

Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki
Zakład Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych

Artur Kalinowski

Optymalizacja algorytmu trygera mionowego detektora CMS w obecności szumów komórek RPC.

Praca magisterska wykonana pod kierunkiem
dr hab. Grzegorza Wrochny



Warszawa 2002

Streszczenie

Praca poświęcona jest optymalizacji algorytmu trygera mionowego pierwszego stopnia detektora CMS, opartego na komorach RPC. Obecność szumów komór RPC, oraz nieskorelowanego tła składającego się głównie z neutronów, wymaga modyfikacji dotychczasowego algorytmu wyznaczania pędu poprzecznego mionu aby utrzymać częstość zliczeń trygera na założonym poziomie rzędu 1 kHz dla mionów o pędzie poprzecznym $p_T \geq 25 \text{ GeV}/c$. Zaproponowane modyfikacje pozwoliły zwiększenie rozdzielczości trygera, oraz na znaczne obniżenie częstości fałszywych zliczeń pochodzących od tła neutronowego i szumów.

Spis treści

1	Wstęp	2
2	Detektor CMS przy LHC	3
2.1	Akcelerator LHC	3
2.2	Detektor CMS	3
2.2.1	Detektor śladowy (ang. TD - Track Detector)	4
2.2.2	Kalorymetr elektromagentyczny (ang. ECAL - Electromagnetic Calorimeter)	5
2.2.3	Kalorymetr hadronowy (ang. HCAL - Hadronic Calorimeter)	7
2.2.4	Cewka nadprzewodząca i jarzmo zwrotne	7
2.2.5	System mionowy	7
2.3	Układ wyzwalania (tryger)	7
3	Tryger mionowy pierwszego stopnia	9
3.1	PACT - Pattern Comparator Trigger	10
3.1.1	PACT oparty na 6 płaszczyznach (PAC6)	14
3.1.2	PACT z podziałem na 3 przedziały pędowe (PAC6₃)	18
3.1.3	PACT z wykorzystaniem dodatkowej informacji z klastrów (PAC6_{31/2})	20
4	Symulacja	23
4.1	Przebieg symulacji	23
4.1.1	Generacja przypadków i symulacja przejścia cząstek przez detektor.	23
4.1.2	Symulacja odpowiedzi detektora (digityzacja).	23
4.1.3	Generacja listy wzorców	25
5	Wyniki	25
5.1	Odpowiedź na miony	26
5.1.1	PAC4	26
5.1.2	PAC6	29
5.1.3	<i>PAC6₃</i>	31
5.1.4	<i>PAC6_{31/2}</i>	33
6	Porównanie różnych wersji	35
6.1	Efektywność	35
6.2	Częstości zliczeń	36
6.3	Odpowiedź na szumy	40
7	Wnioski	42
8	Podziękowania	43
A	Generacja klastrów RPC oparta na algorytmie wykorzystywanym przez eksperyment ALICE	46
B	Rozkład częstości zliczeń na poszczególne układy brakujących trafień.	51
C	Symulowane rozkłady szumów i tła	53

D	Histogramy ugięcia mionów	58
E	Krzywe efektywności	75
E.1	PAC4	75
E.2	PAC6 ₃	78
E.3	PAC6 _{31/2}	81
E.4	Porównanie krzywych efektywności	84

Spis rysunków

1	Widok na obszar LHC. Eksperyment CMS jest zlokalizowany w pkt. oznaczonym P5.	4
2	Przekrój przez detektor CMS.	5
3	System mionowy detektora CMS.	8
4	Przypadek z rozpadem $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \mu\mu\mu\mu$. "20 min bias" oznacza, że w symulowanym przecięciu wiązek zaszło dodatkowo jeszcze 20 oddziaływań pp.	9
5	Zasada działania trygera PAC.	10
6	Symulowane ślady mionów. Na drugim rysunku miejsca, gdzie ślady przechodzą przez przednie stacje mionowe (w pokrywach), są zaznaczone łukami. Widać wyraźne rozmycie spowodowane wielokrotnym rozpraszaniem.	11
7	Podział fizyczny komór RPC i logiczny PACT. Zaznaczono granice w η kolejnych wież.	11
8	Rozkład częstości zliczeń na poszczególne wartości jakości dla wież 0-7. Rozmiar prostokąta jest proporcjonalny do logarytmu z częstości zliczeń.	15
9	Rozkład częstości zliczeń na poszczególne wartości jakości dla wież 8-16	16
10	Rozkład efektywności w % powyżej progu 25 GeV/c na poszczególne wartości jakości dla wież 0-7.	17
11	Rozkład częstości zliczeń pochodzących od szumów na poszczególne wartości jakości dla wież 0-7. Wartości na "trzeciej osi" są liniowe.	17
12	Rozkład częstości zliczeń pochodzących od szumów na poszczególne wartości jakości dla wież 8-16. Wartości na "trzeciej osi" są liniowe.	18
13	Ugięcia dla wszystkich płaszczyzn w wieży 0. Wybrano ślady dające w sumie 95% zliczeń.	19
14	Zasada deklasteryzacji. Zaznaczono granice stożka dla pędów bardzo wysokich.	20
15	Rozkład położenia trafienia w pasek dla klastrów o różnej parzystości. Linią czerwoną, przerywaną oznaczono klastry nieparzyste.	24
16	Częstość zliczeń trygera. Parametry symulacji: $RPC_{eff} = 1, RPC_{bramka} = 20$.	26
17	Procentowy udział duchów w kolejnych wieżach. Parametry symulacji: $RPC_{eff} = 1, RPC_{bramka} = 20, cs = 1.5$.	27
18	Częstość zliczeń spowodowanych szumami i tłem.	27
19	Częstość zliczeń trygera. Parametry symulacji: $RPC_{eff}=1, RPC_{bramka}=20$.	29
20	Procentowy udział duchów w kolejnych wieżach. Parametry symulacji: $RPC_{eff} = 1, RPC_{bramka} = 20, cs = 1.5$.	30
21	Częstość zliczeń spowodowanych szumami i tłem.	30
22	Częstość zliczeń trygera. Parametry symulacji: $RPC_{eff} = 1, RPC_{bramka} = 20$.	31
23	Procentowy udział duchów w kolejnych wieżach. Parametry symulacji: $RPC_{eff} = 1, RPC_{bramka} = 20, cs = 1.5$.	32
24	Częstość zliczeń spowodowanych szumami i tłem.	32

25	Częstość zliczeń trygera. Parametry symulacji: $RPC_{eff} = 1, RPC_{bramka} = 20, cs = 1.5$	33
26	Procentowy udział duchów w kolejnych wieżach. Parametry symulacji: $RPC_{eff} = 1, RPC_{bramka} = 20, cs = 1.5$	34
27	Częstość zliczeń spowodowanych szumami i tłem.	34
28	Efektywność w poszczególnych wieżach na znalezienie mionu o dowolnym p_T , dla mionów o $p_T \geq 100$ [GeV/c].	35
29	Efektywność w poszczególnych wieżach na znalezienie mionu o $p_T \geq$ wygenerowanego, dla mionów o $p_T \geq 100$ [GeV/c]. Parametr klastrow 1.5. . .	36
30	Częstości zliczeń pochodzących od mionów dla wszystkich rozważanych wersji PAC.	37
31	Ilorazy częstości zliczeń.	37
32	Ilorazy częstości zliczeń. Obszar beczki.	38
33	Ilorazy częstości zliczeń. Obszar pokryw.	38
34	Ilorazy częstości zliczeń. Bez klastrow.	39
35	Ilorazy częstości zliczeń. Bez klastrow. Obszar beczki.	39
36	Ilorazy częstości zliczeń. Bez klastrow. Obszar pokryw.	40
37	Częstość zliczeń spowodowanych szumami i tłem.	41
38	Częstość zliczeń spowodowanych szumami i tłem. Obszar beczki.	41
39	Częstość zliczeń spowodowanych szumami i tłem. Obszar pokryw	42
40	Rozkład krotności klastrow dla różnych szerokości paska. Naniesiono także rozkład wykładniczy z parametrem $cs = 1.5$	46
41	Rozkład prawdopodobieństwa zapalenia się paska w funkcji jego odległości od trafienia, wyrażonej w mm.	47
42	Rozkład położenia trafienia w pasek dla klastrow o różnej parzystości, dla różnych szerokości paska. Krzywe skoncentrowane na brzegach odpowiadają klastrom parzystym.	47
43	Częstości zliczeń pochodzących tylko od mionów dla różnych algorytmów generacji klastrow.	48
44	Częstości zliczeń pochodzących tylko od mionów dla różnych algorytmów generacji klastrow. Wszystkie krzywe zostały znormalizowane do krzywej odpowiadającej PAC6, przy standardowej generacji klastrow.	49
45	Częstości zliczeń pochodzących tylko od mionów dla różnych algorytmów generacji klastrow w obecności strimerów.	49
46	Częstości zliczeń pochodzących tylko od mionów dla różnych algorytmów generacji klastrow w obecności strimerów. Wszystkie krzywe zostały znormalizowane do krzywej odpowiadającej PAC6, przy standardowej generacji klastrow.	50
47	Wkład do częstości zliczeń dla różnych, dopuszczalnych, konfiguracji brakujących płaszczyzn. Obszar beczki.	51
48	Wkład do częstości zliczeń dla różnych, dopuszczalnych, konfiguracji brakujących płaszczyzn. Obszar pokryw.	52
49	Symulowany rozkład gęstości powierzchniowej szumów dla poszczególnych płaszczyzn wzdłuż osi wiązki, w obszarze beczki. Symulowana wartość, $50Hz/cm^2$ jest zaznaczona linią poziomą. Ubytki widoczne na histogramach odpowiadają przerwom w kołach jarzma.	54
50	Symulowany rozkład radialny gęstości powierzchniowej szumów dla poszczególnych płaszczyzn w pokrywach.	55

51	Symulowany rozkład gęstości powierzchniowej trafień od tła neutralnego dla poszczególnych płaszczyzn wzdłuż osi wiązki, w obszarze beczki. Ubytki widoczne na histogramach odpowiadają przerwom w kołach jarzma.	56
52	Symulowany rozkład radialny gęstości powierzchniowej trafień od tła neutralnego w dla poszczególnych płaszczyzn w pokrywach.	57
53	Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 0.	58
54	Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 1.	59
55	Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 2.	60
56	Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 3.	61
57	Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 4.	62
58	Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 5.	63
59	Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 6. Płaszczyzny logiczne 3 i 6 są podłączone do jednej płaszczyzny fizycznej.	64
60	Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 7. Płaszczyzny logiczne 3 i 6 są podłączone do jednej płaszczyzny fizycznej.	65
61	Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 8.	66
62	Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 9. Płaszczyzny logiczne 3 i 4 są podłączone do jednej płaszczyzny fizycznej.	67
63	Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 10.	68
64	Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 11.	69
65	Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 12.	70
66	Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 13.	71
67	Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 14.	72
68	Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 15.	73
69	Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 16.	74
70	Efektywności trygera dla poszczególnych wież i wybranych cięć ($cs=1.5$). PAC4.	75
71	Efektywności trygera dla poszczególnych wież i wybranych cięć. PAC4. Kontynuacja.	76
72	Efektywności trygera dla poszczególnych wież i wybranych cięć. PAC4. Kontynuacja.	77
73	Efektywności trygera dla poszczególnych wież i wybranych cięć ($cs = 1.5$). PAC6 ₃	78
74	Efektywności trygera dla poszczególnych wież i wybranych cięć. PAC6 ₃ . Kontynuacja.	79
75	Efektywności trygera dla poszczególnych wież i wybranych cięć. PAC6 ₃ . Kontynuacja.	80
76	Efektywności trygera dla poszczególnych wież i wybranych cięć ($cs = 1.5$). PAC6 _{31/2}	81
77	Efektywności trygera dla poszczególnych wież i wybranych cięć. PAC6 _{31/2} . Kontynuacja.	82
78	Efektywności trygera dla poszczególnych wież i wybranych cięć. PAC6 _{31/2} . Kontynuacja.	83
79	Porównanie efektywności trygera dla wieży 0 i wybranych cięć.	84
80	Porównanie efektywności trygera dla wieży 1 i wybranych cięć.	85
81	Porównanie efektywności trygera dla wieży 2 i wybranych cięć.	86
82	Porównanie efektywności trygera dla wieży 3 i wybranych cięć.	87
83	Porównanie efektywności trygera dla wieży 4 i wybranych cięć.	88
84	Porównanie efektywności trygera dla wieży 5 i wybranych cięć.	89
85	Porównanie efektywności trygera dla wieży 6 i wybranych cięć.	90
86	Porównanie efektywności trygera dla wieży 7 i wybranych cięć.	91

87	Porównanie efektywności trygera dla wieży 8 i wybranych cięć.	92
88	Porównanie efektywności trygera dla wieży 9 i wybranych cięć.	93
89	Porównanie efektywności trygera dla wieży 10 i wybranych cięć.	94
90	Porównanie efektywności trygera dla wieży 11 i wybranych cięć.	95
91	Porównanie efektywności trygera dla wieży 12 i wybranych cięć.	96
92	Porównanie efektywności trygera dla wieży 13 i wybranych cięć.	97
93	Porównanie efektywności trygera dla wieży 14 i wybranych cięć.	98
94	Porównanie efektywności trygera dla wieży 15 i wybranych cięć.	99
95	Porównanie efektywności trygera dla wieży 16 i wybranych cięć.	100

Spis tabel

1	Rozdzielczości względne w % pomiaru pędu poprzecznego na podstawie informacji z detektora śladowego i komór mionowych dla różnych obszarów detektora.	5
2	Rozdzielczości względne ECAL w % dla różnych obszarów detektora.	6
3	Przedziały pędowe trygera PAC. Liczby w kolumnie p_T oznaczają dolne kresy zbiorów.	12
4	Opis połączeń pasków RPC z PACT. Zapis 8-1+8 oznacza, że jest brane 8 pasków na prawo i na lewo, oraz 1 odpowiadający paskowi w stacji referencyjnej. OR8+2xOR4 oznacza, że połowa stożka składa się z 1 paska logicznego utworzonego z 8 fizycznych, oraz 2 utworzonych z 4 fizycznych, patrząc od zewnętrznej krawędzi.	12
5	PAC6. Liczby bitów wejściowych dla poszczególnych płaszczyzn.	13
6	PAC4. Liczby wzorców dla mionów jednego znaku w poszczególnych wieżach, oraz granice między pędami wysokimi i niskimi. Liczba 7 oznacza, że pędy	13
7	Opis połączeń pasków RPC z PAC6. Zapis 8-1+8 oznacza, że jest brane 8 pasków na prawo i na lewo, oraz 1 odpowiadający paskowi w stacji referencyjnej. OR8+2xOR4 oznacza, że połowa stożka składa się z 1 paska logicznego utworzonego z 8 fizycznych, oraz 2 utworzonych z 4 fizycznych.	14
8	PAC6. Liczby wzorców dla mionów jednego znaku w poszczególnych wieżach, oraz granice między pędami wysokimi i niskimi.	15
9	PAC6. Konfiguracje trafień dla 8 możliwych wartości jakości. "O" oznacza brak trafienia. Płaszczyzny są uszeregowane od lewej: 1-2-3-4-5(1')-6(2'). W pokrywach, gdzie brak płaszczyzn 5,6 uznaje się je za trafione.	16
10	PAC6. Liczby bitów wejściowych dla poszczególnych płaszczyzn.	17
11	PAC6 ₃ . Liczby bitów wejściowych dla poszczególnych płaszczyzn.	18
12	Liczby wzorców dla mionów jednego znaku w poszczególnych wieżach, oraz granice między kolejnymi zakresami pędów. Np. dla wieży 0 wysokie pędy są dla $p_T \geq 18$, niskie $18 > p_T \geq 8$, b.niskie $p_T < 8$	19
13	Rozkład stożków PAC6 _{31/2} (oraz dla PAC6 ₃ bez pędów bardzo wysokich) na paski logiczne dla poszczególnych przedziałów pędowych.	21
14	PAC6 _{31/2} . Liczby wzorców dla mionów jednego znaku w poszczególnych wieżach, oraz granice między kolejnymi zakresami pędów. Np. dla wieży 0 bardzo wysokie pędy są dla $p_T \geq 30$, wysokie dla $30 > p_T \geq 18$, niskie $18 > p_T \geq 8$, b.niskie $p_T < 7$	22
15	Liczby wzorców połówkowych w poszczególnych wieżach.	22
16	Parametryzacja liczby trafień pochodzących od tła neutronowego dla różnych obszarów detektora.	53

*“Wybrałem Cię spośród milionów
Wybrałem tak jak mogłem wtedy najlepiej”
Kazik Staszewski*

1 Wstęp

Rzeczywistość na najgłębszym poziomie, poziomie cząstek elementarnych jest dziś opisywana przy pomocy teorii, która dla swej dokładności zyskała miano Modelu Standardowego. W ramach tego modelu fundamentalnymi składnikami materii są kwarki (u, d, c, s, t, b), leptony (e, ν_e , μ , ν_μ , τ , ν_τ) oraz bozony cechowania (γ , $W^\pm$, Z^0 , g (w ośmiu "kolorach")) przenoszące oddziaływania: elektromagnetyczne, słabe oraz silne. Matematycznie Model Standardowy jest teorią pola z cechowaniem. Grupą cechowania jest tutaj $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ [1]. Teoria jest niezmiennicza ze względu na przyjęte cechowanie tylko dla bezmasowych cząstek. Nadanie cząstkom masy wymaga dodania nowego pola, którego niezerowa wartość próżniowa powoduje spontaniczne złamanie symetrii elektroslabej, a oddziaływanie z pozostałymi cząstkami generuje ich masę. To nowe pole jest nazywane polem Higgsa. Opisuje ono skalarną cząstkę nazywaną skalarem, bądź bozonem Higgsa.¹

Od czasu swego powstania model standardowy był intensywnie testowany. Najdokładniejsze testy zostały przeprowadzone w ramach 4 eksperymentów pracujących przy Dużym Zderzaczu Elektronowo-Pozytronowym (ang. LEP - Large Electron-Positron Collider). Testy te wykazały zgodność przewidywań teoretycznych z wynikami doświadczeń na poziomie 0.1% [4]. W roku 2000 LEP został zamknięty po 10 latach pracy nie odnajdując ostatniego ważnego elementu Modelu Standardowego - bozonu Higgsa. Zaobserwowano co prawda pewną nadwyżkę przypadków, sugerującą obecność Higgsa. Potwierdzenie tego odkrycia wymagałoby jednak przedłużenia działania LEP-u co najmniej o kolejny rok, na co nie pozwala harmonogram budowy LHC.

Pomimo tego, że Model Standardowy precyzyjnie opisuje fizykę oddziaływań elementarnych uważa się, że jest on tylko teorią efektywną, niskoenergetycznym przybliżeniem jakiejś bardziej ogólnej teorii. Jednym z podstawowych problemów MS jest tzw. problem hierarchii. Polega on, na niezrozumiałej różnicy między skalą elektroslabą ($\sim 100 \text{ GeV}$) oraz skalą Plancka, związaną z grawitacją ($\sim 10^{19} \text{ GeV}$). Wydaje się także, że unifikacja wszystkich 4 oddziaływań wymaga istnienia fizyki poza Modelem Standardowym.

Zaproponowano wiele teorii wychodzących poza SM. Najbardziej popularne są modele postulujące dodatkową symetrię między fermionami i bozonami, tzw. supersymetrię (ang. Super Symmetry - SUSY)[3]. W ramach tych modeli każdemu fermionowi towarzyszy bozon, a bozonowi fermion. Teorie takie więc postulują istnienie całego spektrum nowych cząstek. Skoro nie były one dotychczas obserwowane to, jeśli istnieją ich masy są zbyt duże na to by mogły być wyprodukowane w działających dotychczas zderzaczach.²

Pojawia się więc potrzeba budowy nowych, lub ulepszania istniejących maszyn, zdolnych wyprodukować nowe, ciężkie cząstki. W budowie znajduje się Wielki Zderzacz Hadronowy (ang. Large Hadron Collider - LHC) w CERN w Genewie. W fazie projektów, znajdują się liniowe zderzacze e^+e^- o energii w układzie środka masy od 500 GeV do 1.5 GeV . Aktualnie istnieją 4 projekty takich maszyn: NLC - Next Linear Collider w FNAL (Chicago), JLC - Japan Linear Collider w KEK (Tsukuba k. Tokio), oraz TESLA - TeV-Energy Superconducting Linear Collider w DESY (Hamburg). Zmodyfikowano także zderzacz $p\bar{p}$ Tevatron w Narodowym Laboratorium Fermiego w Batawii koło Chicago (Fermi National Accelerator Laboratory - FNAL) podnosząc znacznie jego świetność. W fazie wstępnych projektów znajduje się CLIC - Compact Linear Collider w CERN (Genewa). Ma on

¹W bardziej ogólnych teoriach, np. w supersymetrycznych występuje więcej cząstek Higgsa. W najprostrzym modelu (MSSM - Minimal Supersymmetric Standard Model) jest ich 5. [3]

²Pewną informację można uzyskać z poprawek radiacyjnych, w których w pętach są wymieniane nowe cząstki. Takie analizy dają zwykle dolne granice mas dla tych cząstek wyższe niż wynikające z braku obserwacji.

wykorzystywać nowatorską technologię wiązki prowadzącej i przyspieszać elektrony do energii rzędu 5 TeV.

2 Detektor CMS przy LHC

Z uwagi na małą masę elektron poruszający się po torze zakrzywionym emituje znaczną część swej energii w postaci promieniowania synchrotronowego. Moc tego promieniowania jest proporcjonalna do $1/m^4 R^2$ [7]. Można więc zmniejszyć straty na promieniowanie synchrotronowe budując akceleratory o coraz większym promieniu aż po liniowe.³ Dla akceleratorów liniowych problemem może być duża długość wymagana dla uzyskania odpowiednio wysokiej energii. Projekt TESLA przewiduje ok. 15 km dla przyspieszania e^+ i drugie tyle dla e^- przy planowanej energii wiązki 500 GeV, CLIC ma wykorzystywać nową technikę przyspieszania pozwalającą na uzyskanie wiązki o energii 3 TeV przy długości jednego ramienia 38 km. Akcelerator kołowy LEP miał promień ok. 4 km., przy energii wiązki 105 GeV. Jeżeli chcielibyśmy uzyskać energie rzędu 1 TeV promień, lub długość akceleratora elektronowego stają się zbyt wielkie. Pozostaje więc przyspieszanie cząstek o dużej masie. W Tevatronie p i $\bar{p}$ są przyspieszane do energii 1 TeV, na okręgu o promieniu 1 km. W LHC przeciwbieżne wiązki protonów będą przyspieszane do energii 7 TeV, dając energię w środku masy równą 14 TeV. Planuje się też przyspieszanie jonów ołowiu do energii 2.76 TeV na nukleon [5].

2.1 Akcelerator LHC

W akceleratorze LHC będą przyspieszane, a następnie zderzane przeciwbieżne wiązki protonów. Protony będą utrzymywane na orbicie kołowej o obwodzie 27 km (znajdującej się w tunelu wykorzystywanym uprzednio przez LEP) za pomocą magnesów nadprzewodzących dających pole magnetyczne o indukcji 8.4 T. Będą one zgrupowane w paczki, z których każda będzie zawierała ok. 10^{11} cząstek. Takich paczek na całym obwodzie akceleratora będzie 2835, oddzielonych od siebie przestrzennie o 7.5 m a czasowo o 25 ns. Oznacza, to, że przecięcia wiązek będą zachodziły co 25 ns, czyli 40 milionów razy na sekundę. Planowana świetność wynosi $\mathcal{L} = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Przy takiej świetności w każdym przecięciu wiązek będzie zachodziło średnio 17 zderzeń pp.

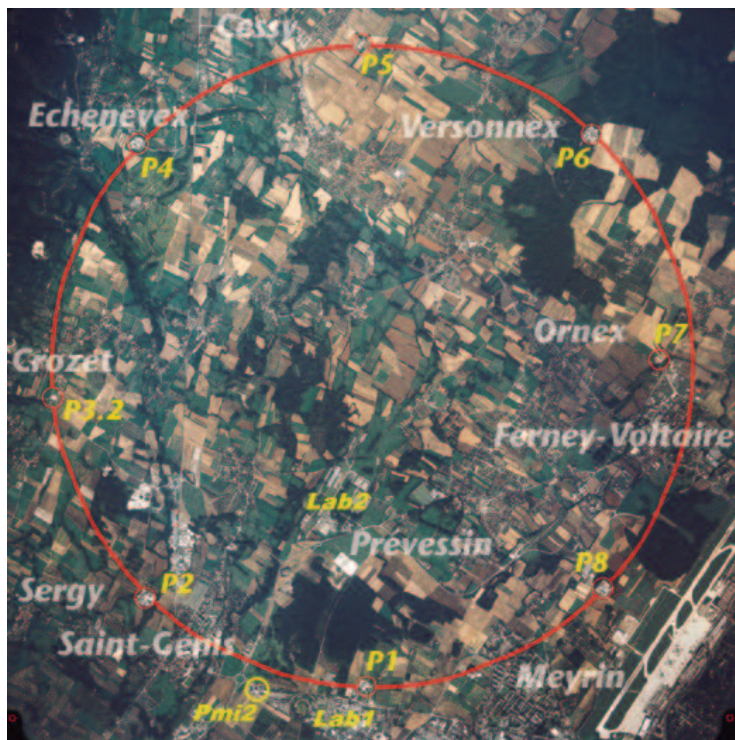
W czterech punktach przecięcia wiązek będzie zlokalizowanych 5 eksperymentów: ATLAS (A Toroidal Apparatus), CMS (Compact Muon Solenoid), LHCb (b - związane jest z kwarkiem b, którego badaniu poświęcony jest ten detektor), ALICE (A Large Ion Collider Experiment), oraz TOTEM (Total Cross Section, Elastic Scattering and Diffraction Dissociation at the LHC) umieszczony na obszarze eksperymentu CMS.

Pierwsze, próbne, uruchomienie akceleratora jest planowane na wiosnę 2007r.

2.2 Detektor CMS

Detektor CMS umieszczony będzie w przecięciu P5, na obszarze Francji w okolicach Cessy, ok. 8 km na północ od CERN, na głębokości 30 m (Rys. 1). CMS został zaprojektowany jako uniwersalny detektor, w którym szczególny nacisk położono na precyzyjną rekonstrukcję mionów o wysokim pędzie poprzecznym. Jak każdy nowoczesny detektor ma on budowę warstwową. Składa się z koncentrycznych warstw detektorów

³W przypadku akceleratorów liniowych także mamy do czynienia z promieniowaniem synchrotronowym, tym razem spowodowanym przyspieszeniem liniowym. Efekt ten staje się istotny dopiero dla gradientów pola $\sim 10^{14} \text{ MeV/m}$ [7].



Rysunek 1: Widok na obszar LHC. Eksperyment CMS jest zlokalizowany w pkt. oznaczonym P5.

ułożonych wokół punktu zderzenia (ang. IP - Interaction Point) w kształcie walca nazywanego dalej beczką. Beczka jest zamknięta z obu stron pokrywami, które także są wyposażone w detektory (Rys. 2). Taki układ zapewnia akceptancję w pełnym kącie bryłowym, z wyłączeniem obszaru wokół rury akceleratora. Głównym elementem konstrukcyjnym detektora jest jarzmo magnesu (zaznaczone kolorem czerwonym na Rys. 2) mające w obszarze beczki kształt koncentrycznych pierścieni, a w pokrywach kolistych płyt.⁴ Całkowita masa CMS'u to 14500 ton, długość 21.6 m, a średnica 14.6 m. Cząstka wyprodukowana w IP przechodzi kolejno przez następujące detektory:

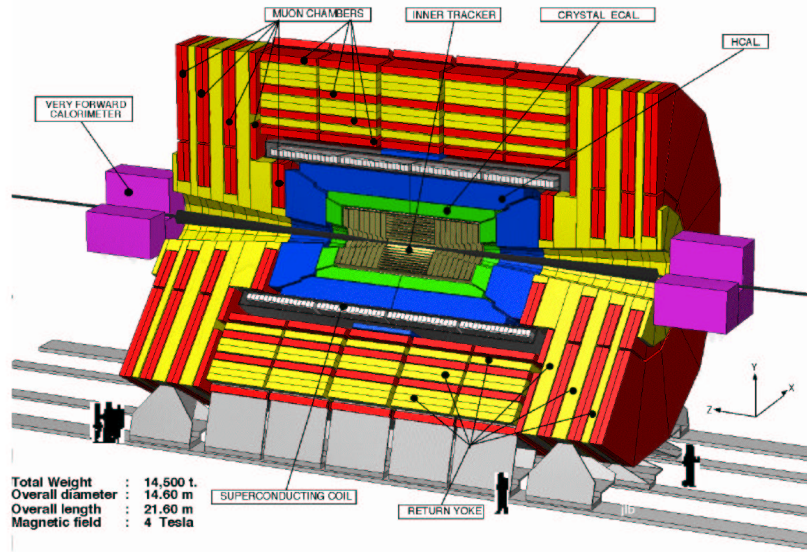
2.2.1 Detektor śladowy (ang. TD - Track Detector)

Detektor śladowy składa się z dwóch części : 10 warstw detektorów krzemowych w beczce i 9 w pokrywach otaczających 2 warstwy mozaikowego detektora wierzchołka. Całkowita powierzchnia detektora śladowego to około 200 m². Zakładana precyzja pomiaru pędu, to od $\delta p/p \approx (15 \cdot p_T \oplus 0.5)\%$ dla p_T wyrażonego w TeV, w obszarze centralnym $|\eta| < 1.6$ do $\delta p/p \approx (60 \cdot p_T \oplus 0.5)\%$, w obszarze "do przodu", $\eta \approx 2.5$.⁵ W połączeniu z informacją z komór mionowych można osiągnąć precyzję $\delta p/p \approx (4.5 \cdot \sqrt{p})\%$ dla p_T powyżej 100 GeV [9].

⁴Ilość żelaza zużyta na konstrukcję jarzma jest w przybliżeniu równa użytej przy budowie wieży Eiffela.

⁵Pseudopospiesznosc(ang. pseudorapidity) jest zdefiniowana jako $\eta = -\ln(\text{tg}(\frac{\theta}{2}))$, gdzie θ to kąt biegunowy względem osi wiązki.

Detektor CMS (Compact Muon Solenoid)



Rysunek 2: Przekrój przez detektor CMS.

Tabela 1: Rozdzielczości względne w % pomiaru pędu poprzecznego na podstawie informacji z detektora śladowego i komór mionowych dla różnych obszarów detektora.

p_T [GeV/c]	$\frac{\sigma p_T}{p_T}$	
	$\eta=0$	$\eta=2$
10	0.6	1.2
100	1.3	1.5
1000	4.5	4.5

2.2.2 Kalorymetr elektromagentyczny (ang. ECAL - Electromagnetic Calorimeter)

Jednym z założeń konstrukcyjnych detektora CMS było uzyskanie doskonałej precyzji pomiaru energii elektronów i fotonów. Zadanie to spełnia kalorymetr elektromagnetyczny. Składa się on z 76832 kryształów wolframianu ołowiu ($PbWO_4$). Pokrywa on obszar pseudospieszności w zakresie $|\eta| < 3$. Uzyskiwana rozdzielczość energetyczna, to $\frac{\sigma_E}{E} = \frac{2.7\%}{\sqrt{E}} \oplus 0.55\% \oplus \frac{0.21}{E}$ dla $\eta = 0$, oraz $\frac{\sigma_E}{E} = \frac{5.7\%}{\sqrt{E}} \oplus 0.55\% \oplus \frac{0.25}{E}$ dla $\eta = 2$ (E wyrażona w GeV) [10].

Tabela 2: Rozdzielczości względne ECAL w % dla różnych obszarów detektora.

E_T [GeV]	$\frac{\sigma E}{E}$	
	$\eta=0$	$\eta=2$
10	1	1.9
100	0.6	0.8
1000	0.6	0.6

2.2.3 Kalorymetr hadronowy (ang. HCAL - Hadronic Calorimeter)

Kalorymetr hadronowy służy identyfikacji i pomiarowi energii cząstek oddziaływujących silnie, złożonych z kwarków i gluonów. Wraz z kalorymetrem elektromagnetycznym pozwala na wyznaczenie “brakującej energii” unoszonej przez niewykrywane w detektorze cząstki (neutrino, hipotetyczne cząstki supersymetryczne). HCAL jest zbudowany z naprzemiennych warstw 50 mm mosiądzu ⁶ i 4 mm plastikowego scyntylatora. Dodatkowym elementem jest przedni kalorymetr hadronowy (ang. HF - Hadronic Forward calorimeters), złożony ze stalowych płyt poprzekładanych kwarcowymi włóknami zbierającymi promieniowanie Czerenkowa. Dzięki temu elementowi system kalorymetryczny (ECAL + HCAL) pokrywa obszar pseudospieszości o $|\eta| < 5$ [11].

2.2.4 Cewka nadprzewodząca i jarzmo zwrotne

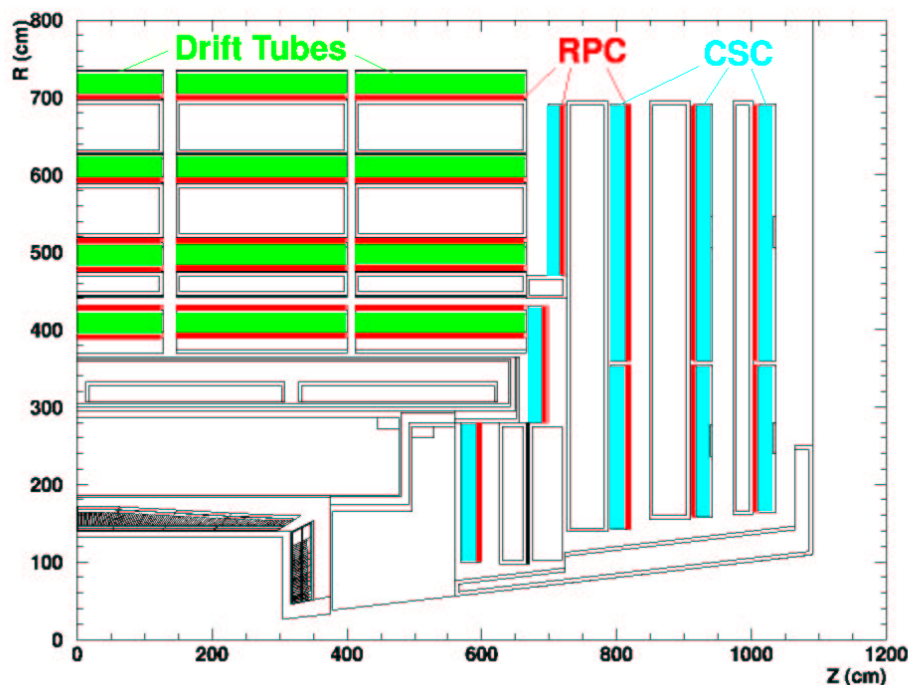
Cały wewnętrzny obszar detektora znajduje się w polu magnetycznym o indukcji 4 T, które pozwala na precyzyjny pomiar pędu cząstek naładowanych z dokładnością ok. 1% dla mionów o $p_T = 100$ GeV/c, oraz 5% dla $p_T = 1$ TeV/c.

Nadprzewodząca cewka będzie miała długość 13 m i średnicę 5.9 m. Będzie ona dawała jednorodne pole magnetyczne o indukcji 4 T. Pole magnetyczne będzie zamknięte żelaznym jarzmem zwrotnym o całkowitej grubości 1.8 m. Jarzmo to będzie składało się w beczce z 5 kół złożonych z zestawów koncentrycznych, żelaznych pierścieni. Między pierścieniami, będą umieszczone stacje mionowe. Każda pokrywa będzie składała się z 3 okrągłych płyt, między którymi zostaną umieszczone komory mionowe. W obszarze jarzma indukcja magnetyczna wydosi do 2 T.

2.2.5 System mionowy

System mionowy składa się z 3 typów detektorów: komór dryfowych (ang. DT - Drift Tubes) w obszarze beczki ($0 \leq \eta \leq 1.3$), komór z segmentowaną katodą (ang. CSC - Cathode Strip Chambers) w pokrywach ($0.9 \leq \eta \leq 2.4$), oraz komór gazowych z wysokooporowymi elektrodami (ang. RPC - Resistive Plate Chambers) w całym detektorze ($0 \leq \eta \leq 2.1$), Rys. 3. Komory są zgrupowane w 4 stacje mionowe, przedzielone warstwami żelaza jarzma magnezu. W stacjach 1 i 2 (licząc od cewki) w obszarze beczki znajdują się dwie warstwy komór RPC. W beczce są one zgrupowane w 5 kół, odpowiadających elementom jarzma. Komory w każdym kole są podzielone na 2 wzdłuż osi wiązki, z wyjątkiem drugiej płaszczyzny, która jest podzielona na 3 części. Na całym obwodzie detektora komory RPC są podzielone na paski, równoległe do wiązki w beczce i radialne w pokrywach. Każdy pasek pokrywa obszar $5/16^\circ$ w kącie azymutalnym, mamy więc 1152 paski na całym obwodzie.

⁶Mosiądz użyty w HCAL pochodzi ze złomowania łusek do posików rosyjskich okrętów wojennych.[15]



Rysunek 3: System mionowy detektora CMS.

System mionowy jest kluczowym elementem układu wyzwalania (Rozdz. 2.3). Dobra zdolność rozdzielcza komór CSC i DT w połączeniu z bardzo dobrą charakterystyką czasową komór RPC pozwala na szybkie oszacowanie pędu poprzecznego mionu i przypisanie go do określonego przecięcia wiązek, co stanowi podstawowe informacje dla systemu wyzwalania opisanego w następnym paragrafie.

2.3 Układ wyzwalania (tryger)

Przy zderzeniach zachodzących z częstością 40 MHz, detektor CMS będzie produkował 100 TB/s (terabajtów/s), co przy obecnych technikach zapisu jest ilością danych praktycznie niemożliwą do zachowania w pamięciach stałych (np. na twardych dyskach). Stąd wynika konieczność selekcji przypadków i wyboru tylko małej, interesującej nas części. Zadanie to spełnia system wyzwalania (tryger), który ma wybrać około 100 przypadków na sekundę, które będzie można zapisać na twardych dyskach. Średni rozmiar przypadku to 1 MB, wymaga to więc zapisu z prędkością 100 MB/s. Nawet przy tak wielkiej redukcji danych ($1/10^6$) CMS będzie produkował 1 TB danych dziennie, które będą zachowywane.

Tryger będzie podzielony na kilka stopni:

- Stopień 1 (LV1 - Level 1)

Ponieważ nie można sobie pozwolić na utratę interesujących przypadków, tryger musi podejmować decyzję dla każdego z pojawiających się co 25 ns przypadku. Taki odcinek czasu to zdecydowanie za mało na wykonanie potrzebnych operacji. Rozwiązaniem problemu jest przetwarzanie potokowe. Dane są przechowywane w

buforze, a algorytm analizy podzielony na kroki, o czasie wykonywania równym 25 ns (lub 1BX - Bunch Crossing). Bufor na długość 128 BX, czyli $3.2 \mu s$. Odliczając czas potrzebny na propagację sygnałów otrzymujemy ok. $1 \mu s$ na analizę. W tak krótkim czasie nie można wykonać złożonych algorytmów jak np. rekonstrukcja torów w detektorze śladowym. Tryger LV1 będzie więc oparty na cięciach na pędzie poprzecznym mionów oszacowanym przez system mionowy, oraz wielkościach kalorymetrycznych: energiach dżetów (E_j), ilości brakującej energii (E_T^{miss}) oraz energii fotonów i elektronów bez rozróżnienia między tymi cząstkami. Na tym etapie algorytmy będą zaimplementowane sprzętowo w układach scalonych typu FPGA lub ASIC. Zakłada się, że pierwszy stopień ma zredukować częstość przypadków do 75 kHz, z przewidywanym rozszerzeniem do 100 kHz, przy zastosowaniu technik, jakie mogą się pojawić do czasu zbudowania detektora. Przyjmując czynnik bezpieczeństwa 3, otrzymujemy pasmo o szerokości 25 kHz, do podziału między tryger kalorymetryczny i mionowy.

- Wyższe stopnie trygera (HLT - High Level Triggers)

Po redukcji liczby przypadków na sekundę z 40 milionów do 100 tysięcy, pozostałą część można poddać dokładniejszej analizie z użyciem złożonych algorytmów i wszystkich informacji (w szczególności danych z detektora śladowego). Ta część trygera jest implementowana programistycznie na farmie komputerów klasy PC. Aktualnie algorytmy HLT nie mają jeszcze ostatecznie ustalonego kształtu i znajdują się na etapie intensywnego rozwoju [13]. Na wyjściu HLT ma dawać 100 Hz przypadków, co już przy obecnym stanie techniki zapisu można zachować na twardych dyskach.

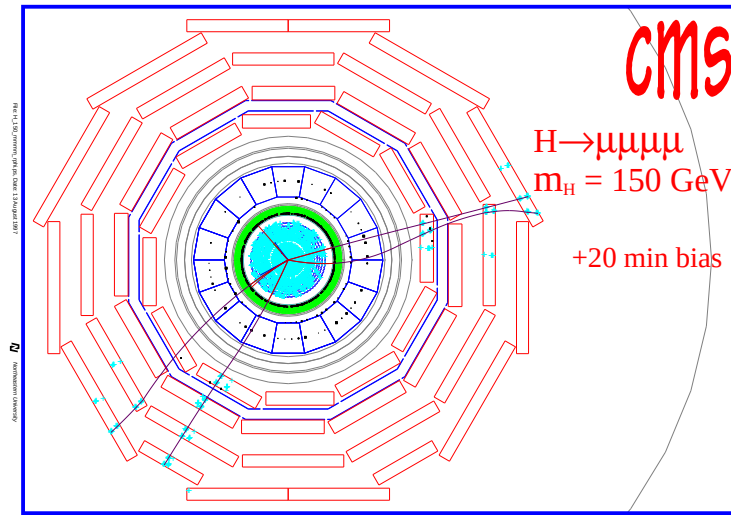
3 Tryger mionowy pierwszego stopnia

Przewiduje się, że w procesach “nowej fizyki” powinny powstawać leptony o dużym pędzie poprzecznym w stanie końcowym, np. jednym z bardziej obiecujących kanałów rozpadu Higgsa jest tzw. kanał 4μ . W tym przypadku Higgs rozpada się na dwa bozony Z^0 , a te następnie na 2 pary $\mu^+\mu^-$: $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \mu\mu\mu\mu$. Jeden z bozonów Z może być wirtualny, co oznaczono gwiazdką. Na Rys. 4 jest pokazana symulacja przykładowego przypadku tego typu.

Każdy zespół detektorów systemu mionowego będzie posiadał własny tryger. Komory RPC będą podłączone do trygera PACT (ang. Pattern Comparator Trigger), z danych CSC oraz DT będą rekonstruowane tory którym zostaną przypisane pęd poprzeczny (p_T), oraz informacja o jakości rekonstrukcji (Q - Quality). Każdy system wysyła kandydatów (4 CSC, 4 DT, 4 z beczki i 4 z pokryw RPC) do globalnego trygera mionowego (ang. GMT - Global Muon Trigger), który sortuje miony według ich jakości i pędu i wysyła 4 “najlepszych” kandydatów do trygera globalnego (ang. GT - Global Trigger). Tryger globalny podejmuje decyzję na podstawie informacji z trygera kalorymetrycznego i mionowego.

3.1 PACT - Pattern Comparator Trigger

Tryger PAC dokonuje przypisania pędu poprzecznego na podstawie wyniku porównania toru utworzonego przez trafienia w 4 płaszczyznach komór RPC ze wzorami wygenerowanymi dla różnych p_T , Rys. 5 i 14. W beczce są brane 4 płaszczyzny bliższe cewki dla małych pędów $p_T < 10 \text{ GeV}$, oraz płaszczyzny oznaczone 1, 2, 3 i 4 na Rys. 7 dla wysokich p_T . Pędy poprzeczne zostały zgrupowane w 31 przedziałów opisanych w Tab. 3. Dopuszczalne są tory z 4 lub 3 trafieniami. Informacja o numerze brakującej płaszczyzny jest przekazywana jako “jakość”. Miony penetrując żelazo jarzma ulegają wielokrotnemu rozproszeniu (Rys. 6), co

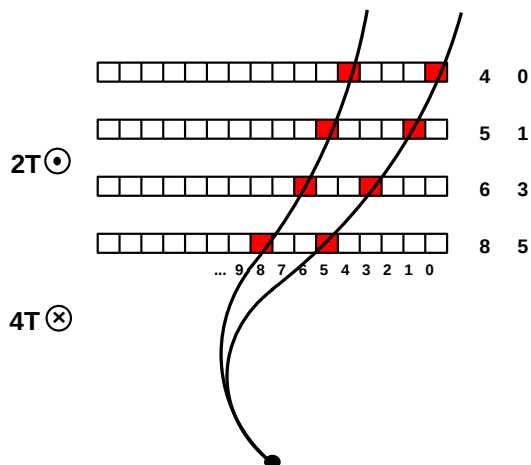


Rysunek 4: Przypadek z rozpadem $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \mu\mu\mu\mu$. “20 min bias” oznacza, że w symulowanym przecięciu wiązek zaszło dodatkowo jeszcze 20 oddziaływań pp.

Tabela 3: Przedziały pędowe trygera PAC. Liczby w kolumnie p_T oznaczają dolne kresy zbiorów.

Ipt	p_T [GeV/c]	Ipt	p_T [GeV/c]
1	0.0	16	16.0
2	1.5	17	18.0
3	2.0	18	20.0
4	2.5	19	25.0
5	3.0	20	30.0
6	3.5	21	35.0
7	4.0	22	40.0
8	4.5	23	45.0
9	5.0	24	50.0
10	6.0	25	60.0
11	7.0	26	70.0
12	8.0	27	80.0
13	10.0	28	90.0
14	12.0	29	100.0
15	14.0	30	120.0
		31	140.0

powoduje, że dla jednego pędu mamy wiele możliwych śladów, a także ten sam wzór może być utworzony przez miony o różnych pędach. Tryger przypisuje mionowi najwyższy pęd do jakiego pasuje jego tor. Następnie miony są sortowane według jakości i pędu (jakość ma większą wagę). Do GMT są wysyłane 4 najlepsze miony z beczki i 4 z pokryw. Tabela 6 zawiera liczby wzorców dla każdej z wież dla pędów wysokich, niskich, oraz granicę między nimi. Zakłada się symetrię dla wież $\pm X$ [20]. Dla mionów przeciwnego znaku



Rysunek 5: Zasada działania trygera PAC.

liczby są identyczne (wzorce dla nich są uzyskiwane przez symetrię odbicia względem paska referencyjnego).⁷

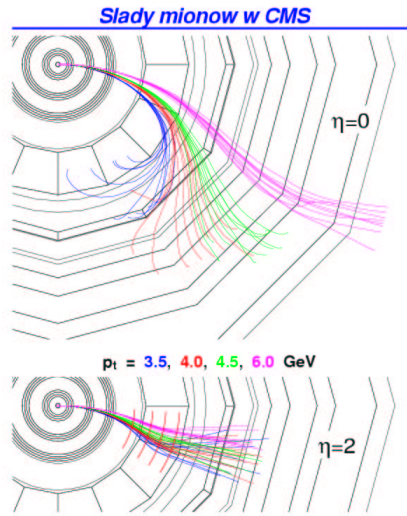
Przestrzennie obszar detektora został podzielony na 33 wieże w pseudopospiesznosci, Rys. 7. W kącie azymutalnym mamy 144 segmenty, każdy obejmujący 2.5° (8 pasków płaszczyźnie referencyjnej). Dane wejściowe dla PACa stanowią różnice położenia trafień w poszczególnych płaszczyznach względem płaszczyzny referencyjnej, oznaczone kolorem żółtym na Rys. 7, wyrażonych w paskach RPC. (Od tego miejsca przez PAC będziemy rozumieli jeden segment obejmujący 2.5° w płaszczyźnie referencyjnej.) Z każdym paskiem w płaszczyźnie referencyjnej jest związany stożek sformowany przez połączenia pasków RPC z PACem, opisany w Tab. 4. Sprzętowo każdy segment jest obsługiwany przez jeden procesor ASIC [19].

Tabela 4: Opis połączeń pasków RPC z PACT. Zapis 8-1+8 oznacza, że jest brane 8 pasków na prawo i na lewo, oraz 1 odpowiadający paskowi w stacji referencyjnej. OR8+2xOR4 oznacza, że połowa stożka składa się z 1 paska logicznego utworzonego z 8 fizycznych, oraz 2 utworzonych z 4 fizycznych, patrząc od zewnętrznej krawędzi.

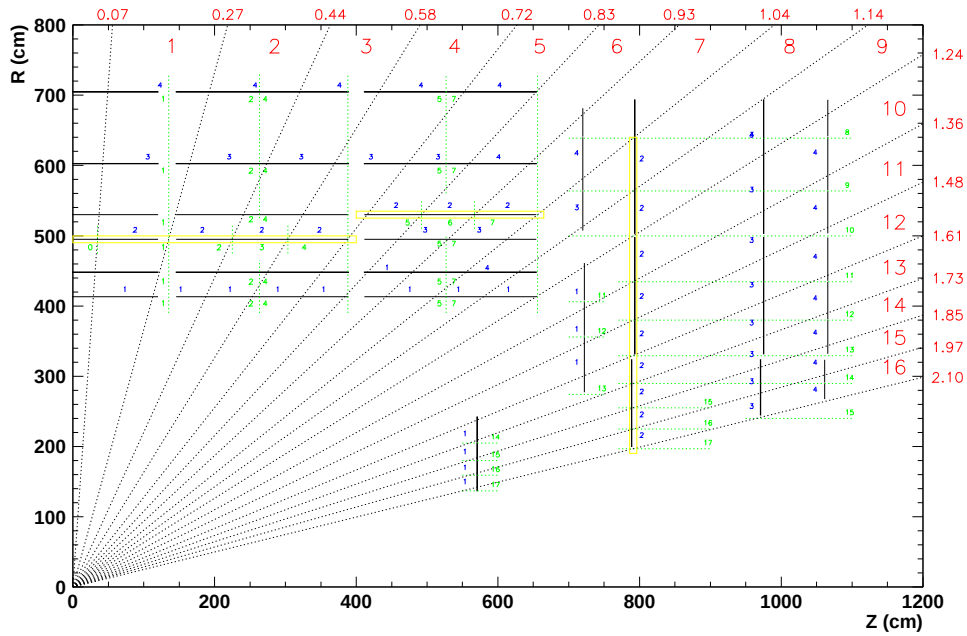
Płaszczyzna	Rozkład na paski logiczne	
	bloki 1-8	blok 9
1	12-1+12, 12=OR4+OR3+OR2+3xOR1	32-8+32, 32=2xOR8+4xOR4
1'(5)	–	24-8+24, 24=OR8+4xOR4
2	1	8, 8=1xOR8
2'(6)	–	16-8+16, 16=4xOR4
3	8-1+8, 8=OR3+OR2+3xOR1	–
4	8-1+8, 8=OR3+OR2+3xOR1	–

W celu zmniejszenia liczby połączeń nie wszystkie paski są używane jednocześnie, a część jest połączona poprzez operację OR w szersze paski logiczne. PAC jest podzielony

⁷Nie oznacza to jednak, że odpowiedź detektora na miony o przeciwnych znakach jest całkowicie symetryczna. Różnice w wieżach zostały sparametryzowane w [29].



Rysunek 6: Symulowane ślady mionów. Na drugim rysunku miejsca, gdzie ślady przechodzą przez przednie stacje mionowe (w pokrywach), są zaznaczone łukami. Widać wyraźne rozmycie spowodowane wielokrotnym rozpraszaniem.



Rysunek 7: Podział fizyczny komórek RPC i logiczny PACT. Zaznaczono granice w η kolejnych wież.

na 8 bloków, każdy związany z jednym paskiem ze stacji referencyjnej, oraz dodatkowy blok 9 związany ze wszystkimi 8 paskami. Każdy z bloków 1-8 jest połączony z płaszczyznami 1,2,3,4 w których paski są pogrupowane jak opisano w Tab. 4. Blok 9 jest dedykowany rozpoznawaniu mionów o niskim pędzie, a więc silnie uginających się w polu magnetycznym. W becce jest on podłączony do płaszczyzn 1,2,5,6 ponieważ miony niskopędowe ($p_T < 7 \text{ GeV}/c$) nie dolatują dalej. Wykorzystuje on wszystkie dostępne paski, jednocześnie ograniczając mocno granularność (grupując po 4 i 8 pasków fizycznych). Jest to związane z tym, że miony niskopędowe ulegają bardzo silnemu rozpraszaniu wielokrotnemu (Rys. 6), co przy dużej granularności powodowałoby zbyt wielką liczbę wzorców im odpowiadających. Dane z komór RPC są przesyłane łączyami optycznymi na płytę trygera (TB - Trigger Board), gdzie są odbierane przez odpowiednio zaprojektowany układ LDEMUX. LDEMUX dekoduje dane z łączy, łączy informacje z sąsiadujących pasków tworząc logiczne paski OR4 i resynchronizuje je z zegarem zewnętrznym. Dane wejściowe dla PAC są podawane na obu zboczach zegara, co pozwala wydajnie zmniejszyć liczbę potrzebnych połączeń. Jeden układ PAC pobiera 62 bity danych z komór RPC, Tab. 5, 1 bit taktu zegara i 4 BS. Na wyjściu podaje 5 bitów kodu pędowego, 1 znaku i 2 jakości [14].

Tabela 5: PAC6. Liczby bitów wejściowych dla poszczególnych płaszczyzn.

Typ	MB1	MB2	MB3	MB4	MB5(1')	MB6(2')	Suma
OR1	16	4	12	12	0	0	44
OR4	6	0	0	0	7	4	17

Tabela 6: PAC4. Liczby wzorców dla mionów jednego znaku w poszczególnych wieżach, oraz granice między pędami wysokimi i niskimi. Liczba 7 oznacza, że pędy $\geq 7\text{GeV}/c$ uznajemy za wysokie.

Wieża	Liczba wzorców dla pędów			Granica wysokie/ niskie [GeV/c]
	wysokich	niskich	wszyskich	
0	68	10	78	7
1	62	10	72	7
2	62	10	72	7
3	58	12	70	7
4	61	9	70	7
5	60	9	69	7
6	57	7	64	4.5
7	45	16	61	6
8	40	15	55	7
9	39	12	51	5
10	57	21	78	5
11	54	22	76	5
12	84	29	113	4.5
13	46	57	103	7
14	59	64	123	6
15	55	73	128	6
16	59	59	118	5

3.1.1 PACT oparty na 6 płaszczyznach (PAC6)

Podstawowa modyfikacja PACa rozważana w niniejszej pracy dotyczy obszaru beczki i polega na użyciu wszystkich 6 płaszczyzn RPC jednocześnie do wyznaczania p_T . Ponieważ niskoenergetyczne miony nie osiągają płaszczyzn 3 i 4, dopuszczalne są ślady z 3 trafieniami w płaszczyznach 1,5,6,2, czyli 4 najbliższych cewki, tak jak to miało miejsce dla PAC4. Zwiększona liczba koincydencji powoduje znaczne zmniejszenie częstości odpowiedzi trygera na szumy [31]. Stożki i liczby wzorców zostały opisane w Tab. 7, 8. Jedyna zmiana w

Tabela 7: Opis połączeń pasków RPC z PAC6. Zapis 8-1+8 oznacza, że jest brane 8 pasków na prawo i na lewo, oraz 1 odpowiadający paskowi w stacji referencyjnej. OR8+2xOR4 oznacza, że połowa stożka składa się z 1 paska logicznego utworzonego z 8 fizycznych, oraz 2 utworzonych z 4 fizycznych.

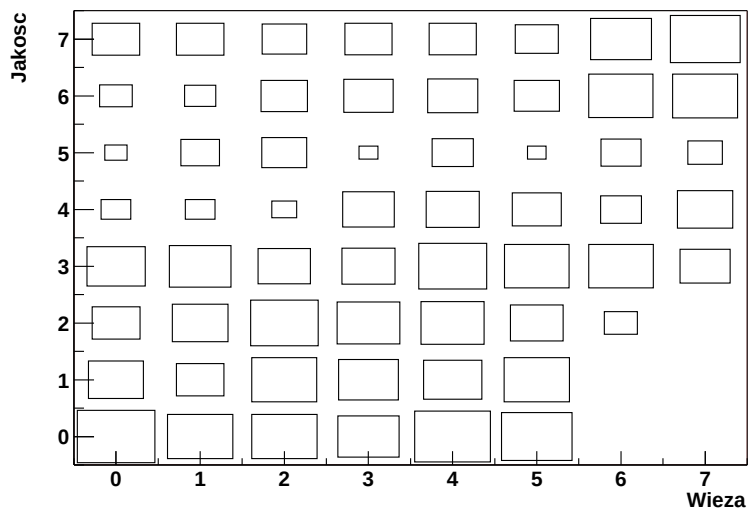
Płaszczyzna	Rozkład na paski logiczne	
	bloki 1-8	blok 9
1	12-1+12, 12=OR4+OR3+OR2+3xOR1	32-8+32, 32=2xOR8+4xOR4
1'(5)	16-1+16, 16=OR8+OR3+OR2+3xOR1	24-8+24, 24=OR8+4xOR4
2	1	8, 8=1xOR8
2'(6)	8-1+8, 8=OR3+OR2+3xOR1	16-8+16, 16=4xOR4
3	8-1+8, 8=OR3+OR2+3xOR1	16-8+16, 16=4xOR4
4	8-1+8, 8=OR3+OR2+3xOR1	24-8+24, 24=OR8+4xOR4

stożkach dotyczy płaszczyzny 5, gdzie dodano jeden, szeroki, pasek logiczny utworzony z ośmiu fizycznych (OR8).

Większa liczba płaszczyzn wymaga więcej bitów do przekazania informacji o jakości. W czasie analizy używano 6 bitów, po jednym dla każdej płaszczyzny. Implementacja sprzętowa pozwala jednak tylko na 3 bity, czyli 8 możliwości. Na podstawie analizy wkładu do częstości zliczeń od każdego z dopuszczalnych układów brakujących płaszczyzn, Dodatek B, dokonano pogrupowania opisanego w Tab. 9. Najniższe 4 jakości zostały przyznane najczęściej występującym konfiguracjom brakujących trafień pochodzących od samych szumów. Konfiguracje należące do tych kategorii dobrano tak, by efektywność z nimi związana (Rys. 10) rozłożyła się w miarę równo na wszystkie 4 możliwości. Taka procedura minimalizuje straty efektywności w przypadku, gdy dla zmniejszenia wkładu od szumów zostaną odrzucone miony o niskiej jakości na poziomie globalnego trygera mionowego (GMT).

Kolejne wartości jakości były przyznawane konfiguracjom dającym odpowiednio mniejszy wkład do częstości zliczeń pochodzących już od prawdziwych mionów. Procedura taka, przeprowadzona dla każdej wieży oddzielnie, prowadziła do różnych pogrupowań w wieżach. Jest to związane z dziurami w akceptacji geometrycznej, występującymi w różnych miejscach (płaszczyznach) dla różnych wież. By tego uniknąć przeprowadzono opisaną procedurę dla wieży 0, gdzie nie ma przerw w komorach RPC. Następnie przenoszono niektóre konfiguracje trafień do innych wartości jakości, by uwzględnić różnice między wieżami. Rys. 8, 9 przedstawiają rozkład częstości zliczeń na 8 możliwych wartości jakości. W pokrywach jest tylko 5 możliwych konfiguracji brakujących trafień, co wymaga zmiany przyporządkowania. Najniższą jakość otrzymał przypadek, gdy brak jest trafienia w 2 płaszczyźnie.

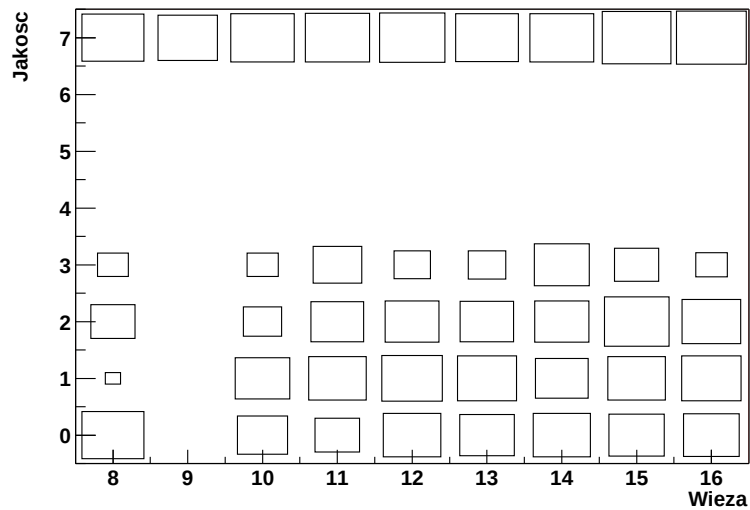
Ponieważ płaszczyzny 5 i 6 są podłączone do wszystkich bloków PACa zmienia się liczba bitów wejściowych, które kodują trafienia w kolejnych płaszczyznach. Wynosi ona teraz 91, Tab. 10.



Rysunek 8: Rozkład częstości zliczeń na poszczególne wartości jakości dla wież 0-7. Rozmiar prostokąta jest proporcjonalny do logarytmu z częstości zliczeń.

Tabela 8: PAC6. Liczby wzorców dla mionów jednego znaku w poszczególnych wieżach, oraz granice między pędami wysokimi i niskimi.

Wieża	Liczba wzorców dla pędów			Granica wysokie/ niskie [GeV/c]
	wysokich	niskich	wszyskich	
0	187	34	221	7
1	185	30	215	7
2	178	30	208	7
3	169	33	203	7
4	183	33	216	7
5	132	27	159	7
6	90	10	100	4.5
7	86	45	131	6
8	40	15	55	7
9	40	11	51	5
10	58	20	78	5
11	54	21	75	5
12	83	29	112	4.5
13	47	59	106	7
14	59	64	123	6
15	55	71	126	6
16	59	60	119	5



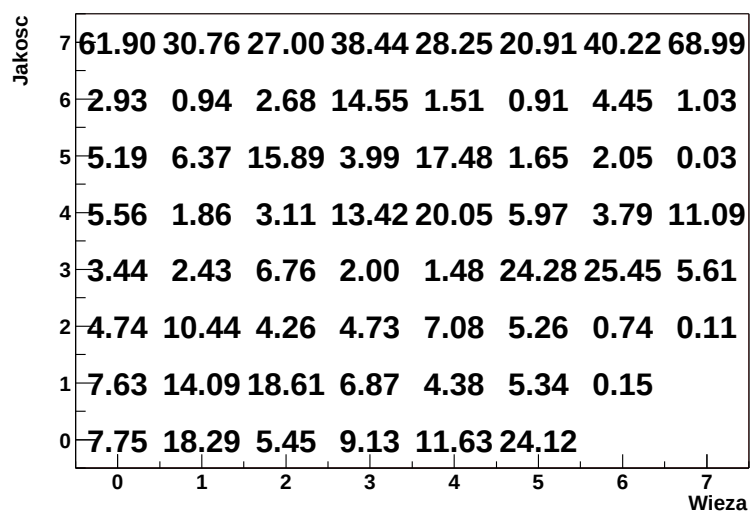
Rysunek 9: Rozkład częstości zliczeń na poszczególne wartości jakości dla wież 8-16

Tabela 9: PAC6. Konfiguracje trafień dla 8 możliwych wartości jakości. “O” oznacza brak trafienia. Płaszczyzny są uszeregowane od lewej: 1-2-3-4-5(1’)-6(2’). W pokrywach, gdzie brak płaszczyzn 5,6 uznaje się je za trafione.

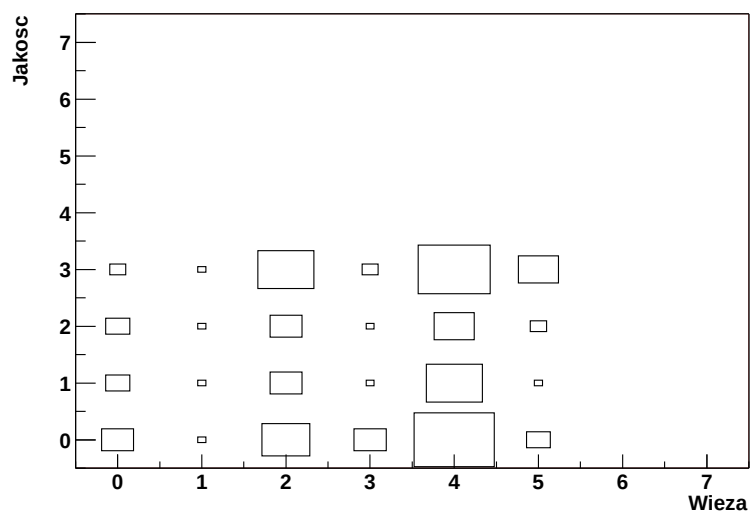
Jakość	Konfiguracje trafień	
	Beczka	Pokrywy
0	XOXXXX	XOXXXX
0	XXXXOX	
0	XXOXXX	
1	XOXXXX	OXXXXX
1	OXXXXX	
1	XXXXOO	
2	XOXXXX	XXXXOX
2	OXXXXX	
2	XXOXOX	
2	XXOXOX	
3	OXXXXX	XXOXXX
3	XOXXXX	
3	XXXXOX	
4	XOXXXX	
4	XXXXOX	
4	XXXXXO	
5	OXXXXX	
5	XXOXXX	
6	OXXXXX	
6	OXXXXX	
6	XXXXOX	
7	XXXXXX	XXXXXX

Tabela 10: PAC6. Liczby bitów wejściowych dla poszczególnych płaszczyzn.

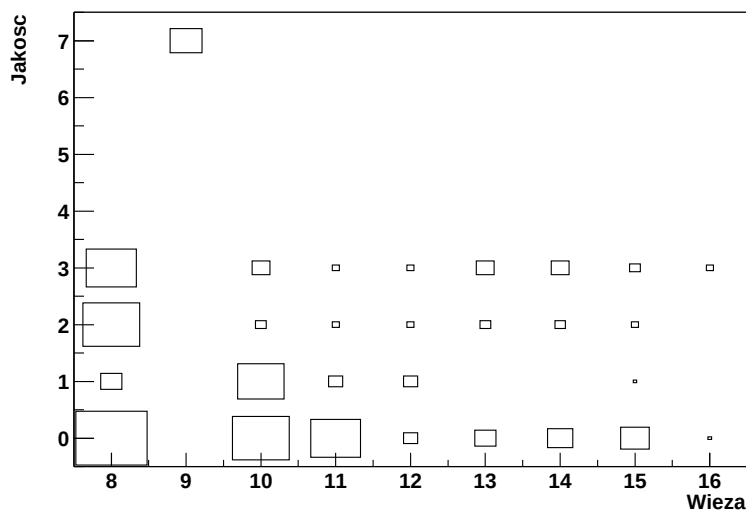
Typ	MB1	MB2	MB3	MB4	MB5(1’)	MB6(2’)	Suma
OR1	16	4	12	12	20	20	76
OR4	5	0	2	4	2	2	15



Rysunek 10: Rozkład efektywności w % powyżej progu 25 GeV/c na poszczególne wartości jakości dla wież 0-7.



Rysunek 11: Rozkład częstości zliczeń pochodzących od szumów na poszczególne wartości jakości dla wież 0-7. Wartości na “trzeciej osi” są liniowe.



Rysunek 12: Rozkład częstości zliczeń pochodzących od szumów na poszczególne wartości jakości dla wież 8-16. Wartości na “trzeciej osi” są liniowe.

3.1.2 PACT z podziałem na 3 przedziały pędowe (PAC6₃)

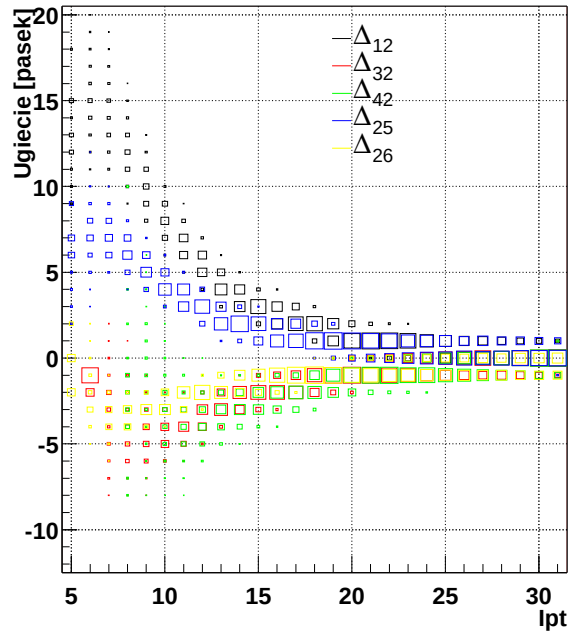
W drugim kroku, po rozszerzeniu PACa na wszystkie 6 płaszczyzn, zmieniono podział na pędy wysokie i niskie. Pędy zostały podzielone na 3 grupy: Bardzo niskie (Very Low), Niskie (Low), Wysokie (High). Do każdej grupy dobrano odpowiednio granularność i szerokość stożków (Tab. 12, 13). W pierwszym kroku wyznaczono dolną granicę pędów *wysokich*, tak, by ugięcia nie przekraczały ± 4 pasków w płaszczyźnie 1 i ± 3 w pozostałych. Szerokości stożków w poszczególnych płaszczyznach zostały tak dobrane by we wszystkich wieżach można było wyznaczyć granice zakresów pędów w sposób efektywny. Efektywny oznacza tu, że w danej wieży pędy dla których ugięcia są równe szerokości stożka są podobne dla każdej z płaszczyzn. Najniższy z pędów jest wybierany jako granica zakresu. W Dodatku D zawarto wykresy ugięć dla poszczególnych płaszczyzn oraz każdej wieży, na podstawie których wykonano omówioną powyżej procedurę.

Podział na 3 przedziały pędowe pozwala na bardziej optymalny rozkład stożków na paski logiczne o różnej szerokości. Prowadzi to do redukcji bitów potrzebnych do przesłania informacji o trafionych paskach do PAC z 91 do 72, Tab. 11.

Tabela 11: PAC6₃. Liczby bitów wejściowych dla poszczególnych płaszczyzn.

Typ	MB1	MB2	MB3	MB4	MB5(1')	MB6(2')	Suma
OR1	8	4	7	7	8	9	43
OR2	4	0	3	3	4	2	16
OR4	3	0	2	4	4	0	13

Wieża 0



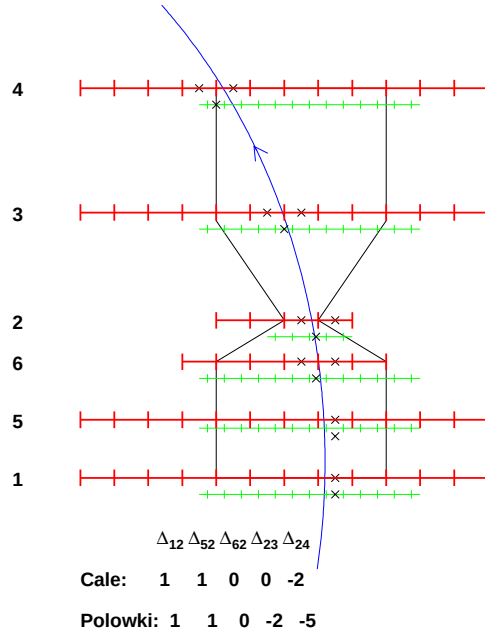
Rysunek 13: Ugięcia dla wszystkich płaszczyzn w wieży 0. Wybrano ślady dające w sumie 95% zliczeń.

Tabela 12: Liczby wzorców dla mionów jednego znaku w poszczególnych wieżach, oraz granice między kolejnymi zakresami pędów. Np. dla wieży 0 wysokie pędy są dla $p_T \geq 18$, niskie $18 > p_T \geq 8$, b.niskie $p_T < 8$.

Wieża	Liczba wzorców dla pędów				Granice między zakresami [GeV/c]	
	wys.	nis.	b nis.	wszystkich	wysokie	niskie
0	92	63	50	205	18	8
1	88	61	49	198	18	8
2	88	56	49	193	18	8
3	93	59	50	202	18	8
4	87	61	58	206	18	8
5	68	61	41	170	16	8
6	40	43	26	109	16	7
7	43	38	64	145	14	4.5
8	23	18	28	69	18	8
9	18	23	16	62	12	5
10	31	28	20	78	8	5
11	34	27	18	87	7	4.5
12	34	35	27	98	8	4.0
13	23	27	51	101	18	7
14	28	29	61	118	16	7
15	27	32	64	123	14	7
16	29	29	58	116	14	7

3.1.3 PACT z wykorzystaniem dodatkowej informacji z klastrów ($PAC6_{31/2}$)

W idealnym przypadku mion produkuje sygnał tylko na jednym pasku w komorze. Niestety w rzeczywistości mamy do czynienia z sytuacjami, gdy sygnał pojawia się na kilku paskach. Mówimy wtedy o klastrach. Obecność klastrów może w znacznym stopniu zmodyfikować zachowanie trygera, w szczególności pogorszyć jego rozdzielczość. Wpływ klastrów usiłowano zminimalizować stosując procedurę deklasteryzacji. Polegała ona na odrzuceniu dwóch skrajnych pasków klastra (algorytm " $N-2$ "), a dla pozostałych tworzone ślady łącząc każdy z każdym paski w kolejnych płaszczyznach [21]. W niniejszej pracy analizowano możliwość wykorzystania dodatkowej informacji o zależności parzystości rozmiaru klastra od położenia trafienia względem paska. Z testów komór wynika, że klastry rozwijają się symetrycznie względem miejsca trafienia, stąd wynika, że dla trafień z brzegu klastry będą miały zwykłe parzysty rozmiar, natomiast trafienia centralne będą prowadziły



Rysunek 14: Zasada deklasteryzacji. Zaznaczono granice stożka dla pędów bardzo wysokich.

do klastrów nieparzystych. Redukując klaster do jego środka poprzez zsumowanie numeru początkowego i końcowego paska, uzyskujemy położenie trafienia wyrażone w połówkach paska. Dzięki temu zabiegowi zwiększamy efektywnie granularność, co jest istotne dla słabo uginających się mionów o wysokim p_T (Rys. 14).

W celu wykorzystania tej informacji rozszerzono $PAC6_3$ o dodatkowy przedział pędowy, dla pędów bardzo wysokich. Stożek dla tego przedziału jest bardzo wąski ± 2 paski (Tab. 13). Szerszy stożek dawałby zbyt wiele wzorców. Wartość pędu jest odczytywana ze specjalnej pamięci pod adresem utworzonym ze śladu w procesie deklasteryzacji.

Algorytm deklasteryzacji składa się z następujących kroków:

- Poszukujemy klastrów w stacji referencyjnej na obszarze całego segmentu, czyli 8 pasków. Możemy mieć tu maksymalnie 4 klastry.

- Następnie dokonujemy deklasteryzacji w bloku odpowiadającym klastrowi w stacji referencyjnej. Jeżeli w stacji referencyjnej nie było trafień, deklasteryzujemy kolejno wszystkie 8 bloków.
- Ślad mionu jest wyrażany w połówkach paska i tłumaczony na adres w pamięci. Dopuszczamy tutaj także ślady z brakującymi trafieniami w beczce (4/6, 5/6) i pokrywach (3/4).
- Mionowi jest przyporządkowywany kod pędowy znajdujący się pod adresem wygenerowanym ze śladu. Pamięć zawiera także wpisy dla śladów z niepełną liczbą trafień.

Tabela 13: Rozkład stożków $PAC_{6_{31/2}}$ (oraz dla PAC_6 bez pędów bardzo wysokich) na paski logiczne dla poszczególnych przedziałów pędowych.

Płasz.	Liczba pasków i rozkład na paski logiczne dla pędów			
	b. wysokich	wysokich	niskich	b. niskich
1	2-1+2, 2=4x1/2	4-1+4, 4=4xOR1	10-2+10, 10=5xOR2	32-4+32, 32=2xOR8+4xOR4
1'(5)	2-1+2, 2=4x1/2	4-1+4, 4=4xOR1	10-2+10, 10=5xOR2	24-4+24, 24=OR8+4xOR4
2	1= 2x1/2	1	2 = 1xOR2	4 = 1xOR4
2'(6)	2-1+2, 2=4x1/2	3-1+3, 3=3xOR3	5-2+5, 5=5xOR1	8-4+8, 8=4xOR2
3	2-1+2, 2=4x1/2	3-1+3, 3=3xOR3	8-2+8, 8=4xOR2	16-4+16, 16=4xOR4
4	2-1+2, 2=4x1/2	3-1+3, 3=3xOR3	8-2+8, 8=4xOR2	24-4+24, 24=OR8+4xOR4

Tabela 14: $PAC6_{31/2}$. Liczby wzorców dla mionów jednego znaku w poszczególnych wieżach, oraz granice między kolejnymi zakresami pędów. Np. dla wieży 0 bardzo wysokie pędy są dla $p_T \geq 30$, wysokie dla $30 > p_T \geq 18$, niskie $18 > p_T \geq 8$, b.niskie $p_T < 7$.

Wieża	Liczba wzorców dla pędów				Granice między zakresami [GeV/c]		
	wys.	nis.	b nis.	wszystkich	b. wys.	wys.	niskie
0	36	63	50	149	30	18	8
1	37	60	49	146	30	18	8
2	36	57	48	141	30	18	8
3	35	59	50	144	30	18	8
4	36	61	58	155	30	18	8
5	35	61	41	137	35	16	7
6	23	43	26	92	35	16	4.5
7	25	38	64	127	35	14	7
8	7	18	28	53	35	18	8
9	17	28	16	61	30	12	5
10	11	27	20	58	12	8	5
11	13	35	18	66	12	7	4.5
12	12	38	27	77	14	8	4.0
13	13	27	51	91	40	18	7
14	11	29	61	101	35	16	7
15	12	31	64	107	35	14	7
16	25	29	58	112	30	14	7

Tabela 15: Liczby wzorców połówkowych w poszczególnych wieżach.

Wieża	Liczba wzorców
0	10090
1	11020
2	11992
3	10421
4	11735
5	9842
6	2062
7	2340
8	731
9	87
10	629
11	664
12	765
13	681
14	740
15	752
16	679

4 Symulacja

4.1 Przebieg symulacji

4.1.1 Generacja przypadków i symulacja przejścia cząstek przez detektor.

Produkcja cząstek (w tym wypadku jednego mionu na przypadek) w punkcie zderzenia, wykonywana była w programie Pythia. Następnie symulowano propagację cząstek przez detektor przy użyciu programu CMSIM, symulującego działanie detektora.

Do generacji wzorców wygenerowano próbkę 500000 μ^+ dla każdego kodu pędowego, co daje w sumie: $500k \times 31 = 15.5M$. Rozkład w kącie azymutalnym, w zakresie $0 \leq \phi \leq 2\pi$, oraz w pseudopospieszności, $-2.1 \leq \eta \leq 2.1$ był płaski. Rozkład pędu w każdym przedziale był zanikający wykładniczo, zgodnie z widmem pojedynczych mionów pochodzących z wierzchołka oddziaływania [23]. Analiza odpowiedzi trygera na miony była wykonywana na niezależnej próbce zawierającej 30k μ^+ dla każdego kodu pędowego, czyli ok. 930k przypadków.

Reakcja na szumy była badana na podstawie 930k przypadków, co odpowiada symulacji 0.02s pracy LHC przy $\mathcal{L} = 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Wynik tej symulacji był następnie przeskalowany do całej sekundy (symulacja całej sekundy LHC zajęłaby ok. 50 dni pracy komputera).

4.1.2 Symulacja odpowiedzi detektora (digityzacja).

Wygenerowane trafienia są przenoszone do obiektowej bazy danych, z której korzysta symulator CMSu o nazwie ORCA (Object-oriented Reconstruction for Cms Analysis), napisany w C++. ⁸

Proces zamiany położenia trafień, wyrażonych we współrzędnych kartezjańskich, na wielkości takie jak numer paska w komorze RPC, czy ilość ładunku zebranego w komórce CSC jest określany mianem digityzacji. ⁹

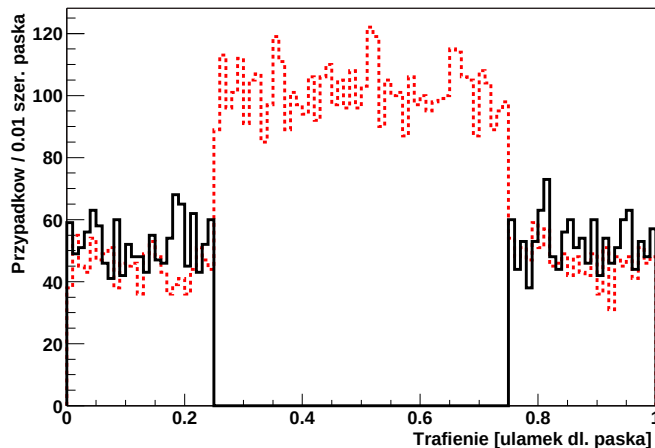
W Orce przy symulacji komór RPC zostały uwzględnione następujące efekty:

- zakłada się efektywność komór stałą dla całego detektora. Typową wartością jest 95-98%. Wszystkie prezentowane w tej pracy symulacje były wykonywane przy $\epsilon_{RPC}=1$, by zredukować wpływ czynników innych niż algorytm rekonstrukcji.
- dla każdego trafienia jest symulowany rozmiar klastra wg rozkładu wykładniczego: $\exp(-R/cs)$, gdzie R to rozmiar klastra w paskach, a cs to parametr. Jako rozmiar jest brana część całkowita $R+1$. Średni rozmiar klastra wyraża się następującym wzorem: $\langle R \rangle = \frac{1}{1-\exp(-1/cs)}$. Wartość $cs = 1.5$ najlepiej reprodukuje dane doświadczalne. Nie są symulowane tzw. strimery (ang. streamers), gdy zapala się duża (> 7) liczba pasków. Wg danych doświadczalnych prawdopodobieństwo takiego wydarzenia jest $< 5\%$ [24]. Zależność parzystości rozmiaru klastra od miejsca trafienia w pasek uwzględniono w następujący sposób: Pasek został podzielony na 3 części: 0.25 szerokości bo bokach i 0.5 w środku. Odpowiednio do miejsca trafienia jest wymuszana żądana parzystość poprzez zmniejszenie szerokości klastra o 1. W przypadku, gdy ta procedura prowadzi do klastra o szerokości 0, szerokość jest losowana jeszcze raz i nie jest modyfikowana, niezależnie od parzystości. Na Rys. 15 przedstawiono końcową zależność parzystości klastra od

⁸16 milionów przypadków użytych do generacji wzorców zajęłoby w tej bazie danych kilkadziesiąt Gb. Aby tego uniknąć dokonano modyfikacji CMSIM-a pozwalającej na zapisywanie wybranych danych do pliku ASCII, oraz modyfikacji Orki pozwalającej na czytanie tego pliku. Zmiany w CMSIM-ie wykonał Paweł Zych, za co mu dziękuję.

⁹Nazwa pochodzi stąd, że zamieniamy wielkości "analogowe" jakimi są współrzędne na "cyfrowe" (ang. digital), zwracane przez detektory.

miejsca trafienia. Jak widać klastry parzyste pochodzą tylko z trafień peryferycznych, nieparzyste z całego obszaru paska.



Rysunek 15: Rozkład położenia trafienia w pasek dla klastrów o różnej parzystości. Linia czerwona, przerywana oznaczono klastry nieparzyste.

Wadą całego algorytmu generacji klastrów jest niezależność parametru cs od miejsca w detektorze. Komory położone dalej od środka mają szersze paski (do 4 cm dla płaszczyzny 4 w beczce) niż bliższe wiązki (2 cm dla płaszczyzny 1) [25]. Niestety brak danych doświadczalnych dotyczących zależności rozmiaru klastra od szerokości paska nie pozwala na poprawne uwzględnienie tego efektu w symulacji. W celu jakościowego oszacowania wpływu tego efektu na częstość zliczeń trygera, zaadaptowano algorytm używany przez eksperyment ALICE, także wyposażony w komory RPC [22]. Szczegółowy opis użytego algorytmu znajduje się w Dodatku A. Uwzględniono tam także prostą symulację strimerów.

- Każdemu trafieniu zostaje przypisany czas przelotu (ang. TOF - Time Of Flight) mionu od wierzchołka. Rozkład czasu reakcji komory oraz rozmycie spowodowane elektroniką są opisane krzywymi Gaussa. Jak pokazały testy komór paski z klastra wykazują opóźnienie względem paska centralnego. Efekt ten został sparametryzowany zależnością postaci: $\exp(-op/3)$, gdzie op to opóźnienie danego paska wyrażone w ns. Uwzględniono także czas propagacji sygnału wzdłuż paska, zależny od odległości trafienia od układu odczytu, znajdującego się na jednym z końców paska, liczonej wzdłuż paska. Założono tu stałą prędkość propagacji: $0.66c$.

Suma wymienionych powyżej efektów składa się na czas przyścia sygnałów od poszczególnych trafień. Trafienie jest akceptowane i przypisywane do danego przecięcia wiązek (BX - Beam Crossing), jeżeli mieści się w bramce czasowej, której rozmiar jest wspólny dla całego detektora i standardowo wynosi 20 ns. Bramka ta jest przesunięta o wartość zależną od położenia komory w detektorze. Jak widać tylko trafienia pochodzące z danego BX stanowią dane wejściowe dla trygera. Trafienia z sąsiednich BX, które mogłyby być błędnie przypisane do danego BX nie są tu uwzględniane.

- Na tym etapie są dodawane i digitizowane trafienia pochodzące od szumów i cząstek neutralnych, głównie neutronów. Zakłada się stałą wartość natężenia szumów w

Hz/cm^2 dla całego detektora. Dodatek C zawiera histogramy ukazujące częstości dla poszczególnych płaszczyzn dla szumów, oraz dla tła neutralnego. W przypadku tego ostatniego naniesiono także krzywe parametryzujące rozkłady. Jak widać tło neutralne daje istotny wkład tylko w obszarze pokryw.¹⁰

Końcowym efektem digityzacji są obiekty zawierające kod komory, numer paska w komorze, oraz numer BX. Stanowią one dane wejściowe dla trygera.

4.1.3 Generacja listy wzorców

Jak zostało opisane w Rozdz. 3.1 tryger przypisuje pęd cząstce na podstawie porównania jej toru ze wzorcem odpowiadającym danemu p_T . Wzorce są generowane w dwóch etapach:

- zbieranie kolekcji wszystkich możliwych śladów dla każdej wieży i każdego kodu pędowego, określonych jako ugięcia względem płaszczyzny referencyjnej wyrażone w paskach, Rys. 14. Uwzględniane są tylko ślady zawierające trafienia we wszystkich płaszczyznach. W przypadku generowania listy dla połówek na końcu tego etapu są dopisywane wzorce ze wszystkimi dopuszczalnymi (5/6 i 4/6 w beczie, oraz 3/4 w pokrywach) kombinacjami brakujących płaszczyzn.
- każdemu śladowi z kolekcji jest przypisywana liczba mionów jaka go wygenerowała, czyli częstość występowania. Wybierane są ślady dające w sumie 95 % zliczeń, Dodatek D. Śladom tym są przypisywane pędy. Jeżeli ślad występuje dla kilku kodów pędowych, dostaje on najwyższy z nich.

W ten sposób otrzymujemy listę wzorców (=ślady wyrażony w ugięciach względem płaszczyzny referencyjnej), w której każdemu wzorcowi jest przypisany jeden pęd.

5 Wyniki

Dla każdej wersji PACa zanalizowano krzywe efektywności w różnych wieżach, całkowitą częstość zliczeń w obecności szumów i klastrów, oraz bez. Wyniki tych analiz są przedstawione na poniższych rysunkach. Zanalizowano także liczbę duchów, czyli przypadków, gdy dla jednego prawdziwego mionu PAC zwraca kilka. Sytuacje takie są wynikiem dopuszczenia śladów z brakującymi trafieniami (5/6, 4/6 lub 3/4). Tryger PAC może zrekonstruować prawdziwy mion oraz “ducha” w sąsiedniej wieży lub sektorze z brakującymi trafieniami. Zanim tryger przekaże miony do Globalnego Trygera Mionowego jest przeprowadzana procedura usuwania duchów (ang. ghostbusting). Jeżeli w sąsiednich wieżach, lub sektorach w kącie azymutalnym zostały znalezione miony to wybierany jest jeden o największym pędzie i jakości [27],[28]. Próbką służąca do analizy odpowiedzi trygera została znormalizowana tak, by symulowane widmo p_T odpowiadało dokładnie parametryzacji p_T pojedynczych mionów uzyskanej w detalicznej symulacji [30] w programie PYTHIA 6.136 [18].

Krzywe efektywności zostały uzyskane na podstawie próbek zawierających tylko miony, bez szumów i tła neutronowego. Częstości zliczeń dla każdego, ze źródeł (miony, szumy i tło) zostały uzyskane oddzielnie, a następnie zsumowane by uzyskać całkowitą odpowiedź trygera. Procedura ta jest z dobrym przybliżeniem poprawna, gdyż prawdopodobieństwo reakcji trygera w jednym przecięciu jest $< 1\%$ dla każdego ze źródeł i można zaniedbać człon przekrywania we wzorze na prawdopodobieństwo sumy zdarzeń:

¹⁰Neutrony wzbudzają jądra atomów detektora, które przechodząc do stanów podstawowych emitują kwanty gamma. Fotony konwertują na pary elektron-pozyton, które dają sygnał w komorach detekcyjnych.

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B) \simeq P(A) + P(B)$$

gdzie:

$P(A)$ - prawdopodobieństwo reakcji trygera w jednym BX (25 ns) w obecności samych mionów, $P(A) < 1\%$

$P(B)$ - prawdopodobieństwo reakcji trygera w jednym BX (25 ns) tylko w obecności szumów i tła, $P(B) < 1\%$

$P(A \cap B)$ - prawdopodobieństwo reakcji trygera w obecności mionów i szumów.

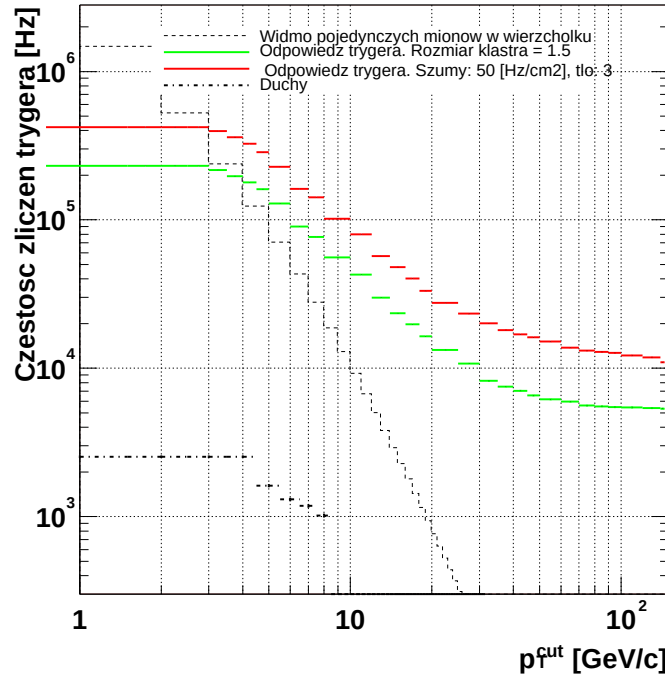
Jak widać z Rys. 16 (czarna krzywa przerywana) częstość pojawienia się mionu w systemie RPC (miony o $p_T < 1$ GeV nie docierają poza cewkę magnesu) wynosi ok. 1.5 MHz, gdy częstość przecięć wynosi 40 MHz. Oznacza to, że tylko $1.5/40 \simeq 0.04$ przecięć zawiera miony. Na tej podstawie można oszacować $P(A \cap B)$:

$$P(A \cap B) < P(B) \cdot 0.04 < 0.04\% \ll P(A) + P(B) \simeq 2\%$$

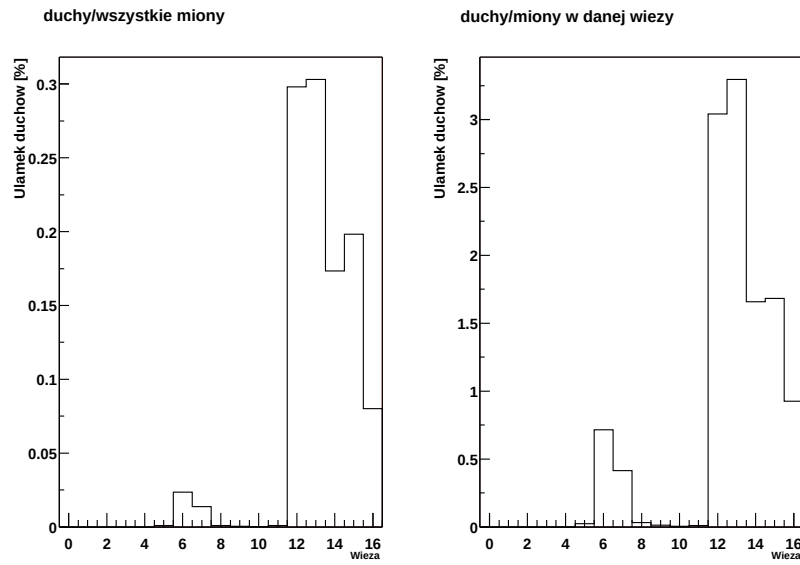
Założenie powyższe sprawdzono za pomocą symulacji dla poprzednich wersji PAC [26]. Szczegółowe symulacje pokazują także, że obecność szumów w minimalnym stopniu pogarsza zdolność rozdzielczą trygera [26].

5.1 Odpowiedź na miony

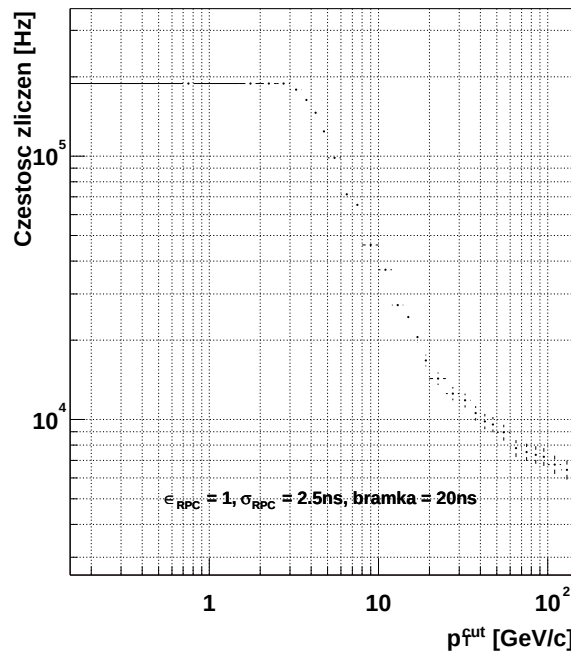
5.1.1 PAC4



Rysunek 16: Częstość zliczeń trygera. Parametry symulacji: $RPC_{eff} = 1$, $RPC_{bramka} = 20..$



Rysunek 17: Procentowy udział duchów w kolejnych wieżach. Parametry symulacji: $RPC_{eff} = 1$, $RPC_{bramka} = 20$, $cs = 1.5$.



Rysunek 18: Częstość zliczeń spowodowanych szumami i tłem.

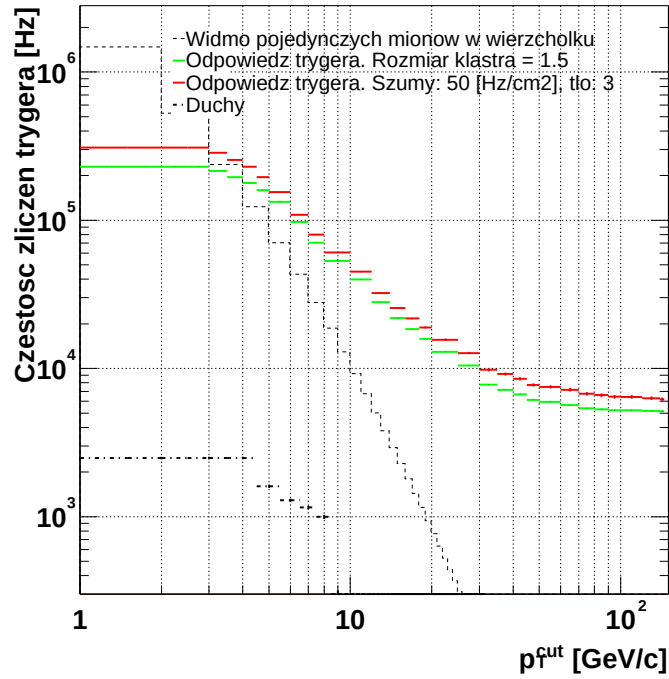
Scałkowane częstości zliczeń pojedynczych mionów są przedstawione na Rys. 16. Każdy przedział histogramu zawiera częstości zliczeń mionów o zrekonstruowanym $p_T \geq$ odpowiadającemu dolnemu kresowi przedziału. Naniesiono także scałkowane, widmo generowanego p_T mionów. Krzywa zielona odpowiada zliczeniom pochodzącym tylko od mionów, w nieobecności szumów i tła. Krzywa czerwona jest sumą krzywej zielonej i zliczeń pochodzących od samych szumów i tła.

Jak widać krzywa częstości wypłaszcza się w okolicach $p_T = 50 \text{ GeV}/c$ i znajduje się wiele rzędów wielkości ponad krzywą generowaną. Jest to związane z tym, że krzywe efektywności (Dodatek E.1) nie są idealne (tzn. nie są krzywymi $\theta(p_T - p_T^{cut})$, gdzie θ to funkcja schodkowa Heavisida'a). Generowane widmo jest bardzo strome i przesypywanie się nawet niewielkiej części mionów do wyższego przedziału pędowego powoduje znaczne zwiększenie częstości zliczeń trygera dla tego przedziału.

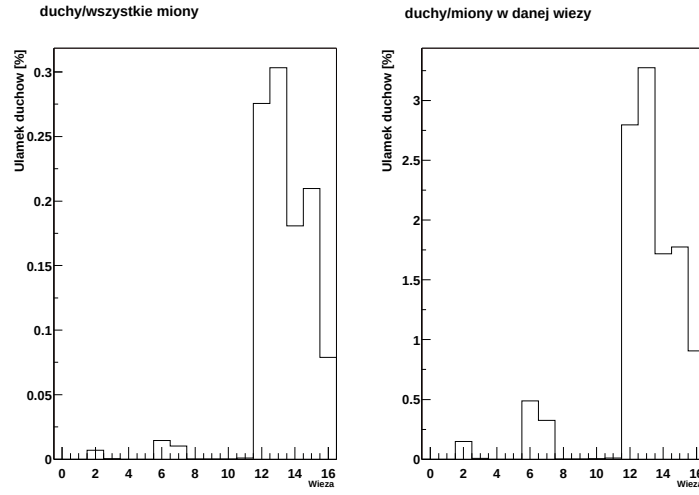
Duchy stanowią $<1\%$ mionów zwróconych przez tryger, mają bardzo niski zrekonstruowany pęd poprzeczny i prawie wszystkie pochodzą ze śladów z brakującym trafieniem w płaszczyźnie referencyjnej. Dzięki temu mogą być łatwo odrzucone na poziomie GMT [28].

5.1.2 PAC6

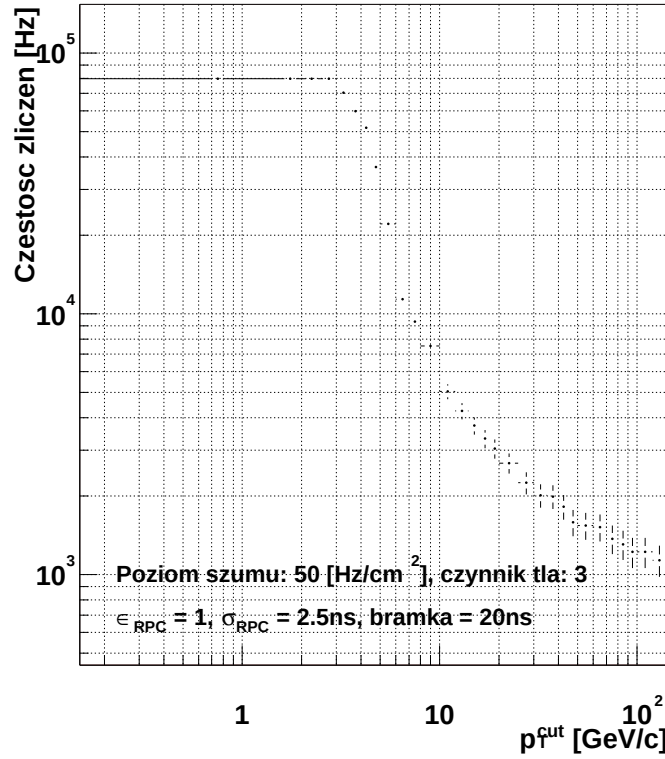
Zasadniczą zaletą wersji PACa na 6 płaszczyznach jest redukcja liczby zliczeń pochodzących od szumów w obszarze beczki. Dokładniejsza analiza została opisana w Rozdz. 6.3.



Rysunek 19: Częstość zliczeń trygera. Parametry symulacji: $RPC_{eff}=1$, $RPC_{bramka}=20$.



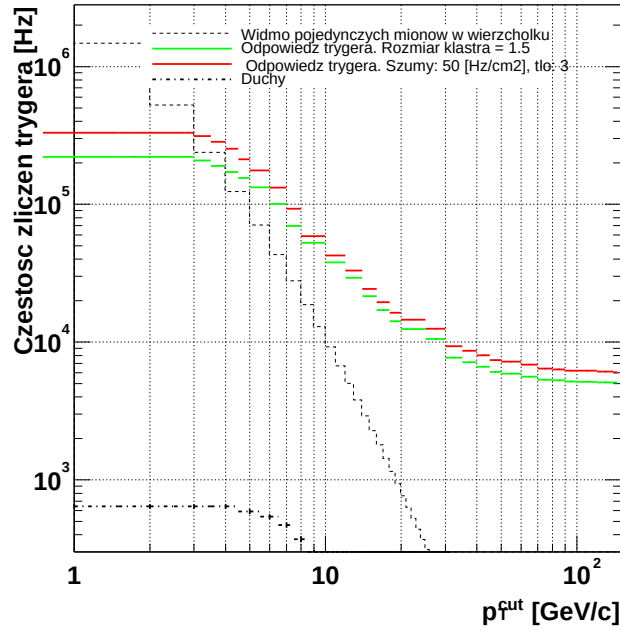
Rysunek 20: Procentowy udział duchów w kolejnych wieżach. Parametry symulacji: $RPC_{eff} = 1$, $RPC_{bramka} = 20$, $cs = 1.5$.



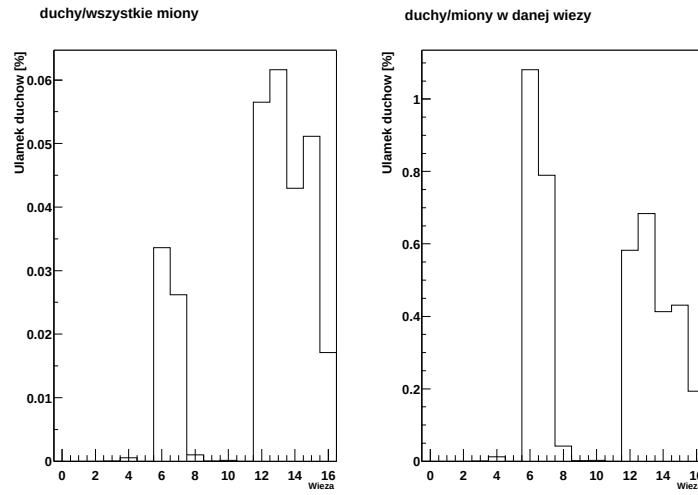
Rysunek 21: Częstość zliczeń spowodowanych szumami i tłem.

5.1.3 PAC₆₃

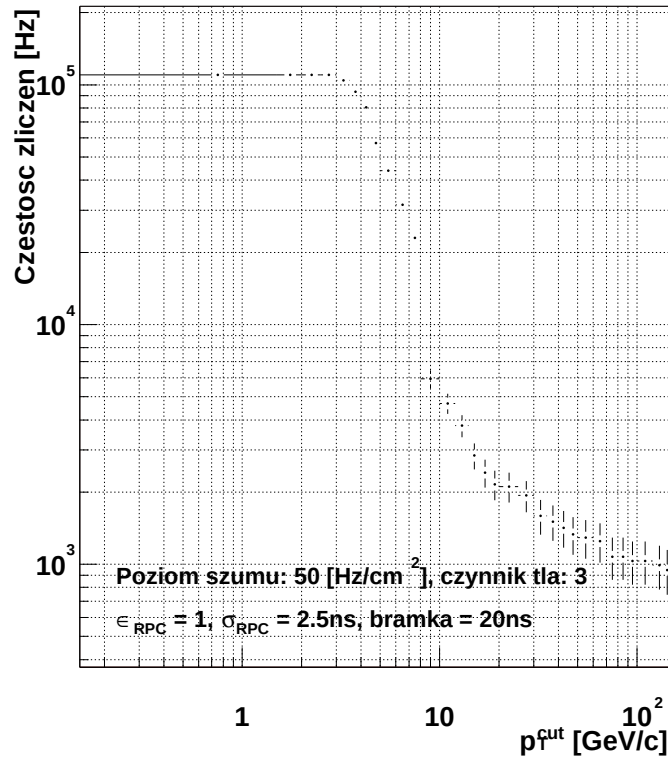
PAC z podziałem na trzy przedziały pędowe charakteryzuje się znacznie mniejszą liczbą fałszywych kandydatów (duchów) niż jest to w przypadku wersji z podziałem na dwa przedziały pędowe. Szczegółowe porównanie tej wersji z pozostałymi zostało opisane w Rozdz. 6.3.



Rysunek 22: Częstość zliczeń trygera. Parametry symulacji: $RPC_{eff} = 1$, $RPC_{bramka} = 20$.



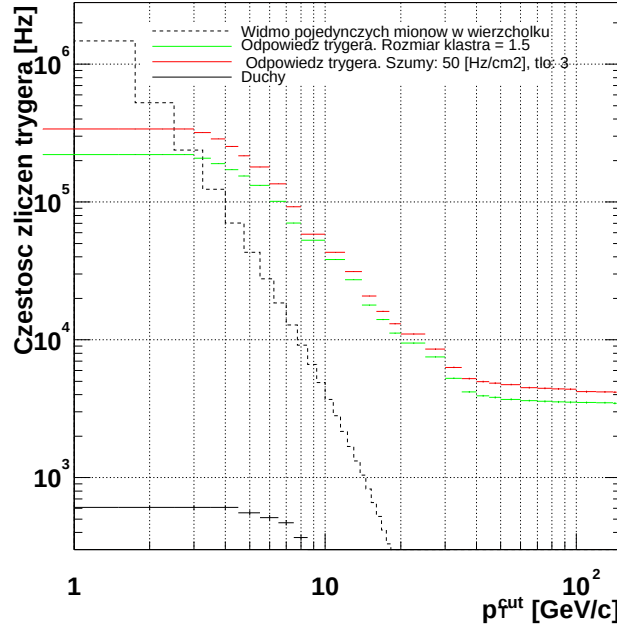
Rysunek 23: Procentowy udział duchów w kolejnych wieżach. Parametry symulacji: $RPC_{eff} = 1$, $RPC_{bramka} = 20$, $cs = 1.5$.



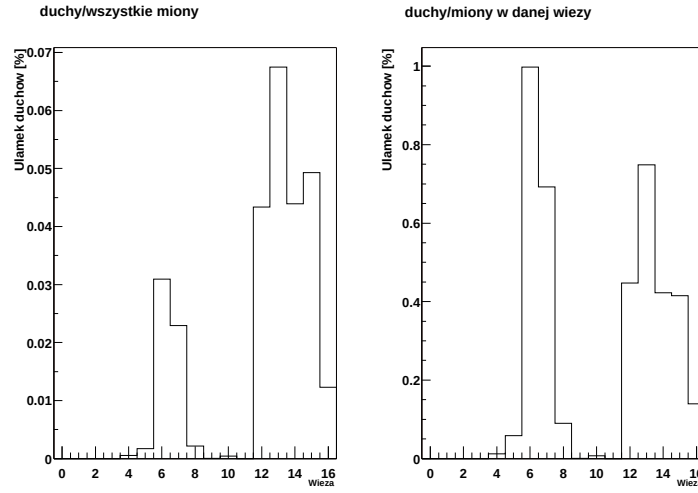
Rysunek 24: Częstość zliczeń spowodowanych szumami i tłem.

5.1.4 $PAC6_{31/2}$

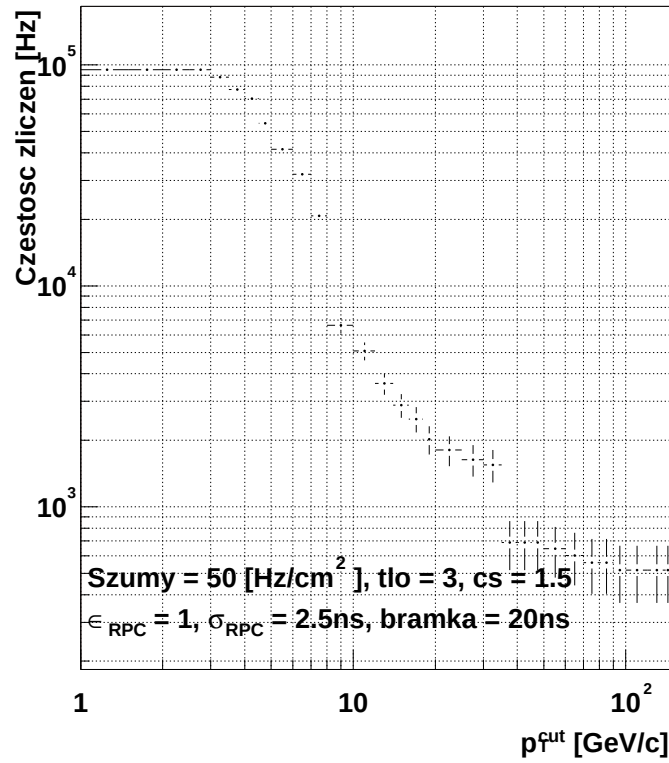
Dla pędów bardzo niskich, niskich i wysokich $PAC6_{31/2}$ zachowuje się jak $PAC6_3$. Wprowadzenie algorytmu “połówkowego” dla pędów bardzo wysokich powoduje redukcję częstości zliczeń dla cięć powyżej 30 GeV/c.



Rysunek 25: Częstość zliczeń trygera. Parametry symulacji: $RPC_{eff} = 1$, $RPC_{bramka} = 20$, $cs = 1.5$.



Rysunek 26: Procentowy udział duchów w kolejnych wieżach. Parametry symulacji: $RPC_{eff} = 1$, $RPC_{bramka} = 20$, $cs = 1.5$.

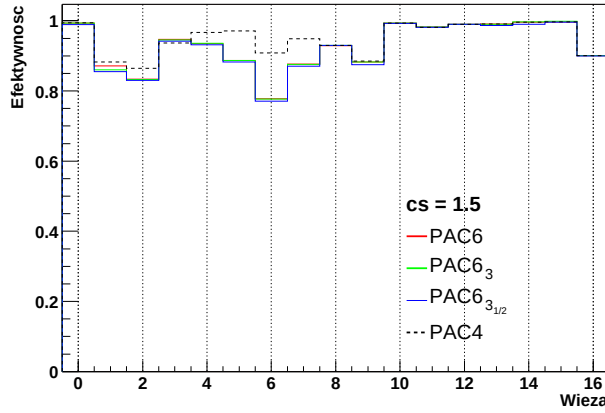


Rysunek 27: Częstość zliczeń spowodowanych szumami i tłem.

6 Porównanie różnych wersji

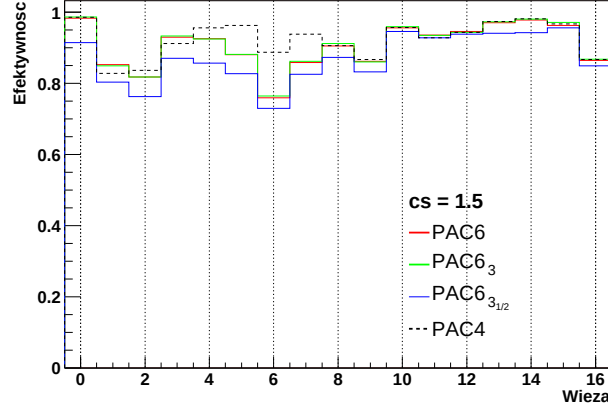
6.1 Efektywność

Rys. 28 przedstawia efektywność trygera na znalezienie conajmniej jednego mionu, o dowolnym p_T dla poszczególnych wersji. Widoczna, jest wyraźna strata efektywności wersji na 6 płaszczyznach w obszarze beczki, szczególnie w wieżach 5,6,7. Spowodowane jest to zmniejszoną akceptancją geometryczną systemu 6 płaszczyznowego względem 4 [32]. Nie ma znaczących różnic między poszczególnymi wersjami PAC6.



Rysunek 28: Efektywność w poszczególnych wieżach na znalezienie mionu o dowolnym p_T , dla mionów o $p_T \geq 100$ [GeV/c].

Na Rys. 29 przedstawiono efektywność na znalezienie mionu o $p_T \geq$ wygenerowanego. Jak widać wersja z połówkami w obszarze beczki jest znacznie gorsza od pozostałych wersji PAC6. Biorąc pod uwagę wyniki na Rys.28 oznacza to, że znaczna część mionów otrzymuje zaniżony p_T . Jest to spowodowane dużymi trudnościami w wygenerowaniu wzorców dla połówek. Wzorce te są bardzo liczne i zebranie odpowiednio licznej statystyki wymaga bardzo dużej liczby mionów. W przypadku pozostałych wersji wystarczało ok. 930k mionów w całym detektorze, do połówek użyto zaś ponad 15M mionów. Na etapie zbierania kolekcji liczba kandydatów na wzorce wynosi ok. 50000 dla wież w obszarze beczki. Przy tak dużej liczbie wzorców trudno wybrać podzbiór dający 95% zliczeń. Zwiększenie procentu zliczeń do 99 daje znaczną poprawę efektywności, przy jednoczesnym pogorszeniu rozdzielczości pędowej.



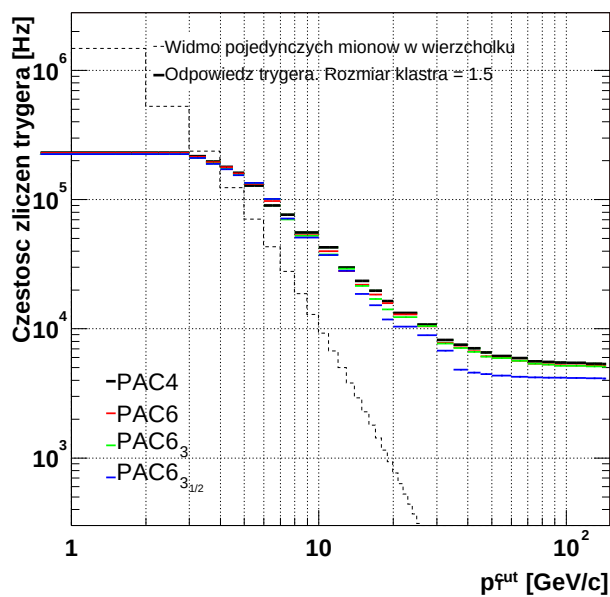
Rysunek 29: Efektywność w poszczególnych wieżach na znalezienie mionu o $p_T \geq$ wygenerowanego, dla mionów o $p_T \geq 100$ [GeV/c]. Parametr klastrow 1.5.

6.2 Częstości zliczeń

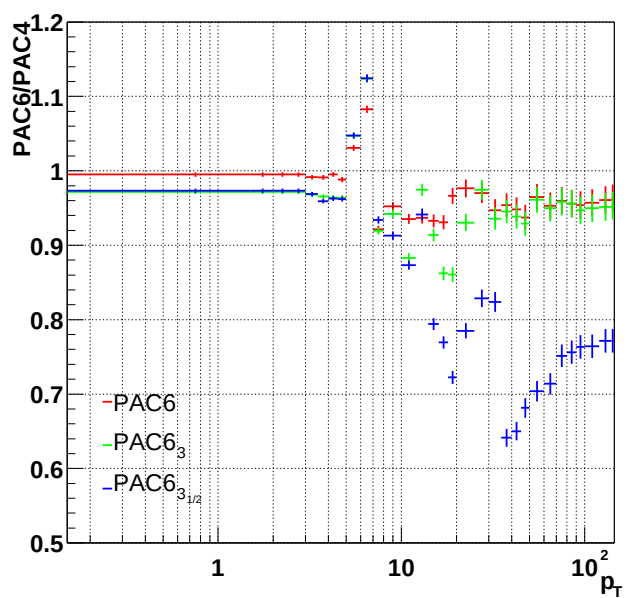
PAC oparty na 6 płaszczyznach ma wyraźnie lepszą zdolność rozdzielczą w obszarze pokryw bez klastrow, Rys. 35, oraz z klastrami, Rys. 32. W obszarze pokryw są tylko 4 płaszczyzny i wszystkie wersje (oprócz połówkowej) różnią się tylko nieznacznie, z powodu trochę innych zestawów wzorców, lub podziałów na przedziały pędowe, Rys. 36, 33. Netto dla całego detektora wszystkie wersje, za wyjątkiem połówek, dają bardzo podobną częstość zliczeń, niezależnie od obecności klastrow, Rys. 30, 34, 31.

Wersja na połówkach, bez klastrow jest wyraźnie gorsza niż pozostałe. Jest to spodziewany wynik, gdyż używając dodatkowej informacji z klastrow optymalizujemy wzorce na ślady nieco bardziej ugięte niż jest to w przypadku całych pasków. Bez klastrow mamy efektywnie całe paski (zapalają się tylko parzyste połówki), ale wzorce dla połówkowych. Widać to szczególnie wyraźnie w obszarze pokryw, gdzie ugięcie jest mniejsze niż w beczce, Rys. 36.

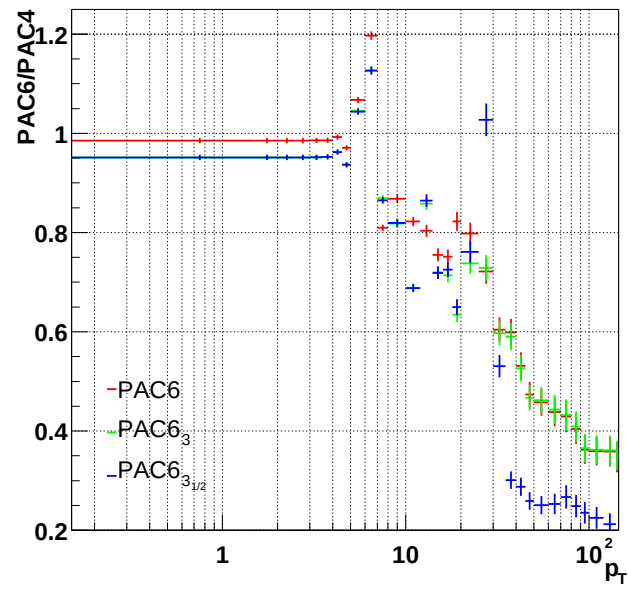
W obecności klastrow natępuje znaczna poprawa. W obszarze beczki połówki są używane od. ok. 30 GeV/c. Na Rys. 32 widać wyraźny spadek częstości zliczeń w tym miejscu. W obszarze pokryw, Rys. 33 spadek zaczyna się wcześniej, gdyż tam granica pędów bardzo wysokich jest, w niektórych wieżach, niższa (do 12 GeV/c w wieżach 10 i 11), Tab. 14.



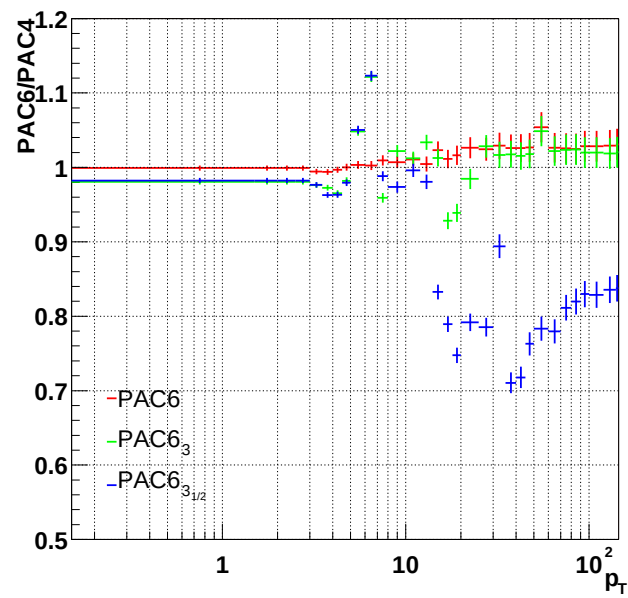
Rysunek 30: Częstości zliczeń pochodzących od mionów dla wszystkich rozważanych wersji PAC.



Rysunek 31: Ilorazy częstości zliczeń.

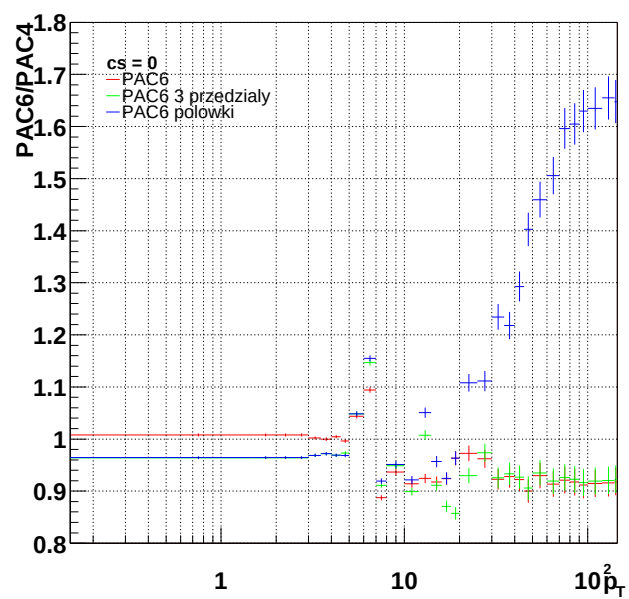


Rysunek 32: Ilorazy częstości zliczeń. Obszar beczki.



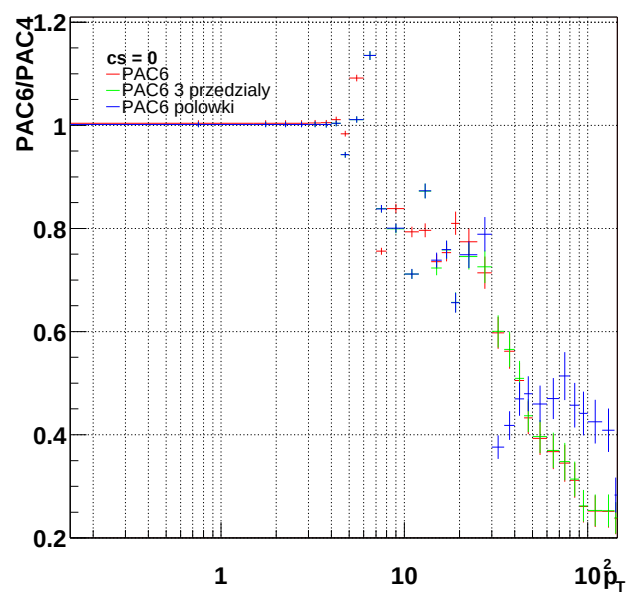
Rysunek 33: Ilorazy częstości zliczeń. Obszar pokryw.

Cały detektor



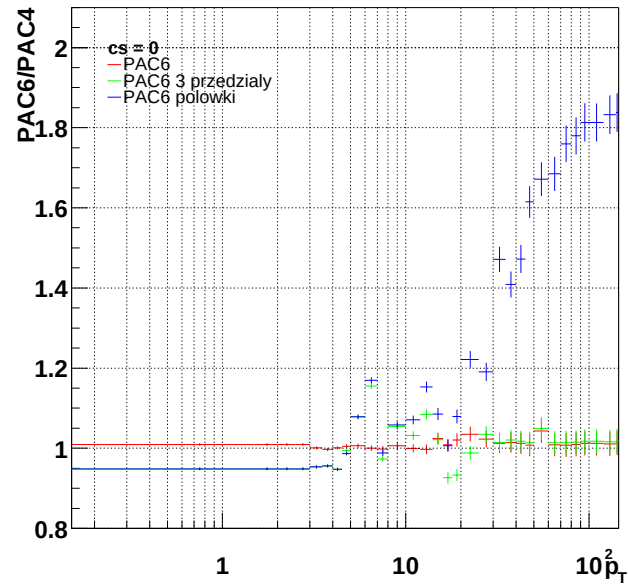
Rysunek 34: Ilorazy częstości zliczeń. Bez klastrów.

Obszar beczki



Rysunek 35: Ilorazy częstości zliczeń. Bez klastrów. Obszar beczki.

Obszar pokryw

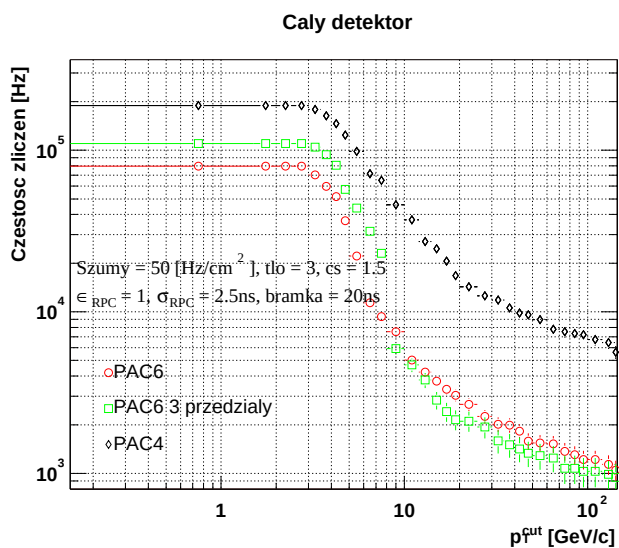


Rysunek 36: Ilorazy częstości zliczeń. Bez klastrów. Obszar pokryw.

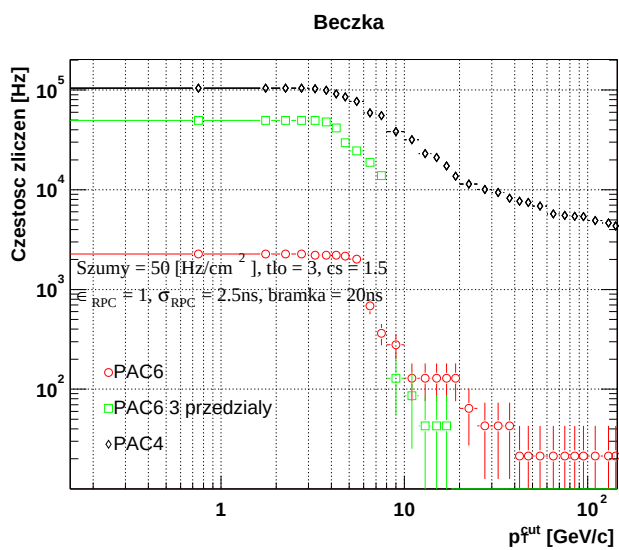
6.3 Odpowiedź na szumy

Analizę reakcji na szumy i tło neutronowe przeprowadzono dla szumów na poziomie 50 Hz/cm^2 i tła zwiększonego o czynnik 3 względem przewidywanego. Prawdopodobnie poziom szumów komór RPC nie będzie przekraczał 20 Hz/cm^2 . Symulacje przeprowadzono dla 50 Hz/cm^2 , gdyż dla niższych poziomów szumu uzyskanie odpowiednio dużej statystyki wymaga długiego czasu pracy komputera (dla 20 Hz/cm^2 jest to ok. 1 miesiąc na procesorze PIII 1 GHz). Dokładna analiza wpływu zmiany algorytmu trygera na częstość zliczeń trygera pochodzącą od szumów jest zawarta w [31], gdzie przeprowadzono symulacje dla poziomu szumów 10, 20, 30, 40 i 100 Hz/cm^2 .

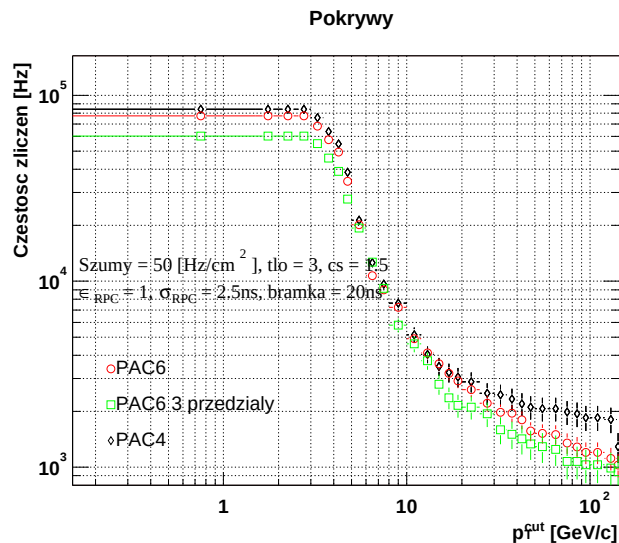
Najbardziej istotnym czynnikiem jest tu żądanie trafień w conajmniej 5 z 6 płaszczyzn w beczce (PAC6). Jak widać na Rys. 38, 39 dla wersji z 6 płaszczyznami większość fałszywych zliczeń pochodzi z obszaru pokryw, gdzie są tylko 4 płaszczyzny. W obszarze beczki, Rys. 38 zliczenia są zredukowane względem wersji na 4 płaszczyznach o czynnik rzędu 100. Duży wkład do zliczeń w beczce dają wieże 6 i 7, gdzie jest tylko 5 płaszczyzn komór RPC (Rys.7).



Rysunek 37: Częstość zliczeń spowodowanych szumami i tłem.



Rysunek 38: Częstość zliczeń spowodowanych szumami i tłem. Obszar beczki.



Rysunek 39: Częstość zliczeń spowodowanych szumami i tłem. Obszar pokryw

7 Wnioski

Na podstawie analiz zamieszczonych w niniejszej pracy dokonano wyboru algorytmu rekonstrukcji p_T dla pierwszego stopnia trygera mionowego, opartego na komorach RPC. Zdecydowano się na implementację wersji PAC na 6 płaszczyznach w beczce z podziałem na trzy przedziały pędowe. O wyborze tym zadecydowały:

- Zmniejszenie udziału “duchów” o czynnik 4 względem wersji z podziałem na 2 przedziały pędowe (PAC4, PAC6)
- Mniejsza, niż dla PAC6, maksymalna liczba wzorców w jednej wieży.
- Mniejsza, względem PAC6, liczba bitów wejściowych do PAC, przekazujących informację o zapalonych paskach.

Z uwagi na małą efektywność zrezygnowano z implementacji $PAC_{631/2}$ w całym detektorze. Rozważa się opcję w której algorytm połówkowy byłby wykonywany tylko dla obszaru pokryw, gdzie strata efektywności nie jest zbyt duża. Możliwość realizacji tego pomysłu zależy od rozwoju technologii układów programowalnych FPGA, a w szczególności od spadku ich ceny.

W przygotowaniu znajduje się specyfikacja opisująca szczegóły implementacji w technologii ASIC.

8 Podziękowania

Przed wszystkim dziękuję moim Rodzicom, za to że zawsze mnie wspierali.

Dziękuję wszystkim, którzy pomagali mi bezpośrednio, Janowi Królikowskiemu, mojemu opiekunowi w ramach Kolegium MISMaP (Międzywydziałowych Indywidualnych Studiów Matematyczno-Przyrodniczych), Grzegorzowi Wrochnie, który zawsze był gotowy odpowiedzieć na moje pytania, niekoniecznie rozsądne, Marcinowi Koneckiemu, który wprowadził mnie w arkana używania programu ORCA i służył radą w problemach programistycznych oraz Pawłowi Zychowi za długie i czasem nawet owocne dyskusje.

Dziękuję także wszystkim wykładowcom Wydziału Fizyki, którzy w ciągu 5 lat studiów starali się przekazać mnie, oraz moim kolegom i koleżankom część swej wiedzy o Prawach, jakie rządzą Światem i mnogości zjawisk, które są dzięki nim możliwe. Jestem przekonany, że nie tylko we mnie wzbudzili “zdziwienie”. “Dzięki bowiem dziwieniu się ludzie obecni, jak i pierwsi myśliciele, zaczęli filozofować; dziwiły ich początkowo niezwykle zjawiska spotykane codziennie, później z wolna stawali wobec trudniejszych zagadnień, jak na przykład wobec zjawisk związanych z Księżcem, Słońcem i gwiazdami, i wobec powstania wszechświata” [34].

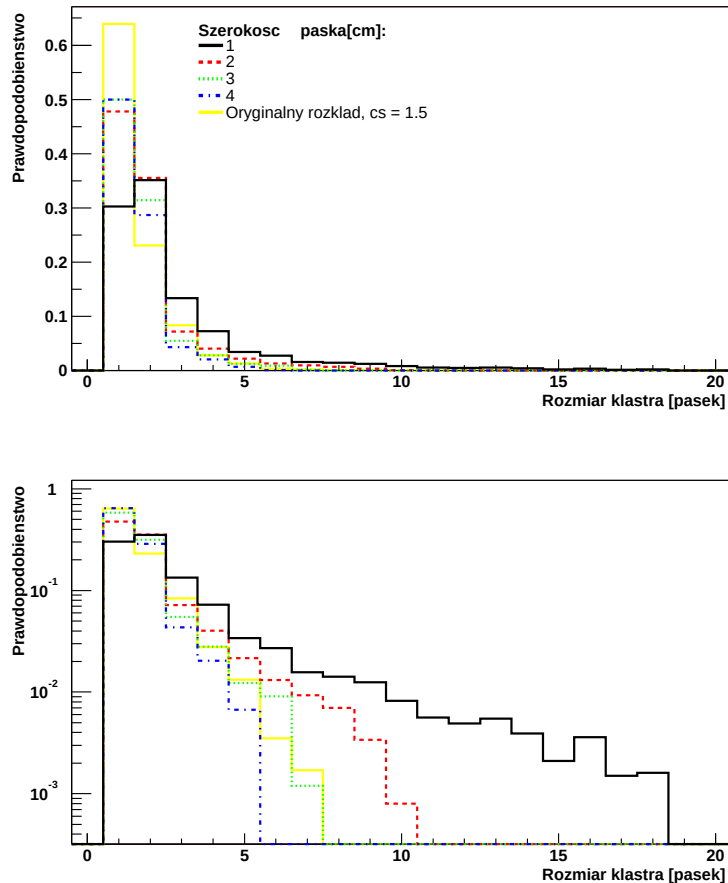
Praca powyższa może się wydawać mało związana z fizyką cząstek. Główny wysiłek z nią związany polegał na implementacji algorytmów oraz narzędzi do analizy uzyskanych danych w C++ w programach ORCA oraz ROOT [33]. Należy jednak pamiętać, że jest to jeden z wielu, małych, ale niezbędnych elementów z jakich jest budowany LHC, narzędzie, które pozwoli Ludzkości zedrzeć kolejną zasłonę Tajemnicy jaką otacza się Natura.

Bibliografia

- [1] E.Leader, E.Predazzi, *Wstęp do teorii oddziaływań kwarków i leptonów*, PWN, Warszawa 1990
S. Glashow, **Nucl. Phys.****22** (1961) 579
S. Weinberg, **Phys. Rev. Lett.** 19 (1967) 1264
- [2] P. Higgs, **Phys. Lett.** 12 (1964) 132; **Phys. Rev. Lett.** 113 (1964) 508; **Phys. Rev.** 1145 (1966) 145
- [3] J. Wess, J. Bagger, *Supersymmetry and Supergravity*
- [4] The LEP Collaborations ALEPH, DELPHI, L3, OPAL, the LEP Electroweak Working Group and the SLD Heavy Flavour and Electroweak Groups, *A Combination of Preliminary Electroweak Measurements and Constraints on the Standard Model*, **CERN-EP/2001-021**
- [5] The LHC Study Group, *The Large Hadron Collider Conceptual Design*, **CERN/AC/95-05**
- [6] ALEPH Collaboration, *Observation of an excess in the search for the standard model Higgs boson at ALEPH*, **Phys. Lett., B** 495 (2000) 1
- [7] J.D. Jackson, *Elektrodynamika klasyczna*, PWN, Warszawa 1982
- [8] *The Compact Muon Solenoid Technical Proposal*, **CERN/LHCC 94-38**
- [9] *The Tracker Project, Technical Design Report*, **CERN/LHCC 98-9**
Addendum to the CMS Tracker TDR by the CMS Collaboration, **CERN/LHCC 2000-016**
- [10] *The Electromagnetic Calorimeter Project, Technical Design Report*, **CERN/LHCC 97-33**
- [11] *The Hadron Calorimeter Project, Technical Design Report*, **CERN/LHCC 97-31**
- [12] *The Muon Project, Technical Design Report*, **CERN/LHCC 97-32**
- [13] Ł. Gościło, G. Wrochna, *How to Apportion 100 Hz Bandwidth Among Physics Channels?*, **CMS IN-2001/046**
- [14] *The Level-1 Trigger, Technical Design Report*, **CERN/LHCC 2000-38**
- [15] Oficjalna strona WWW eksperymentu CMS: <http://cmsinfo.cern.ch/Welcome.html>
- [16] The CMS Software and Computing Group, *ORCA - Object Oriented Reconstruction for CMS Analysis*, **CMS-IN 1999/01**, <http://cmsdoc.cern.ch/orca/>.
- [17] *CMS Simulation Package CMSIM - User's Guide and Reference Manual*, <http://cmsdoc.cern.ch/cmsim/cmsim.html>
- [18] T. Sjonstrand, *PYTHIA 5.7 and JETSET 7.4 Physics and Manual*, , **CERN-TH 7112/93**
- [19] J.Królikowski et al, *Pattern Comparator (PAC) ASIC Version 2 Specification*, **CMS-IN 2001/002**

- [20] G.Bruno et al, *RPC system Geometry Simulated in CMSIM 118-120 and ORCA 4.2*, **CMS-IN 2000/054**
- [21] M.Górski et al, *Clusters in RPC and Muon Trigger performance*, **CMS-TN 1996-107**
- [22] V.Barret et al, *Cluster size study for RPC of ALICE Dimuon trigger*, **ALICE-INT-2001-04**
- [23] M. Ćwiok, G. Wrochna, *Muon rates in UA1, D0, CDF and CMS predicted by PYTHIA 5.7*, **CMS-TN-1995/150**
- [24] Grzegorz Wrochna, doniesienie ustne.
- [25] G.Iaselli et al, *Study of Detailed Geometry of Barrel RPC Strips*, **CMS-IN 2000/044**
- [26] G.Bruno, M.Konecki, *Simulation of the Baseline RPC Trigger System for CMS: Efficiency and Output Rates in Single Muon Topology*, **CMS-Note 2001/012**
- [27] A. Fengler et al, *Ghosts Buster for the RPC based Muon Trigger*, **CMS TN 1998/012**
- [28] A.Kalinowski et al, *Sorting Tree and Ghostbuster for RPC Muon Trigger*, **CMS-IN 2001/007**
- [29] M.Konecki, J. Królikowski, G.Wrochna, *Parametrisation functions of the PRC based muon trigger*, **CMS-TN 1996/104**
- [30] G.Bruno et al, *RPC Pattern Comparator Trigger Simulation in CMSIM 121-123 and ORCA 4-5*, **CMS-IN 2001/054**
- [31] A. Kalinowski et al, *Muon Trigger Algorithms Based on 6 RPC Planes*, **CMS-NOTE 2001/045**
- [32] J. Królikowski, P.Zych, *Acceptance of the Baseline and Modified RPC System Geometry*, **CMS IN-2001/026**
- [33] Rene Brun and Fons Rademakers, *ROOT - An Object Oriented Data Analysis Framework*, Proceedings AIHENP'96 Workshop, Lausanne, Sep. 1996, Nucl. Inst. & Meth. in Physics. Res. A 389 (1997) 81 - 86, <http://root.cern.ch/>.
- [34] Arystoteles, *Metafizyka AI*, tł. K. Leśniak, PWN, Warszawa 1984

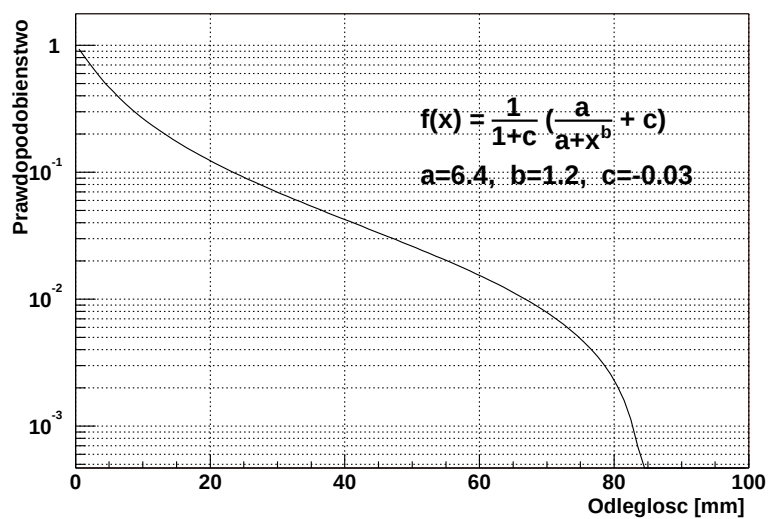
A Generacja klastrow RPC oparta na algorytmie wykorzystywanym przez eksperyment ALICE



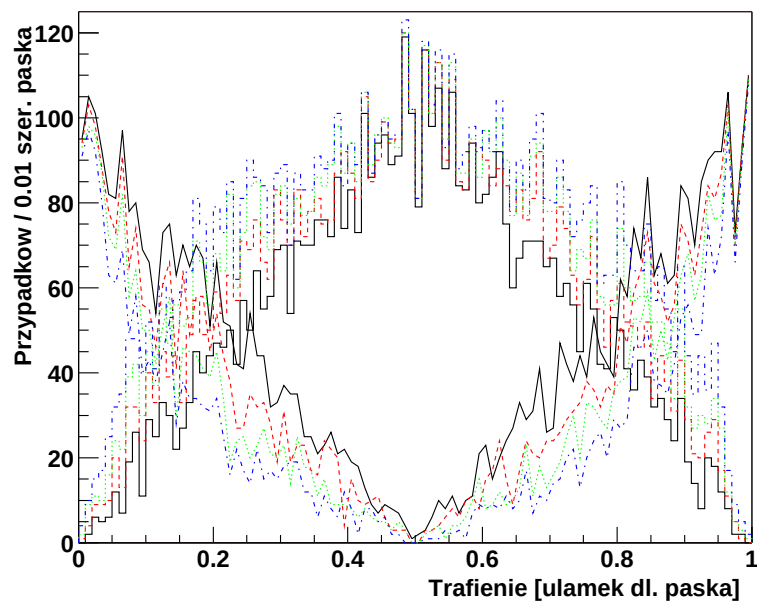
Rysunek 40: Rozkład krotności klastrow dla różnych szerokości paska. Naniesiono także rozkład wykładniczy z parametrem $cs = 1.5$.

Z pracy [22] zaczerpnięto krzywą prawdopodobieństwa zapalenia się paska w funkcji jego odległości od trafienia wyrażonej w mm. Parametry rozkładu dobrano tak, by jakościowo odtworzyć wykładniczy rozkład krotności klastra z parametrem $cs = 1.5$, Rys. 41. Rys. 40 przedstawia rozkład krotności klastra dla pasków o szerokości 1, 2, 3 i 4 cm. Jak widać im węższy pasek, tym szerszy jest rozkład krotności. Dla żadnej z szerokości nie uzyskano dobrej zgodności z wyjściowym rozkładem wykładniczym. Zważywszy jednak, że analiza ta ma tylko charakter jakościowy i brak jest danych eksperymentalnych wynik ten jest wystarczający.

Rys. 42 przedstawia rozkład położenia trafienia w pasek dla klastrow parzystych i nieparzystych. Widać, że trafienia centralne zwykle prowadzą do klastrow nieparzystych, a peryferyczne do parzystych. Uzyskane rozkłady są jednak dużo bardziej rozmyte niż uzyskane na podstawie pierwotnego algorytmu generacji klastra (wymuszania żądanej parzystości dla trafienia w określony obszar paska, Rys. 15).



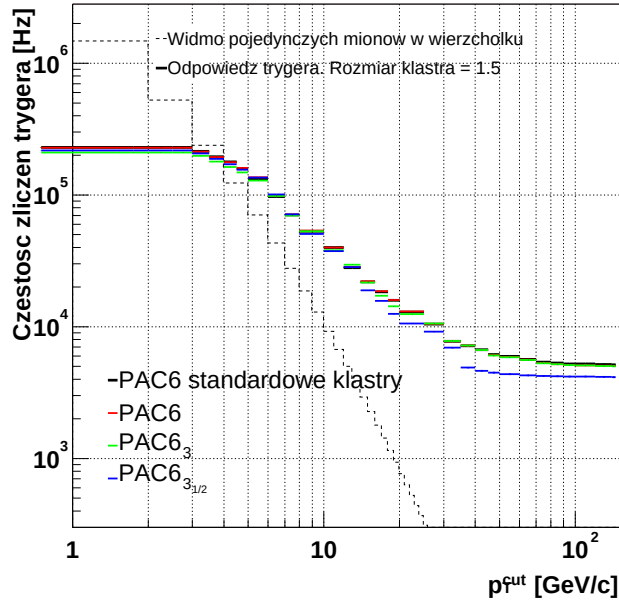
Rysunek 41: Rozkład prawdopodobieństwa zapalenia się paska w funkcji jego odległości od trafienia, wyrażonej w mm.



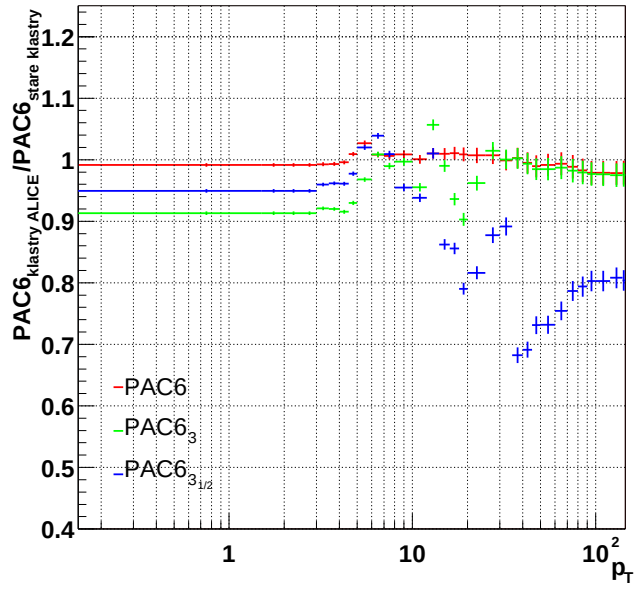
Rysunek 42: Rozkład położenia trafienia w pasek dla klastrów o różnej parzystości, dla różnych szerokości paska. Krzywe skoncentrowane na brzegach odpowiadają klastrom parzystym.

Powtórzono symulacje reakcji trygera przy nowej generacji klastrów oraz w obecności strimerów. Założono 5% udział strimerów, symulowanych jako klastry o średnim rozmiarze 12 pasków. Zróżnicowanie średniej krotności klastra w zależności od szerokości paska, nie wpływa znacząco na liczbę zliczeń trygera, Rys. 43, 44. Strimery zwiększają częstość zliczeń o ok. 20%, Rys. 45, 46. W przypadku połówek rozmyta zależność parzytości klastra od miejsca trafienia w pasek oraz strimery nie pogarszają zdolności rozdzielczej.

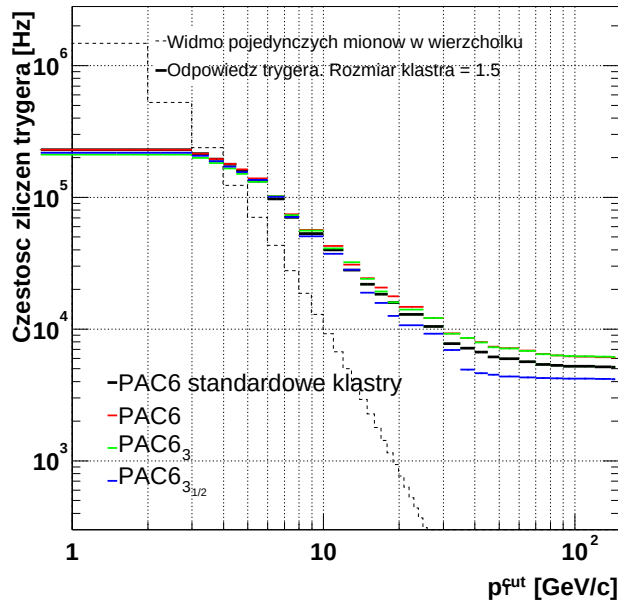
Powyższe, jakościowe, rozważania pozwalają sądzić, że dokładniejsze symulacje krotności klastrów, oraz strimerów, oparte na danych doświadczalnych nie zmienią wniosków wynikających z analiz zawartych w niniejszej pracy.



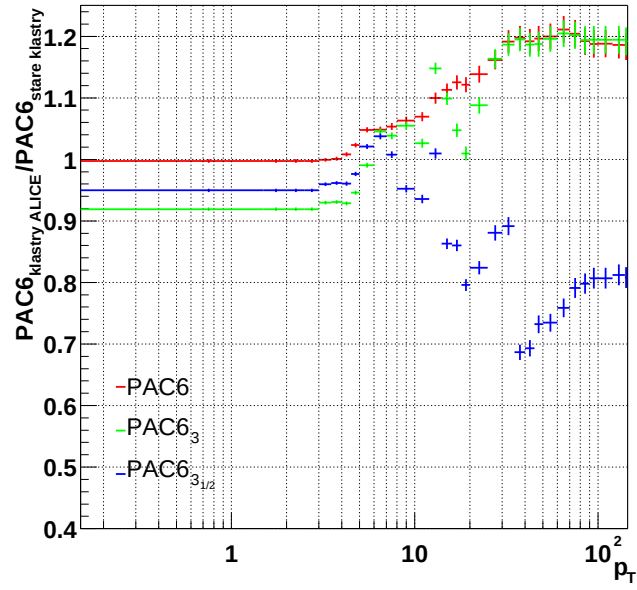
Rysunek 43: Częstości zliczeń pochodzących tylko od mionów dla różnych algorytmów generacji klastrów.



Rysunek 44: Częstości zliczeń pochodzących tylko od mionów dla różnych algorytmów generacji klastrow. Wszystkie krzywe zostały znormalizowane do krzywej odpowiadającej PAC6, przy standardowej generacji klastrow.

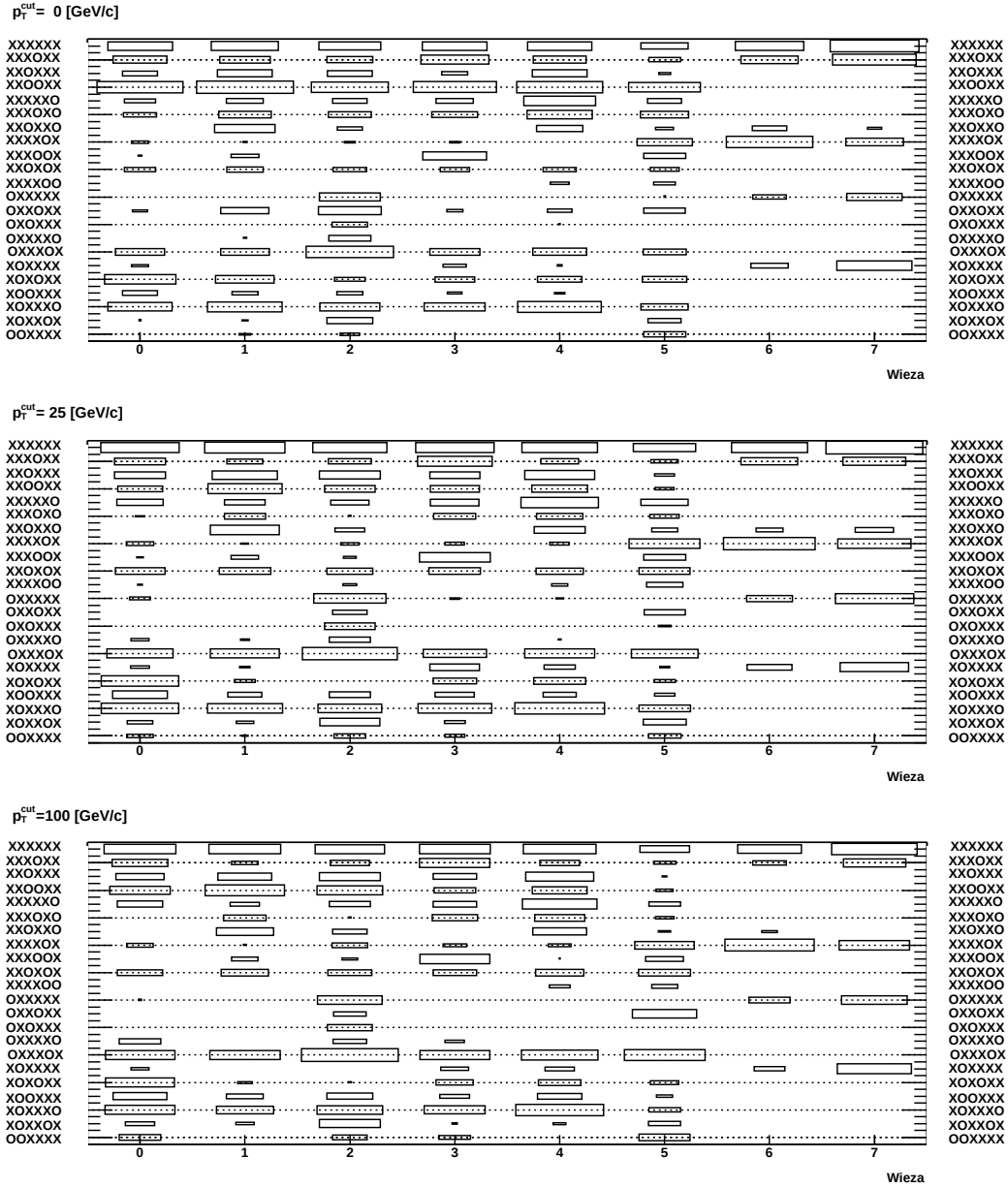


Rysunek 45: Częstości zliczeń pochodzących tylko od mionów dla różnych algorytmów generacji klastrow w obecności strimerów.

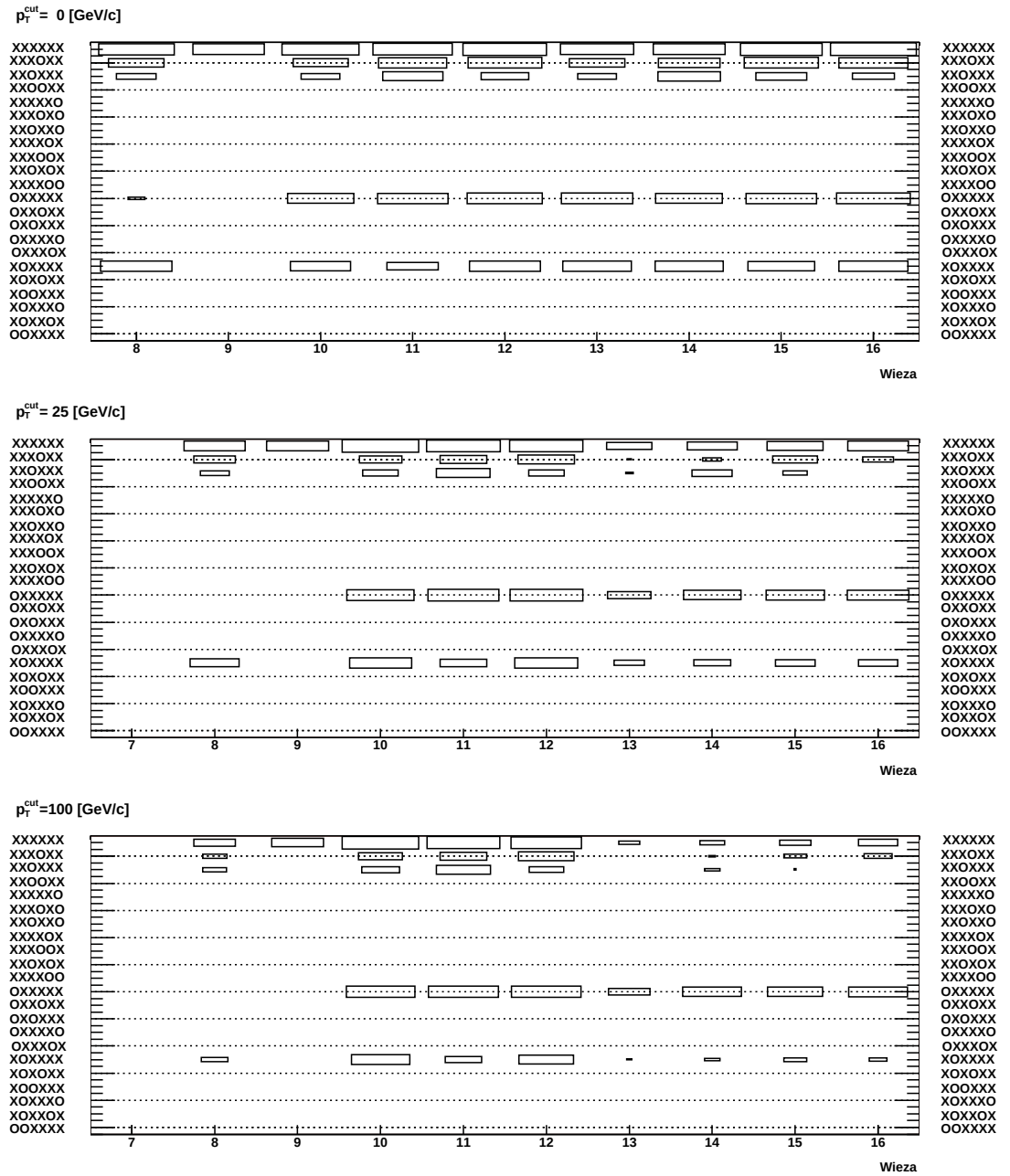


Rysunek 46: Częstości zliczeń pochodzących tylko od mionów dla różnych algorytmów generacji klastków w obecności strimerów. Wszystkie krzywe zostały znormalizowane do krzywej odpowiadającej PAC6, przy standardowej generacji klastków.

B Rozkład częstości zliczeń na poszczególne układy brakujących trafień.



Rysunek 47: Wkład do częstości zliczeń dla różnych, dopuszczalnych, konfiguracji brakujących płaszczyzn. Obszar beczki.



Rysunek 48: Wkład do częstości zliczeń dla różnych, dopuszczalnych, konfiguracji brakujących płaszczyzn. Obszar pokryw.

C Symulowane rozkłady szumów i tła

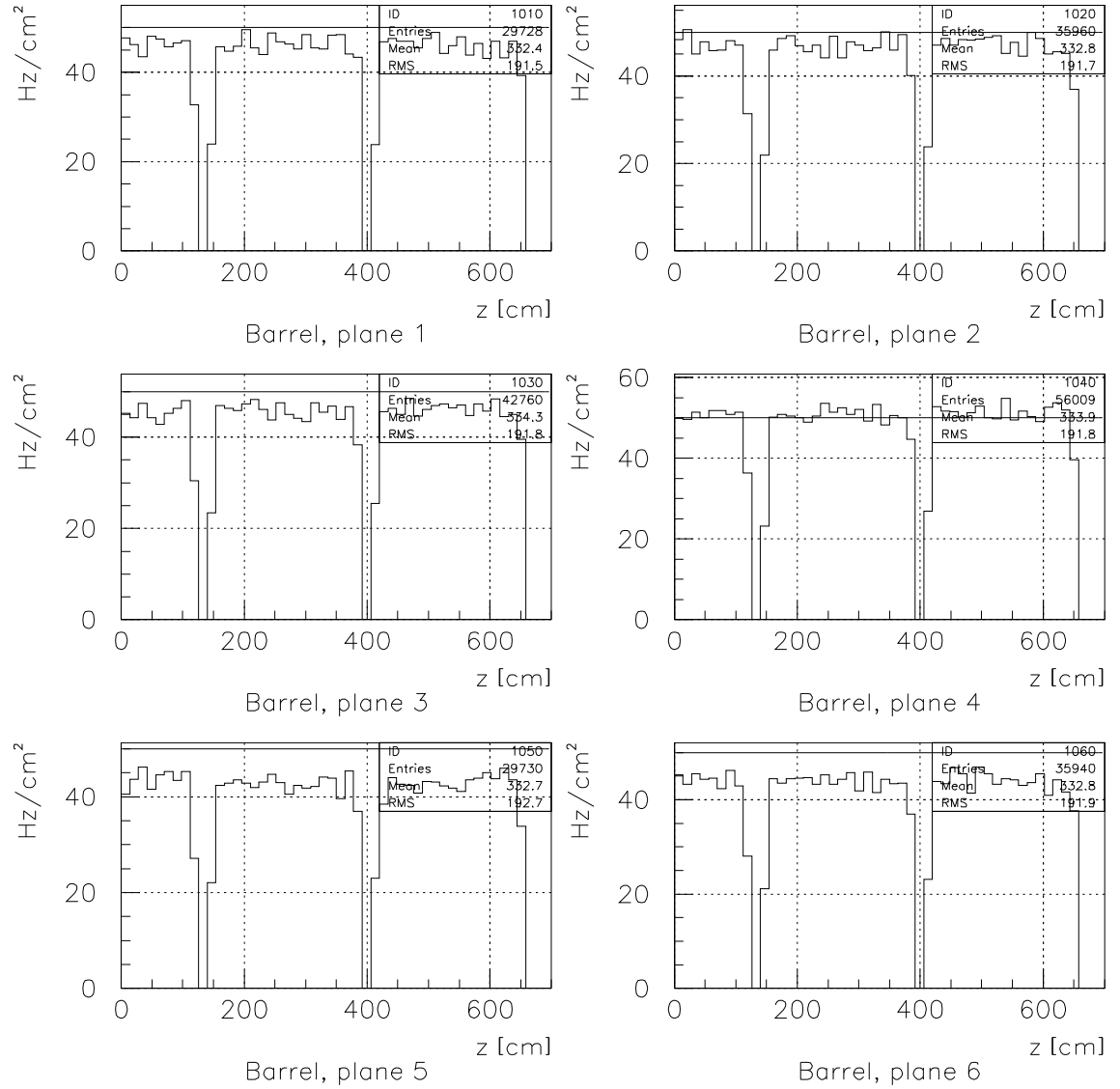
Gęstość liczby trafień na cm^2 sparametryzowano zależnością:

$$f = \exp(A + (B + (C + D \cdot x) \cdot x) \cdot x)$$

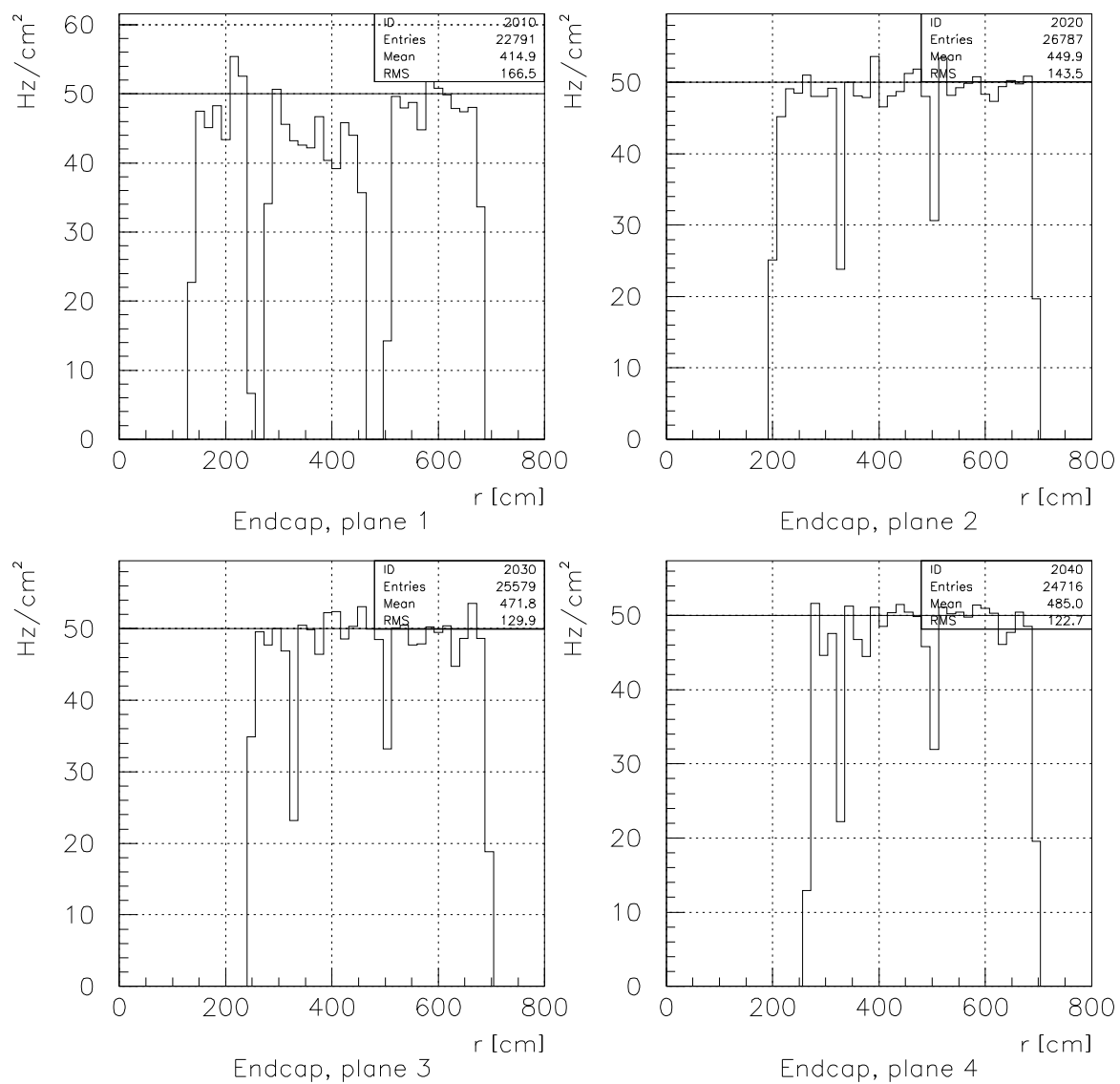
gdzie x to położenie wzdłuż osi detektora, liczone od punktu przecięcia (IP) dla obszaru beczki (MBx) i odległość radialna od rury wiązki w pokrywach (MEx).

Tabela 16: Parametryzacja liczby trafień pochodzących od tła neutronowego dla różnych obszarów detektora.

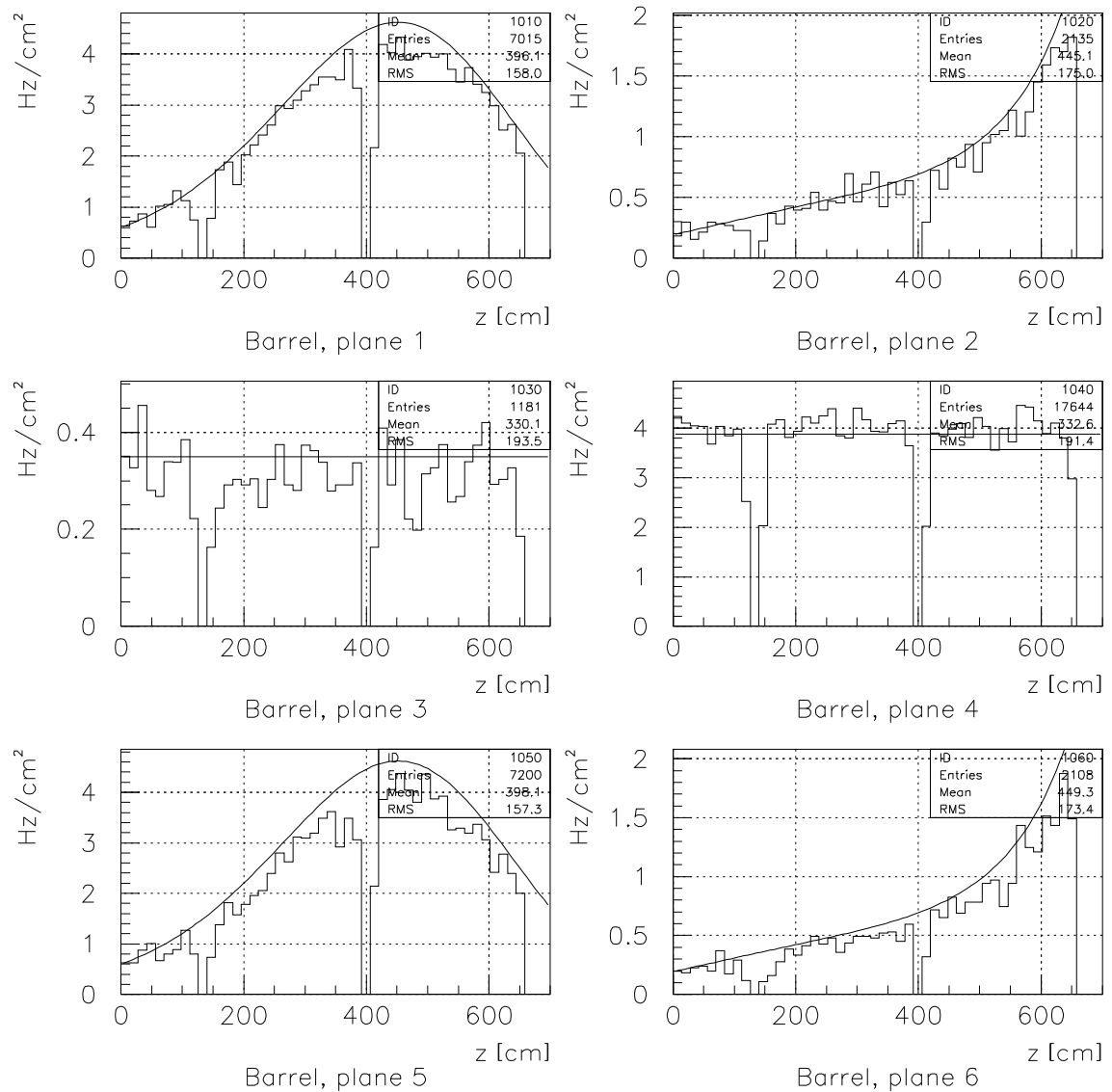
Obszar	A	B	C	D
MB1	-0.5074	0.7261E-2	-0.2190E-5	-0.8628E-8
MB2	-1.637	0.5619E-2	-0.1135E-4	0.1311E-7
MB3	-1.050	0.0,	0.0,	0.0
MB4	1.355	0.0,	0.0,	0.0
ME1/1	6.301	-0.7569E-2	-0.2031E-4	0.0
ME1/2	30.600	-0.2533	0.7226E-3	-0.6917E-6
ME1/3	10.320	-0.3996E-1	0.3832E-4	0.0
ME2/1	4.694	-0.5920E-2	0.0	0.0
ME2/2, ME2/3	7.745	-0.2075E-1	0.1585E-4	0.0
ME3/1	3.564	-0.1776E-2	0.0	0.0
ME3/2, ME3/3	19.10	-0.8462E-1	0.1306E-3	-0.6544E-7
ME4/1	8.719	-0.3666E-1	0.5665E-4	0.0
ME4/2, ME4/3	4.910	-0.8699E-2	0.7215E-5	0.0



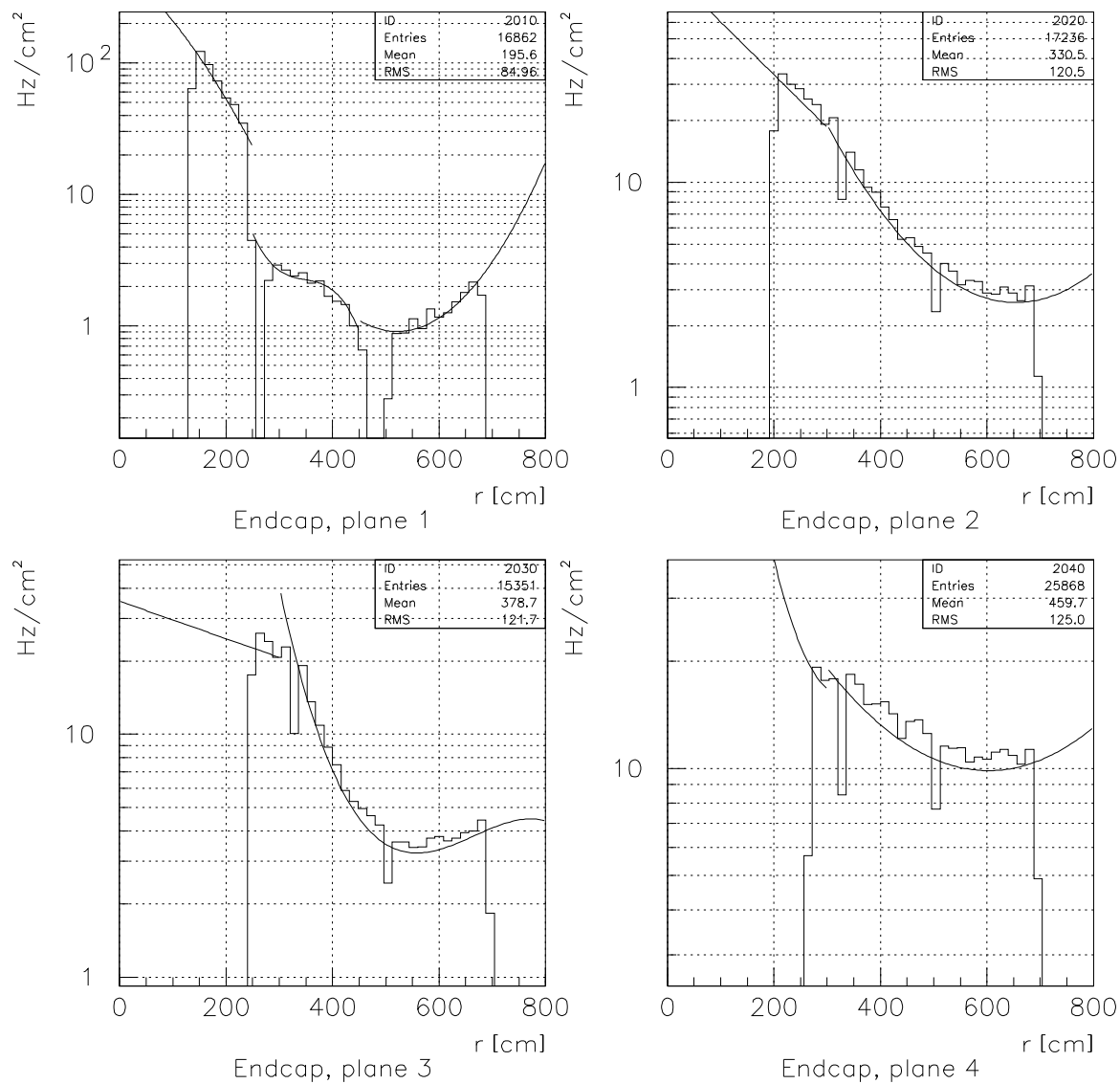
Rysunek 49: Symulowany rozkład gęstości powierzchniowej szumów dla poszczególnych płaszczyzn wzdłuż osi wiązki, w obszarze beczki. Symulowana wartość, 50 Hz/cm^2 jest zaznaczona linią poziomą. Ubytki widoczne na histogramach odpowiadają przerwom w kołach jarzma.



Rysunek 50: Symulowany rozkład radialny gęstości powierzchniowej szumów dla poszczególnych płaszczyzn w pokrywach.

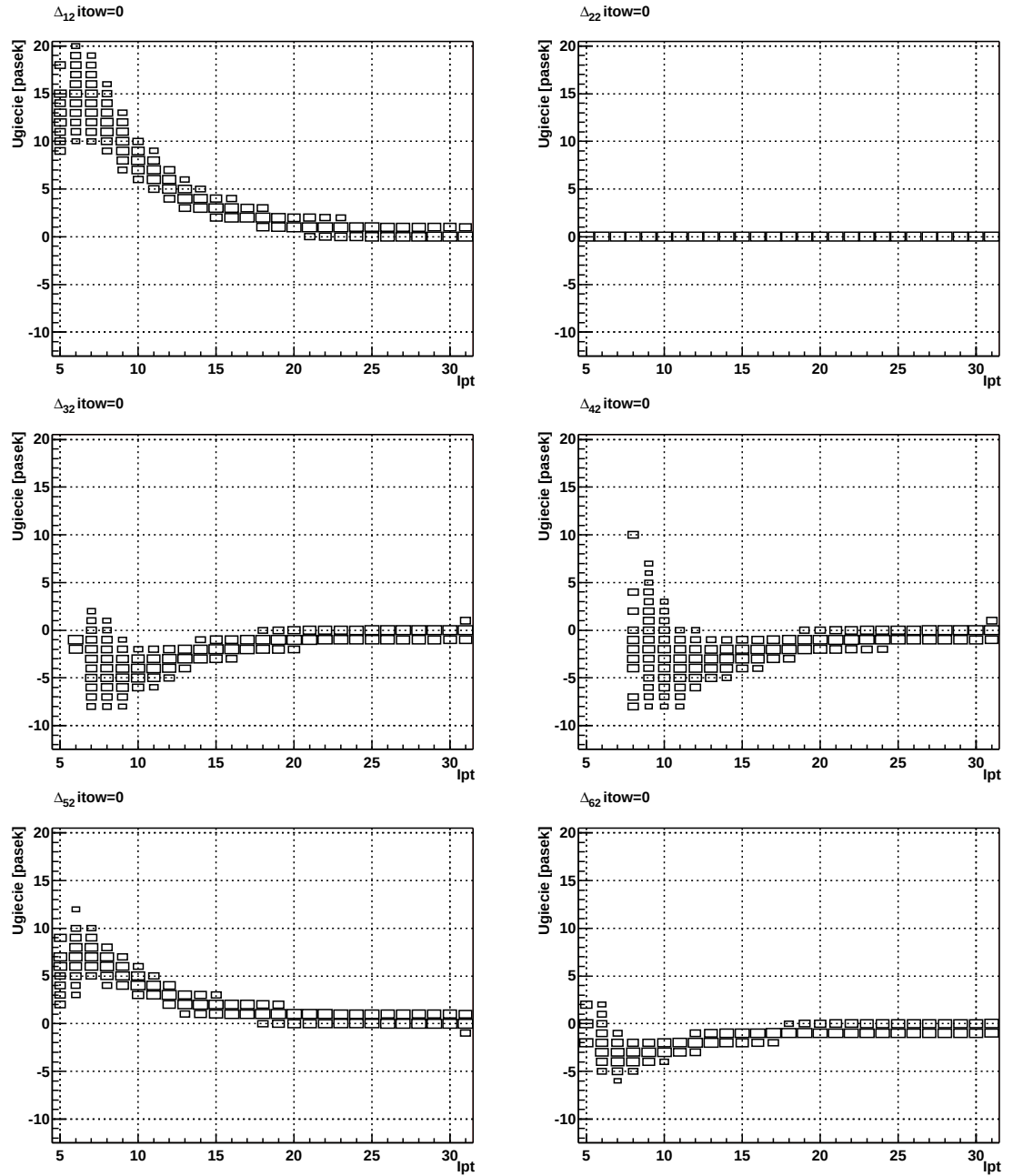


Rysunek 51: Symulowany rozkład gęstości powierzchniowej trafień od tła neutralnego dla poszczególnych płaszczyzn wzdłuż osi wiązki, w obszarze beczki. Ubytki widoczne na histogramach odpowiadają przerwom w kołach jarzma.

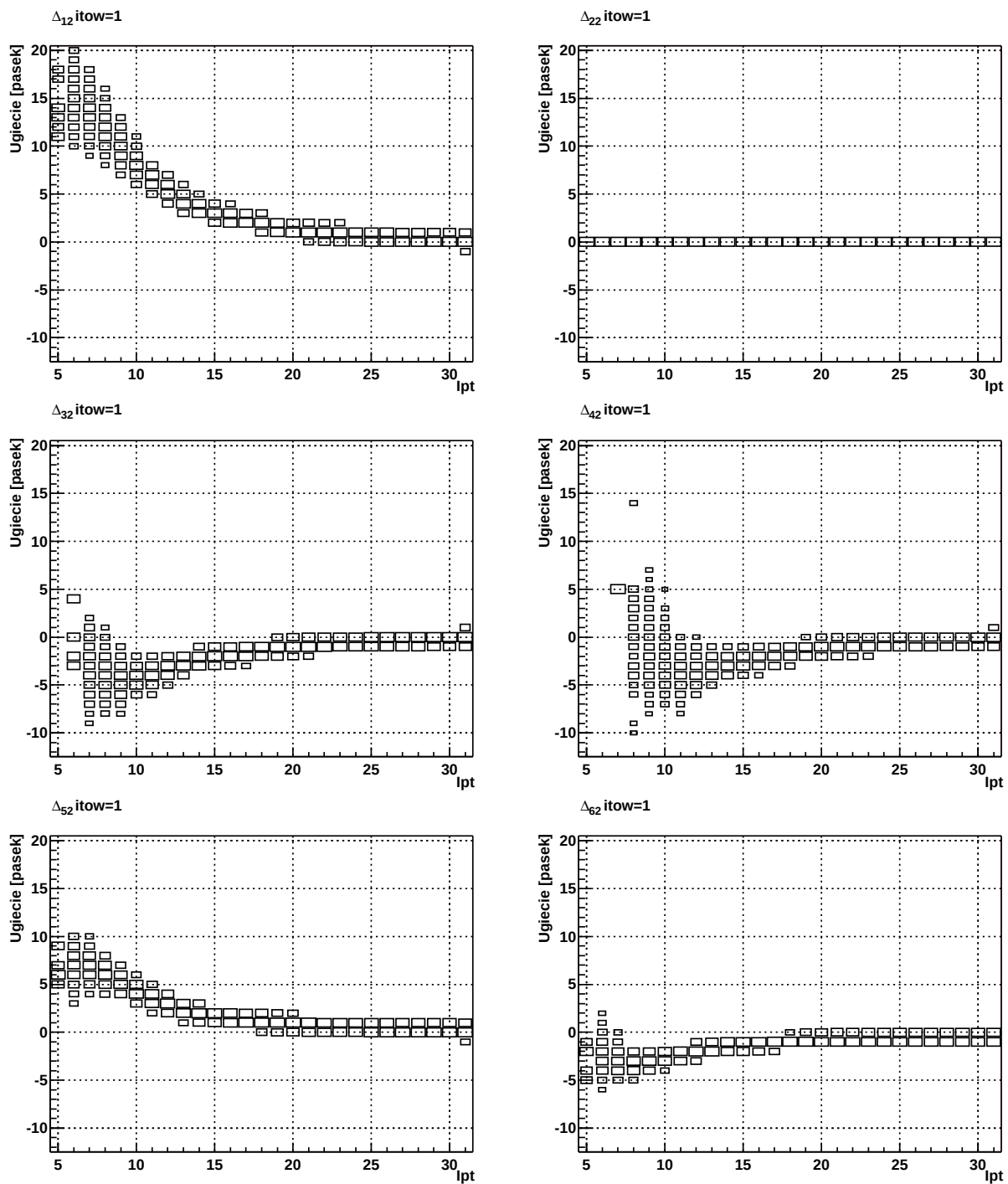


Rysunek 52: Symulowany rozkład radialny gęstości powierzchniowej trafień od tła neutralnego w dla poszczególnych płaszczyzn w pokrywach.

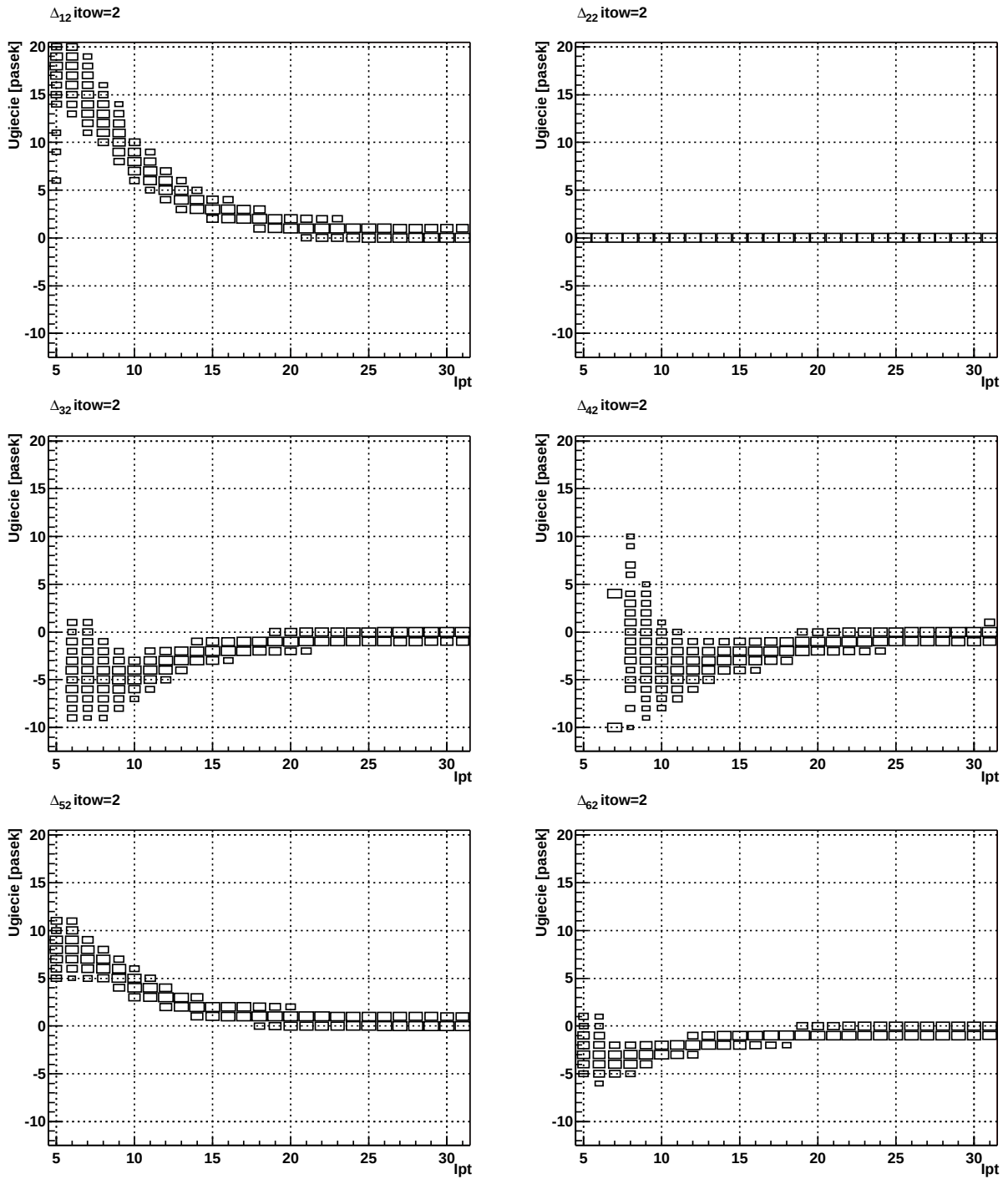
D Histogramy ugięcia mionów



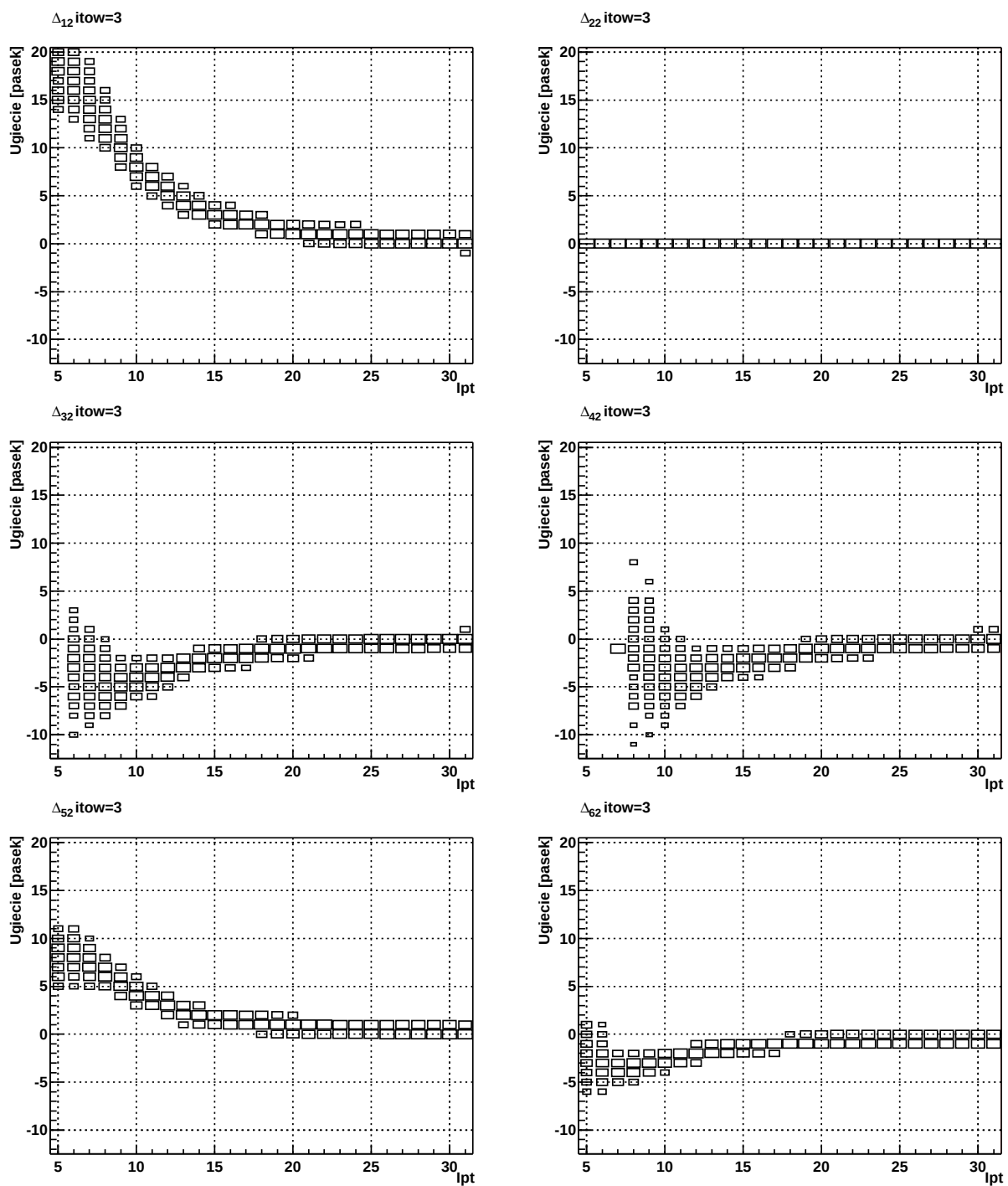
Rysunek 53: Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 0.



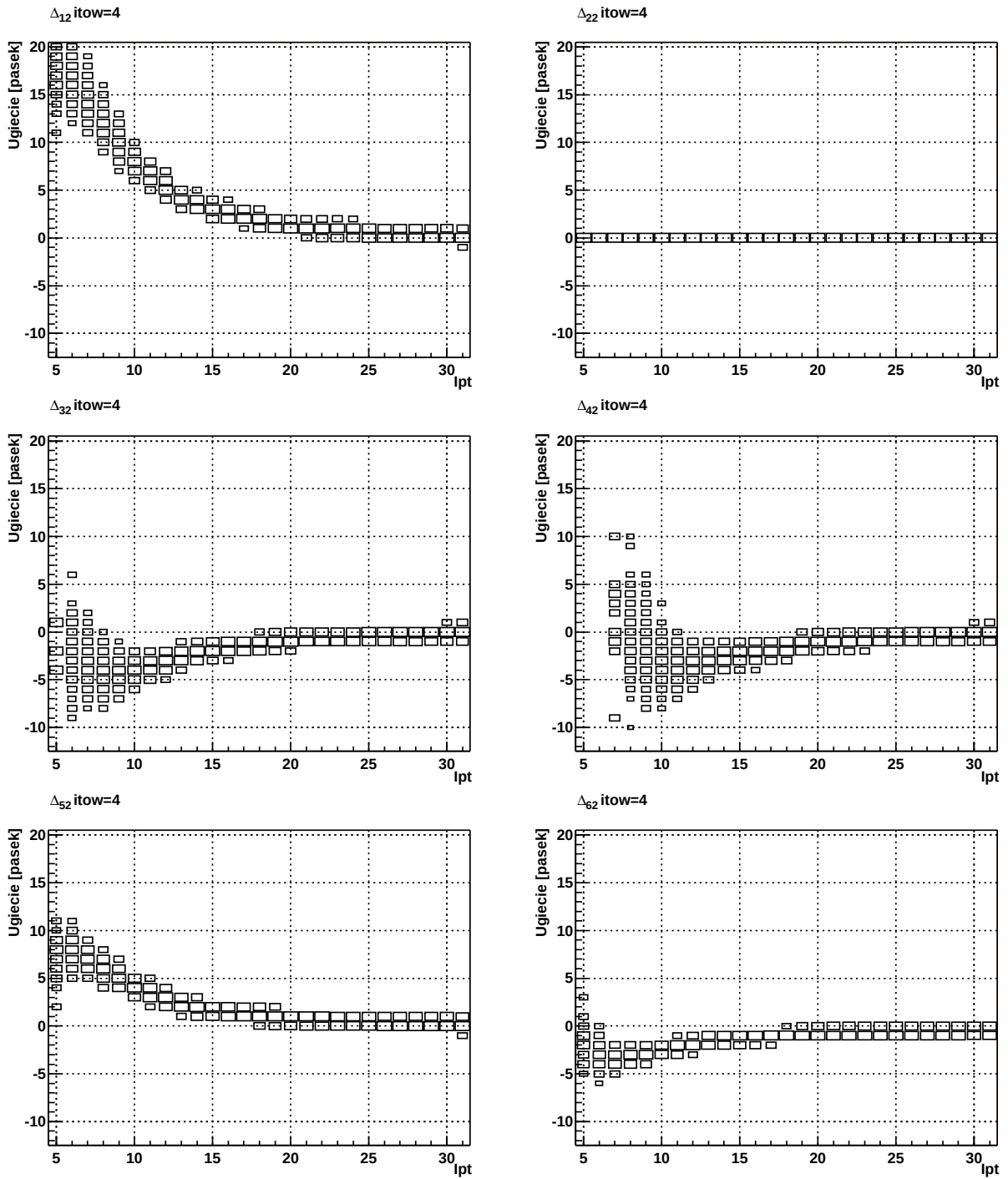
Rysunek 54: Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 1.



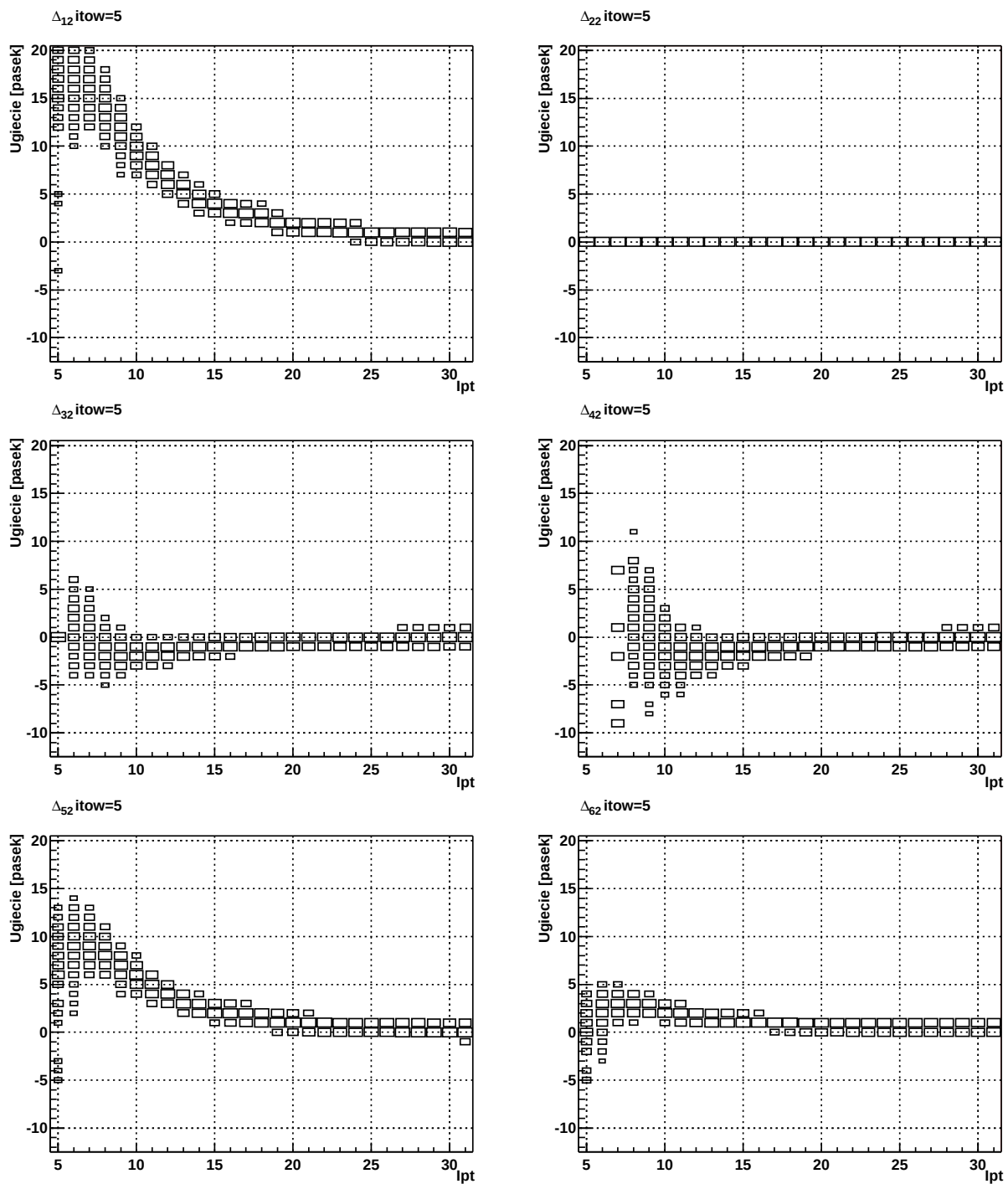
Rysunek 55: Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 2.



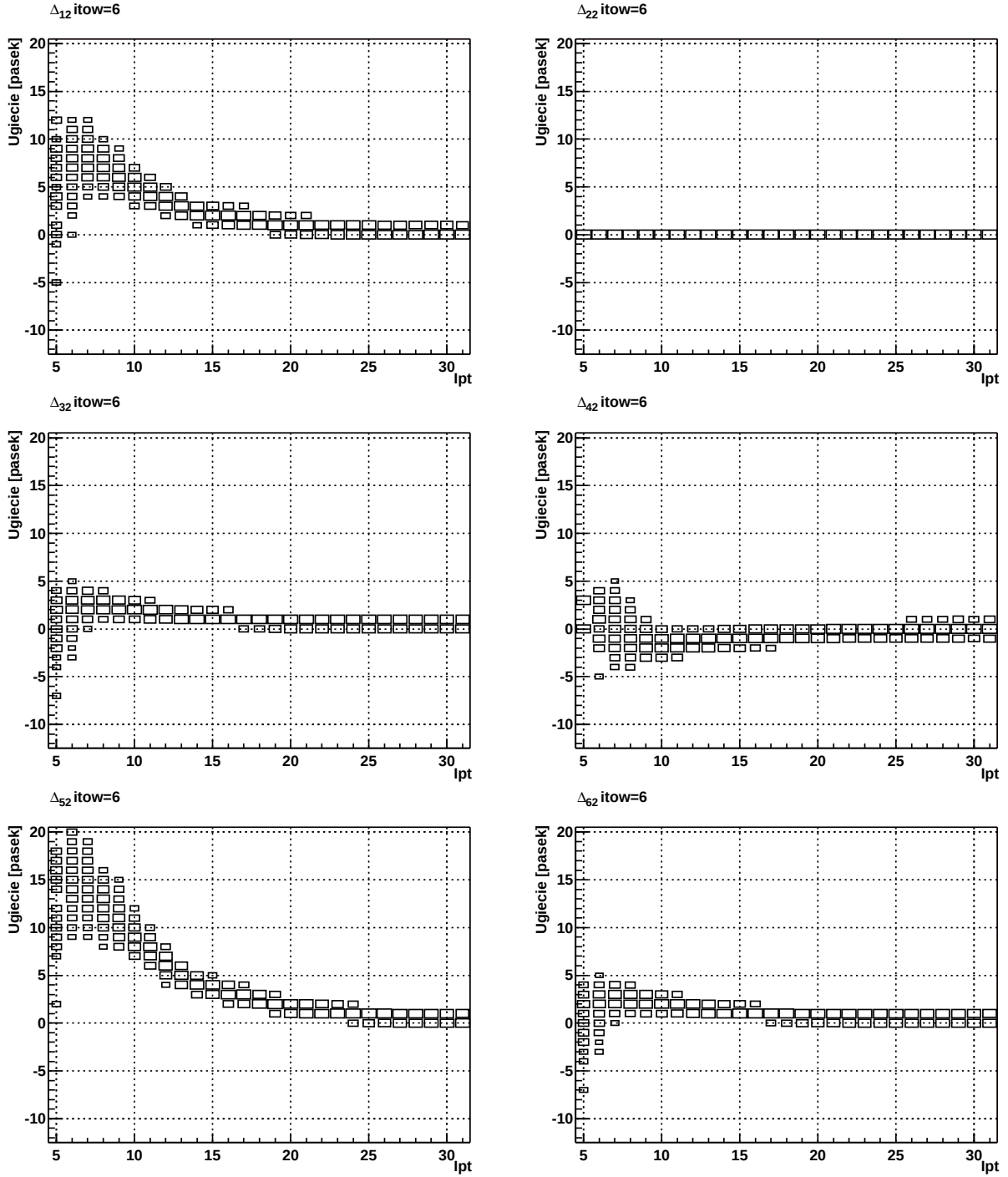
Rysunek 56: Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 3.



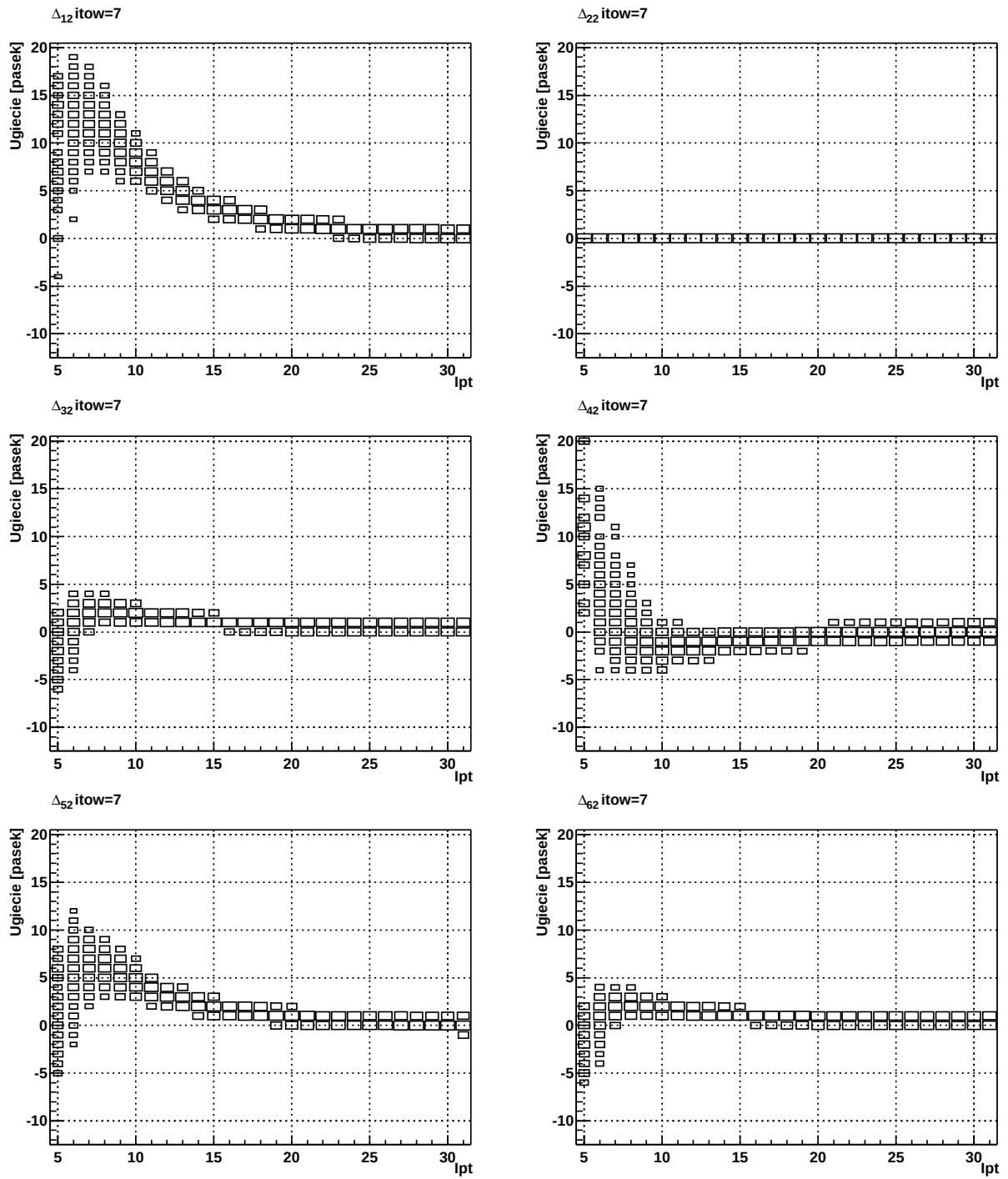
Rysunek 57: Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 4.



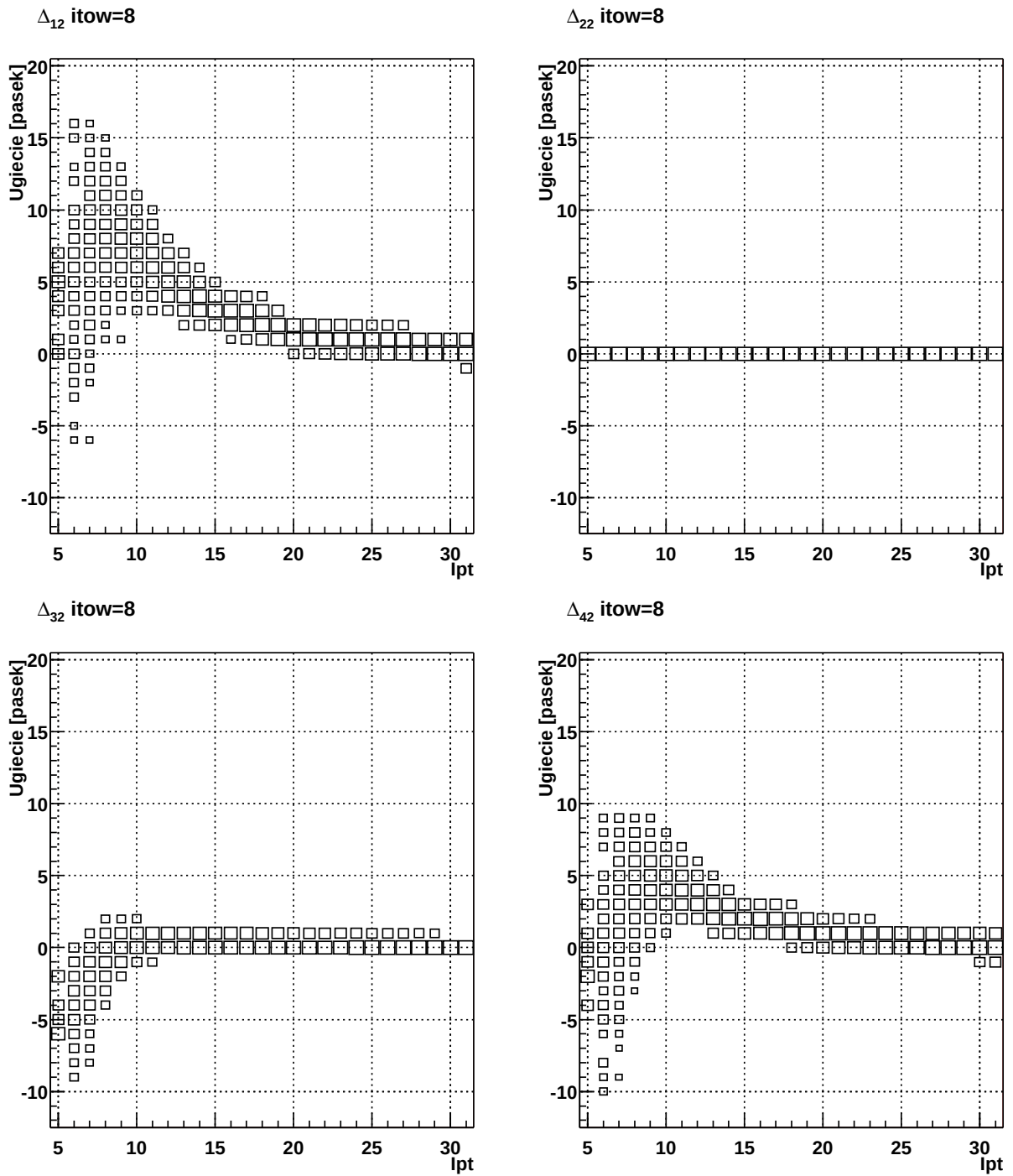
Rysunek 58: Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 5.



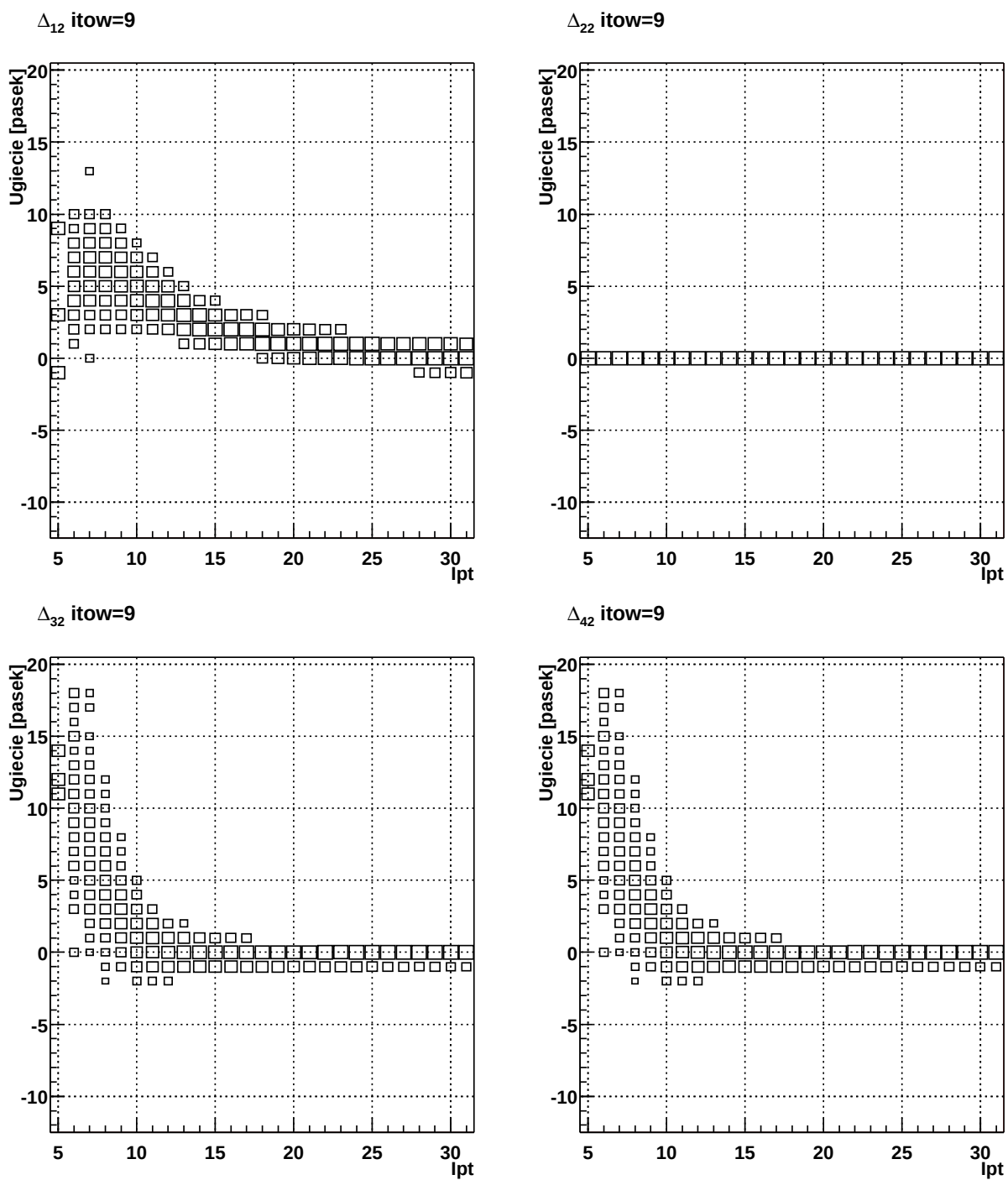
Rysunek 59: Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 6. Płaszczyzny logiczne 3 i 6 są podłączone do jednej płaszczyzny fizycznej.



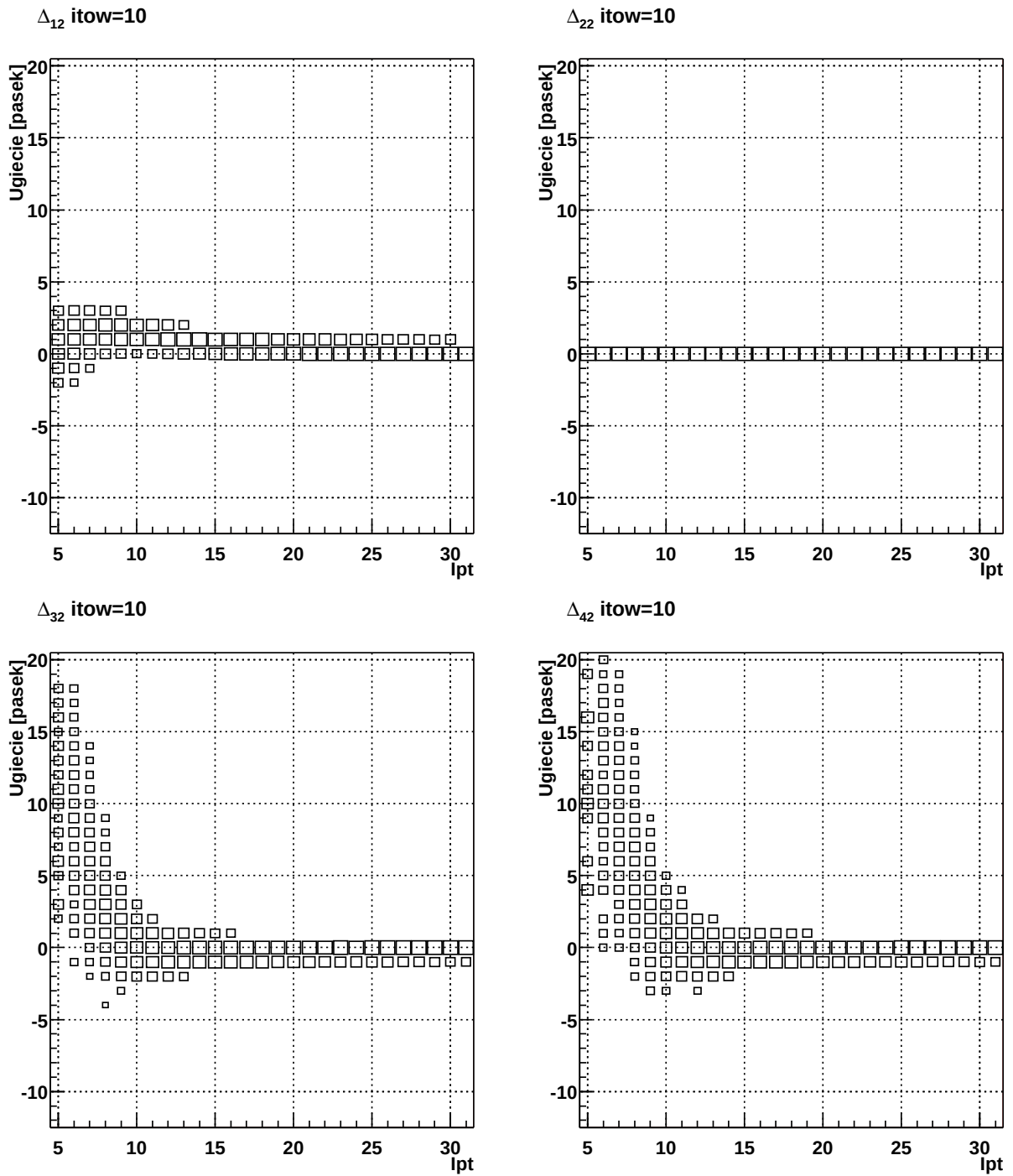
Rysunek 60: Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 7. Płaszczyzny logiczne 3 i 6 są podłączone do jednej płaszczyzny fizycznej.



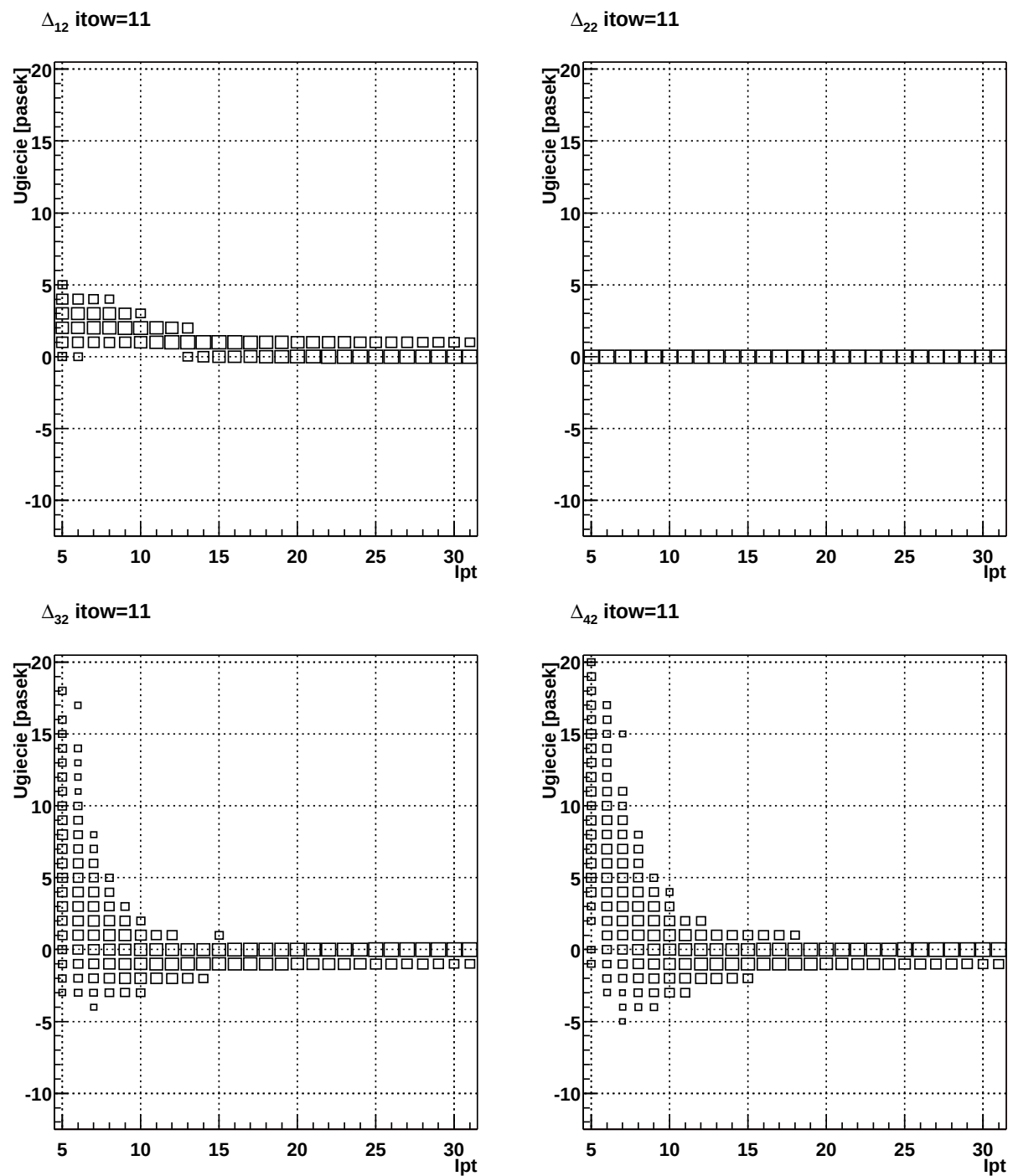
Rysunek 61: Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 8.



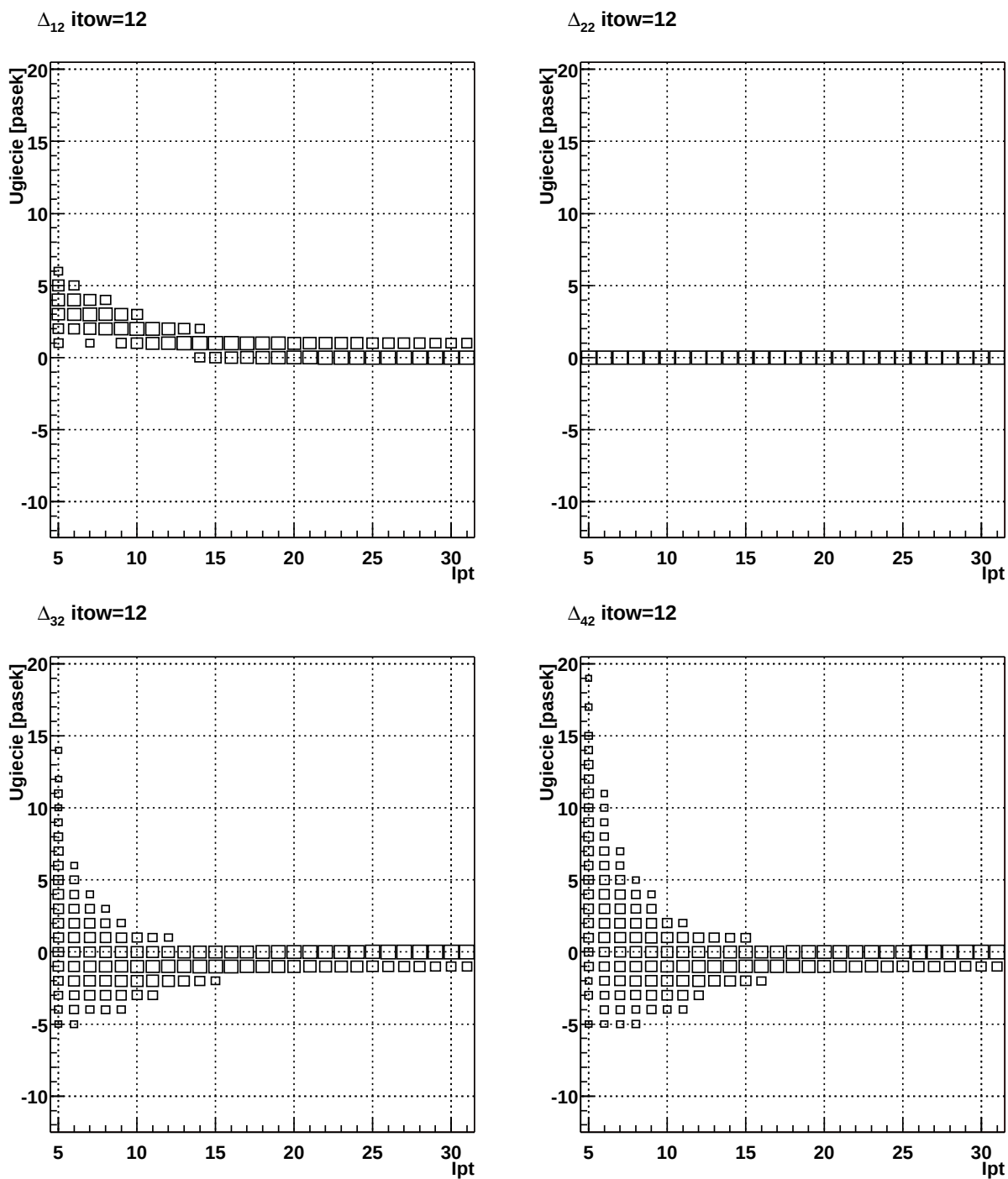
Rysunek 62: Ugicie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 9. Płaszczyzny logiczne 3 i 4 są podłączone do jednej płaszczyzny fizycznej.



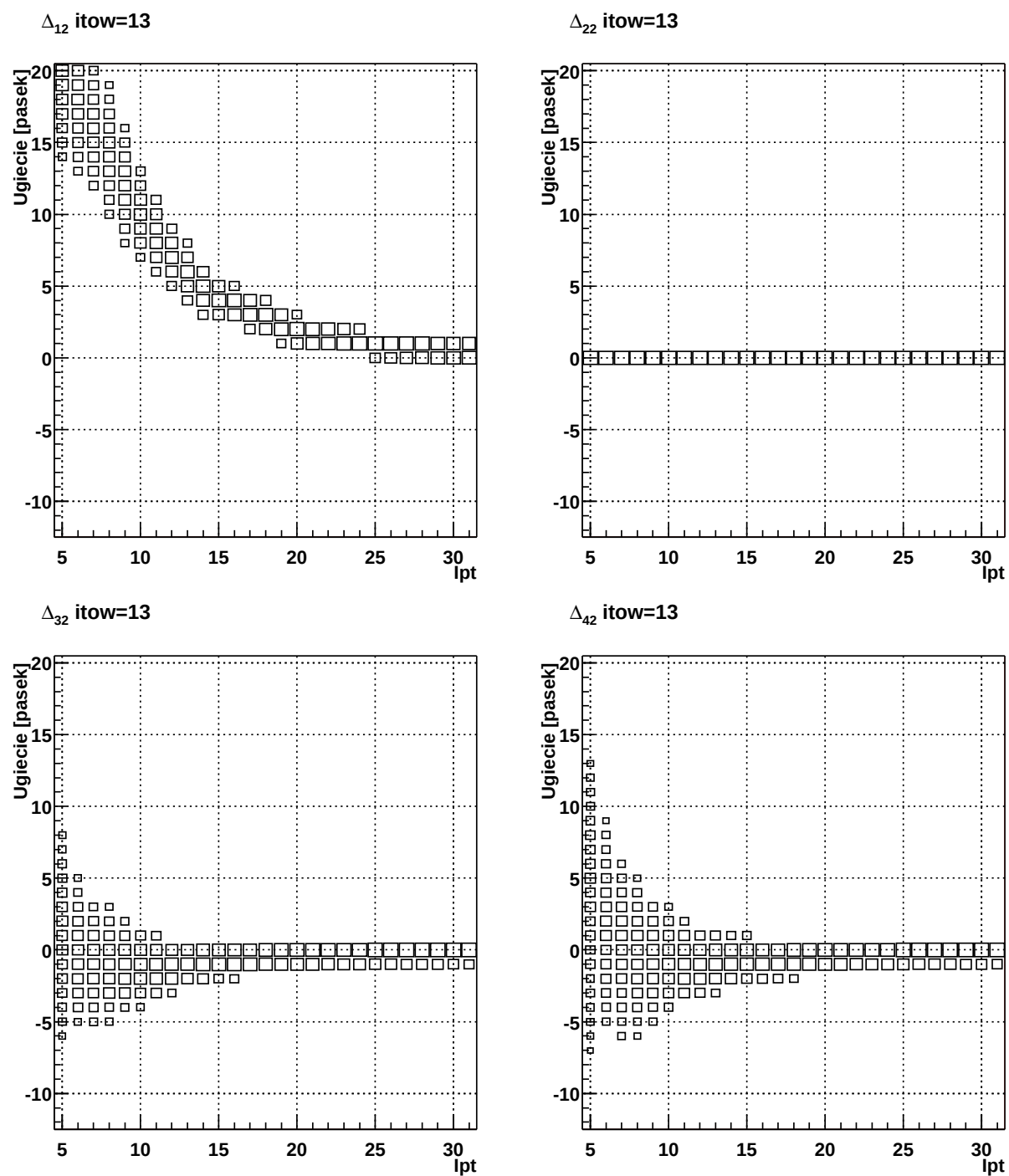
Rysunek 63: Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 10.



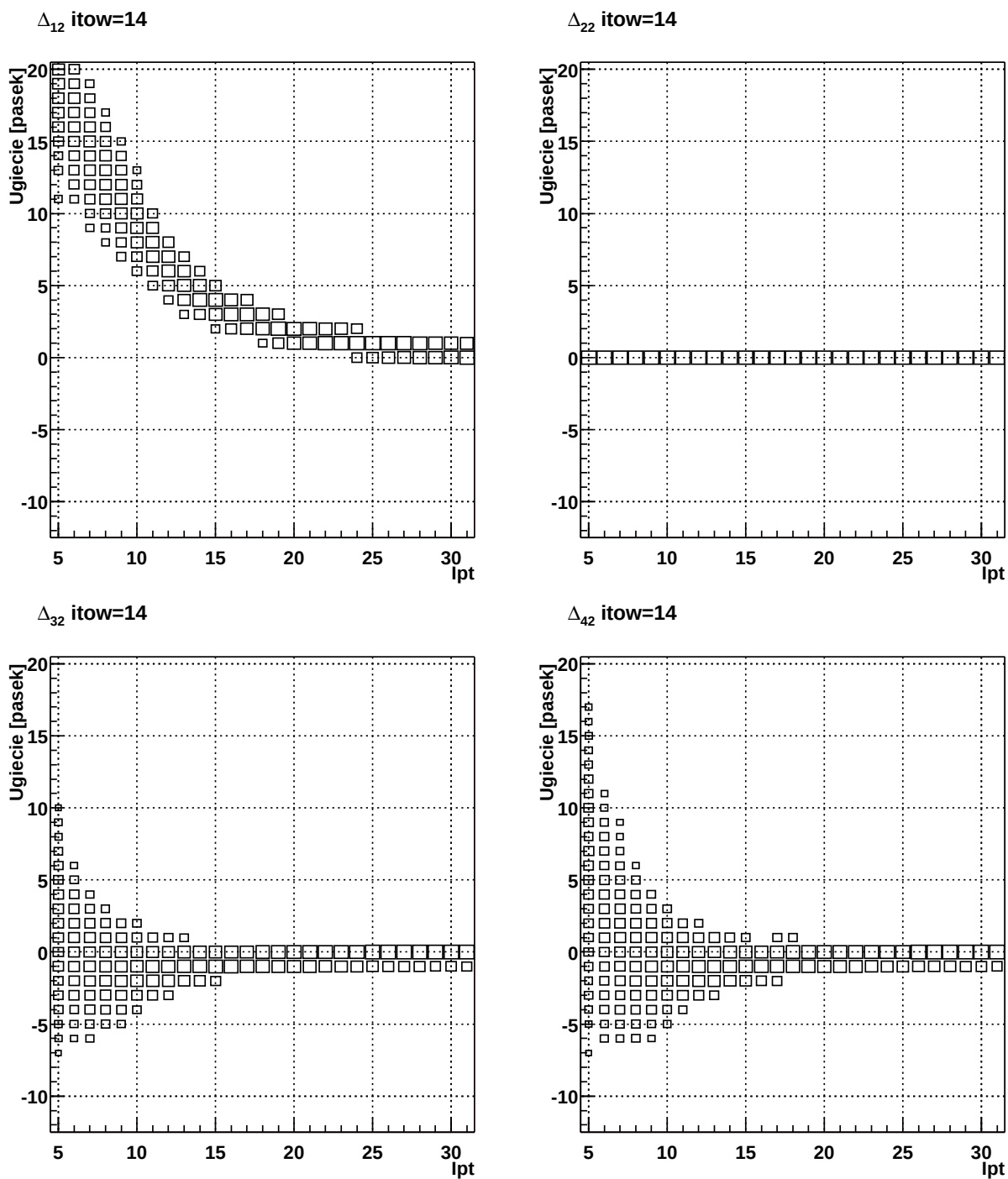
Rysunek 64: Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 11.



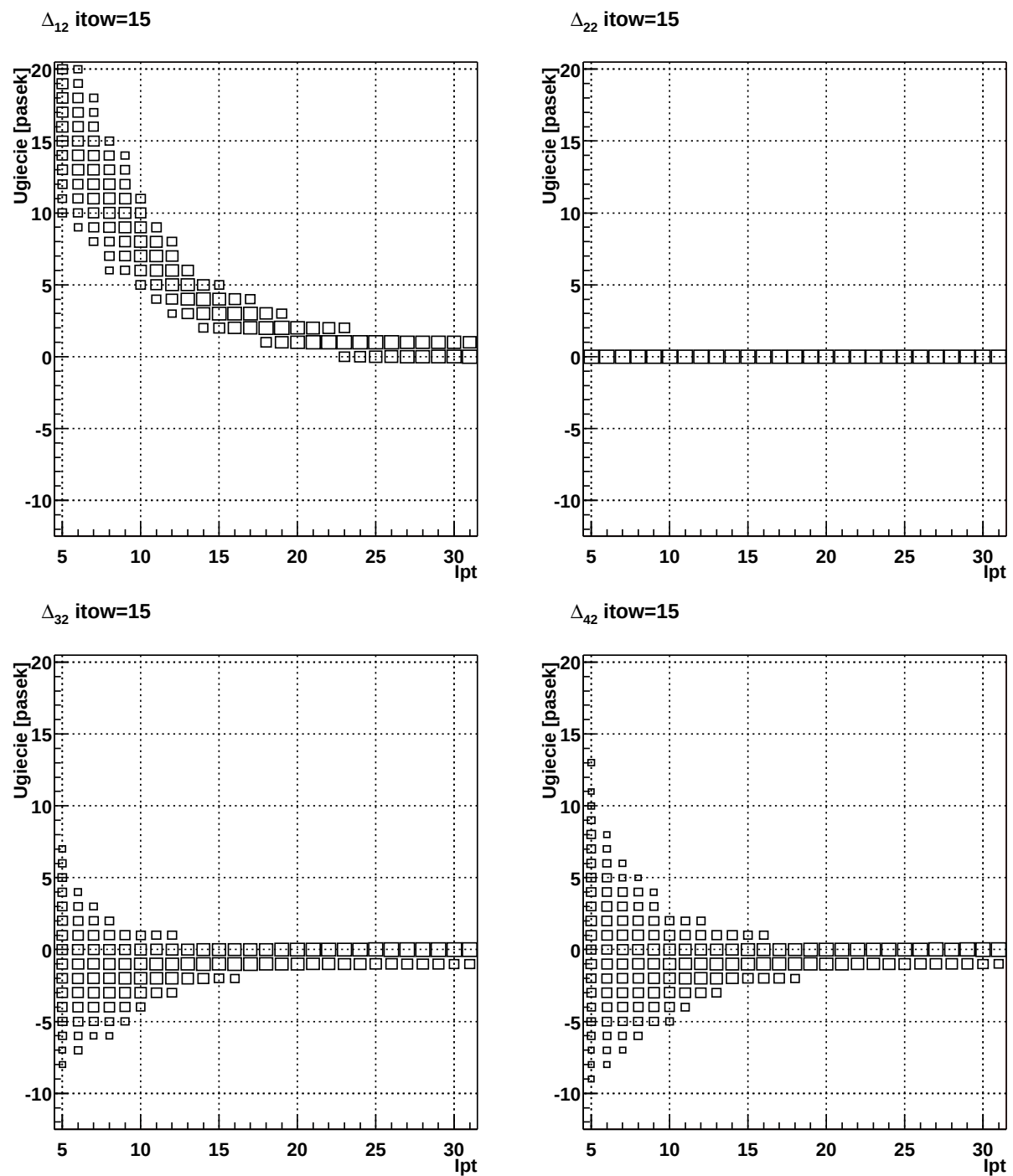
Rysunek 65: Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 12.



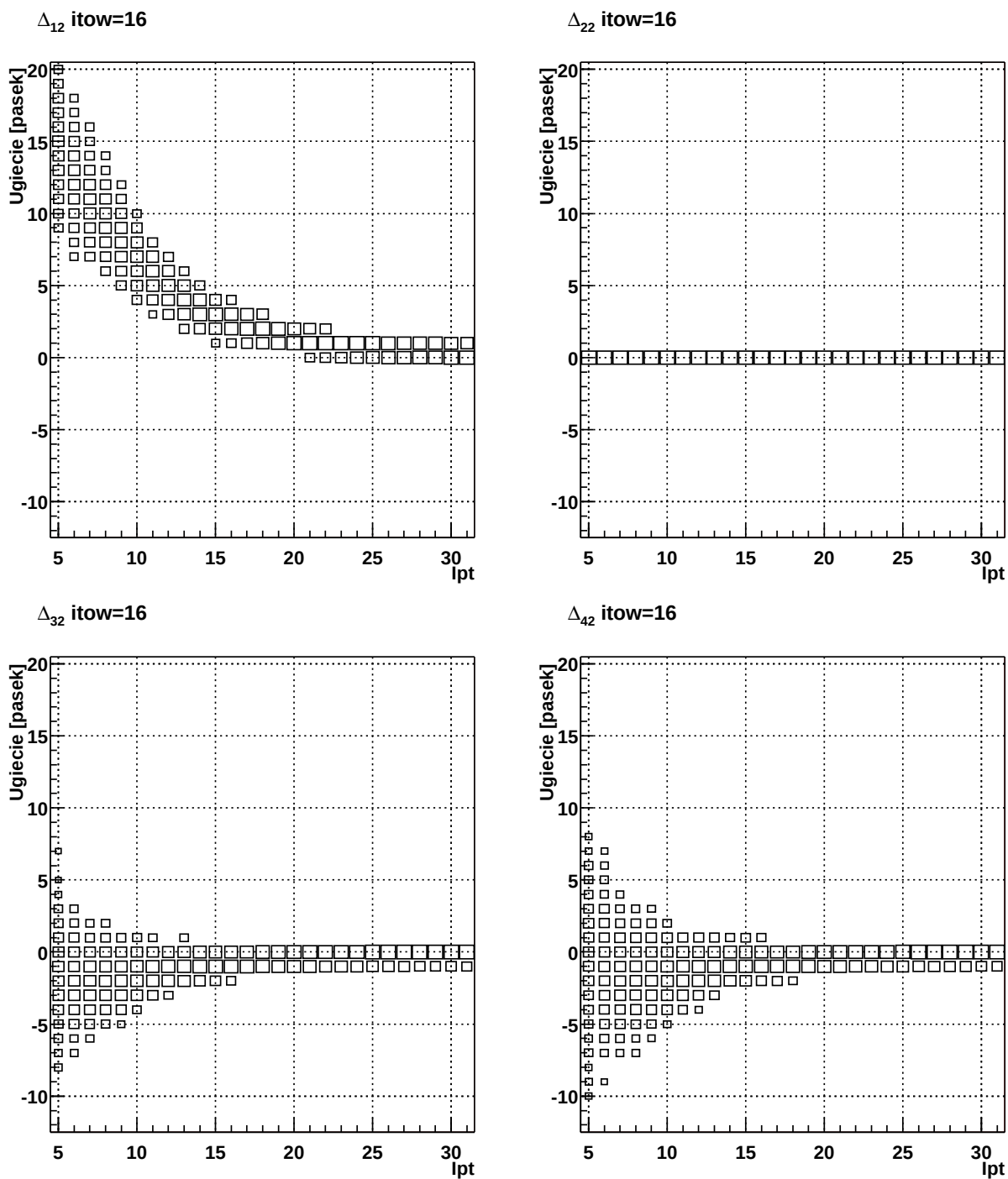
Rysunek 66: Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 13.



Rysunek 67: Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 14.



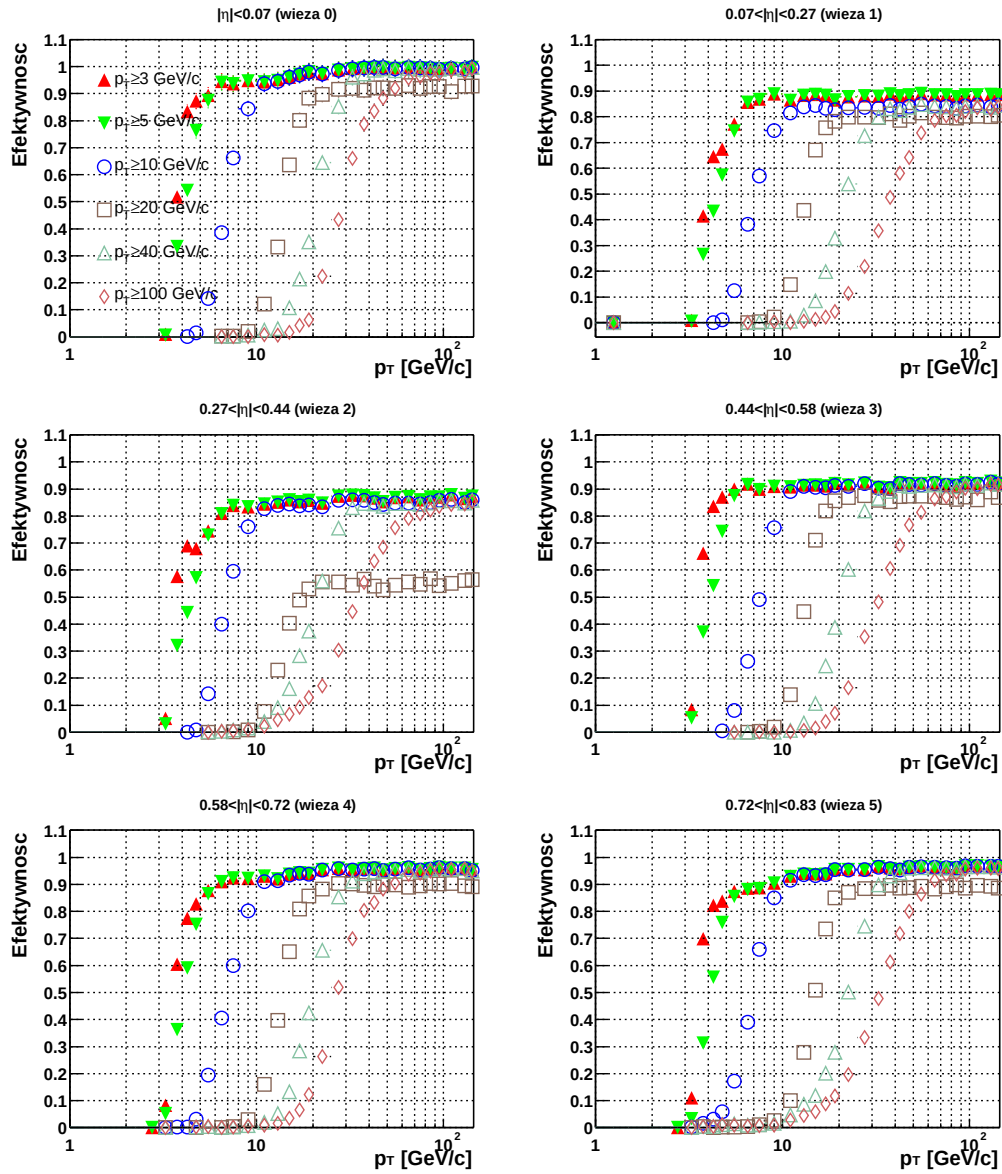
Rysunek 68: Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 15.



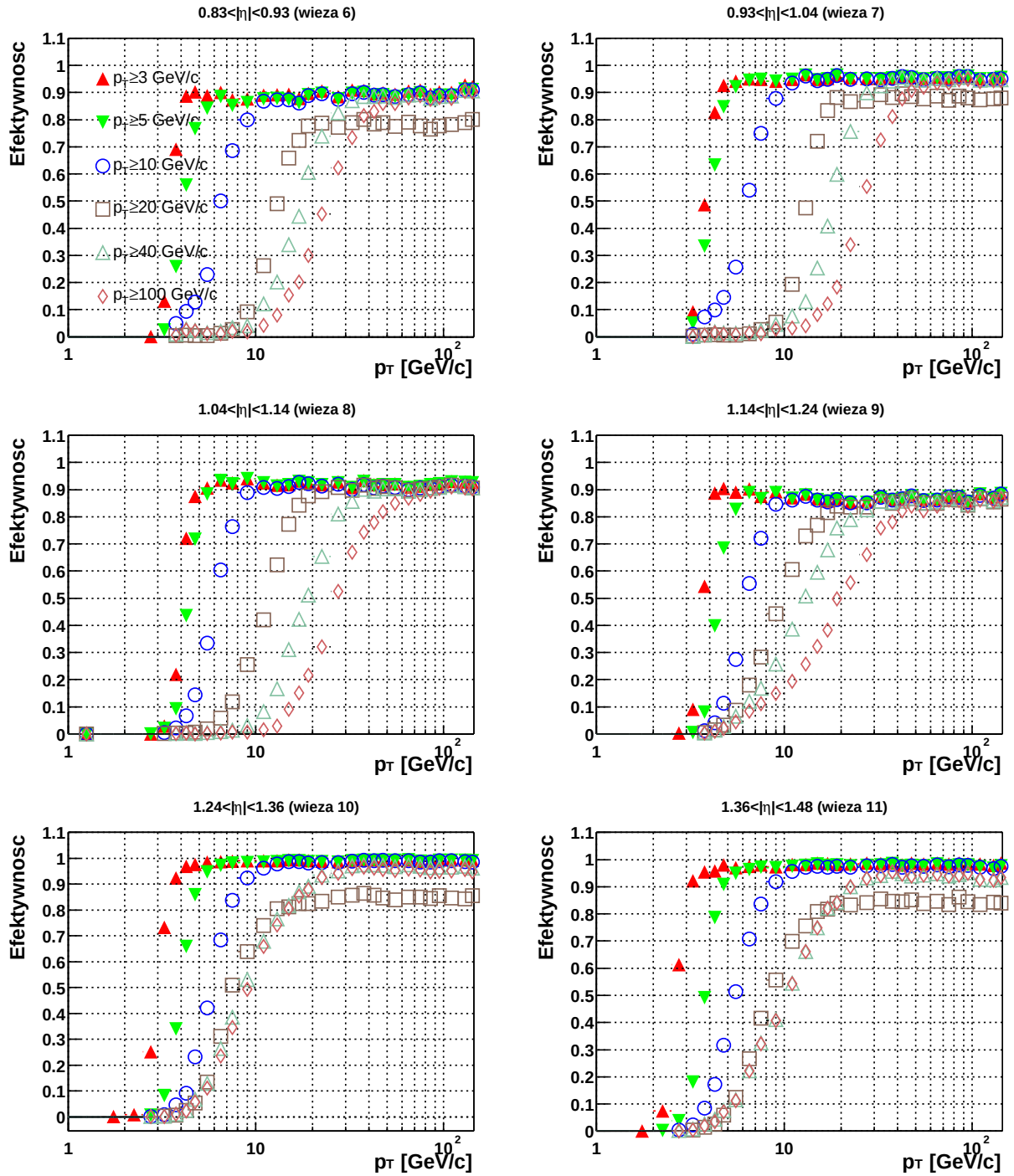
Rysunek 69: Ugięcie mionów dla kolejnych kodów pędowych, wieża 16.

E Krzywe efektywności

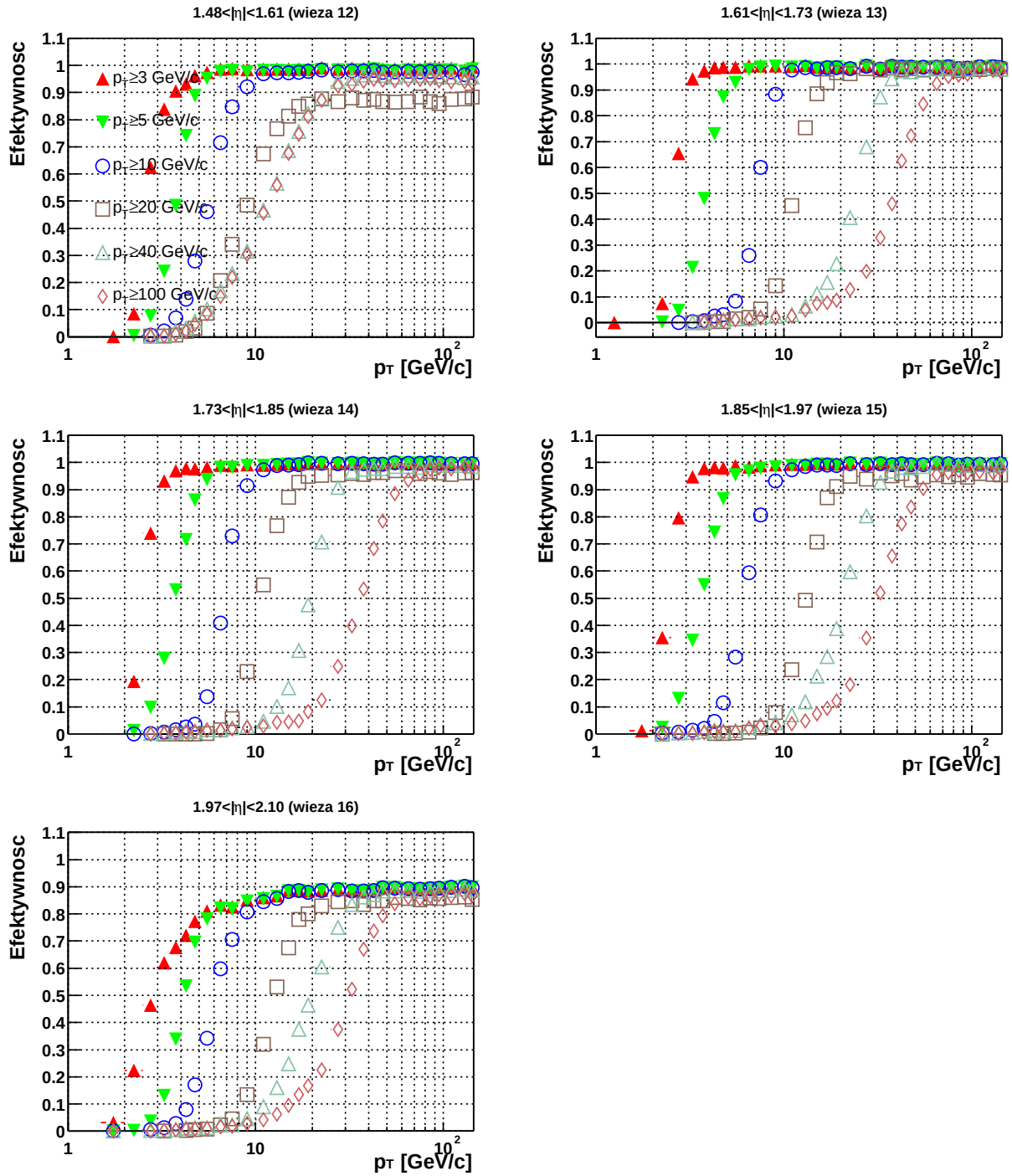
E.1 PAC4



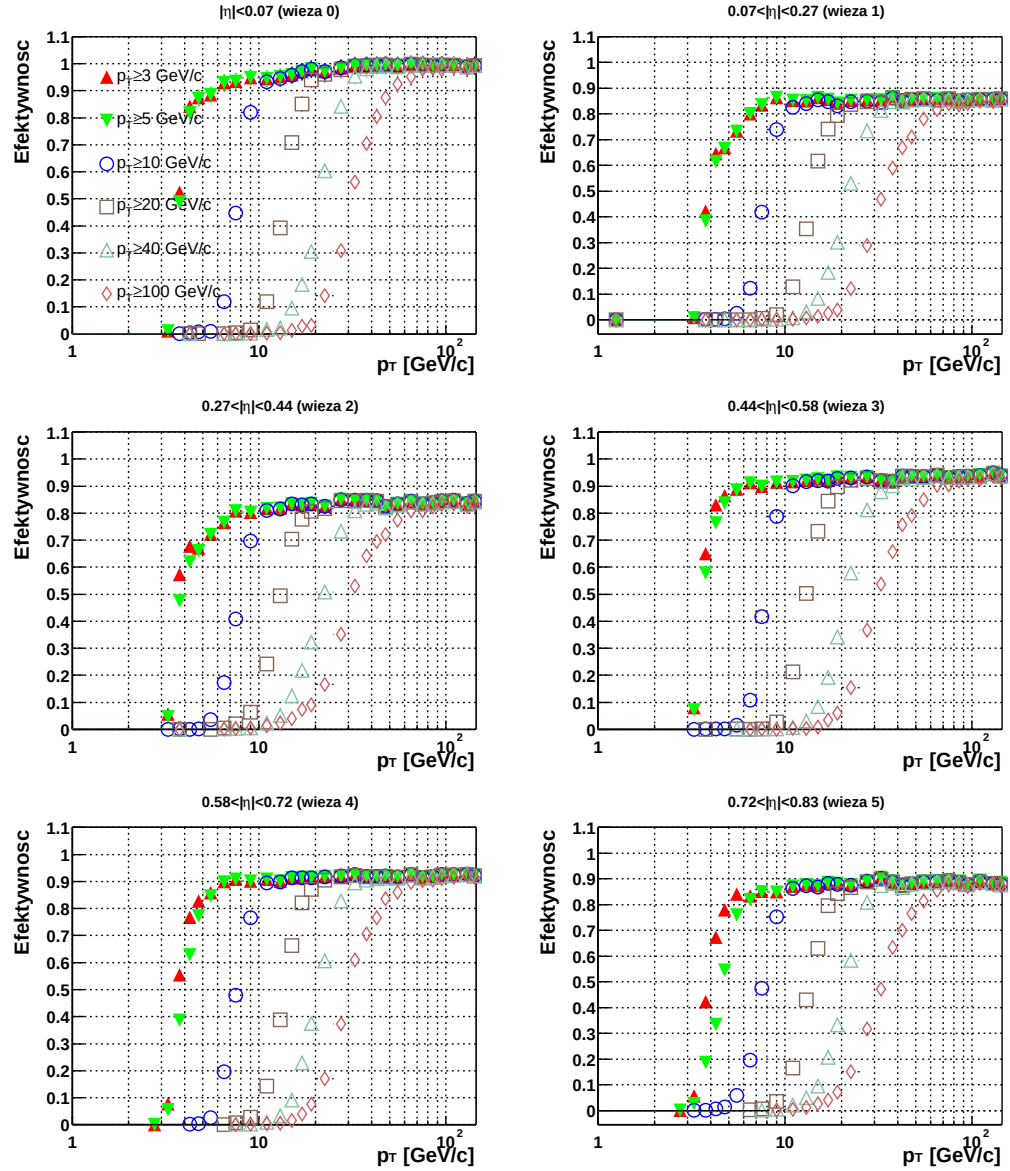
Rysunek 70: Efektywności trygiera dla poszczególnych wież i wybranych cięć ($\sqrt{s}=1.5$). PAC4.



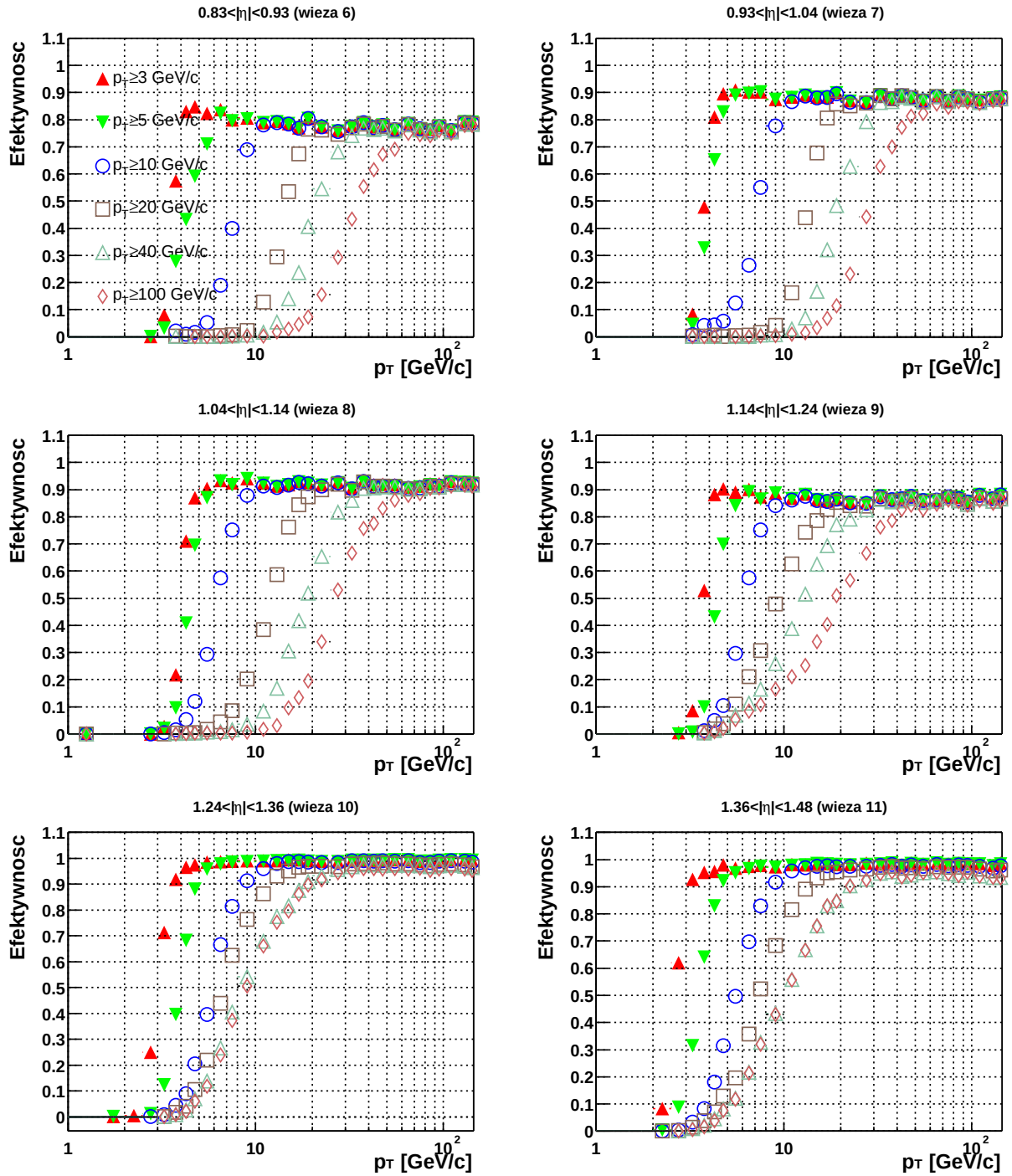
Rysunek 71: Efektywności trygera dla poszczególnych wież i wybranych cięć. PAC4. Kontynuacja.



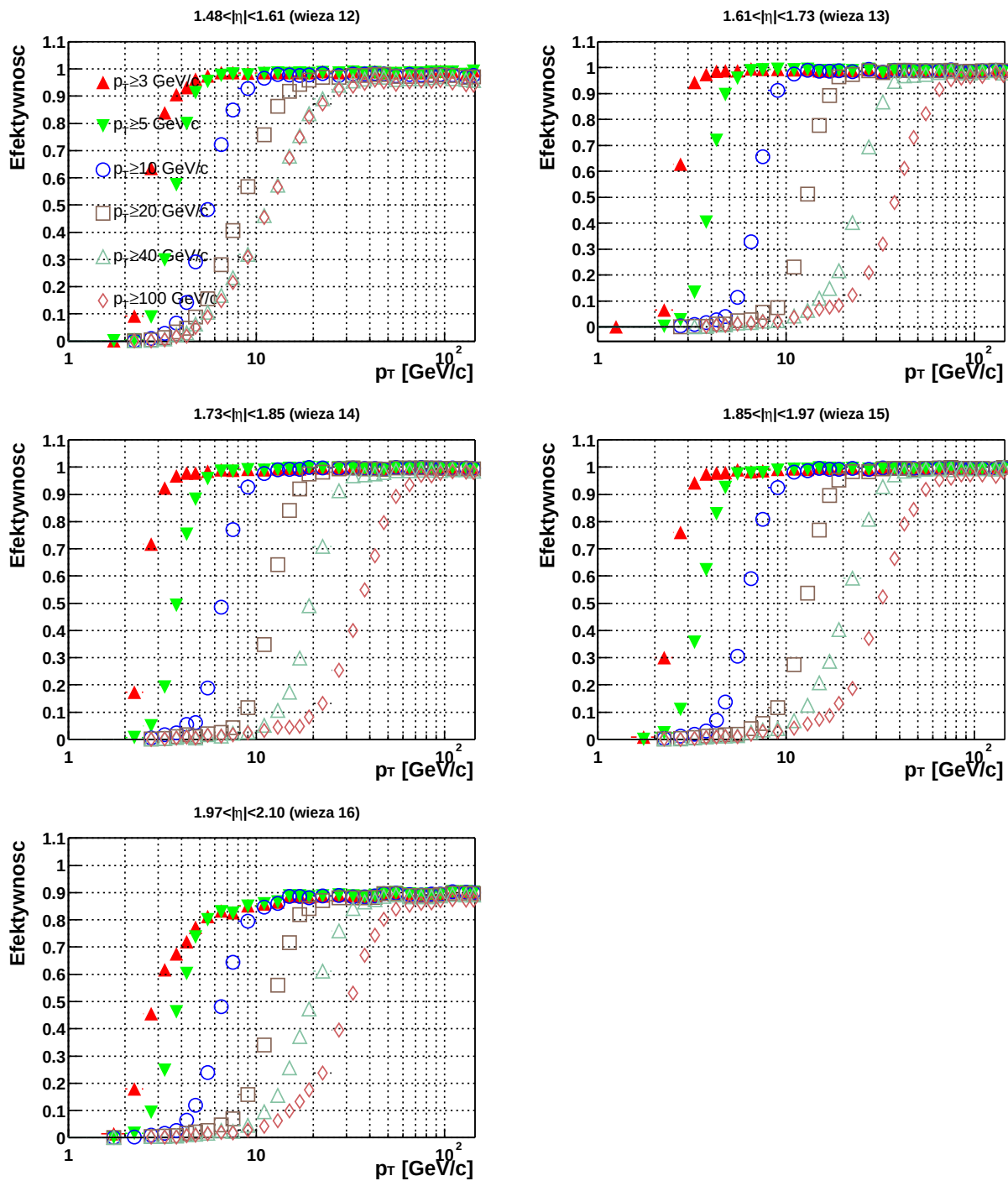
Rysunek 72: Efektywności trygera dla poszczególnych wież i wybranych cięć. PAC4. Kontynuacja.

E.2 $PAC6_3$ 

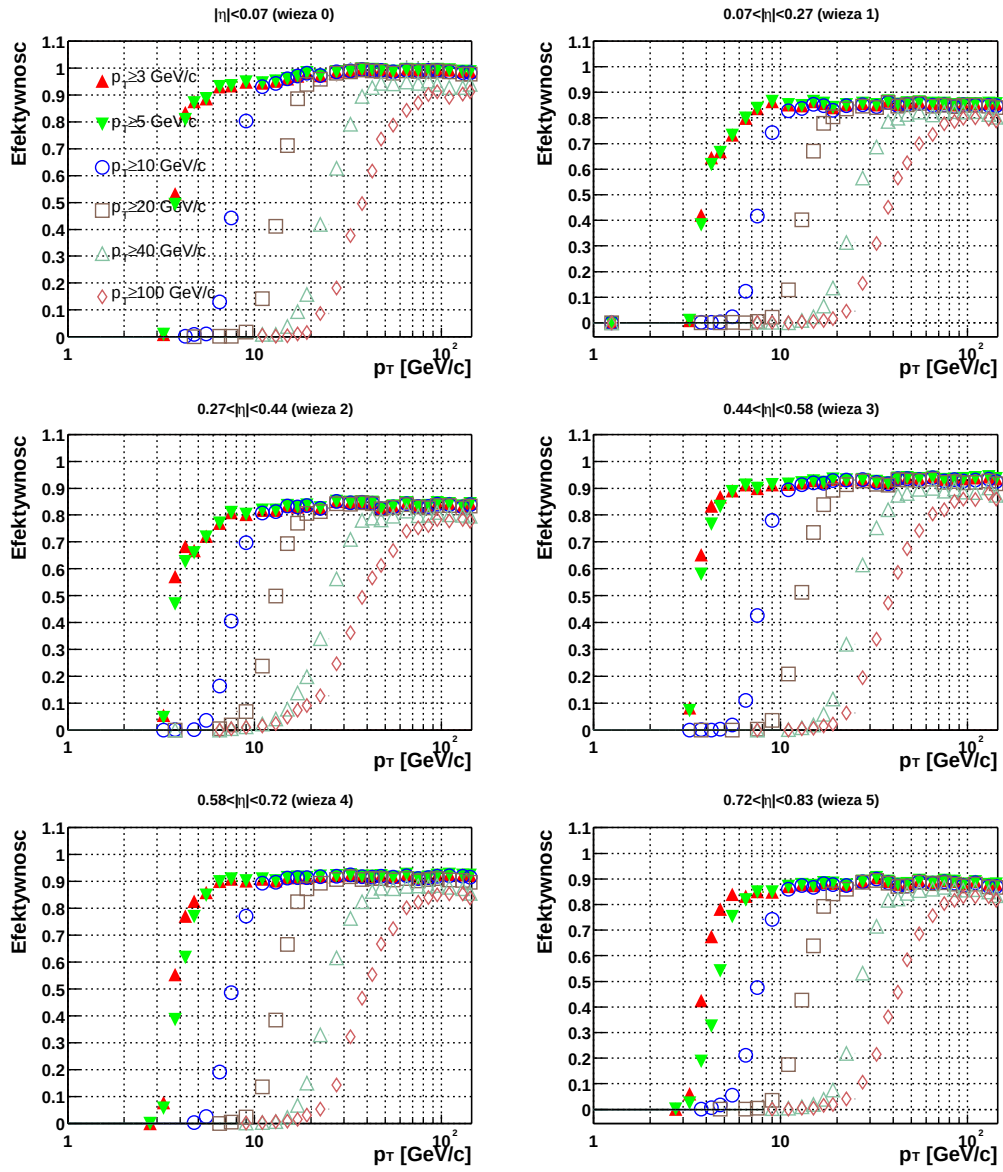
Rysunek 73: Efektywności trygera dla poszczególnych wież i wybranych cięć ($cs = 1.5$). $PAC6_3$



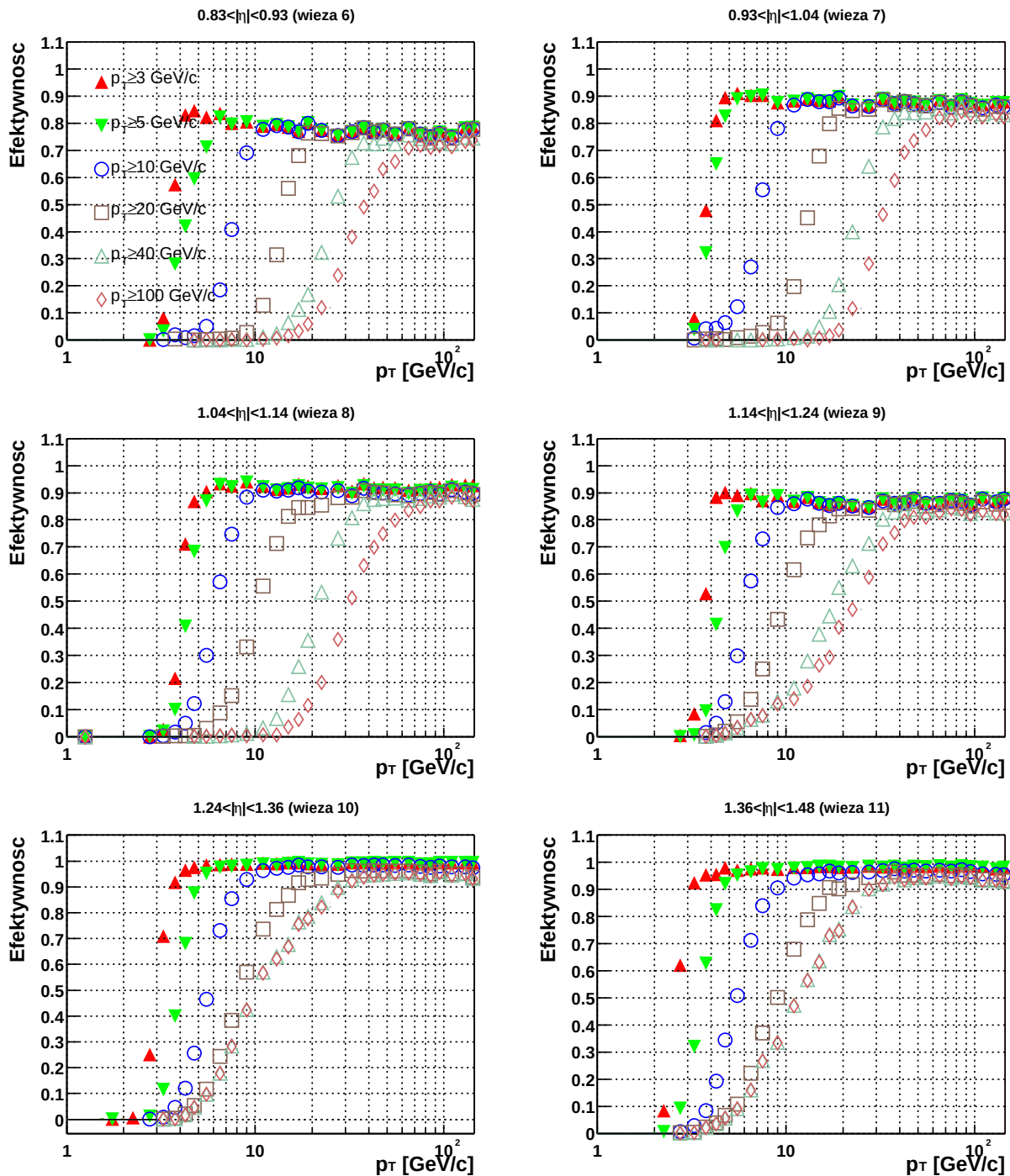
Rysunek 74: Efektywności trygera dla poszczególnych wież i wybranych cięć. PAC₆₃.
Kontynuacja.



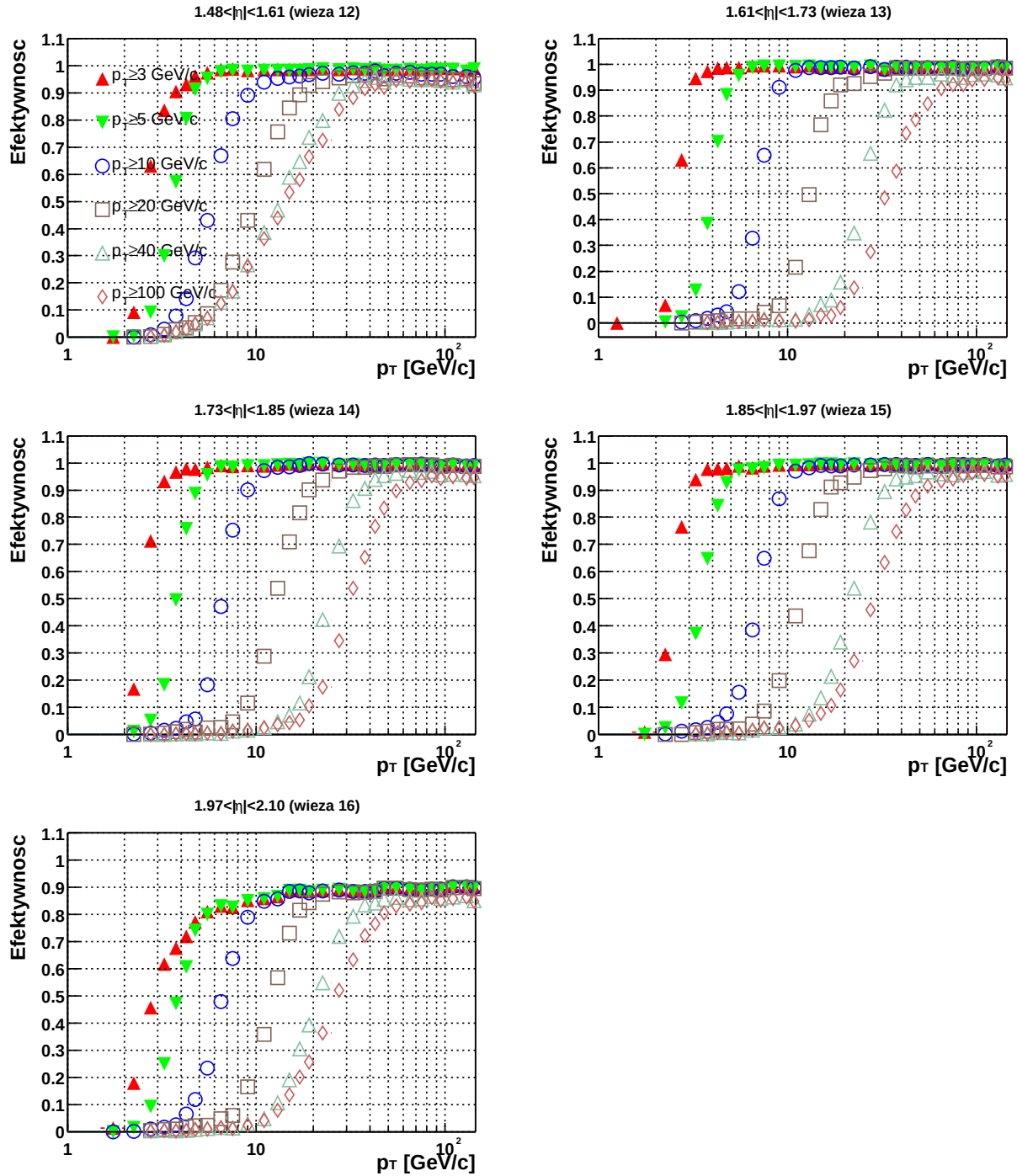
Rysunek 75: Efektywności trygera dla poszczególnych wież i wybranych cięć. $PAC6_3$. Kontynuacja.

E.3 $PAC_{631/2}$ 

Rysunek 76: Efektywności trygera dla poszczególnych wież i wybranych cięć ($c_s = 1.5$). $PAC_{631/2}$

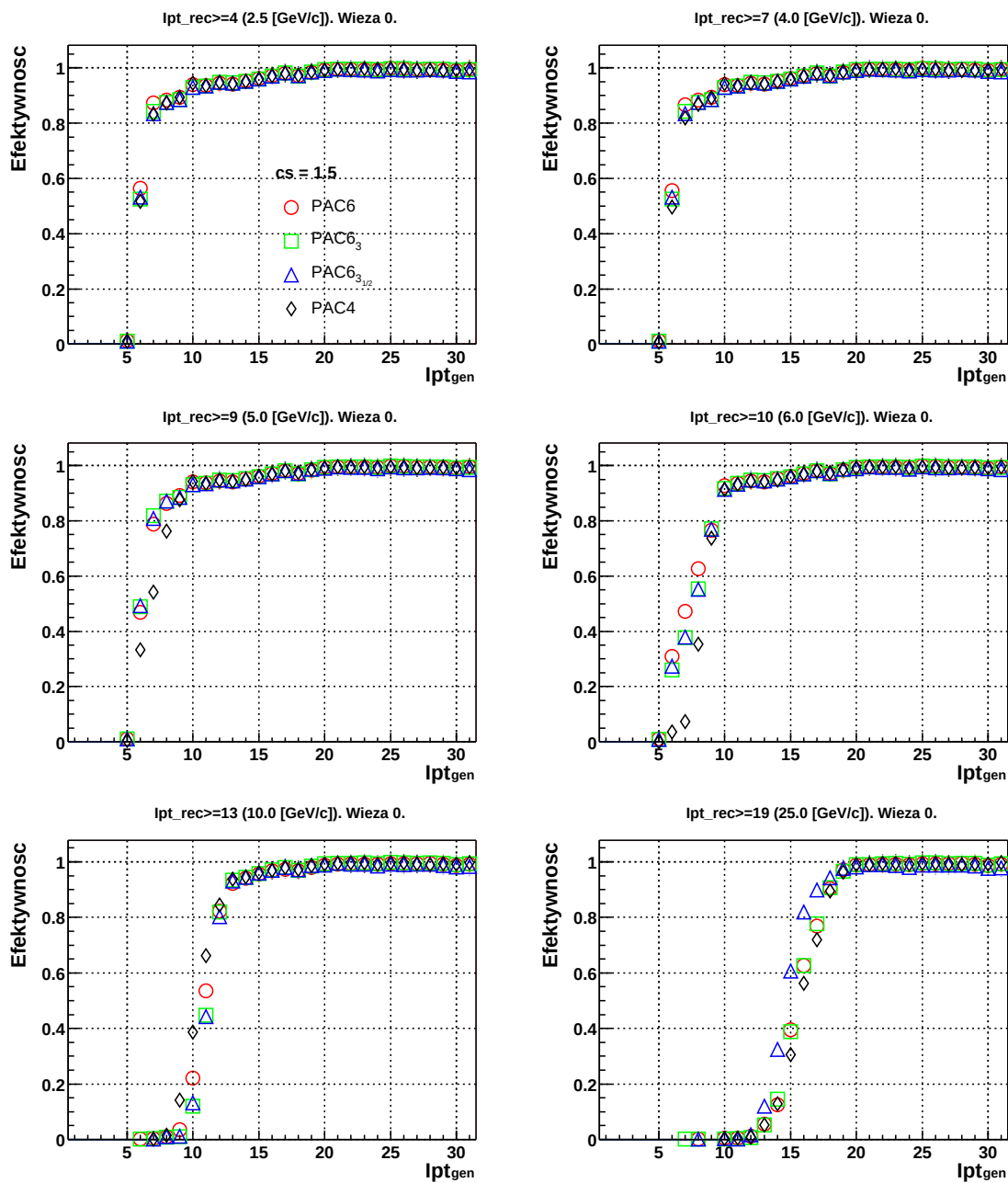


Rysunek 77: Efektywności trygera dla poszczególnych wież i wybranych cięć. $PAC6_{31/2}$. Kontynuacja.

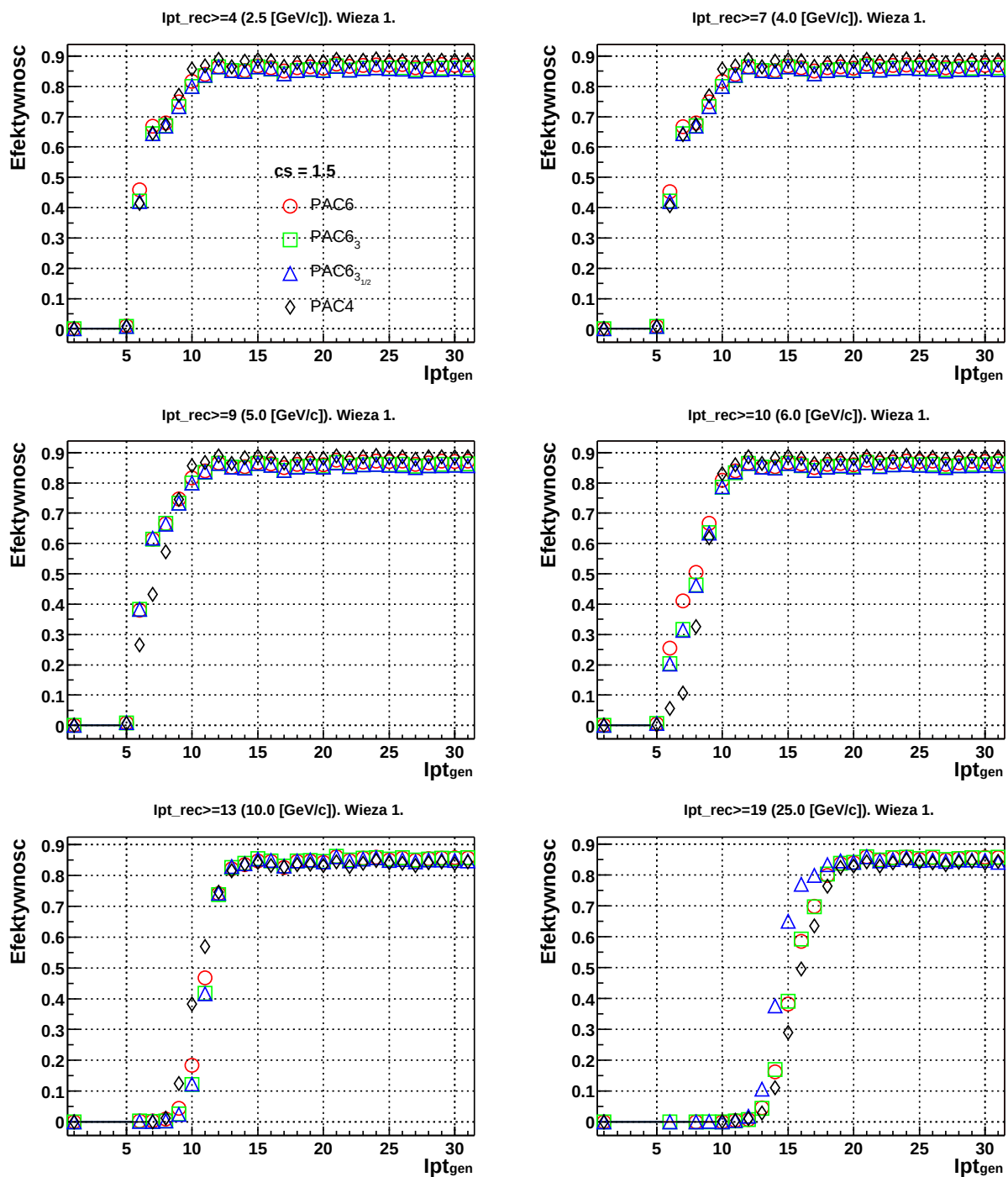


Rysunek 78: Efektywności trygera dla poszczególnych wież i wybranych cięć. $PAC_{631/2}$.
Kontynuacja.

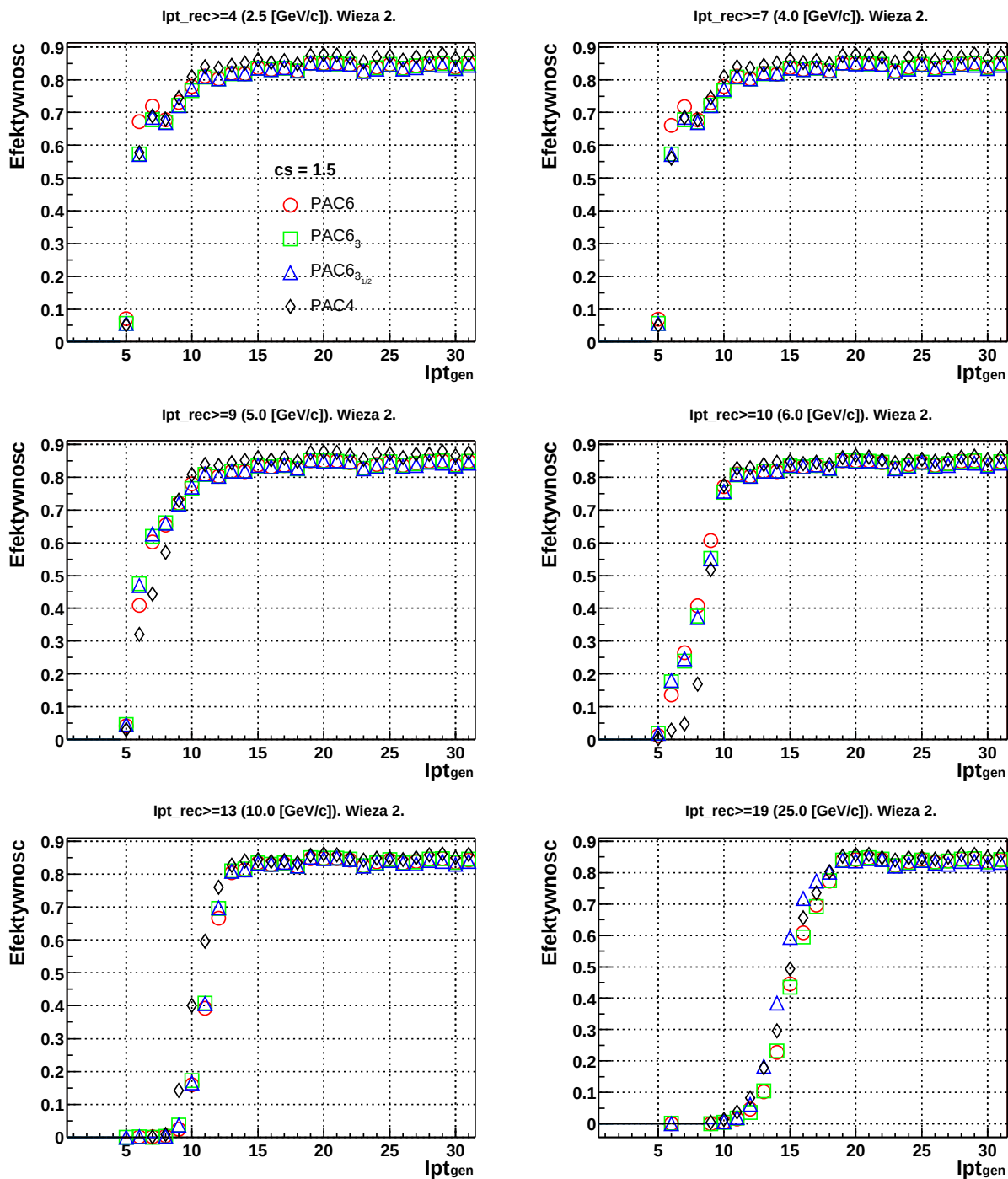
E.4 Porównanie krzywych efektywności



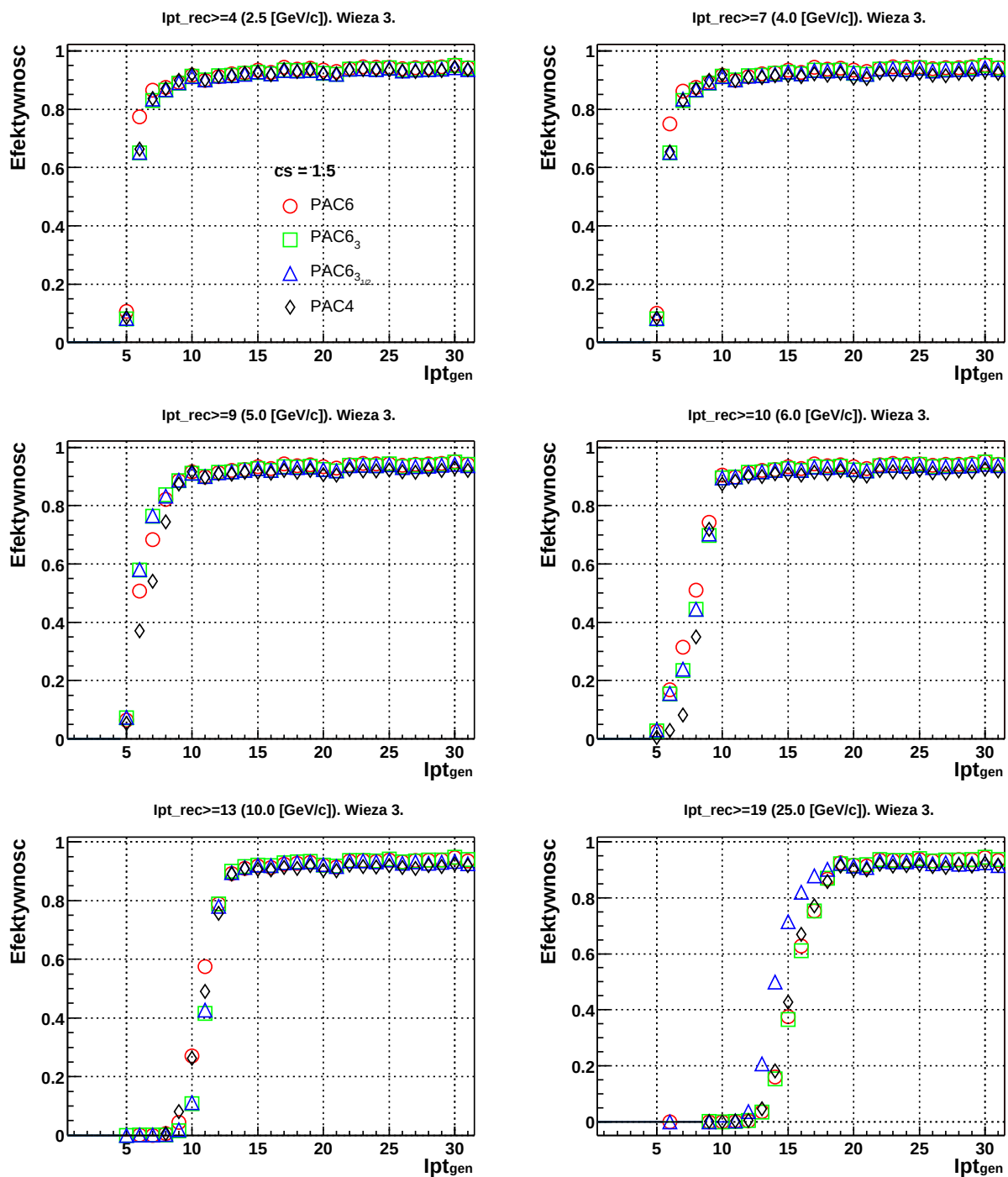
Rysunek 79: Porównanie efektywności trygera dla wieży 0 i wybranych cięć.



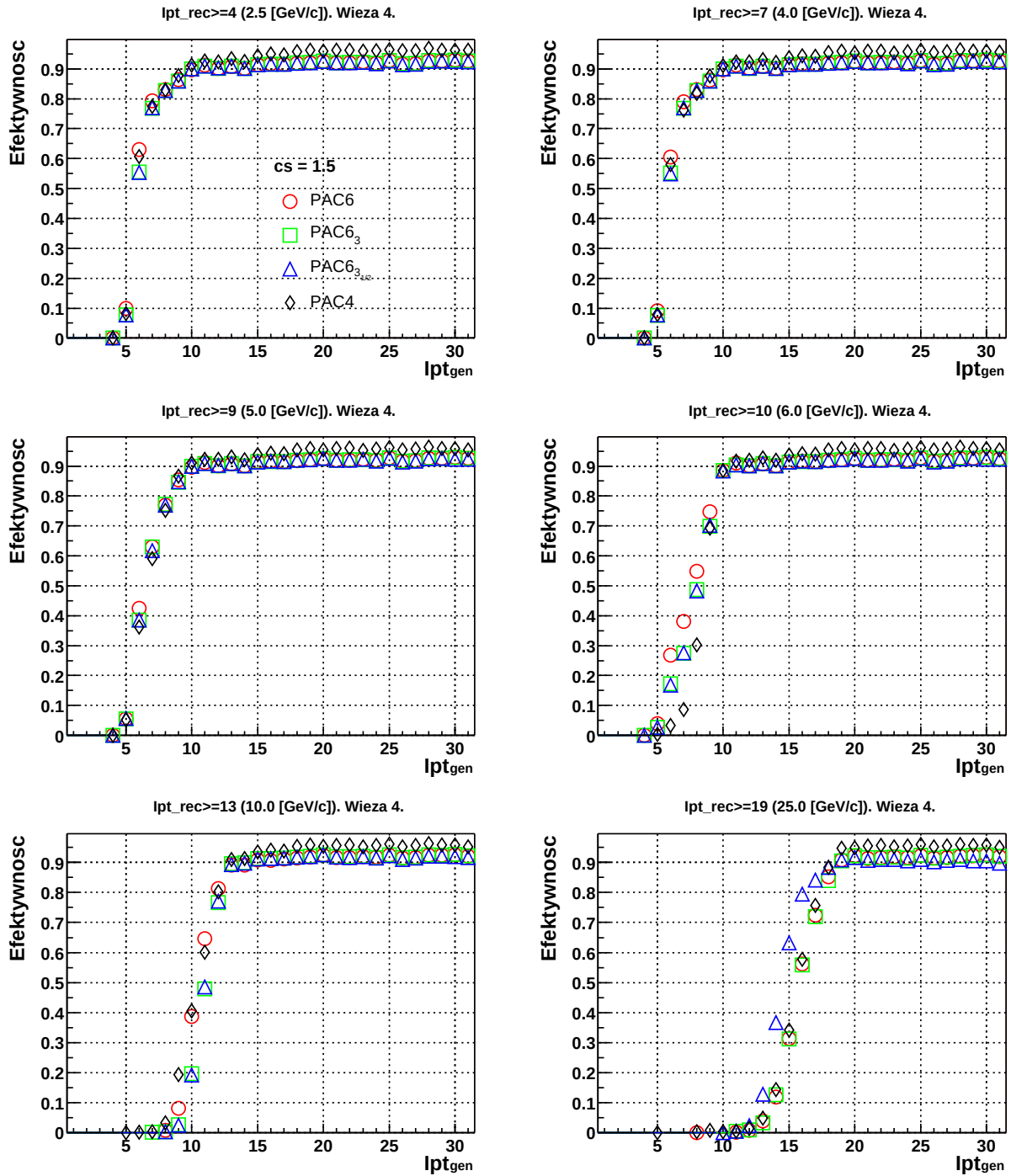
Rysunek 80: Porównanie efektywności trygiera dla wieży 1 i wybranych cięć.



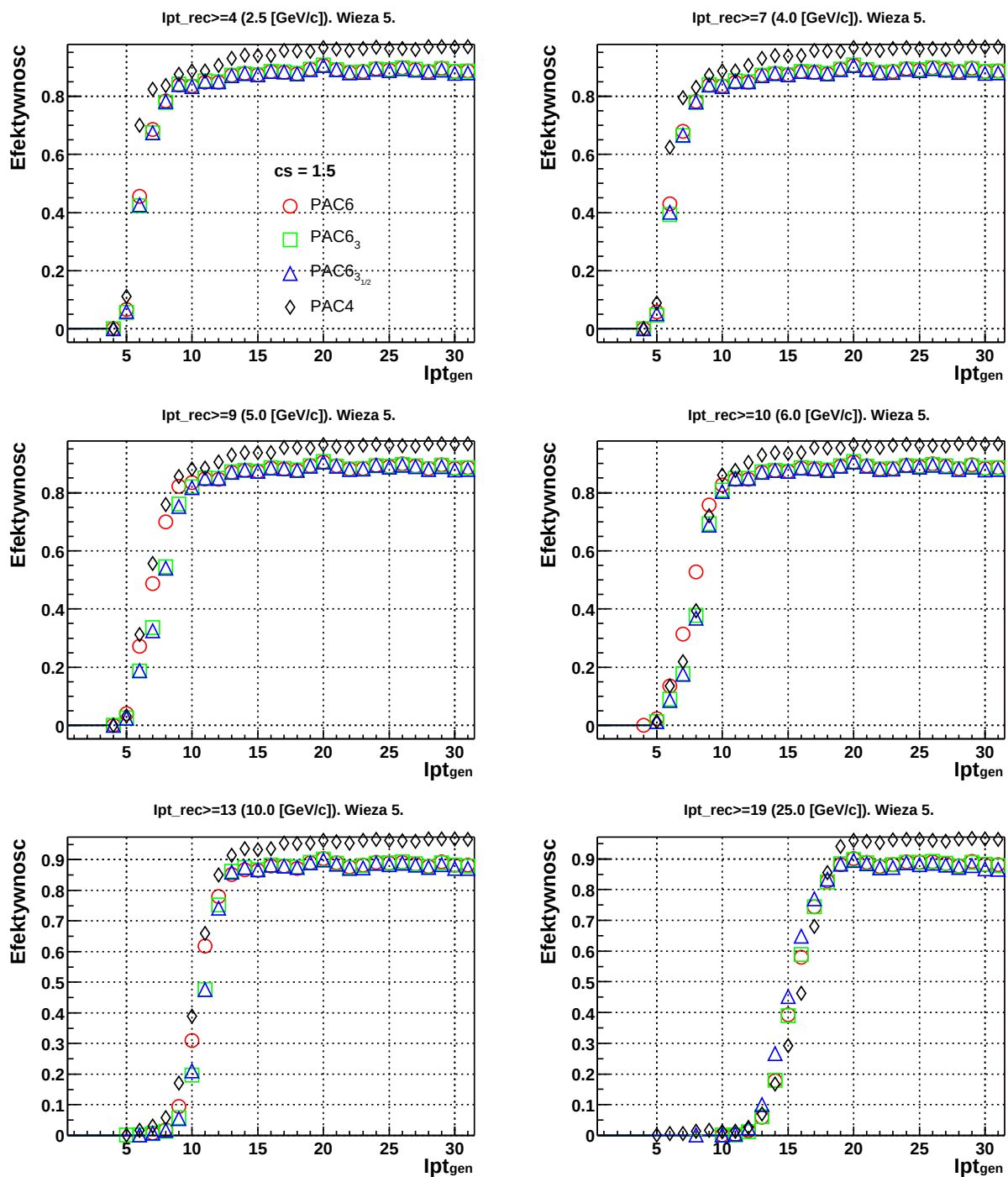
Rysunek 81: Porównanie efektywności trygera dla wieży 2 i wybranych cięć.



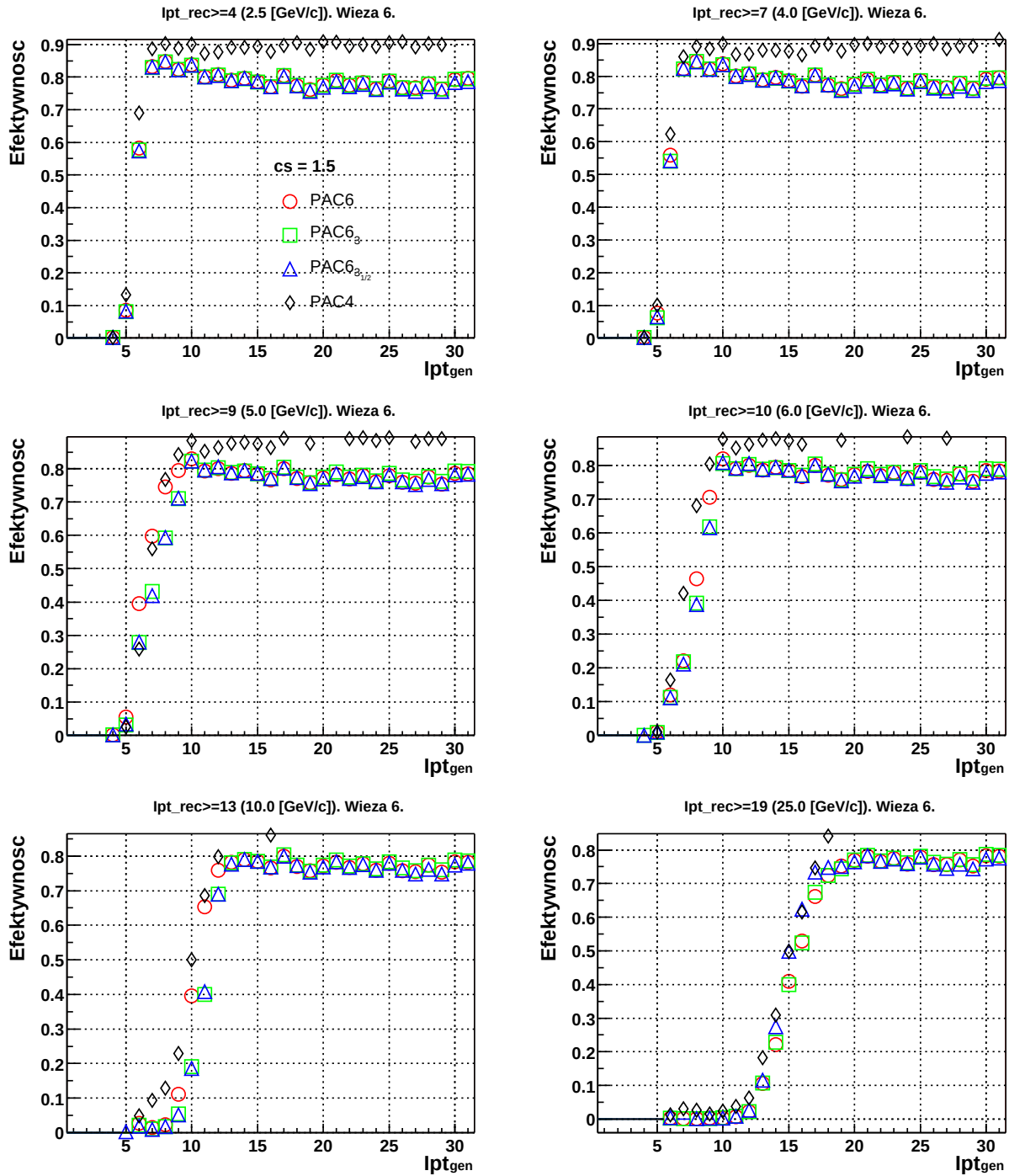
Rysunek 82: Porównanie efektywności trygera dla wieży 3 i wybranych cięć.



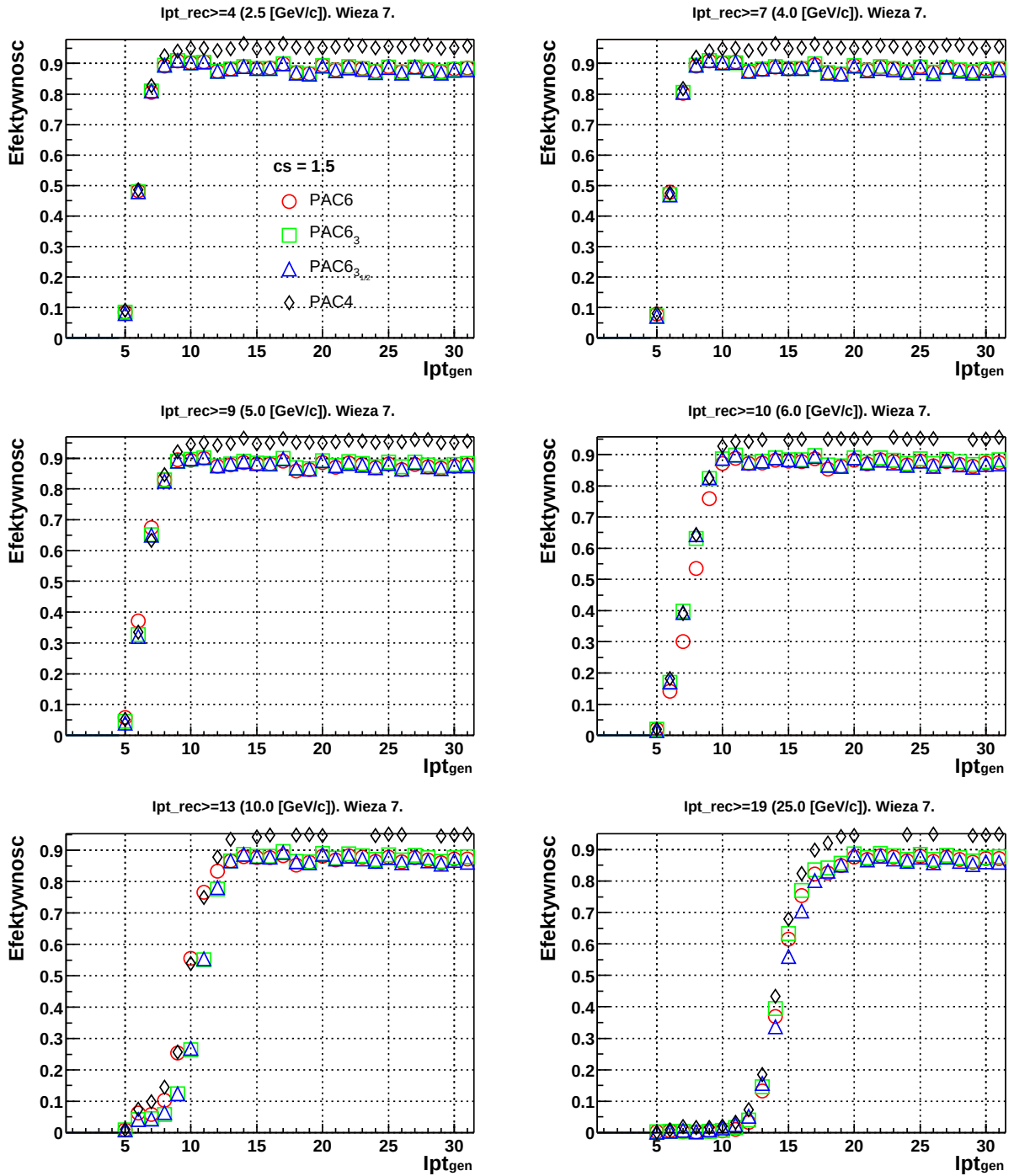
Rysunek 83: Porównanie efektywności trygera dla wieży 4 i wybranych cięć.



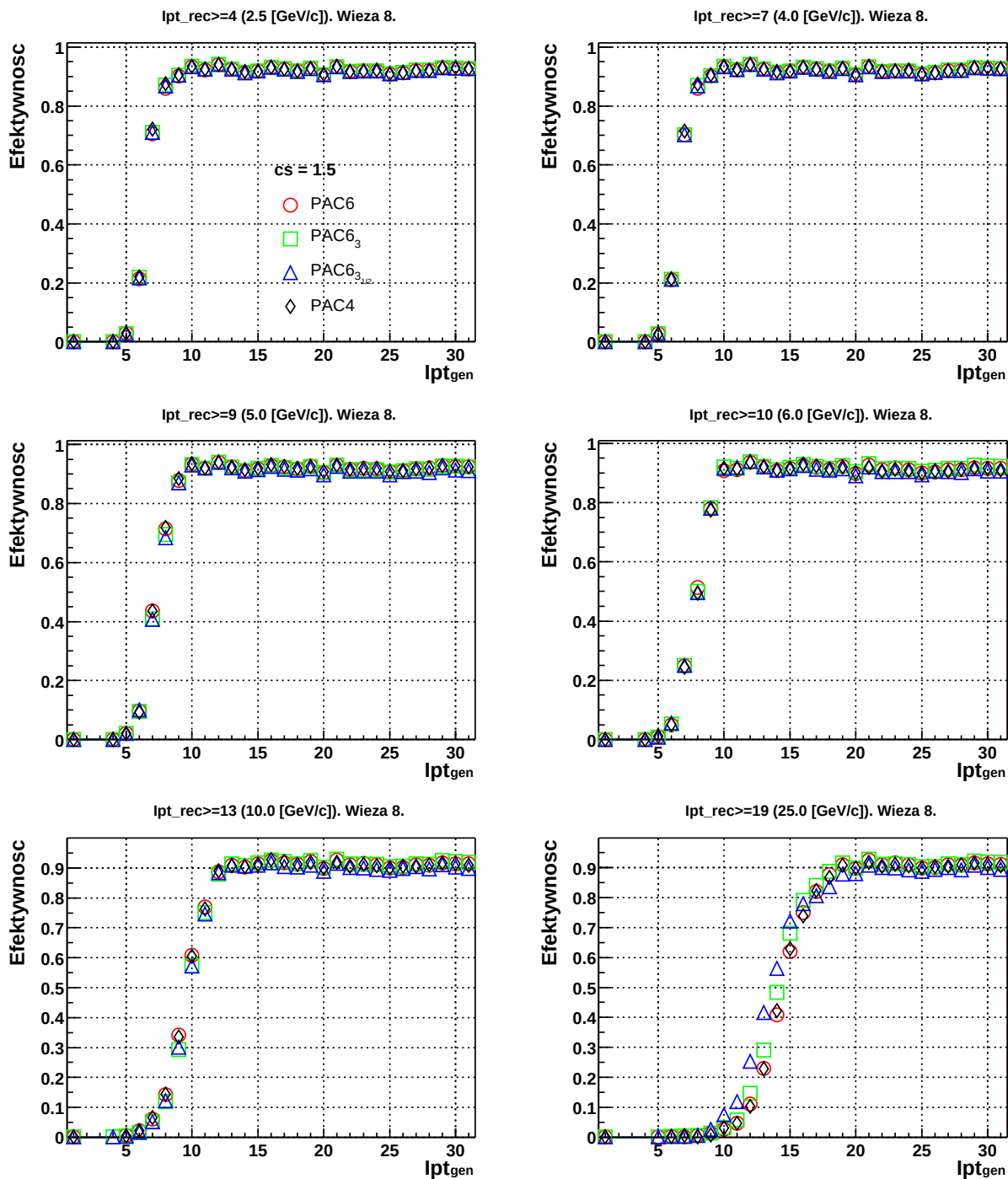
Rysunek 84: Porównanie efektywności trygera dla wieży 5 i wybranych cięć.



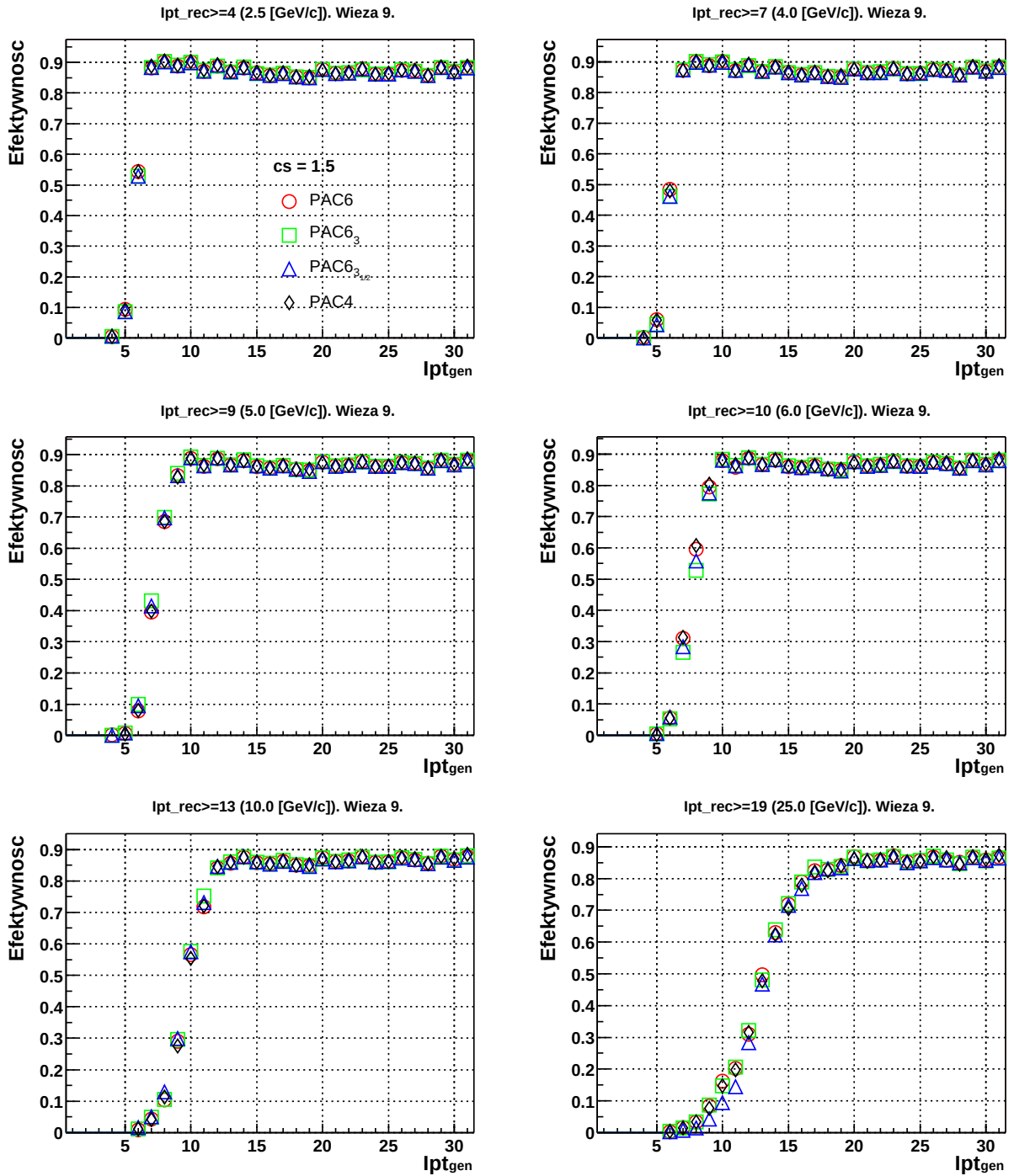
Rysunek 85: Porównanie efektywności trygera dla wieży 6 i wybranych cięć.



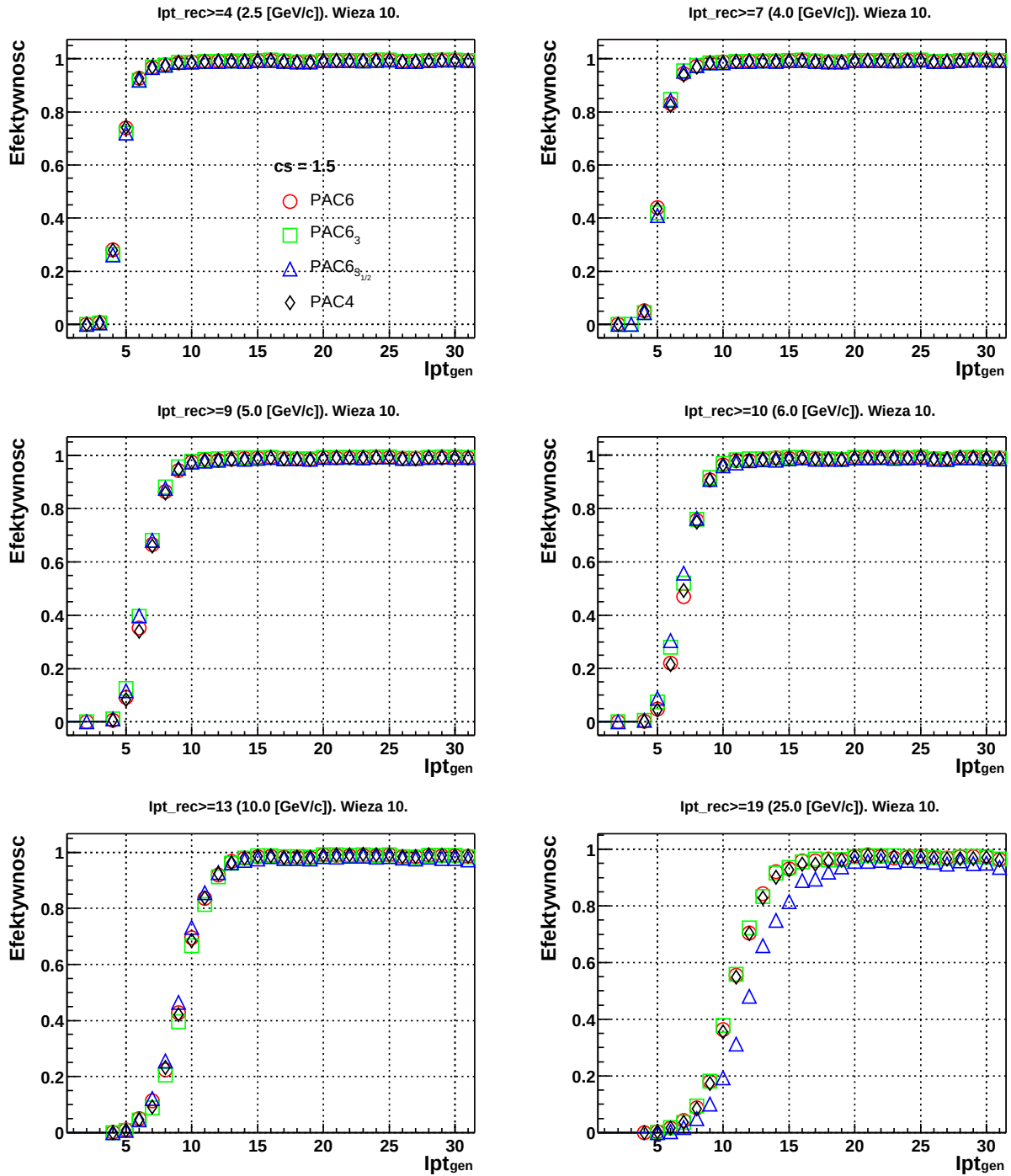
Rysunek 86: Porównanie efektywności trygera dla wieży 7 i wybranych cięć.



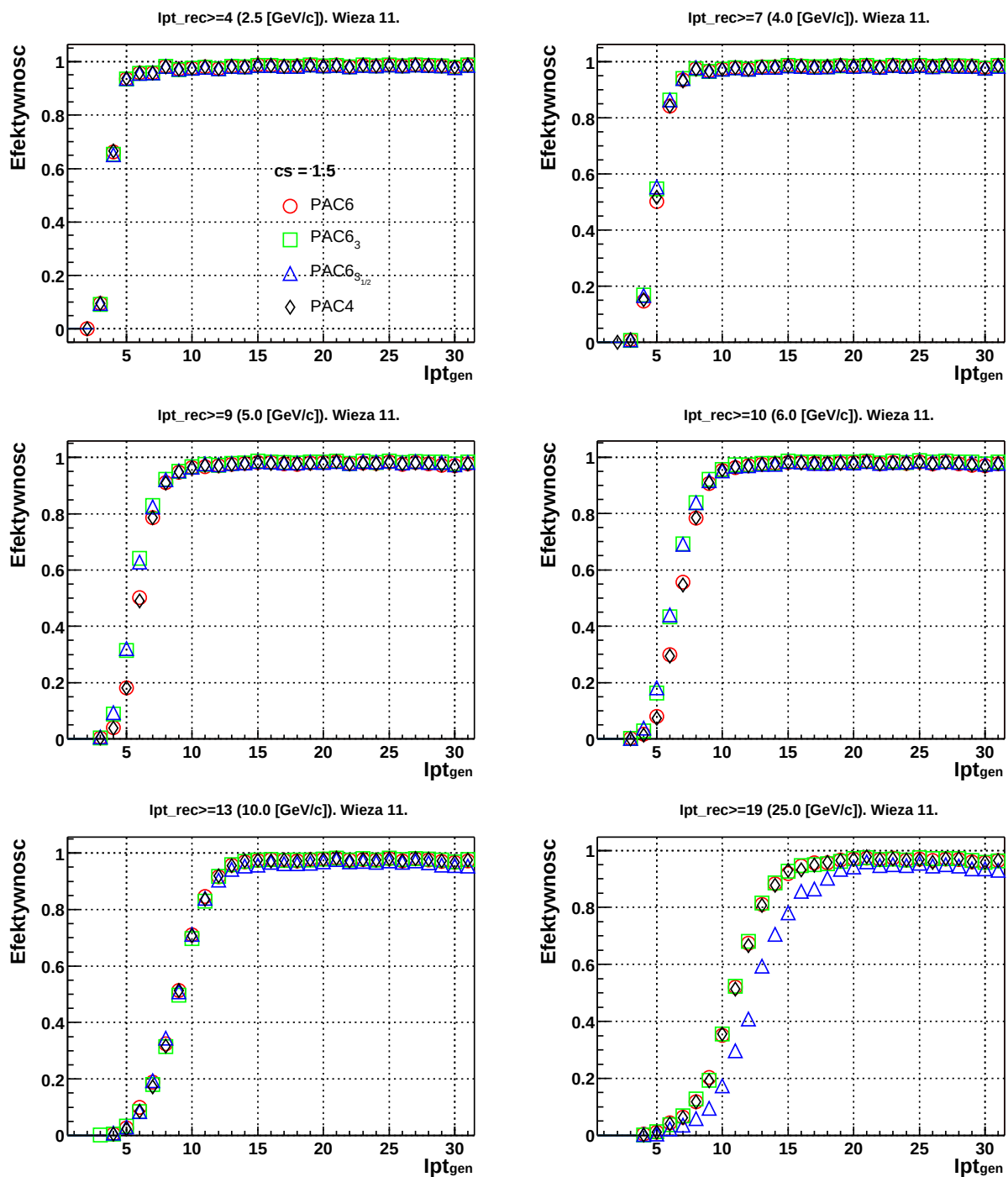
Rysunek 87: Porównanie efektywności trygera dla wieży 8 i wybranych cięć.



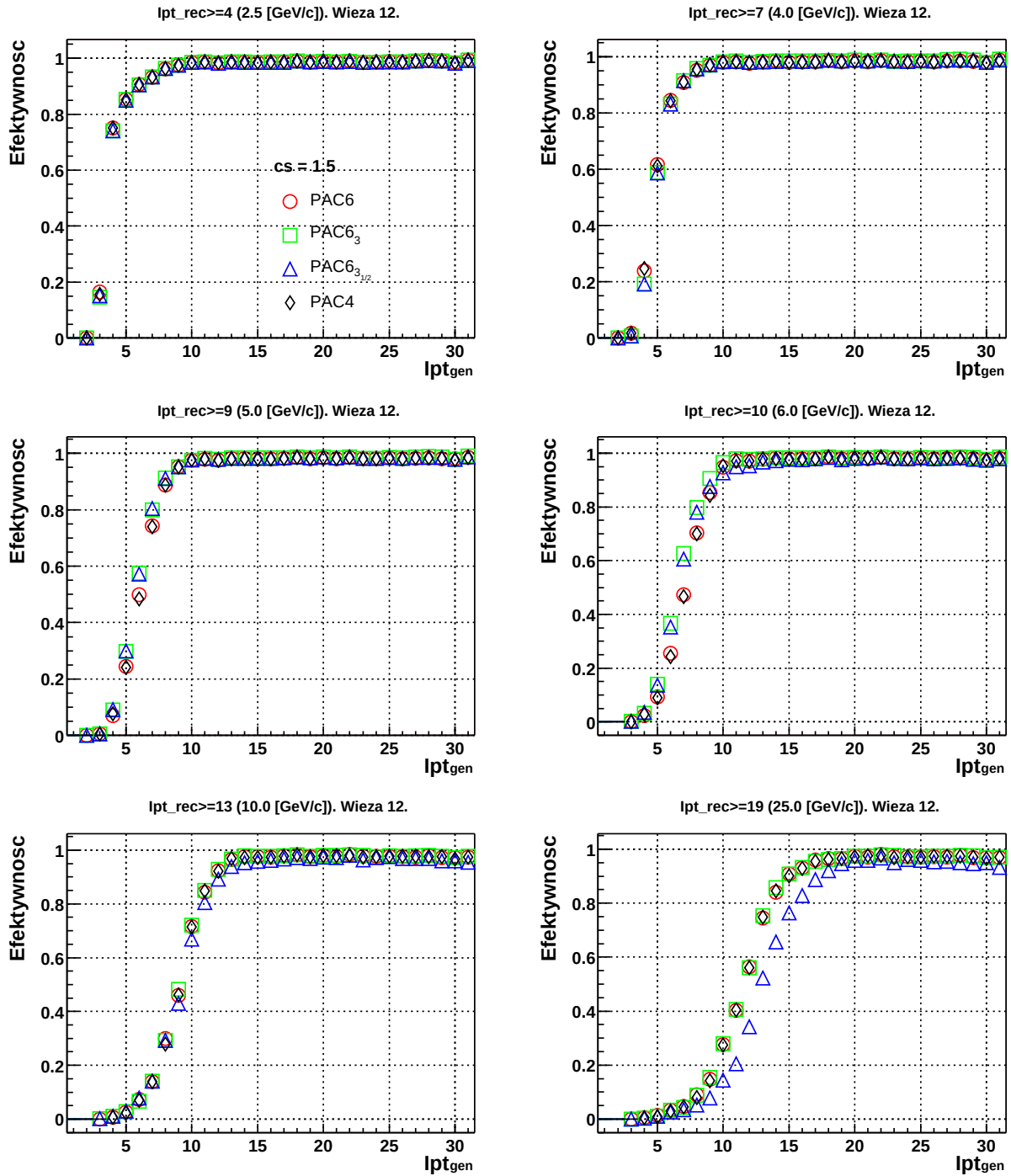
Rysunek 88: Porównanie efektywności trygera dla wieży 9 i wybranych cięć.



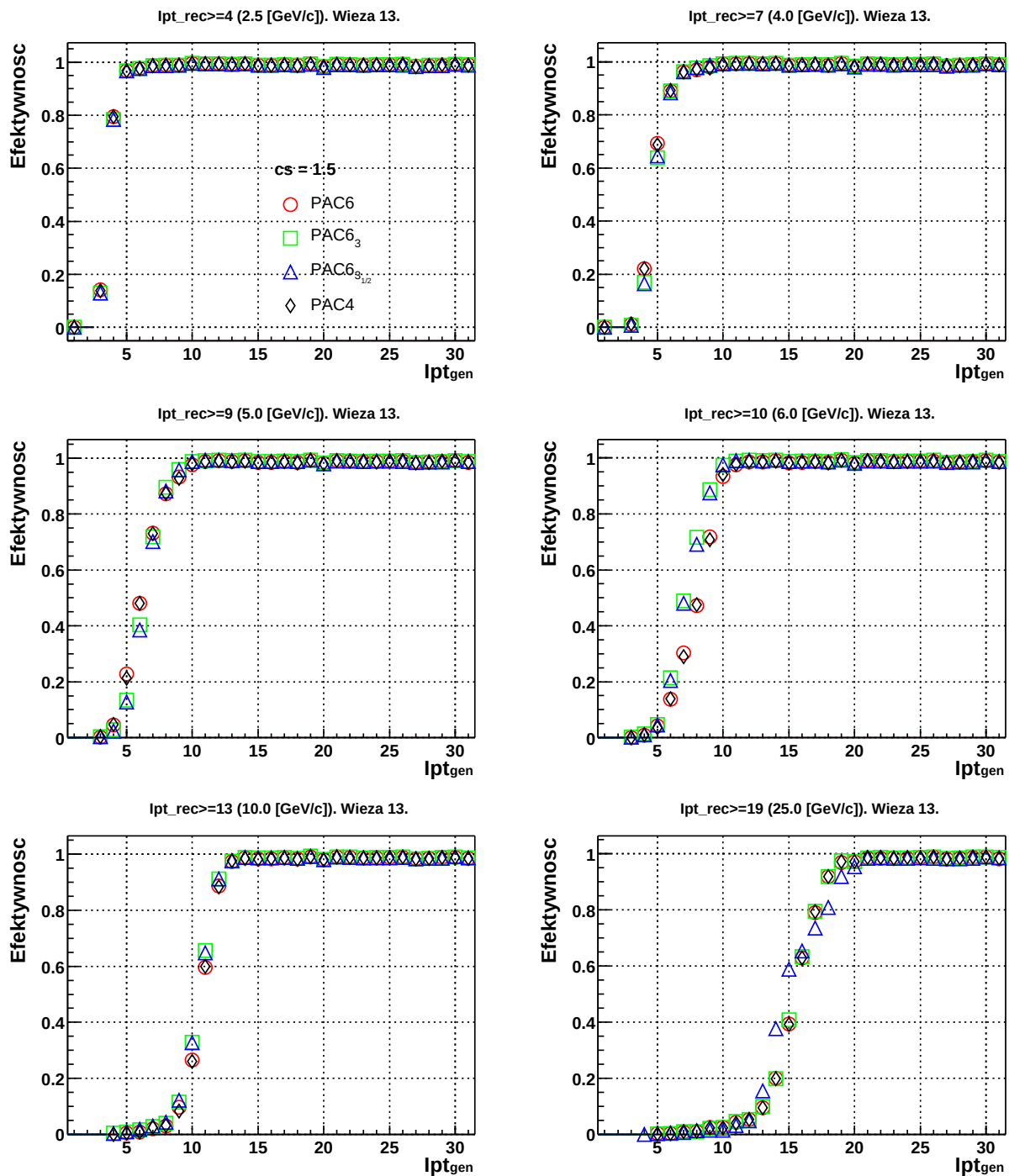
Rysunek 89: Porównanie efektywności trygera dla wieży 10 i wybranych cięć.



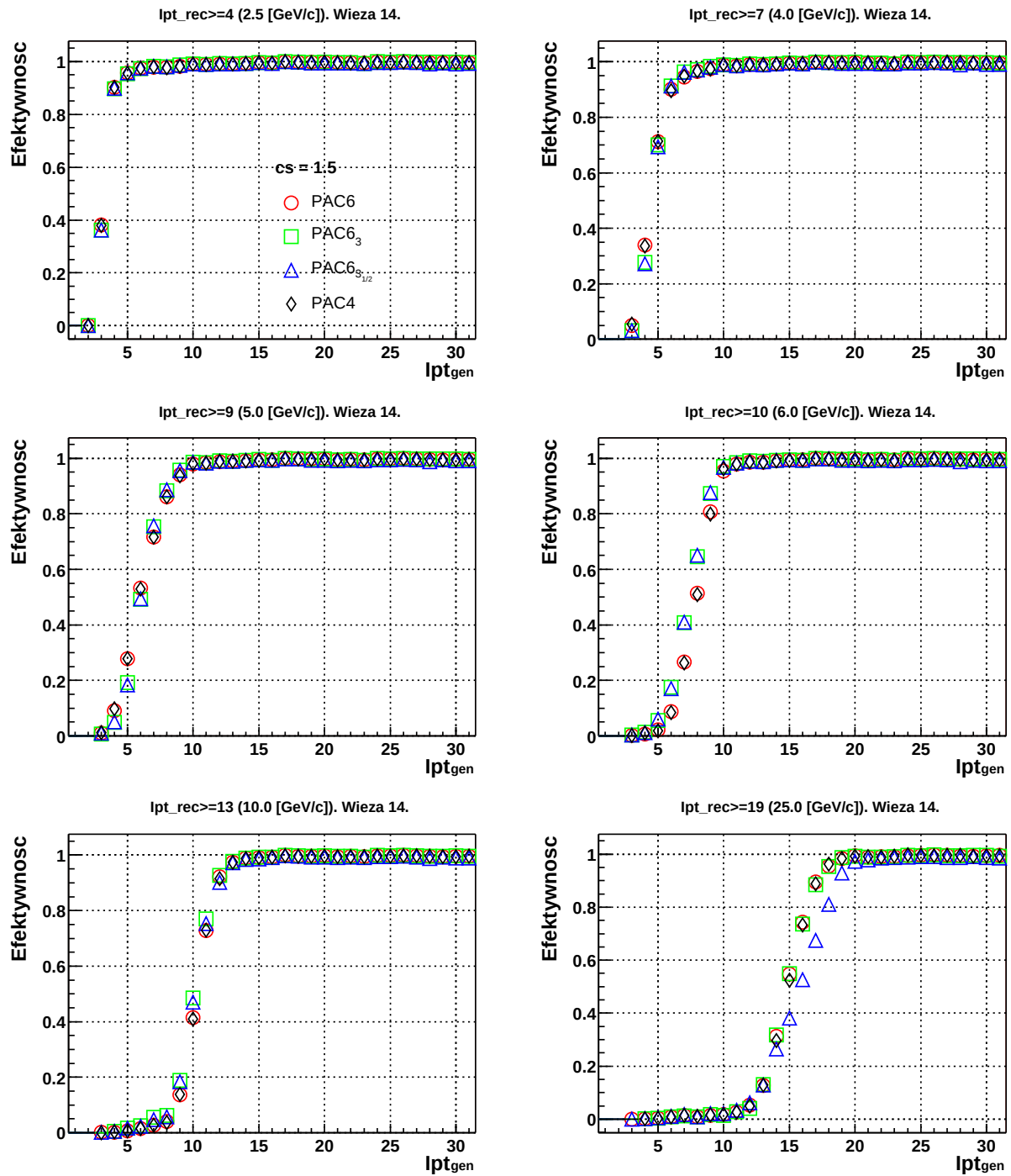
Rysunek 90: Porównanie efektywności trygera dla wieży 11 i wybranych cięć.



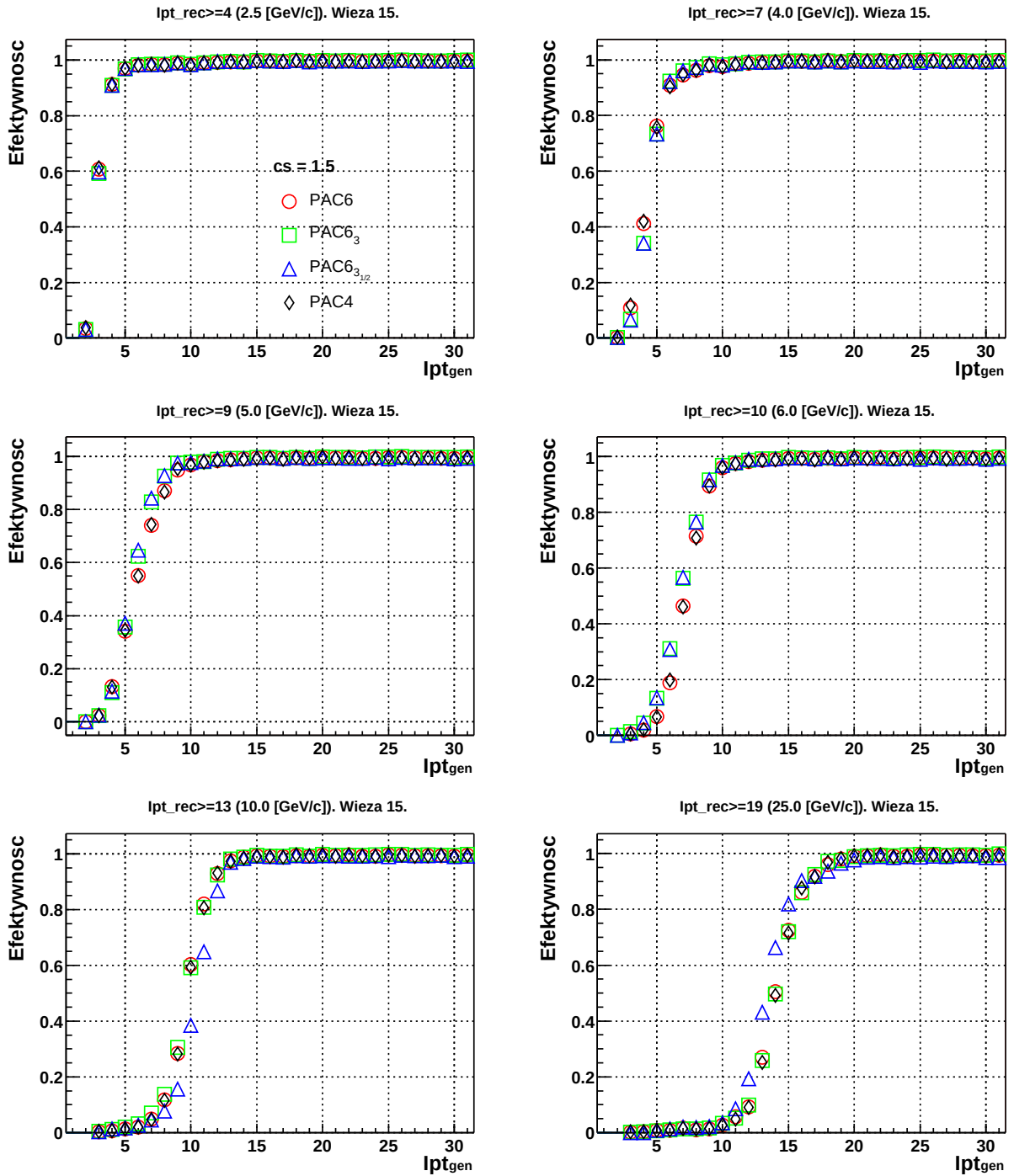
Rysunek 91: Porównanie efektywności trygiera dla wieży 12 i wybranych cięć.



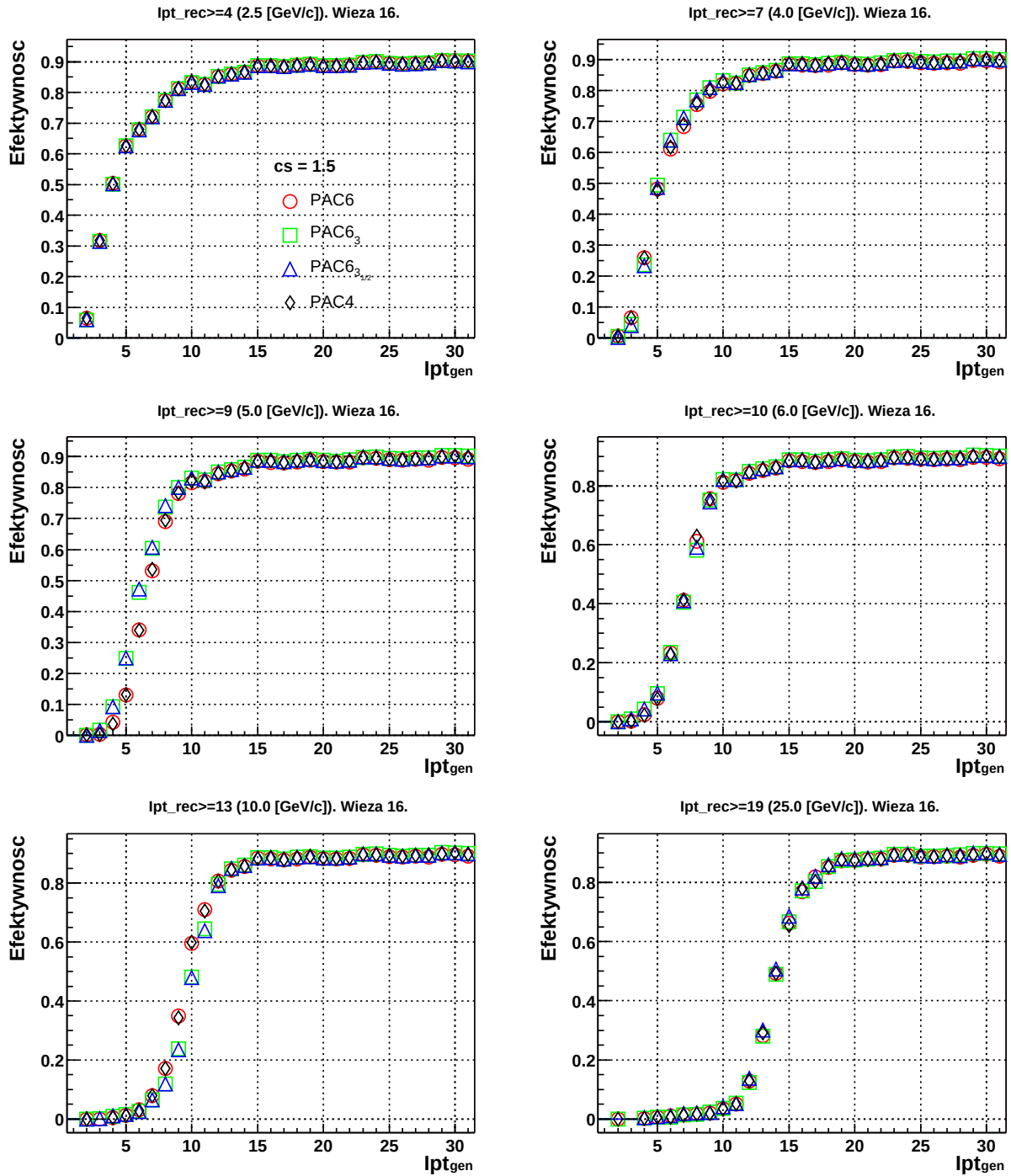
Rysunek 92: Porównanie efektywności trygera dla wieży 13 i wybranych cięć.



Rysunek 93: Porównanie efektywności trygera dla wieży 14 i wybranych cięć.



Rysunek 94: Porównanie efektywności trygera dla wieży 15 i wybranych cięć.



Rysunek 95: Porównanie efektywności trygiera dla wieży 16 i wybranych cięć.