



Hfdst 12: Afscherming van uitwendige straling

Gammas

CD Cursus Stralingsveiligheid 2023–2024

mariet.hofstee@maastrichtuniversity.nl

M.A. Hofstee

Afscherming

indeling



afscherming van elektromagnetische straling

- γ -straling
- röntgenstraling

oefeningen uit vraagstukkenboek 1-8

Fotonen (elektromagnetische straling)



- ▶ Rayleigh verstrooiing bij zeer lage energien

- $Z E^{-2}$

- ▶ Foto-elektrisch effect

- $(E_f - BE)^{-3} Z^4$

- ▶ Compton effect

$$E'_f = \frac{E_f}{1 + \frac{E_f}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}$$

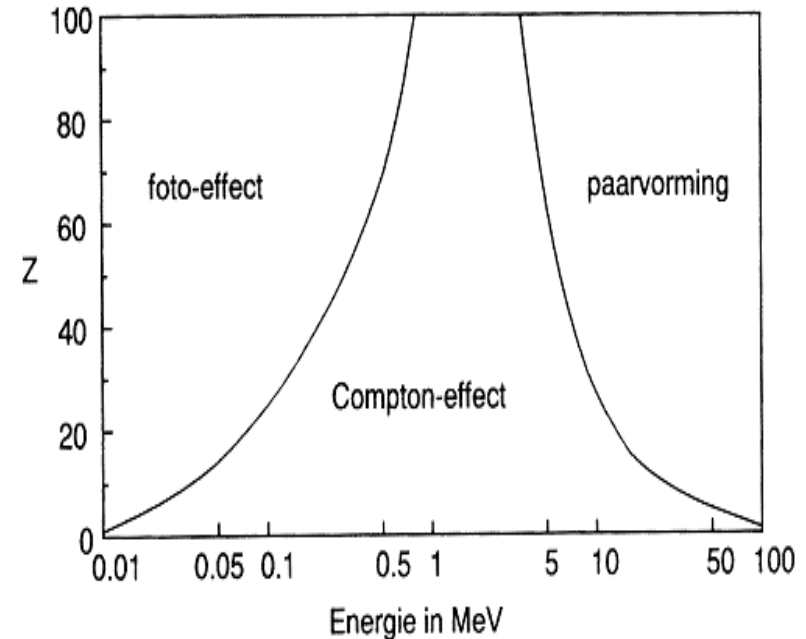
- ▶ Paarvorming (bij KERN)

- $E_{e^+e^-} = E_f - 1,022 \text{ MeV}$

- Z

- ▶ Een gat in een diepe schil wordt opgevuld:

- Auger elektronen
 - Secundaire Röntgens



Fotonen (elektromagnetische straling)



- ▶ Rayleigh verstrooiing bij zeer lage energien

- $Z E^{-2}$

- ▶ Foto-elektrisch effect

- $(E_f - BE)^{-3} Z^4$

- ▶ Compton effect

$$E'_f = \frac{E_f}{1 + \frac{E_f}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}$$

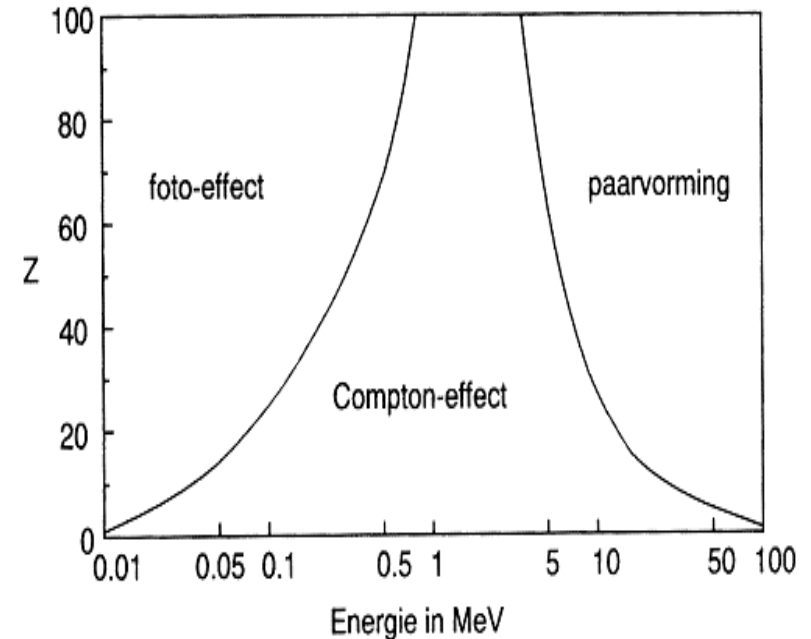
- ▶ Paarvorming (bij KERN)

- $E_{e^+e^-} = E_f - 1,022 \text{ MeV}$

- Z

- ▶ Een gat in een diepe schil wordt opgevuld:

- Auger elektronen
 - Secundaire Röntgens



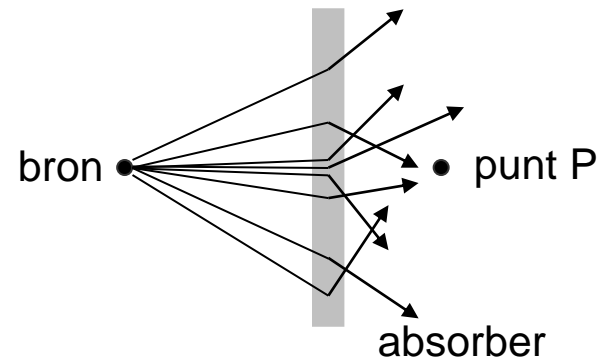
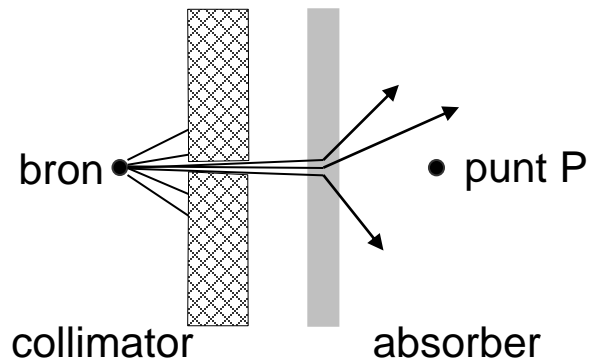
Afscherming

γ -straling

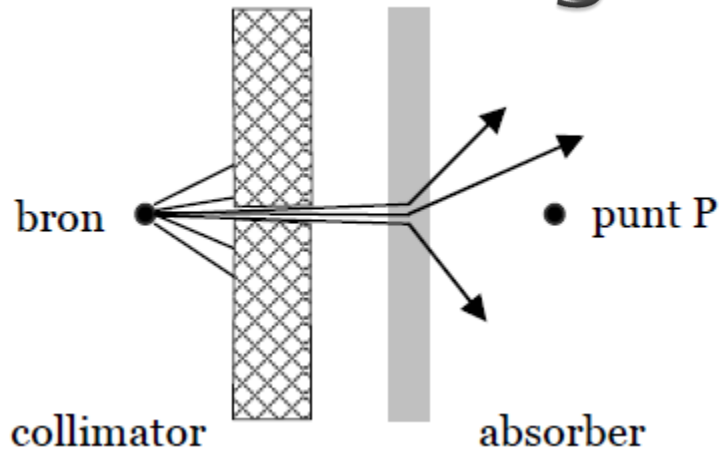
bundelgeometrie

smalle bundelgeomtrie → exponentiële verzwakking

brede bundelgeometrie → er komt **verstrooide straling** bij
met name door **Compton-effect**



Afscherming fotonen



- ▶ Smalle bundel-geometrie monoenergetisch
- ▶ $N(d) = N(0) e^{-\mu d}$ (smalle bundel geometrie)
 - halveringsdikte $\mu d_{1/2} = \ln(2) = 0,69315$

Afscherming Gammas (smalle bundel geometrie)



2 Een radioactieve bron bevat een nuclide dat slechts één γ -overgang bezit. Met een γ -detector in een smalle bundel van deze γ -straling meet men een netto-teltempo van 4500 telpulsen per minuut (tpm). Als een plaatje lood van 3,0 mm dikte in de bundel wordt geplaatst, bedraagt het netto-teltempo nog maar 1200 tpm.

a bereken de halveringsdikte van lood voor de betreffende γ -straling

$$\blacktriangleright T = N(d)/N(0) = e^{-\mu d} = \exp(-\mu d) = 2^{-(d/d_{1/2})}$$

$$\blacktriangleright T = 1200/4500 = 0.27 = 2^{-(3 \text{ mm}/d_{1/2})}$$

$$\ln 0.27 = -(3 \text{ mm}/d_{1/2}) \ln 2 \quad \text{dus}$$

$$d_{1/2} = -3 \ln 2 / \ln 0.27 = 1.6 \text{ mm}$$

$$\text{Afschatting } 1200/4500 \geq 1/4 \text{ dus } d \leq 2 d_{1/2}$$

Afscherming Gammas (smalle bundel geometrie)



3 Een smalle bundel mono-energetische γ -straling valt op een absorber bestaande uit water, lood of een combinatie van beide materialen. De halveringsdikte van water is $d_{1/2, \text{water}} = 5,5$ cm; van lood is deze $d_{1/2, \text{lood}} = 0,08$ cm. Bereken de transmissie van de doorgelaten bundel als de absorber bestaat uit

- a 1,0 cm water
- b 0,2 cm lood
- c twee lagen lood van elk 0,1 cm met daartussen 1 cm water

$$\blacktriangleright T = N(d)/N(0) = e^{-\mu d} = \exp(-\mu d) = 2^{-(d/d_{1/2})}$$

a) $T = 0.88$

b) $T = 0.18$

c) $T = (0.88)(0.18) = 0.16$

Oefening uit hoofdstuk 11

- 4 De effectieve dikte van de gaslaag in een met argon gevulde proportionele telbuis is 35 mm. De soortelijke massa van argon is $1,66 \text{ mg cm}^{-3}$. De massaverzwakkingscoëfficiënt van argon voor de K_{α} -lijn van koper (8 keV) en de K_{α} -lijn van molybdeen (13 keV) is $112 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ respectievelijk $27,5 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$.
- bereken het detectorrendement bij 8 keV
 - bereken het detectorrendement bij 13 keV

de massieke laagdikte is $d\rho = 3,5 \text{ cm} \times 1,66 \times 10^{-3} \text{ g cm}^{-3} = 0,0058 \text{ g cm}^{-2}$

- | | | |
|---|------------------------|---|
| a | transmissie bij 8 keV | $T = e^{-(\mu/\rho)(d\rho)} = e^{-112 \times 0,0058} = 0,52$ |
| | detectorefficiëntie | $f_{\text{det}} = 1 - T = 1 - 0,52 = 0,48$ |
| b | transmissie bij 13 keV | $T = e^{-(\mu/\rho)(d\rho)} = e^{-27,5 \times 0,0058} = 0,85$ |
| | detectorefficiëntie | $f_{\text{det}} = 1 - T = 1 - 0,85 = 0,15$ |

Afscherming Gammas (smalle bundel geometrie)



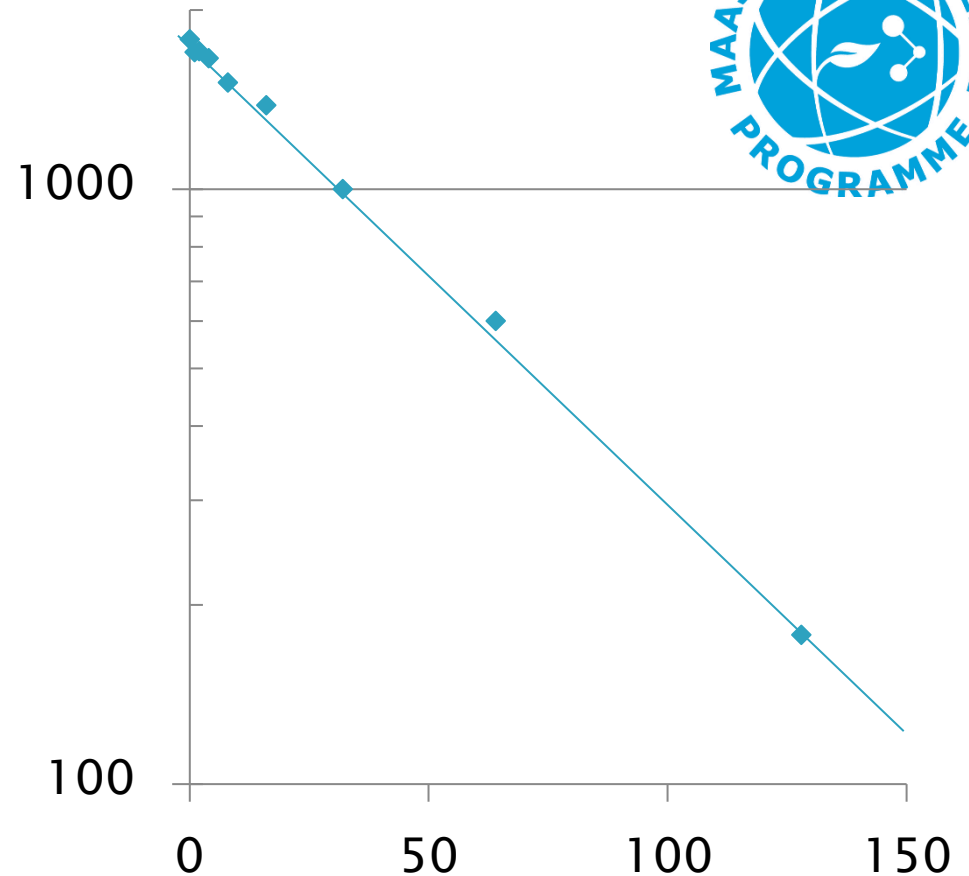
- 4 Ter bepaling van de massaverzwakkingscoëfficiënt μ/ρ van aluminium voor γ -straling wordt een serie metingen verricht met een bron die γ -straling uitzendt met een energie van 800 keV. De metingen vinden plaats in de smalle bundelgeometrie, met behulp van een dikke loodcollimator en een serie vlakke absorbers van aluminium met diktes variërend van 1 tot 128 mm. Als detector wordt een GM-telbuis gebruikt. Het aantal telpulsen per minuut (tpm) als functie van de absorberdikte (in mm) bedraagt:

| | | | | | | | | | |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|
| <i>absorberdikte</i> | 0 | 1 | 2 | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 | 128 |
| <i>teltempo</i> | 1805 | 1720 | 1725 | 1680 | 1530 | 1404 | 1020 | 620 | 198 |

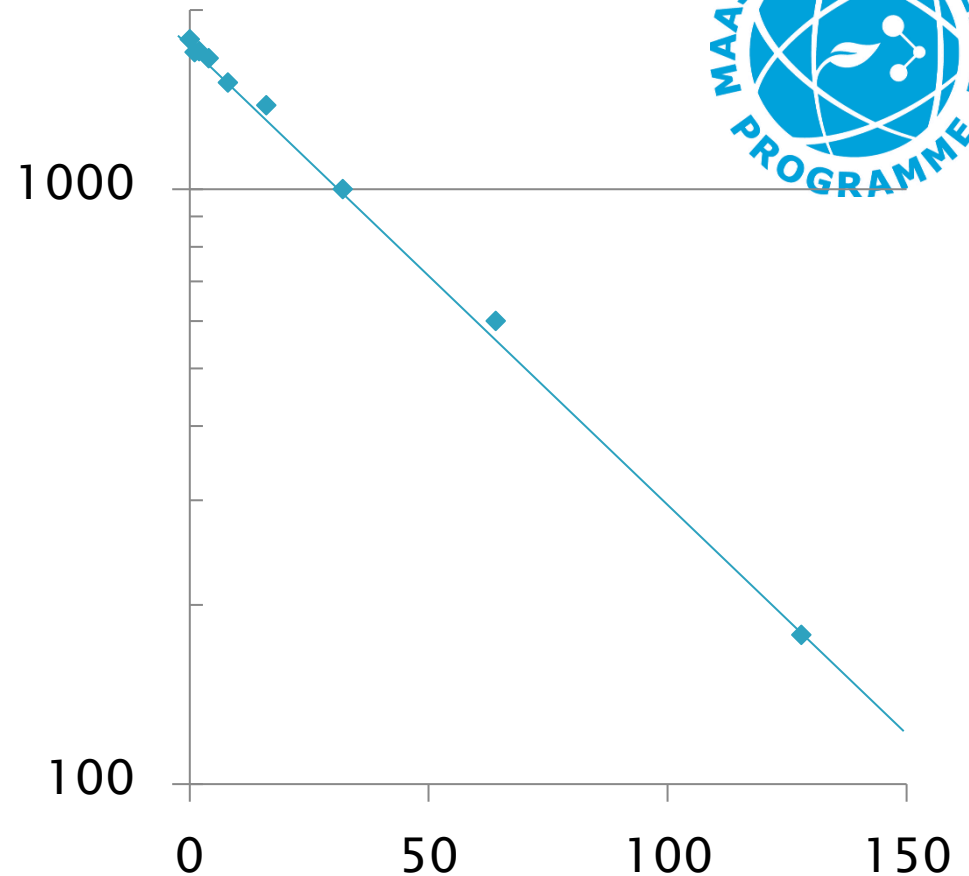
Het nuleffect, gemeten met een dik loodblok als absorber, levert 20 tpm. De soortelijke massa van aluminium is $\rho_{\text{Al}} = 2,7 \text{ g cm}^{-3}$.

- zet de transmissie uit tegen de dikte op enkel-logaritmisch papier
- bepaal de halveringsdikte $d_{1/2}$ van aluminium voor deze γ -energie
- bepaal de massaverzwakkingscoëfficiënt μ/ρ van aluminium voor deze γ -energie

| Dikte (mm) | Teltempo | netto |
|------------|----------|-------|
| 0 | 1805 | 1785 |
| 1 | 1720 | 1700 |
| 2 | 1725 | 1705 |
| 4 | 1680 | 1660 |
| 8 | 1530 | 1510 |
| 16 | 1404 | 1384 |
| 32 | 1020 | 1000 |
| 64 | 620 | 600 |
| 128 | 198 | 178 |



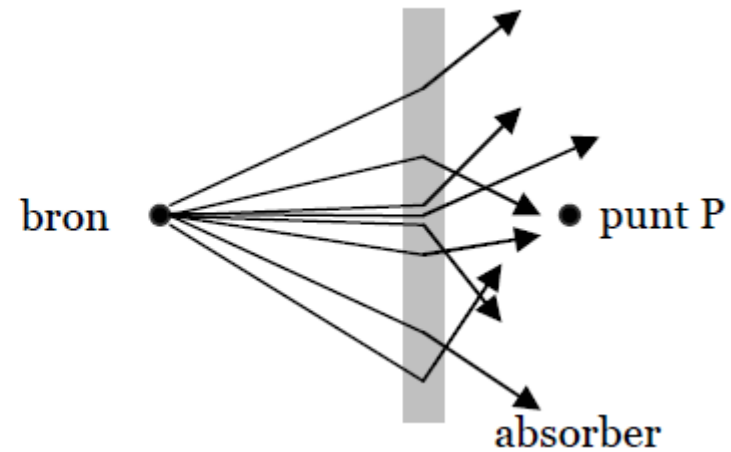
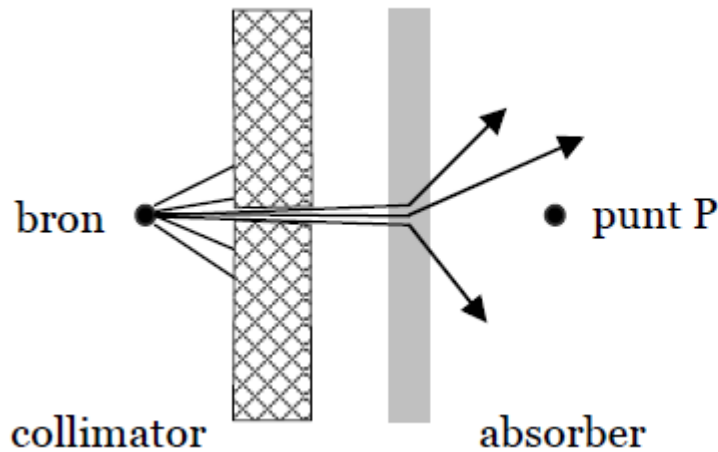
| Dikte (mm) | Teltempo | netto |
|------------|----------|-------|
| 0 | 1805 | 1785 |
| 1 | 1720 | 1700 |
| 2 | 1725 | 1705 |
| 4 | 1680 | 1660 |
| 8 | 1530 | 1510 |
| 16 | 1404 | 1384 |
| 32 | 1020 | 1000 |
| 64 | 620 | 600 |
| 128 | 198 | 178 |



$$T(128 \text{ mm}) = 0.1 \Rightarrow \exp(-\mu 12.8) = 0.1, \mu = -\ln 0.1 / 12.8 = 0.18$$

$$d_{1/2} = \ln 2 / \mu = 3.85 \text{ cm en } \mu/\rho = 0.18 / 2.7 = 0.0666 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

Smalle vs. brede bundel-geometrie



- ▶ **Smalle bundel-geometrie**
 - $N(d) = N(0) e^{-\mu d}$ (smalle bundel geometrie)
 - halveringsdikte $\mu d_{1/2} = \ln(2) = 0,69315$
- ▶ **Brede bundelgeometrie ook Dosisopbouwfactor (B)**
 - $N(d) = B(E,d) N(0) e^{-\mu d}$
 - (Terug)verstrooing

Afscherming

γ -straling, dosisopbouw



met dosisopbouw is de intensiteit achter een afscherming

$$T(d) = B e^{-\mu d}$$

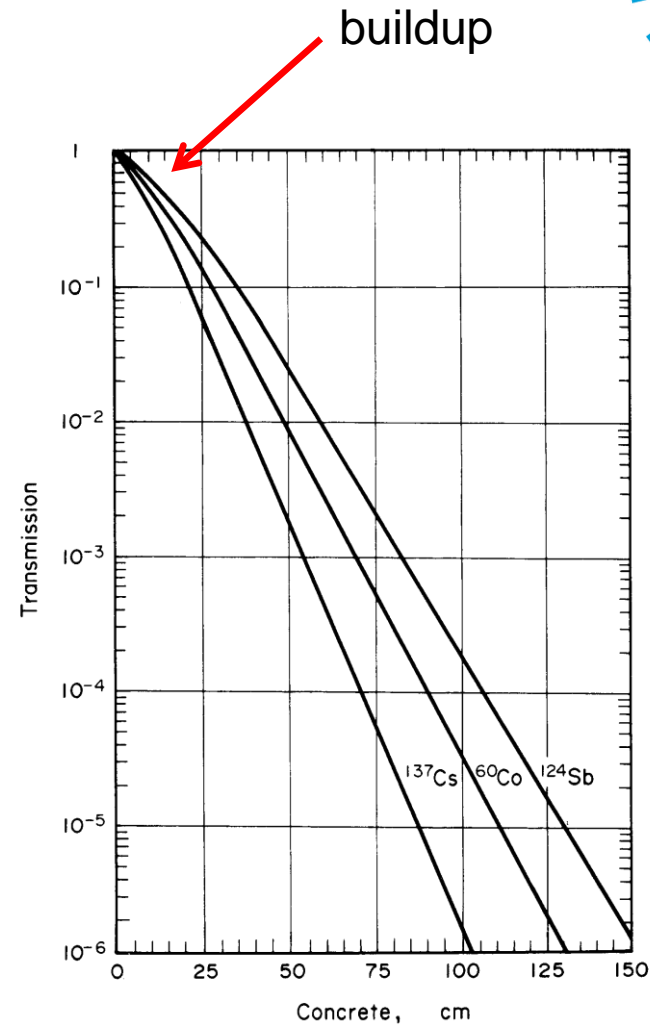
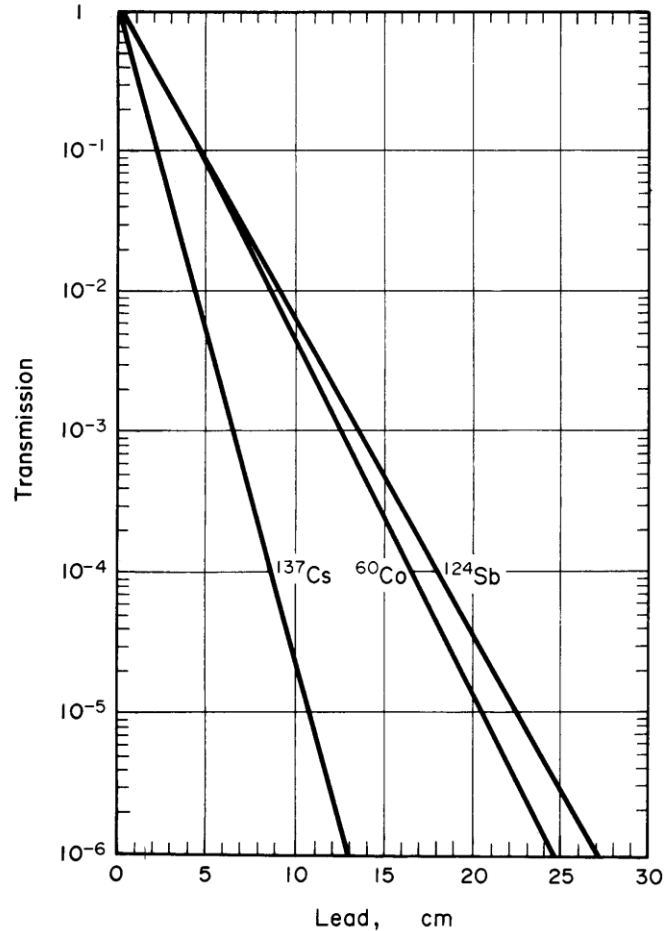
B = dosisopbouwfactor, hangt af van E_γ en μd

d = dikte van afscherming

| materiaal | E_γ (MeV) | 1 | 4 | 10 | 20 |
|-----------|---------------------|---|----|----|-----|
| water | 0,5 | 3 | 14 | 78 | 334 |
| | 2,0 | 2 | 5 | 12 | 28 |
| beton | 0,5 | 2 | 8 | 29 | 98 |
| | 2,0 | 2 | 4 | 11 | 26 |
| lood | 0,5 | 1 | 2 | 2 | 3 |
| | 2,0 | 1 | 3 | 5 | 9 |

Afscherming

γ -straling, dosisopbouwfactor



$$T = N(d) / N(0) = B e^{-\mu d}$$

Afscherming Gammas (brede bundel geometrie)



- 5 Men wil de intensiteit van de γ -straling van ^{137}Cs met behulp van beton respectievelijk lood reduceren met een factor 1000. De γ -energie bedraagt $E_\gamma = 0,66 \text{ MeV}$. De massaverzwakkingscoëfficiënten van beton en lood voor deze γ -energie zijn $(\mu/\rho)_{\text{beton}} = 0,0772 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ respectievelijk $(\mu/\rho)_{\text{lood}} = 0,100 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$. Verder is $\rho_{\text{beton}} = 2,35 \text{ g cm}^{-3}$ en $\rho_{\text{lood}} = 11,35 \text{ g cm}^{-3}$.
- bereken de benodigde diktes met behulp van transmissiefiguren
aanwijzing: maak gebruik van de transmissies in appendix A10 en A11
 - bereken de benodigde diktes met behulp van de massaverzwakkingscoëfficiënten en de buildup-factoren
aanwijzing: bepaal eerst de noodzakelijke waarde van μd , en zoek dan de daarbij horende build-up-factor in appendix A12; herhaal zo nodig de procedure

Afscherming Gammas (brede bundel geometrie)



5

Men wil de intensiteit van de γ -straling van ^{137}Cs met behulp van beton respectievelijk lood reduceren met een factor 1000. De γ -energie bedraagt $E_\gamma = 0,66 \text{ MeV}$. De massaverzwakkingscoëfficiënten van beton en lood voor deze γ -energie zijn $(\mu/\rho)_{\text{beton}} = 0,0772 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ respectievelijk $(\mu/\rho)_{\text{lood}} = 0,100 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$. Verder is $\rho_{\text{beton}} = 2,35 \text{ g cm}^{-3}$ en $\rho_{\text{lood}} = 11,35 \text{ g cm}^{-3}$.

- a bereken de benodigde diktes met behulp van transmissiefiguren
aanwijzing: maak gebruik van de transmissies in appendix A10 en A11
- b bereken de benodigde diktes met behulp van de massaverzwakkingscoëfficiënten en de buildup-factoren
aanwijzing: bepaal eerst de noodzakelijke waarde van μd , en zoek dan de daarbij horende build-up-factor in appendix A12; herhaal zo nodig de procedure

a) Aflezen uit de grafiek geeft $d = 55 \text{ cm}$

Afscherming Gammas (brede bundel geometrie)



5

Men wil de intensiteit van de γ -straling van ^{137}Cs met behulp van beton respectievelijk lood reduceren met een factor 1000. De γ -energie bedraagt $E_\gamma = 0,66 \text{ MeV}$. De massaverzwakkingscoëfficiënten van beton en lood voor deze γ -energie zijn $(\mu/\rho)_{\text{beton}} = 0,0772 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ respectievelijk $(\mu/\rho)_{\text{lood}} = 0,100 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$. Verder is $\rho_{\text{beton}} = 2,35 \text{ g cm}^{-3}$ en $\rho_{\text{lood}} = 11,35 \text{ g cm}^{-3}$.

a bereken de benodigde diktes met behulp van transmissiefiguren

aanwijzing: maak gebruik van de transmissies in appendix A10 en A11

b bereken de benodigde diktes met behulp van de massaverzwakkingscoëfficiënten en de buildup-factoren

aanwijzing: bepaal eerst de noodzakelijke waarde van μd , en zoek dan de daarbij horende build-up-factor in appendix A12; herhaal zo nodig de procedure

a) Aflezen uit de grafiek geeft $d = 55 \text{ cm}$

Met behulp van bovenstaande gegevens kun je dan B uitrekenen: $0.001 = B \exp[-(0.0772 * 55 * 2.35)]$

Afscherming Gammas (brede bundel geometrie)



5

Men wil de intensiteit van de γ -straling van ^{137}Cs met behulp van beton respectievelijk lood reduceren met een factor 1000. De γ -energie bedraagt $E_\gamma = 0,66 \text{ MeV}$. De massaverzwakkingscoëfficiënten van beton en lood voor deze γ -energie zijn $(\mu/\rho)_{\text{beton}} = 0,0772 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ respectievelijk $(\mu/\rho)_{\text{lood}} = 0,100 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$. Verder is $\rho_{\text{beton}} = 2,35 \text{ g cm}^{-3}$ en $\rho_{\text{lood}} = 11,35 \text{ g cm}^{-3}$.

a bereken de benodigde diktes met behulp van transmissiefiguren

aanwijzing: maak gebruik van de transmissies in appendix A10 en A11

b bereken de benodigde diktes met behulp van de massaverzwakkingscoëfficiënten en de buildup-factoren

aanwijzing: bepaal eerst de noodzakelijke waarde van μd , en zoek dan de daarbij horende build-up-factor in appendix A12; herhaal zo nodig de procedure

a) Aflezen uit de grafiek geeft $d = 55 \text{ cm}$

Met behulp van bovenstaande gegevens kun je dan B uitrekenen: $0.001 = B \exp[-(0.0772 * 55 * 2.35)]$

$$B = 0.001 / \exp[-(0.0772 * 55 * 2.35)] = 21.5$$



- ▶ Je moet een startwaarde kiezen om iteratief het goede antwoord te vinden. Een mogelijkheid is om de waarde uit onderdeel a) als startwaarde te gebruiken. Een andere manier is om eerst te kijken hoeveel dikte nodig is zonder rekening te houden met de Dosisopbouw (dus $B=1$), maar je verwacht dan wel (veel) te laag uit te komen.

$T = N(d) / N(0) = B e^{-\mu d}$, dus heb je $T=0.001 = B e^{-\mu d}$ en dan is $\ln(0.001/B) = -\mu d$
 Voor eerste gok $B = 1$ krijg je als uitkomst dat $\mu d = 6.91$. Bij deze waarde van μd hoort volgens de Tabel een waarde voor B van ongeveer 13.5. Gebruik vervolgens deze nieuwe waarde van B om een nieuwe schatting voor μd te krijgen. Als de waarde van μd bijna niet meer veranderd bij de volgende stap (van 10.0 naar 10.1), mag je aannemen dat dit het gevraagde antwoord is.

$$T = B e^{-\mu d} = 0,001$$

$$\mu_{\text{beton}} = 0,0772 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1} \times 2,35 \text{ g cm}^{-3} = 0,181 \text{ cm}^{-1}$$

$$\mu_{\text{lood}} = 0,100 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1} \times 11,35 \text{ g cm}^{-3} = 1,135 \text{ cm}^{-1}$$

bepaal B door middel van lineaire interpolatie naar E_γ en μd

| | | | |
|-------|---|-------------------------------------|------------------|
| beton | neem $B = 1$, dan is | $\mu d = -\ln(0,001 / 1) = 6,91$ | $B \approx 13,5$ |
| | neem nu $B = 13,5$ | $\mu d = -\ln(0,001 / 13,5) = 9,51$ | $B \approx 21,8$ |
| | neem nu $B = 21,8$ | $\mu d = -\ln(0,001 / 21,8) = 10,0$ | $B \approx 23,4$ |
| | neem nu $B = 23,4$ | $\mu d = -\ln(0,001 / 23,4) = 10,1$ | $B \approx 23,8$ |
| | $d = 10,1 / 0,181 \text{ cm}^{-1} = 56 \text{ cm}$ | | |
| lood | neem $B = 1$ | $\mu d = -\ln(0,001 / 1) = 6,91$ | $B \approx 2,51$ |
| | neem nu $B = 2,3$ | $\mu d = -\ln(0,001 / 2,51) = 7,83$ | $B \approx 2,68$ |
| | neem nu $B = 2,5$ | $\mu d = -\ln(0,001 / 2,68) = 7,89$ | $B \approx 2,70$ |
| | neem nu $B = 2,5$ | $\mu d = -\ln(0,001 / 2,70) = 7,90$ | $B \approx 2,70$ |
| | $d = 7,90 / 1,135 \text{ cm}^{-1} = 7,0 \text{ cm}$ | | |

gebruik $\mu = \mu/\rho * \rho$ om μ te bepalen

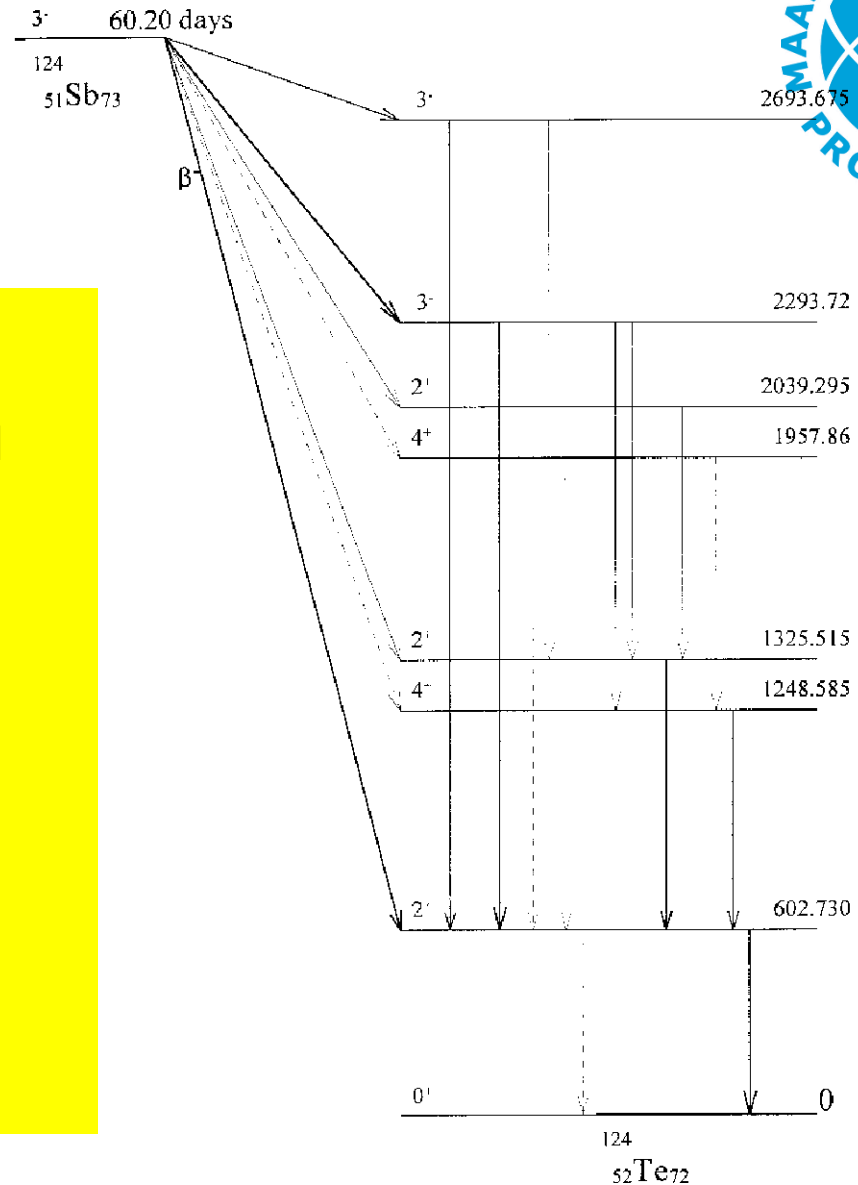
Afscherming

γ -straling



INTERACTIE

Afscherming van gamma verval van ^{134}Sb door beton, inclusief buildup.



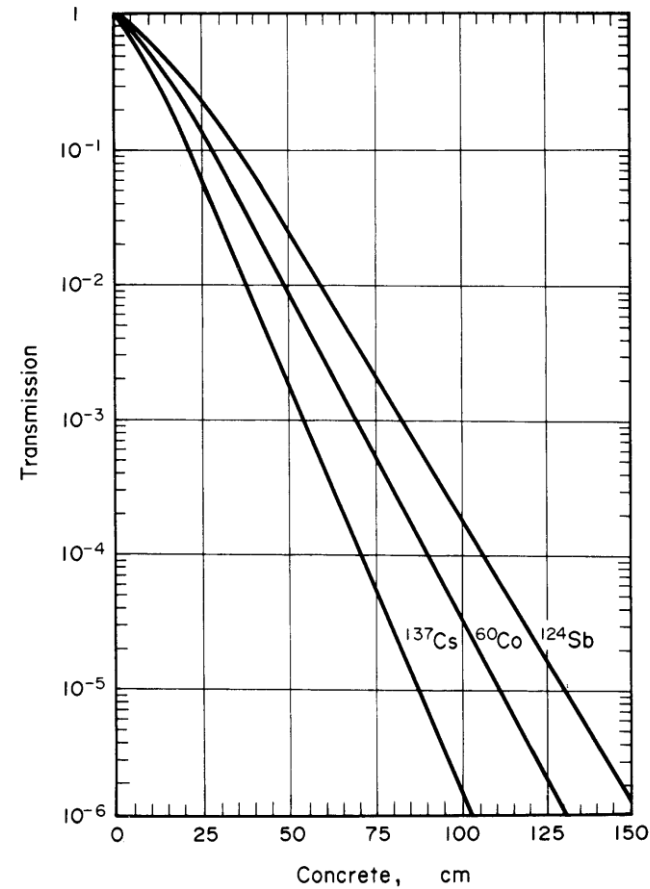
Afscherming

γ -straling



INTERACTIE

γ -bron ^{124}Sb
dikte beton 200 cm
wat is de transmissie ?



Afscherming

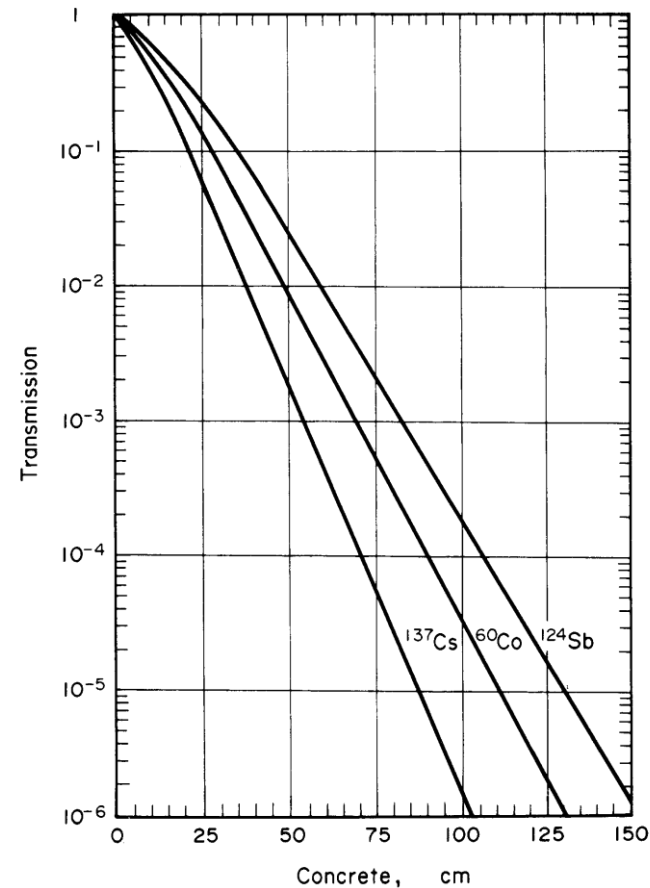
γ -straling



INTERACTIE

γ -bron ^{124}Sb
dikte beton 200 cm
wat is de transmissie ?

bedenk dat $200 = 150 + 50$
150 cm $\rightarrow T = 1,5 \times 10^{-6}$



Afscherming

γ -straling

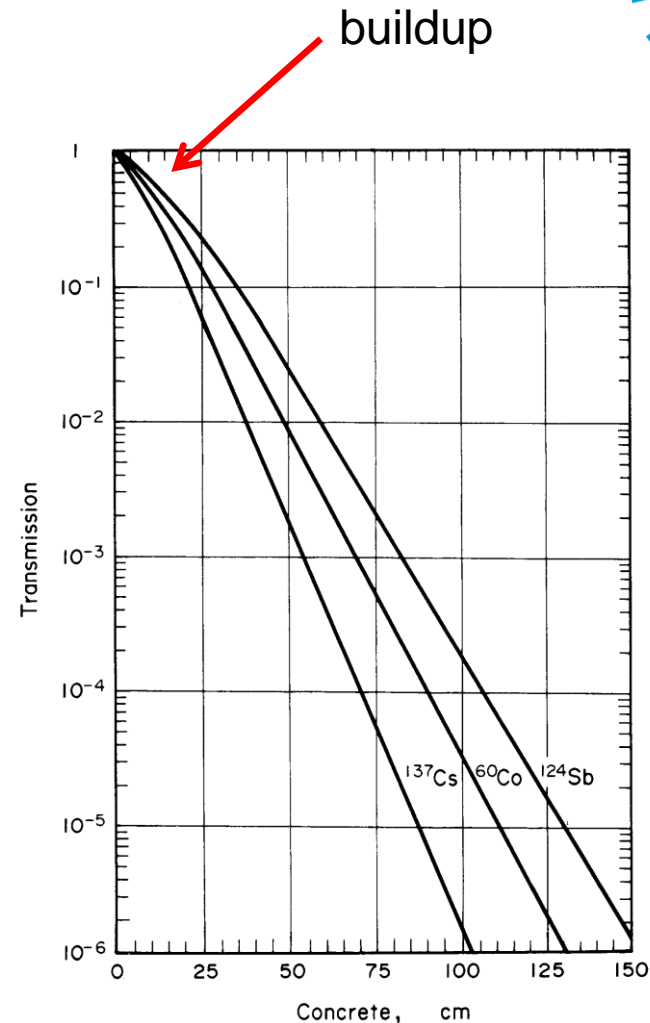


INTERACTIE

γ -bron ^{124}Sb
dikte beton 200 cm
wat is de transmissie ?

bedenk dat $200 = 150 + 50$
 $150 \text{ cm} \rightarrow T = 1,5 \times 10^{-6}$

$100 \text{ cm} \rightarrow T = 2 \times 10^{-4}$
transmissie van de laatste 50 cm is
dus $1,5 \times 10^{-6} / 2 \times 10^{-4} = 0,75 \times 10^{-2}$



Afscherming

γ -straling



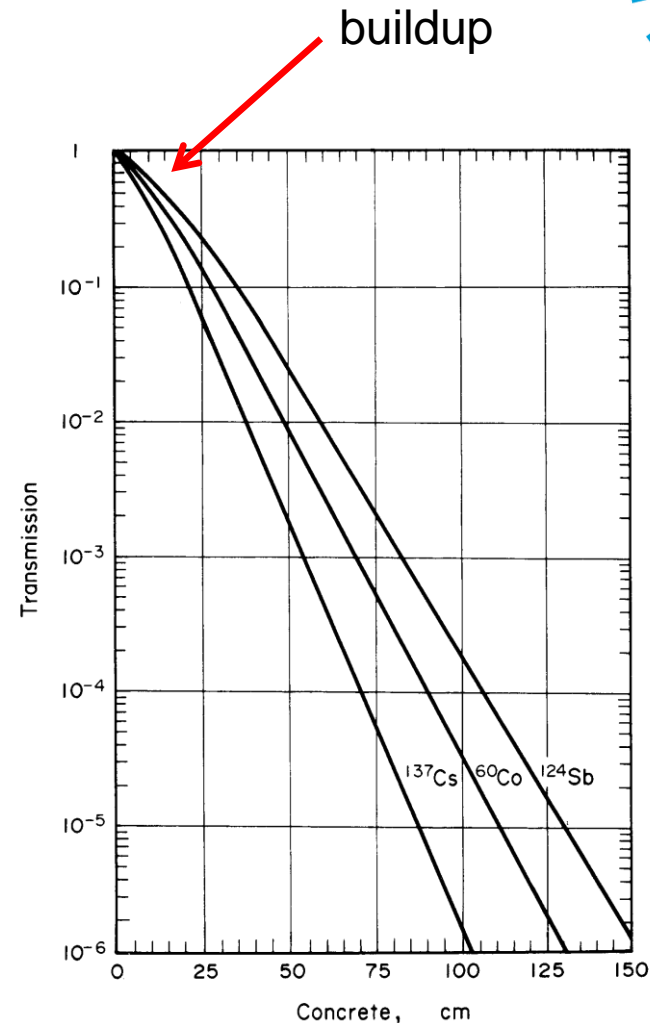
INTERACTIE

γ -bron ^{124}Sb
dikte beton 200 cm
wat is de transmissie ?

bedenk dat $200 = 150 + 50$
150 cm $\rightarrow T = 1,5 \times 10^{-6}$

100 cm $\rightarrow T = 2 \times 10^{-4}$
transmissie van de laatste 50 cm is
dus $1,5 \times 10^{-6} / 2 \times 10^{-4} = 0,75 \times 10^{-2}$

transmissie van 150 + 50 cm is
 $1,5 \times 10^{-6} \times 0,75 \times 10^{-2} = 1,1 \times 10^{-8}$



Afscherming

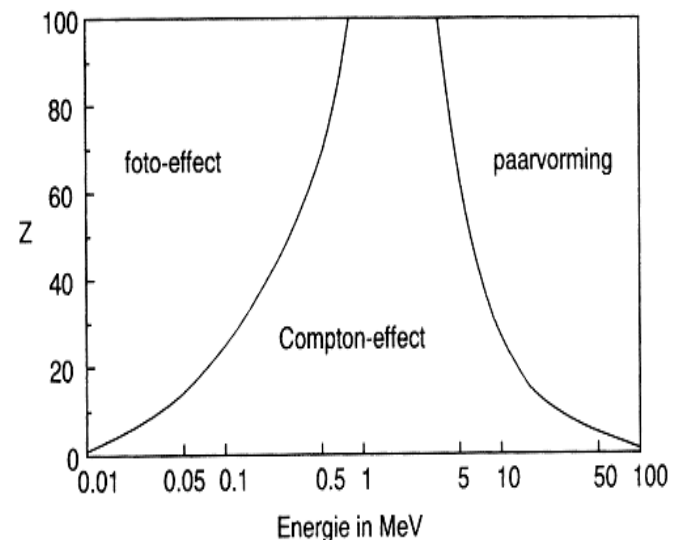
γ -straling, afscherming en strooistraling

keuze materiaal

- ▶ als Compton-effect domineert is materiaalkeuze onbelangrijk
- ▶ voor bouwkundige voorzieningen is beton goed en goedkoop
- ▶ op een laboratoriumtafel is lood handzamer dan beton
- ▶ bij lage E_γ domineert foto-effect en is lood de beste keus

hoeveelheid strooistraling hangt af van

- energie van straling
- verstrooihoek
- verstrooiend materiaal
- verstrooiend oppervlak (m^2)

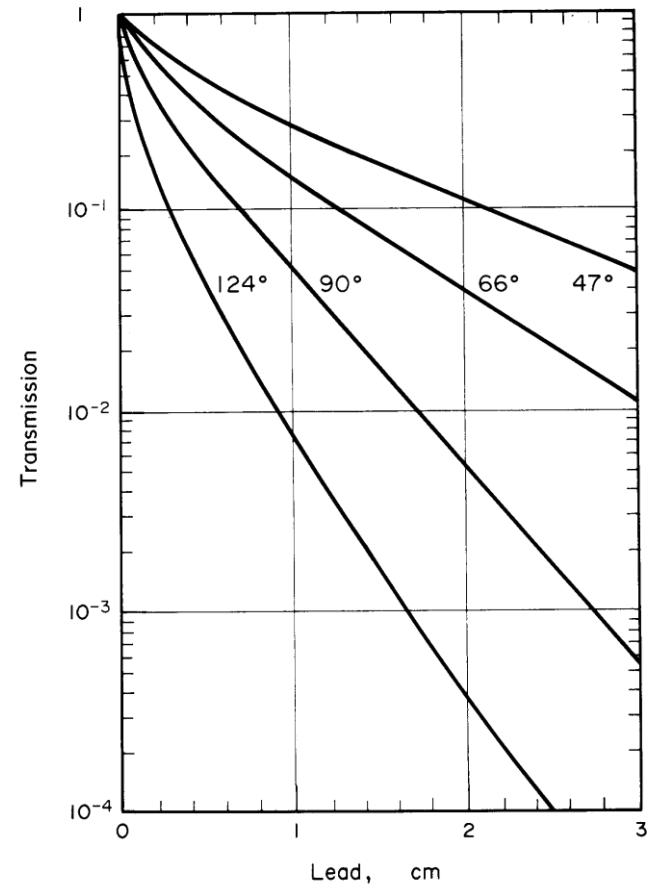


Afscherming

γ -straling

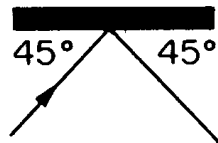
verstrooiing γ -straling van ^{60}Co

| hoek | $E_{\gamma'} / E_{\gamma}$ |
|---------------|----------------------------|
| 0° | 1 |
| 47° | 0,56 |
| 66° | 0,41 |
| 90° | 0,29 |
| 124° | 0,21 |
| 180° | 0,17 |

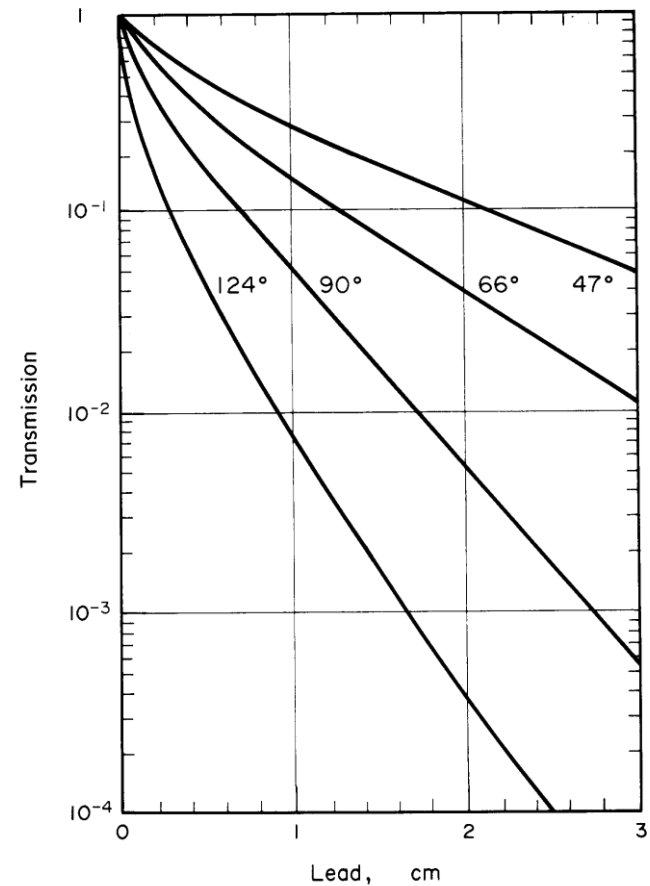


Afscherming

γ -straling

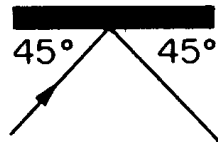


INTERACTIE



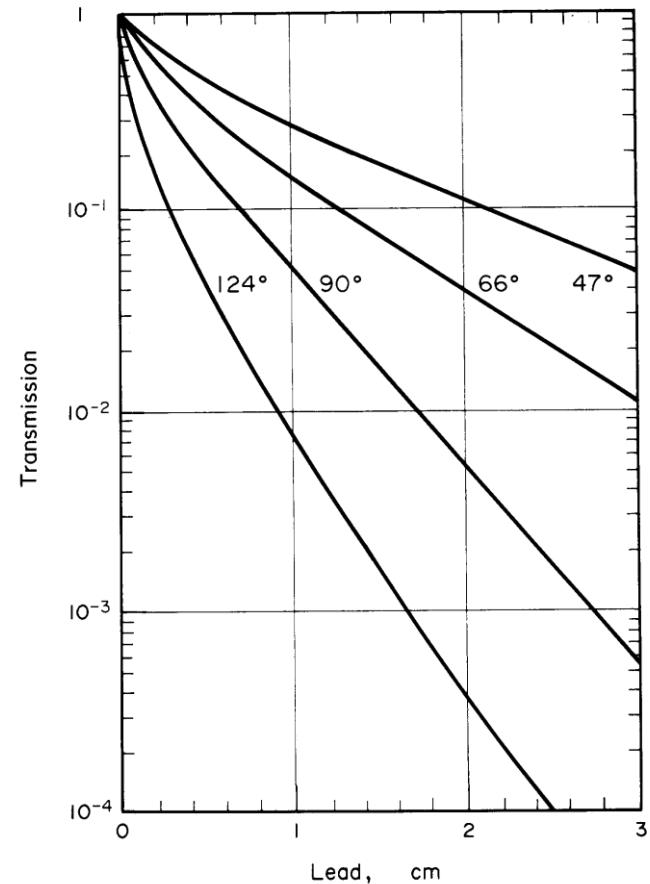
Afscherming

γ -straling



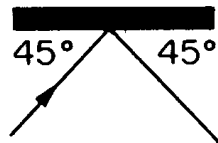
INTERACTIE

γ -bron ^{60}Co
 geometrie zie boven
 dikte lood 2 cm
 wat is de verstrooihoek ?
 wat is de transmissie ?



Afscherming

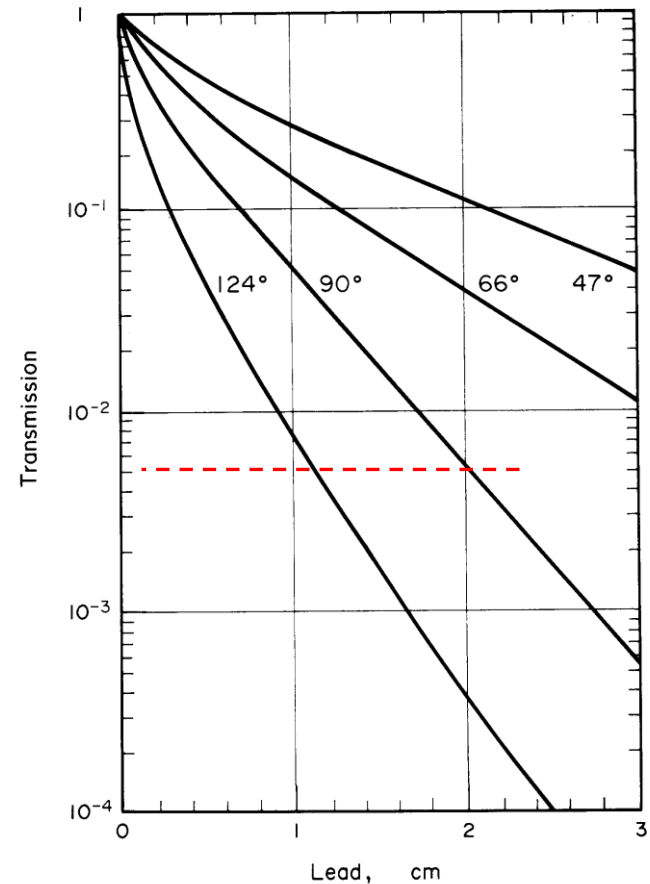
γ -straling



INTERACTIE

γ -bron ^{60}Co
 geometrie zie boven
 dikte lood 2 cm
 wat is de verstrooihoek ?
 wat is de transmissie ?

verstrooihoek = 90°
 transmissie = 5×10^{-3}



Afscherming

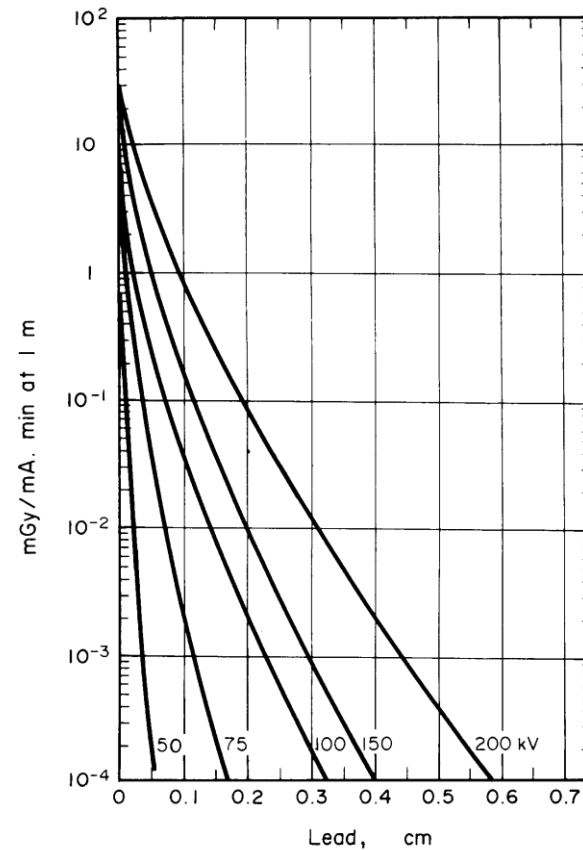
röntgenstraling

gegevens van een röntgentoestel
bevatten twee soorten informatie

1. buisopbrengst
2. transmissie

intensiteit bij 0 cm lood:

- 28,7 bij 200 kV
- 18,3 bij 150 kV
- 9,6 bij 100 kV
- 6,1 bij 75 kV
- 2,6 bij 50 kV



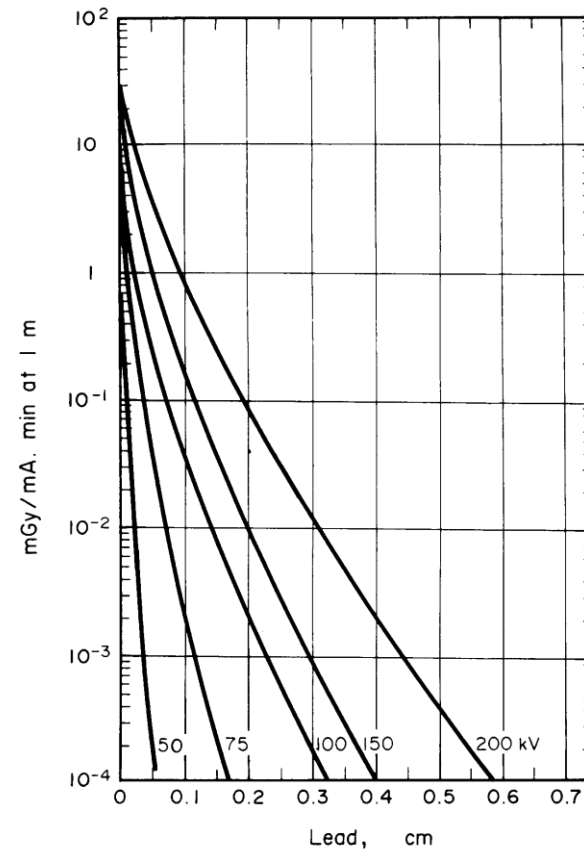
Afscherming

röntgenstraling

INTERACTIE

intensiteit bij 0 cm lood:

- 28,7 bij 200 kV
- 18,3 bij 150 kV
- 9,6 bij 100 kV
- 6,1 bij 75 kV
- 2,6 bij 50 kV



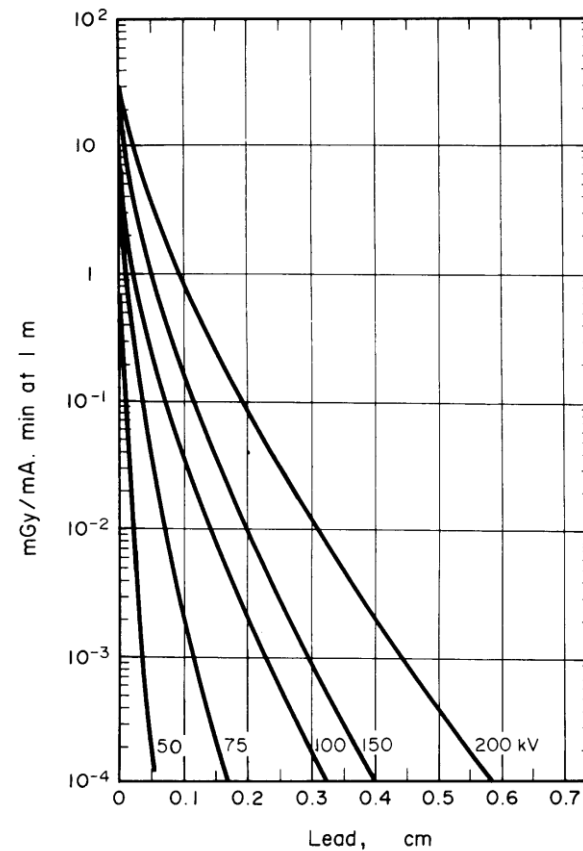
Afscherming

röntgenstraling

INTERACTIE

buisspanning 100 kV
 dikte lood 2,5 mm
 wat is de transmissie ?

intensiteit bij 0 cm lood:
 28,7 bij 200 kV
 18,3 bij 150 kV
 9,6 bij 100 kV
 6,1 bij 75 kV
 2,6 bij 50 kV



Afscherming

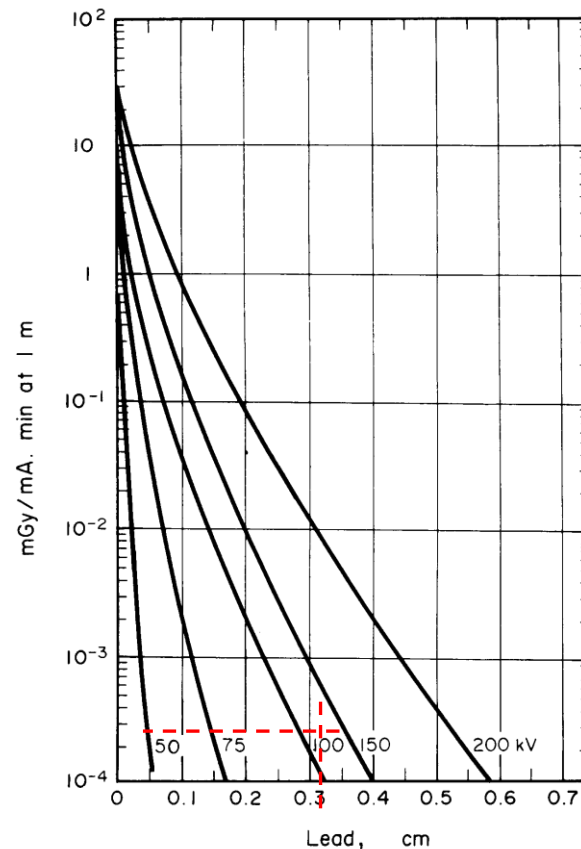
röntgenstraling

INTERACTIE

buisspanning 100 kV
 dikte lood 2,5 mm
 wat is de transmissie ?

opbrengst op 1 meter bij
 0 cm → 9,6 mGy/mA min
 0,25 cm → 5×10^{-4} mGy/mA min
 transmissie = $5 \times 10^{-4} / 9,6 = 5 \times 10^{-5}$

intensiteit bij 0 cm lood:
 28,7 bij 200 kV
 18,3 bij 150 kV
 9,6 bij 100 kV
 6,1 bij 75 kV
 2,6 bij 50 kV



Afscherming

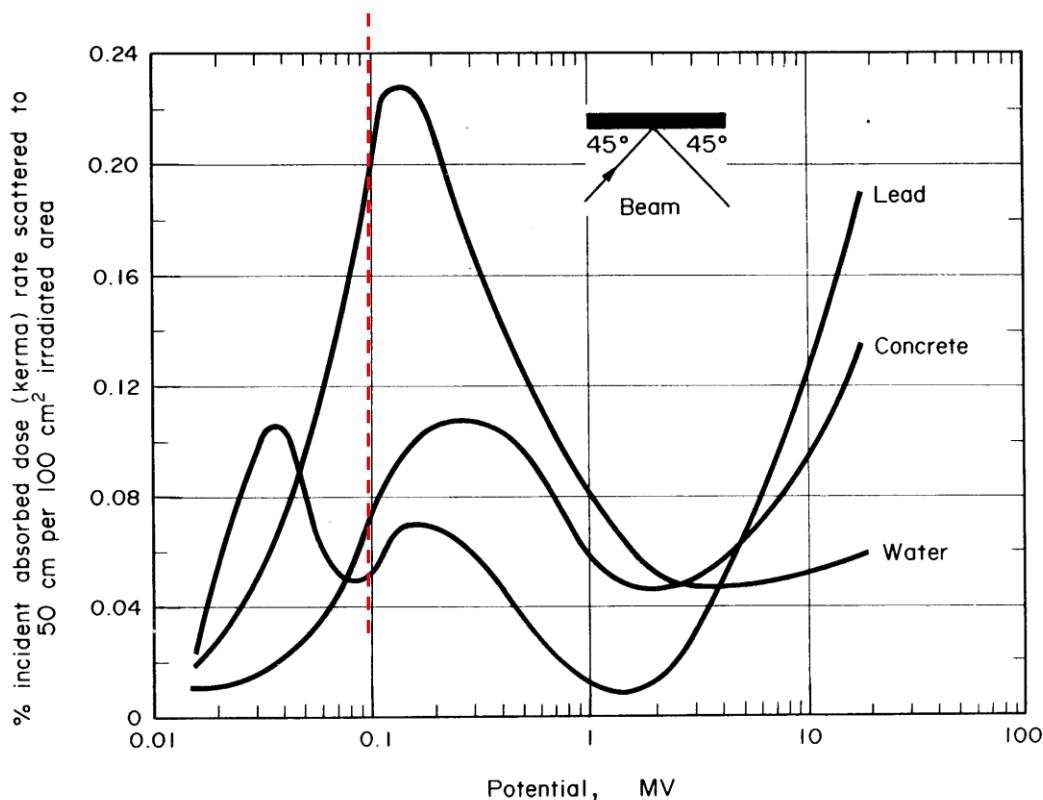
röntgenstraling

verstrooiing

hoek fractie (%) *

| | |
|------|------|
| 30° | 0,02 |
| 45° | 0,03 |
| 60° | 0,04 |
| 90° | 0,06 |
| 120° | 0,12 |
| 135° | 0,17 |
| 150° | 0,21 |

* voor 100 kV
per 100 cm² weefsel
op 50 cm van focus



het is zinvol om de buis onder de tafel te monteren

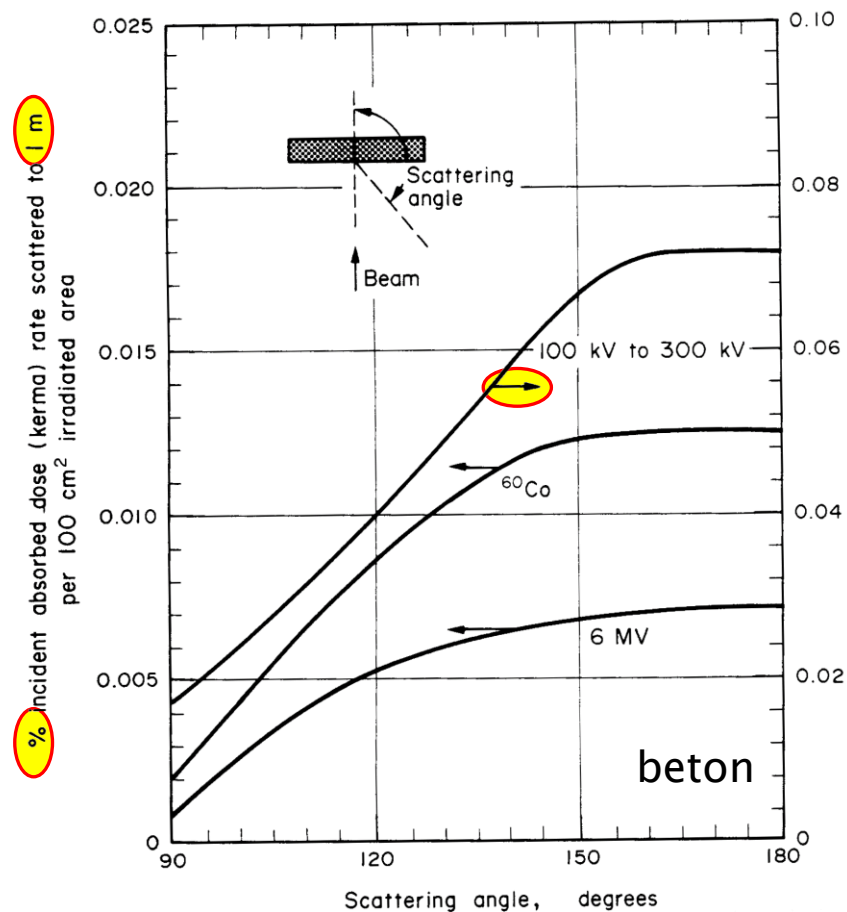
Afscherming röntgenstraling

verstrooiing

hoek fractie (%) *

| | |
|------|------|
| 30° | 0,02 |
| 45° | 0,03 |
| 60° | 0,04 |
| 90° | 0,06 |
| 120° | 0,12 |
| 135° | 0,17 |
| 150° | 0,21 |

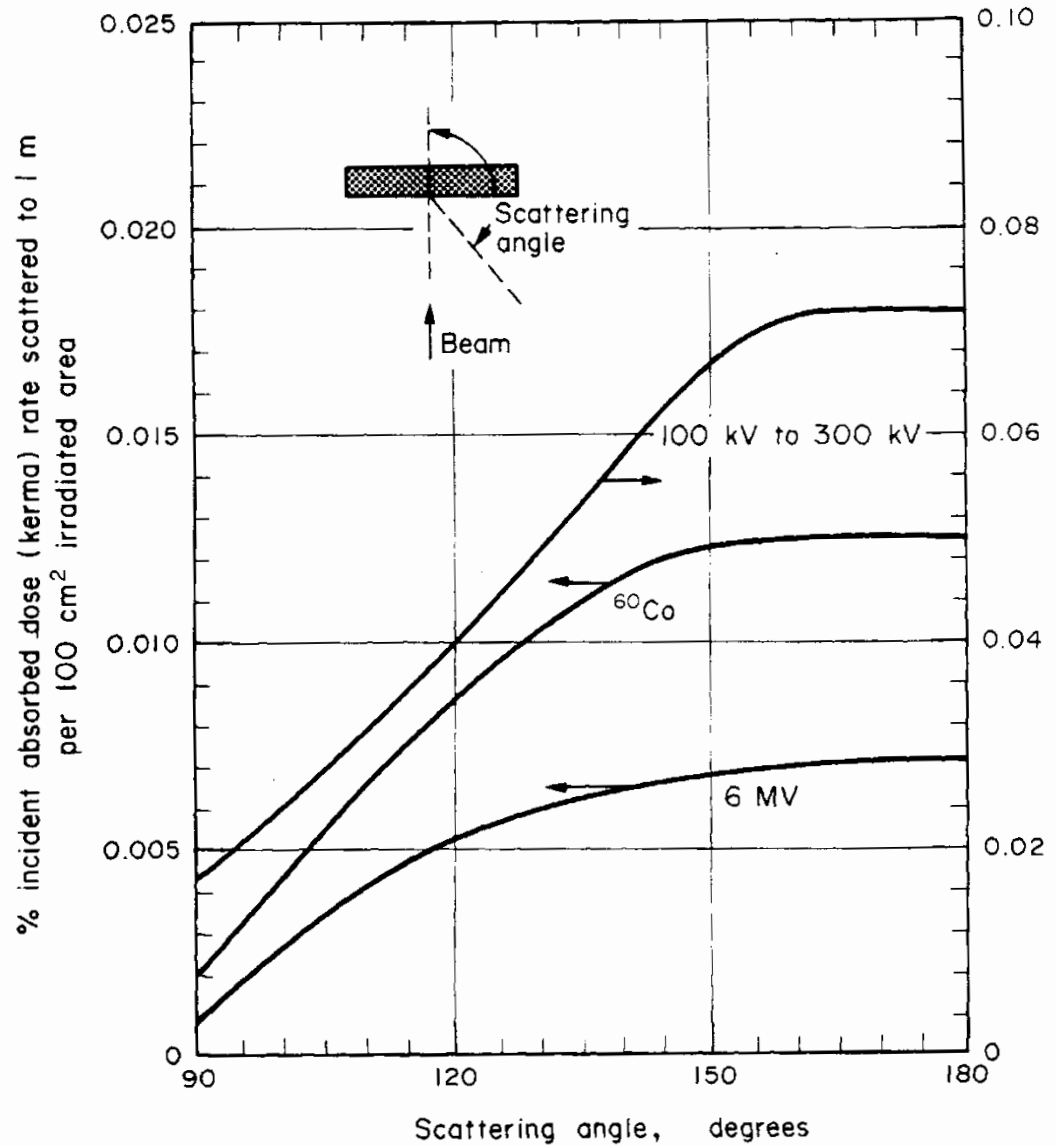
* voor 100 kV
per 100 cm² weefsel
op 50 cm van focus



Verstrooiing

- ▶ Energie vestrooide gamma: in terugwaartse richting nooit groter dan 0.256 MeV ($= m_e c^2 / 2$)

$$E'_f = \frac{E_f}{1 + \frac{E_f}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}$$



Afscherming Remstraling

- ▶ Continue Spectrum
- ▶ Hardere Röntgens minder verzwakt dus meer afscherming nodig
- ▶ Kerma = energieoverdracht per eenheid van massa, maar alleen voor zover het de primaire interactie betreft

▶ Dosis (Gy) $K = E_f \Phi \mu_{tr} / \rho$

$$D = E_f \Phi \mu_{en} / \rho$$

- ▶ Lineieke energie absorptie coefficient

$$\mu_{en} = (1 - g) \mu_{tr}$$

$$\mu_{tr} = (1 - E'_f/E_f) \mu$$

