

Dawki otrzymywane przez
pacjenta w efekcie stosowania
właściwych dla danej dziedziny
procedur radiologicznych.
Zasady optymalizacji.

dr inż. Krzysztof Wojciech Fornalski

krzysztof.fornalski@gmail.com

Ustawa

PRAWO ATOMOWE

z dnia 29 listopada 2000
tekst jednolity Dz. U.
z 2017 r., poz. 576

Wybrane przepisy z Ustawy

- art. 3 – definicje c.d.

- **narażenie – proces, w którym organizm ludzki podlega działaniu promieniowania jonizującego;**
- narażenie wyjątkowe – narażenie osoby uczestniczącej w usuwaniu skutków zdarzenia radiacyjnego lub w działaniach interwencyjnych, w czasie których może ona otrzymać dawkę przekraczającą wartość rocznej dawki granicznej dla pracowników;
- ochrona radiologiczna – zapobieganie narażeniu ludzi i skażeniu środowiska, a w przypadku braku możliwości zapobieżenia takim sytuacjom – ograniczenie ich skutków do poziomu tak niskiego, jak tylko jest to rozsądnie osiągalne, przy uwzględnieniu czynników ekonomicznych, społecznych i zdrowotnych;
- **ochrona radiologiczna pacjenta – zespół czynności i ograniczeń zmierzających do zminimalizowania narażenia pacjenta na promieniowanie jonizujące, które nie będzie nadmiernie utrudniało lub uniemożliwiało uzyskania pożądanych i uzasadnionych informacji diagnostycznych lub efektów leczniczych;**
- **ogranicznik dawki (limit użytkowy dawki) – ograniczenie przewidywanych dawek indywidualnych, które mogą pochodzić od określonego źródła promieniowania jonizującego, uwzględnione podczas planowania ochrony radiologicznej w celach związanych z optymalizacją;**

Wybrane przepisy z Ustawy

- **Art. 33a.** 1. Stosowanie promieniowania jonizującego w celach medycznych obejmuje ekspozycje:
 - 1) pacjentów, wynikającą z badań lekarskich i leczenia, w tym ze wstępnych i okresowych badań pracowników;
 - 2) osób poddawanych przesiewowym badaniom z zastosowaniem promieniowania jonizującego;
 - 3) zdrowych osób lub pacjentów uczestniczących w eksperymentach medycznych;
 - 4) osób poddawanych badaniom z zastosowaniem promieniowania jonizującego w celach medyczno-prawnych, kiedy podjęcie tych badań nie wynika ze wskazań zdrowotnych;
 - 5) osób, które poza obowiązkami zawodowymi, świadomie i z własnej woli udzielają pomocy pacjentom i opiekują się nimi.
- 2. Ekspozycje, o których mowa w ust. 1, wymagają **uzasadnienia**. Uzasadnienie jest oparte na przewadze oczekiwanych korzyści zdrowotnych dla pacjenta lub społeczeństwa nad uszczerbkiem zdrowotnym, który ekspozycja może spowodować

Wybrane przepisy z Ustawy

- 3. Warunkiem właściwego uzasadnienia jest zastosowanie radiologicznej procedury diagnostycznej lub leczniczej, której skuteczność w określonej sytuacji klinicznej została udowodniona lub powszechnie uznana. W procesie uzasadnienia ocenia się również korzyści i rodzaje ryzyka związane ze stosowaniem alternatywnych procedur, służących temu samemu celowi, prowadzących do mniejszej ekspozycji na promieniowanie jonizujące lub nienarażających na jego działanie.
- 4. **Skierowanie pacjenta na określone badanie z zastosowaniem promieniowania jonizującego wynika z uzasadnionego przekonania lekarza lub innej osoby upoważnionej do kierowania na takie badanie, że jego wynik dostarczy informacji, które przyczynią się do postawienia prawidłowego rozpoznania lub wykluczenia choroby, oceny jej przebiegu i postępów leczenia oraz, że korzyści z tego tytułu przewyższą możliwe ujemne następstwa dla zdrowia, które mogą być związane z narażeniem na promieniowanie jonizujące.**

Wybrane przepisy z Ustawy

- 5. Skierowanie, o którym mowa w ust. 4, może być wystawione po upewnieniu się, że inne alternatywne, nieinwazyjne i nienarażające na działanie promieniowania jonizującego metody, a także wcześniej wykonane badania z zastosowaniem promieniowania jonizującego nie mogą dostarczyć równoważnych informacji.
- 6. W szczególnych przypadkach, podlegających każdorazowo odrębnej ocenie, można wykonać badanie z zastosowaniem promieniowania jonizującego, jeżeli nie zostało ono uzasadnione w sposób, o którym mowa w ust. 3–5.
- 7. Dokonanie badania z zastosowaniem promieniowania jonizującego uzasadnionego w sposób, o którym mowa w ust. 6, odnotowuje się w dokumentacji chorego. Dotyczy to w szczególności ekspozycji w celach medyczno-prawnych.
- 8. W przypadku zaistnienia okoliczności wykluczających lub ograniczających zakres zastosowania procedury radio-logicznej u pacjenta, pomimo że jest ona ogólnie uzasadniona, o odstąpieniu od jej wykonania lub o zakresie jej zastosowania decyduje lekarz kierujący lub wykonujący badanie.
- 9. Dokonywanie ekspozycji na promieniowanie jonizujące w celach medycznych w wyniku procedury, która nie została uzasadniona w sposób określony w ust. 3–5, jest niedopuszczalne, z zastrzeżeniem ust. 6.

Dawka pochłonięta

- fizyczna definicja dawki

Dawka pochłonięta

- Jest to energia promieniowania
zdeponowana w jednostce masy
napromienionej substancji:

$$D = E / m$$

- Jednostka: **grej** [Gy] $\rightarrow 1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$

Wyznaczanie dawki
równoważnej i skutecznej na
podstawie dawki pochłoniętej

Dawka równoważna (na narząd)

- Dawka równoważna to dawka pochłonięta D przez narząd, uwzględniająca **efektywność biologiczną** różnych typów promieniowania:

$$H = w_R D \text{ [Sv]}$$

gdzie w_R to współczynnik wagowy biologicznej efektywności promieniowania

W_R
w zależności
od typu
promieniowania

Rodzaj i zakres energii promieniowania	W_R
Fotony gamma o dowolnej energii	1
Elektrony i miony o dowolnej energii	1
Neutrony o energiach:	
< 10 keV	5
10 – 100 keV	10
0,1 – 2 MeV	20
2 – 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protony o energii > 2 MeV (bez protonów odrzutu)	5
Cząstki α , ciężkie jony, fragmenty rozszczepienia	20

Dawka skuteczna (efektywna)

- Odnosi się do skutku biologicznego na całe ciało
- Radioczułość poszczególnych tkanek i narządów jest inna
- Dawka skuteczna jest równa dawce równoważnej mnożonej przez czynnik wagowy dla narządu:

$$E = \sum w_T H_T = \sum w_T \sum w_R D_T [\text{Sv}]$$

Obowiązujące
współczynniki w_T w
zależności od typu
narządu.

Uwaga: dla całego
ciała $w_T = 1$
→ dawka skuteczna
równa jest dawce
równoważnej

Narząd lub tkanka	w_T
Guczoły płciowe (gonady)	0,20
Czerwony szpik kostny	0,12
Jelito grube	0,12
Płuca	0,12
Żołądek	0,12
Pęcherz moczowy	0,05
Guczoły sutkowe	0,05
Wątroba	0,05
Przełyk	0,05
Tarczycyca	0,05
Skóra	0,01
Powierzchnia kości	0,01
Pozostałe	0,05
!!!!!! Całe ciało	1,00

Przykład obliczeń:

- Pacjent otrzymał dawkę równoważną na płuca równą 2 mSv
- W związku z tym dawka skuteczna (na całe ciało) pochodząca od tego narażenia wynosi:

$$E = w_T H = 0,12 * 2 \text{ mSv} = \mathbf{0,24 \text{ mSv}}$$

Inny przykład obliczeń:

- Człowiek wchłonał opary substancji alfa-promieniotwórczej, co przełożyło się na dawkę pochłoniętą **w** płucach równą $D = 5 \text{ mGy}$
- Z racji tego, iż jest to promieniowanie alfa, otrzymał on dawkę równoważną **na** płuca równą $H = w_R D = 20 * 5 \text{ mGy} = 100 \text{ mSv}$
- W związku z tym dawka skuteczna (na całe ciało) pochodząca od tego narażenia wynosi:
 $E = w_T H = 0,12 * 100 \text{ mSv} = \mathbf{12 \text{ mSv}}$

Podsumowanie

**DAWKA
POCHŁONIĘTA**

**CZYNNIK WAGOWY
PROMIENIOWANIA**
 w_R

**DAWKA
RÓWNOWAŻNA**

**CZYNNIK WAGOWY
TKANKI w_T**

**DAWKA
SKUTECZNA
(EFEKTYWNA)**

Wielkości dozymetryczne w rentgenodiagnostyce

KERMA

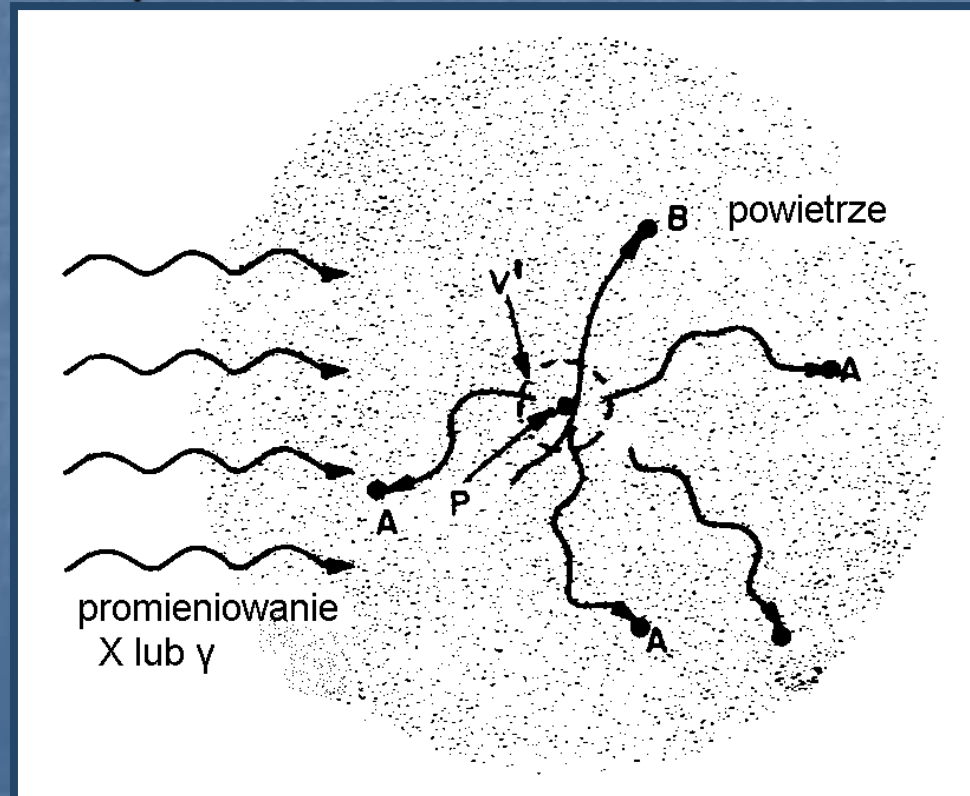
- KERMA = Kinetic Energy Released in Unit Mass:

$$K = dE_{\text{kin}} / dm \text{ [Gy]}$$

gdzie dE_{kin} to suma początkowych energii kinetycznych cząstek naładowanych wytworzonych w elemencie materii (o masie dm) przez promieniowanie jonizujące pośrednio (a więc np. fotony i neutrony). Najczęściej używamy pojęcia kermy w powietrzu.

KERMA

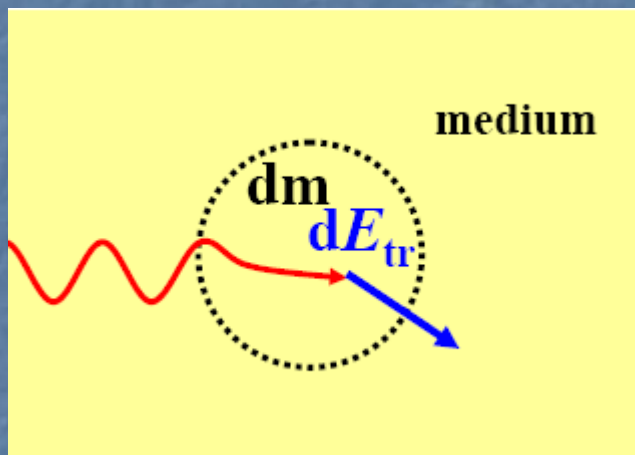
- Suma energii kinetycznej wszystkich cząstek naładowanych uwolnionych przez promieniowanie w masie dm danej substancji, czyli np. suma energii kinetycznych elektronów dla promieniowania fotonowego
- Jednostką kermy jest grej (analogicznie jak dawki pochłoniętej)



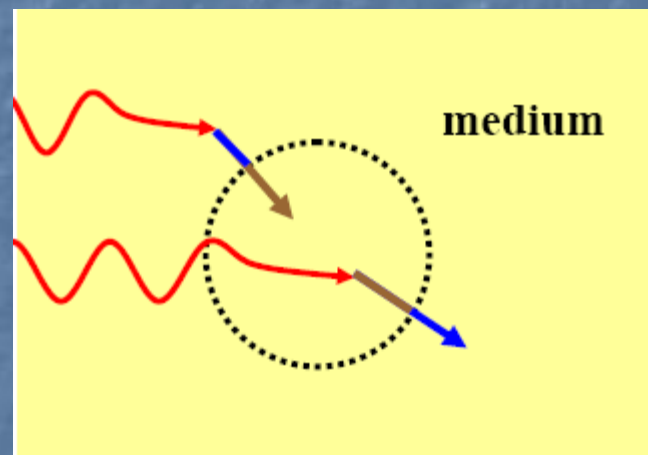
KERMA

a

DAWKĄ POCHŁONIĘTĄ



Do kermy wliczamy całkowitą energię cząstek naładowanych wygenerowanych w masie dm (oznaczoną niebieską strzałką)



Do dawki pochłoniętej wliczamy energię cząstek naładowanych pozostawioną w masie dm (oznaczone brązowym kolorem)

Dawka wejściowa (ESD)

- Dawka wejściowa - kerma w powietrzu w punkcie przecięcia osi wiązki z powierzchnią ciała pacjenta

$$ESD = K \cdot B \cdot \left(\frac{\mu}{\rho} \right) [Gy]$$

gdzie

K - kerma w powietrzu mierzona w osi wiązki promieniowania na powierzchni skóry pacjenta,

B – czynnik rozpraszania promieniowania przez pacjenta,

$\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{\text{skóra}}^{\text{powietrze}}$ masowy współczynnik pochłaniania dla skóry względem powietrza.

Wejściowa dawka powierzchniowa

- Wejściowa dawka powierzchniowa - kerma w powietrzu mierzona na powierzchni skóry pacjenta w miejscu wejścia wiązki promieniowania z uwzględnieniem promieniowania rozproszonego

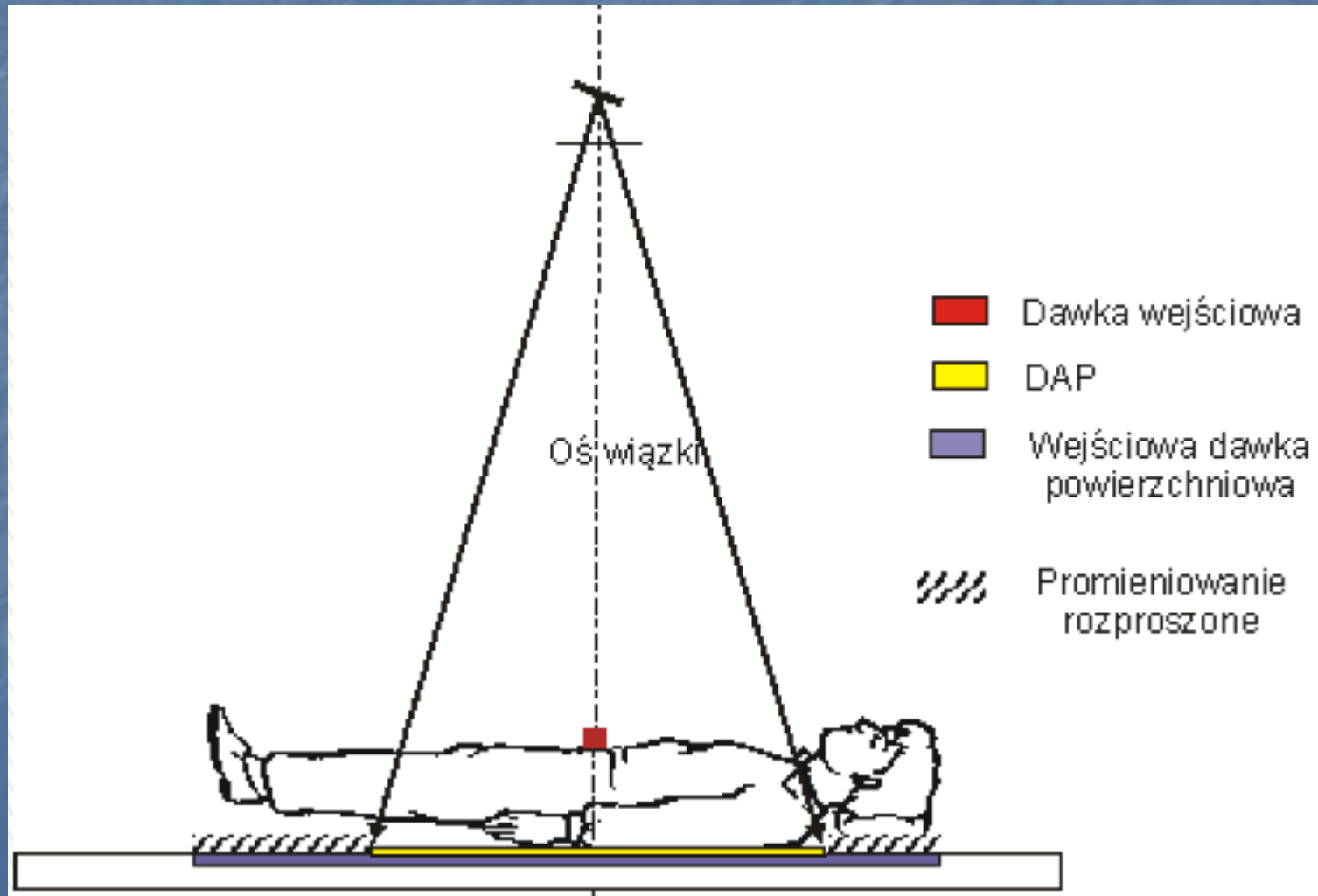
$$D_{wejciowa} = K_{wejciowa} \cdot B \quad [Gy]$$

DAP (*Dose Area Product*)

- DAP = iloczyn kerry w powietrzu i pola powierzchni wiązki promieniowania rentgenowskiego prostopadłego do osi wiązki [$\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$]
- Obliczenie dawki wejściowej (ESD) na podstawie DAP jest trudne, stosuje się odpowiednie programy. Można przyjąć empiryczne przybliżenie:

$$\text{ESD [mGy]} \approx 0,02 \cdot \text{DAP [cGy}\cdot\text{cm}^2]$$

Parametry ekspozycji dla pacjenta - podsumowanie



Przykłady

Radiologia i mammografia dla dorosłego człowieka o wzroście 170 cm i ciężarze 70 kg

Lp.	Rodzaj badania	DAP ⁽¹⁾ [cGy x cm ²]	Dawka wejściowa ⁽²⁾ [mGy]	Wejściowa dawka powierzchniowa ⁽³⁾ [mGy]
1	czaszka AP/PA	110	3,7	5,0
2	czaszka LAT	100	2,3	3,0
3	klatka piersiowa PA	20	0,21	0,3
4	klatka piersiowa LAT	100	1,1	1,5
5	kręgosłup piersiowy AP	220	5,2	7,0
6	kręgosłup piersiowy LAT	320	9,0	12
7	kręgosłup lędźwiowy AP	320	7,4	10
8	kręgosłup lędźwiowy LAT	800	22	30
9	miednica AP	500	7,0	10
10	jama brzuszna	550	7,0	10
11	zęby – zdjęcie wewnątrzustne	–	4,0 ⁽⁴⁾	5

(1) Iloczyn kermu w powietrzu i pola powierzchni wiązki promieniowania rentgenowskiego prostopadłego do osi wiązki.

(2) Kerma w powietrzu w punkcie przecięcia osi wiązki z powierzchnią ciała pacjenta.

(3) Kerma w powietrzu w punkcie przecięcia osi wiązki z powierzchnią ciała pacjenta z uwzględnieniem promieniowania rozproszonego.

(4) Kerma w powietrzu mierzona na końcu tubusa dla standardowego zdjęcia zęba trzonowego szczęki.

(5) Wartości wejściowej dawki powierzchniowej odnoszą się do 5 cm ściśnięcia piersi dla standardowego pacjenta przy zdjęciu z wykorzystaniem kratki przeciwrzproszeniowej.

W tomografii komputerowej

Iloczyn dawka – długość DLP w Tomografii Komputerowej

$$DLP = \int_L D(z) dz \quad [Gy \cdot m]$$

gdzie:

$D(z)$ – rozkład dawki pochłoniętej wzdłuż osi obrotu skanera CT (osi z) dla jednego pełnego obrotu (360°).

Tomograficzny indeks dawki, $CTDI_{100}$:

$$CTDI_{100} = \frac{1}{N \cdot s} \int_{-50mm}^{+50mm} D(z) dz \quad [Gy]$$

gdzie:

$D(z)$ – rozkład dawki pochłoniętej wzdłuż osi obrotu skanera CT (osi z) dla jednego pełnego obrotu (360°), s – nominalna szerokość warstwy, N – liczba warstw przypadająca na jeden obrót

Przykładowe dawki otrzymywane w medycynie

Dawka skuteczna (efektywna) dla konwencjonalnych badań RTG

otrzymywana przez przeciętnego dorosłego pacjenta (wg Instytutu Medycyny Pracy w Łodzi)

Lp.	Rodzaj badania	Dawka skuteczna (mSv)
1	Zdjęcie wewnątrzustne (wg Radiation Protection 136)	0,008
2	Zdjęcie pantomograficzne (wg Radiation Protection 136)	0,03
3	Badanie głowy	0,03
4	Zdjęcie klatki piersiowej (duży format, PA)	0,11
5	Zdjęcie miednicy	0,50
6	Zdjęcie jamy brzusznej	0,80
7	Zdjęcie małoobrazkowe klatki piersiowej	1,00
8	Zdjęcie kręgosłupa piersiowego	3,00
9	Zdjęcie kręgosłupa lędźwiowo–krzyżowego	
10	Urografia	3,50
11	Badanie żołądka i przewodu pokarmowego	5,60
12	Wlew doodbytniczy	8,00

Rozporządzenie Ministra Zdrowia
z dnia 18 lutego 2011 (z późn.
zm.) *w sprawie warunków
bezpiecznego stosowania
promieniowania jonizującego dla
wszystkich rodzajów ekspozycji
medycznej* (t. jedn. Dz. U. z 2017
r., poz. 884)

Załączniki do rozporządzenia:

- *Wymagania dotyczące opisu i przeglądu obrazów rejestrowanych w postaci cyfrowej*
- ***Poziomy referencyjne dla badań i zabiegów RTG***
- *Wymagania dotyczące systemu zarządzania jakością w radioterapii, medycynie nuklearnej, rentgenodiagnostyce i radiologii zabiegowej*
- *Zakres oraz dopuszczalne odchylenia badanych fizycznych parametrów i częstość wykonywania testów eksploatacyjnych*
- *Ramowy program szkolenia w dziedzinie ochrony radiologicznej pacjenta*

Poziomy referencyjne

- Z ustawy Prawo atomowe: **poziomy referencyjne – dawki promieniowania jonizującego na powierzchnię skóry w badaniach rentgenodiagnostycznych** lub **poziomy aktywności** – w przypadku podawania pacjentom produktów radiofarmaceutycznych, **dotyczące badań typowych pacjentów, dla poszczególnych kategorii urządzeń radiologicznych; poziomy referencyjne nie mogą być przekraczane w przypadku powszechnie stosowanych medycznych procedur radiologicznych, jeżeli stosuje się właściwe sposoby postępowania i urządzenia techniczne; poziomy referencyjne mogą być przekraczane w przypadku istnienia istotnych wskazań klinicznych;**

Poziomy referencyjne

Lp.	Rodzaj badania	Dawka ¹⁾ (mGy)
1	Radiografia klatki piersiowej – projekcja AP – projekcja LAT	0,3 1,5
2	Radiografia czaszki – projekcja AP/PA – projekcja LAT	5 3
3	Radiografia kręgosłupa lędźwiowego – projekcja AP/PA – projekcja LAT – projekcja LAT stawu lędźwiowo–krzyżowego	10 30 40
4	Radiografia miednicy – projekcja AP	10
5	Radiografia układu moczowego – projekcja AP zwykle zdjęcie lub przed podaniem kontrastu – po podaniu kontrastu	10 10
6	Radiografia zębów	5
7	Mammografia – projekcja MLO – projekcja CC	10 10
¹⁾ (wejściowa dawka powierzchniowa) odnosząca się do standardowego pacjenta o wzroście 1,70 m i wadze 70 kg, a przy mammografii do 5 cm ściśnięcia piersi dla standardowego pacjenta przy zdjęciu z wykorzystaniem kratki p.rozproszeniowej		

Poziomy referencyjne w pediatrii

Lp.	Rodzaj badania ¹⁾	Dawka ²⁾ (mGy)
1	Radiografia klatki piersiowej (poza noworodkami) – projekcja PA/AP – projekcja LAT	0,1 0,2
2	Radiografia klatki piersiowej noworodków – projekcja AP	0,08
3	Radiografia czaszki – projekcja PA/AP – projekcja LAT	1,5 1,0
4	Radiografia miednicy – niemowlęta – starsze dzieci	0,2 0,9
5	Radiografia brzucha z użyciem wiązki poziomej lub pionowej	1,0
¹⁾ Wartości poziomów referencyjnych dla pozostałych badań są obecnie nieokreślone.		
²⁾ Odnosząca się do standardowego pacjenta w wieku 5 lat (z wyłączeniem badań noworodków i niemowląt)		

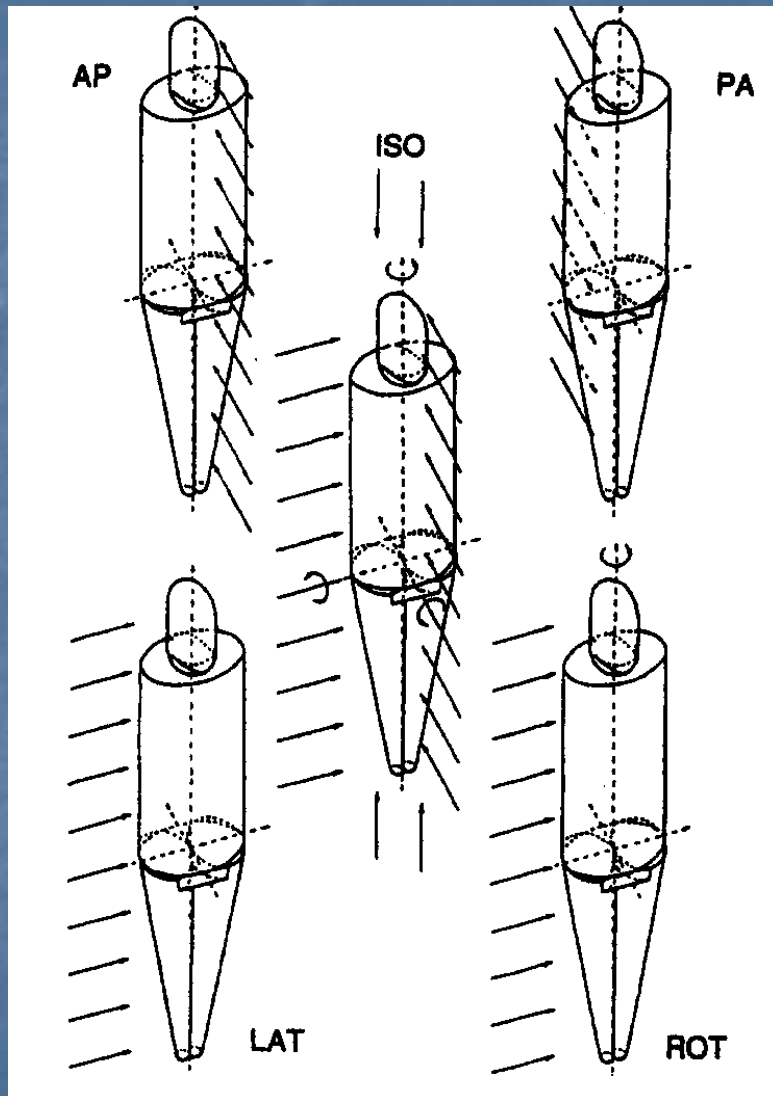
Wyniki rzeczywistych pomiarów

Porównanie dawek powierzchniowych przy różnych badaniach diagnostycznych zarejestrowanych podczas pomiarów przez OHR – Łódź i Zduńska Wola dla 160 aparatów RTG (1999r.)

Lp.	Rodzaj badania RTG	Przedział wartości dawek (mSv)	Mediana (mSv)	Dawka referencyjna (mSv)
1	Klatka piersiowa PA	0,03–5,48	0,3	0,3
2	Kręgosłup piersiowy AP	0,27–16,4	1,0	7,0
3	Kręgosłup piersiowy LAT	0,31–63,8	1,5	20,0
4	Kręgosłup lędźwiowy AP	0,22–18,7	5,0	10,0
5	Kręgosłup lędźwiowy LAT	0,44–22,8	3,0	30,0
6	Czaszka AP/PA	0,27–10,0	0,5	5,0

KIERUNKI NAPROMIENIENIA

(dygresja)



AP – napromienienie od przodu, prostopadłe do pionowej osi ciała

PA – napromienienie od tyłu

LAT – napromienienie z boku

ROT – ciało obraca się w polu skierowanym prostopadłe do osi pionowej

ISO – pole jest izotropowe

Co ma wpływ na wartość dawki otrzymanej przez pacjenta?

- Wielkość naświetlanego pola
- DAP [$\text{mGy} \times \text{cm}^2$]
- **Czas naświetlania**
- Kolimacja wiązki, kształt wiązki
- Osłony na narządy i części ciała
- Odległość ogniska lampy od powierzchni skóry
- Filtracja promieniowania
- Wyszukolenie pracownika (precyzja pomiaru)
- **Użyty sprzęt (urządzenie RTG)**

Zasada optymalizacji (ALARA)

Podstawowe zasady ochrony radiologicznej

- **ALARA** (*As Low As Reasonable Achievable*) – tak nisko jak to jest rozsądnie osiągalne
- ALARP (*As Low As Reasonable Possible*) – tak nisko jak to jest rozsądnie możliwe
- = Zasada Optymalizacji (w polskim prawie)
- Zasada Pesymizacji
 - = zakładanie najbardziej pesymistycznych warunków narażenia na promieniowanie

ALARA = zasada optymalizacji

- Innymi słowy **międzynarodowa zasada ALARA w polskim prawie nosi nazwę zasady optymalizacji**
- Zasada ta nakazuje zmniejszać narażenie na promieniowanie do poziomu tak niskiego, jak to jest rozsądnie możliwe, przy uwzględnieniu innych czynników, takie jak społeczne czy finansowe

Wybrane przykłady implementacji zasady optymalizacji w polskim prawie

Ustawa Prawo atomowe

- art. 3 – definicje

- ochrona radiologiczna – zapobieganie narażeniu ludzi i skażeniu środowiska, a w przypadku braku możliwości zapobieżenia takim sytuacjom – ograniczenie ich skutków do poziomu tak niskiego, jak tylko jest to rozsądnie osiągalne, przy uwzględnieniu czynników ekonomicznych, społecznych i zdrowotnych;
- ochrona radiologiczna pacjenta – **zespół czynności i ograniczeń zmierzających do zminimalizowania narażenia pacjenta na promieniowanie jonizujące**, które nie będzie nadmiernie utrudniało lub uniemożliwiało uzyskania pożądanych i uzasadnionych informacji diagnostycznych lub efektów leczniczych;
- ogranicznik dawki (limit użytkowy dawki) – ograniczenie przewidywanych dawek indywidualnych, które mogą pochodzić od określonego źródła promieniowania jonizującego, uwzględnione podczas planowania ochrony radiologicznej **w celach związanych z optymalizacją;**