo zbliżona, do wyznaczonej szacunkowo ze wzoru (1). Z wykresu widać, że w odległości 10 m od urządzenia hałas pogłosowy w pomieszczeniu wyposażonym w sufit dźwiękochłonny odpowiedzialny jest za wzrost odczuwalnego poziomu dźwięku już tylko o 10,0 dB(A) w stosunku do analogicznego urządzenia stojącego w takiej samej odległości, ale w terenie otwartym.

Omówiony powyżej przykład dobrze ilustruje jak będzie zmieniał się poziom dźwięku w pomieszczeniu słabo wytlumionym (czyli np. w pełni betonowym), oraz w pomieszczeniu mocno wytlumionym (czyli tam gdzie zastosowano znaczną powierzchnię materiału dźwiękochłonnego). Nie mniej jednak aby ułatwić ocenę szerszego zakresu pomieszczeń, na wykresie 2 przedstawiono w uproszczony sposób jak zmienia się hałas pogłosowy, w zależności od kubatury i czasu



Wykres 2. Wpływ czasu pogłosu na poziom hałasu pogłosowego, w zależności od kubatury pomieszczenia

pogłosu wnętrza dla pomieszczeń o różnych kubaturach i różnych czasach pogłosu. Wartość w dB(A) pokazana na wykresie 2 oznacza stopień wzmocnienia poziomu dźwięku dla dowolnego źródła hałasu wstawionego do pomieszczenia, w stosunku do poziomu dźwięku tego samego źródła, ale ustawionego w terenie otwartym i słyszalnego z odległości 10 m.

Analizując wykres 2 warto zwrócić uwagę na kilka istotnych zależności.

Po pierwsze, obniżenie czasu pogłosu o połowę skutkuje obniżeniem poziomu hałasu o 3 dB. Jeśli spojrzymy na wzór (1), to zależność tą można łatwiej zrozumieć. Dwukrotne zwiększenie chłonności akustycznej pomieszczenia po adaptacji w stosunku do wersji przed adaptacją powoduje obniżenie poziomu hałasu o 3 dB. Kolejne krotności zwiększenia chłonności powodują dalszą redukcję poziomu hałasu pogłosowego, co pokazano w tabeli 2 poniżej. Dziesięciokrotne zwiększenie chłonności pomieszczenia, takie jak w przypadku opisanego powyżej przykładu pomieszczenia o kubaturze 480 m^3 , redukuje hałas pogłosowy o 10 dB.

Tabela 2. Stopień redukcji hałasu pogłosowego wyznaczony z wzoru (1), w zależności od krotności wzrostu chłonności akustycznej pomieszczenia ($A_{\text{PO ADAPTACJI}}/A_{\text{PRZED ADAPTACJĄ}}$)

Wzrost chłonności akustycznej pomieszczenia $A_{\text{PO ADAPTACJI}}/A_{\text{PRZED ADAPTACJĄ}}$	Redukcja hałasu pogłosowego [dB]
2	3,0 dB
3	4,8 dB
4	6,0 dB
5	7,0 dB
6	7,8 dB
7	8,5 dB
8	9,0 dB
9	9,5 dB
10	10,0 dB

O ile redukcja poziomu hałasu pogłosowego właściwie nie zależy od kształtu pomieszczenia i sposobu rozmieszczenia materiału

dźwiękochłonnego we wnętrzu, o tyle te dwa czynniki mają istotny wpływ na wartość czasu pogłosu w pomieszczeniu. Teoretycznie, dwukrotne zwiększenie chłonności akustycznej pomieszczenia odpowiada obniżeniu czasu pogłosu o połowę. Teoretycznie dziesięciokrotne zwiększenie chłonności akustycznej pomieszczenia odpowiada obniżeniu czasu pogłosu dziesięciokrotnie. Jednak taka sytuacja rzadko występuje w rzeczywistych pomieszczeniach, co widać z analizy pomieszczenia które służyło za przykład dla wykresu 1. Zwiększenie chłonności akustycznej tego prostokątnego, betonowego pomieszczenia o kubaturze 480 m^3 z $12,7 \text{ m}^2$ do $132,7 \text{ m}^2$ (czyli ponad 10krotnie), spowodowało redukcję poziomu hałasu pogłosowego o ok. 11 dB – wartość zbliżoną do wyznaczonej ze wzoru (1) (10,2 dB). Natomiast czas pogłosu spadł zaledwie 2,5krotnie (z 4,5 sekundy do 1,7 sekundy). Przyczyna tak niewielkiego spadku czasu pogłosu leży w sposobie rozłożenia materiału pochłaniającego we wnętrzu oraz fakcie prostopadłościowości pomieszczenia. Otóż jeśli w prostopadłościennym pustym pomieszczeniu, o równoległych, gładkich i twardych ścianach cały materiał dźwiękochłonny zostanie umieszczony tylko na jednej płaszczyźnie (np. tylko na suficie), dźwięk nadal może swobodnie odbijać się w płaszczyźnie poziomej, pomiędzy ścianami, nie zostając pochłonięty w dźwiękochłonnym suficie. Stąd czas pogłosu w tym wnętrzu wyniósł 1,7 sekundy, kiedy w rzeczywistości ilość zastosowanego materiału dźwiękochłonnego była wystarczająca do obniżenia czasu pogłosu aż do wartości 0,6 sekundy! Czas Pogłosu ($RT_{\text{SABINE'A}}$) można to wyliczyć w prosty sposób ze wzoru Sabine'a, znając kubaturę (V) i chłonność akustyczną pomieszczenia (A):

$$\text{Czas Pogłosu } RT_{\text{SABINE'A}} = 0,16 * V / A \text{ [s]} \quad (\text{wzór 2})$$

Podstawiając dane dla omawianego powyżej pomieszczenia do wzoru (2) ($V = 480 \text{ m}^3$ oraz $A = 132,7 \text{ m}^2$) otrzymujemy czas pogłosu równy 0,58 sekundy. Czas pogłosu Sabine'a obrazuje

minimalną wartość czasu pogłosu do jakiej można dojść w danym pomieszczeniu, stosując daną ilość materiału dźwiękochłonnego. Warunkami uzyskania wyliczonej ze wzoru Sabine'a wartości w rzeczywistym pomieszczeniu jest równomierne rozmieszczenie materiału dźwiękochłonnego na wszystkich przegrodach ograniczających to pomieszczenie oraz dobre rozproszenie dźwięku w pomieszczeniu. Oba te warunki nie są spełnione w omawianym pomieszczeniu: materiał dźwiękochłonny skupiony jest jedynie na suficie a dwie pary idealnie równoległych ścian powodują, że dźwięk może odbijać się pomiędzy nimi nie ulegając rozproszeniu. Z tego powodu dokładne obliczenia na modelu 3d pokazują, że czas pogłosu będzie wynosił ok. 1,7 sekundy, a nie 0,58 jak wskazują obliczenia z wykorzystaniem wzoru Sabine'a. Nie mniej jednak wystarczy kilka niewielkich zabiegów, aby uzyskana w skończonym pomieszczeniu wartość czasu pogłosu była zbliżona do tej wyliczonej ze wzoru Sabine'a. Stosując wzór Sabine'a do typowych prostopadłościennych pomieszczeń, należy zawsze pamiętać o jego ograniczeniach. Zalecamy traktować wartość uzyskaną ze wzoru Sabine'a jako minimalną do uzyskania przy maksymalnie sprzyjających warunkach w pomieszczeniu. Zwłaszcza jeśli pomieszczenia te mają pozostać praktycznie bez umeblowania. Natomiast dopiero rozsądne rozplanowanie materiału dźwiękochłonnego na poszczególnych przegrodach pomieszczenia, umeblowanie pomieszczenia albo wprowadzenia elementów rozpraszających dźwięk pozwoli uzyskać tą wartość w rzeczywistości. Zostanie to omówione w kolejnym rozdziale.

Dalsza analiza wykresu 2 pokazuje, że po drugie, ten sam efekt obniżenia hałasu o 3 dB uzyskuje się przez podwojenie kubatury pomieszczenia, ale bez zmiany czasu pogłosu. Można by z tego odnieść wnioski, że wystarczy zwiększyć kubaturę pomieszczenia, a hałas pogłosowy spadnie. Niestety, taki wniosek nie jest uzasadniony, gdyż analizując wykres 2 należy koniecznie pamiętać, że zwiększenie kubatury pomieszczenia, bez

zmian w rodzaju materiałów wykończeniowych, zawsze powoduje zwiększenie czasu pogłosu. Pokazano to w tabeli 3, na przykładzie w pełni betonowych pomieszczeń o różnej kubaturze. Jak widać, czas pogłosu wzrasta o ok. 0,6 s przy podwojeniu kubatury niewielkich pomieszczeń (50 m^3). Natomiast przy dużych pomieszczeniach (6400 m^3) podwojenie kubatury powoduje wzrost czasu pogłosu o ok. 1,8 s.

Tabela 3. Czasu pogłosu w zależności od kubatury pomieszczenia; ściany, sufit i podłoga betonowe; wartość dla 1000 Hz z uwzględnieniem chłonności powietrza

Kubatura [m^3]	Czas Pogłosu [s]
50	2,6 s
100	3,2 s
200	4,0 s
400	4,9 s
800	6,0 s
1600	7,3 s
3200	8,8 s
6400	10,5 s
12800	12,3 s

Jak widać z wykresu 2, dopiero pomieszczenie o kubaturze $12\,800 \text{ m}^3$ i czasie pogłosu 0,4 sekundy, nie będzie powodować wzrostu poziomu hałasu ponad to, co słychać w terenie otwartym. Jednak przy tak dużej kubaturze ($12\,800 \text{ m}^3$) uzyskanie czasu pogłosu o wartości 0,4 sekundy wymagało by zastosowania chłonności akustycznej równej co najmniej 5120 m^2 . Czyli oprócz wyłożenia wszystkich ścian, sufitu i podłogi, duża część materiałów dźwiękochłonnych musiała by również być umieszczona w przestrzeni pomieszczenia. Jest to bardzo mało realna sytuacja, i raczej nigdy nie wystąpi.

Podsumowując, wykres 2 pozwala na oszacowanie efektu zastosowania danej powierzchni materiału dźwiękochłonnego (przeliczonej na całkowitą chłonność akustyczną), a w ostatecznym rachunku na czas pogłosu (stosując np. wzór (2) Sabine'a).

3. Zrozumiałość mowy

Czas pogłosu jest parametrem najczęściej stosowanym do opisu akustyki wnętrza. Mówi dużo o charakterze akustycznym pomieszczenia. Jeśli wewnątrz charakteryzuje się relatywnie krótkim czasem pogłosu, to znaczy, że jest cichsze, panują w nim lepsze warunki do komunikacji słownej (naturalnej czy z użyciem nagłośnienia), a w odbiorze subiektywnym wydaje się przyjemniejsze. Jednak możliwość obiektywnej oceny jak będzie rozumiała mowa w danym pomieszczeniu przez długi czas nie była dostępna.

Jedną z metod obiektywnej oceny zrozumiałości mowy jest „metoda STI” opracowana w latach 70. przez Hermana Steenekena i Tammo Houtgasta, pracujących w holenderskiej firmie TNO. STI jest skrótem od słów Speech Transmission Index, co po polsku tłumaczy się jako Wskaźnik Transmisji Mowy. Autorzy tej metody potrzebowali szybkiego i obiektywnego sposobu pomiaru jakości transmisji mowy, głównie w systemach komunikacji wojskowej takich jak czołgi. Zleceniodawcą tych badań było właśnie NATO, które chciało wiedzieć jak dobrze będzie rozumiała komunikacja pomiędzy załogą czołgu przez jego system komunikacji. Przy tworzeniu metody STI jej autorzy zainspirowali się funkcją modulacji częstotliwości wykorzystywaną w optyce do wyrażania degradacji sygnałów wizualnych. Metoda STI przedstawiona po raz pierwszy w 1980 roku przez Steenekena i Houtgasta [2] wykorzystuje funkcję MTF ale w dziedzinie akustycznej. Wartość wskaźnika transmisji mowy STI (ang. Speech Transmission Index) można otrzymać poprzez wykorzystanie funkcji modulacji częstotliwości. Funkcja MTF (Modulation Transfer Function) uwzględnia zakłócenia i zmiany, którym podlega sygnał na swojej drodze (np. mowa) wysyłany ze źródła a odbierany w innym punkcie pomieszczenia. Zakłóceniami takimi może być między innymi występujący pogłos, wysokie tło akustyczne czy też echo.

Zrozumiałość mowy wyrażona wskaźnikiem transmisji mowy STI służy do oceny zdolności odbiorcy do zrozumienia poszczególnych sylab i słów. Podczas pomiaru lub obliczania STI uwzględnia się zarówno czas pogłosu wnętrza jak i obecny w nim poziom hałasu. STI bierze ponadto pod uwagę zjawisko maskowania dźwięków o wyższej częstotliwości przez te o niższych częstotliwościach. STI jest praktycznie niezależne od języka, którym posługują się użytkownicy wnętrza i daje właściwe odzwierciedlenie zrozumiałości mowy dla większości języków (za wyjątkiem holenderskiego).

Niekiedy w wytycznych spotyka się zalecenie mówiące o współczynniku RASTI. RASTI jest uproszczoną i wyliczaną w szybki sposób wersją STI (RASTI = Rapid STI), i nie powinien być stosowany.

Wskaźnik transmisji mowy STI to parametr określający w sposób obiektywny zrozumiałość mowy w pomieszczeniu. Przybiera wartości w zakresie od 0 do 1 (albo od 0% do 100%), gdzie wyższa wartość oznacza lepszą zrozumiałość mowy. Wartość STI może być określona zarówno za pomocą obliczeń, jak i pomiarów. Technicznie pomiar polega np. na emisji w pomieszczeniu szumu o paśmie zbliżonym do pasma mowy ludzkiej (pasmo oktawowe 125~8000 Hz), modulowanego częstotliwościami zbliżonymi do tych, które występują w naturalnej mowie (0,63 ~ 12,5 Hz). Poziom dźwięku sygnału odpowiada poziomowi dźwięku normalnego głosu. Następnie bada się zmiany głębokości modulacji (czyli zniekształcenie) sygnału w różnych miejscach pomieszczenia. Wartość STI mierzona w danym miejscu pomieszczenia zależy od trzech parametrów: od poziomu tła akustycznego (poziomu obecnego cały czas w pomieszczeniu hałasu), od czasu pogłosu oraz od odległości punktu pomiarowego od źródła sygnału. Im niższy poziom tła akustycznego, krótszy czas pogłosu i im bliżej jest źródło, tym większe wartości przyjmuje STI. Zależność pomiędzy wskaźnikiem STI a subiektywnym odbiorem mowy pokazano w tabeli 4.

Tabela 4. Zależność pomiędzy wskaźnikiem STI a subiektywnym odbiorem mowy

Zrozumiałość mowy	Wartość wskaźnika STI
Doskonała	> 0,75
Dobra	0,60–0,75
Dostateczna	0,45–0,60
Słaba	0,30–0,45
Zła	< 0,30

4. Wymagania normy PN-B 02151-4 dla pomieszczeń do komunikacji słownej

Dla większości pozostałych pomieszczeń norma PN-B 02151-4:2015 określa wymagania w zakresie czasu pogłosu. Dla niewielkiej części pomieszczeń norma określa wymagania w zakresie minimalnej chłonności akustycznej pomieszczenia. W tabeli 5 poniżej podano wyciąg z wymagań normy PN-B 02151-4 dla pomieszczeń gdzie wymaganiem jest czas pogłosu. W tabeli 6 poniżej podano wyciąg z wymagań normy PN-B 02151-4 dla pozostałych pomieszczeń gdzie wymaganiem jest minimalna chłonność akustyczna.

Tabela 5. Wymagania normy PN-B 02151-4 dla pomieszczeń do komunikacji słownej, w części dotyczącej sal i pracowni szkolnych, sal audytoryjnych oraz wykładowych zlokalizowanych w szkołach podstawowych, średnich i wyższych, oraz dla innych pomieszczeń o podobnym przeznaczeniu

Kubatura pomieszczenia V [m ³]	Czas pogłosu T, [s]	Wskaźnik transmisji mowy STI [-]
do 120	≤ 0,6	brak wymagań
od 120 do 250	≤ 0,6	
od 250 do 500	≤ 0,8	≥ 0,6
od 500 do 2000	≤ 1,0	
ponad 2000	określić indywidualnie	określić indywidualnie

Tabela 6. Wymagania normy PN-B 02151-4 dla pomieszczeń do komunikacji słownej, w części dotyczącej sal rozpraw sądowych, sal konferencyjnych, audytoriów i innych pomieszczeń o podobnym przeznaczeniu. Ta część pomieszczeń nie obejmuje pomieszczeń w szkołach (podstawowych, średnich i wyższych)

Kubatura pomieszczenia V [m ³]	Czas pogłosu T, [s]	Wskaźnik transmisji mowy STI [-]
do 500	≤ 0,8	≥ 0,6
od 500 do 2000	≤ 1,0	
ponad 2000	określić indywidualnie	określić indywidualnie

5. Wymagania normy PN-B 02151-4 dla pozostałych pomieszczeń (nie przeznaczonych zasadniczo do komunikacji słownej) gdzie celem jest ograniczanie hałasu pogłosowego

Dla tej grupy pomieszczeń norma PN-B 02151-4:2015 określa wymagania w zakresie czasu pogłosu, a dla części z nich – w zakresie minimalnej chłonności akustycznej pomieszczenia odniesionej do powierzchni pomieszczenia. W tabeli 7 poniżej podano wyciąg z wymagań normy PN-B 02151-4 pomieszczeń gdzie wymaganiem jest czas pogłosu. W tabeli 8 poniżej podano wyciąg z wymagań normy PN-B 02151-4 dla pozostałych pomieszczeń gdzie wymaganiem jest minimalna chłonność akustyczna pomieszczenia.

Tabela 7. Wymagania normy PN-B 02151-4 dla pomieszczeń gdzie celem jest ograniczanie hałasu pogłosowego a wymaganie wyrażono przez maksymalny dopuszczalny czas pogłosu

Lp.	Rodzaj pomieszczenia	Objętość lub wysokość maksymalna pomieszczenia	Czas pogłosu, T_s
1.1	Sale gimnastyczne, hale sportowe i inne pomieszczenia o podobnym przeznaczeniu	$\leq 5\ 000\ m^3$	$\leq 1,5$
1.2		$> 5\ 000\ m^3$	$\leq 1,8$
2.1	Hale basenowe pływalni, parków wodnych i innych obiektów o podobnym przeznaczeniu	$\leq 5\ 000\ m^3$	$\leq 1,8$
2.2		$> 5\ 000\ m^3$	$\leq 2,2$
3	Sale w żłobkach i przedszkolach ^a	–	$\leq 0,4$
4	Świetlice szkolne ^a	–	$\leq 0,6$
5	Sale konsumpcyjne w stołówkach szkolnych ^a	–	$\leq 0,6$
6.1	Czytelnie, wypożyczalnie oraz pomieszczenia księgozbiorów z wolnym dostępem w bibliotekach ^a	$\leq 4,0\ m$	$\leq 0,6$
6.2		$> 4,0\ m$	$\leq 0,8$
7.1	Atria, hole, foyer i inne pomieszczenia o podobnym przeznaczeniu, wielokondygnacyjne strefy komunikacji ogólnej w centrach handlowych	$\leq 4,0\ m$	$\leq 1,2$
7.2		od 4,0 m do 16,0 m	$\leq 1,5$
7.3		$> 16,0\ m$	$\leq 1,8$
8.1	Galerie wystawowe, sale ekspozycyjne w muzeach i inne pomieszczenia o podobnym przeznaczeniu ^b	$\leq 4,0\ m$	$\leq 1,5$
8.2		od 4,0 m do 16,0 m	$\leq 2,0$
8.3		$> 16,0\ m$	$\leq 2,5$
9.1	Terminale pasażerskie portów lotniczych, dworce kolejowe i autobusowe: obszary komunikacji ogólnej, strefy odpraw pasażerów, odbioru bagażu, kas i informacji, poczekalnie	$\leq 4,0\ m$	$\leq 1,2$
9.2		od 4,0 m do 16,0 m	$\leq 1,5$
9.3		$> 16,0\ m$	$\leq 1,8$
10	Gabinety lekarskie i zabiegowe oraz inne pomieszczenia o podobnym przeznaczeniu	–	$\leq 0,8$
11	Pokoje biurowe i inne pomieszczenia o podobnym przeznaczeniu	–	$\leq 0,6$
12	Pokoje nauczycielskie, socjalne i inne pomieszczenia o podobnym przeznaczeniu w szkołach i przedszkolach	–	$\leq 0,6$
13	Sale konsumpcyjne w restauracjach	Określić indywidualnie	
14	Pomieszczenia sakralne, kościoły, kaplice	Określić indywidualnie	
15	Połączone pomieszczenia o różnej objętości i/lub o różnym przeznaczeniu spośród wymienionych powyżej	Określić indywidualnie w przedziale wartości odpowiednim dla połączonych pomieszczeń	
^a Dotyczy pomieszczeń wykończonych,umeblowanych i wyposażonych w sposób typowy dla przeznaczenia, łącznie z ruchomymi meblami i wyposażeniem, bez obecności ludzi. ^b Jeżeli pomieszczenie jest przeznaczone do komunikacji słownej lub instalacji dźwiękowych, należy zapewnić możliwość okresowego zmniejszenia czasu pogłosu, T_s o 0,5 sekundy.			

Tabela 8. Wymagania normy PN-B 02151-4 dla pomieszczeń gdzie celem jest ograniczanie hałasu pogłosowego a wymaganie wyrażono przez minimalną chłonność akustyczną pomieszczenia odniesioną do jego powierzchni

Lp.	Rodzaj pomieszczenia	Chłonność akustyczna, A , pomieszczenia m^2
1	Biura wielkoprzestrzenne, pomieszczenia biurowe typu „open space”, sale operacyjne banków i urzędów, biura obsługi klienta oraz inne pomieszczenia o podobnym przeznaczeniu ^{a, b}	$\geq 1,1 \times S$
2	Centra obsługi telefonicznej ^{a, b}	$\geq 1,3 \times S$
3	Szatnie w szkołach i przedszkolach, w których ubrania zamknięte są w szafkach z pełnymi drzwiami	$\geq 0,6 \times S$
4	Pracownie do zajęć technicznych i warsztaty szkolne	$\geq 0,6 \times S$
5	Sale chorych na oddziałach intensywnej opieki medycznej	$\geq 0,8 \times S$
6	Poczekalnie i punkty przyjęć w szpitalach i przychodniach lekarskich	$\geq 0,8 \times S$
7	Korytarze w przedszkolach, szkołach podstawowych, gimnazjach i szkołach ponadgimnazjalnych	$\geq 1,0 \times S$
8	Korytarze w hotelach, szpitalach i przychodniach lekarskich	$\geq 0,6 \times S$
9	Klatki schodowe w przedszkolach, szkołach, obiektach służby zdrowia i administracji publicznej ^{c, d}	$\geq 0,4 \times S$
10	Kuchnie i pomieszczenia zaplecza gastronomicznego (z wyjątkiem magazynów)	$\geq 0,4 \times S$
11	Połączone pomieszczenia o różnym przeznaczeniu spośród wymienionych powyżej	Określić w przedziale wartości odpowiednim dla połączonych pomieszczeń

^a Dotyczy pomieszczeń wykończonych,umeblowanych i wyposażonych w sposób typowy dla przeznaczenia, bez obecności ludzi.
^b Przy projektowaniu tych pomieszczeń należy uwzględnić dodatkowo szczegółowe wymagania wg PN-EN ISO 3382-3.
^c Nie dotyczy zamkniętych klatek schodowych wyłącznie do ewakuacji lub do celów technologicznych.
^d Jako powierzchnię, S , należy przyjąć iloczyn rzutu powierzchni klatki schodowej i liczby kondygnacji.

6. Wpływ czasu pogłosu i tła akustycznego na poziom zrozumiałości mowy w pomieszczeniach

Określony w normie maksymalny dopuszczalny czas pogłosu pomieszczenia zależy od jego kubatury oraz przeznaczenia. Dla pomieszczeń do komunikacji słownej wymaganie waha się w granicach 0,6 s–1,0 s. Dla pozostałych pomieszczeń, w których celem jest ograniczenie hałasu pogłosowego wymaganie waha się w granicach 0,4 s–2,5 s. Dla wszystkich wymienionych w normie pomieszczeń wymagana wartość czasu pogłosu dotyczy pasm oktaowych

o środkowych częstotliwościach z zakresu 250 Hz–4000 Hz, natomiast dla pomieszczeń do komunikacji słownej wymagania poszerzono również o pasma o środkowych częstotliwościach 125 Hz i 8000 Hz.

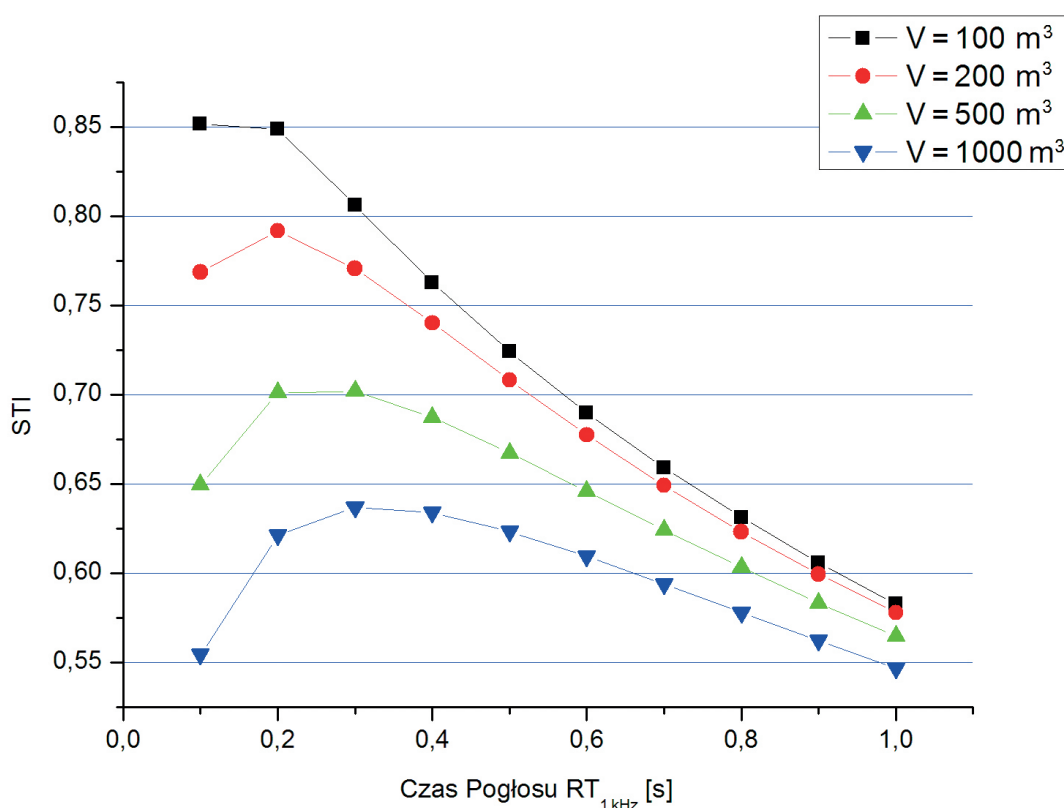
Część z osób może mieć wątpliwości, po co i w jaki sposób obliczać czas pogłosu w paśmie 8000 Hz, skoro praktycznie żaden producent nie podaje w tym paśmie współczynników pochłaniania dla swoich produktów. Pasma 8000 Hz zostało objęte wymaganiami tylko z powodu potrzeby utrzymania spójności zakresów częstotliwości z drugim wymaganym parametrem w pomieszczeniach dla komunikacji słownej – wskaźnikiem STI – który obejmuje zakres aż do 8000 Hz. Natomiast przy obliczaniu czasu

pogłosu w paśmie 8000 Hz, należy przyjąć współczynniki pochłaniania danego materiału jak dla pasma 4000 Hz. Z uwagi na wysokie pochłanianie powietrza w paśmie 8000 Hz, oraz zwykle wyższe współczynniki pochłaniania w paśmie 8000 Hz w stosunku do 4000 Hz (dla większości materiałów), takie podejście jest bezpieczne z punktu widzenia spełnienia wymagań normowych w budynku.

Drugą z wątpliwości, które często się pojawiają w kontekście wymagań w zakresie czasu pogłosu zawartych w normie PN-B 02151-4 jest ustalenie wymagań w normie wg wartości maksymalnej, bez podawania „optymalnego” czasu pogłosu, jak wielu projektantów czyniło to dotychczas. Taki sposób określenia wymagań wynika przede wszystkim z funkcji i wielkości pomieszczeń. Podawanie „optymalnego” czasu pogłosu ma sens dla sal koncertowych czy też dla pomieszczeń o zmiennej funkcji (np. funkcja konferencyjna łączona z funkcją koncertową),

gdzie wartość czasu pogłosu ma zapewnić odpowiednie brzmienie danego rodzaju instrumentu czy też muzyki. Natomiast w przypadku pomieszczeń dla komunikacji słownej, wartość czasu pogłosu jest de facto funkcją wymaganej zrozumiałości mowy w pomieszczeniu – nie może być zbyt długi, gdyż powodowałby obniżenie zrozumiałości mowy. Nic natomiast nie stoi na przeszkodzie, aby czas pogłosu był krótszy, niż wartość wymagana, gdyż skrócenie czasu pogłosu praktycznie zawsze poprawia zrozumiałość mowy. Równocześnie nie ma sensu przetłumiać pomieszczenia, czyli dążyć do uzyskania bardzo krótkiego czasu pogłosu, znacznie niższego niż 0,50 sekundy. Takie podejście generuje duże koszty materiałów dźwiękochłonnych, i nie jest ekonomicznie uzasadnione.

Na wykresie 3 pokazano teoretyczną zależność pomiędzy czasem pogłosu a wskaźnikiem transmisji mowy STI, dla pomieszczeń o różnej objętości, od 100 do 1000 m³. Dla uproszczenia



Wykres 3. Zależność wskaźnika transmisji mowy STI od czasu pogłosu, w polu pogłosowym, dla 1 kHz. Poziom mowy 60 dB@1 m, poziom hałasu tła 40 dB. Obliczenia wg [3]

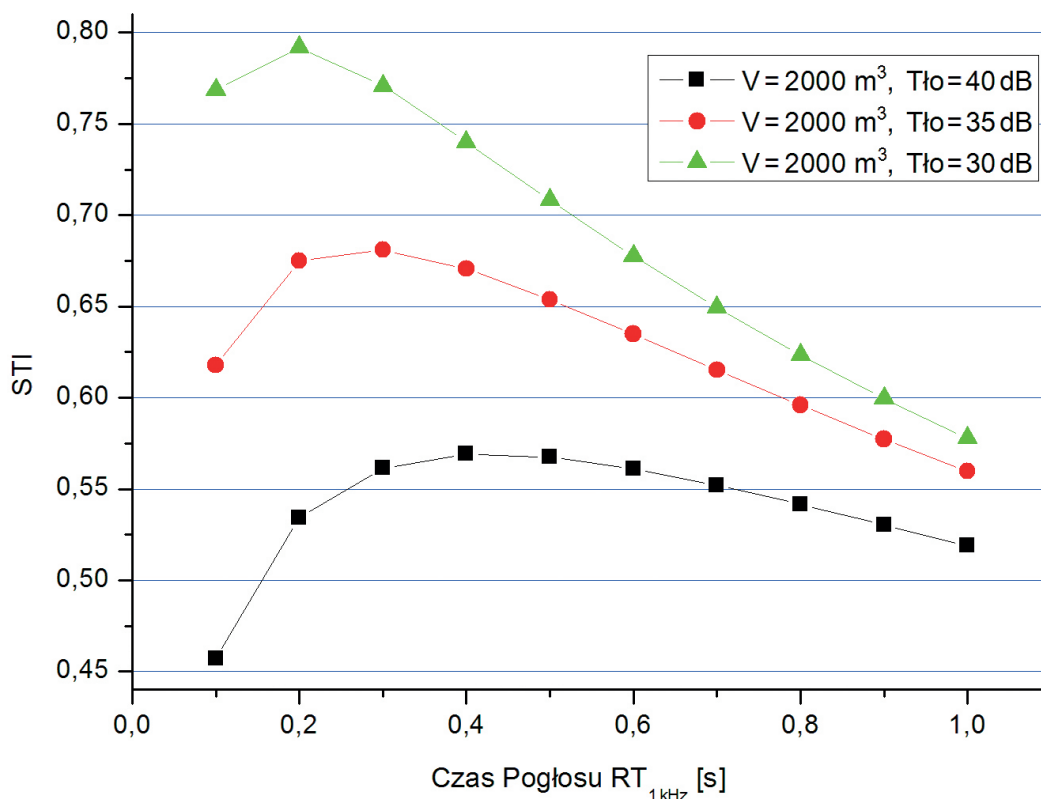
obliczenia wykonano tylko dla 1000 Hz. Do obliczeń przyjęto poziom mowy równy 60 dB w odległości 1 m od mówcy. Tło akustyczne przyjęto na poziomie 40 dB.

Jak widać, wskaźnik transmisji mowy STI rośnie wraz z obniżaniem czasu pogłosu. Widać, że dla analizowanych objętości, wartość STI zaczyna spadać dopiero przy bardzo krótkich wartościach czasu pogłosu, rzędu 0,20~0,40. Widać równocześnie, że dla większych objętości, wartość STI jest zdecydowanie niższa, niż dla mniejszych kubatur, i to bez względu na czas pogłosu. W trakcie projektowania pomieszczeń z uwzględnieniem wymagań zrozumiałości mowy, należy pamiętać, że dla pomieszczeń o niewielkiej objętości, głównym czynnikiem wpływającym na wartość STI jest czas pogłosu. Jeśli w małych pomieszczeniach poziom tła będzie niższy niż ok 40~45 dB(A) wartość STI będzie właściwie determinowana tylko czasem pogłosu. Natomiast wraz ze wzrostem kubatury,

poziom tła zaczyna odgrywać coraz ważniejszą rolę. Na wykresie 4 pokazano jak w pomieszczeniu o objętości 2000 m³ będzie zmieniać się wartość STI wraz ze zmianą czasu pogłosu, dla trzech różnych poziomów tła akustycznego: 40 dB, 35 dB i 30 dB.

Jak widać, w pomieszczeniu o objętości 2000 m³ wskaźnik transmisji mowy STI nadal rośnie wraz z obniżaniem czasu pogłosu, lecz przy wysokim poziomie tła (40 dB), wartość maksymalna STI zaledwie przekracza 0,55, podczas gdy w mniejszych pomieszczeniach przy tym samym poziomie tła oscylowała w zakresie 0,65 do 0,85. Porównując kształt wykresu 3 z wykresem 4 widać, że dla pomieszczenia o objętości 2000 m³, dopiero obniżenie poziomu tła do wartości 35 dB pozwala uzyskać STI > 0,60, i to przy równoczesnej konieczności obniżenia czasu pogłosu poniżej wartości 0,7 sekundy.

Powyższe rozważania dotyczą pola pogłosowego, czyli tych obszarów pomieszczenia, gdzie



Wykres 4. Zależność wskaźnika transmisji mowy STI od czasu pogłosu i poziomu tła akustycznego. Wartości w polu pogłosowym, dla 1 kHz. Poziom mowy 60 dB@1 m, poziom hałasu tła zmienny od 40 do 30 dB. Obliczenia wg [3]

dźwięk odbity dominuje nad dźwiękiem bezpośrednim. W obszarze bliższym źródła, gdzie dominuje dźwięk bezpośredni, wartości STI powinny być jeszcze wyższe.

Jak pokazują symulacje oraz pomiary wykonane w rzeczywistych budynkach, teoretyczne obliczenia – takie jak powyżej – oparte na teorii pola rozproszonego – często przeszacowują wartość STI. Nie mniej jednak zasada i relacje pokazane powyżej, w tym wpływ poziomu tła akustycznego, czasu pogłosu i objętości pomieszczenia na wartość STI, są jak najbardziej prawdziwe. Dlatego w pomieszczeniach przeznaczonych do komunikacji słownej, zwłaszcza takich o większej objętości, zarówno poziom tła akustycznego jak i wartość czasu pogłosu muszą podlegać świadomej kontroli projektanta.

Praktycznym przykładem pokazującym, jak bardzo mogą różnić się komfortem akustycznym zbliżone funkcją pomieszczenia pokazują badania przeprowadzone w dwóch Krakowskich klasach szkolnych.

Pomiary czasu pogłosu, poziomu tła akustycznego i zrozumiałości mowy przeprowadzono w dwóch Krakowskich szkołach podstawowych, w Szkole Podstawowej nr 159 Sióstr

Urszulanek Unii Rzymskiej przy ul. Starowiślnej 7 oraz w Społecznej Szkole Podstawowej nr 4 STO im. Juliusza Słowackiego przy ul. Krowoderskiej 8. Kształt i wygląd obu klas pokazano na ilustracjach 1 i 2 poniżej. Pomiary wykonano zgodnie z metodologią opisaną w normie [1].

Obie klasy charakteryzowały się typowym standardem wykończenia dla klas w szkołach podstawowych. Nie były w nich stosowane żadne dedykowane materiały dźwiękochłonne. Krzesła były twarde (drewniane). W klasie w szkole przy ul. Krowoderskiej było więcej elementów wyposażenia wnętrza, w tym np. niewielki dywan w tylnej części klasy.

Klasa 3b w szkole przy ul. Starowiślnej charakteryzowała się poziomem tła akustycznego mierzonego w godzinach pracy szkoły, równym 40 dB(A), oraz czasem pogłosu $T_{30,500-1000\text{ Hz}} = 1,65\text{ s}$. Kubatura klasy 3b w szkole przy ul. Starowiślnej wynosiła 209 m³. Klasa 1b w szkole przy ul. Starowiślnej charakteryzowała się poziomem tła akustycznego mierzonego w godzinach pracy szkoły, równym 30 dB(A), oraz czasem pogłosu $T_{30,500-1000\text{ Hz}} = 1,0\text{ s}$. Kubatura klasy 1b w szkole przy ul. Krowoderskiej wynosiła 121 m³.



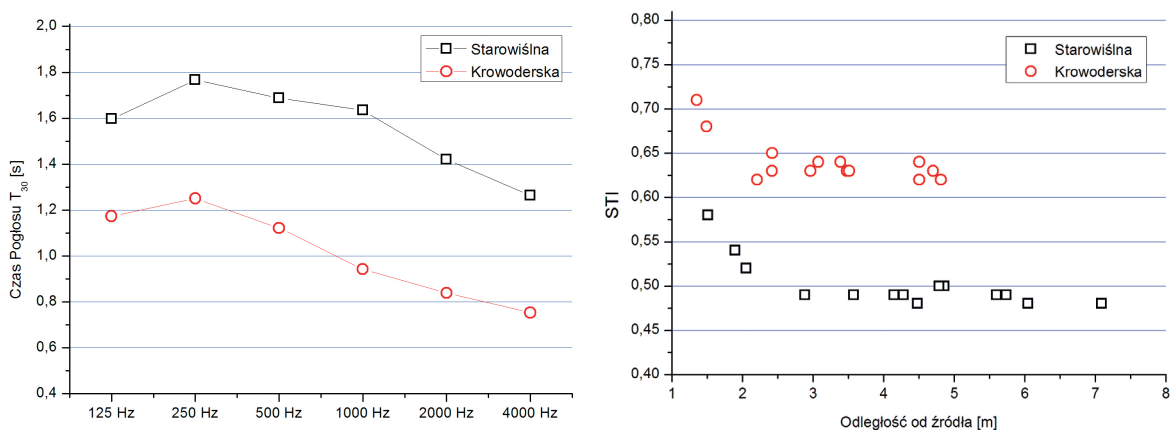
Ilustracja 1. Klasa 3b w Szkole Podstawowej nr 159 Sióstr Urszulanek Unii Rzymskiej przy ul. Starowiślnej 7



Ilustracja 2. Klasa 1b w Społecznej Szkole Podstawowej nr 4 STO im. Juliusza Słowackiego przy ul. Krowoderskiej 8

Z uwagi na swoją funkcję i wielkość, obie klasy powinny – zgodnie z wymaganiami normy PN-B 02151-4 – posiadać czas pogłosu niższy niż 0,60 sekundy (a przyjmując, że w obu salach prowadzone są zajęcia z nauczania początkowego to niższy niż 0,50 sekundy) oraz zrozumiałość mowy wyrażoną wskaźnikiem transmisji mowy równym lub wyższym niż 0,60. Ponadto, obie klasy spełniały wymaganie w zakresie dopuszczalnego poziomu hałasu [5] równe 40 dBA.

Zmierzone w obu klasach wartości czasu pogłosu T_{30} i wskaźnika transmisji mowy STI pokazano na wykresie 5.



Wykres 5. Zmierzone wartości czasu pogłosu T_{30} (po lewej) i STI (po prawej) w obu klasach

Jak widać z wykresu 5, obie klasy nie spełniały wymagań normy PN-B 02151-4 w zakresie maksymalnej wartości czasu pogłosu. Natomiast wymagania w zakresie STI były spełnione tylko w mniejszej z klas (w szkole przy ul. Krowoderskiej). Na wykresie STI dla obu widać wyraźny spadek wartości STI wraz z oddalaniem się od źródła dźwięku (czyli lokalizacji nauczyciela), oraz stabilizację wartości STI w dalszej części Sali. Z wykresów widać, że stabilizacja wartości STI następuje w odległości ok. 2 m od lokalizacji źródła, co jest zapewne skutkiem niewielkiej wielkości obu sal, a co za tym idzie większą liczbą wczesnych odbić dźwięku od przegród otaczających pomieszczenie. Prognozowana w polu pogłosowym wartość wskaźnika transmisji mowy wynosi dla Sali przy ul. Starowiślniej ok. $STI_{1\text{ kHz}} = 0,47$, czyli jest praktycznie równy wartości zmierzonej. Dla Sali przy ul. Krowoderskiej prognozowany

w polu pogłosowym wskaźnik transmisji mowy wynosi ok. $STI_{1\text{ kHz}} = 0,58$, czyli nieco mniej, niż wartość zmierzona.

Szczegółowe analizy otrzymanych wyników potwierdziły, że w przypadku Sali przy ul. Starowiślniej przyczyną niespełnienia wymagań w zakresie zrozumiałości mowy nie jest poziom tła akustycznego, lecz wysoka wartość czasu pogłosu, ponad trzy krotnie wyższa niż dopuszcza norma. Obniżenie pogłosu do wartości wymaganej (0,50 sekundy) pozwoliło by zwiększyć wartość STI w polu pogłosowym do poziomu 0,70 i to bez zmiany poziomu hałasu. W Sali

przy ul. Krowoderskiej, obniżenie czasu pogłosu do wartości wymaganej (0,50 sekundy) pozwoliło by zwiększyć wartość STI w polu pogłosowym do poziomu 0,73. Przy minimalnej odczuwalnej przez człowieka różnicy w wartości STI równej 0,05, tak duża zmiana w poziomie zrozumiałości mowy była by bardzo mocno odczuwalna przez dzieci. Oznacza to, że montaż sufitów dźwiękochłonnych **Rockfon** w istniejących salach szkolnych, w których brak jest takiego materiału jest jak najbardziej wskazane. Natomiast celem przy projektowaniu takich pomieszczeń, zwłaszcza przeznaczonych do nauczania początkowego, powinno być przekroczenie wymaganej wartości STI, gdyż zapewni to lepsze warunki akustyczne dla nauki dzieci.

Ograniczenie czasu pogłosu pomieszczenia, przeznaczonego zwłaszcza do komunikacji słownej jest kluczowym elementem zmierzającym

do zapewnienia w nim pożądanego poziomu komfortu akustycznego. Jak pokazano na przykładzie dwóch krakowskich klas szkolnych, spełnienie wymagań normy [1] w zakresie maksymalnych wartości czasu pogłosu pozwala na uzyskanie bardzo komfortowych poziomów zrozumiałości mowy, pomimo dosyć wysokiego poziomu tła. Dobra zrozumiałość mowy jest szczególnie ważna w nauczaniu początkowym, z uwagi na konieczność opanowania przez dzieci nowych słów i brzmień. Drugim, równie ważnym elementem – zwłaszcza w pomieszczeniach o większej objętości – jest ograniczenie poziomu tła akustycznego. Jak pokazano w artykule, w pomieszczeniach o objętości 1000~2000 m³, ograniczenie czasu pogłosu nie jest wystarczająca do uzyskania wartości wskaźnika transmisji mowy powyżej 0,60. Konieczne jest obniżenie poziomu hałasu. Ten ostatni czynnik będzie również bardzo istotny w pomieszczeniach, gdzie słuchacze są zlokalizowani w dużej odległości od mówcy, a co za tym idzie docierający do nich poziom głosu mówcy zaczyna zbliżać się, a niejednokrotnie spada poniżej obecnego w danym pomieszczeniu tła akustycznego. W takim przypadku – bez względu na wartość czasu pogłosu – zrozumiałość mowy będzie znikoma.

Opublikowana w 2015 r. norma PN-B 02151-4 daje projektantom obiektywne podstawy do świadomego projektowania komfortowych akustycznie pomieszczeń. Spełnienie wymagań tej normy pozwoli na stworzenie lepszych wnętrz oraz w których nauka, zapamiętywanie i poznawanie nowych wyrazów i znaczeń będzie sprawiała mniej problemów, zwłaszcza dzieciom.

7. Projektowanie pomieszczeń dla komunikacji słownej w celu zapewnienia dobrej zrozumiałości mowy

7.1. Kubatura pomieszczenia

Najbardziej istotnym elementem przy projektowaniu pomieszczeń dla komunikacji słownej jest przyjęcie optymalnej kubatury pomieszczenia przypadającej na jednego słuchacza, pozwalającej bez nadmiernych kosztów osiągnąć w danym pomieszczeniu wymagany normą czas pogłosu. W salach dla prezentacji słownych optymalną kubaturę pomieszczenia należy dostosować do liczby osób w pomieszczeniu (liczby miejsc siedzących) w taki sposób, aby na każdą osobę przypadało nie więcej niż 3 do 6 m³ kubatury pomieszczenia. W tabeli 9 dla przykładowych liczb osób planowanych w danym pomieszczeniu, podano zalecane i maksymalne kubatury pomieszczeń.

Tabela 9. Zalecane zakresy kubatury pomieszczeń dla prezentacji słownych, w zależności od planowanej liczby osób w pomieszczeniu (miejsc siedzących)

Planowana liczba osób (miejsc siedzących) w pomieszczeniu	kubatura pomieszczenia [m ³]	
	zalecana	maksymalna
10	30	60
20	60	120
30	90	180
40	120	240
50	150	300
75	225	450
100	300	600
125	375	750
150	450	900
200	600	1200
300	900	1800

W celu uniknięcia problemów przy projektowaniu zaleca się nie przyjmowanie w pomieszczeniach dla prezentacji słownych więcej niż 6 m^3 na jedną osobę (jedno miejsce siedzące), gdyż spowoduje to duże problemy przy ograniczeniu czasu pogłosu oraz obniży zrozumiałość mowy w pomieszczeniu. Natomiast bez problemu można przyjmować kubaturę pomieszczenia poniżej wartości zalecanej, jeśli tylko nie ograniczy to względów funkcjonalnych (minimalna wysokość pomieszczenia, minimalna powierzchnia wraz z komunikacją)

Opisane powyżej zalecenia można sprowadzić do prostej zasady – powierzchnia pomieszczenia powinna być dostosowana do liczby osób (liczby miejsc siedzących) i powiększona jedynie o niezbędną komunikację. Natomiast wysokość pomieszczenia – która staje się w takim przypadku najbardziej istotnym czynnikiem, determinującym akustykę pomieszczenia – powinna być ograniczona do niezbędnego minimum. Stosowanie w pomieszczeniach dla prezentacji słownych zbyt dużych wysokości, prowadzi zawsze do problemów akustycznych.

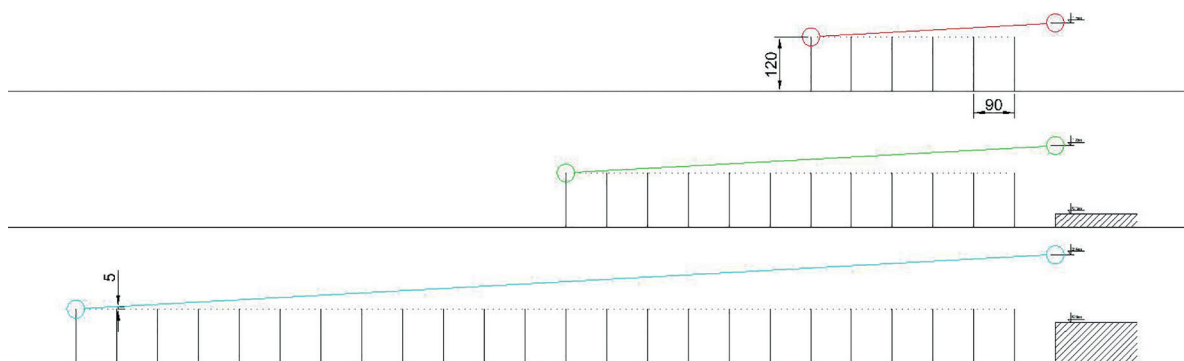
7.2. Kształt pomieszczenia

Przy założeniu, że kubatura pomieszczenia jest poprawnie dobrana, kształt pomieszczenia nie ma decydującego znaczenia. Zwykle dobrze sprawdzają się pomieszczenia o rzucie zbliżonym do prostokąta, gdzie szerokość pomieszczenia

nie przekracza 6–9 m. Istotnym jest unikanie kształtów, powodujących niekorzystne zjawiska akustyczne, takie jak np. ogniskowanie dźwięku – czyli kształtów zbliżonych w rzucie albo przekroju do okręgu, półkola albo elipsy.

Dla zapewnienia poprawnej słyszalności naturalnej mowy, odległość od mówcy do najbliższego słuchacza powinna być możliwie mała (10–15 m), a na pewno nie przekraczać 25 m, gdyż dalej zlokalizowani słuchacze nie będą słyszeć mówcy wystarczająco głośno.

Istotne jest zapewnienie dobrej widoczności mówcy, co przekłada się również na dobrą słyszalność. Kluczowym elementem przy projektowaniu widoczności jest tzw. przewyżka, czyli odległość pomiędzy linią oczu widza siedzącego w poprzedzającym rzędzie a linią łączącą ustalony punkt nad frontem sceny (tzw. punkt fokus) z oczami widza siedzącego w kolejnym rzędzie. Widownia jest projektowana w taki sposób, że przyjęty punkt fokus i wszystko co ponad nim będzie widoczne z każdego miejsca, natomiast to co poniżej niego będzie zasłonięte głowami osób siedzących w poprzedzających rzędach. Przyjęcie punktu fokus jest decydujące o jakości odbioru wizualnego mówcy. Zwykle w salach audytoryjnych zaleca się przyjęcie punktu fokus 60 cm nad poziomem podłogi albo podestu albo frontową krawędzią podestu. Dzięki temu mówca będzie widoczny w całości dla słuchaczy. Jednak takie przyjęcie punktu fokus eliminuje praktycznie możliwość zastosowania płaskiej widowni.



Ilustracja 3. Wpływ przyjęcia punktu fokus na możliwą długość widowni. Punkt fokus na wysokości ust mówcy (1,5 m nad poziomem podłogi) – rozwiązanie nie zalecane, gdyż słuchacze nie będą mogli obserwować całej sylwetki mówcy (np. gestykulacji mówcy), ale jedne jeśli konieczna jest płaska widownia

W typowych salach wykładowych o płaskiej widowni można próbować przyjmować punkt fokus na wysokości ust mówcy – to pozwoli na maksymalne wydłużenie widowni, zachowując przynajmniej słyszalność mówcy oraz widoczność jego ust. Nie jest to na pewno rozwiązanie optymalne. Każdy architekt projektując salę z płaską widownią powinien sam zdecydować w jakim stopniu sylwetka mówcy ma być widoczna.

W salach o płaskiej widowni należy konieczne stosować podest, na którym znajdzie się mówca. Spowoduje to podniesienie go ponad płaszczyznę słuchaczy, co zapewni i dobrą widoczność i lepszą słyszalność jego słów. Bez podestu, minimalna widzialność mówcy, którego usta znajdują się na wysokości 1,5 m nad posadzką (czyli osoby o wzroście ok. 1.7 m) jest ograniczona zaledwie do 3,6 m odległości pomiędzy mówcą a ostatnim rzędem. Jeśli zastosowane zostanie przesunięcie kolejnych rzędów miejsc o $\frac{1}{2}$ szerokości (tak aby głowy w kolejnych rzędach wypadały pomiędzy ramionami rzędów poprzedzających), to maksymalna odległość od ostatniego rzędu do mówcy wzrasta o 1,8 m do 5,4 m. Przy typowej głębokości rzędu (90 cm) daje to maksimum 5–6 rzędów słuchaczy. Podniesienie mówcy, przez zastosowanie podestu wysokości 30 cm zwiększa widzialność o kolejne 5,4 m (kolejne 6 rzędów). Każde kolejne zwiększenie wysokości podestu o 30 cm, pozwala na zaprojektowanie dłuższej Sali. Maksymalna zalecana wysokość podestu to 90 cm (pozwala to ciągle widzieć płaszczyznę podestu przez siedzących słuchaczy, gdyż ich oczy są na wysokości ok. 120 cm). Przy takim podeście długość Sali o płaskiej widowni jest ograniczona do 21,6 m odległości pomiędzy mówcą a ostatnim rzędem. Jest to limit długości dla płaskiej widowni, przy założeniu przesunięcia miejsce o $\frac{1}{2}$ szerokości. Bez przesunięcia miejsc limit długości Sali o płaskiej widowni, przy podeście wysokości 90 cm wynosi 19,8 m.

Jednak widownia o tak przyjętym punkcie fokus pozwala jedynie na obserwację ust mówcy, natomiast jego ręce i gesty nie będą widoczne.

Dlatego w większych pomieszczeniach dla prezentacji słownych często stosowana jest wznosząca się widownia. Są trzy rodzaje takich widowni – o stałym kącie nachylenia, o zmiennym kącie nachylenia (przednia część widowni pod mniejszym kątem, a tylna część pod większym kątem) oraz o płynnie zmieniającym się kącie nachylenia (krzywizna widowni jest wycinkiem hiperboli, a przewyżka jest stała w każdym miejscu). Najczęściej spotykany jest pierwszy rodzaj, w którym przewyżka zmniejsza się ku końcowi widowni. Ten typ najprościej projektować sprawdzając przewyżkę dla ostatniego rzędu – jeśli w ostatnim rzędzie taka widownia spełnia minimalną wartość 10–12 cm (przy fotelach bezpośrednio za sobą), albo 5–6 cm (przy fotelach przesuniętych o $\frac{1}{2}$ szerokości w kolejnych rzędach), to w rzędach bliższych scenie będzie tylko lepsza. Częstym błędem jest sprawdzanie widoczności tylko w pierwszym rzędzie, albo tylko w środku widowni – generuje to problemy z widocznością w ostatnich rzędach. Jednak widownia o stałym kącie nachylenia generuje zwykle bardzo stromą widownię, a co za tym idzie dużą wysokość i kubaturę Sali. Dlatego lepszym rozwiązaniem są zwykle widownie o zmiennym kącie nachylenia albo widownie o stałej przewyżce (czyli o kształcie hiperboli).

Decyzja o układzie widowni jest kluczowa z punktu widzenia dalszych działań, i ma decydujące znaczenie dla kubatury Sali.

7.3. Niezbędna powierzchnia materiałów dźwiękochłonnych

Powierzchnia niezbędnych do zastosowania materiałów dźwiękochłonnych powinna być dostosowana do czasu pogłosu wymaganego wg normy PN-B 02151-4 dla danego rodzaju i objętości pomieszczenia. Minimalną niezbędną ilość materiału można wyliczyć przekształcając wzór Sabine'a (wzór 2) do postaci:

$$A = 0,16 * V / \text{Wymagany Czas Pogłosu [m}^2\text{]} \quad (\text{wzór 3})$$

Pozwoli to na wyliczenie chłonności akustycznej pomieszczenia niezbędnej do osiągnięcia wymaganego czasu pogłosu. Stosując typowe produkty **Rockfon** (**Rockfon** Sonar, **Rockfon** Kolar, **Rockfon** Tropic) uzyskaną ze wzoru 3 ilość metrów kwadratowych należy zwiększyć o 20%, i tą zwiększoną wartość przyjąć jako minimalną wymaganą do zastosowania we wnętrzu w celu osiągnięcia wymaganego normą czasu pogłosu.

7.4. Rozplanowanie materiałów dźwiękochłonnych

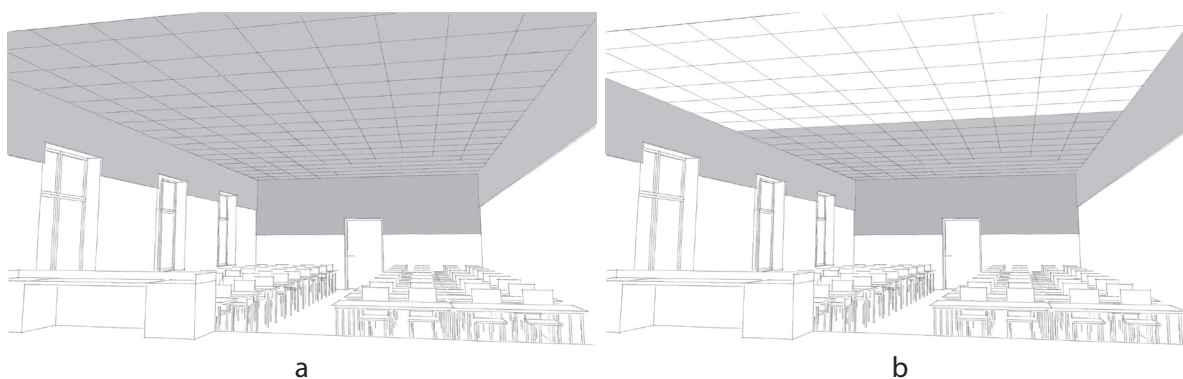
Pamiętając dyskusję z Rozdziału 2, należy zwrócić uwagę, że najbardziej efektywnym sposobem rozplanowania materiałów dźwiękochłonnych jest w miarę równomierne rozłożenie wyliczonej w Rozdziale 7.3 ilości płyt **Rockfon** na suficie i ścianach pomieszczenia. W prostopadłościennych pomieszczeniach dla prezentacji słownych zalecanym sposobem rozłożenia materiału jest umieszczenie materiałów dźwiękochłonnych na każdym na głównych kierunków pomieszczenia, czyli na suficie (kierunek wysokości Sali – Z), na ścianie tylnej (kierunek długości Sali – X) oraz na jednej albo obu ścianach bocznych (kierunek szerokości Sali – Y). Proporcje rozkładu materiałów na poszczególnych kierunkach będą zależne od wymiarów i estetyki pomieszczenia, jednak jako generalne zalecenie można przyjąć następujące wytyczne:

Kierunek długości Sali (X) – pokrycie materiałem dźwiękochłonnym (**Rockfon** Samson, **Rockfon** Boxer) górnej części ściany tylnej, od poziomu 1,2~1,5 (czyli linii ponad głowami ostatnich słuchaczy) do sufitu; ściana za prelewentem powinna pozostać twarda i odbijająca dźwięk (beton, tynk, płyty gipsowo-kartonowe, etc), aby odbijać słowa mówcy w kierunku widowni, zwłaszcza jeśli będzie on zwrócony w jej kierunku w trakcie prelekcji.

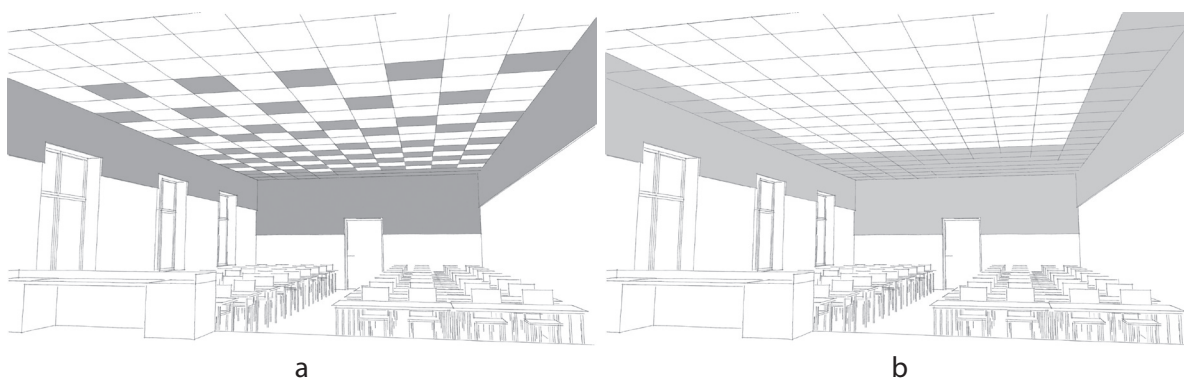
Kierunek szerokości Sali (Y) – pokrycie materiałem dźwiękochłonnym (**Rockfon** Samson, **Rockfon** Boxer, **Rockfon** Kosmos) górnej części ścian bocznych, np. pas wysokości 60–120 cm zlokalizowany na obydwóch ścianach wzdłuż sufitu; dolna część ścian (od 0,80 do 2,0 m nad poziomem posadzki) powinna zwykle pozostać twarda i odbijająca dźwięk (beton, tynk, płyty gipsowo-kartonowe, etc), aby odbijać słowa mówcy w kierunku widowni.

Kierunek wysokości Sali (Z) – pokrycie materiałem dźwiękochłonnym sufitu Sali w tylnej jej części oraz pasów wzdłuż ścian bocznych (**Rockfon** Sonar, **Rockfon** Koral, **Rockfon** Tropic), pokrywając część środkową płytami typu „bas/tenor” (**Rockfon** Sonar Bas, **Rockfon** Koral Sonar). Alternatywnie można pokryć całość sufitu płytami typu „tenor” (**Rockfon** Koral Tenor).

Zastosowanie powyższych zaleceń w typowych salach szkolnych albo wykładowych nie wymaga już stosowania innych materiałów



Ilustracja 4. Rozplanowanie materiałów dźwiękochłonnych w Sali wykładowej. a) materiał dźwiękochłonny na ścianie tylnej i w górnych pasach na ścianach bocznych, cały sufit pokryty materiałem typu „bass”; b) materiał dźwiękochłonny na ścianie tylnej i w górnych pasach na ścianach bocznych, sufit podzielony na część odbijającą dźwięk (z przodu Sali – białe pola) i pochłaniającą dźwięk (z tyłu – ciemne pola)



Ilustracja 5. Rozplanowanie materiałów dźwiękochłonnych w Sali wykładowej. a) materiał dźwiękochłonny na ścianie tylnej i w górnych pasach na ścianach bocznych, sufit pokryty mieszanką materiałów typu „bass” (białe pola) i płyt dźwiękochłonnych (ciemne pola); b) materiał dźwiękochłonny na ścianie tylnej i w górnych pasach na ścianach bocznych, sufit podzielony na część odbijającą dźwięk (część centralna nad widownią - białe pola) i pochłaniającą dźwięk (wokół części centralnej - ciemne pola)

dźwiękochłonnych (np. wyścielane krzesła czy fotele), choć absolutnie nie przeszkadza ich zastosowaniu.

Na ilustracji 4 przedstawiono możliwe rozplanowanie materiału w Sali wykładowej na ok. 100 os. (14 x 6,6 m, wys. 4 m). Przykład a) pokazuje zastosowanie dwóch rodzajów materiałów: ściana tylna (do wys ok 2 m nad posadzką) pokryta jest ściennymi płytami dźwiękochłonnymi **Rockfon**. Podobnie na obu dłuższych bokach Sali zastosowano pasy o wysokości 1,2 m ze ściennych płyt dźwiękochłonnych **Rockfon**. Sufit sali pokryty został płytami typu „bas” (np. Sonar Bas), które pochłaniają tylko niskie częstotliwości dźwięku, a odbijają zakres częstotliwości mowy. W przypadku zastosowania już na ścianach dużej ilości płyt dźwiękochłonnych, dodatkowe zastosowanie na suficie typowych płyt o szerokim spektrum pochłaniania spowodowałoby zbyt mocne wytłumienie Sali. Natomiast połączenie tradycyjnych płyt na ścianach z płytami typu „bas” pozwoliło na uzyskanie wymaganego czasu pogłosu i zrozumiałości mowy bez przetłumienia sali. Przykład b) jest zbliżonym rozwiązaniem, gdzie zwykłe płyty gipsowo-kartonowe zostały zastosowane w przedniej części sufitu, natomiast tył sufitu oraz ściana tylna i boczne pasy zostały pokryte typowymi płytami dźwiękochłonnymi **Rockfon**. Ten przykład pozwala na wzmocnienie

odbicia dźwięku od przedniej części sufitu w kierunku miejsc w ostatnich rzędach.

Na ilustracji 5 przedstawiono dwa kolejne możliwe rozplanowania materiału w tej samej Sali wykładowej co na wcześniejszej ilustracji. Przykład a) pokazuje zastosowanie na suficie mieszanki dwóch rodzajów materiałów: płyt odbijających dźwięk (jasne pola) i typowych pochłaniających dźwięk płyt **Rockfon**. Dzięki takiemu ułożeniu płyt, zmieniając proporcje płyt odbijających do pochłaniających można dowolnie regulować chłonność pomieszczenia i czas pogłosu. Taki układ płyt powoduje również dobre rozproszenie dźwięku. Przykład b) pokazuje zastosowanie centralnej, odbijającej dźwięk części sufitu, oraz umieszczenie materiału dźwiękochłonnego w miejscach gdzie odbicia dźwięku są mniej istotne. Część centralna może być wykonana z płyt gipsowo-kartonowych albo z płyt typu „bas”. Regulując powierzchnię pozostałych obszarów pokrytych płytami dźwiękochłonnymi można dostosować czasu pogłosu do potrzeb.

7.5. Poziom hałasu w pomieszczeniu

Kluczowym z punktu widzenia zrozumiałości mowy jest uzyskany w wykończonym pomieszczeniu poziom hałasu. Poziom hałasu od instalacji i wyposażenia technicznego w pomieszczeniu

dla komunikacji słownej powinien spełniać wymagania normy PN-B 02151-2 [5] i być niższy niż 40 dB(A) w małych salach (do 125 m³), niższy niż 35 dB(A) w salach o średniej wielkości (do 1000 m³) oraz niższy niż 30 dB(A) w dużych salach (powyżej 1000 m³). W miarę możliwości nawet w małych salach (do 125 m³) zaleca się takie projektowanie systemu wentylacji i klimatyzacji oraz urządzeń A/V aby poziom hałasu od nich pochodzący nie przekraczał w Sali 35 dB(A).

8. Projektowanie pomieszczeń z uwagi na ograniczenie hałasu pogłosowego

W pomieszczeniach innych niż przeznaczone dla prezentacji słownych, kluczowe jest umieszczenie takiej ilości materiału dźwiękochłonnego, aby ograniczyć czas pogłosu albo zwiększyć chłonność akustyczną pomieszczenia. W tym celu powierzchnia niezbędnych do zastosowania materiałów dźwiękochłonnych powinna być dostosowana do czasu pogłosu albo minimalnej chłonności akustycznej pomieszczenia wymaganej wg normy PN-B 02151-4 dla danego rodzaju i objętości/wysokości pomieszczenia. Minimalną niezbędną ilość materiału do osiągnięcia wymaganego czasu pogłosu można wyliczyć analogicznie jak opisano to w Rozdziale 7.3 stosując wzór (3). Pozwoli to na wyliczenie chłonności akustycznej pomieszczenia niezbędnej do osiągnięcia wymaganego czasu pogłosu. Stosując typowe produkty **Rockfon** (**Rockfon** Sonar, **Rockfon** Kolar, **Rockfon** Tropic) uzyskaną ze wzoru 3 ilość metrów kwadratowych należy

zwiększyć o 20%, i tą zwiększoną wartość przyjąć jako minimalną wymaganą do zastosowania we wnętrzu w celu osiągnięcia wymaganego normą czasu pogłosu. W miarę możliwości należy starać się rozmieścić wyliczoną ilość płyt **Rockfon** równomiernie na każdym z kierunków pomieszczenia (wysokość, długość, szerokość).

Minimalną konieczną do zastosowania chłonność akustyczną można szacunkowo wyliczyć dzieląc wartość wymaganą **A** wyznaczoną z Normy przez współczynnik α_w wybranego materiału **Rockfon**.

Andrzej Kłosak
©2016 archAKUSTIK

Literatura

1. PN-B-02151-4:2015-06 Akustyka budowlana. Ochrona przed hałasem w budynkach. Wymagania dotyczące warunków pogłosowych i zrozumiałości mowy w pomieszczeniach oraz wytyczne prowadzenia badań;
2. Steeneken, H.J.M., and Houtgast, T., 1980. „A physical method for measuring speech transmission quality,” J. Acoust. Soc. Am. 67, s. 318–326.
3. T. Houtgast, H.J.M. Steeneken and R. Plomp, „Predicting Speech Intelligibility in Rooms from the Modulation Transfer Function. I. General Room Acoustics,” Acustica 46, s. 60–72 (1980).
4. H. Kuttruff: Room Acoustic (wydanie 5). Nowy Jork: Spon Press, 2009. ISBN 0-203-87637-7
5. PN-87/B-02151/02 – „Akustyka budowlana. Ochrona przed hałasem pomieszczeń w budynkach. Dopuszczalne wartości poziomu dźwięku w pomieszczeniach.”
6. Bradley, J.S. “Predictors of speech intelligibility in rooms”, NRC Canada, Vol 80, n°3, 1986

O autorze

dr inż. arch. Andrzej K. Kłosak

architekt, konsultant akustyczny, założyciel pracowni archAKUSTIK (archakustik.pl), specjalizującej się w akustyce budowlanej i architektonicznej (doktorat z akustyki na Wydziale Architektury Politechniki Krakowskiej); adiunkt Instytutu Materiałów i Konstrukcji Budowlanych PK, członek Komitetu Technicznego ds. Akustyki Architektonicznej przy PKN. Autor i współautor ponad 30 publikacji z dziedziny architektury i akustyki budynków. Współpracował jako konsultant akustyczny m.in. przy projektach: nowej polskiej ambasady w Berlinie, hali Koszyki w Warszawie, Międzynarodowego Centrum Kongresowego w Katowicach, Wystawy Stałej w Muzeum Historii Żydów Polskich w Warszawie, Muzeum Sztuki Współczesnej w Warszawie, Polskiego Pawilonu na XIII Biennale Architektury w Wenecji, dworca Łódź Fabryczna, nowego kompleksu ASP w Warszawie, Wydziału Radia i Telewizji Uniwersytetu Śląskiego, teatru Fredreum na Zamku Kazimierzowskim w Przemyślu; Małej Sali Teatru Starożytności w Krakowie; remontu sali „Hołdu pruskiego” w krakowskich Sukiennicach; Sali Koncertowej im. Krzysztofa Pendereckiego w Radomiu; Sądu Apelacyjnego w Krakowie i Sądu Rejonowego w Siedlcach.

ROCKFON FUSION®

ZWYCIĘSKI DESIGN O UNIKALNEJ TOŻSAMOŚCI

ROCKFON Fusion to biały, designerski sufit opracowany z myślą o połączeniu estetyki z funkcjonalnością.

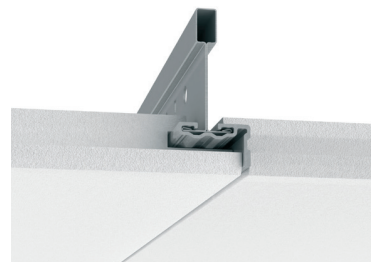
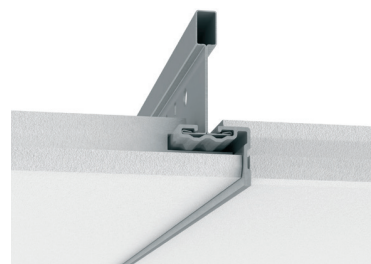
ROCKFON Fusion charakteryzuje się wysublimowanym, minimalistycznym stylem dzięki zastosowaniu wąskiego, anodowanego, aluminiowego profilu, który daje efekt przecięcia czystej, białej powierzchni sufitu. Sufit uzyskuje unikalną tożsamość. Wygląda spokojnie i spójnie, a jednocześnie dynamicznie dzięki podkreślającej kierunek, charakterystycznej długiej linii.

Więcej na www.rockfon.pl



Vinder
Den Danske Designpris 2007

ROCKFON Fusion otrzymał nagrodę
Danish Design Award



Andrzej K. Kłosak

Akustyka wnętrz

Wydawca:

Małopolska Okręgowa Izba Architektów RP

30-110 Kraków, ul. Kraszewskiego 36

tel./fax: 12 427 26 47

e-mail: malopolska@izbaarchitektow.pl

Redakcja:

Andrzej K. Kłosak, Marek Tarko, Witold Zieliński

Opracowanie graficzne okładki: MPOIA RP

Skład i łamanie: Jerzy Najder

Druk:

Drukarnia UNIDRUK

ul. Bronowicka 117, 30-121 Kraków

