

**STUDIUM PODYPLOMOWE „INŻYNIERIA RUCHU DROGOWEGO”
OCENY ODDZIAŁYWAŃ RUCHU DROGOWEGO NA ŚRODOWISKO
(ORD)**

**Prognozowanie poziomu hałasu w otoczeniu dróg oraz
skrzyżowań i skuteczność ekranowania dróg**

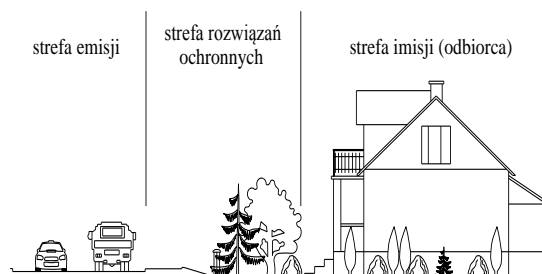
Dr inż. Krystian Woźniak

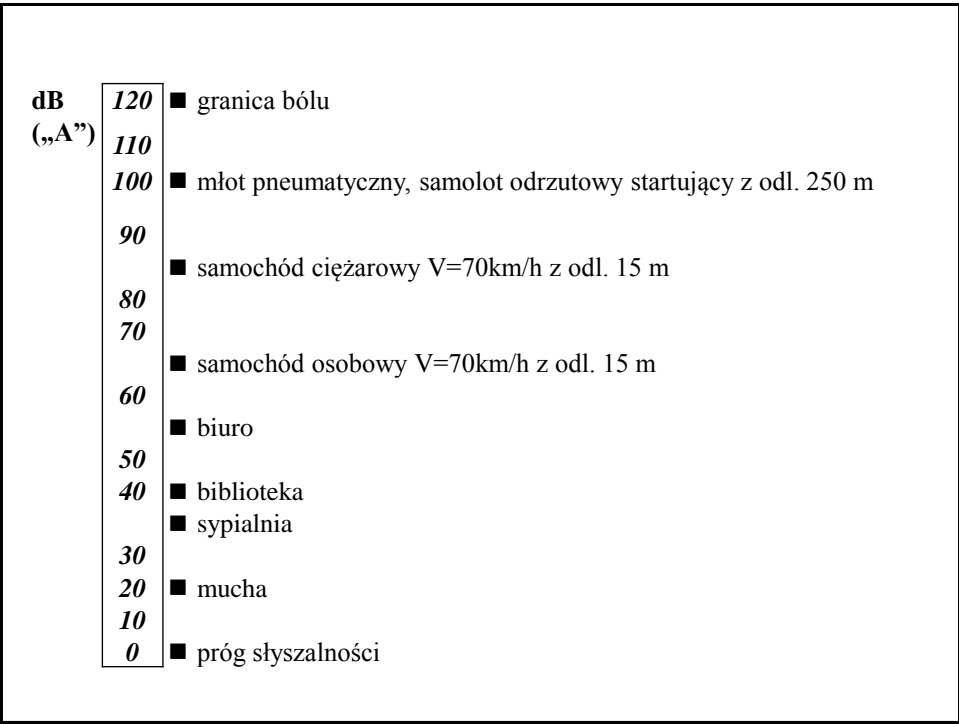
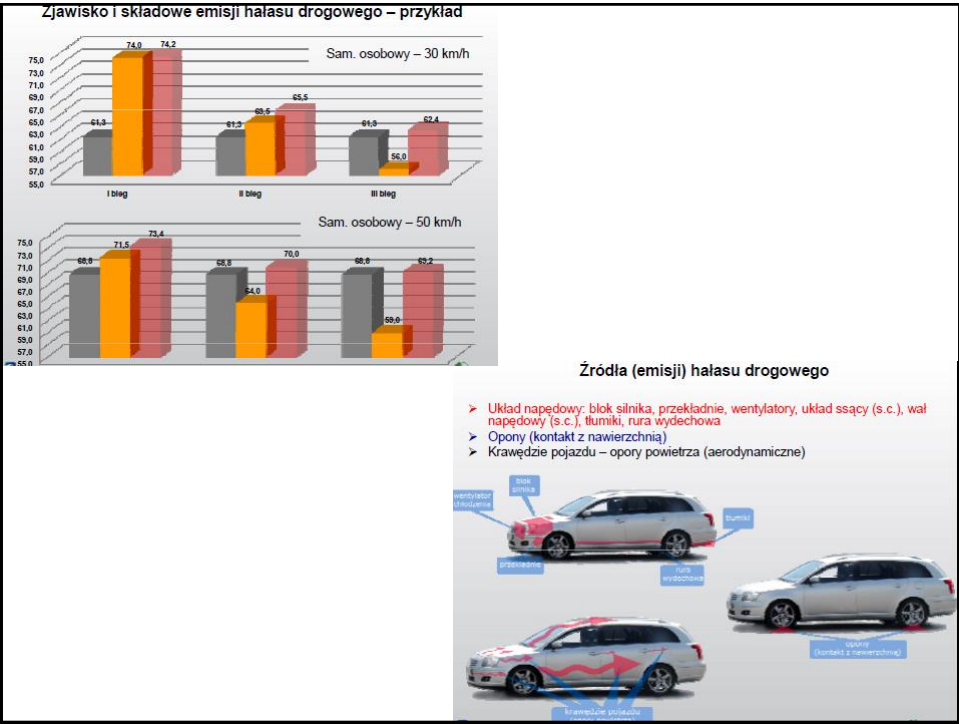
Zjazd 2 piątek 13.03.2020 r.

Kraków, Politechnika Krakowska

Prognozowanie redukcji poziomu hałasu przez ekran akustyczny

Metody i sposoby ochrony przed hałasem drogowym





Mierniki poziomu dźwięku.



ZAKRESY SZKODLIWOŚCI HAŁASU

30 - 65 dB

reakcje psychiczne: nerwowość i zaburzenia snu

65 - 80 dB

reakcje wegetatywne:
wzrost nerwowości, szybkie zmęczenie, spadek wydajności
pracy, błędne reagowanie, podatność na powodowanie
wypadków drogowych

80-120 dB

uszkodzenia narządów słuchu

>120 dB

mechaniczne uszkodzenia słuchu (głuchota)

Poziom równoważny

Poziom równoważny, zdefiniowany wzorem poniżej, jest jednym z podstawowych wskaźników (parametrów) liczbowych opisu klimatu akustycznego, ważony w decybelach jest to skorygowany według krzywej korekcyjnej A poziom ciśnienia akustycznego ciągłego ustalonego dźwięku, który w określonym przedziale czasu T ma taki sam średni kwadrat ciśnienia akustycznego, jak analizowany dźwięk o poziomie zmiennym w czasie.

Chcąc podać inną definicję poziomu równoważnego można napisać, że wartość L_{Aeq} to taki stały w rozważanym okresie czasu poziom hałasu (dźwięku), dla którego ilość energii wypromieniowanej przez źródło dźwięku w tym czasie jest równoważna energii wypromieniowanej pochodzącej od źródła o zmiennym poziomie.

Poziom równoważny

$$L_{Aeq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \quad [\text{dB}]$$

gdzie: L_{Aeq} – równoważny poziom dźwięku A wyrażony w decybelach, w czasie T [dB],

p_0 – ciśnienie akustyczne odniesienia $p_0 = 2 \times 10^{-5}$ [Pa],

$p(t)$ – chwilowa wartość ciśnienia akustycznego skorygowana według charakterystyki

A [Pa],

T – czas, dla którego określony jest poziom równoważny [s].

Graficzne przedstawienie poziomu równoważnego L_{Aeq}

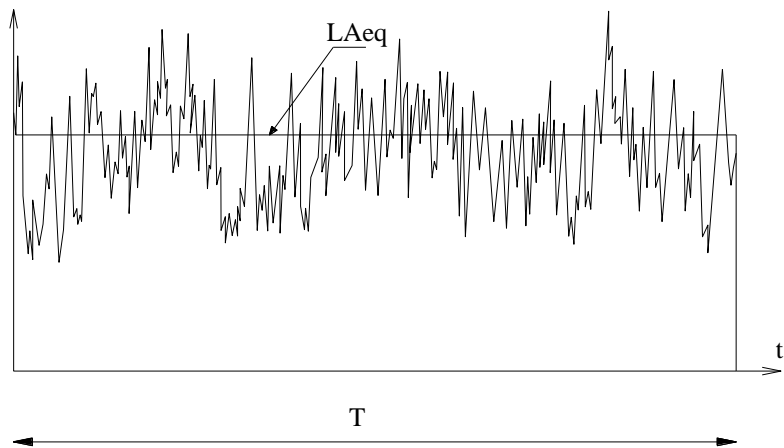


Tabela. Dopuszczalne poziomy hałasu w środowisku w zależności od źródeł hałasu dla ocen krótkoterminowych.

Dopuszczalny poziom hałasu w [dB]			
Drogi lub linie kolejowe ¹⁾		Pozostałe obiekty i działalność będąca źródłem hałasu	
$L_{Aeq D}$ przedział czasu odniesienia równy 16 godzinom	$L_{Aeq N}$ przedział czasu odniesienia równy 8 godzinom	$L_{Aeq D}$ przedział czasu odniesienia równy 8 naj- mniej korzyst- nym godzinom dnia kolejno po sobie następującym	$L_{Aeq N}$ przedział czasu odniesienia równy 1 naj- mniej korzystnej godzinie nocy
50	45	45	40
55	50	50	40
60	50	55	45
65	55	55	45

Lp -	Rodzaj terenu	Dopuszczalny poziom hałasu w [dB]			
		Drogi lub linie kolejowe ¹⁾		Pozostałe obiekty i działalność będąca źródłem hałasu	
		$L_{Aeq D}$ przedział czasu odniesienia równy 16 godzinom	$L_{Aeq N}$ przedział czasu odniesienia równy 8 godzinom	$L_{Aeq D}$ przedział czasu odniesienia równy 8 najmniej korzystnym godzinom dnia kolejno po sobie następującym	$L_{Aeq N}$ przedział czasu odniesienia równy 1 najmniej korzystnej godzinie nocy
1	a) Strefa ochronna "A" - uzdrowiska b) Tereny szpitali poza miastem	50	45	45	40
2	a) Tereny zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej b) Tereny zabudowy związanej ze stałym lub czasowym pobytem dzieci i młodzieży ²⁾ c) Tereny domów opieki społecznej d) Tereny szpitali w miastach	61	56	50	40
3	a) Tereny zabudowy mieszkaniowej wielorodzinnej i zamieszkania zbiorowego b) Tereny zabudowy zagrodowej c) Tereny rekreacyjno-wypoczynkowe ³⁾ d) Tereny mieszkaniowo-usługowe	65	56	55	45
4	Tereny w strefie śródmiejskiej miast powyżej 100 tys. mieszkańców ⁴⁾	68	60	55	45

Nieobowiązujące /

Strefa emisji:

Pojazd i kierowca:

- konstrukcja pojazdu
- styl jazdy kierowców

Sposób projektowania dróg i jej elementów:

- lokalizacja drogi i jej otoczenie
- przekrój poprzeczny drogi
- nawierzchnia drogi

Organizacja ruchu:

- natężenie ruchu pojazdów
- struktura pojazdów
- płynność ruchu
- koncentracja ruchu na określonych drogach
- uspokojenie ruchu

Strefa imisji:

Lokalizacja, ukształtowanie oraz izolacja budynku:

- sytuowanie budynków w większej odległości od drogi (100-150m)
- zmiana przeznaczenia funkcji budynku
- wykonanie ekranów na elewacji budynku
- domknięcia (ekrany) ścian szczytowych
- wymiana okien
- izolacja ścian budynków

Strefa rozwiązań ochronnych:

Urządzenia na drodze źródło hałasu - odbiorca:

- ekrany akustyczne
- wały ziemne
- kombinacja wału ziemnego z ekranem akustycznym i zielenią
- zabudowa niewrażliwa
- pasy zieleni
- formy pośrednie (żywopłoty, ogrodzenia...)

Ekrany akustyczne

Ekrany akustyczne to najczęściej stosowany sposób poprawy klimatu akustycznego. Ekran akustyczny jest to obiekt zaprojektowany na ogół wyłącznie w celu ochrony przed hałasem terenów i obiektów budowlanych na ten hałas wrażliwych (w szczególności terenów i budynków mieszkalnych).

Realizację tego celu uzyskuje się za pomocą:

- Usytuowania ekranu na drodze rozprzestrzeniania się dźwięku między źródłem, a obserwatorem (odbiorcą),
- Przesłonięcia odbiorcy w ten sposób, że nie dociera do niego fala akustyczna biegnąca bezpośrednio ze źródła.

Do zalet ekranów akustycznych można zaliczyć:

- małe zajęcie terenu
- łatwość montażu
- dobra efektywność (pod warunkiem ich prawidłowego rozwiązania)
- akceptowalne koszty (koszt ekranu za 1mb waha się w granicach 1000-3000zł)
- estetyka (niektórych) rozwiązań.

Natomiast do wad ekranów akustycznych można zaliczyć:

- tworzenie efektu bariery
- trudności z obsługa bezpośredniego otoczenia drogi
- tworzenie monotonnego krajobrazu wzdłuż drogi
- utrudnienie rozwiązań odwodnienia
- ograniczenie widoczności

Podział ekranów akustycznych

Ze względu na różny charakter zabudowy oraz warunki terenowe występują rozmaite formy i kształty ekranów akustycznych. Możemy je podzielić ze względu na:

Własności akustyczne:

- odbijające (odbijają fale dźwiękową w kierunku źródła)
- odbijająco - rozpraszające (posiadają dodatkowo własności rozpraszające)
- pochłaniające (posiadają kształt podnoszący chłonność, wypełnione materiałami absorpcyjnymi, możliwość osadzenia roślin)

Podział ekranów akustycznych

Materiał, z jakiego zbudowano ekran:

- metalowe (rys. 1)
- betonowe (rys. 2)
- ceramiczne
- drewniane (rys. 3)
- szklane (rys. 4)
- z tworzyw sztucznych (rys. 5)
- inne



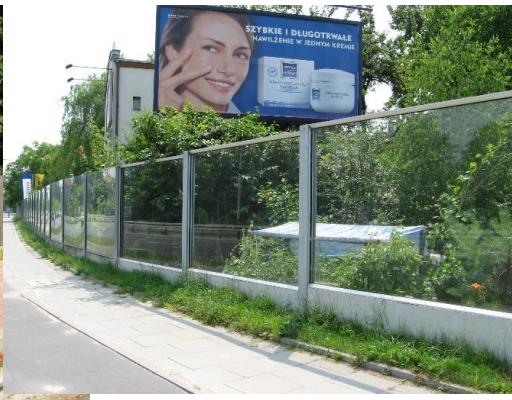
Rys. 1. Ekran akustyczny o konstrukcji metalowej.



Rys. 2. Ekran akustyczny o konstrukcji betonowej.



Rys. 3. Ekran akustyczny o konstrukcji drewnianej



Rys. 4. Ekran akustyczny o konstrukcji szklanej.

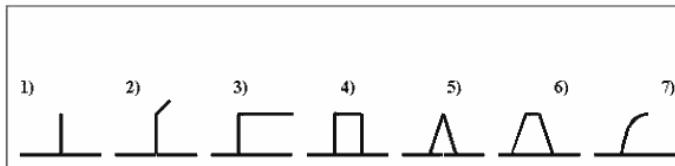


Rys. 5. Ekran akustyczny o konstrukcji z tworzywa sztucznego.

Podział ekranów akustycznych

Kształt przekroju poprzecznego:

- pionowe (1)
- pionowe nadwieszane (2)
- poziome (3)
- prostopadłościennie (4)
- klinowe (5)
- trapezowe (6)
- łukowe (7)



Rys. 6. Podział ekranów ze względu na kształt przekroju poprzecznego

Podział ekranów akustycznych

Kształt rzutu pionowego:

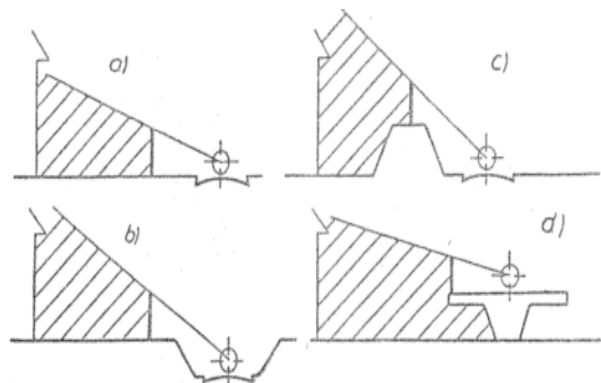
- prostoliniowe
- krzywoliniowe (względy akustyczne, estetyka, warunki terenowe, usuwanie monotonii)

Sposób montowania;

- segmentowy (składany z kolejnych dużych segmentów o katalogowej wielkości)
- modułowy (składany z kolejnych elementów o małym module)

Warunki terenowe w otoczeniu drogi, ekrany możemy podzielić na:

- wolnostojące (a)
- ekranujące drogę prowadzoną w wykopie (b)
- stanowiące uzupełnienie naturalnego lub sztucznego nasypu (wzniesienia) (c)
- ekranujące drogę prowadzoną na estakadzie (d)



Rys. 7. Podział ekranów ze względu na warunki terenowe w otoczeniu drogi.

Skuteczność ekranu akustycznego

Skuteczność ekranu zależy od tego, ile energii akustycznej emitowanej przez źródło przedostanie się poza ekran i dotrze do punktu odbioru (odbiorcy). Do liczbowej oceny skuteczności można używać prostej zależności:

$$L_A = L_{A1} - L_{A2} \text{ [dB]}$$

gdzie:

L_{A1} – poziom dźwięku w danym punkcie obserwacji, przed zainstalowaniem ekranu, [dB]

L_{A2} – poziom dźwięku w tym samym punkcie, po zainstalowaniu ekranu, [dB]

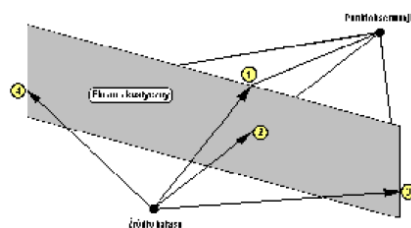
Ekran jest wtedy skuteczny, gdy różnica ta jest większa od zera, (im większa, tym lepsza), najlepiej – jeżeli jest możliwie duża.
Praktycznie można spodziewać się skuteczności ekranu akustycznego rzędu:

$L_A > 10$ dB - skuteczność bardzo wysoka,
 $6 \text{ dB} < L_A < 10$ dB - skuteczność zadawalająca,
 $4 \text{ dB} < L_A < 6$ dB - skuteczność „tolerowana”
 $0 \text{ dB} < L_A < 4$ dB - ekran wątpliwej jakości (praktycznie nie skuteczny).

Warunkiem koniecznym, aby ekran stanowił skuteczną ochronę przed hałasem jest by odbiorca znajdował się w obszarze cienia akustycznego. Obszar cienia nie jest zupełnie pozbawiony hałasu, ponieważ fale dźwiękowe, załamując się na krawędzi ekranu, wnikają w ten obszar.

Drogi przenikania fal akustycznych od źródła do odbiorcy:

- Bezpośrednio przez konstrukcję ekranu (stopień przenikania dźwięku przez konstrukcję ekranu zależy od jego masy oraz konstrukcji elementów, z którego ekran zbudowano) (2)
- Załamanie fal akustycznych na:
 - Górnej krawędzi ekranu (1)
 - Bocznych krawędziach ekranu (3,4)



Rys. 8. Drogi przenikania fal akustycznych od źródła do odbiorcy

Zjawisko załamania powoduje zmniejszenie się energii akustycznej niesionej przez fale, co odbiera się organem słuchu jako obniżenie poziomu dźwięku. Im głębiej w cieniu akustycznym umieści się odbiorcę, tym kąt załamania fal akustycznych na krawędzi ekranu będzie większy, a więc większy stopień obniżenia poziomu hałasu. Warunek znalezienia się odbiorcy w cieniu akustycznym określić można wzorem:

$$h_{obs} \leq \frac{r_{obs}}{r_e} \cdot (h_e - h_z) + h_z$$

gdzie:

h_{obs} – wysokość punktu obserwacji, [m]

h_e – wysokość ekranu akustycznego, [m]

h_z – wysokość źródła dźwięku, [m]

r_{obs} – odległość horyzontalna punktu obserwacji od źródła, [m]

r_e – odległość horyzontalna ekranu od źródła, [m]

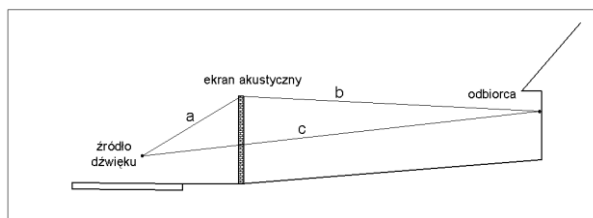
Spełnienie powyższego warunku oznacza, iż ochroną przed hałasem za pomocą ekranu akustycznego powinna być objęta raczej zabudowa niska (maksymalnie 2 - 4 kondygnacji).

Teoretyczna skuteczność ekranu zależy od parametru zwanego liczbą Fresnela. Liczba ta zależy zarówno od geometrii ekranu, jak też częstotliwości. Jednak dla źródła liniowego, jakim jest droga określa się ją z przybliżonej zależności:

$$N = 5,88 \cdot d$$

gdzie:

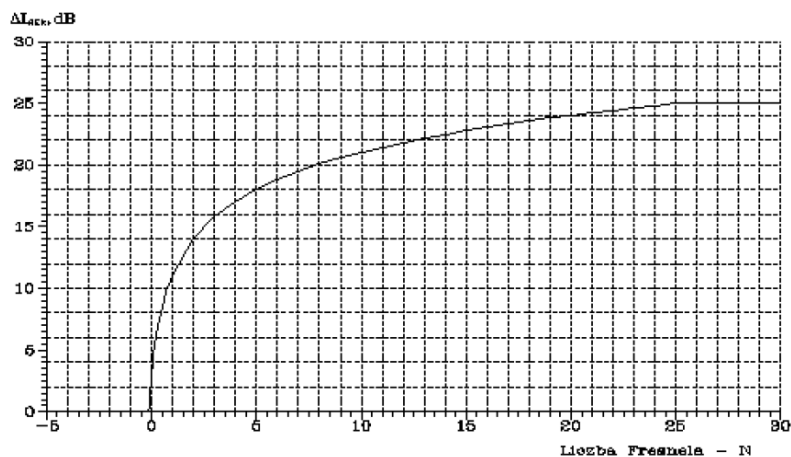
d - parametr określany jako różnica dróg fali załamanej na krawędzi ekranu i fali bezpośredniej, $d = a + b - c$ (rys 9)



Rys. 9. Przebieg fali załamanej na krawędzi ekranu i fali bezpośredniej

Skuteczność ekranowania La określa się przy pomocy nomogramu przedstawionego na rys. 10, przy zastosowaniu skali logarytmicznej. Wyznaczona tak skuteczność odnosi się do sytuacji wyjściowej, teoretycznej dla ekranu, o założonej nieskończonej długości. Tak więc wartość ta stanowi punkt wyjścia do oszacowania skuteczności ekranów rzeczywistych, dla których jest ona zwykle mniejsza niż wynikająca z teorii.

Analizując skuteczność rozwiązania ekranu akustycznego należy rozpatrywać go jako element zagospodarowania przestrzeni, którego własności zależą od tej przestrzeni. Może się okazać, że rozwiązanie dobrze się sprawujące w jednych warunkach, przeniesione w inne zawodzi. Stąd też bardzo istotną fazą jest analiza koncepcji i projektu ekranu. Błędy popełnione na tym etapie są później trudne do wyeliminowania.



Rys. 10. Ekranowanie przez liniowe źródło hałasu dla ekranu nieskończenie długiego

Dla zapewnienia pożądanej skuteczności ekranu, należy rozpatrzyć następujące zagadnienia:

- miejsce posadowienia ekranu (lokalizacja)
- parametry geometryczne (wysokość, długość)
- materiał, z którego ekran został wykonany

Podstawowe czynniki wpływające na praktyczną wartość skuteczności ekranowania

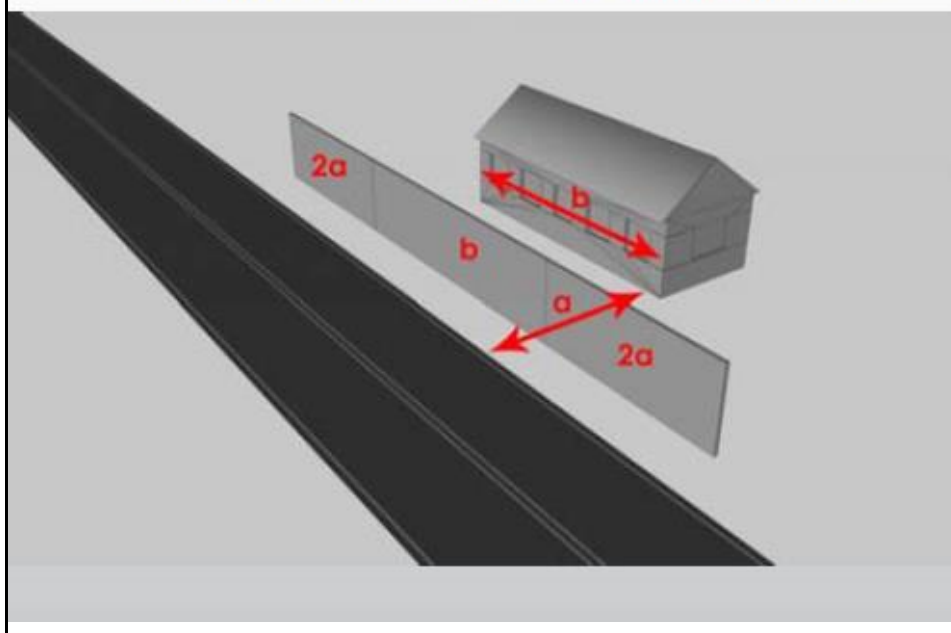
Lokalizacja ekranu

Ekran powinien być zlokalizowany maksymalnie blisko źródła hałasu lub maksymalnie blisko obiektu chronionego. Pierwsze rozwiązanie jest lepsze, ponieważ nie ogranicza terenu i przestrzeni w bezpośredniej odległości od zabudowy. Najczęściej jednak usytuowanie ekranu jest narzucone z góry, poprzez ograniczenia techniczne, terenowe i ekonomiczne. Aby zwiększyć skuteczność ekranu, projektant może manewrować jedynie jego wysokością.

Wysokość ekranu

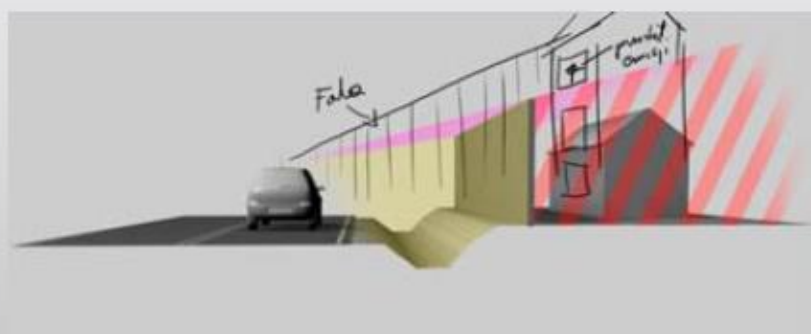
Jednym z podstawowych parametrów ekranu akustycznego jest jego wysokość. Wysokość ekranu decyduje o tym, czy budowlane obiekty chronione znajdują się w obszarze cienia akustycznego. Wartość skuteczności ekranu związana ze stopniem załamania się fali akustycznej na jego krawędzi – patrz kąty α_1 oraz α_2 .

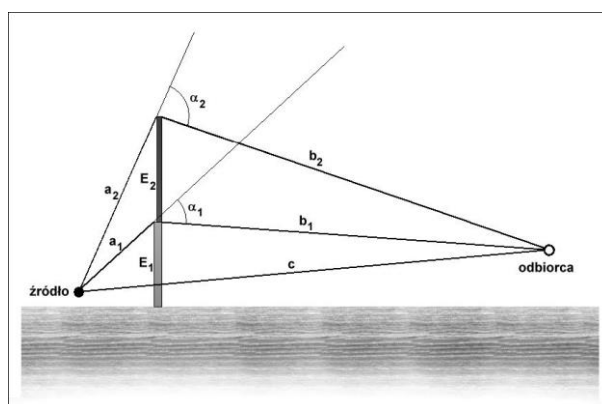
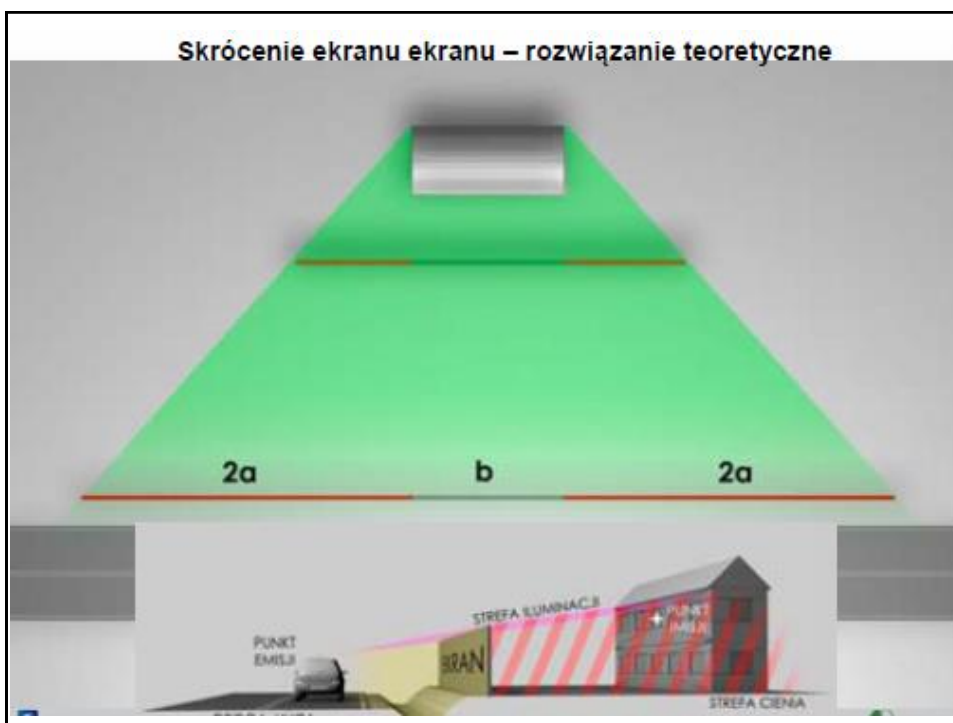
Orientacyjne wyznaczanie długości ekranu akustycznego



Orientacyjne wyznaczanie wysokości ekranu

(uwaga na zagięcie fal dźwiękowych na krawędzi ekranu)





Rys. 11. Załamanie się fali akustycznej w zależności od wysokości ekranu

Oktagon

Nowoczesnym sposobem zwiększania skuteczności ekranu akustycznego bez zwiększania jego wysokości jest oktagonalny (ośmiokątny) reduktor hałasu. Jest to urządzenie, które zainstalowane na górze ekranu, pozwala na dalszą redukcję poziomu natężenia dźwięku dzięki absorpcji hałasu ugiętego na górnej krawędzi ekranu. Specyficzny kształt geometryczny jak również odpowiednich materiałów czyni „oktagon” efektywnym i praktycznym sposobem redukcji hałasu. Przy tej samej wysokości ekranu dołączony do niego „oktagon” poprawia efekt tłumienia o średnią wartość 3dB. Przy użyciu „oktagonu” możliwe jest zredukowanie nawet o 1 metr całkowitej wysokości ekranu przy zachowaniu tej samej efektywności jakie daje konwencjonalny ekran.



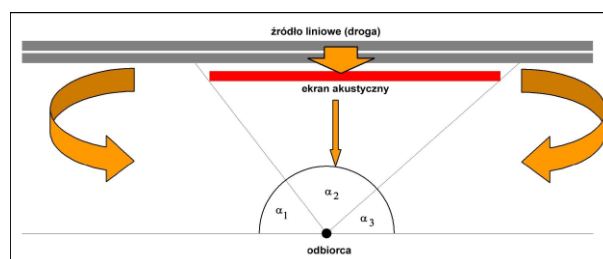
Rys. 12. Przykład 1 zastosowania „oktagonu”



Rys. 13. Przykład 2 zastosowania „oktagonu”

Długość ekranu

Do chronionego obszaru za ekranem mogą przedostawać się fale akustyczne również spoza krawędzi bocznych. Im krótszy ekran, tym poziom dźwięku tych fal będzie większy. Szczególnie istotne jest to zjawisko w przypadku, gdy mamy do czynienia ze źródłem liniowym. W niektórych przypadkach może się okazać, iż ekran jest na tyle krótki, że nie ma on żadnego znaczenia dla zmniejszenia hałasu u odbiorcy. Ekran o teoretycznej skuteczności 10dB, lecz zbyt krótki, oddziałuje praktycznie bez efektu. Schemat tego zjawiska pokazano na rys. 14 (schemat) oraz rys. 15 (rozwiązanie praktyczne).



Rys. 14. Przenikanie fali akustycznej przez krawędzie boczne ekranu – schemat

Rys. 15. Przenikanie fali akustycznej przez krawędzie boczne ekranu – rozwiązanie praktyczne



Występowanie fali odbitych

Pole akustyczne w przestrzeni (w środowisku) może mieć charakter:

Pola fali swobodnie biegnącej,

Pola dyfuzyjnego.

Pole fali swobodnie biegnącej charakteryzuje się wyraźnie dominującym dźwiękiem, pochodzącym od określonego źródła i z określonego kierunku, przy stosunkowo niewielkim poziomie zakłóceń innymi sygnałami akustycznymi. Ekrany akustyczne lokalizuje się przede wszystkim na drodze propagacji tego typu fali. Pole dyfuzyjne natomiast powstaje wtedy, gdy mamy odczyniania z dużą liczbą fal odbitych dobiegających z różnych kierunków.

Materiał

Ekrany akustyczne budowane są ze specjalnych materiałów i elementów, zapewniających uzyskanie właściwych parametrów akustycznych. W większości przypadków są to rozwiązania panelowe (panele) o konstrukcji sandwich'owej. Rozwiązania elementów do budowy ekranu muszą mieć określoną izolacyjność akustyczną oraz własności pochłaniające. Stopień przenikania dźwięku przez konstrukcje ekranu (izolacyjność akustyczna) zależy od jego masy. Gęstość powierzchniowa ekranu „m” powinna spełniać warunek:

$$m > 3 \cdot 10^{\frac{(L_{dop} - L_a - 10)}{14}}$$

gdzie:

L_{dop} – dopuszczalny poziom hałasu, [dB]

L_A – poziom dźwięku przed zainstalowaniem ekranu, [dB].

Generalnie izolacyjność akustyczna nie powinna być mniejsza niż:

- ok. 20 dB w przypadku ekranu lekkiego, którego rzeczywista skuteczność jest nie większa niż 7-10 dB,
- ok. 25 dB dla ekranów masywnych, o skuteczności obniżenia poziomu dźwięku powyżej 10 dB.

Parametry izolacyjności akustycznej i charakterystyki pochłaniania dźwięku dobiera się z uwzględnieniem aktualnych i przewidywanych warunków w miejscu posadowienia ekranu (jest to jedna z istotniejszych faz projektowania). Nie dopuszczalna jest zmiana tych elementów (w tak zwanym projekcie wykonawczym, zastępczym) bez wykonania ponownie pełnej analizy akustycznej, czyli całego projektu ekranu poza projektem konstrukcyjnym.

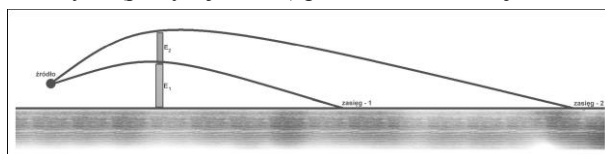
Uwarunkowania związane z warunkami meteorologicznymi

Skuteczność ekranowania nie jest wartością stałą w czasie. Zmienia się ona, tak zresztą jak warunki rozprzestrzeniania się dźwięku, wraz z zaistnieniem różnych kombinacji warunków pogodowych.

W niektórych przypadkach może się okazać, iż dobrze zaprojektowany ekran akustyczny wykazuje czasem obniżenie wartości skuteczności niemal do zera.

Ma to miejsce dla:

- Specyficznych zestawów wartości gradientów temperatury i gradientów wiatru,
- Dalszych (powyżej 100 m) punktów obserwacji.



Rys. 16. Schemat przebiegu zjawiska zakrzywania się „promienia dźwiękowego”, dla dwóch wysokości ekranu

Uwarunkowania związane z warunkami meteorologicznymi

Rozpatrywane zakrzywienie powoduje znaczne zmniejszenie skuteczności ekranu od pewnej odległości (zasięgu). Zdarzają się takie dni, gdy ocena skuteczności ekranu na skutek specyficznego zestawu parametrów pogodowych, jest bardzo niska. Nie jest to błąd projektowania, choć sygnały o występowaniu tego zjawiska należy kontrolować. Należy dążyć do możliwie dużej wysokości ekranu. Wtedy zasięg zmniejszenia się skuteczności ekranu podczas inwersji temperaturowej jest duży. Natomiast ekrany niskie, poniżej 3,5 – 4 m są bardzo „czułe” na zmiany warunków atmosferycznych. Z uwagi na zasięgi obniżania się skuteczności ekranów akustycznych z uwagi na warunki atmosferyczne nie powinno się rozpatrywać ochrony przy pomocy ekranów akustycznych obiektów oddalonych o więcej niż 150 – 200 m od źródła.

Metody projektowania efektywności ekranów akustycznych

Przez wiele lat, opracowanych zostało w różnych ośrodkach zajmujących się problematyką ekranową, kilka metod obliczeniowych efektywności ekranowania. Pośród najpopularniejszych z nich wymienić należy metody: Rettingera, Radfearna, VDI-270, Delany’ego czy metoda Meakawy. Również w warunkach krajowych w ramach badań własnych w Instytucie Ochrony Środowiska opracowana została metodyka prognozowania hałasu drogowego i obliczania skuteczności ekranowania przez dr inż. Kucharskiego. Dzięki dynamicznemu rozwojowi elektroniki i informatyki w ostatnich 15 latach obecnie dysponuje się bardzo dużymi mocami obliczeniowymi oraz znacznie lepszymi programami pozwalającymi prognozować klimat akustyczny już nie tylko lokalnie ale również w ujęciu globalnym. Obecnie tworzy się cyfrowe modele terenu nie tylko dla wybranych fragmentów miast, ale również dla całych miast czy aglomeracji miejskich. Powstały liczne komercyjne programy umożliwiające prognozowaniu hałasu w środowisku. Pośród nich wymienić należy: SoundPlan, Cadna, Mithra, Immi i inne.

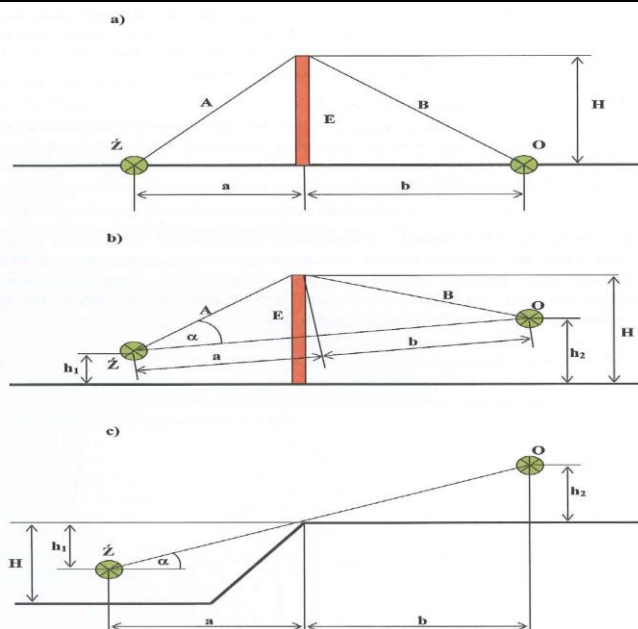
Metoda geometryczna

W pierwszym przypadku, gdy spełniony jest warunek $a \geq h$ oraz $b \geq a$, efektywność akustyczną ekranu można obliczyć metodą geometryczną wykorzystując zależność:

$$\Delta L_E = 10 \log(20X) \quad (2.8)$$

gdzie: $X = \frac{h^2}{\lambda \cdot a}$,

λ - długość fali dźwiękowej padającej na ekran, [m].



Rys. 2.3. Różne przypadki usytuowania źródła hałasu względem obserwatora: a) źródło dźwięku i obiekt chroniony znajdują się na tym samym poziomie, b) źródło dźwięku i obiekt chroniony znajdują się na różnych wysokościach, c) źródło dźwięku znajduje się w wykopie

2.8. Metoda Rettingera

$$\Delta L_E = 10 \log[(0,5 - x)^2 + (0,5 - y)^2] - 3, \quad (2.9)$$

gdzie:

x, y – funkcje parametryczne zależne od parametru geometrycznego w , które wyznacza się z następujących zależności:

- a) gdy źródło i obserwator znajdują się na tym samym poziomie, parametr geometryczny w wyznacza się ze wzoru:

$$w = \frac{1,4h}{\sqrt{\lambda}} \cdot \sqrt{\frac{a+b}{ab}} \quad (2.10)$$

- b) gdy źródło i obserwator znajdują się na różnych poziomach, parametr geometryczny w wyznacza się ze wzoru:

$$w = \left[h + \frac{b(h-h_1)}{a} - h_2 \right] \sqrt{\frac{2a \cos \alpha}{\lambda \cdot b(a+b)}} \quad (2.11)$$

- c) gdy źródło dźwięku znajduje się w wykopie, parametr geometryczny w wyznacza się ze wzoru:

$$w = \left[\frac{bh_1}{a} - h_2 \right] \sqrt{\frac{2a \cdot \cos \alpha}{\lambda b(a+b)}} \quad (2.12)$$

Funkcje parametryczne x i y wyznacza się na podstawie znajomości parametru geometrycznego w z tablicy całek Fresnela zamieszczonej niżej.

Wartości całek Fresnela wykorzystywanych w metodzie Rettingera

w	x	y	w	x	y
0	0	0	4,5	0,5261	0,4342
0,1	0,1	0,0005	4,6	0,5673	0,5162
0,2	0,1999	0,0042	4,7	0,4914	0,5672
0,3	0,2994	0,0141	4,8	0,4338	0,4968
0,4	0,3975	0,0334	4,9	0,5002	0,435
0,5	0,4923	0,0647	5,0	0,5637	0,4992
0,6	0,5811	0,1105	5,05	0,545	0,5442
0,7	0,6597	0,1721	5,1	0,4998	0,5624
0,8	0,723	0,2493	5,15	0,4553	0,5427
0,9	0,7648	0,3398	5,2	0,4389	0,4969
1	0,7799	0,4383	5,25	0,461	0,4536
1,1	0,7638	0,5365	5,3	0,5078	0,4405
1,2	0,7154	0,6234	5,35	0,549	0,4662
1,3	0,6386	0,6863	5,4	0,5573	0,514
1,4	0,5431	0,7135	5,45	0,5269	0,5519
1,5	0,4453	0,6975	5,5	0,4784	0,5537
1,6	0,3655	0,6389	5,55	0,4456	0,5181
1,7	0,3238	0,5492	5,6	0,4517	0,47
1,8	0,3336	0,5408	5,65	0,4926	0,4441
1,9	0,3944	0,3734	5,7	0,5385	0,4595
2	0,4882	0,3434	5,75	0,5551	0,5049
2,1	0,4882	0,3743	5,8	0,5298	0,5461
2,2	0,6363	0,4557	5,85	0,4819	0,5513
2,3	0,6266	0,5531	5,9	0,4486	0,5163
2,4	0,555	0,6197	5,95	0,4566	0,4688
2,5	0,4574	0,6192	6,0	0,4995	0,447
2,6	0,389	0,55	6,05	0,5424	0,4689
2,7	0,3925	0,4529	6,1	0,5495	0,5165
2,8	0,4675	0,3915	6,15	0,5146	0,5496
2,9	0,5626	0,4101	6,2	0,4676	0,5398
3,0	0,6058	0,4963	6,25	0,4493	0,4954
3,1	0,5616	0,5818	6,3	0,4476	0,4555
3,2	0,4664	0,5933	6,35	0,524	0,456
3,3	0,4058	0,5192	6,4	0,5496	0,4965
3,4	0,4385	0,4296	6,45	0,5292	0,5398
3,5	0,5326	0,4152	6,5	0,4826	0,5454
3,6	0,588	0,4923	6,55	0,452	0,5078
3,7	0,542	0,5750	6,6	0,469	0,4631
3,8	0,4481	0,5656	6,65	0,5161	0,4546
3,9	0,4223	0,4752	6,7	0,5467	0,4915
4	0,4984	0,4204	6,75	0,5302	0,5362
4,1	0,5738	0,4758	6,8	0,4831	0,5436
4,2	0,5418	0,5633	6,85	0,5939	0,506
4,3	0,4494	0,544	6,9	0,4732	0,4624
4,4	0,4383	0,4622	6,95	0,5207	0,4591

2.9. Metoda Meakawy

Według metody Meakawy, akustyczną efektywność ekranu oblicza się z wyrażenia:

$$\Delta L_E = 5 + 20 \log \frac{\sqrt{2\pi|N|}}{\operatorname{tgh} \sqrt{2\pi|N|}}; \quad (2.13)$$

gdzie:

N – liczba Fresnela, którą wyznacza się ze wzoru:

$$N = \frac{2\delta}{\lambda}, \quad \delta = A + B - d$$

Oznaczenia A , B , d zgodne z rys.2.3.

2.10. Metoda Rathego

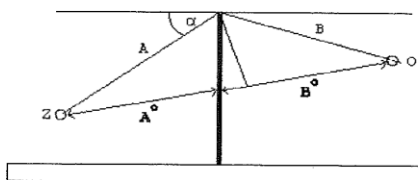
Według metody Rathego akustyczną efektywność ekranu dla wszystkich trzech przypadków usytuowania źródła względem obserwatora można wyznaczyć ze wzoru:

$$\Delta L_E = 13 + 10 \log(N); \quad \text{gdzie: } N \geq 1 \quad (2.14)$$

gdzie:

$$N = \frac{2(A + B - A^0 - B^0)}{\lambda} \text{ - liczba Fresnela.}$$

Oznaczenia występujące w liczbie Fresnela wyszczególniono na schemacie pokazanym na rys. 2.4.



Rys. 2.4. Oznaczenia występujące we wzorze Rathego: A^0 – odległość źródła dźwięku od ekranu, B^0 – odległość obserwatora od ekranu

W opisanych metodach obliczeniowych, ekran akustyczny jest traktowany jako prostopadłościenna cienka pionowa płyta o nieskończonej długości.

Metoda PK (Politechniki Krakowskiej)

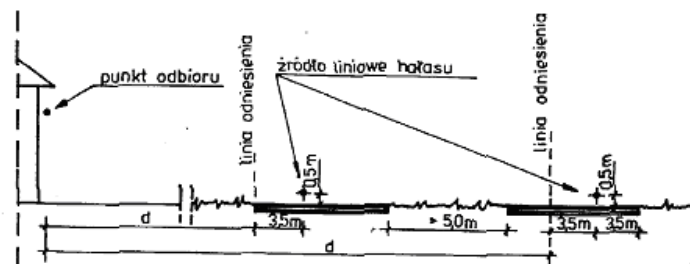
Poziom hałas drogowy zależy od następujących czynników:

- ♦ parametry ruchu drogowego:
 - natężenie ruchu w obu kierunkach [P/h];
 - prędkość średnia potoku ruchu [km/h];
 - udział pojazdów ciężkich;
- ♦ parametry drogi:
 - pochylenie drogi;
 - rodzaj nawierzchni;
- ♦ odległość odbiorcy od jezdni;
- ♦ rodzaj pokrycia terenu;
- ♦ ekranowanie (przeszkody na drodze rozchodzenia się dźwięku pomiędzy drogą a odbiorcą);
- ♦ obecność urządzeń odbijających;

Założenia metody prognozowania hałasu drogowego opracowanej w IIdiK Politechniki Krakowskiej

Podstawowe założenia wykorzystanej procedury obliczeniowej to:

- ♦ ruch pojazdów stanowi liniowe źródło dźwięku,
- ♦ lokalizacja źródła jest określona na wysokości 0,5m nad jezdnią, w odległości 3,5m od krawędzi jezdni, bądź pasa ruchu,

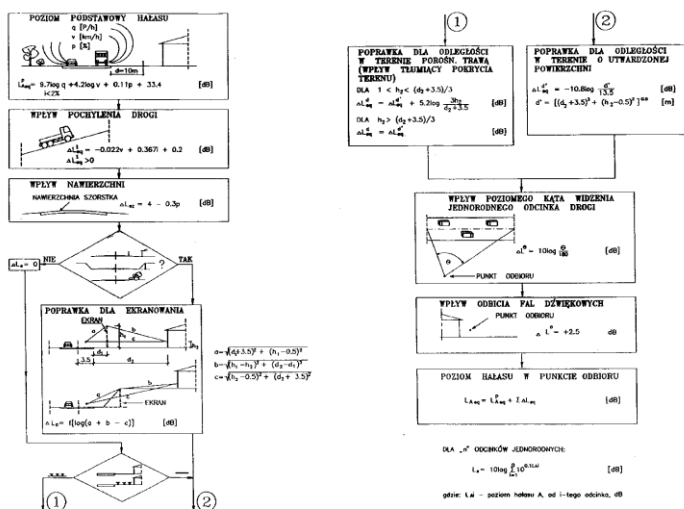


Lokalizacja liniowych źródeł hałasu na drodze dwujezdniowej.

Założenia metody prognozowania hałasu drogowego opracowanej w IIdiK Politechniki Krakowskiej

- ♦ przedmiotem obliczeń prognostycznych jest równoważny poziom hałasu w średniej godzinie pory dnia lub nocy,
- ♦ metoda zakłada dwustopniową procedurę obliczeń – poziom podstawowy w odległości 10m od krawędzi jezdni (poziom u źródła, czyli poziom emisji) oraz poziom hałasu w punkcie odbioru,
- ♦ poziom podstawowy zależy od parametrów ruchu i pochylenia drogi oraz rodzaju nawierzchni i nie zależy od czynników związanych z rozchodzeniem się hałasu od drogi.
- ♦ poziom hałasu u odbiorcy w strefie **tzw. imisji** jest określany poprzez korektę poziomu podstawowego uwzględniającą: odległość i położenie odbiorcy w odniesieniu do drogi, ekranowanie, rodzaj pokrycia terenu, cechy geometryczne drogi oraz poziomy kąt widzenia drogi z punktu odbioru.

SCHEMAT OBLICZANIA POZIOMU HAŁASU DLA JEDNORODNEGO ODCINKA DROGI



Schemat metody obliczania poziomu hałasu

Poziom podstawowy hałas

Wpływ parametrów ruchu na poziomy podstawowy L^p_{Aeq}

Parametry ruchu wpływające na podstawowy poziomy hałas L^p_{Aeq} :
prędkość średnia potoku pojazdów v [km/h] określana zgodnie z równaniem

$$v = v_l \times u_l + v_c \times u_c \quad [\text{km/h}]$$

gdzie: v_l - średnia prędkość chwilowa potoku pojazdów lekkich [km/h],

v_c - średnia prędkość chwilowa potoku pojazdów ciężkich [km/h],

u_l - udział w ruchu pojazdów lekkich [-],

u_c - udział w ruchu pojazdów ciężkich [-].

- ♦ natężenie ruchu pojazdów w obu kierunkach q [P/h],
- ♦ procentowy udział p pojazdów hałaśliwych w ruchu.

$$L^p_{Aeq} = 9,7 \log q + 4,2 \log v + 0,11p + 33,4 \quad [\text{dB}]$$

Wpływ pochylenia i rodzaju nawierzchni drogowej

$$\Delta L^i_{eq} = -0,022v + 0,367i + 0,2 \quad [\text{dB}]$$

gdzie: ΔL^i_{eq} - poprawka ze względu na pochylenie podłużne [dB],

v - średnia prędkość potoku pojazdów [km/h],

i - pochylenie podłużne [-].

Powyższą poprawkę należy stosować, gdy wartość pochylenia podłużnego $i \geq 2\%$.

Jest to poprawka, która przyjmuje wartości dodatnie. Istnieje jednak możliwość wystąpienia ujemnych wartości poprawek dotyczy to sytuacji, niewielkich pochyłeń i dużych prędkości średnich potoku pojazdów. W przypadku wystąpienia wartości ujemnych należy przyjąć wartość $\Delta L^i_{eq} = 0$ [dB].

W przypadku wystąpienia nawierzchni specjalnie uszorstnionej stosuje się poprawkę. Jej wpływ zależy od udziału pojazdów ciężkich.

$$\Delta L^n_{eq} = 4 - 0,3u_c \quad [\text{dB}]$$

gdzie: ΔL^n_{eq} - poprawka ze względu na szorstkość nawierzchni [dB],

u_c - udział pojazdów ciężkich [-].

Poziom hałasu u odbiorcy

Poprawka dla odległości w terenie o utwardzonej powierzchni

Jeżeli teren pomiędzy drogą, a odbiorcą jest utwardzony na co najmniej 50 % powierzchni, to poprawkę dla odległości oblicza się wg wzoru:

$$\Delta L_{eq}^{d'} = -10,8 \log \frac{d'}{13,5} \quad [\text{dB}]$$

gdzie: $\Delta L_{eq}^{d'}$ - poprawka dla odległości w terenie o utwardzonej powierzchni [dB],

d' - odległość punktu odbioru od źródła hałasu [m].

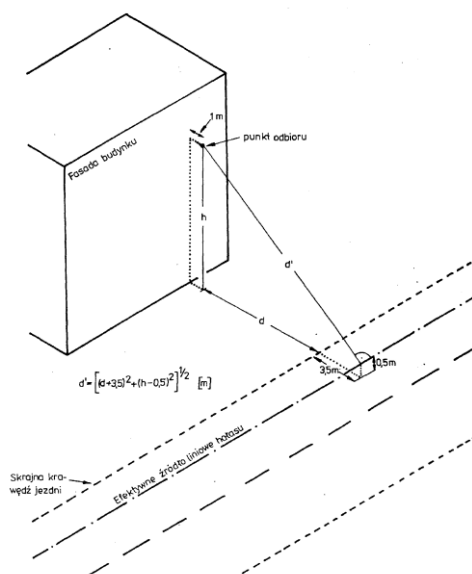
$$d' = \sqrt{(h - 0,5)^2 + (d + 3,5)^2} \quad [\text{m}]$$

gdzie: h - wysokość odbiorcy względem poziomu jezdni [m],

d - odległość odbiorcy od krawędzi jezdni mierzona w poziomie [m].

Odległość d' punktu odbioru od liniowego źródła hałasu.

- Wysokość h przyjmuje się ze znakiem „+” dla punktów leżących ponad poziomem jezdni natomiast ze znakiem „-” dla punktów poniżej poziomu jezdni.



Poprawka dla odległości w terenie płaskim, porośniętym trawą

Gdy droga przebiega w terenie płaskim i teren pomiędzy drogą, a odbiorcą jest porośnięty trawą bądź niskimi uprawami rolnymi na ponad 50 % powierzchni i:

$$1 \leq h \leq \frac{d + 3,5}{3}$$

to:

$$\Delta L_{eq}^d = \Delta L_{eq}^{d'} + 5,2 \log \frac{3h}{d + 3,5} = -10,8 \log \frac{d'}{13,5} + 5,2 \log \frac{3h}{d + 3,5} \quad [\text{dB}]$$

gdzie: ΔL_{eq}^d - poprawka dla odległości w terenie porośniętym trawą [dB].

W przypadku, gdy $h > (d + 3,5)/3$ to:

$$\Delta L_{eq}^d = \Delta L_{eq}^{d'}$$

Teren pochylony lub nierówny

Jeżeli teren pomiędzy odbiorcą a drogą jest nierówny lub pochylony, ale jego powierzchnia jest utwardzona to poprawkę dla odległości należy ustalić według zasad jak dla terenu o utwardzonej powierzchni.

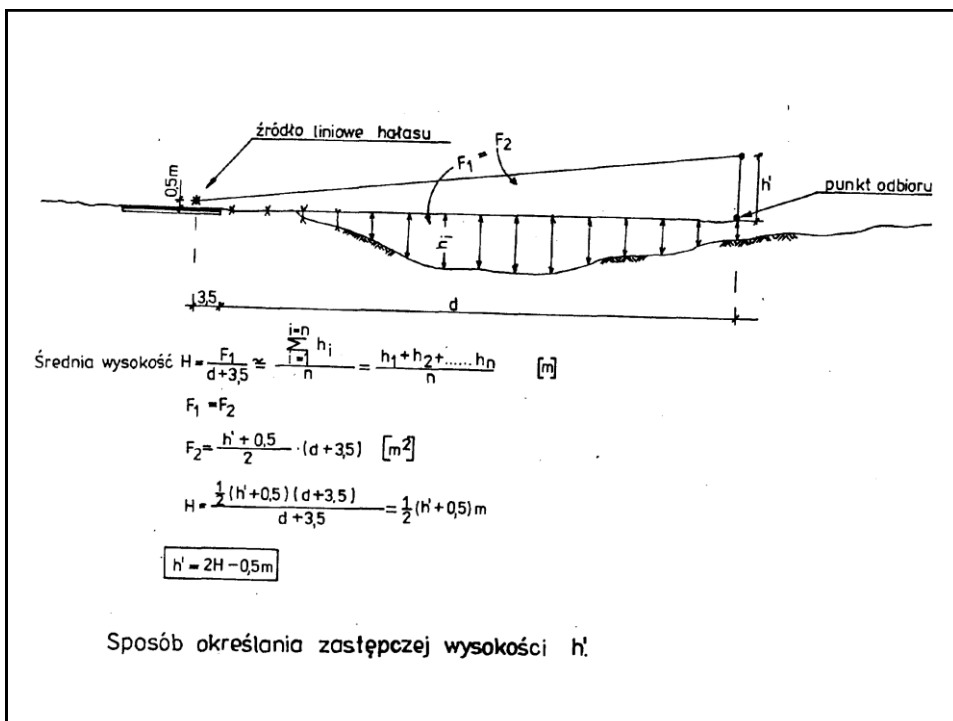
W przypadku gdy teren porośnięty trawą jest lekko pochylony ale równy, to poprawkę oblicza się jak dla terenu porośniętego trawą - za d należy podstawić odległość odbiorcy od linii odniesienia mierzoną wzdłuż linii ogólnego nachylenia terenu, natomiast za h wysokość punktu odbioru nad terenem.

W przypadku gdy teren jest znacznie pochylony lub nierówny ale porośnięty trawą to za d podstawiamy odległość odmierzoną w poziomie, a za h zastępczą wysokość h' :

$$h' = 2H - 0,5 \quad [\text{m}]$$

gdzie: h' - zastępcza wysokość punktu odbioru nad terenem [m],

H - średnia wysokość nad terenem mierzona w przedziale co 2 do 5[m].



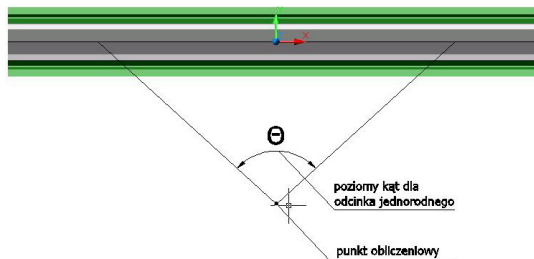
Wpływ poziomego kąta widzenia odcinka drogi

Średnia wartość kwadratu ciśnienia akustycznego zależy liniowo od kąta poziomego, pod którym widoczne jest źródło hałasu z punktu odbioru. Poprawkę dla poziomego punktu widzenia oblicza się wg wzoru:

$$\Delta L^\theta = 10 \log \frac{\theta}{180^\circ} \quad [\text{dB}]$$

gdzie: ΔL^θ - poprawka ze względu na poziomy kąt widzenia odcinka drogowego [dB],

θ - wartość poziomego kąta widzenia drogi [°].



Sposób wyznaczania poziomego kąta θ dla odcinka jednorodnego.

Wpływ ekranowania

Obecność obiektów na drodze rozchodzenia się fal akustycznych powoduje ich tłumienie i zmniejszenie poziomu hałasu w punktach obliczeniowych znajdujących się w obszarze cienia akustycznego. Bezpośredni efekt ekranowania zależy od różnicy dróg δ - drogi fali ugiętej na ekranie akustycznym i fali biegnącej bezpośrednio od źródła w stronę odbiorcy.

$$\delta = a + b - c \text{ [m]}$$

$$a = \sqrt{(d_1 + 3,5)^2 + (h_1 - 0,5)^2} \text{ [m]}$$

$$b = \sqrt{(d_2)^2 + (h_1 - h_2)^2} \text{ [m]}$$

$$c = \sqrt{(h_2 - 0,5)^2 + (d_2 + d_1 + 3,5)^2} \text{ [m]}$$

gdzie: d_2 - odległość mierzona w poziomie od ekranu do odbiorcy [m],

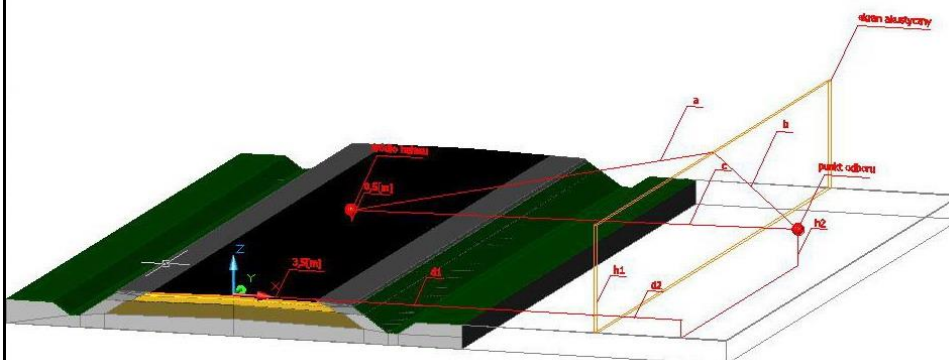
d_1 - odległość mierzona w poziomie od krawędzi jezdni do ekranu [m],

h_2 - wysokość odbiorcy względem jezdni [m],

h_1 - wysokość ekranu akustycznego względem jezdni [m],

a, b, c - wielkości geometryczne do wyznaczenia różnicy dróg δ [m].

Wielkości geometryczne do wyznaczenia wartości δ



W obliczeniach wpływu ekranowania wyróżnia się dwie strefy:

- ♦ strefę cienia akustycznego, w której odbiorca nie widzi źródła hałasu,
- ♦ strefę iluminowaną, w której odbiorca widzi źródło hałasu

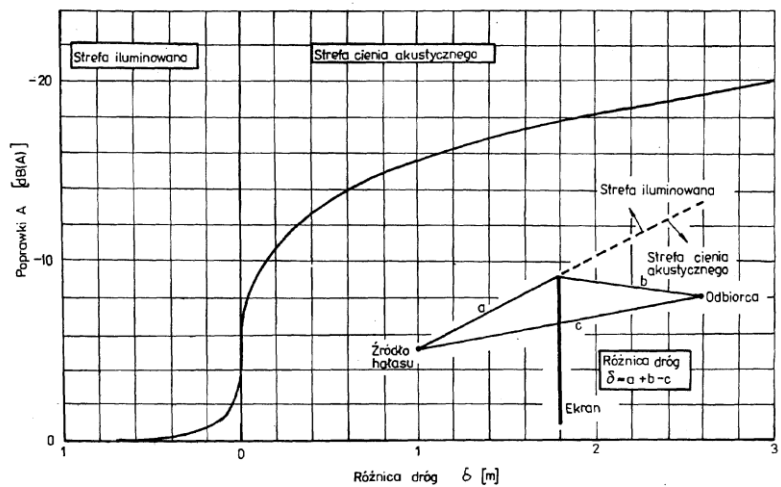
Poprawki dla ekranowania oblicza się wg wzoru:

$$A = A_0 + A_1x + A_2x^2 + \dots + A_nx^n \text{ [dB]}$$

gdzie: A_i - wartości współczynników
zależnie od strefy zgodnie
z tabelą,
 $x = \log \delta$

Tablica. Wartości współczynników A_n

	Strefa cienia akustycznego	Strefa iluminowana
A_0	-15,4	0
A_1	-8,26	+0,109
A_2	-2,787	-0,815
A_3	-0,831	+0,479
A_4	-0,198	+0,3284
A_5	+0,1539	+0,04385
A_6	+0,12248	0
A_7	+0,02175	0
Zakres		
dla x spoza zakresu należy przyjąć	$x < -3,0$ $A = -5,0$ $x > 1,2$ A - nieokreślone	$x < -4,0$ $A = -5,0$ $x > 0$ $A = 0$



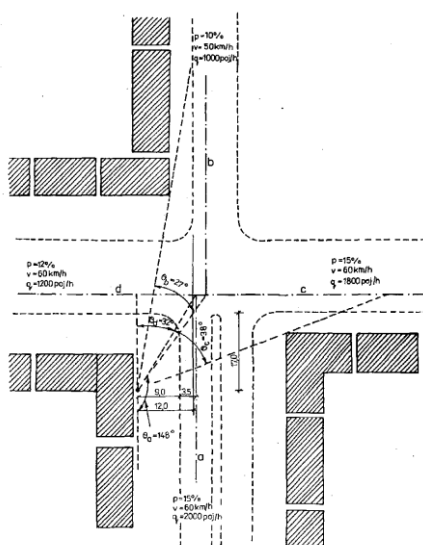
Wykres poprawek dla ekranowania w zależności od parametru δ .

Powyższy algorytm obliczania poprawek dla ekranowania obowiązuje dla ekranu „masywnego”, tzn. spełniającego warunek:

$$m \geq 3 \cdot 10^{\left(\frac{-A+10}{14}\right)} \quad [\text{kg/m}^2]$$

gdzie: m - wymagana masa ekranu akustycznego $[\text{kg/m}^2]$,

A - poprawka ze względu na ekranowanie $[\text{dB}]$.



Plan sytuacyjny skrzyżowania do przykładu nr 6.

Sumaryczny poziom hałasu

Należy zauważyć, że poziom równoważny w danym punkcie odbioru może być wyznaczony jako „suma” (w sensie dodawania wielkości logarytmicznych) poziomów odnoszących się do różnych źródeł. W takim przypadku uzyskuje się wielkość, którą można określić mianem poziomu hałasu otoczenia określoną zależnością:

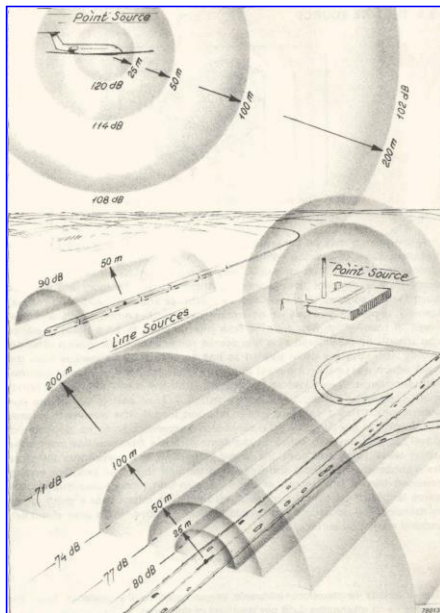
$$L_{Aeq} = 10 \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{0,1 \cdot L_{Aeqi}} \right) \quad [\text{dB}]$$

gdzie: L_S – sumaryczny poziom hałasu w punkcie odbioru [dB],

L_{Aeqi} – poziomy równoważne jednostkowe określone dla danego hałasu [dB],

$i=1 \dots n$ – liczba źródeł lub grup hałasów jednostkowych [s].

PROPAGACJA - WPŁYW ODLEGŁOŚCI



Źródło punktowe

(zmiana o 6 dB na podwojenie odległości)

$$\frac{I_1}{I_n} = \left(\frac{r_n}{r_1} \right)^2$$

$$L_n = L_1 - 20 \log \left(\frac{r_n}{r_1} \right)$$



Źródło liniowe

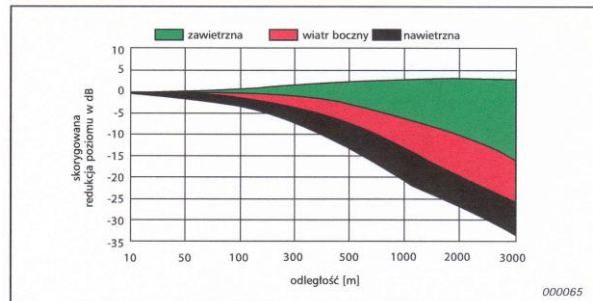
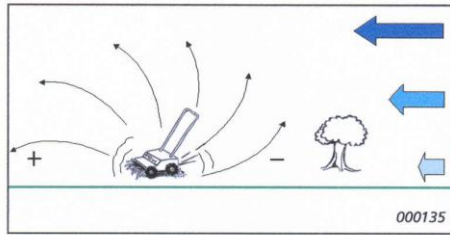
(zmiana o 3 dB na podwojenie odległości)

$$\frac{I_1}{I_n} = \left(\frac{r_n}{r_1} \right)$$

$$L_n = L_1 - 10 \log \left(\frac{r_n}{r_1} \right)$$



PROPAGACJA - WPŁYW WIATRU



Prognostowanie hałasu wzdłuż odcinka drogi z wykorzystaniem metod komputerowych

Zalety komputerowych metod prognozowania hałasu:

- ☐ Prędkość obliczeń,
- ☐ Dokładność obliczeń (regulowana),
- ☐ Możliwość prezentacji wyników w różnych formach (mapa siatkowa hałasu, mapa 3D, mapa przekroju, mapa przekroczeń, mapa na fasadach, obliczanie natężenia dźwięku w punkcie),
- ☐ Możliwość wyboru metody obliczeń,
- ☐ Możliwość wyboru obliczania różnych wskaźników (L_{eq} , L_{eqmax} , L_{den} itp.),
- ☐ Możliwość importu, eksportu z/do różnych programów (AutoCad, ArcGIS, innych programów symulacyjnych).

♦ Wiodącymi czynnikami, które mają decydujący wpływ przy ocenie klimatu akustycznego oraz projektowaniu ekranów akustycznych są:

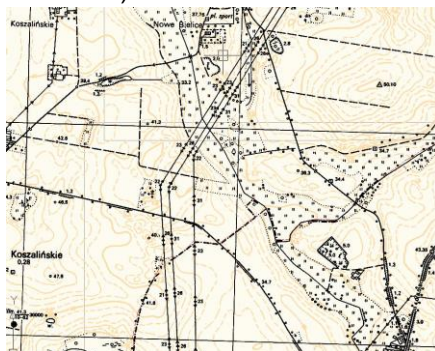
- ☐ natężenie ruchu drogowego,
- ☐ struktura rodzajowa,
- ☐ średnia prędkość poruszających się pojazdów,
- ☐ rodzaj ruchu pojazdów,
- ☐ rodzaj nawierzchni,
- ☐ pochylenie podłużne drogi,
- ☐ pokrycie i zagospodarowanie terenu,
- ☐ dane geometryczne,
- ☐ dokładność odwzorowania terenu (NMT),
- ☐ dane meteorologiczne.

♦ Najpopularniejsze programy służące do prognozowania hałasu:

- ☐ SoundPLAN,
- ☐ CadnaA,
- ☐ LEQ Professional,
- ☐ Lima,
- ☐ Immi,
- ☐ Mithra,
- ☐ Noisemap,
- ☐ Predictor.

♦ Tok postępowania przy prognozowaniu hałasu z odcinka drogi w programie SoundPLAN:

- ❖ Dane wyjściowe
- ☐ pozyskanie danych terenowych (podkłady sytuacyjno-wysokościowe, Numeryczny model terenu z CODGiK np. w postaci plików ASCII.)

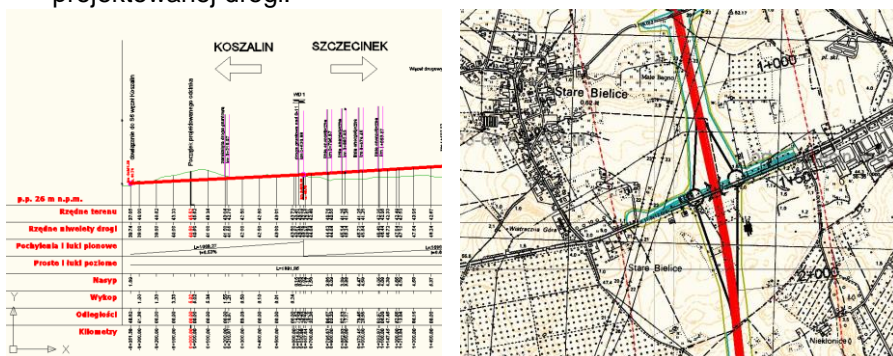


1.txt - Notatnik		
Plk	Edycja	Format
532440	695760	55,42
532470	695760	56
532560	695760	58,09
532590	695760	59,39
532620	695760	60,58
532650	695760	61,16
532680	695760	61,2
532710	695760	60,6
532740	695760	61,59
532770	695760	62,48
532800	695760	62,23
532830	695760	62,2
532860	695760	61,45
532920	695760	62,88
532950	695760	63,57
532980	695760	64,33
533010	695760	64,97
533040	695760	65,64
533070	695760	65,55
533100	695760	68,39
533130	695760	68,73
533160	695760	69,53
533190	695760	70,32
533220	695760	70,8
533250	695760	69,47
533280	695760	68,02

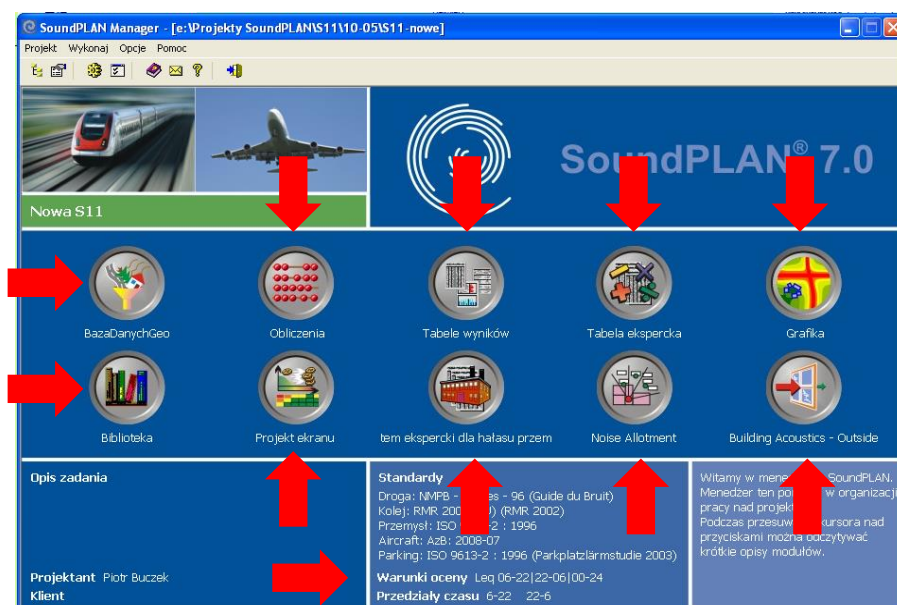
- ♦ Tok postępowania przy prognozowaniu hałasu z odcinka drogi w programie SoundPLAN:
 - ❖ Dane wyjściowe
- Pozyskanie danych z MPZP

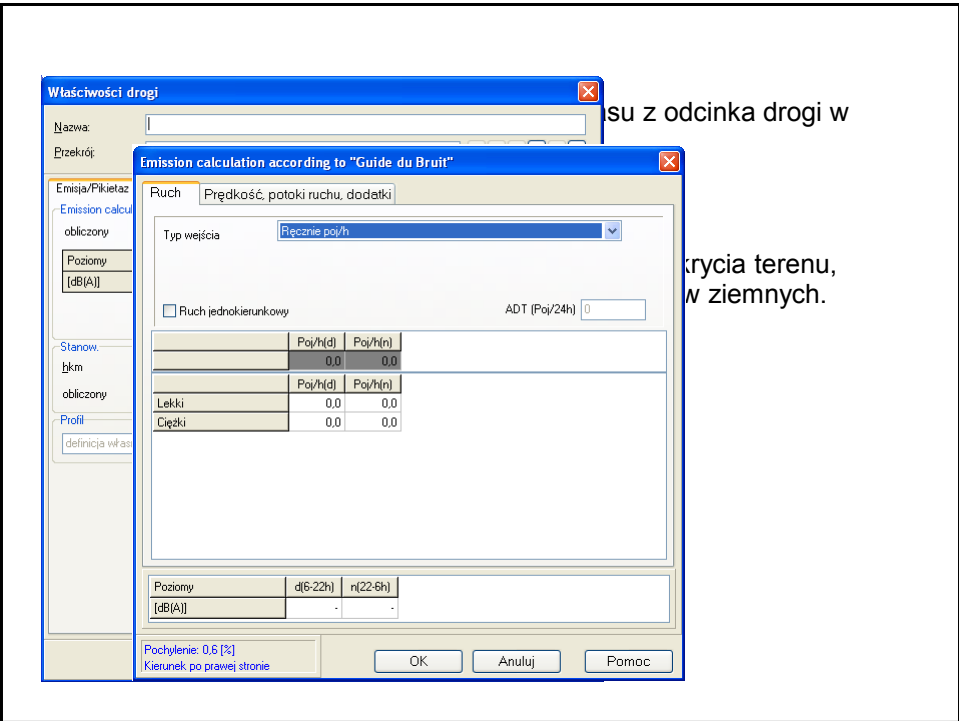
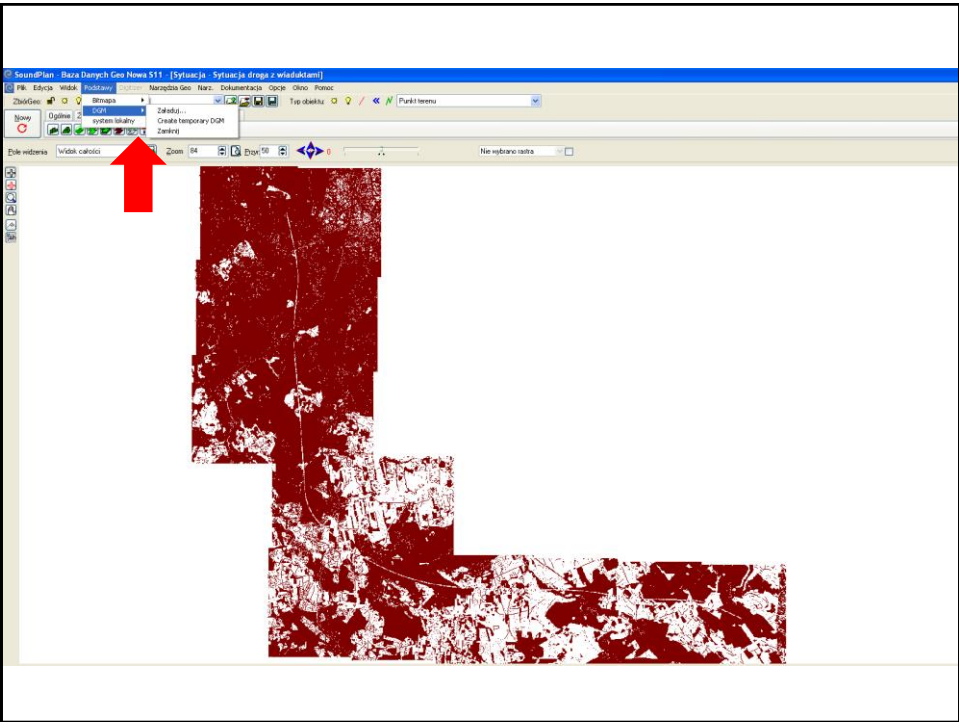


- ♦ Tok postępowania przy prognozowaniu hałasu z odcinka drogi w programie SoundPLAN:
 - ❖ Dane wyjściowe
- Pozyskanie danych drogowych tzn. trasy oraz niwelety drogi.
 Dużym błędem jest nieuwzględnianie w obliczeniach niwelety nowo projektowanej drogi.

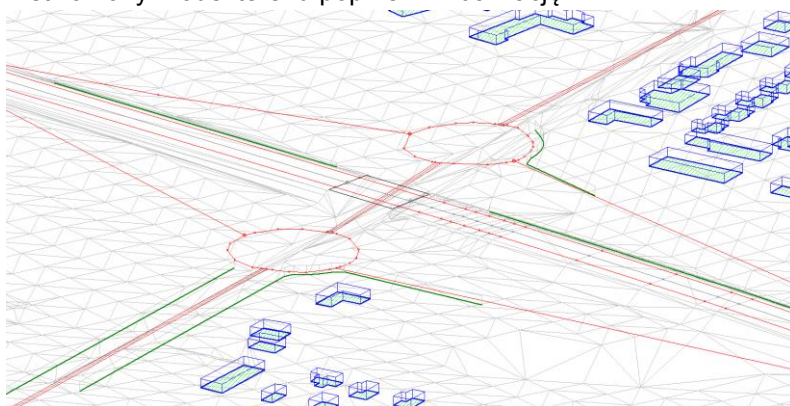


- ♦ Tok postępowania przy prognozowaniu hałasu z odcinka drogi w programie SoundPLAN:
 - ❖ Dane wyjściowe
 - ❑ Pozyskanie danych meteorologicznych (temperatura, wilgotność, ciśnienie atmosferyczne, prędkość wiatru, róża wiatru).
 - ❑ Pozyskanie danych meteorologicznych (temperatura, wilgotność, ciśnienie atmosferyczne, prędkość wiatru, róża wiatru).





- ♦ Tok postępowania przy prognozowaniu hałasu z odcinka drogi w programie SoundPLAN:
 - ❖ Weryfikacja danych
- ☐ Po wprowadzeniu wszystkich elementów należy sprawdzić stworzony model terenu poprzez wizualizację.



- ♦ Tok postępowania przy prognozowaniu hałasu z odcinka drogi w programie SoundPLAN:
 - ❖ Obliczenia
- ☐ Wybór typu obliczeń

