



College Zorgopleidingen

Tabellenboek

Formules, tabellen en grafieken ten behoeve van
opleidingen stralingsbescherming op
niveau 4A en 4B

Dit boekwerk met formules, tabellen en grafieken ten behoeve van opleidingen stralingsbescherming op niveau 4A en 4B is samengesteld op initiatief van het College Zorgopleidingen.

Materiaal van ICRP publicaties 21 (1971), 33 (1982), 60 (1991), 72 (1996), 78 (1997) en 103 (2007) zijn gereproduceerd met toestemming van de ICRP.

Verder is materiaal met toestemming overgenomen uit de leerboekenserie voor radiologisch laboranten welke door Elsevier Gezondheidszorg/Reed Business/Bohn Stafleu van Loghum worden uitgegeven.

Voor opmerkingen en aanvullingen kunt u schrijven naar:

Secretariaat CZO

Oudlaan 4

Postbus 9696

3506 GR UTRECHT

E-mail: info@czo.nl

© CZO, december 2023

Inhoudsopgave

HOOFDSTUK 1	EENHEDEN 4
1.1 SI-voorvoegsels	4
1.2 Fundamentele SI-eenheden.....	4
1.3 Enkele afgeleide eenheden.....	4
1.4 Fysische constanten.....	5
1.5 Dichtheid in $g \cdot cm^{-3}$ van enkele materialen bij 293 K.....	5
1.6 Griekse letters	6
HOOFDSTUK 2	FORMULES 7
2.1 Formules algemeen	7
2.2 Formules elektromagnetische straling	8
2.3 Formules corpusculaire straling.....	8
2.4 Formules radioactiviteit	9
2.5 Formules dosimetrie en statistiek.....	11
2.6 Formules afschermingsberekeningen	13
2.7 Formules dosimetrie bij computertomografie	14
HOOFDSTUK 3	RADIOBIOLOGIE EN WET- EN REGELGEVING 15
3.1 Grootheden en formules radiobiologie.....	15
3.2 Incidentie- en sterfterisico voor stochastische effecten.....	16
3.3 Weefselweegfactoren (w_T) voor het totale gewogen risico op stochastische effecten.....	16
3.4 Stralingsweegfactoren (w_R)	17
3.5 Kans op stochastische effecten in termen van detriment	17
3.6 Limietwaarden voor de effectieve dosis en equivalente dosis.....	18
3.7 Maximaal toegestaan omgevingsdosis-equivalenttempo ten gevolge van lekstraling bij toestellen	19
3.8 Maximaal toegestaan equivalent dosistempo bij opslag en transport van radioactieve bronnen.....	19
HOOFDSTUK 4	CHEMISCHE ELEMENTEN EN RADIONUCLIDEN 20
4.1 Periodiek systeem van de elementen	20
4.2 Overzicht chemische symbolen	21
4.3 Atoomnummers en bindingsenergieën van elektronen in de verschillende schillen	24
4.4 Halveringstijden en luchtkermatempoconstanten van enkele ingekapselde radioactieve bronnen	25
4.5 Dosisconversiecoëfficiënten en halveringstijden van enkele open radioactieve bronnen voor blootgestelde werknemers van 18 jaar en ouder	29
HOOFDSTUK 5	GRAFIEKEN RADIONUCLIDEN 30
5.1 Transmissiefactor van ^{192}Ir , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{226}Ra door staal	30
5.2 Transmissiefactor van ^{99m}Tc , ^{67}Ga , ^{111}In , ^{131}I door beton.....	31
5.3 Transmissiefactor van ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{124}Sb door beton.....	32
5.4 Transmissiefactor van ^{198}Au , ^{192}Ir , ^{226}Ra door beton.....	33
5.5 Transmissiefactor van ^{192}Ir , ^{198}Au , ^{182}Ta , ^{226}Ra door lood.....	34
5.6 Transmissiefactor van ^{99m}Tc , ^{111}In , ^{67}Ga , ^{131}I , 511 keV, ^{137}Cs , ^{60}Co door lood	35
5.7 Transmissiefactor van ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{124}Sb door lood	36
HOOFDSTUK 6	GRAFIEKEN RÖNTGENSTRALING 37
6.1 Kerma vrij in lucht per eenheid van lading bij een mammografietoestel	37
6.2 Kerma vrij in lucht per eenheid van lading bij aluminiumfiltratie.....	38
6.3 Kerma vrij in lucht per eenheid van lading bij aluminium- en koperfiltratie	39
6.4 Kerma vrij in lucht per eenheid van lading bij koperfiltratie	40
6.5 Kerma vrij in lucht per eenheid van lading van röntgenstraling door lood (1).....	41
6.6 Kerma vrij in lucht per eenheid van lading van röntgenstraling door lood (2).....	42
6.7 Kerma vrij in lucht per eenheid van lading van röntgenstraling door beton (1).....	43
6.8 Kerma vrij in lucht per eenheid van lading van röntgenstraling door beton (2).....	44
6.9 Verzwakking van loodschorten als functie van de buisspanning	45
6.10 Buildup-factor voor lood als functie van de fotonenergie	46
6.11 Buildup-factor voor beton als functie van de fotonenergie	47
6.12 Buildup-factor voor water als functie van de fotonenergie	48
6.13 Gereduceerde halveringsdikte van lucht, beton, lood, water als functie van de fotonenergie	49
HOOFDSTUK 7	GRAFIEKEN MEGAVOLT FOTONENSTRALING 50
7.1 Transmissiefactor van megavolt fotonenstraling door ijzer.....	50
7.2 Kerma vrij in lucht per eenheid van lading van megavolt fotonenstraling door beton.....	51
7.3 Transmissiefactor van megavolt fotonenstraling door beton	52
7.4 Transmissiefactor van megavolt fotonenstraling door lood.....	53
HOOFDSTUK 8	STROOISTRALING, CELOVERLEVING, VERZWAKKINGSCOËFFICIËNT EN BACKSCATTERFACTOREN 54
8.1 Verstrooiing van ioniserende fotonenstraling (1)	54
8.2 Verstrooiing van ioniserende fotonenstraling (2).....	55
8.3 Celoverlevingscurven voor diverse stralingssoorten.....	56
8.4 Massieke verzwakkingcoëfficiënt van water bij verschillende fotonenergieën	57
8.5 Massieke verzwakkingcoëfficiënt van lood bij verschillende fotonenergieën	58

8.6	Backscatterfactoren radiologie 50-150 kV	59
8.7	Backscatterfactoren radiologie 24-40 kV.....	60

Hoofdstuk 1 Eenheden

1.1 SI-voorvoegsels

Voorvoegsel		
Naam	Symbool	Grootte
deci	d	10^{-1}
centi	c	10^{-2}
milli	m	10^{-3}
micro	μ	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
pico	p	10^{-12}
femto	f	10^{-15}
atto	a	10^{-18}
zepto	z	10^{-21}
yocto	y	10^{-24}

Voorvoegsel		
Naam	Symbool	Grootte
deca	da	10
hecto	h	10^2
kilo	k	10^3
mega	M	10^6
giga	G	10^9
tera	T	10^{12}
peta	P	10^{15}
exa	E	10^{18}
zetta	Z	10^{21}
yotta	Y	10^{24}

1.2 Fundamentele SI-eenheden

Grootheid	Eenheid	
	Naam	Symbool
Lengte	meter	m
Massa	kilogram	kg
Tijd	seconde	s
Elektrische stroomsterkte	ampère	A
Thermodynamische temperatuur	kelvin	K
Hoeveelheid stof	mol	mol
Lichtsterkte	candela	cd

1.3 Enkele afgeleide eenheden

Afgeleide grootheid	Afgeleide eenheid		
	Naam	Symbool	Afgeleid van
Energie	joule	J	$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
	elektronvolt	eV	$1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
Temperatuur	graad celsius	$^{\circ}\text{C}$	$0 \text{ }^{\circ}\text{C} = 273 \text{ K}$
Vermogen	watt	W	$\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$
Frequentie	hertz	Hz	s^{-1}
Lading	coulomb	C	$\text{A} \cdot \text{s}$
Spanning	volt	V	$\text{W} \cdot \text{A}^{-1}$ of $\text{J} \cdot \text{C}^{-1}$
Weerstand	ohm	Ω	$\text{V} \cdot \text{A}^{-1}$
Capaciteit	farad	F	$\text{C} \cdot \text{V}^{-1}$
Geabsorbeerde dosis	gray	Gy	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
Kerma	gray	Gy	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
Equivalentente dosis	sievert	Sv	-
Effectieve dosis	sievert	Sv	-

Integrale dosis	joule	J	kg • Gy
Activiteit	becquerel	Bq	s ⁻¹

1.4 Fysische constanten

Elementaire lading	$1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Rustmassa elektron	$9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Rustmassa proton	$1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Constante van Planck	$6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
Lichtsnelheid in vacuüm	$3,00 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Getal van Avogadro	$6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

1.5 Dichtheid in g • cm⁻³ van enkele materialen bij 293 K

Aluminium	2,70
Baksteen	1,65
Barietbeton	3,50
Beton	2,35
Bot	1,85
Gips	2,32
Glas	2,55
Kobalt	8,90
Koolstof	2,62
Koper	8,96
Kwik	13,5
Lood	11,35
Lucht	0,001205
MDF	0,72
Messing	8,50
Molybdeen	10,2
Plexiglas (perspex)	1,19
Spierweefsel	1,05
Staal	7,8
Uraan	19,0
Water	1,00
Wolfraam	19,3
IJzer	7,87

1.6 Griekse letters

α	A	alfa
β	B	bèta
γ	Γ	gamma
δ	Δ	delta
ε	E	epsilon
ζ	Z	zèta
η	H	èta
θ, ϑ	Θ	thèta
ι	I	iota
κ	K	kappa
λ	Λ	lambda
μ	M	mu

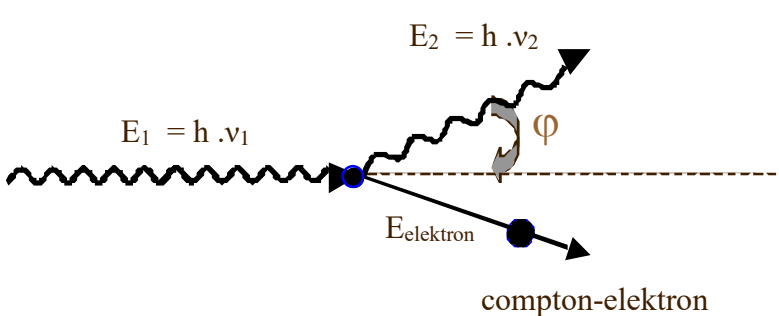
ν	N	nu
ξ	Ξ	xi ("ksi")
\omicron	O	omikron
π	Π	pi
ρ	P	rho
σ, ς	Σ	sigma
τ	T	tau
υ	Y	upsilon
ϕ, φ	Φ	phi ("fi")
χ	X	chi ("gi")
ψ	Ψ	psi
ω	Ω	omega

Hoofdstuk 2 Formules

2.1 Formules algemeen

Omtrek cirkel (O) [m]	$O = 2 \cdot \pi \cdot r$, waarin: $\pi = 3,14159$ $r = \text{straal [m]}$
Oppervlakte cirkel (A) [m ²]	$A = \pi \cdot r^2$
Oppervlakte bol (A) [m ²]	$A = 4 \cdot \pi \cdot r^2$
Inhoud bol (I) [m ³]	$I = (4/3) \cdot \pi \cdot r^3$
Oppervlakte cilinder (A) [m ²]	$A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h$, waarin: $h = \text{hoogte [m]}$
Inhoud cilinder (I) [m ³]	$I = \pi \cdot r^2 \cdot h$
Dichtheid (ρ) [g • cm ⁻³]	$\rho = m / V$, waarin: $m = \text{massa [g]}$ $V = \text{volume [cm}^3\text{]}$
Energie (E _o) [J]	$E_o = m_o \cdot c^2$, waarin: $m_o = \text{rustmassa van het deeltje [kg]}$ $c = \text{lichtsnelheid in vacuüm [m • s}^{-1}\text{]}$
Stroom (I) [A]	$I = Q / t$, waarin: $Q = \text{lading [C]}$ $t = \text{tijd [s]}$
Spanning (U) [V]	$U = I \cdot R$, waarin: $I = \text{stroomsterkte [A]}$ $R = \text{weerstand [}\Omega\text{]}$
Lading condensator (Q) [C]	$Q = C \cdot U$, waarin: $C = \text{capaciteit [F]}$
Vermogen (P) [W]	$P = U \cdot I$, waarin: $U = \text{spanning [V]}$ $I = \text{stroomsterkte [A]}$
Belasting röntgenbuis (E) [J]	$E = I \cdot U \cdot t \cdot c$, waarin: $I = \text{buisstroom [mA]}$ $U = \text{buisspanning [kV}_p\text{]}$ $t = \text{tijd [s]}$ $c = \text{spanningsvormfactor}$

2.2 Formules elektromagnetische straling

Fotonenergie (E_{foton}) [J]	$E_{\text{foton}} = h \cdot \nu$, waarin: h = constante van Planck (= $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$) ν = frequentie [Hz] of [s^{-1}]
Fotonenergie (E_{foton}) [keV]	$E_{\text{foton}} = 1,24 / \lambda$, waarin: λ = golflengte [nm]
Golflengte foton (λ) [m]	$\lambda = c / \nu$, waarin: c = lichtsnelheid in vacuüm (= $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$) ν = frequentie [Hz]
Homogeniteitsgraad [-]	Homogeniteitsgraad = 1 ^e HVD / 2 ^e HVD
Heterogeniteitsgraad [-]	Heterogeniteitsgraad = 2 ^e HVD / 1 ^e HVD
Golflengte verandering bij het comptoneffect $\Delta\lambda$ [nm]	$\Delta\lambda = 0,00242 \cdot (1 - \cos \varphi)$ [nm], waarin: φ = verstrooiingshoek van het foton 

2.3 Formules corpusculaire straling

Gemiddelde kinetische energie geladen deeltje (E_{kin}) [J]	$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$, waarin: m = massa van het deeltje [kg] v = snelheid [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
Dracht of Range (R) [cm]	Vuistregel dracht β^- -straling: (mits $E_{\beta \text{ max}} > 0,6 \text{ MeV}$) $R[\text{cm}] = \frac{1}{2} \cdot E_{\beta \text{ max}} / \rho$, waarin: $E_{\beta \text{ max}}$ = maximale energie van de β^- -straling [MeV] ρ = dichtheid van afschermer [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]
Gereduceerde dracht (R_p) [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$]	$R_p = \rho \cdot R$ waarin: ρ = dichtheid van afschermer [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$] R = dracht of range [cm]
Dosistempo bij een β^- -bron \dot{D} [$\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$]	Vuistregel dosistempo bij een β^- -bron: (mits $E_{\beta \text{ max}} \geq 200 \text{ keV}$ en bij emissie van één bètadeeltje per kernmutatie) $\dot{D} = 100 \cdot A$ waarin: A = activiteit [MBq] \dot{D} = dosistempo op 30 cm afstand van de β^- -bron [$\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$]
Gemiddelde energie β^- -straling	$E_{\beta \text{ gem}} = 0,3 \cdot E_{\beta \text{ max}}$

2.4 Formules radioactiviteit

Activiteit (A) [Bq]	$A = \lambda \cdot N$, waarin: λ = vervalconstante N = aantal instabiele atoomkernen
Fysisch verval (A_t / A_0) [-]	$A_t / A_0 = 2^{-(t / HVT)}$ of $A_t / A_0 = e^{-(\lambda \cdot t)}$, waarin: HVT = halveringstijd radionuclide in bijv. s λ = vervalconstante in bijvoorbeeld: s^{-1} t = verstreken tijd in bijvoorbeeld: s Verder geldt altijd: $\ln 2 = \lambda \cdot HVT$
Specifieke activiteit (A_s) [$Bq \cdot g^{-1}$]	$A_s = A / m$, waarin: A = activiteit [Bq] m = massa [g]
Yield (y)	Emissiewaarschijnlijkheid (de kans dat het radionuclide op een bepaalde manier vervalst)
Effectief verval (HVT_{eff}) [s] of: (λ_{eff}) [s^{-1}]	$1 / HVT_{eff} = 1 / HVT_{fys} + 1 / HVT_{bio}$ of $\lambda_{eff} = \lambda_{fys} + \lambda_{bio}$, waarin: HVT_{fys} = fysische halveringstijd HVT_{bio} = biologische halveringstijd λ_{fys} = fysische vervalconstante λ_{bio} = biologische vervalconstante

Moeder – Dochter relaties:

Glijdend evenwicht	$A_{d(t)} = \{HVT_m / (HVT_m - HVT_d)\} \cdot A_{m(t)}$, waarin $A_{d(t)}$ = activiteit van de dochternuclide op tijdstip t $A_{m(t)}$ = activiteit van de moedernuclide op tijdstip t HVT_d = de halveringstijd van de dochternuclide HVT_m = de halveringstijd van de moedernuclide
Absoluut evenwicht	Indien HVT_m meer dan 10 keer zo groot is als HVT_d , dan geldt: $A_{d(t)} = A_{m(t)}$
Geen evenwicht	Indien HVT_m meer dan 10 keer zo klein is als HVT_d , dan geldt: $A_{d(t)} = (HVT_m / HVT_d) \cdot A_{m(0)}$ waarin: $A_{m(0)}$ = activiteit van de moedernuclide op tijdstip 0

Maximaal toe te passen activiteit:
$$A_{\max,inh} = \frac{0,02 \times 10^{p+q+r}}{e(50)_{inh}}$$

Toepassing	p	Ruimte	q	Ventilatie	r
gassen, poeders in open systemen, vloeistoffen tegen kookpunt, spattende bewerkingen	-4	werkrimte buiten laboratoriumbeheer	0	werken buiten zuurkast	0
labeling met vluchtig nuclide (jodium), koken vloeistoffen in gesloten systeem, centrifugeren en mengen op vortex, poeders in gesloten systeem	-3	D-laboratorium, nevenruimte bij laboratorium	1	plaatselijke afzuiging / zuurkast	1
labeling met niet-vluchtig nuclide, eenvoudige chemische bepalingen	-2	C-laboratorium	2	DIN-gekeurde zuurkast	2
eenvoudig "nat" werk, eenvoudige handelingen in gesloten systemen	-1	B-laboratorium	3	gesloten werkkast	3

2.5 Formules dosimetrie en statistiek

Kerma (K) [Gy]	$K = E_k / m$, waarin: E_k = energieoverdracht van indirect ioniserende straling naar direct ioniserende straling [J] m = massa [kg]
Geabsorbeerde dosis (D) [Gy]	$D = E_{abs} / m$, waarin: E_{abs} = geabsorbeerde stralingsenergie [J] m = massa [kg]
Exposie (X) [C • kg ⁻¹]	$X = Q / m$, waarin: Q = lading in lucht [C] m = massa van de lucht [kg]
Relatie tussen geabsorbeerde dosis en kerma (bij geladen deeltjes evenwicht)	$D = K \cdot (1 - g)$, waarin: D = geabsorbeerde dosis [Gy] K = kerma [Gy] g = fractie van de kinetische energie van de geladen deeltjes die wordt omgezet in remstraling
Relatie tussen geabsorbeerde dosis in materie en geabsorbeerde dosis in lucht	$D_m = \{(\mu / \rho)_m / (\mu / \rho)_L\} \cdot D_L$, waarin: D_m = geabsorbeerde dosis in materie [Gy] D_L = geabsorbeerde dosis in lucht [Gy] $(\mu / \rho)_m$ = massieke verzwakingscoëfficiënt van materie [cm ² • g ⁻¹] $(\mu / \rho)_L$ = massieke verzwakingscoëfficiënt van lucht [cm ² • g ⁻¹]
Relatie tussen luchtkerma en exposie (bij geladen deeltjes evenwicht)	$K = X \cdot (W / e) \cdot \{1 / (1 - g)\}$, waarin: K = luchtkerma [Gy] X = exposie [C.kg ⁻¹] W / e = het quotiënt van de gemiddelde energie, nodig voor de vorming van een ionenpaar in lucht en de elementaire lading (= 34 J • C ⁻¹) g = fractie van de kinetische energie van de geladen deeltjes die wordt omgezet in remstraling
Telrendement stralingsdetector (ε) [-]	$\epsilon = R / (A \cdot y)$, waarin R = teltempo [cps] (⇒ counts per seconde) A = activiteit [Bq] y = yield of emissiewaarschijnlijkheid [-]
Druk, temperatuur correctiefactor (bij open ionisatievaten) (f) [-]	$f = (P_{calibratie} / P_{meting}) \cdot (T_{meting} / T_{calibratie})$, waarin P = druk [Pa] T = temperatuur [K]
Dode tijd (τ) [s]	$\tau = (R_o - R) / (R_o \cdot R)$, waarin: R_o = juiste teltempo R = waargenomen teltempo of: $R_o = R / (1 - \tau \cdot R)$
Dode tijd (τ) [s]	$\tau = (R_a + R_b - R_{ab}) / (2 \cdot R_a \cdot R_b)$, waarin: R_a = teltempo sample A R_b = teltempo sample B R_{ab} = teltempo van A + B gelijktijdig opgenomen

Absolute telfout (δ_{abs}) [counts] (bij normaalverdeling)	$\delta_{abs} = \sqrt{N}$, waarin: N = totaal aantal gemeten counts van één telling
Relatieve telfout (δ_{rel}) [-]	$\delta_{rel} = 1 / \sqrt{N}$, waarin: N = totaal aantal gemeten counts van één telling
Telfout teltempo ($\delta_{teltempo}$) [cps]	$\delta_{teltempo} = \sqrt{N} / t$ of $\delta_{teltempo} = \sqrt{R / t}$, waarbij t als exact gegeven wordt beschouwd
Netto teltempo ($R_{netto\ teltempo}$) [cps] of [cpm]	$R_{netto\ teltempo} = R_{bruto\ teltempo} - R_{achtergrond\ teltempo}$
Telfout netto teltempo ($\delta_{netto\ teltempo}$) [cps] of [cpm]	$\delta_{netto\ teltempo} = \sqrt{\{(\delta_{bruto\ teltempo})^2 + (\delta_{achtergrond\ teltempo})^2\}}$ of: $= \sqrt{\{(R_{bruto\ teltempo} / t_{bruto\ teltempo}) + (R_{achtergrond\ teltempo} / t_{achtergrond})\}}$

2.6 Formules afschermingsberekeningen

<p>Transmissiefactor (T) [-]</p>	<p>$T = B_i \cdot 2^{-(d / \text{HVD})}$ of : $T = B_i \cdot e^{-(\mu \cdot d)}$ of : $T = K_{\text{met}} / K_{\text{zonder}}$ waarin: B_i = buildupfactor d = dikte afscherming in bijvoorbeeld cm HVD = halveringsdikte in bijvoorbeeld cm μ = lineïeke verzwakkingscoëfficiënt in bijvoorbeeld cm^{-1} K_{met} = kerma met afscherming K_{zonder} = kerma zonder afscherming K_{met} en K_{zonder} in hetzelfde meetpunt Verder geldt altijd: $\ln 2 = \mu \cdot \text{HVD}$</p>
<p>Transmissieverhouding (TVH) [-]</p>	<p>$\text{TVH} = D_{\text{uit}} / D_{\text{in}}$, waarin: D_{uit} = uitreedosis D_{in} = intreedosis</p>
<p>Kerma vrij in lucht achter afscherming (K) [Gy]</p>	<p>$K = (\Gamma \cdot A \cdot t / r^2) \cdot T$, waarin: Γ = luchtkermatempoconstante in bijvoorbeeld $\mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ A = activiteit [MBq] t = tijd [h] r = afstand [m] T = transmissiefactor [-]</p>
<p>Luchtkermatempo van de verstrooide straling $\left(\dot{K}_{\text{str}} \right)$ [Gy • s⁻¹]</p>	<p>$\dot{K}_{\text{str}} = c \cdot \dot{K}_p \cdot (A_{\text{str}} / A_{\text{ref}}) \cdot (r_{\text{ref}} / r)^2$, waarin: c = coëfficiënt, afhankelijk van de versnelspanning en de verstrooiingshoek \dot{K}_p = luchtkermatempo vrij in lucht van de primaire straling ter plaatse van het centrum van het verstrooiende oppervlak A_{str} = oppervlakte van het intreeveld op de verstrooier A_{ref} = referentieoppervlakte van het intreeveld r_{ref} = referentie-afstand tot de verstrooier r = afstand tot de verstrooier</p>

2.7 Formules dosimetrie bij computertomografie

CTDI = ComputerTomografie Dosis Index [Gy]
 D_{gem} = gemiddelde dosis in langwerpige ionisatiekamer [Gy]
L = lengte ionisatiekamer [mm]
T = coupedikte

$$\text{CTDI} = D_{\text{gem}} \times \frac{L}{T}$$

CTDI_c = CTDI in centrum van cilindrisch perspex fantoom [Gy]
 CTDI_p = CTDI in de periferie van cilindrisch perspex fantoom [Gy]
 CTDI_w = gewogen gemiddelde CTDI [Gy]

$$\text{CTDI}_w = \frac{1}{3} \times \text{CTDI}_c + \frac{2}{3} \times \text{CTDI}_p$$

N = aantal coupes [-]
 $N \times T$ = totale collimatie [mm]
I = taferverschuiving per rotatie [mm]
 CTDI_{vol} = CTDI van een volumescan [Gy]

$$\text{CTDI}_{\text{vol}} = \text{CTDI}_w \times \frac{N \times T}{I}$$

Scanlengte = lengte van het gescande gebied [cm]
DLP = Dosis-Lengte-Product [Gy•cm]

$$\text{DLP} = \text{CTDI}_{\text{vol}} \times \text{Scanlengte}$$

E = effectieve dosis [mSv]
 C_E = conversiefactor [$\text{mSv} \cdot (\text{Gy} \cdot \text{cm})^{-1}$]

$$E = C_E \times \text{DLP}$$

Hoofdstuk 3 Radiobiologie en wet- en regelgeving

3.1 Grootheden en formules radiobiologie

Equivalente dosis (H_T) [Sv]	$H_T = D_T \cdot w_R$, waarin: w_R = stralingsweegfactor D_T = orgaan- of weefseldosis
Effectieve dosis (E) [Sv]	$E = \sum(H_T \cdot w_T)$, waarin, w_T = weefselweegfactor
Effectieve volg dosis $E(50)$ [Sv]	$E(50) = e(50) \cdot A_{\text{inname}}$, waarin: $e(50)$ = dosisconversiecoëfficiënt (DCC) [$\text{Sv} \cdot \text{Bq}^{-1}$] A_{inname} = activiteit [Bq] die via ingestie, inhalatie of injectie ingenomen is
Integrale dosis = totale geabsorbeerde stralingsenergie [J] of [kg • Gy]	Integrale dosis = $D_{\text{gem}} \cdot m$, waarin: D_{gem} = gemiddelde dosis over gehele massa van de patiënt of orgaan/weefsel [Gy] m = massa [kg] van gehele patiënt of orgaan/weefsel
Relatieve Biologische Effectiviteit (RBE_x) [-]	$\text{RBE}_x = D_{\text{ref}} / D_x$, waarin: D_{ref} = geabsorbeerde dosis referentiestraling D_x = geabsorbeerde dosis van straling X De doses D_{ref} en D_x veroorzaken hetzelfde biologische effect, onder dezelfde stralingsomstandigheden (zoals zuurstofgraad, fractionering en tijd). De referentiestraling is vaak röntgenstraling opgewekt met 200 kV - 250 kV buispanning
Oxygen Enhancement Ratio (zuurstof- versterkingsfactor) (OER) [-]	OER = dosis A zonder zuurstof / dosis B met zuurstof (hypoxisch / hyperoxisch), waarin: doses A en B hetzelfde biologische effect veroorzaken, bij dezelfde stralingssoort en fractionering en tijd
Linear Energy Transfer (lineïeke energie- overdracht) (LET) [$\text{keV} \cdot \mu\text{m}^{-1}$]	LET = energieoverdracht per eenheid van weglengte, de LET is evenredig met de lading in het kwadraat, de massa van het deeltje, de dichtheid van de materie en omgekeerd evenredig met de energie van het deeltje

3.2 Incidentie- en sterfterisico voor stochastische effecten

Orgaan/ weefsel	ICRP-60 (1991)		ICRP-103 (2007)	
	Incidentierisico [10 ⁻⁴ Sv ⁻¹]	Sterfterisico [10 ⁻⁴ Sv ⁻¹]	Incidentierisico [10 ⁻⁴ Sv ⁻¹]	Sterfterisico [10 ⁻⁴ Sv ⁻¹]
Beenmerg	50,5	50,0	41,9	28,0
Longen	89,5	85,0	114,2	101,5
Maag	122,2	110,0	79,1	65,5
Dikke darm	154,5	85,0	65,4	31,3
Borst*	40,0	20,0	112,1	33,0
Schildklier	80,0	8,0	32,5	2,2
Slokdarm	31,6	30,0	15,1	14,0
Blaas	60,0	30,0	43,4	12,0
Lever	15,8	15,0	30,3	28,9
Ovarium	14,3	10,0	10,6	6,0
Botoppervlak	6,9	5,0	7,0	3,2
Huid	1000,0	2,0	1000,0	2,0
Overige	70,4	50,0	143,8	70,5
Totaal	1735,7	500,0	1695,4	398,1

*Gemiddeld over mannen en vrouwen, dat wil zeggen:
voor vrouwen is het sterfterisico $66 \cdot 10^{-4} \text{ Sv}^{-1}$, voor mannen 0 (ICRP-103)

3.3 Weefselweegfactoren (w_T) voor het totale gewogen risico op stochastische effecten

Weefsels en organen	w_T (ICRP-60)	w_T (ICRP-103)
Gonaden	0,20	0,08
Beenmerg (rood)	0,12	0,12
Longen	0,12	0,12
Maag	0,12	0,12
Dikke darm (onderste deel)	0,12	0,12
Borstweefsel	0,05	0,12
Schildklier	0,05	0,04
Slokdarm	0,05	0,04
Blaas	0,05	0,04
Lever	0,05	0,04
Botoppervlak	0,01	0,01
Huid	0,01	0,01
Speekselklieren	-	0,01
Hersenen	-	0,01
Overige organen*	0,05	0,12
Totaal	1,00	1,00

*Voor rekendoeleinden wordt hier gedacht aan bijnieren, extrathoracale deel van de ademhalingswegen (ET), galblaas, hart, nieren, lymfeknopen, spieren, mondslijmvlies, alvleesklier, prostaat, milt, thymus en uterus. Gemiddelde dosis nemen en wegen met 0,12 (ICRP-103).

3.4 Stralingsweegfactoren (w_R)

ICRP-60 (1991)

Soort straling en energiegebied	w_R
Fotonen	1
Elektronen en muonen	1
Protonen > 2 MeV	5
α -deeltjes, splijtingsfragmenten, zware deeltjes	20
Neutronen < 10 keV	5
10 keV - 100 keV	10
> 100 keV - 2 MeV	20
> 2 MeV - 20 MeV	10
> 20 MeV	5

ICRP-103 (2007)

Soort straling en energiegebied	w_R
Fotonen	1
Elektronen en muonen	1
Protonen en geladen pionen	2
α -deeltjes, splijtingsfragmenten, zware ionen	20
Neutronen	Zie kader hier onder

Stralingsweegfactor voor neutronen (ICRP-103)

$$w_R = \begin{cases} 2.5 + 18.2e^{-[\ln(E_n)]^2/6}, & E_n < 1 \text{ MeV} \\ 5.0 + 17.0e^{-[\ln(2E_n)]^2/6}, & 1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV} \\ 2.5 + 3.25e^{-[\ln(0.04E_n)]^2/6}, & E_n > 50 \text{ MeV} \end{cases}$$

3.5 Kans op stochastische effecten in termen van detriment

ICRP-60 (1991)

	Detriment [10^{-3} Sv^{-1}]	
	alle leeftijden	beroeps bevolking
Kanker	60	48
Ernstige erfelijke effecten	13	8
Totaal	73	56

ICRP-103 (2007)

	Detriment [10^{-3} Sv^{-1}]	
	alle leeftijden	beroeps bevolking
Kanker	55	41
Ernstige erfelijke effecten	2	1
Totaal	57	42

3.6 Limietwaarden voor de effectieve dosis en equivalente dosis

Categorie	Orgaan	Blootgestelde werknemers 18 jaar en ouder	Blootgestelde werknemers tussen 16 en 18 jaar in opleiding	Alle overige personen binnen de locatie	Leden van de bevolking buiten de locatie
Effectieve dosis [mSv per jaar]		20	6	1	0,1
Equivalente dosis [mSv per jaar]	Ooglens	20 *	15	15	-
	Huid **	500	150	50	-
	Extremititeiten	500	150	50	-

* 20 mSv in één jaar of 100 mSv in 5 opeenvolgende jaren (maar dan max 50 mSv in 1 jaar)

** Gemiddeld over enig blootgesteld huidoppervlak van 1 cm².

Voor zwangere blootgestelde werknemers geldt dat het ongeboren kind vanaf het moment van de melding van de zwangerschap aan de ondernemer tot aan het eind van de zwangerschap de equivalente dosis 1 mSv niet zal overschrijven.

3.7 Maximaal toegestaan omgevingsdosisequivalenttempo ten gevolge van lekstraling bij toestellen

Toestel	Maximaal toegestaan omgevingsdosisequivalenttempo op 1 meter afstand van het focus	Maximaal toegestaan omgevingsdosisequivalenttempo op 5 cm van de omhulling
Radiodiagnostiektoestel (tevens simulator of lokalisator)	1 mSv • h ⁻¹	
Contacttherapieapparaat		1 mSv • h ⁻¹
Orthovolttoestel	10 mSv • h ⁻¹	300 mSv • h ⁻¹
Kobaltapparaat: A met open sluiters	10 mSv • h ⁻¹	
B met dichte sluiters	10 μSv • h ⁻¹	200 μSv • h ⁻¹
Lineaire versneller	0,1 % van het kermatempo in lucht op de as van de bundel in het isocentrum	

3.8 Maximaal toegestaan equivalent dosistempo bij opslag en transport van radioactieve bronnen

Op 10 cm afstand van het buitenoppervlak van de kluis bij opslag	1 μSv • h ⁻¹
Op het buitenoppervlak van de container / verpakking bij transport	2 mSv • h ⁻¹
Op 1 meter afstand van het oppervlak van de container / verpakking bij transport	0,1 mSv • h ⁻¹

4.2 Overzicht chemische symbolen

Element	Atoom- Nummer	Nederlands	Engels	Duits
Ac	89	Actinium	Actinium	Aktinium
Ag	47	Zilver	Silver	Silber
Al	13	Aluminium	Aluminium	Aluminium
Am	95	Americium	Americium	Amerizium
Ar	18	Argon	Argon	Argon
As	33	Arseen	Arsenic	Arsen
At	85	Astaat	Astatine	Astat(in)
Au	79	Goud	Gold	Gold
B	5	Boor	Boron	Bor
Ba	56	Barium	Barium	Barium
Be	4	Beryllium	Beryllium	Beryllium
Bh	107	Bohrium	Bohrium	Bohrium
Bi	83	Bismut	Bismuth	Wismut (Bismut)
Bk	97	Berkelium	Berkelium	Berkelium
Br	35	Broom	Bromine	Brom
C	6	Koolstof	Carbon	Kohlenstoff
Ca	20	Calcium	Calcium	Kalzium
Cd	48	Cadmium	Cadmium	Kadmium
Ce	58	Cerium	Cerium	Zer (Cer)
Cf	98	Californium	Californium	Kalifornium
Cl	17	Chloor	Chlorine	Chlor
Cm	96	Curium	Curium	Curium
Cn	112	Copernicium	Copernicium	Copernicium
Co	27	Kobalt	Cobalt	Kobalt
Cr	24	Chroom	Chromium	Chrom(ium)
Cs	55	Cesium	Cesium	Zäsium(Caesium)
Cu	29	Koper	Copper	Kupfer
Db	105	Dubnium	Dubnium	Dubnium
Ds	110	Darmstadtium	Darmstadtium	Darmstadtium
Dy	66	Dysprosium	Dysprosium	Dysprosium
Er	68	Erbium	Erbium	Erbium
Es	99	Einsteinium	Einsteinium	Einsteinium
Eu	63	Europium	Europium	Europium
F	9	Fluor	Fluorine	Fluor
Fe	26	IJzer	Iron	Eisen
Fl	114	Flerovium	Flerovium	Flerovium
Fm	100	Fermium	Fermium	Fermium
Fr	87	Francium	Francium	Franzium
Ga	31	Gallium	Gallium	Gallium
Gd	64	Gadolinium	Gadolinium	Gadolinium
Ge	32	Germanium	Germanium	Germanium
H	1	Waterstof	Hydrogen	Wasserstoff

Element	Atoom- Nummer	Nederlands	Engels	Duits
He	2	Helium	Helium	Helium
Hf	72	Hafnium	Hafnium	Hafnium
Hg	80	Kwik	Mercury	Quecksilber
Ho	67	Holmium	Holmium	Holmium
Hs	108	Hassium	Hassium	Hassium
In	49	Indium	Indium	Indium
Ir	77	Iridium	Iridium	Iridium
J(I)	53	Jodium	Iodine	Jod (Iod)
K	19	Kalium	Potassium	Kalium
Kr	36	Krypton	Krypton	Krypton
La	57	Lanthaan	Lanthanum	Lanthan
Li	3	Lithium	Lithium	Lithium
Lu	71	Lutetium	Lutetium	Lutetium
Lr	103	Lawrencium	Lawrencium	Lawrenzium
Lv	116	Livermorium	Livermorium	Livermorium
Md	101	Mendelevium	Mendelevium	Mendelevium
Mg	12	Magnesium	Magnesium	Magnesium
Mn	25	Mangaan	Manganese	Mangan
Mo	42	Molybdeen	Molybdenum	Molybdän
Ms	115	Moscovium	Moscovium	Moscovium
Mt	109	Meitnerium	Meitnerium	Meitnerium
N	7	Stikstof	Nitrogen	Stickstoff
Na	11	Natrium	Sodium	Natrium
Nb	41	Niobium	Niobium	Niob(ium)
Nd	60	Neodymium	Neodymium	Neodym(ium)
Ne	10	Neon	Neon	Neon
Nh	113	Nihonium	Nihonium	Nihonium
Ni	28	Nikkel	Nickel	Nickel
No	102	Nobelium	Nobelium	Nobelium
Np	93	Neptunium	Neptunium	Neptunium
O	8	Zuurstof	Oxygen	Sauerstoff
Og	118	Oganesson	Oganesson	Oganesson
Os	76	Osmium	Osmium	Osmium
P	15	Fosfor	Phosphorus	Phosphor
Pa	91	Protactinium	Protactinium	Protaktinium
Pb	82	Lood	Lead	Blei
Pd	46	Palladium	Palladium	Palladium
Pm	61	Promethium	Promethium	Promethium
Po	84	Polonium	Polonium	Polonium
Pr	59	Praseodymium	Praseodymium	Praseodym(ium)
Pt	78	Platina	Platinum	Platin
Pu	94	Plutonium	Plutonium	Plutonium
Ra	88	Radium	Radium	Radium
Rb	37	Rubidium	Rubidium	Rubidium
Re	75	Renium	Rhenium	Rhenium

Element	Atoom-Nummer	Nederlands	Engels	Duits
Rf	104	Rutherfordium	Rutherfordium	Rutherfordium
Rg	111	Röntgenium	Roentgenium	Röntgenium
Rh	45	Rodium	Rhodium	Rhodium
Rn	86	Radon	Radon	Radon
Ru	44	Ruthetium	Ruthenium	Ruthenium
S	16	Zwavel	Sulfur	Schwefel
Sb	51	Antimoon	Antimony	Antimon
Sc	21	Scandium	Scandium	Skandium
Se	34	Seleen	Selenium	Selen
Sg	106	Seaborgium	Seaborgium	Seaborgium
Si	14	Silicium	Silicon	Silizium (Silicium)
Sm	62	Samarium	Samarium	Samarium
Sn	50	Tin	Tin	Zinn
Sr	38	Strontium	Strontium	Strontium
Ta	73	Tantaal	Tantalium	Tantal
Tb	65	Terbium	Terbium	Terbium
Tc	43	Technetium	Technetium	Technetium
Te	52	Telluur	Tellurium	Tellur
Th	90	Thorium	Thorium	Thorium
Ti	22	Titaan	Titanium	Titan(ium)
Tl	81	Thallium	Thallium	Thallium
Tm	69	Thulium	Thulium	Thulium
Ts	117	Tenessine	Tenessine	Tenessine
U	92	Uraan	Uranium	Uran(ium)
V	23	Vanadium	Vanadium	Vanadium (Vanadin)
W	74	Wolfraam	Tungsten	Wolfram
Xe	54	Xenon	Xenon	Xenon
Y	39	Yttrium	Yttrium	Yttrium
Yb	70	Ytterbium	Ytterbium	Ytterbium
Zn	30	Zink	Zine	Zink
Zr	40	Zirkonium	Zirconium	Zirkonium

4.3 Atoomnummers en bindingsenergieën van elektronen in de verschillende schillen

Element	Z	E_K [keV]	E_L [keV]	E_M [keV]	E_N [keV]
Na	11	1,07	0,06	-	-
Al	13	1,56	0,12	0,01	-
Cu	29	8,98	1,10	0,12	0,01
Mo	42	20,0	2,87	0,51	0,06
I	53	33,2	5,19	1,07	0,19
La	57	38,9	6,27	1,36	0,27
Gd	64	50,2	8,38	1,88	0,38
W	74	69,5	12,1	2,82	0,59
Pb	82	88,0	15,9	3,85	0,89

4.4 Halveringstijden en luchtkermapoconstanten van enkele ingekapselde radioactieve bronnen

[s]: seconden, [min]: minuten, [h]: uren, [d]: dagen, [a]: jaren

Nuclide	Halveringstijd	Luchtkermapo- constanten (Γ) op 1 m van de bron [$\mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$]
⁷ Be	53,3 d	0,0068
¹¹ C	20,4 min	0,139
¹⁸ F	109,8 min	0,135
²² Na	2,60 a	0,28
²⁴ Na	15,0 h	0,43
²⁶ Al	7,16.10 ⁵ a	0,38
³⁸ Cl	37,2 min	0,162
⁴⁰ K	1,28.10 ⁹ a	0,018
⁴² K	12,36 h	0,032
⁴³ K	22,6 h	
⁴⁷ Ca	4,53 d	0,13
⁴⁶ Sc	83,8 d	0,26
⁴⁷ Sc	3,35 d	0,013
⁴⁴ Ti	47,3 a	0,016
⁴⁸ V	16,24 d	0,37
⁵¹ Cr	27,7 d	0,0042
⁵² Mn	5,6 d	
^{52m} Mn	21,2 min	0,307
⁵⁴ Mn	312,5 d	0,11
⁵⁸ Mn	2,58 h	0,203
⁵² Fe	8,275 h	0,180
⁵⁹ Fe	44,53 d	0,15
⁵⁶ Co	78,76 d	0,42
⁵⁷ Co	270,9 d	0,022
⁵⁸ Co	70,8 d	0,13
⁶⁰ Co	5,27 a	0,31
⁶⁵ Ni	2,52 h	0,0663
⁶⁴ Cu	12,7 h	0,026
⁶⁷ Cu	2,58 d	
⁶⁵ Zn	243,9 d	0,073
^{69m} Zn	13,76 h	
⁶⁶ Ga	9,40 h	
⁶⁷ Ga	78,26 h	0,018
⁶⁸ Ga	68 min	0,13
⁷² Ga	14,1 h	
⁷³ As	80,3 d	0,024
⁷⁴ As	17,76 d	0,11
⁷⁶ As	26,32 h	

Nuclide	Halveringstijd	Luchtkermaptempo- constanten (Γ) op 1 m van de bron [$\mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$]
⁷⁵ Se	119,8 d	0,15
⁷⁶ Br	16,2 h	
⁷⁷ Br	56 h	
⁸² Br	35,3 h	0,344
⁸⁵ Kr	10,72 a	$3,0 \cdot 10^{-4}$
⁸¹ Rb	4,58 h	0,15
^{82m} Rb	6,2 h	
⁸⁴ Rb	32,77 d	
⁸⁶ Rb	18,66 d	0,012
⁸⁵ Sr	64,84 d	0,13
^{87m} Sr	2,8 h	0,0706
⁹¹ Sr	9,52 h	0,089
⁸⁸ Y	106,64 d	0,37
⁹⁰ Y	64,0 h	
⁹¹ Y	58,51 d	0,0004
^{91m} Y	0,83 h	0,075
⁹⁵ Zr	64,0 d	0,098
^{93m} Nb	13,6 a	0,0078
⁹⁵ Nb	35,15 d	0,10
⁹⁹ Mo	66,0 h	0,022
^{99m} Tc	6,0 h	0,018
¹⁰³ Ru	39,28 d	0,066
¹⁰⁶ Ru	368,2 d	0,028
¹⁰⁵ Rh	35,36 h	0,010
¹⁰³ Pd	16,96 d	0,032
^{110m} Ag	249,9 d	0,35
¹¹¹ Ag	7,45 d	0,0037
¹⁰⁹ Cd	464 d	0,024
^{115m} Cd	44,6 d	0,0028
¹¹¹ In	2,83 d	0,076
^{113m} In	1,658 h	0,042
^{114 m} In	49,5 d	0,023
^{115 m} In	4,486 h	
¹²⁵ Sn	9,64 d	
¹²² Sb	2,70 d	
¹²⁴ Sb	60,2 d	0,23
¹²⁵ Sb	2,77 a	0,068
¹²⁶ Sb	12,4 d	
^{127m} Te	109 d	0,01
^{129m} Te	33,6 d	0,018
¹³² Te	78,2 h	0,142
¹²³ I	13,2 h	0,038

Nuclide	Halveringstijd	Luchtkermapo- constanten (Γ) op 1 m van de bron [$\mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$]
¹²⁴ I	4,18 h	0,236
¹²⁵ I	60,14 d	0,034
¹²⁹ I	1,57.10 ⁷ a	0,015
¹³¹ I	8,04 d	0,052
¹²⁷ Xe	36,41 d	0,051
¹³³ Xe	5,245 d	0,012
¹²⁹ Cs	32,06 h	
¹³⁰ Cs	29,9 min	
¹³¹ Cs	9,7 d	
¹³⁴ Cs	2,062 a	0,21
^{134m} Cs	2,90 h	
¹³⁷ Cs	30,0 a	0,077
¹³¹ Ba	11,8 d	
¹³³ Ba	10,74 a	0,069
^{133m} Ba	38,9 h	
^{135m} Ba	28,7 h	
¹⁴⁰ Ba	12,74 d	0,029
¹³⁹ Ce	137,66 d	0,028
¹⁴¹ Ce	32,5 d	0,010
¹⁴³ Ce	33,0 h	
¹⁴⁴ Ce	284,3 d	0,0030
¹⁴⁴ Pr	17,3 min	0,0037
¹⁴⁷ Nd	10,98 d	0,021
¹⁵² Eu	13,33 a	0,150
¹⁵⁴ Eu	8,80 a	
¹⁵⁶ Eu	15,2 d	
¹⁵³ Gd	242 d	0,0020
¹⁶⁰ Tb	72,3 d	0,139
^{166m} Ho	1,2.10 ³ a	0,211
¹⁷⁰ Tm	128,6 d	0,0007
¹⁶⁹ Yb	32,0 d	0,043
¹⁷⁷ Lu	6,71 d	0,043
¹⁸¹ Hf	42,4 d	0,072
¹⁸² Ta	115,0 d	0,161
¹⁸⁶ Re	90,64 h	0,002
¹⁸⁸ Re	16,98 h	
¹⁸⁵ Os	94,0 d	0,095
¹⁹¹ Os	15,4 d	0,008
¹⁹² Ir	74,0 d	0,109
¹⁹⁵ Au	183,0 d	0,010
¹⁹⁸ Au	2,70 d	0,055
¹⁹⁷ Hg	64,1 h	0,008

Nuclide	Halveringstijd	Luchtkermatem- constanten (Γ) op 1 m van de bron [$\mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$]
^{203}Hg	46,6 d	0,044
^{201}Tl	3,044 d	0,011

4.5 Dosisconversiecoëfficiënten en halveringstijden van enkele open radioactieve bronnen voor blootgestelde werknemers van 18 jaar en ouder

s = seconden, min = minuten, h = uren, d = dagen, a = jaren

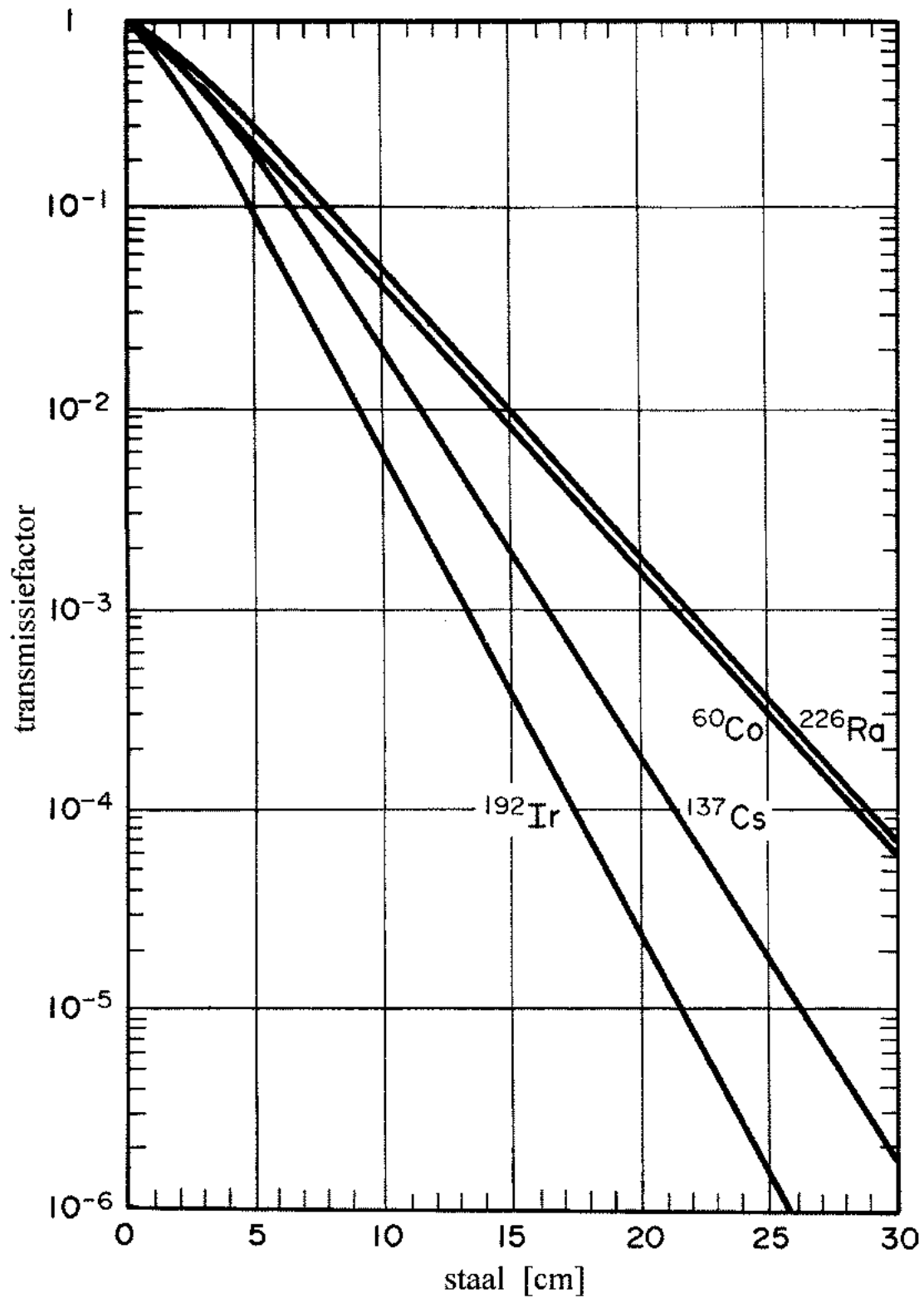
Nuclide	$e(50)_{ingestie}$ [Sv • Bq ⁻¹]	$e(50)_{inhalatie}$ [Sv • Bq ⁻¹]	HVT
³ H	1,8. 10 ⁻¹¹	1,8. 10 ⁻¹¹	12,35 a
⁷ Be	2,8. 10 ⁻¹¹	4,3. 10 ⁻¹¹	53,3 d
¹⁴ C	5,8. 10 ⁻¹⁰	5,8. 10 ⁻¹⁰	5730 a
¹⁸ F	4,9. 10 ⁻¹¹	5,4. 10 ⁻¹¹	109,8 min
²² Na	3,2. 10 ⁻⁹	2,0. 10 ⁻⁹	2,60 a
³² P	2,4. 10 ⁻⁹	1,1. 10 ⁻⁹	14,3 d
³⁵ S	1,4. 10 ⁻¹⁰	8,0. 10 ⁻¹¹	87,4 d
³⁶ Cl	9,3. 10 ⁻¹⁰	4,9. 10 ⁻¹⁰	3,0.10 ⁵ a
⁴⁰ K	6,2. 10 ⁻⁹	3,0. 10 ⁻⁹	1,28.10 ⁹ a
⁴⁵ Ca	7,6. 10 ⁻¹⁰	2,3. 10 ⁻⁹	163 d
⁵¹ Cr	3,8. 10 ⁻¹¹	3,0. 10 ⁻¹¹	27,7 d
⁵⁴ Mn	7,1. 10 ⁻¹⁰	1,1. 10 ⁻⁹	312,5 d
⁵⁹ Fe	1,8. 10 ⁻⁹	3,0. 10 ⁻⁹	44,53 d
⁶⁰ Co	3,4. 10 ⁻⁹	7,1. 10 ⁻⁹	5,27 a
⁶³ Ni	1,5. 10 ⁻¹⁰	5,2. 10 ⁻¹⁰	96 a
⁶⁴ Cu	1,2. 10 ⁻¹⁰	6,8. 10 ⁻¹¹	12,7 h
⁶⁵ Zn	3,9. 10 ⁻⁹	2,8. 10 ⁻⁹	234,9 d
⁹⁰ Sr	2,8. 10 ⁻⁸	3,0. 10 ⁻⁸	29,12 a
^{99m} Tc	2,2. 10 ⁻¹¹	2,0. 10 ⁻¹¹	6,0 h
¹²³ I	2,1. 10 ⁻¹⁰	1,1. 10 ⁻¹⁰	13,2 h
¹²⁵ I	1,5. 10 ⁻⁸	7,3. 10 ⁻⁹	60,14 d
¹³¹ I	2,2. 10 ⁻⁸	1,1. 10 ⁻⁸	8,04 d
¹³⁷ Cs	1,3. 10 ⁻⁸	6,7. 10 ⁻⁹	30,0 a
¹⁹⁷ Hg	2,3. 10 ⁻¹⁰	1,0. 10 ⁻¹⁰	64,1 h
²²⁶ Ra	2,8. 10 ⁻⁷	2,2. 10 ⁻⁶	1600 a
²³² Th	2,2. 10 ⁻⁷	2,9. 10 ⁻⁵	1,4.10 ¹⁰ a
²³⁸ U	4,4. 10 ⁻⁸	5,8. 10 ⁻⁷	4,5.10 ⁹ a

Opmerking:

De dosisconversiecoëfficiënt $e(50)$ [Sv • Bq⁻¹] wordt ook wel aangeduid met DCC of met effectief dosiscoëfficiënt.

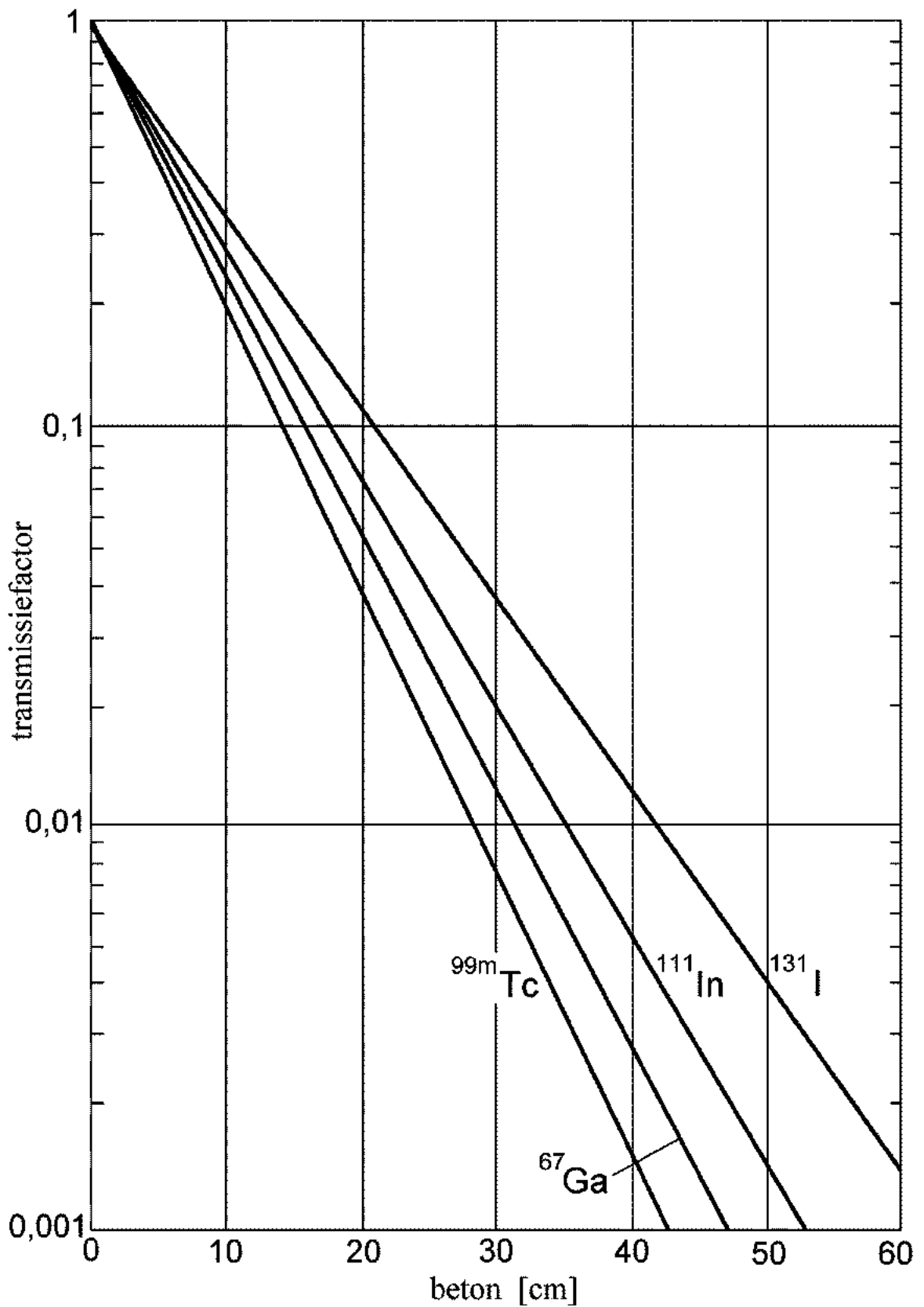
Hoofdstuk 5 Grafieken radionucliden

5.1 Transmissiefactor van ^{192}Ir , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{226}Ra door staal



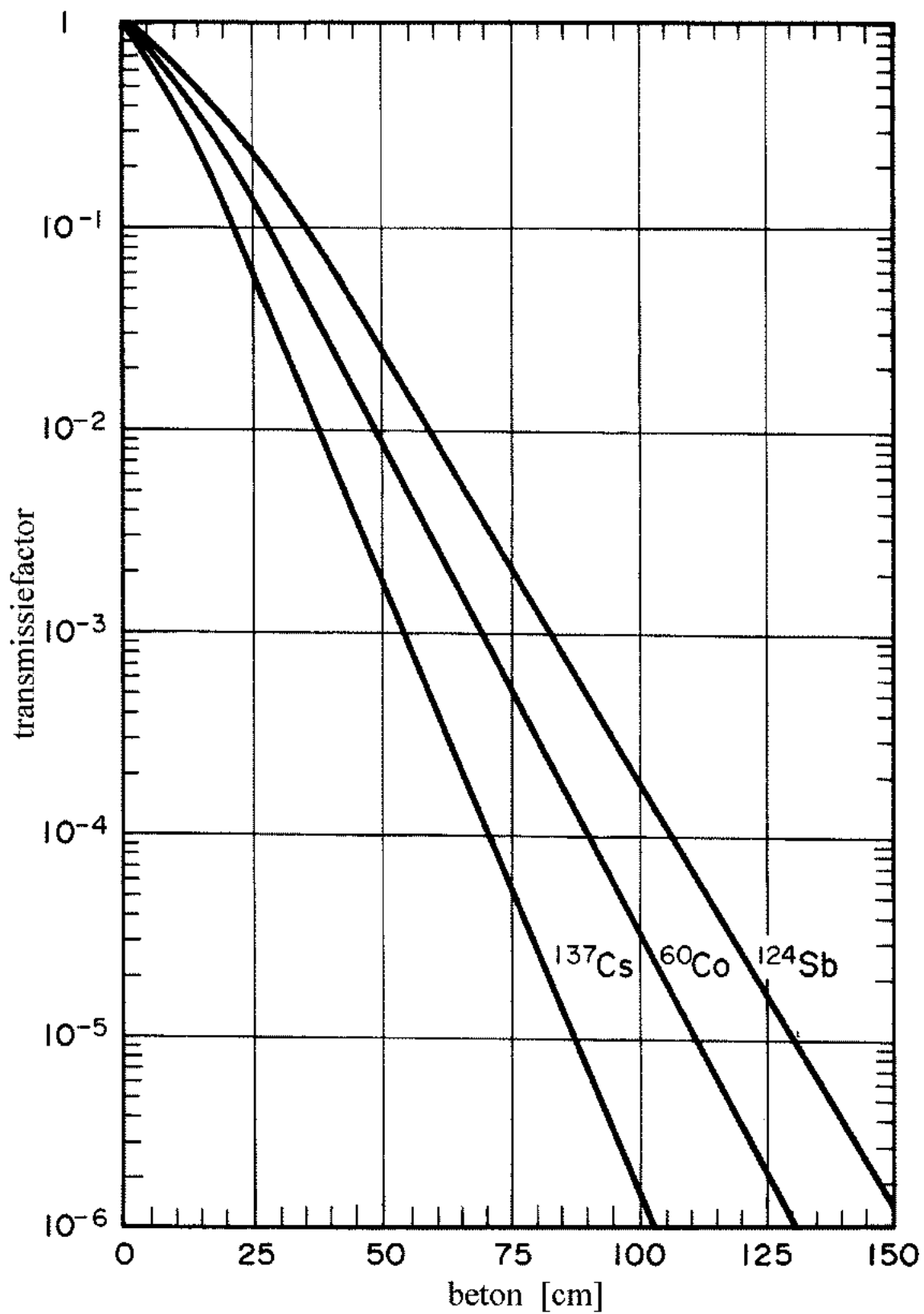
Transmissiefactor van brede bundels gammastraling van diverse radionucliden door staal, dichtheid $7,8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

5.2 Transmissiefactor van ^{99m}Tc , ^{67}Ga , ^{111}In , ^{131}I door beton



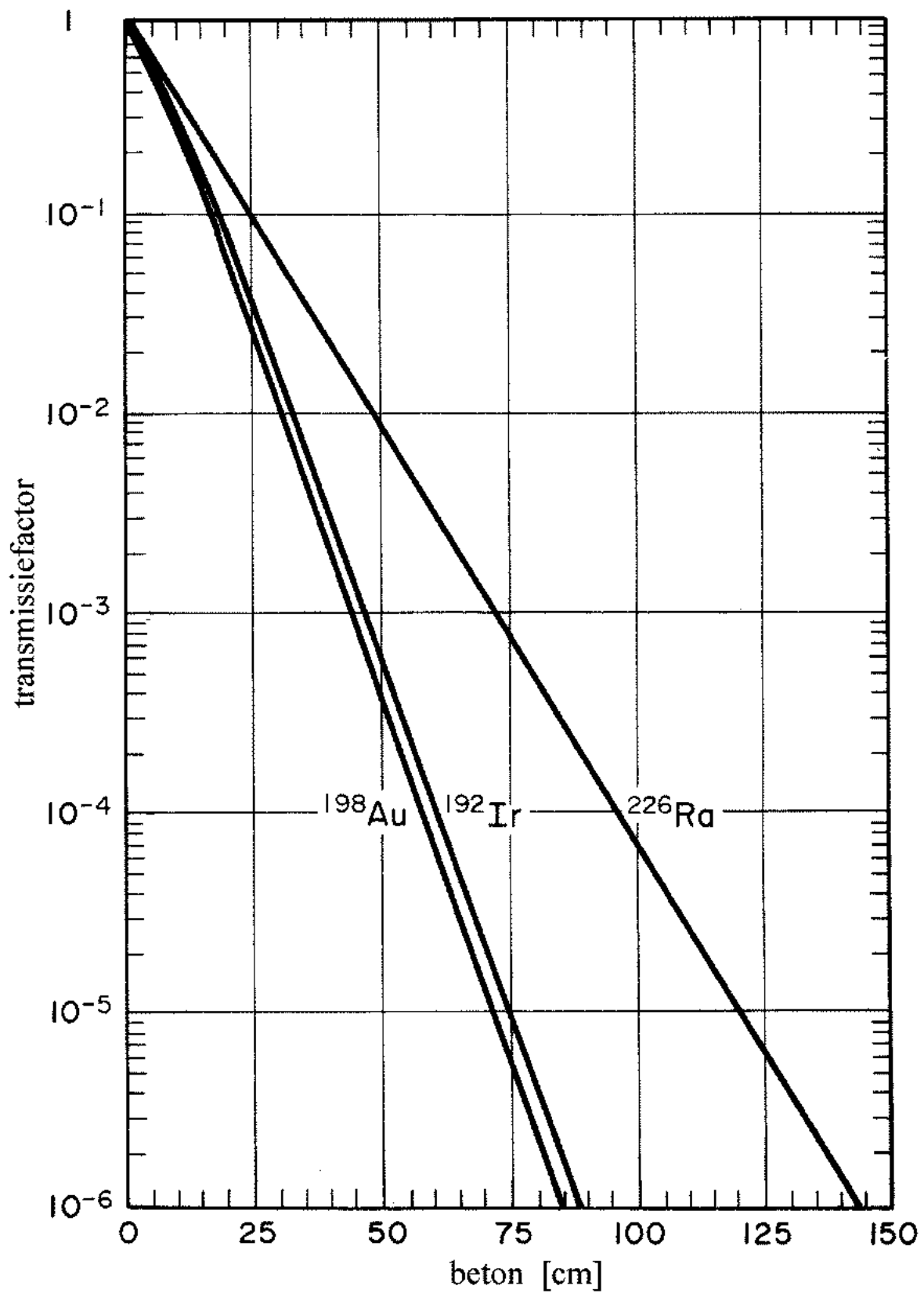
Transmissiefactor van brede bundels gammastraling van diverse radionucliden door beton, dichtheid $2,35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

5.3 Transmissiefactor van ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{124}Sb door beton



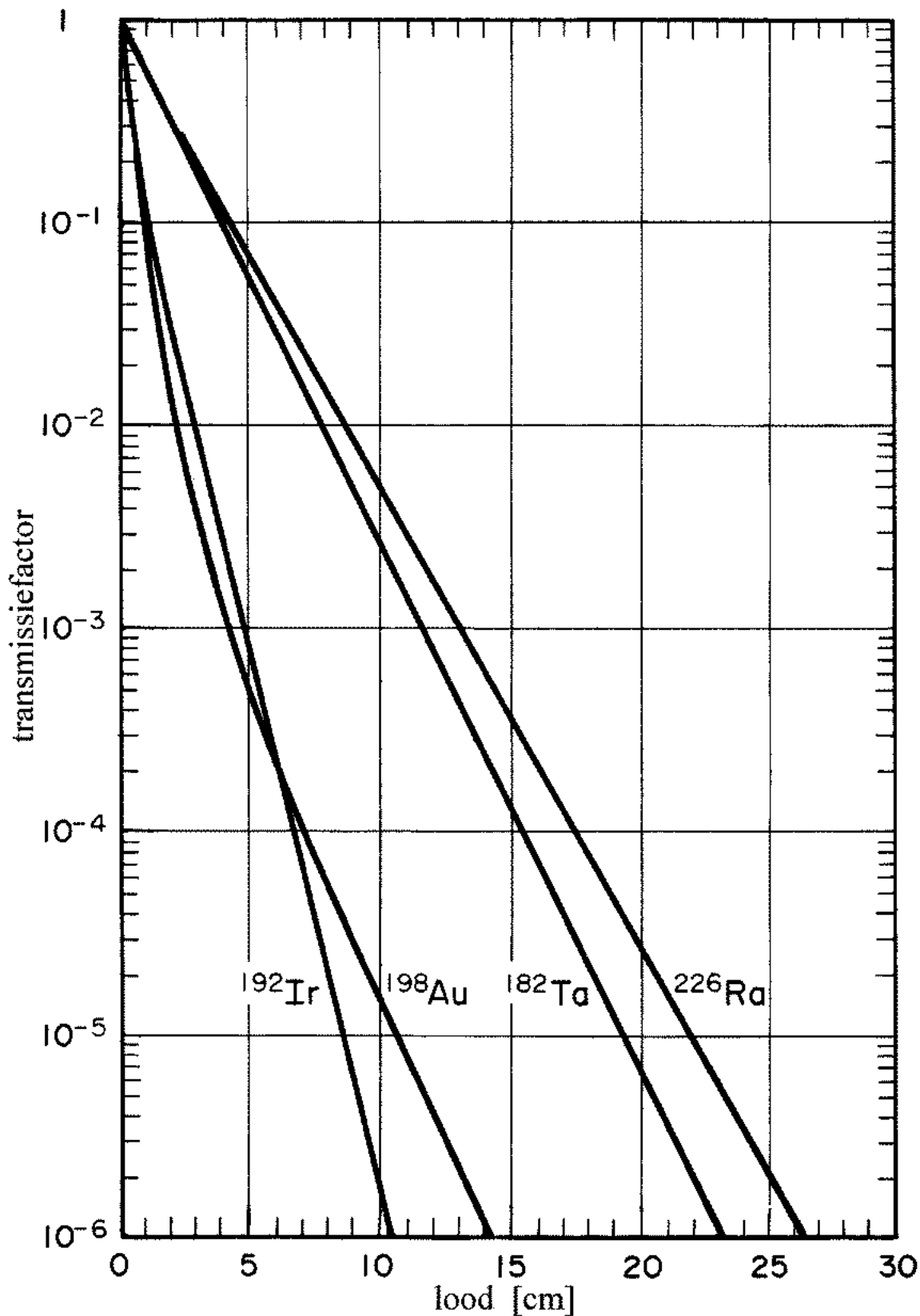
Transmissiefactor van brede bundels gammastraling van diverse radionucliden door beton, dichtheid $2,35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

5.4 Transmissiefactor van ^{198}Au , ^{192}Ir , ^{226}Ra door beton



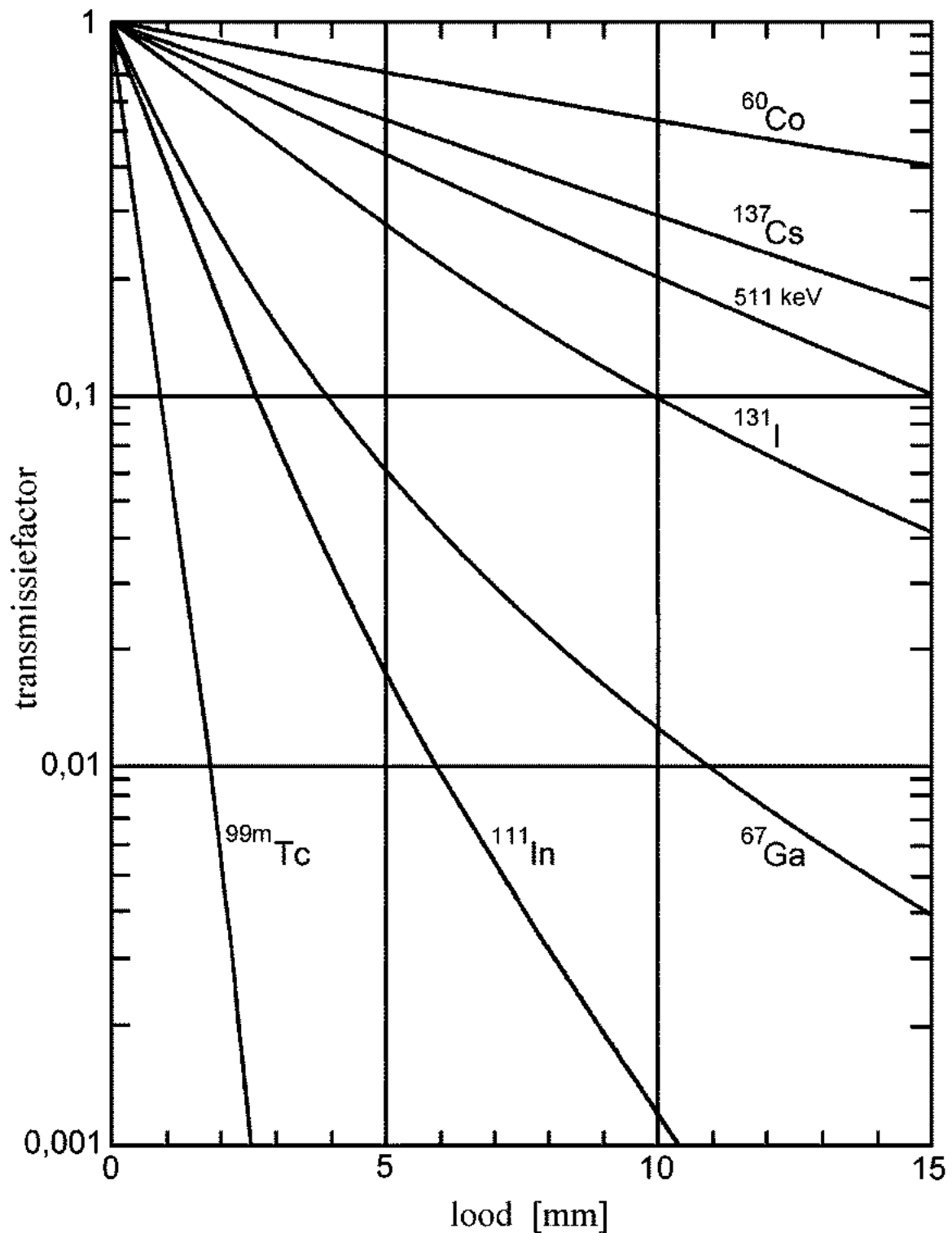
Transmissiefactor van brede bundels gammastraling van diverse radionucliden door beton, dichtheid 2,35 g • cm⁻³

5.5 Transmissiefactor van ^{192}Ir , ^{198}Au , ^{182}Tl , ^{226}Ra door lood



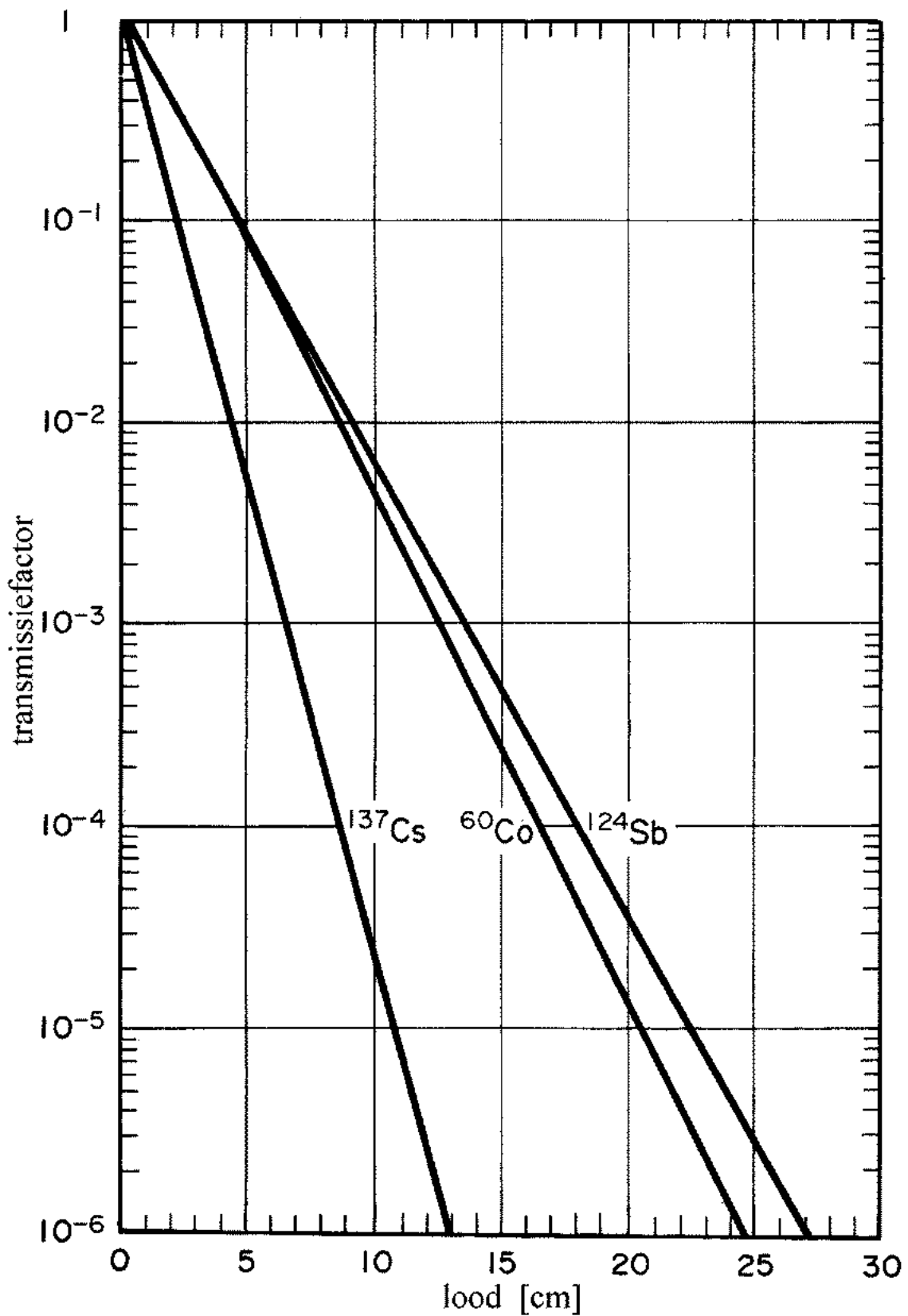
Transmissiefactor van brede bundels gammastraling van diverse radionucliden door lood, dichtheid $11,35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

5.6 Transmissiefactor van ^{99m}Tc , ^{111}In , ^{67}Ga , ^{131}I , 511 keV, ^{137}Cs , ^{60}Co door lood



Transmissiefactor bij brede bundels gammastraling en annihilatiestraling door lood, dichtheid $11,35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

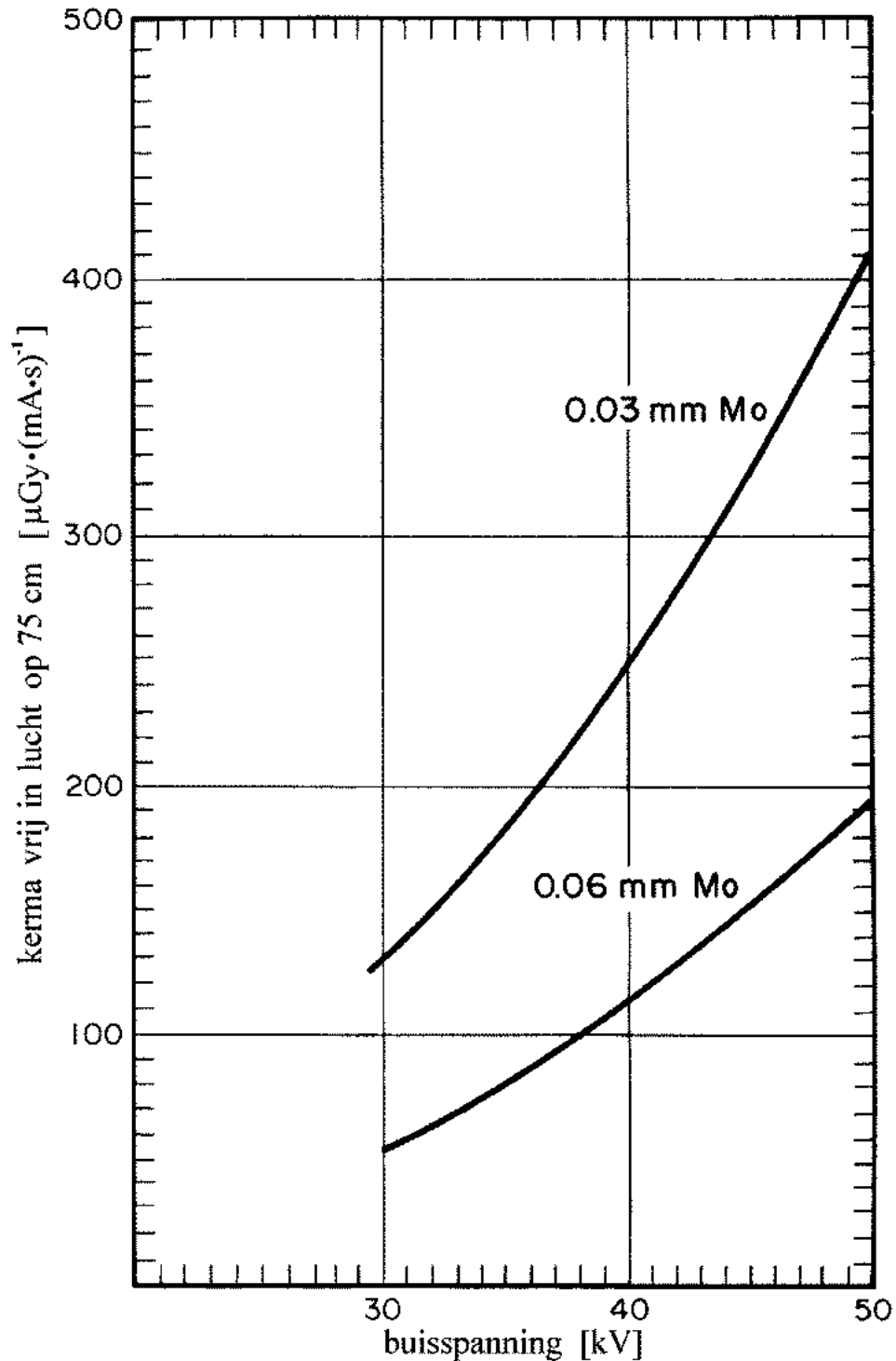
5.7 Transmissiefactor van ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{124}Sb door lood



Transmissiefactor van brede bundels gammastraling van diverse radionucliden door lood, dichtheid $11,35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

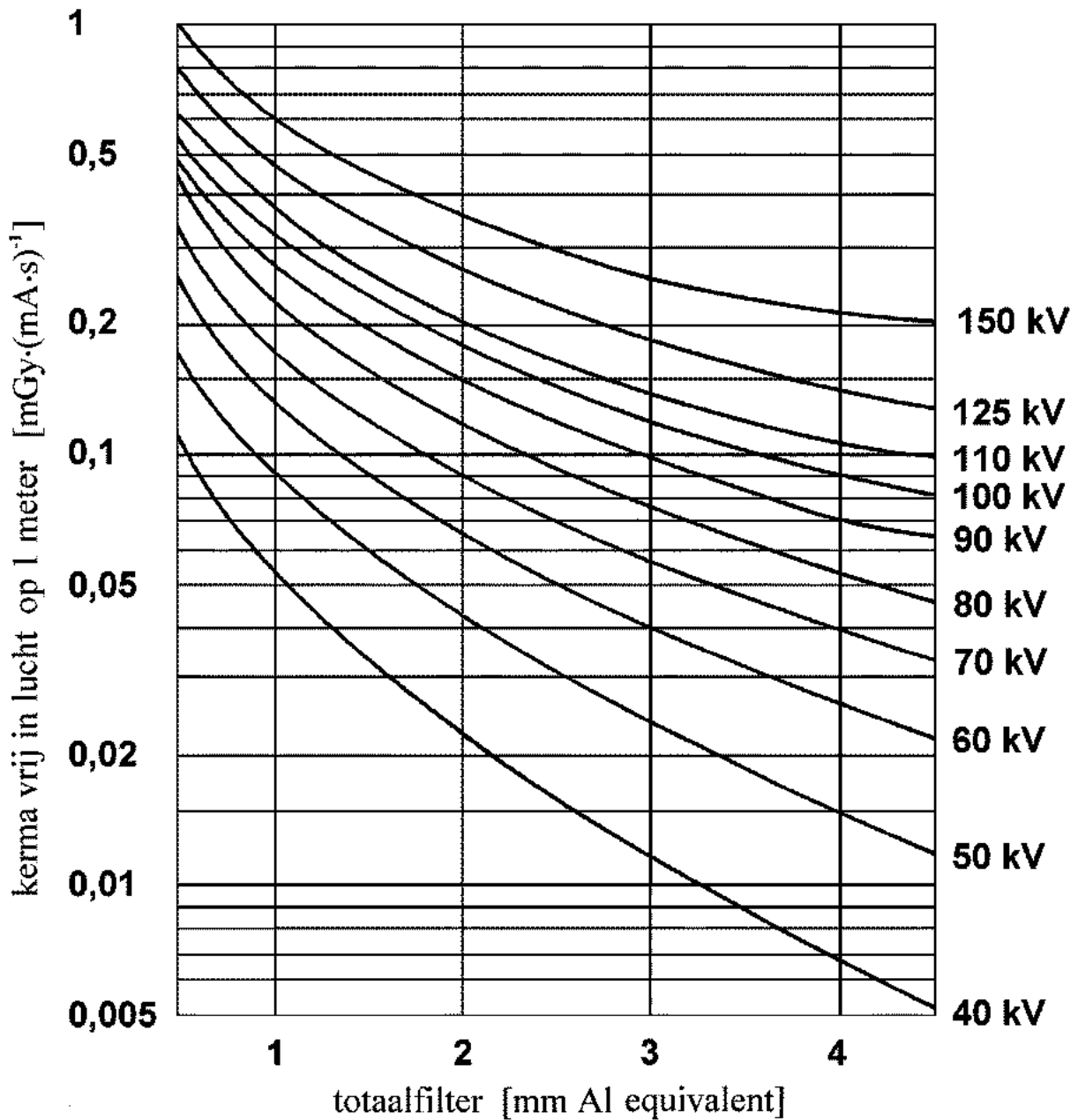
Hoofdstuk 6 Grafieken röntgenstraling

6.1 Kerma vrij in lucht per eenheid van lading bij een mammografietoestel



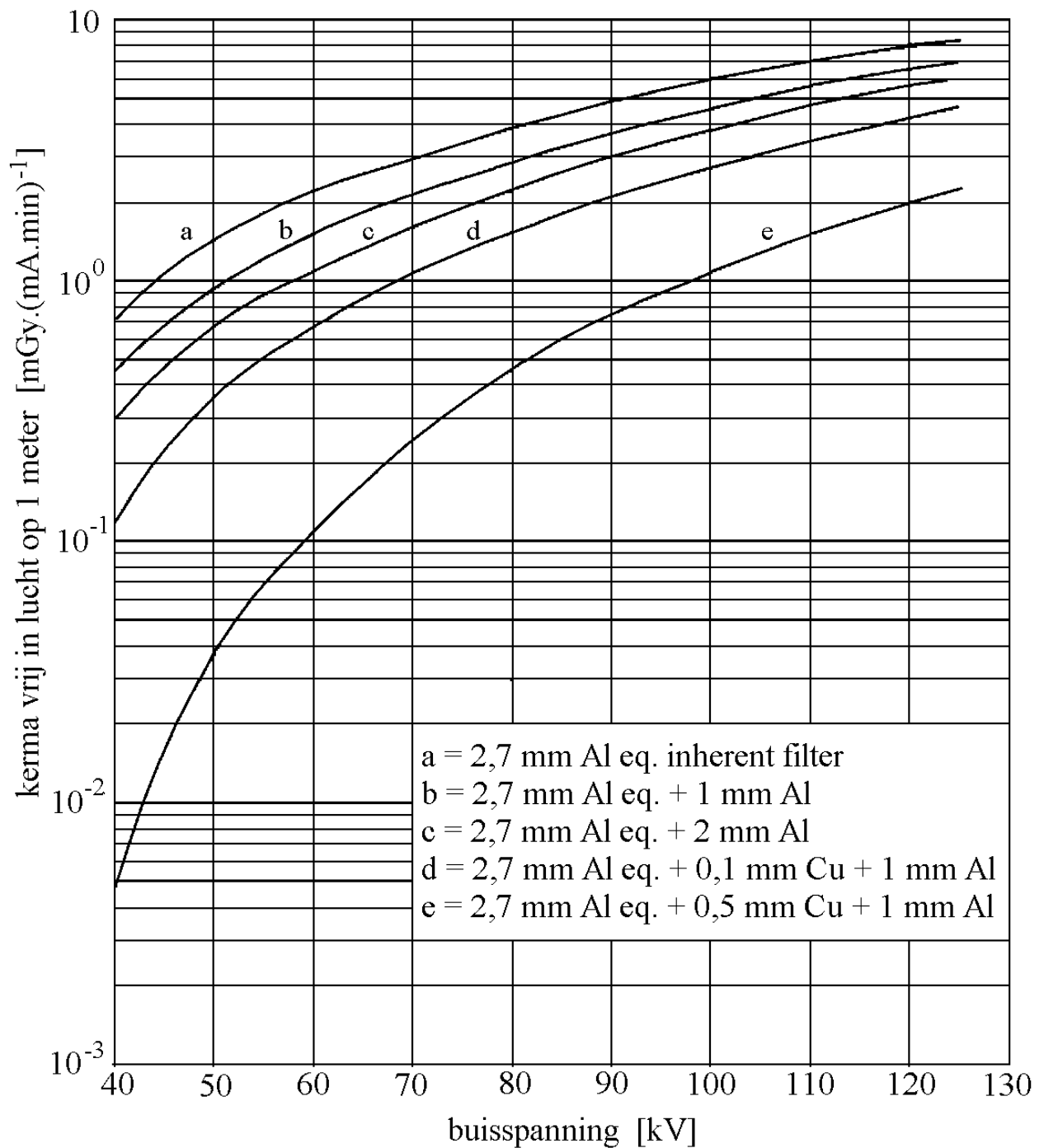
Kerma vrij in lucht per eenheid van lading [$\mu\text{Gy} \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$], op 75 cm van het focus, multipulsgenerator, molybdeen anode, anodehoek 17° , filterdikten: (1 mm Be + 0,03 mm Mo) en (1 mm Be + 0,06 mm Mo)

6.2 Kerma vrij in lucht per eenheid van lading bij aluminiumfiltratie



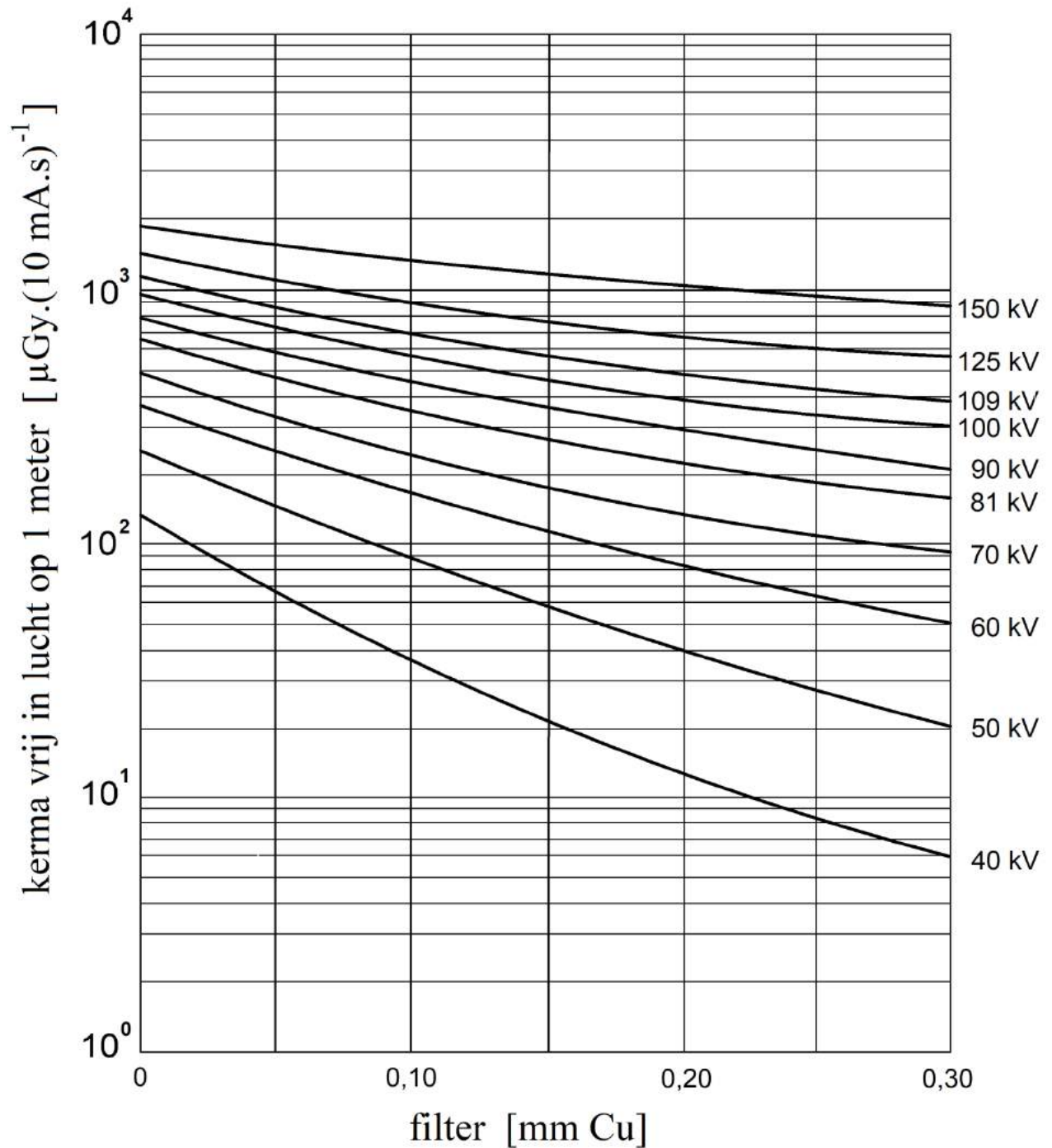
Kerma vrij in lucht per eenheid van lading [$\text{mGy} \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$] op 1 meter van het focus, multipulsgenerator, wolfram anode, voor diverse buisspanningen als functie van de dikte van het aluminiumfilter

6.3 Kerma vrij in lucht per eenheid van lading bij aluminium- en koperfiltratie



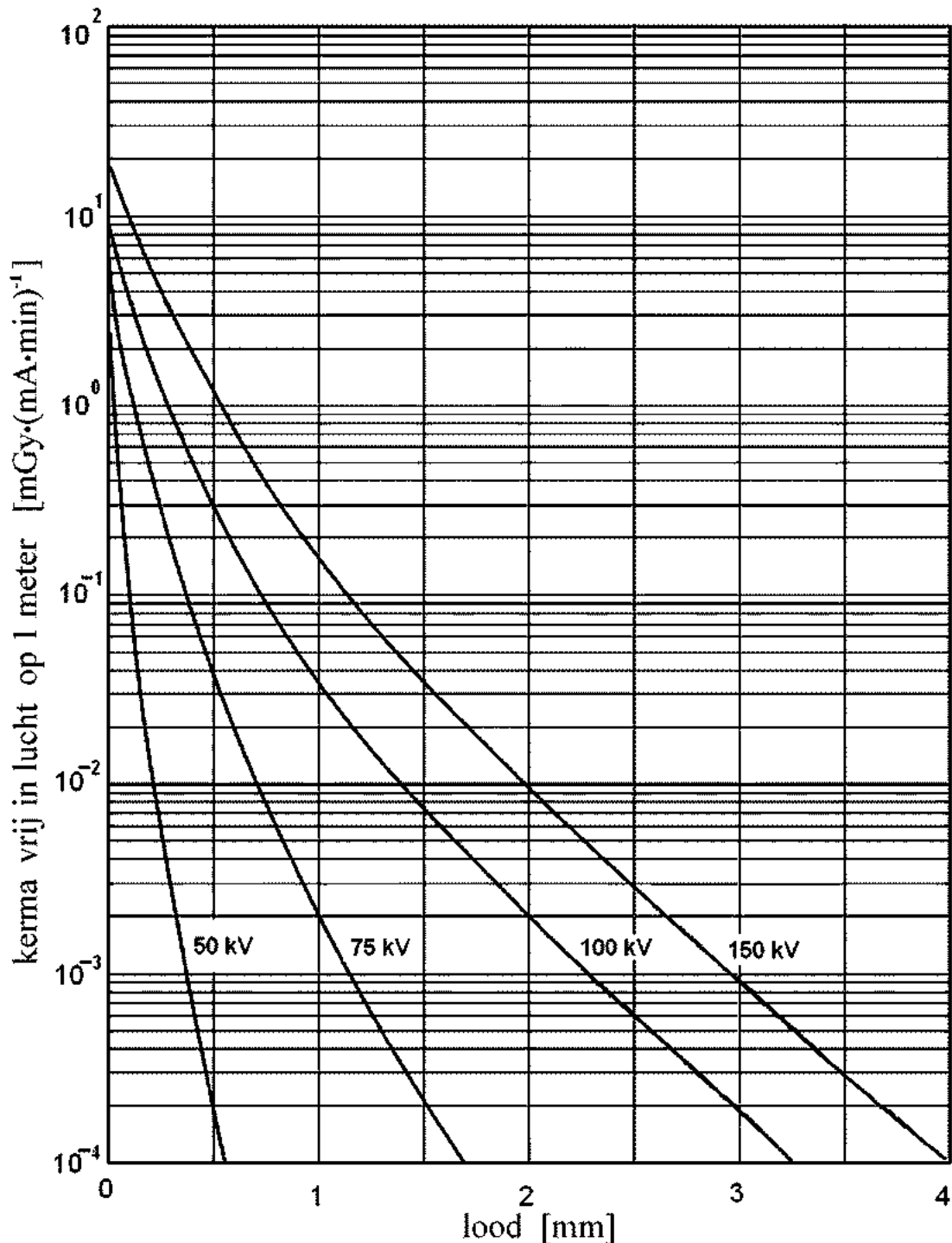
Kerma vrij in lucht per eenheid van lading [$\text{mGy} \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$] op 1 meter van het focus, multipulsgenerator, wolfram anode, voor diverse buisfilters als functie van de buisspanning

6.4 Kerma vrij in lucht per eenheid van lading bij koperfiltratie



Kerma vrij in lucht per eenheid van lading [$\mu\text{Gy} \cdot (10 \text{ mA} \cdot \text{s})^{-1}$] op 1 meter van het focus, multipulsgenerator, wolfram anode, voor diverse buisspanningen als functie van de dikte van het koperfilter

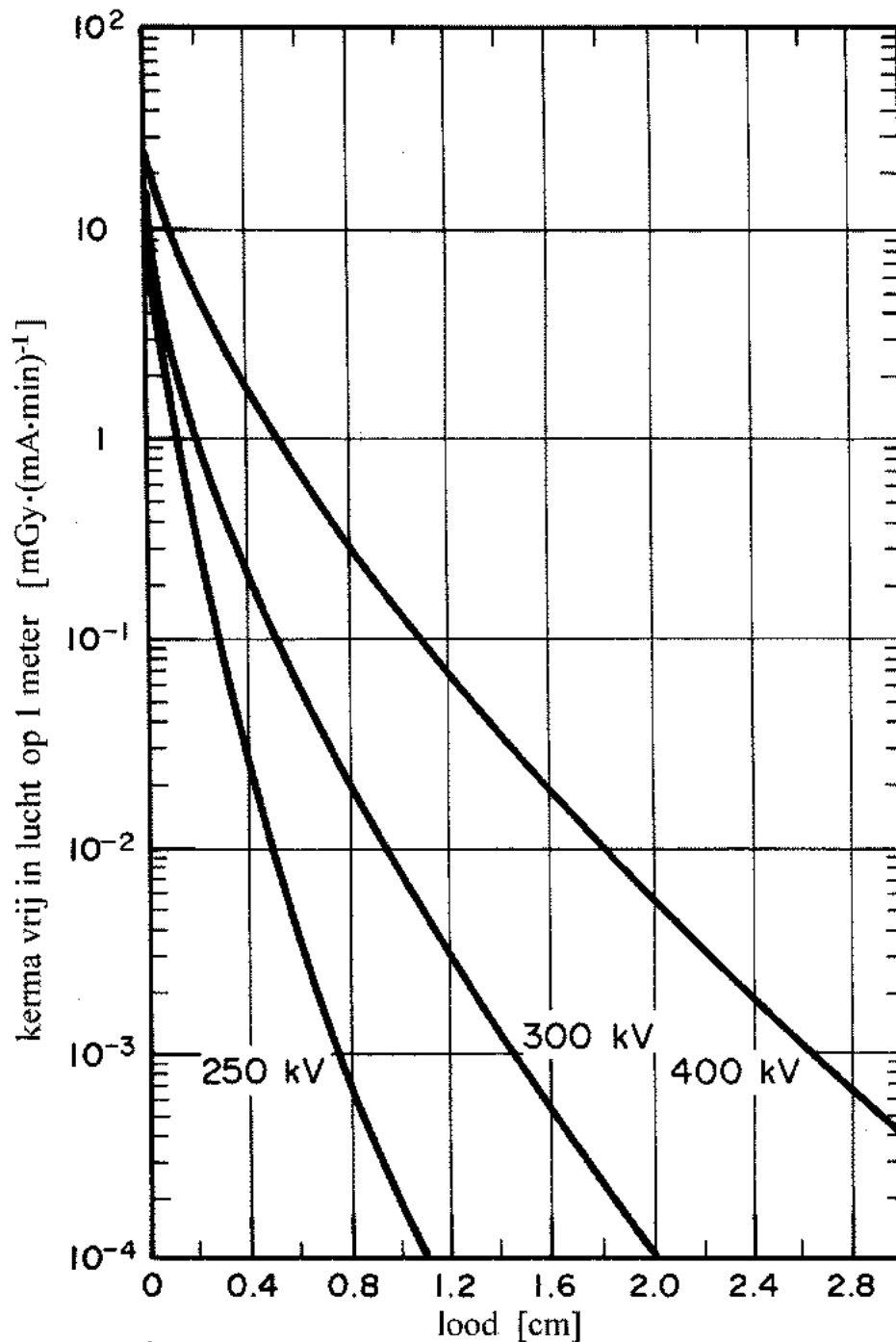
6.5 Kerma vrij in lucht per eenheid van lading van röntgenstraling door lood (1)



Kerma vrij in lucht per eenheid van lading [$\text{mGy} \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$] op 1 meter van het focus van een brede bundel röntgenstraling door lood, dichtheid $11,35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, multipulsgenerator, wolfram anode

buisspanning	50 kV	75 kV	100 kV	150 kV
filtratie	2 mm Al	2 mm Al	2 mm Al	2 mm Al
snijpunt y-as	2,6	6,1	9,6	18,3

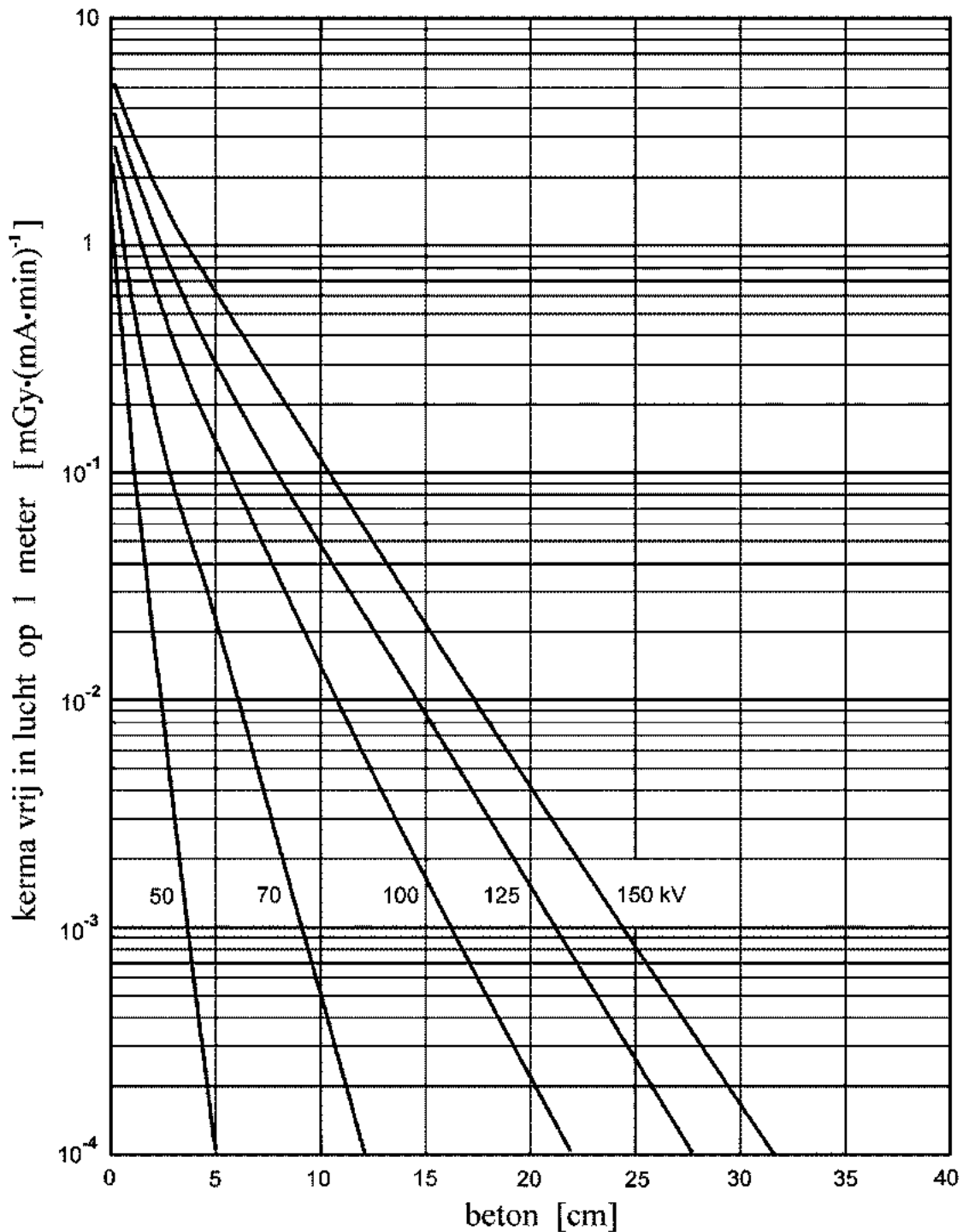
6.6 Kerma vrij in lucht per eenheid van lading van röntgenstraling door lood (2)



Kerma vrij in lucht per eenheid van lading [$\text{mGy} \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$] op 1 meter van het focus van een brede bundel röntgenstraling door lood, dichtheid $11,35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, multipulsgenerator

buisspanning	250 kV	300 kV	400 kV
anodemateriaal	W	Au	Au
filtratie	0,5 mm Cu	3 mm Cu	3 mm Cu
snijpunt y-as	16,5	11,3	23,5

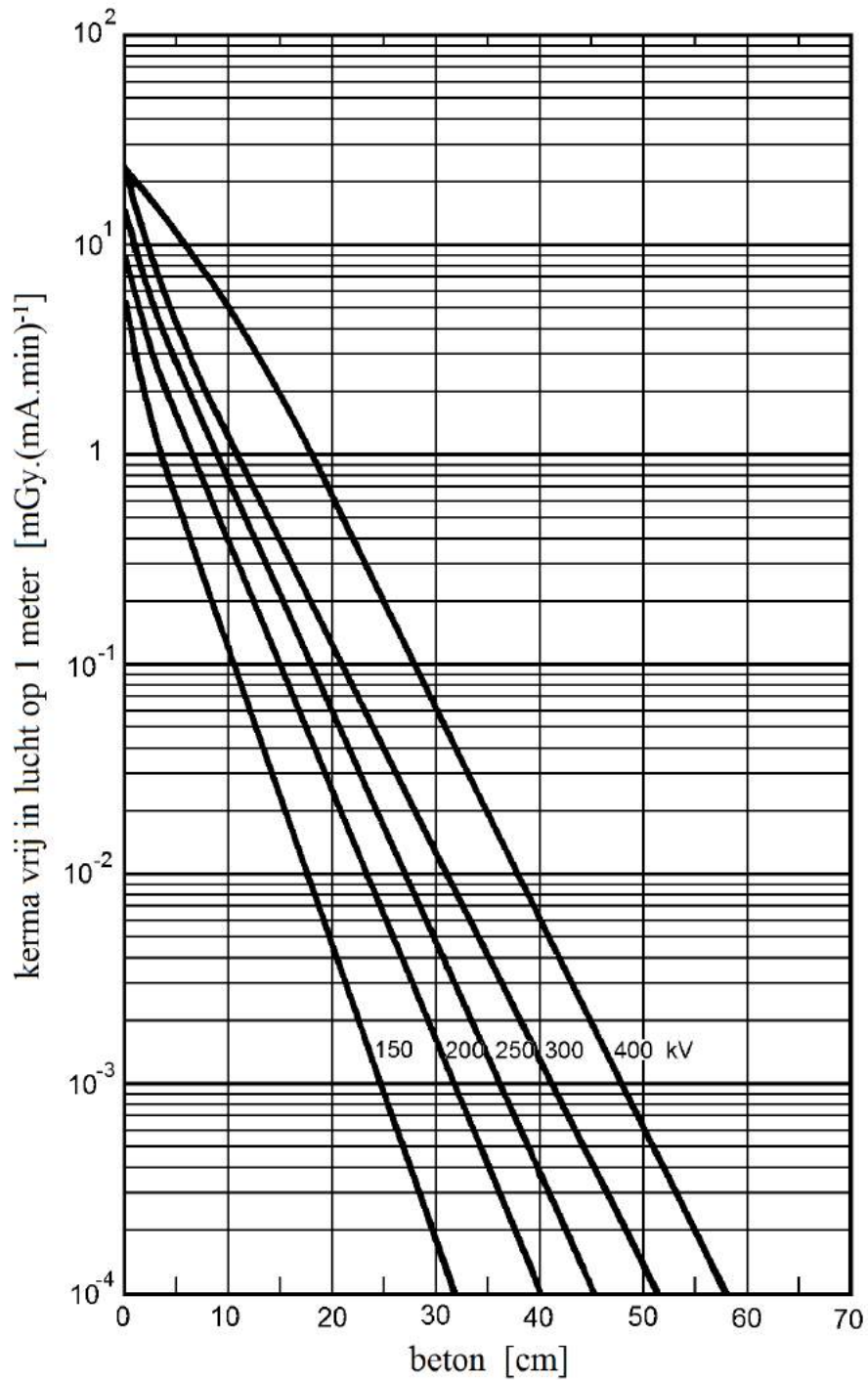
6.7 Kerma vrij in lucht per eenheid van lading van röntgenstraling door beton (1)



Kerma vrij in lucht per eenheid van lading [$\text{mGy} \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$] op 1 meter van het focus van een brede bundel röntgenstraling door beton, dichtheid $2,35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 1-puls generator, wolframe anode

buisspanning	50 kV	70 kV	100 kV	125 kV	150 kV
filtratie	1 mm Al	1,5 mm Al	2 mm Al	3 mm Al	3 mm Al
snijpunt y-as	1,7	2,1	2,8	3,9	5,2

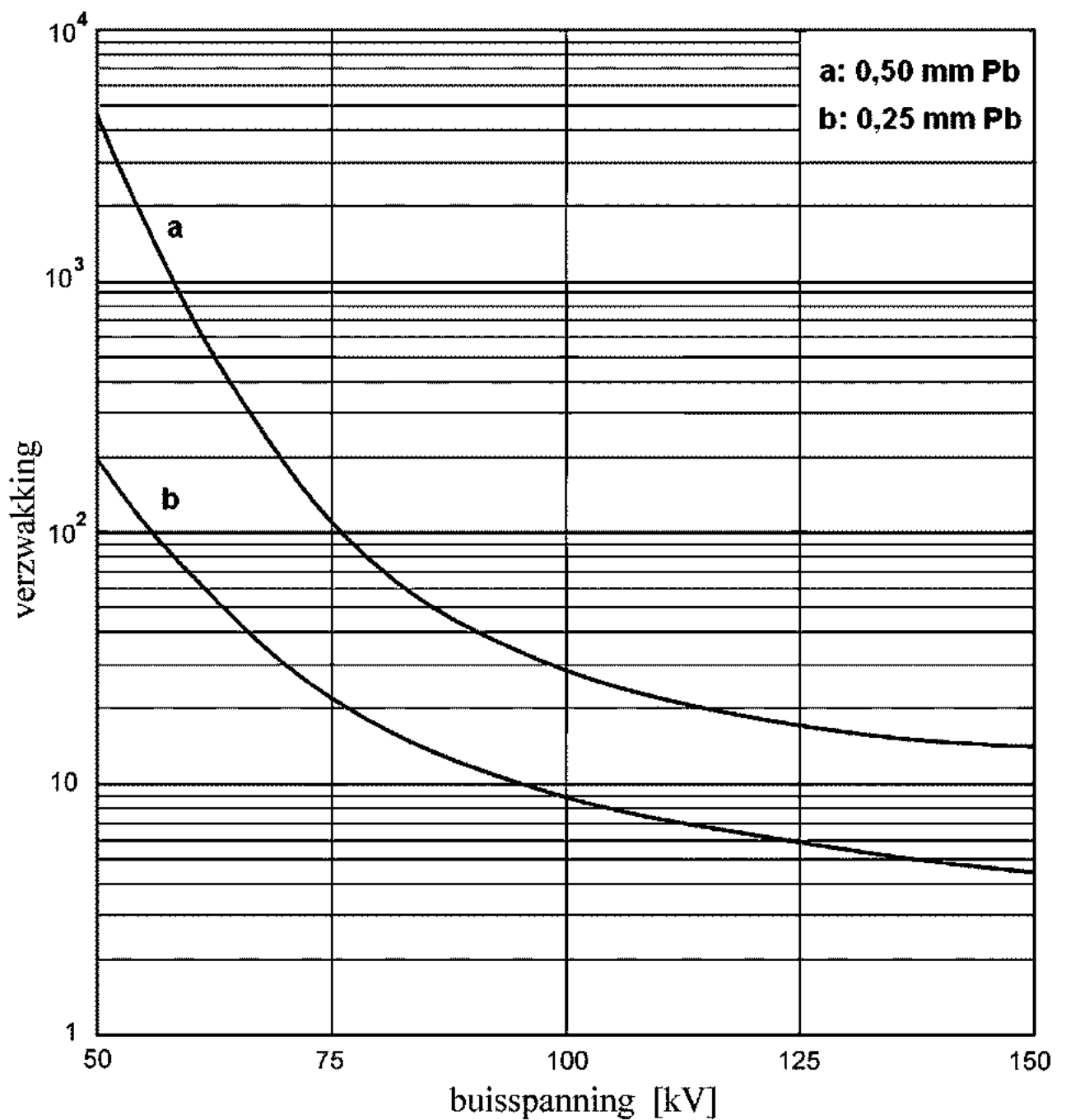
6.8 Kerma vrij in lucht per eenheid van lading van röntgenstraling door beton (2)



Kerma vrij in lucht per eenheid van lading [$\text{mGy} \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$] op 1 meter van het focus van een brede bundel röntgenstraling door beton, dichtheid $2,35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

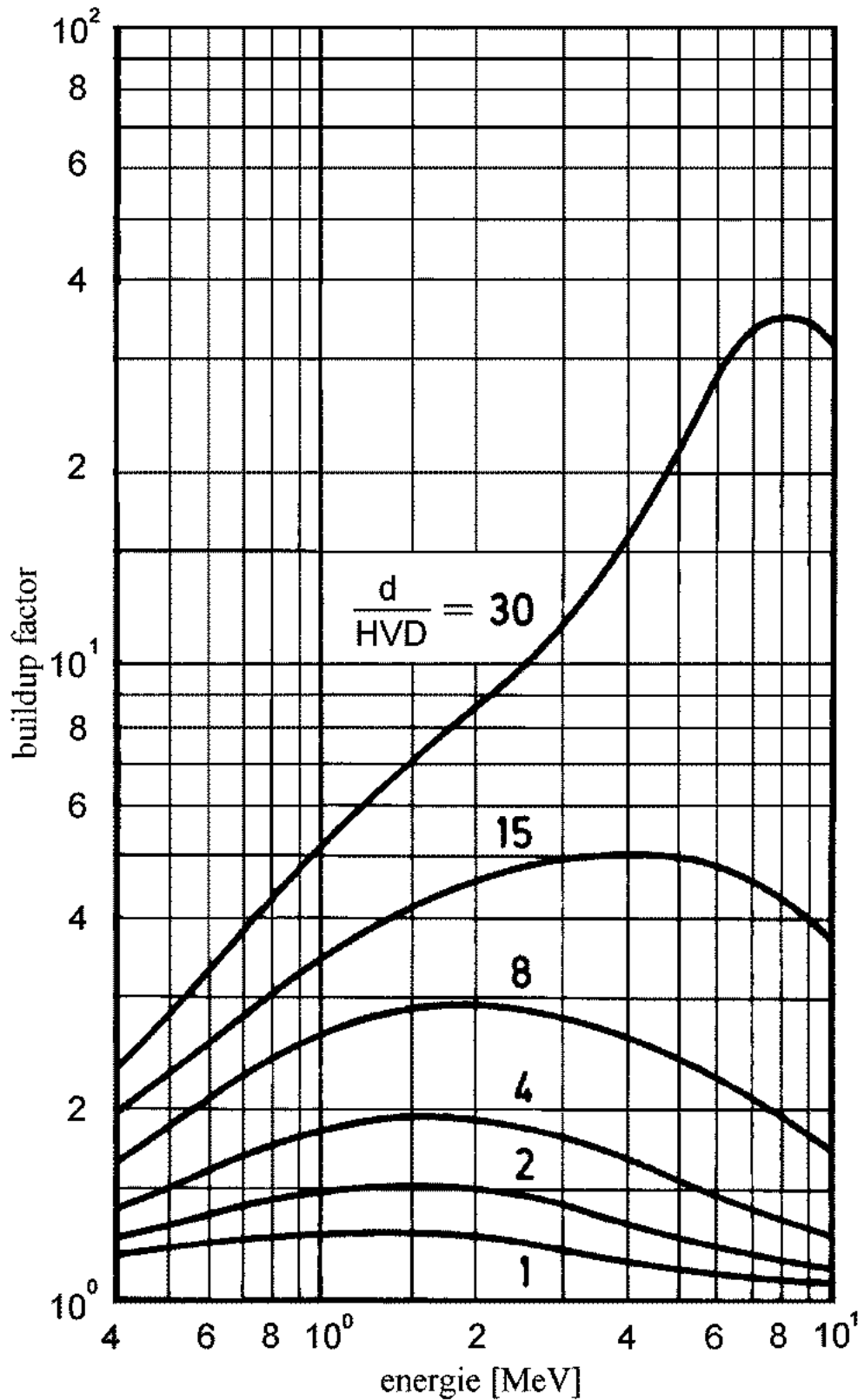
buisspanning	150 kV	200 kV	250 kV	300 kV	400 kV
spanningsvorm	1 puls	1 puls	1 puls	1 puls	Constant
anodemateriaal	W	W	W	W	Au
filtratie	3 mm Al	3 mm Al	3 mm Al	3 mm Al	3 mm Cu
snijpunt y-as	5,2	8,9	13,9	20,9	23,5

6.9 Verzwakking van loodschorten als functie van de buisspanning



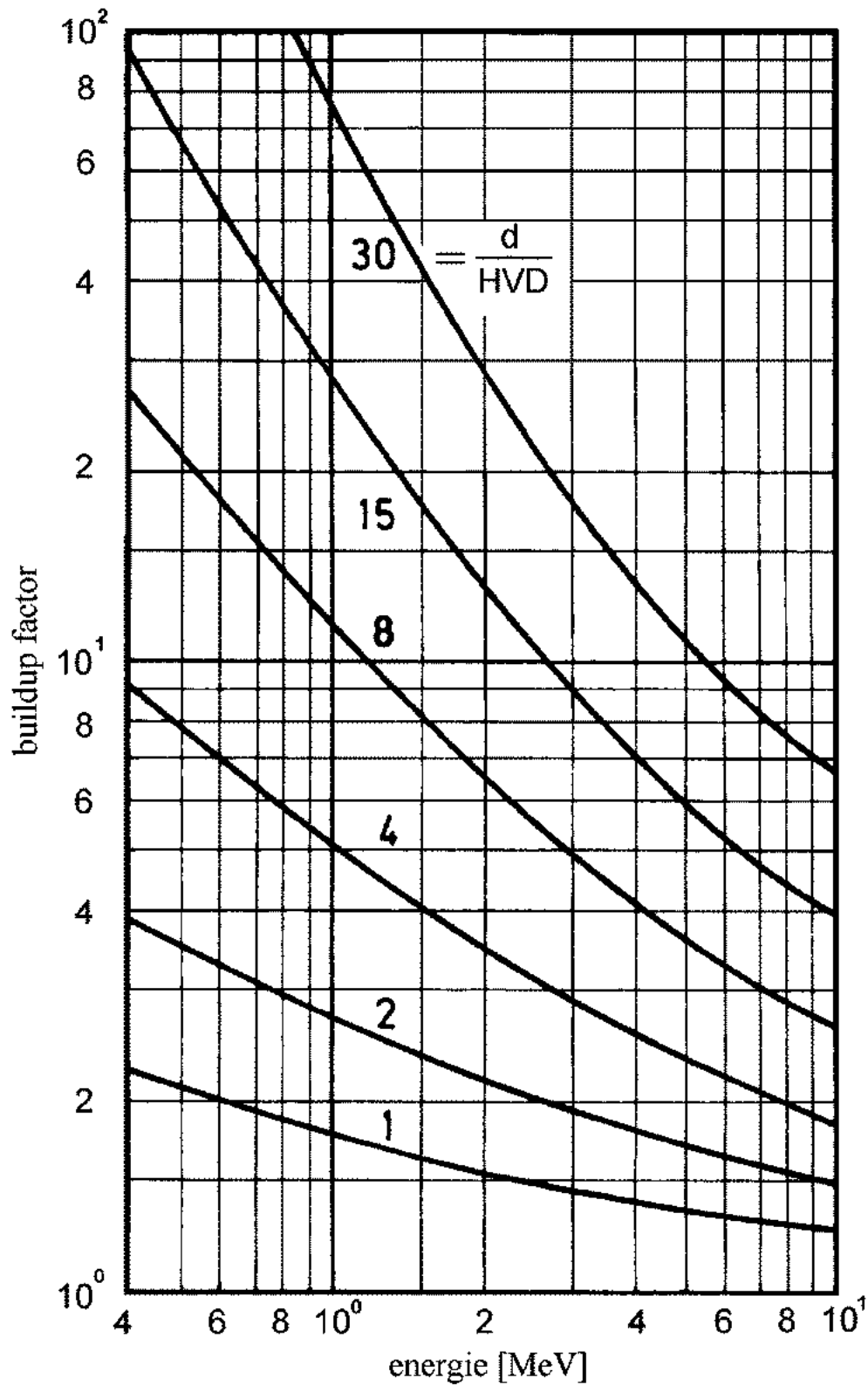
Verzwakking van loodschorten als functie van de buisspanning

6.10 Buildup-factor voor lood als functie van de fotonenergie



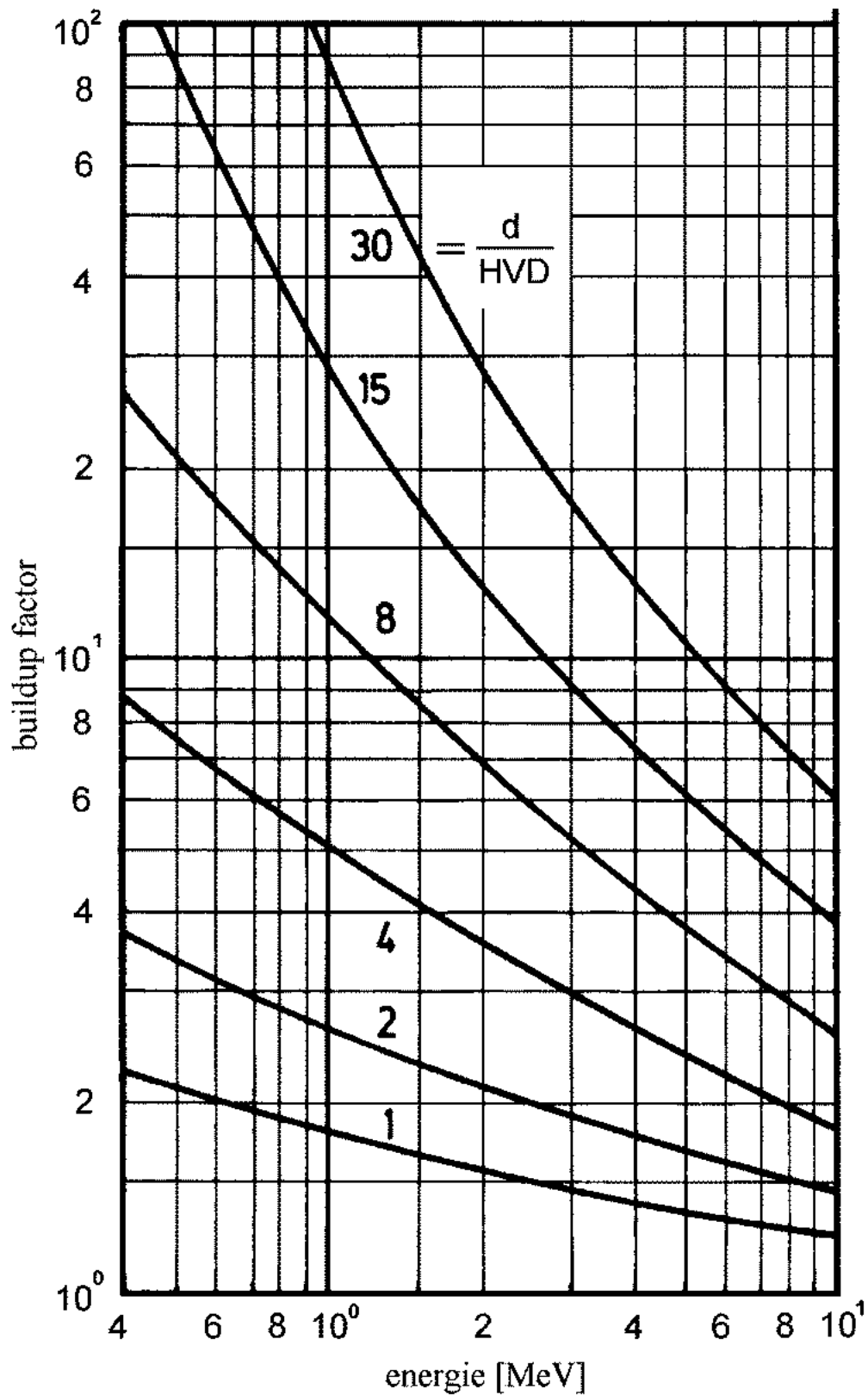
Buildup-factor voor diverse dikten lood (in aantallen halveringsdikten) als functie van de fotonenergie

6.11 Buildup-factor voor beton als functie van de fotonenergie



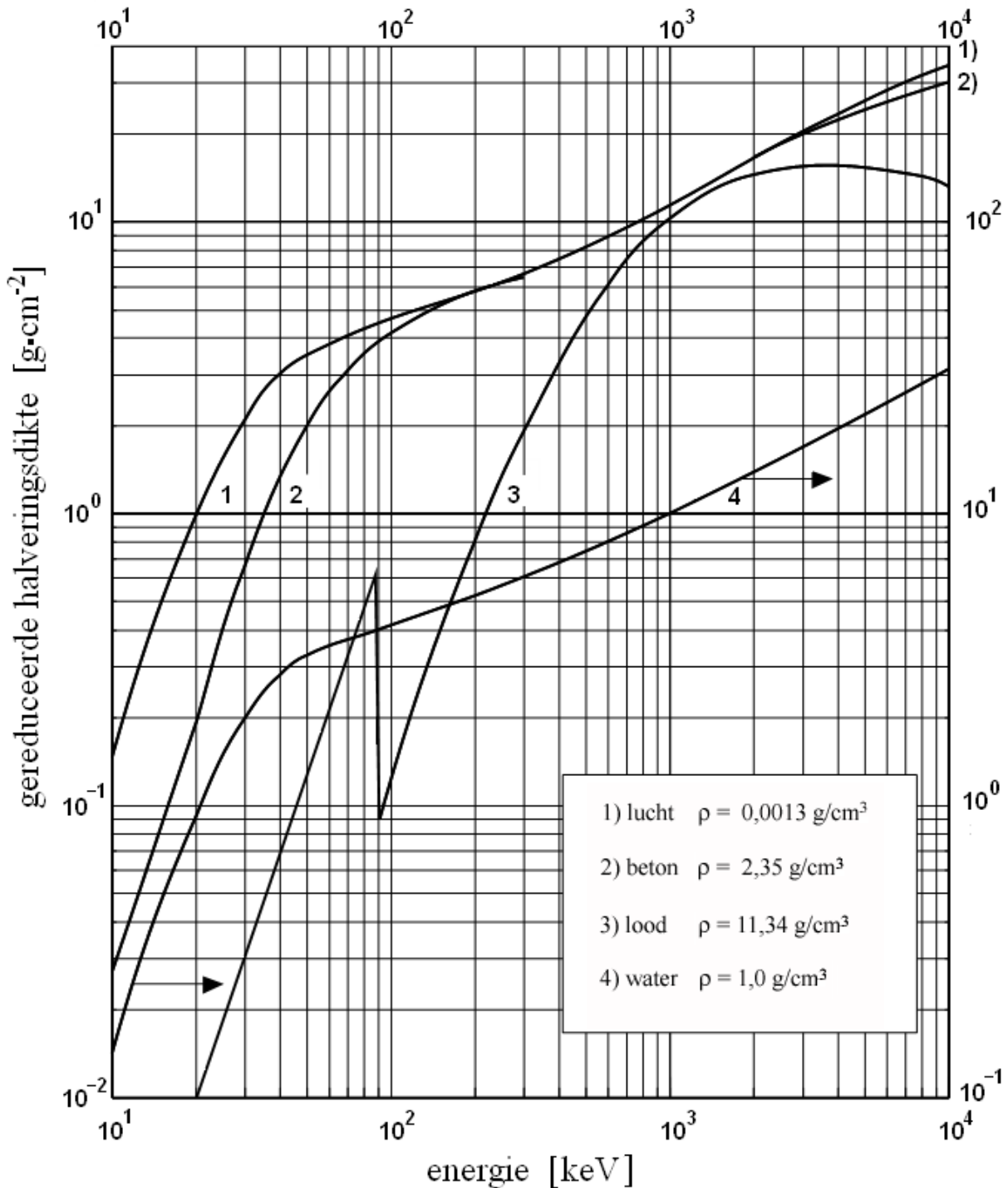
Buildup-factor voor diverse dikten beton (in aantallen halveringsdikten) als functie van de fotonenergie

6.12 Buildup-factor voor water als functie van de fotonenergie



Buildup-factor voor diverse dikten water (in aantallen halveringsdikten) als functie van de fotonenergie

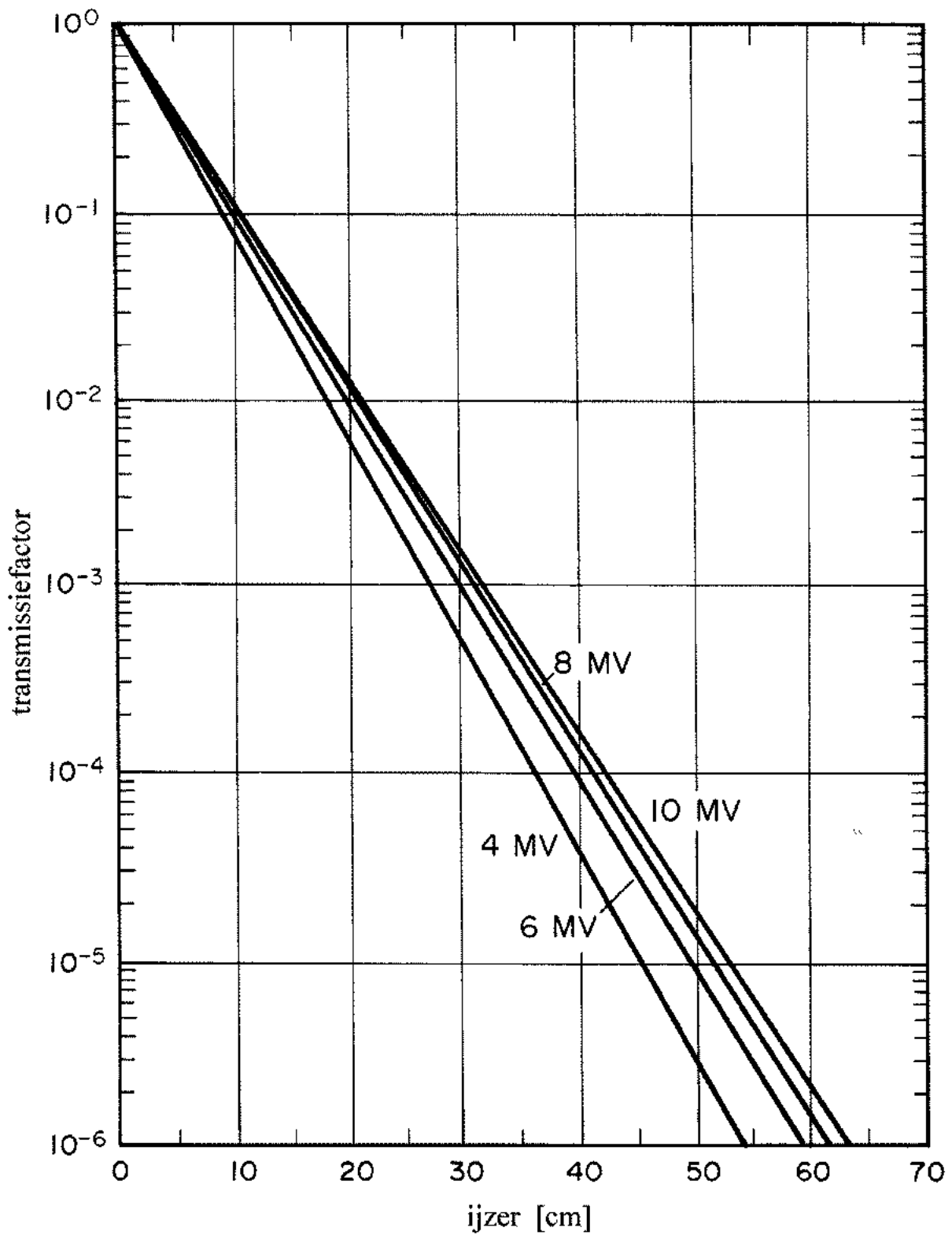
6.13 Gereduceerde halveringsdikte van lucht, beton, lood, water als functie van de fotonenergie



Gereduceerde halveringsdikte ($\rho \cdot \text{HVD}$) van verschillende materialen en voor verschillende fotonenergieën.
 Voor lucht, beton en lood wordt de gereduceerde halveringsdikte aan de linkerkant afgelezen, voor water aan de rechterkant

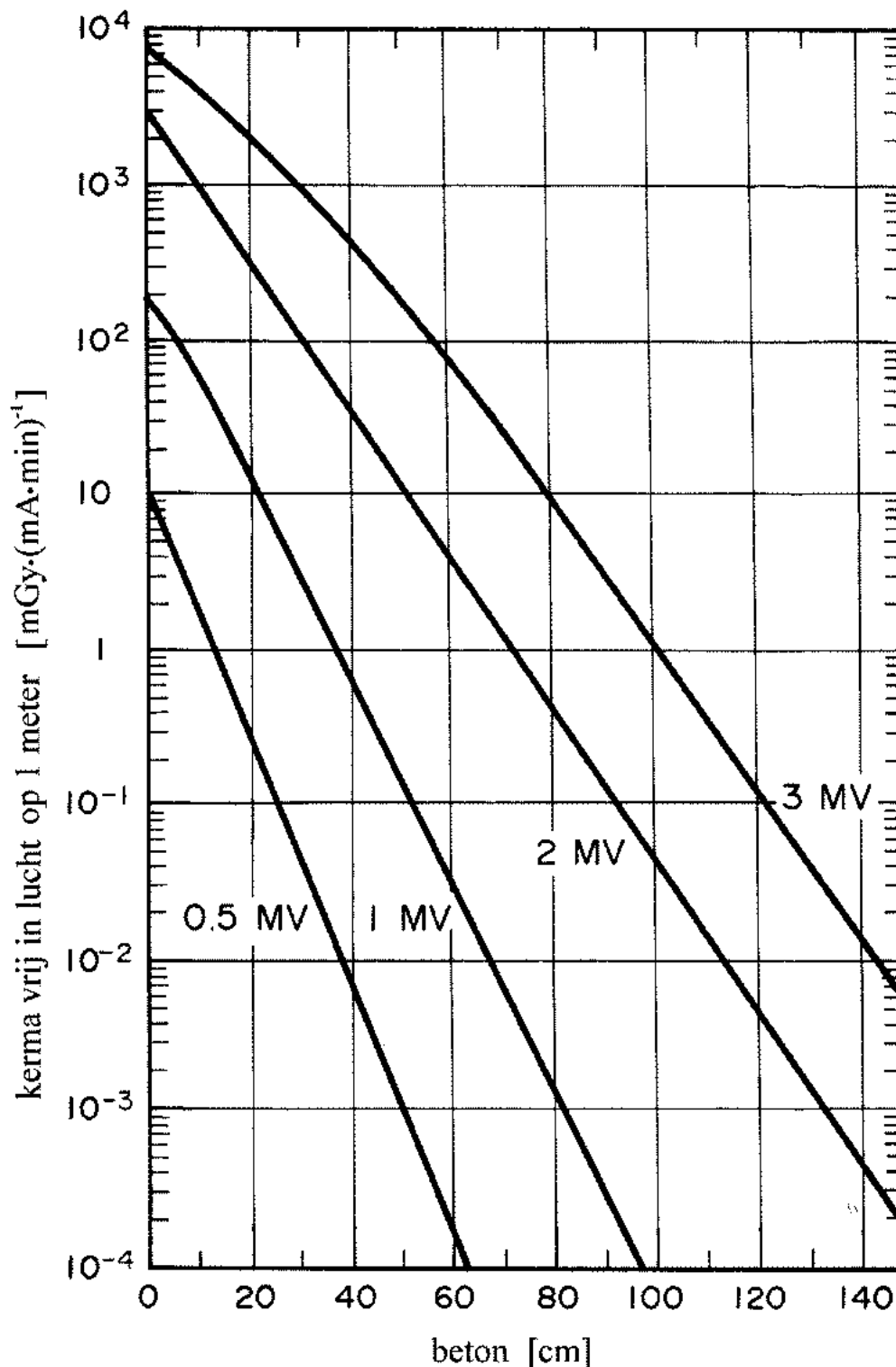
Hoofdstuk 7 Grafieken megavolt fotonenstraling

7.1 Transmissiefactor van megavolt fotonenstraling door ijzer



Transmissiefactor van brede bundels megavolt fotonenstraling door ijzer, dichtheid $7,87 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

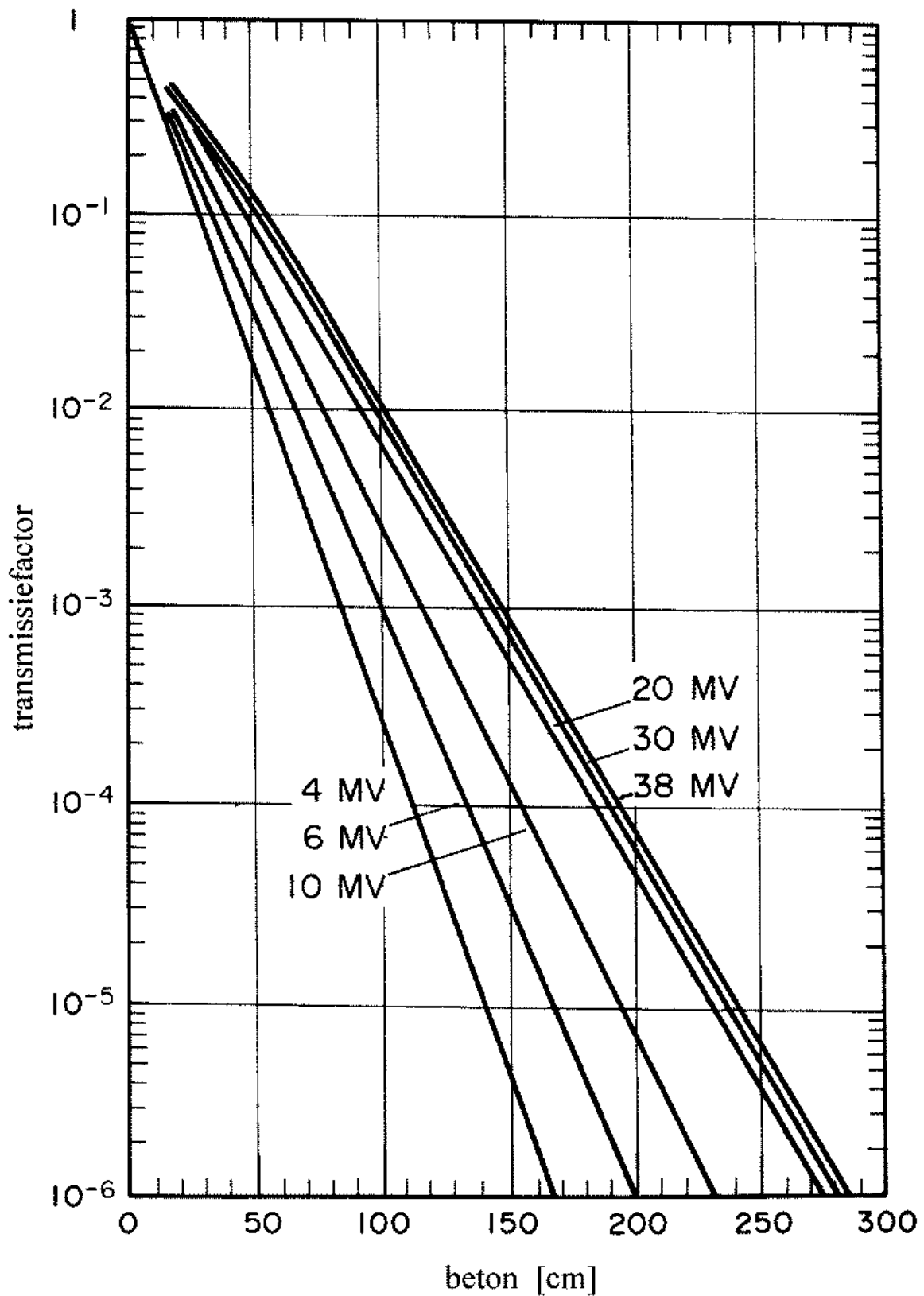
7.2 Kerma vrij in lucht per eenheid van lading van megavolt fotonenstraling door beton



Kerma vrij in lucht [$\text{mGy} \cdot \text{mA}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$] op 1 meter van het focus, van brede bundels megavolt fotonenstraling, door beton, dichtheid $2,35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

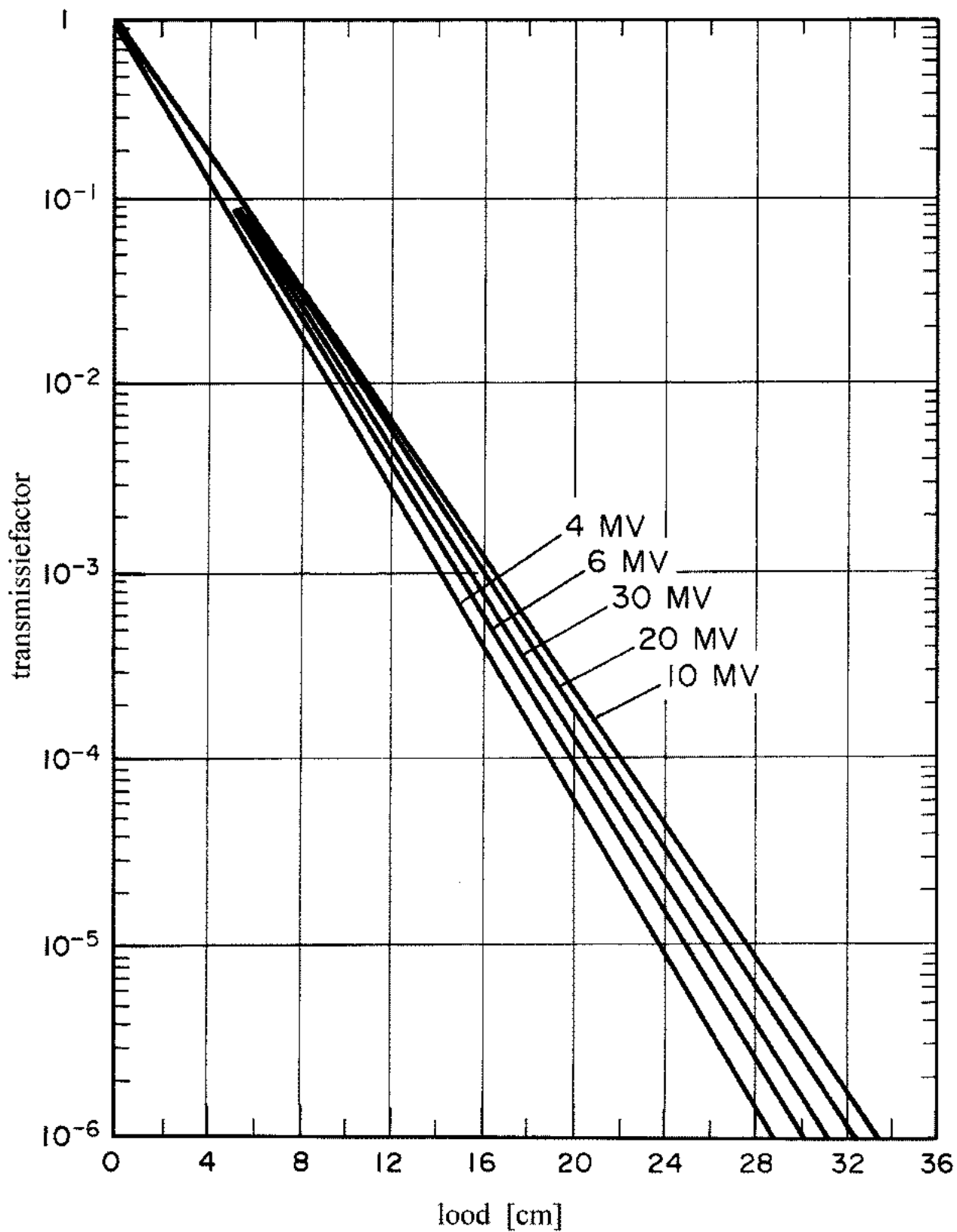
Versnelling	0,5 MV	1 MV	2 MV	3 MV
snijpunt y-as	9	170	2600	7400

7.3 Transmissiefactor van megavolt fotonenstraling door beton



Transmissiefactor van brede bundels megavolt fotonenstraling door beton, dichtheid $2,35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

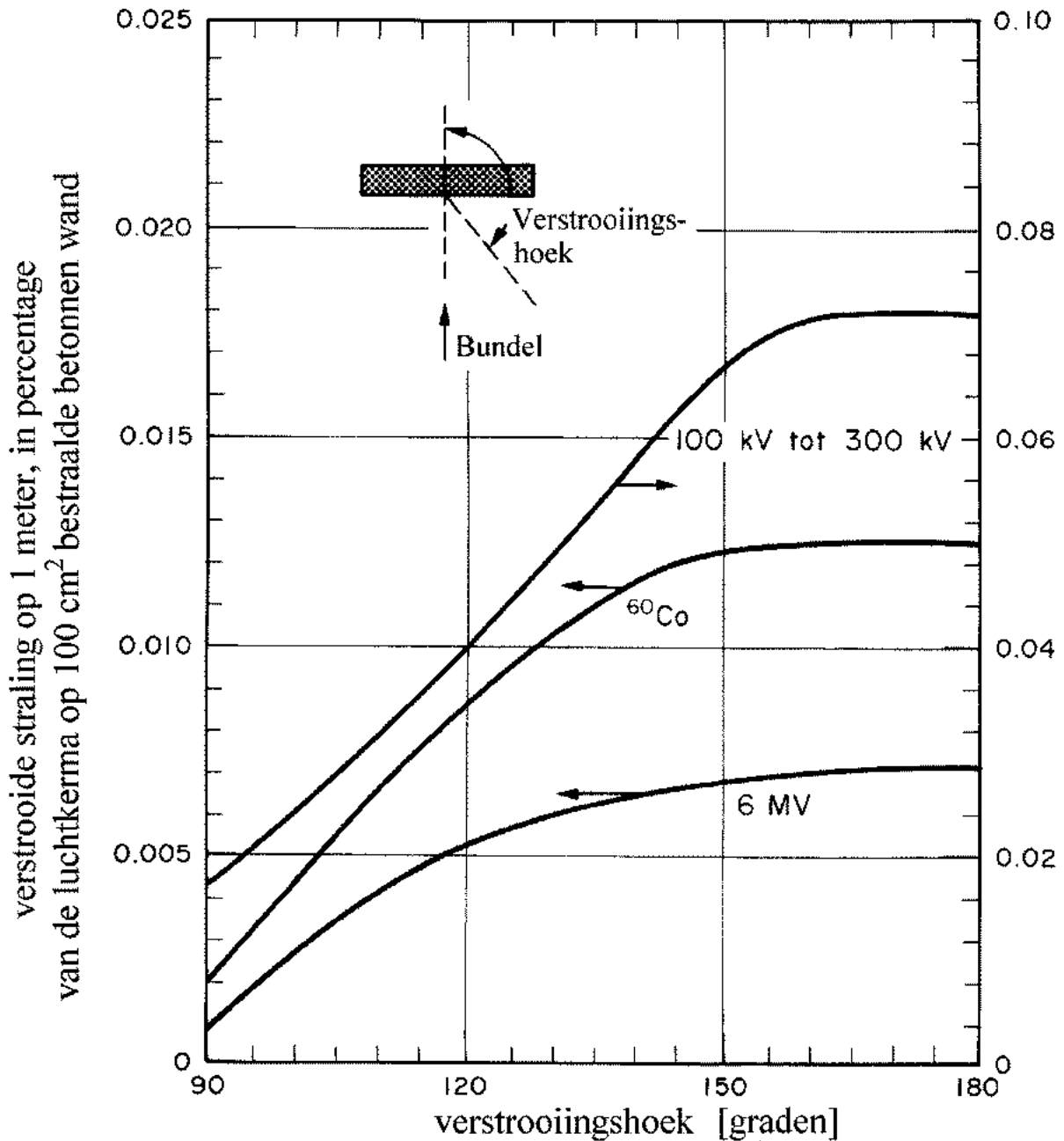
7.4 Transmissiefactor van megavolt fotonenstraling door lood



Transmissiefactor van brede bundels megavolt fotonenstraling door lood, dichtheid $11,35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

Hoofdstuk 8 Strooistraling, celoverleving, verzwakkingscoëfficiënt en backscatterfactoren

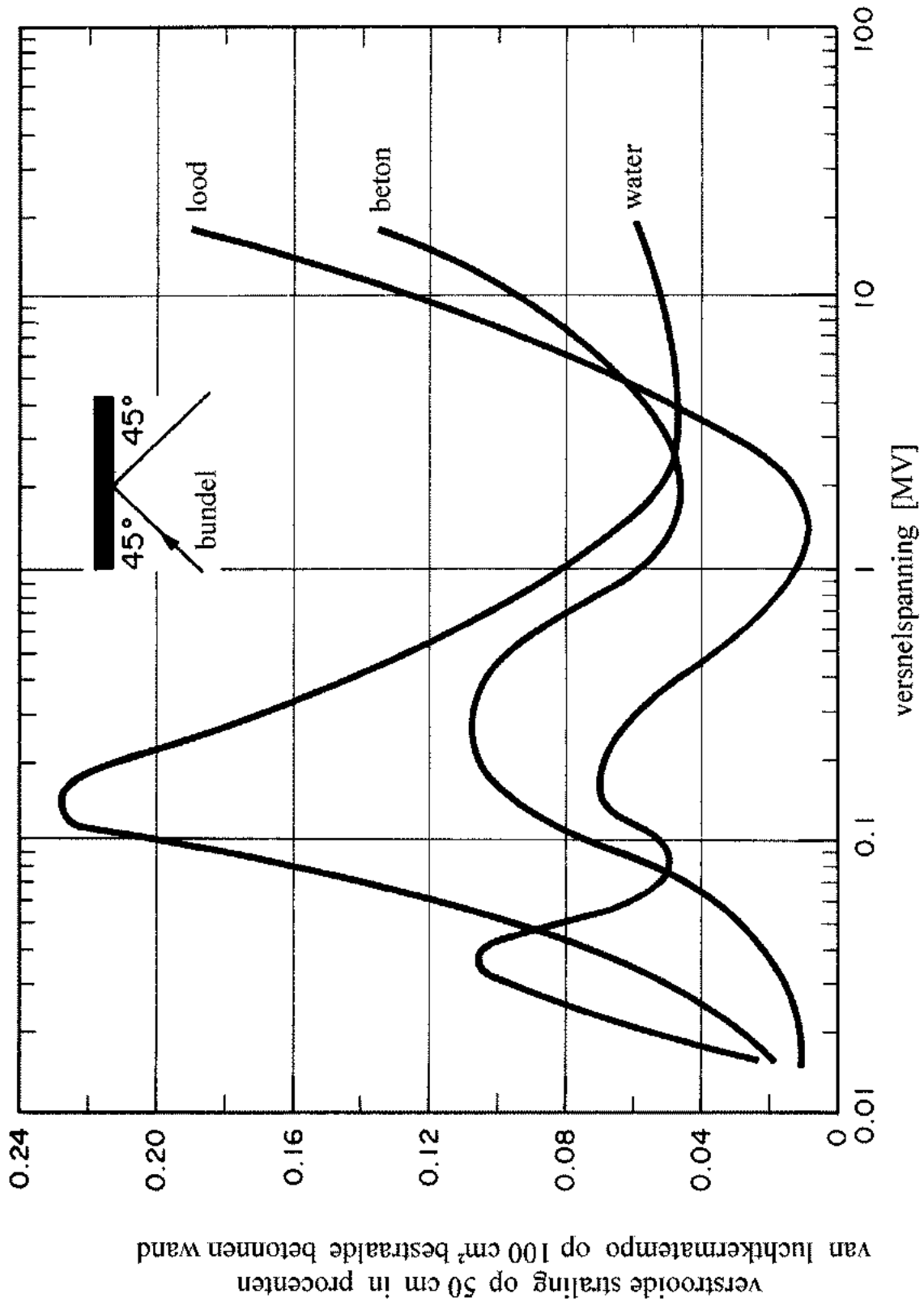
8.1 Verstrooiing van ioniserende fotonenstraling (1)



Verstrooiingspatronen van divergente bundels röntgen- en gammastraling bij loodrechte inval op een vlakke betonnen wand.

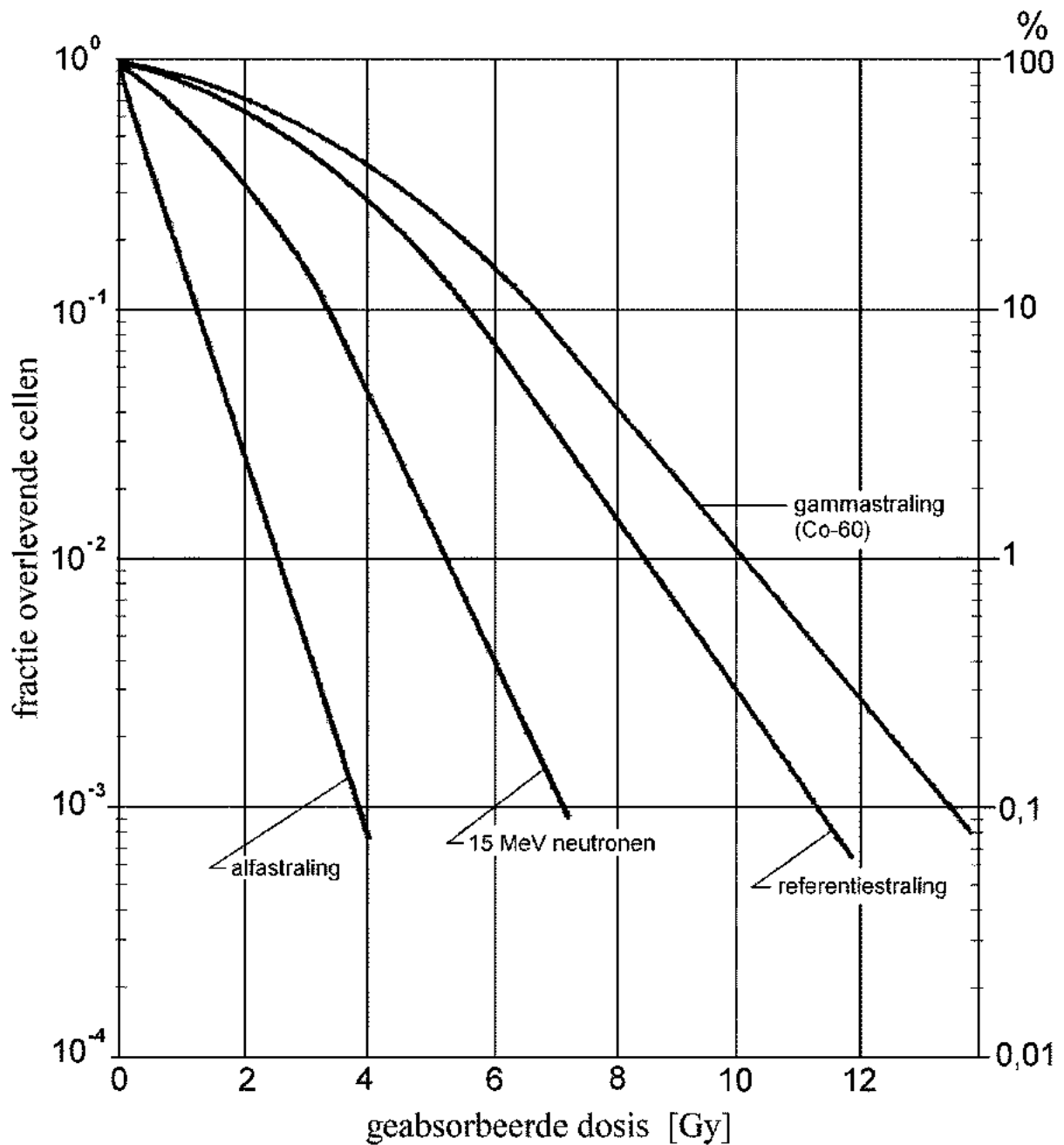
Let op: ⁶⁰Co en 6 MV links aflezen en 100 tot 300 kV rechts aflezen.

8.2 Verstrooiing van ioniserende fotonenstraling (2)



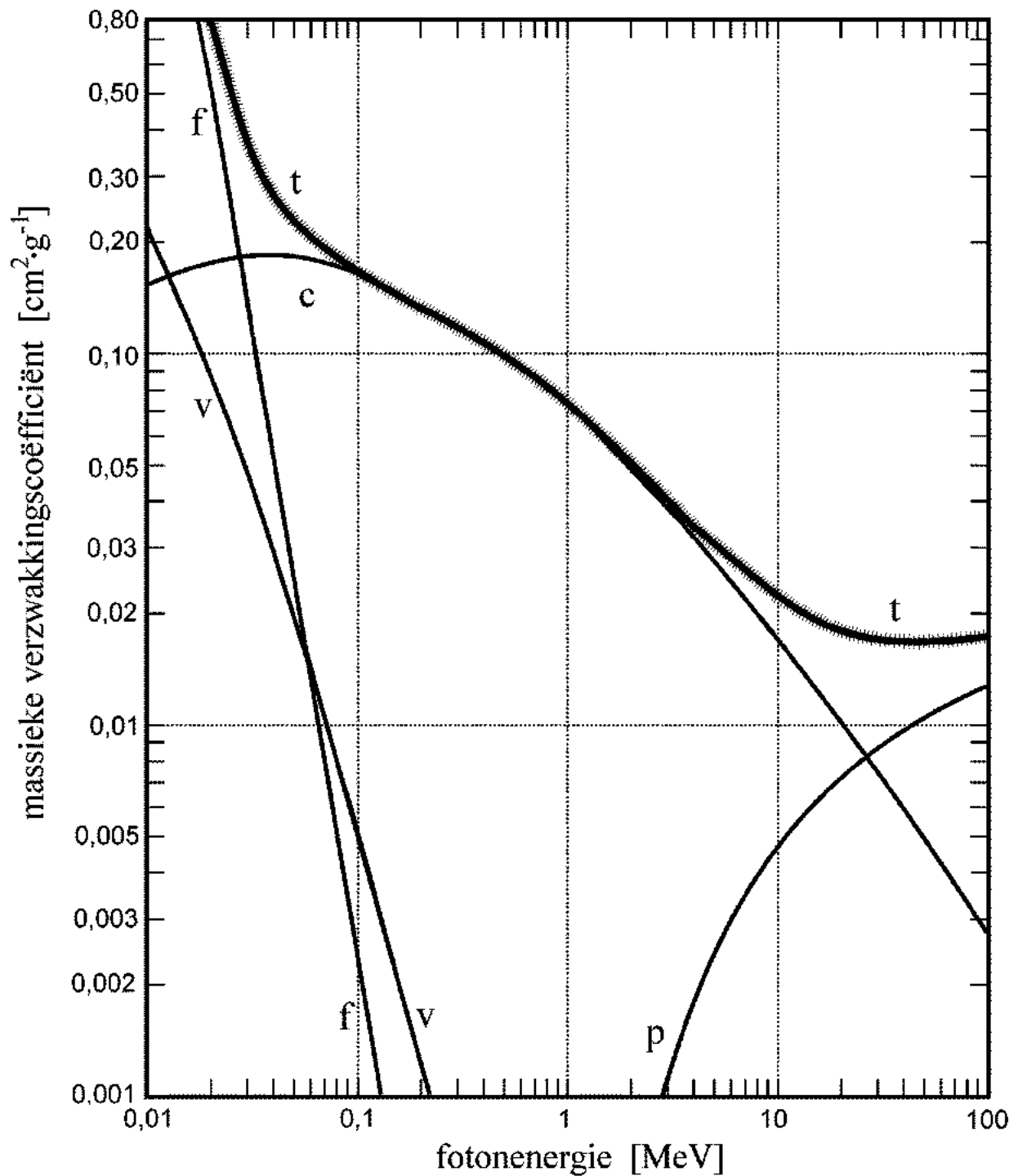
Percentage van het kermatempo in lucht ter plaatse van het punt van verstrooiing, voor verschillende materialen als functie van de versnellsparing bij een hoek van inval en verstrooiing van 45°

8.3 Celoverlevingscurven voor diverse stralingssoorten



Celoverlevingscurven van alfastraling, van 15 MeV neutronenstraling en van gammastraling van ^{60}Co

8.4 Massieke verzwakkingscoëfficiënt van water bij verschillende fotonenergieën



De massieke verzwakkingscoëfficiënt van water als functie van de fotonenergie

v = coherente verstrooiing

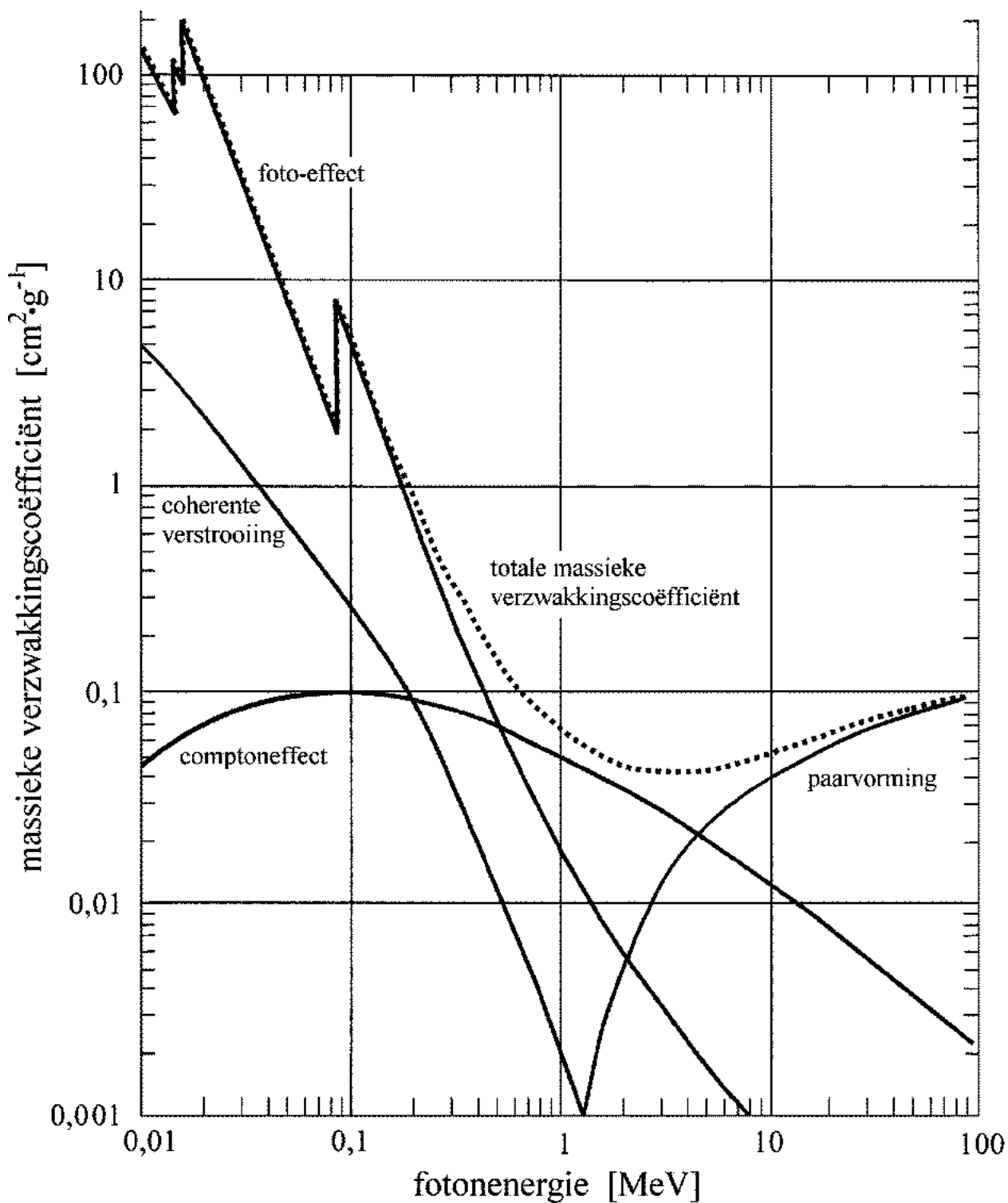
c = comtoneffect

f = foto-elektrisch effect

p = paarvorming

t = totale massieke verzwakkingscoëfficiënt

8.5 Massieke verzwakkingscoëfficiënt van lood bij verschillende fotonenergieën



De massieke verzwakkingscoëfficiënt van lood als functie van de fotonenergie

8.6 Backscatterfactoren radiologie 50-150 kV

Backscatterfactoren voor homogene fantomen van verschillend materiaal voor algemene radiologie, focus-huid-afstand = 100 cm														
Buisspanning (kV)	Filter	1e HVD (mm Al)	veldgrootte 10 cm x 10 cm			veldgrootte 20 cm x 20 cm			veldgrootte 25 cm x 25 cm					
			water	ICRU- weefsel	PMMA	water	ICRU- weefsel	PMMA	water	ICRU- weefsel	PMMA			
50	2,5 mm Al	1,74	1,24	1,25	1,33	1,26	1,27	1,36	1,26	1,27	1,36	1,26	1,28	1,36
60	2,5 mm Al	2,08	1,28	1,28	1,36	1,31	1,32	1,41	1,31	1,32	1,41	1,31	1,32	1,42
70	2,5 mm Al	2,41	1,30	1,31	1,39	1,34	1,36	1,45	1,35	1,36	1,45	1,35	1,36	1,46
70	3,0 mm Al	2,64	1,32	1,32	1,40	1,36	1,37	1,47	1,36	1,37	1,47	1,36	1,38	1,48
70	3,0 mm Al + 0,1 mm Cu	3,96	1,38	1,39	1,48	1,45	1,47	1,58	1,46	1,47	1,58	1,46	1,47	1,59
80	2,5 mm Al	2,78	1,32	1,33	1,41	1,37	1,39	1,48	1,38	1,39	1,48	1,38	1,39	1,50
80	3,0 mm Al	3,04	1,34	1,34	1,42	1,39	1,40	1,51	1,40	1,41	1,51	1,40	1,41	1,52
80	3,0 mm Al + 0,1 mm Cu	4,55	1,40	1,40	1,49	1,48	1,50	1,61	1,49	1,51	1,61	1,49	1,51	1,63
90	2,5 mm Al	3,17	1,34	1,34	1,43	1,40	1,41	1,51	1,41	1,41	1,51	1,41	1,42	1,53
90	3,0 mm Al	3,45	1,35	1,36	1,44	1,42	1,43	1,53	1,42	1,43	1,53	1,42	1,44	1,55
90	3,0 mm Al + 0,1 mm Cu	5,12	1,41	1,41	1,50	1,50	1,51	1,62	1,51	1,51	1,62	1,51	1,53	1,65
100	2,5 mm Al	3,24	1,34	1,34	1,42	1,40	1,41	1,51	1,41	1,41	1,51	1,41	1,42	1,53
100	3,0 mm Al	3,88	1,36	1,37	1,45	1,44	1,45	1,55	1,45	1,45	1,55	1,45	1,46	1,57
100	3,0 mm Al + 0,1 mm Cu	5,65	1,41	1,42	1,50	1,51	1,53	1,64	1,53	1,53	1,64	1,53	1,55	1,66
110	2,5 mm Al	3,59	1,35	1,35	1,43	1,42	1,43	1,53	1,43	1,43	1,53	1,43	1,44	1,55
120	3,0 mm Al	4,73	1,37	1,38	1,46	1,46	1,48	1,58	1,48	1,48	1,58	1,48	1,49	1,60
120	3,0 mm Al + 0,1 mm Cu	6,62	1,41	1,42	1,50	1,53	1,54	1,64	1,54	1,54	1,64	1,54	1,56	1,67
130	2,5 mm Al	4,32	1,36	1,36	1,44	1,44	1,45	1,55	1,44	1,45	1,55	1,45	1,47	1,57
150	2,5 mm Al	4,79	1,36	1,36	1,44	1,45	1,46	1,55	1,45	1,46	1,55	1,46	1,48	1,58
150	3,0 mm Al	6,80	1,39	1,39	1,47	1,50	1,51	1,61	1,50	1,51	1,61	1,52	1,53	1,63
150	3,0 mm Al + 0,1 mm Cu	8,50	1,40	1,41	1,48	1,53	1,54	1,64	1,53	1,54	1,64	1,55	1,57	1,67

8.7 Backscatterfactoren radiologie 24-40 kV

<p>Backscatterfactoren (BSF) voor een halfcilindrisch PMMA-fantoom met een straal van 10 cm, dikte van 5 cm, focus-huid-afstand 65 cm; halfcirkelvormig veld met een straal van 10 cm op het fantoomoppervlak</p>								
Anode: Molybdeen			Anode: Molybdeen			Anode: Rhodium		
Filter: 30 µm Molybdeen			Filter: 25 µm Rhodium			Filter: 25 µm Rhodium		
buisspanning (kV _p)	1e HVD (mm Al)	BSF	buisspanning (kV _p)	1e HVD (mm Al)	BSF	buisspanning (kV _p)	1e HVD (mm Al)	BSF
24	0,282	1,08	24	0,328	1,09	24	0,297	1,09
25	0,295	1,09	25	0,343	1,09	25	0,316	1,09
26	0,306	1,09	26	0,356	1,10	26	0,330	1,10
28	0,325	1,09	28	0,375	1,10	28	0,362	1,11
30	0,340	1,10	30	0,391	1,11	30	0,391	1,11
32	0,353	1,10	32	0,403	1,11	32	0,418	1,12
34	0,364	1,10	34	0,412	1,11	34	0,441	1,12
35	0,369	1,11	35	0,416	1,12	35	0,452	1,13
36	0,373	1,10	36	0,420	1,11	36	0,462	1,13
38	0,381	1,11	38	0,427	1,12	38	0,481	1,13
40	0,388	1,10	40	0,433	1,12	40	0,497	1,14