

## OCENA JAKOŚCI AKUSTYCZNEJ POMIESZCZENIA NA PODSTAWIE KRZYWEJ ROZKŁADU DŹWIĘKU W PRZESTRZENI ORAZ KRZYWEJ ZANIKU

Marek JABŁOŃSKI

\* Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych  
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź,  
e-mail: Marek.Jablonski@p.lodz.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki czasu pogłosu, spadku poziomu ciśnienia akustycznego w przestrzeni z podwojeniem odległości  $DL_2$  i nadwyżki poziomu ciśnienia akustycznego  $DL_f$  otrzymane z obliczeń symulacyjnych oraz z pomiarów dla holu i przestrzeni multimedialnej w budynku szkolnym.

**Słowa kluczowe:** akustyka pomieszczeń, krzywe rozkładu dźwięku, czas pogłosu, ciśnienie akustyczne, właściwości akustyczne pomieszczeń.

### 1. WSTĘP

Korytarze szkolne to miejsce rozmów, odpoczynku między zajęciami, jak również pracy w grupach. Zazwyczaj w szkołach brakuje specjalnych pomieszczeń do tego przeznaczonych. Często zdarza się, że korytarzami w trakcie trwania zajęć przechodzą całe grupy uczniów. Wykończenie obszarów komunikacyjnych twardymi, odbijającymi dźwięk materiałami potęguje hałas, tak że dociera on również do klas. Jak pokazują badania, w hałaśliwym otoczeniu ludzie mają skłonność do głośniejszego mówienia i przekrzykiwania się, obniża się próg wrażliwości na hałas. Wpływa to bezpośrednio na zachowanie uczniów podczas lekcji. Stąd zapewnienie odpowiedniego środowiska akustycznego korytarzy jest tak samo ważne jak dobra akustyka klas szkolnych.

W analizowanym obiekcie hol i przestrzeń multimedialna jest miejscem spełniającym wiele funkcji. Począwszy od typowej funkcji komunikacyjnej, poprzez miejsce spotkań i rozmów, aż do części stanowiącej przestrzeń wystawieniową i multimedialną.

Czas pogłosu jest pierwszym zdefiniowanym parametrem akustycznym pomieszczeń. Ze względu na silną korelację z wrażeniami słuchowymi jest też jednym z najważniejszych

kryteriów oceny akustyki pomieszczenia. Jego wartość wskazuje, jak długo zanikający dźwięk utrzymuje się w pomieszczeniu. Określa, z jak bardzo dynamicznym środowiskiem akustycznym mamy do czynienia.

W artykule podjęto próbę oceny jakości akustycznej pomieszczenia na podstawie czasu pogłosu oraz innych parametrów. Są to parametry określające propagację dźwięku.

### 2. PARAMETR OKREŚLAJĄCE PROPAGACJĘ ORAZ ZANIK DŹWIĘKU W POMIESZCZENIU

Na akustykę pomieszczenia bezpośredni wpływ ma kształt, objętość oraz chłonność powierzchni ograniczających. Czynniki te wpływają na stopień rozproszenia energii akustycznej w pomieszczeniu. Czas pogłosu jest jednym z podstawowych parametrów akustycznych określających jakość pomieszczenia. Od wartości czasu pogłosu zależy jakość odtwarzanej muzyki i zrozumiałość mowy a także określone wrażenia słuchowe.

Innymi parametrami określającymi jakość akustyczną mogą być wielkości określające propagację dźwięku, np. spadek poziomu ciśnienia akustycznego w przestrzeni z podwojeniem odległości ( $DL_2$ ) i nadwyżka poziomu ciśnienia akustycznego ( $DL_f$ ). Wielkości te uzyskuje się, dla danego zakresu odległości od źródła dźwięku, z krzywych rozkładu poziomu ciśnienia akustycznego w przestrzeni [1].

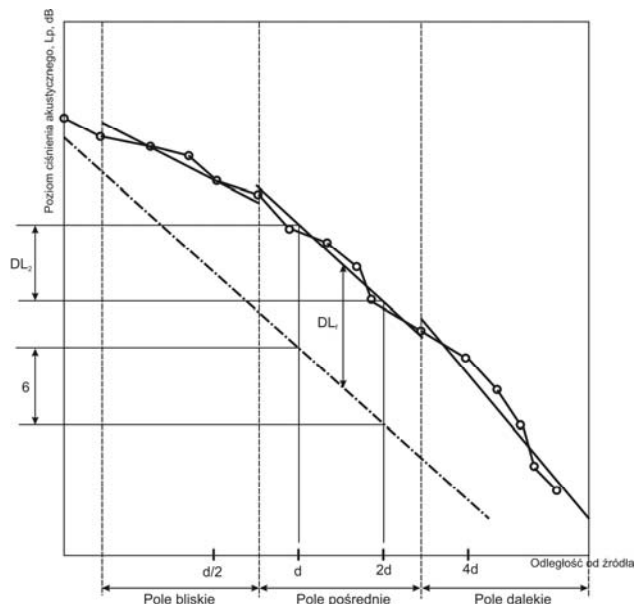
Jakość akustyczna pomieszczenia jest dobra, jeżeli  $DL_f$  jest małe i  $DL_2$  duże.

Wielkości spadku poziomu ciśnienia oraz nadwyżki poziomu ciśnienia wyliczane są dla trzech zakresów odległości (pole bliskie, pole pośrednie i pole dalekie).

Dla odległości około  $1m \leq r \leq 5m$  od źródła (pole bliskie), krzywa zaniku przy podwojeniu odległości od źródła zależy w szczególności od źródła dźwięku i jego usytuowania.

Dla odległości około  $5m \leq r \leq 16m$  od źródła (pole pośrednie), krzywa zaniku zależy od zdolności pochłaniania (współczynników pochłaniania) powierzchni podłogi, ścian i sufitu.

Dla odległości około  $16m \leq r \leq 64m$  od źródła (pole dalekie), krzywa zaniku przy podwojeniu odległości od źródła zależy od rozmiarów pomieszczenia oraz ilości i rozmieszczenia obiektów w rozpatrywanym pomieszczeniu.



Rys. 1. Przebieg krzywej rozkładu dźwięku w pomieszczeniu i w polu swobodnym.

Fig. 1. Sound propagation curve in the room and in the free field.

### 2.1. Parametr $DL_2$

Spadek poziomu ciśnienia akustycznego w przestrzeni z podwojeniem odległości od źródła  $DL_2$  [dB] obliczany jest zgodnie z normą PN-EN ISO 14257:2002 [2] wg zależności:

$$DL_2 = -0,3 \frac{z \sum_{i=n}^m \left[ D_i \lg \left( \frac{r_i}{r_o} \right) \right] - \sum_{i=n}^m D_i \sum_{i=n}^m \lg \left( \frac{r_i}{r_o} \right)}{z \sum_{i=n}^m \left[ \lg \left( \frac{r_i}{r_o} \right) \right]^2 - \left[ \sum_{i=n}^m \lg \left( \frac{r_i}{r_o} \right) \right]^2} \quad (1)$$

gdzie:  $z = m-n+1$

- $D_i$  - określa się z równania  $D_i(r) = L_{pi}(r) - L_{wi}$
- $r_o$  - odległość odniesienia (równa zazwyczaj 1m)
- $r_i$  - odległość  $i$  - tego źródła dźwięku od pozycji mikrofonu, w zasięgu odległości obszaru  $[r_n, r_m]$

$L_{wi}$  - poziom mocy akustycznej referencyjnego źródła dźwięku użytego do badania

$L_{pi}(r)$  - poziom ciśnienia akustycznego w każdym punkcie pomiarowym, umieszczonym w odległości  $r$  od źródła dźwięku

### 2.2. Parametr $DL_f$

Nadwyżka poziomu ciśnienia akustycznego  $DL_f$  obliczana jest zgodnie z normą PN-EN ISO 14257:2002 [2] wg zależności:

$$DL_f = \frac{\sum_{i=n+1}^m (DL_{fi} + DL_{f,i-1}) \left( \log \frac{r_i}{r_{i-1}} \right)}{2 \left( \log \frac{r_i}{r} \right)} \quad (2)$$

gdzie:  $DL_f = D_i - D_{i,B}$

$D_i(r) = L_{pi}(r) - L_{wi}$

$D_{i,B}(r) = 20 \log(r_o/r_i) - 11 \text{ dB}$  - dla pola swobodnego

$r = r_i - r_{i-1}$   
 $r_i$  - odległość  $i$  - tego źródła dźwięku od pozycji mikrofonu, w zasięgu odległości obszaru  $[r_n, r_m]$

$L_{wi}$  - poziom mocy akustycznej referencyjnego źródła dźwięku użytego do badania

$L_{pi}(r)$  - poziom ciśnienia akustycznego w każdym punkcie pomiarowym, umieszczonym w odległości  $r$  od źródła dźwięku

Punkty pomiarowe i pozycja źródła są istotne dla parametrów  $DL_2$  i  $DL_f$  i powinny być wyznaczone zgodnie z normą PN-EN ISO 14257:2002.

### 2.3. Czas pogłosu $RT$

Czas pogłosu jest to czas zmniejszania ciśnienia akustycznego o 60dB określony z krzywej zaniku [3]. Można go oszacować z zależności:

$$T_i = \frac{0,16 \cdot V}{\sum A_i} \quad (3)$$

gdzie:

$\sum A_i$  - całkowita powierzchnia dźwiękochłonna pomieszczenia, określona dla kolejnych pasm częstotliwości  $[m^2]$

Całkowita powierzchnia dźwiękochłonna pomieszczenia:

$$\sum A_i = A_{im} + A_{tow} + A_{air} \quad (4)$$

gdzie:

$A_{im}$  - powierzchnia dźwiękochłonna materiałów w funkcji częstotliwości  $[m^2]$

$A_{\text{low}}$  – powierzchnia dźwiękochłonna osób lub wyposażenia w funkcji częstotliwości [ $\text{m}^2$ ]

$A_{\text{air}}$  – pochłanianie energii akustycznej przez powietrze [ $\text{m}^2$ ]

Znajomość tych oraz innych obiektywnych parametrów akustycznych pomieszczenia pozwala na kształtowanie lub adaptacje pomieszczeń pod względem akustycznym.

### 3. CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU

Przedmiotem rozważań jest hol i przestrzeń multimedialna w szkole językowej należącej do Alliance Francaise.

Pomieszczenie to ma kształt prostopadłościenny o wymiarach wewnętrznych ok. 25.0m x 6.5m i wysokości około 4.3m. Kubatura wewnętrzna pomieszczenia wynosi około 700 $\text{m}^3$ . Strop podwieszony wykonany jest z materiałów pochłaniających dźwięk. Hol jest typowym miejscem komunikacyjnym, natomiast przylegająca do niego przestrzeń multimedialna służy do prezentowania osiągnięć szkoły, jest częścią wystawienniczą oraz służy do odpoczynku pomiędzy zajęciami. Hol sąsiaduje z salami lekcyjnymi.

Materiały użyte do wykończenia wnętrza przedstawiono w tablicy 1.

Tabela 1. Współczynniki pochłaniania materiałów wykończeniowych analizowanego pomieszczenia.

Table 1. Octave band acoustic absorption coefficients for materials in the room.

Materiał	Położenie	Pow. [ $\text{m}^2$ ]	Współczynnik pochłaniania dźwięku							
			Częstotliwość							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Płyta AM-STRONG	Ustrój sufitowy	162.5	0.50	0.60	0.85	0.95	0.98	0.99	0.99	0.99
Płyta gips-karton	Ściana z drzwiami	107.5	0.14	0.14	0.10	0.06	0.04	0.04	0.03	0.03
Tynk cem.-wap.	Ściana	371	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.05
Drewno	Drzwi	12.6	0.14	0.14	0.10	0.06	0.08	0.10	0.10	0.10
Parkiet	Prześciecia	162.5	0.02	0.02	0.03	0.04	0.06	0.12	0.10	0.10

### 4. SYMULACJA KOMPUTEROWA

Wykorzystano komputerowy model pola akustycznego, oparty na zmodyfikowanej metodzie promieniowej, przy użyciu którego obliczono parametry opisujące charakter akustyki pomieszczenia.

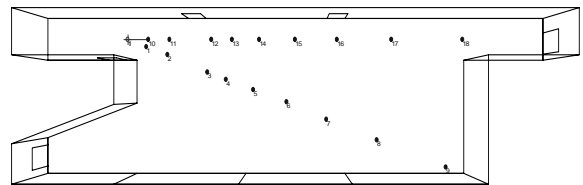
Ocenę właściwości wnętrza pod względem jakości akustyki można dokonywać na podstawie wielu parametrów, które są możliwe do porównania z zalecanymi w literaturze dla tego typu pomieszczeń [4,5]. W niniejszym artykule ograniczono się do przedstawienia trzech: czasu pogłosu, spadku wartości ciśnienia akustycznego w przestrzeni z podwojeniem odległości  $DL_2$  oraz nadwyżki poziomu ciśnienia akustycznego  $DL_f$ .

Pomieszczenie zostało zamodelowane jako trójwymiarowa bryła przez 20 powierzchni. Całkowita powierzchnia ścian ograniczających około 570 $\text{m}^2$ .

Model obliczeniowy pomieszczenia przedstawiono na Rys.2. Jako źródło dźwięku przyjęto źródło wszechkierunkowe usytuowane w holu. Po wprowadzeniu kształtu pomieszczenia i współczynników pochłaniania dźwięku przez materiały wykończeniowe, program symulacyjny oblicza odpowiedź pomieszczenia na pobudzenie impulsowe, a na tej podstawie parametry akustyczne pomieszczenia.

Spadek wartości ciśnienia akustycznego w przestrzeni z podwojeniem odległości obliczono dla dwóch kierunków, zwanych dalej ścieżkami. Ścieżka 1 – punkty odbioru wzdłuż korytarza na wprost źródła, ścieżka 2 – punkty odbioru usytuowane na prostej łączącej źródło i jeden z narożników pomieszczenia.

Zastosowany w pracy do obliczeń program komputerowy ODEON [6] zaleca przyjęcie usytuowania odbiorników w następujących odległościach od źródła (używając logarytmicznego wzrostu): 1, 2, 4, 5, 6.3, 8, 10, 12.6, 16, 20 metrów.

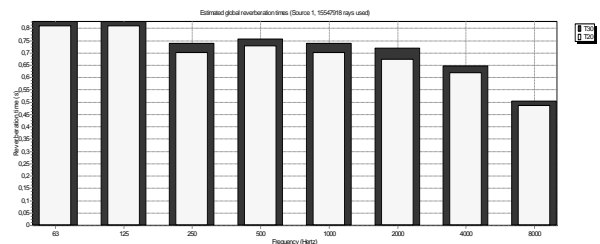


Rys. 2. Obliczeniowy model holu i przestrzeni multimedialnej z zaznaczonymi punktami odbioru.

Fig. 2. Axonometric view (interior plan) of the analyzed room.

### 5. WYNIKI SYMULACJI KOMPUTEROWEJ

Wartość czasu pogłosu w funkcji częstotliwości uzyskana z analizy komputerowej pokazano na rysunku 3.

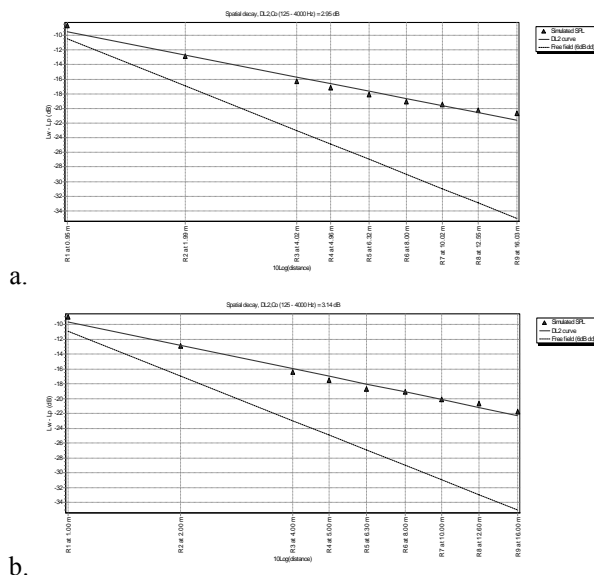


Rys. 3. Czas pogłosu pomieszczenia.

Fig. 3. Reverberation time of the room.

Średni czas pogłosu dla tego pomieszczenia  $RT = 0.7$  s.

Wartości spadku wartości ciśnienia akustycznego w przestrzeni z podwojeniem odległości  $DL_2$  uzyskane z analizy komputerowej dla ścieżek pomiarowych jak na Rys.2 przedstawiono na Rys.4.



Rys.4. Spadek wartości ciśnienia akustycznego w przestrzeni z podwojeniem odległości  $DL_2$  dla analizowanego pomieszczenia (a. ścieżka 1 i b. ścieżka 2), uzyskany z obliczeń symulacyjnych.  
 Fig. 4. Predicted value of spatial decay curves  $DL_2$  for analyzed room (a. path no 1 and b. path no 2).

Dla analizowanego pomieszczenia uzyskano następujące wartości  $DL_2$ :

- dla ścieżki 1 obliczona wartość  $DL_2$  wynosi 3.14 dB,
- dla ścieżki 2 obliczona wartość  $DL_2$  wynosi 2.94 dB,

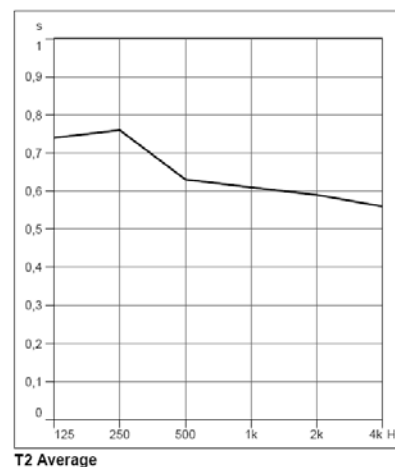
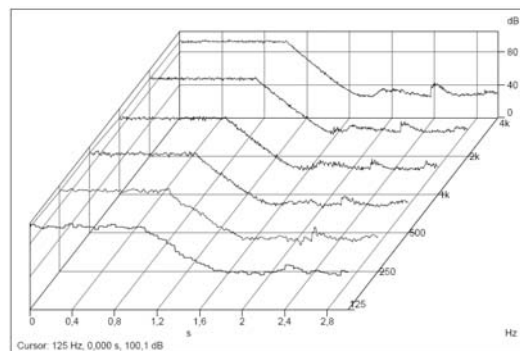
Program ODEON nie pozwala na obliczenie nadwyżki poziomu ciśnienia akustycznego  $DL_f$ . Wartości te obliczono na podstawie danych pomiarowych.

## 6. WYNIKI POMIARÓW

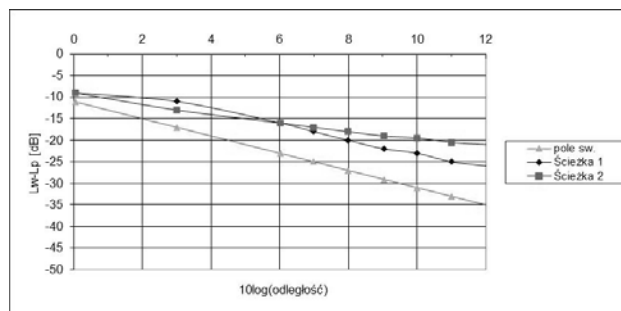
Pomiary czasu pogłosu oraz poziomu dźwięku wykonano przy pomocy ręcznego analizatora dźwięku typ 2270 umożliwiającego wykonanie punktowego pomiaru i analizy hałasu.

Pomiar czasu pogłosu wykonano dla źródła usytuowanego w holu, poziom dźwięku do obliczeń propagacji dźwięku rejestrowano w takich samych odległościach od źródła jak to zostało zamodelowane w przypadku obliczeń komputerowych.

Uzyskane wartości czasu pogłosu przedstawiono na rysunku 5, wartości różnicy poziomu mocy źródła oraz poziomu dźwięku w poszczególnych punktach pomiarowych na wszystkich kierunkach przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 5. Krzywa zaniku oraz czas pogłosu dla analizowanego pomieszczenia.  
 Fig. 5. Decay curve and reverberation time for analyzed room.



Rys. 6. Wartości uzyskane z pomiarów w holu dla poszczególnych ścieżek pomiarowych.  
 Fig. 6. Measured value for all paths for analyzed room.

Czas pogłosu uzyskany z pomiarów przedstawiony na rysunku 5 wynosi około 0,7 s.  
 Wartości spadku wartości ciśnienia akustycznego w przestrzeni z podwojeniem odległości  $DL_2$  oraz nadwyżkę poziomu ciśnienia akustycznego  $DL_f$  obliczano dla dwóch zakresów odległości od źródła (pole bliskie, pole pośrednie).

Wartości uzyskane z obliczeń po wykorzystaniu procedury obliczeniowej opisanej w punkcie 2.1 i 2.2 dla analizowanego pomieszczenia:

	$DL_2$		$DL_f$	
	Pole bliskie	Pole pośrednie	Pole bliskie	Pole pośrednie
Ścieżka 1	3.7	3.5	4.7	7.1
Ścieżka 2	3.4	3.2	5.0	7.5

## 7. UWAGI KOŃCOWE

W pomieszczeniu poddanym analizie uwzględniono trzy parametry akustyczne jakimi są czas pogłosu, spadek wartości ciśnienia akustycznego w przestrzeni z podwojeniem odległości  $DL_2$  oraz nadwyżka poziomu ciśnienia akustycznego  $DL_f$ .

Wartości uzyskane z obliczeń symulacyjnych zostały przewidziane w sposób dość dokładny. Potwierdziły to wyniki badań w pomieszczeniu. Obliczone na podstawie pomiarów wartości czasu pogłosu, spadku wartości ciśnienia akustycznego w przestrzeni z podwojeniem odległości  $DL_2$  oraz nadwyżki poziomu ciśnienia akustycznego  $DL_f$  są bardzo zbliżone do wartości uzyskanych z symulacji.

## 8. WNIOSKI

1. Wartość czasu pogłosu dla tego typu pomieszczeń powinna mieścić się w granicach 0.1 do 1.0 s, zaś optymalna wartość powinna być z zakresu 0.5 – 0.7 s. Uzyskana z obliczeń i pomiarów wartość jest zbliżona do optymalnej.
2. Wartości spadku ciśnienia akustycznego w przestrzeni z podwojeniem odległości  $DL_2$  uzyskane z symulacji wskazują, że pomieszczenie ma cechy pomieszczenia wytłumionego.
3. Wartości uzyskane z pomiarów pokazują, że w polu pośrednim wartości  $DL_2$  (3.5dB i 3.2dB) i  $DL_f$  (7.1dB i 7.5dB) są odpowiednie do stwierdzenia, że jakość akustyczna pomieszczenia jest dobra.
4. Pomiar czasu pogłosu, które są podstawowym kryterium oceniającym komfort akustyczny pomieszczenia wymagają użycia specjalistycznego sprzętu.
5. Spadek i nadwyżkę poziomu ciśnienia akustycznego można pomierzyć wykorzystując zwykły miernik poziomu dźwięku i nie jest wymagany do tego specjalistyczny sprzęt pomiarowy.
6. Parametry związane z propagacją oraz zanikiem dźwięku w pomieszczeniu są odpowiednie do oceny jakości akustycznej pomieszczeń.

## ASSESSMENT OF A ROOM ACOUSTIC QUALITY ON A BASIS OF SPATIAL DECAY CURVE

**Summary:** This paper presents the results of spatial decay in hall, obtained using numerical techniques. They were compared with measurements data of this parameter in real room.

### Literatura

- [1] Jabłoński M., Wąty J. *Krzywa rozkładu dźwięku w przestrzeni jako parametr charakteryzujący akustykę pomieszczenia*. Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce. Tom II, 2007.
- [2] PN-EN ISO 14257:2002 Pomiar i określanie parametrów krzywych rozkładu hałasu przestrzennego na stanowiskach pracy w celu oceny ich właściwości akustycznych.
- [3] PN-EN ISO 3382:2001 Akustyka - Pomiar czasu pogłosu pomieszczenia w powiązaniu z innymi parametrami akustycznymi
- [4] Beranek L.L. *Music, acoustics and architecture*. J.Wiley&Sons, 1962
- [5] Sadowski J. *Akustyka architektoniczna*. PWN W-wa, 1976
- [6] ODEON Room Acoustics Program. Version 5.0. User Manual. Industrial, Auditorium and Combined Editions. 2001

