

Berekening grond en grondwater activering

Verantwoordelijk Stralingsdeskundige TU Delft



Naam



Handtekening

Versie overzicht

V0.1	06/04/2017	Concept
V1.0	20/04/2017	Definitieve rapportage

Berekening grond en grondwater activering

In het cyclotron van ZON-PTC worden protonen tot een energie van 250 MeV versneld. In het cyclotron, en in de bundellijn onderweg naar de patiënt, worden deze protonen afgeremd of zelfs volledig gestopt. Hierbij ontstaat secundaire straling, waarvan voor activering de neutronencomponent van belang is. Na passage van deze straling door de lucht binnenin de bunker en door de betonnen constructie, zal de neutronencomponent van deze straling de bodemgrond of het grondwater mogelijk kunnen activeren door een vangstreactie. Deze activering wordt berekend door met het Monte Carlo programma MCNPX (versie 2.7.0) de thermische, epithermische en snelle neutronenflux te simuleren. We gaan uit van een worst-case afschatting, waarbij we de over het jaar gemiddelde stroomsterkte in het cyclotron berekenen en ervan uit gaan dat deze geheel in collimator materiaal (met hoge Z-waarde, koper) gestopt wordt. De betonvloer wordt verondersteld direct hierachter bolvormig het collimatormateriaal te omvatten, waarna de bodem bereikt wordt. Per ruimtehoek van 10 graden is de neutronenflux gesimuleerd, waaruit we de maximale waarde gebruiken voor onze berekeningen. Met deze maximale neutronenflux wordt de activering van grond berekend bij een zeer lange (100 jaar) bestralingstijd en korte afkoeltijd (1 uur) met het bij het RID (Reactor Instituut TU Delft) gangbare programma BERAKT (zie uitleg werking aan einde van dit document). BERAKT geeft als output, voor de ingevoerde hoeveelheid materiaal in mg, alleen de isotopen met een activiteit groter dan 1 Bq. Om ook de resultaten voor zeldzamere isotopen te zien, hebben we de activering berekend in 10 kg grond, en dit daarna weer teruggerekend naar de activiteit, in Bq per g, de activiteitsconcentratie waar ook het besluit Stralingsbescherming mee rekent (Ref. 1). Voor grondwater hebben we uit moeten gaan van 10.000 kg grondwater om enige activering te verkrijgen. In deze berekening is ook een stralingstijd van 100 jaar gekozen, zodat ook het langlevende tritium tot een evenwichtsconcentratie is ingegroeid.

De keuze van de bestralings- en afkoeltijd garanderen dat voor de geïnduceerde nucliden de evenwichtsconcentratie bereikt is, terwijl er voldoende bestralingstijd is om eventuele andere geïnduceerde nucliden voldoende te laten ingroeien tot een activiteit boven de rapportage ondergrens van het programma.

Door de impuls van de protonenstroom ontstaat er een lage thermische neutronenflux vlak na de betonvloer. Op grote afstand echter, daar waar de neutronenenergie tot thermische waarden is afgenomen, is de flux door de kwadratenwet sterk afgenomen. Om toch over een realistische overschatting van de activering te kunnen beschikken is de thermische flux vermeerderd met de waarde van de epithermische flux op een afstand vlak na de betonvloer.

Grond samenstelling

We berekenen de activiteitsconcentratie van de grond voor twee mogelijke chemische samenstellingen van de grond. Ten eerste voor het standaard referentie-materiaal 2709 van NIST, wat een mengsel is van zand en klei met wat organische resten. Ten tweede voor de grondsamenstelling zoals XXXXXXXXXX gerapporteerd aan Maastricht Clinic in de uitvoering van Monte Carlo afschermingsberekeningen (Ref. 2). Naar deze laatste chemische samenstelling refereren we als zijnde 'MC-grond'.

Enkele isotopen met een zeer lage concentratie maar een grote werkzame doorsnede voor neutronenvangst zijn toegevoegd (151-Eu, 153-Eu, 59-Co en 134-Cs. Dit betreft een 'theoretische' toevoeging in parts per million (ppm), waarmee de chemische samenstelling van de bodemgrond dan als volgt is:

Tabel 1: Grond samenstelling in parts per million

Element	NIST-2709	MC-Grond
H		2.81E+04
C		1.44E+05
O	5.23E+05	4.96E+05
Na	1.16E+04	8.20E+03
Mg	1.51E+04	0.00E+00
Al	7.49E+04	8.93E+04
Si	2.97E+05	2.13E+05
P	6.00E+02	
S	9.00E+02	
K	2.03E+04	5.60E+03
Ca	1.88E+04	5.40E+03
Ti	3.40E+03	0.00E+00
Fe	3.50E+04	9.60E+03
Eu (50% 151-Eu en 50% 153-Eu)	2.97E-01	2.97E-01
59-Co	6.60E+00	6.60E+00
134-Cs	1.66E+00	1.66E+00

Protonen stroom

Maastricht Clinic heeft voor hun afschermingsberekeningen een workload opgegeven van 1000 Gy per week naar een volume van 10 liter, uitgaande van de maximale protonenenergie van 250 MeV. In Ref. 2 is dit omgerekend naar een wekelijkse "productie" en gebruik van 4.1×10^{10} protonen met een energie van 250 MeV. ZON-PTC zal patiënten behandelen over vijf dagen van 16 uur. Dit komt neer op een gemiddelde protonenstroom van 0.227 nA, wat we afronden op 0.25 nA. Dit is de input voor de berekening van de neutronenflux, zie Tabel 2.

Tabel 2: Toegepaste (aangepaste) neutronenflux; Epi-thermisch, snel, en langzaam. In rood de (maximale) waarden zoals gebruikt voor onze activeringsberekeningen. Deze berekeningen gaan uit van een laag van 100 cm dik 'standaard' beton, met een waterstofgehalte van 1%.

Stroom op target [nA]		0.25 Gemiddelde continue stroom gedurende het gehele jaar naar						
% loss	100.00	#p/sec	1.56E+09					
Hoek [deg]	Voorwaartse flux na 1m beton op 2m van target #n.cm ² .p ⁻¹			Voorwaartse flux na 1m beton op 2m van target #n.m ² .s ⁻¹				Σ Thermisch,Epi
	Thermisch	Epi	Snel	Thermisch	Epi	Snel		
Maximum waarde					1.35E+05	4.11E+04	9.97E+04	1.76E+05
0 10	8.63E 09	2.63E 09	6.38E 09	1.35E+05	4.11E+04	9.97E+04	1.76E+05	
10 20	7.54E 09	2.35E 09	5.42E 09	1.18E+05	3.67E+04	8.48E+04	1.55E+05	
20 30	5.77E 09	1.66E 09	3.79E 09	9.02E+04	2.60E+04	5.92E+04	1.16E+05	
30 40	3.89E 09	1.06E 09	2.22E 09	6.07E+04	1.66E+04	3.47E+04	7.73E+04	
40 50	2.42E 09	6.13E 10	1.18E 09	3.79E+04	9.58E+03	1.84E+04	4.75E+04	
50 60	1.53E 09	3.58E 10	6.21E 10	2.40E+04	5.59E+03	9.70E+03	2.96E+04	
60 70	1.01E 09	2.04E 10	3.26E 10	1.57E+04	3.19E+03	5.09E+03	1.89E+04	
70 80	7.45E 10	1.35E 10	1.95E 10	1.16E+04	2.10E+03	3.05E+03	1.37E+04	
80 90	4.00E 10	5.31E 11	6.16E 11	6.26E+03	8.30E+02	9.63E+02	7.09E+03	
90 100	2.19E 09	5.72E 10	1.18E 09	3.42E+04	8.94E+03	1.84E+04	4.31E+04	
100 110	4.23E 10	5.76E 11	7.20E 11	6.62E+03	9.00E+02	1.12E+03	7.52E+03	
110 120	4.00E 10	5.14E 11	6.13E 11	6.26E+03	8.02E+02	9.59E+02	7.06E+03	
120 130	3.75E 10	4.96E 11	5.41E 11	5.85E+03	7.75E+02	8.45E+02	6.63E+03	
130 140	3.77E 10	4.91E 11	4.87E 11	5.89E+03	7.67E+02	7.60E+02	6.66E+03	
140 150	3.68E 10	4.29E 11	5.03E 11	5.74E+03	6.71E+02	7.86E+02	6.42E+03	
150 160	3.45E 10	4.07E 11	4.87E 11	5.38E+03	6.36E+02	7.60E+02	6.02E+03	
160 170	3.61E 10	4.62E 11	5.03E 11	5.64E+03	7.21E+02	7.86E+02	6.36E+03	
170 180	3.54E 10	4.97E 11	4.87E 11	5.54E+03	7.76E+02	7.62E+02	6.31E+03	
Gemiddeld over 4π				3.22E+04	8.70E+03	1.89E+04	4.09E+04	

Resultaten

Hieronder, in Tabel 3, de resultaten van het BERAKT programma voor de twee samenstellingen van de bodemgrond, en voor het grondwater.

Tabel 3: Output van het BERAKT programma voor de bodemgrond en grondwater. De vrijstellingconcentraties (in Bq/g) zijn zoals gesteld in de Uitvoeringsregeling stralingbescherming EZ, Bijlage 1 d.d. 30 december 2014. De kolom Ai/VGi geeft de relatieve activiteit.

Target	Product	Halfw. Tijd	Vrijstellingsgrens (Bq/g)	NIST-2709 reference material			MC-grond			Grondwater		
				Aktiviteit (Bq/10 kg)	Aktiviteit (Bq/g)	Ai / VGi	Aktiviteit (Bq/10 kg)	Aktiviteit (Bq/g)	Ai / VGi	Aktiviteit Bq/10.000 kg	Aktiviteit (Bq/g)	Ai / VGi
Na-23	Na-24	14.90 h	1.00E+01	2.62E+01	2.62E 03	2.62E 04	1.85E+01	1.85E 03	1.85E 04			
S-30	S-31	2.62 h	1.00E+03	2.40E+00	2.40E 04	2.40E 07	1.72E+00	1.72E 04	1.72E 07			
K-41	K-42	12.36 h	1.00E+02	4.83E+00	4.83E 04	4.83E 06	1.33E+00	1.33E 04	1.33E 06			
Fe-54 / Fe-56	Fe-55	2.73 y	1.00E+04	2.41E+01	2.41E 03	2.41E 07	6.61E+00	6.61E 04	6.61E 08			
H-2	H-3	12.33 y	1.00E+06							1.24E+00	1.24E 07	1.24E 13
O-17	C-14	5736.47 y	1.00E+04							6.68E+00	1.24E 07	1.24E 11

Som (Ai/VGi) **2.67E-04**

Som (Ai/VGi) **1.87E-04**

Som (Ai/VGi) **1.25E-11**

Hieruit blijkt dat:

- Alle geïnduceerde nucliden onder de vrijstellingconcentratie blijven als gesteld in de Uitvoeringsregeling stralingbescherming EZ, Bijlage 1 d.d. 30 december 2014.

- De gesommeerde relatieve activiteit volgens de regels als gesteld in het Uitvoeringsregeling Stralingsbescherming EZ lager is dan 1, zodat zij daarmee vrijgesteld is.

Overheid.nl Hoog contrast Tekstgrootte

Home Particulieren Ondernemers **Overheidsinformatie** Over deze site Contact English Help Sitemap

Home > Overheidsinformatie > Zoeken > Zoekresultaten > Regeling

Wet- en regelgeving Instellingen (nu: volledige regeling), opent een nieuw venster

< Terug naar resultaten < Vorige Volgende > Wettechnische informatie

Uitvoeringsregeling stralingsbescherming EZ Afdrukken

Geldend op 30-12-2014 Opslaan

Alles uitklappen

Alles inklappen

Opschrift >

Aanhef >

Hoofdstuk 1 Algemene bepalingen >
(Artikelen 1.1-1.8)

Hoofdstuk 2 Administratieve en organisatorische maatregelen stralingsbescherming >
(Artikelen 2.1-2.10)

Hoofdstuk 3 Deskundigheid stralingsbescherming >
(Artikelen 3.1-3.24)

Hoofdstuk 4 Meldingsplichtige bronnen >
(Artikelen 4.1-4.12)

Hoofdstuk 5 Instrumenten stralingsbescherming >
(Artikelen 5.1-5.12)

Hoofdstuk 6 Beveiliging radioactieve stoffen >

Tabel 1. Vrijstellings- en vrijgavegrenzen voor kunstmatige en natuurlijke bronnen voor activiteitsconcentratie en activiteit

Radionuclide	Activiteitsconcentratie (Bq g ⁻¹)	Activiteit (Bq)
H-3 (incl. OBT ¹)	1E+6	1E+9
Elementair H-3	1E+6	1E+9
Be-7	1E+3	1E+7
Be-10	1E+4	1E+6
C-11	1E+1	1E+6
C-11 monoxide	1E+1	1E+9
C-11 dioxide	1E+1	1E+9
C-14	1E+4	1E+7
C-14 monoxide	1E+8	1E+11
C-14 dioxide	1E+7	1E+11
N-13	1E+2	1E+9
Ne-19	1E+2	1E+9

Figuur 1: Vrijstellings- en vrijgavegrenzen voor kunstmatige en natuurlijke bronnen voor activiteitsconcentratie en activiteit.

We willen benadrukken dat we een worst-case analyse gedaan hebben. De werkelijke activering zal lager zijn omdat:

- We gaan uit van de hoogste protonenstroom in de gehele bundellijn.
- We gaan ervan uit dat alle protonen stoppen in hoge-z materiaal (ijzer), terwijl in werkelijkheid 90% van de protonen in de patiënt stopt.
- We zijn ervan uitgegaan dat alle protonen de maximale energie van 250 MeV hebben, en dus de hoogst mogelijke neutronenflux genereren.
- We gaan uit van de slechtst mogelijke gantryhoek waarbij de neutronenflux in de bodem maximaal is (zie Tabel 2), waarbij de bundel continu naar de grond is gericht.
- We gaan uit van een continue stroom, gedurende het hele jaar, van 0.25 nA, terwijl de werkelijke behandel-uren van het protonencentrum korter zijn (80 uur per week in plaats van 168 uur per week).
- We hebben de kwadratenwet niet volledig meegenomen. Aanname is dat de bodem zich op 2 meter afstand van de bron bevindt.
- We hebben de zelfafscherming van het cyclotron en de patiënt niet meegenomen.

- We zijn uitgegaan van een bestralingsperiode over 100 jaar in plaats van de operationele levensduur van het ZON-PTC (typisch 30 jaar)

Een geringe onderschatting vindt plaats om de volgende twee redenen:

- 1) De met Monte Carlo berekende neutronenfluxen zijn bepaald voor een betonlaag van 100 cm dik, terwijl de betondikte naar de grond bij het ZON-PTC slechts 50 cm dik is. Eerdere Monte Carlo berekeningen hebben laten zien dat de voorwaarts gerichte neutronendosis ongeveer een factor 3 hoger is na 50 cm beton, ipv 100 cm beton.
- 2) De waarden voor de toegepaste neutronenflux in Tabel 2 zijn voor een 'koper'-target, in plaats van voor een 'ijzer'-target zoals gebruikt in Ref. 2. Eerdere Monte Carlo berekeningen hebben laten zien dat de voorwaarts gerichte neutronendosis ongeveer een factor 2 hoger is met een ijzer target.

De gerapporteerde activering in Tabel 3 schaal lineair met de neutronenflux. Na correctie voor deze onderschattingen met een factor zes, blijven de geïnduceerde nucliden onder de vrijstellingsconcentratie en de gesommeerde relatieve activiteit onder de vrijstellingsgrens.

Conclusie

Onze conclusie is dat alle waarden voor de activering van grond en grondwater onder het vrijgaveniveau liggen.

BERAKT input en output: NIST-2709 Grond

Let op: deze berekeningen zijn voor 10 kg grond.

Berakt en

06/04/2017, 10:09

Activiteitsberekening

BERAKT

stof	gewicht (mg)
O	5.22e+006
Na	1.16e+005
Mg	1.51e+005
Al	7.49e+005
Si	2.97e+006
P	6.00e+003
S	9.00e+003
K	2.03e+005
Ca	1.88e+005
Ti	3.40e+004
Fe	3.50e+005
Co-59	6.60e+001
Cs-134	1.66e+001
Eu-151	1.48e+000
Eu-153	1.49e+000

Faciliteit	EigenInvoer
Bestralingstijd	100.00 years
Afkoeltijd	1.00 hours
Dikte loodafscherming	0.045 m

Direct na bestraling:

Totale radiotoxiciteit	1.97e-007 Sv
Dosistempo op 1 meter	5.33e-005 uSv/h
Dosistempo op 1 m met 0.045 m lood	7.59e-006 uSv/h
Opp. dosistempo op 10 cm	1.76e-001 uSv/h
Productnuclide	Al-28

Na afkoeling:

Totale radiotoxiciteit	2.84e-008 Sv
Dosistempo op 1 meter	1.55e-005 uSv/h
Dosistempo op 1 m met 0.045 m lood	2.21e-006 uSv/h
Opp. dosistempo op 10 cm	3.39e-002 uSv/h
Productnuclide	Na-24

				(Gamma dosis)	(Gamma dosis)	(Beta dosis)
				(zonder lood)	(met lood)	
Target	Product	halfw.tijd	aktiviteit (Bq)	h10 (uSv/h)	h10 (uSv/h)	h07 (uSv/h)
Na-23	Na-24	14.90 h	2.62e+001	1.33e-005	1.89e-006	2.62e-002

Berakt en

06/04/2017, 10:09

Si-30	Si-31	2.62 h	2.40e+000	2.40e-009	3.41e-010	2.40e-003
K-41	K-42	12.36 h	4.83e+000	2.24e-006	3.19e-007	4.83e-003
Fe-54	Fe-55	2.73 y	8.88e+000	8.88e-009	1.26e-009	1.78e-004
Fe-56	Fe-55	2.73 y	1.52e+001	1.52e-008	2.16e-009	3.04e-004

TE BESTRALEN STOFFEN

Help **Check input**

ppm
 procent
 ug
 mg
 g

5.22391443E+05 O
 1.16E+04 Na
 1.51E+04 Mg
 7.49E+04 Al
 2.97E+05 Si
 6.00E+02 P
 9.00E+02 S
 2.03E+04 K

Totale massa: mg

Faciliteit:

Therm. flux: s⁻¹.m⁻²

Epi Therm. flux: s⁻¹.m⁻²

Alpha:

Snelle flux: s⁻¹.m⁻²

Bestralingstijd: year

Afkoeltijd: hour

Cyclische bestraling:

Seriebestraling:

Stap 1: Activiteitsberekening

Stap 2: Verpakking van de stoffen

Opslaan in persoonlijke database

BERAKT input en output: "MC-grond"

Let op: deze berekeningen zijn voor 10 kg grond.

Berakt en

06/04/2017, 10:12

Activiteitsberekening

BERAKT

stof	gewicht (mg)
H	2.81e+005
C	1.45e+006
O	4.96e+006
Na	8.20e+004
Mg	0.00e+000
Al	8.93e+005
Si	2.13e+006
K	5.60e+004
Ca	5.40e+004
Ti	0.00e+000
Fe	9.60e+004
Co-59	6.60e+001
Cs-134	1.66e+001
Eu-151	1.48e+000
Eu-153	1.49e+000

Faciliteit	EigenInvoer
Bestralingstijd	100.00 years
Afkoeltijd	1.00 hours
Dikte loodafscherming	0.045 m

Direct na bestraling:

Totale radiotoxiciteit	2.09e-007 Sv
Dosistempo op 1 meter	5.37e-005 uSv/h
Dosistempo op 1 m met 0.045 m lood	7.64e-006 uSv/h
Opp. dosistempo op 10 cm	1.87e-001 uSv/h
Productnuclide	Al-28

Na afkoeling:

Totale radiotoxiciteit	1.27e-008 Sv
Dosistempo op 1 meter	1.00e-005 uSv/h
Dosistempo op 1 m met 0.045 m lood	1.42e-006 uSv/h
Opp. dosistempo op 10 cm	2.17e-002 uSv/h
Productnuclide	Na-24

				(Gamma dosis)	(Gamma dosis)	(Beta dosis)
				(zonder lood)	(met lood)	
Target	Product	halfw.tijd	aktiviteit (Bq)	h10 (uSv/h)	h10 (uSv/h)	h07 (uSv/h)
Na-23	Na-24	14.90 h	1.85e+001	9.37e-006	1.33e-006	1.85e-002

Berakt en

06/04/2017, 10:12

Si-30	Si-31	2.62 h	1.72e+000	1.72e-009	2.45e-010	1.72e-003
K-41	K-42	12.36 h	1.33e+000	6.19e-007	8.81e-008	1.33e-003
Fe-54	Fe-55	2.73 y	2.44e+000	2.44e-009	3.47e-010	4.87e-005
Fe-56	Fe-55	2.73 y	4.17e+000	4.17e-009	5.93e-010	8.33e-005

TE BESTRALEN STOFFEN

Help **Check input**

ppm
 procent
 ug
 mg
 g

2.81E+04 H
 1.44791443E+05 C
 4.96E+05 O
 8.20E+03 Na
 0.00E+00 Mg
 8.93E+04 Al
 2.13E+05 Si
 5.60E+03 K

Totale massa: mg

Faciliteit: **Therm. flux:** s⁻¹.m⁻²
Help **Epi Therm. flux:** s⁻¹.m⁻²
Alpha:
Snelle flux: s⁻¹.m⁻²

Bestralingstijd: year
Afkoeltijd: hour
Help

Cyclische bestraling:
Help

Seriebestraling:

Stap 1: Activiteitsberekening

Stap 2: Verpakking van de stoffen

Opslaan in persoonlijke database

BERAKT input en output: Grondwater

Let op: deze berekeningen zijn voor 10.000 kg grondwater.

Berakt en

06/04/2017, 10:16

Activiteitsberekening

BERAKT

stof gewicht (mg)

O 8.89e+009

H-1 1.11e+009

H-2 4.44e+005

Faciliteit EigenInvoer
 Bestralingstijd 100.00 years
 Afkoeltijd 1.00 hours
 Dikte loodafscherming 0.045 m

Direct na bestraling:

Totale radiotoxiciteit 9.25e-011 Sv
 Dosistempo op 1 meter 7.92e-009 uSv/h
 Dosistempo op 1 m met 0.045 m lood 1.13e-009 uSv/h
 Opp. dosistempo op 10 cm 7.92e-006 uSv/h
 Productnuclide C-14

Na afkoeling:

Totale radiotoxiciteit 9.25e-011 Sv
 Dosistempo op 1 meter 7.92e-009 uSv/h
 Dosistempo op 1 m met 0.045 m lood 1.13e-009 uSv/h
 Opp. dosistempo op 10 cm 7.92e-006 uSv/h
 Productnuclide C-14

				(Gamma dosis)	(Gamma dosis)	(Beta dosis)
				(zonder lood)	(met lood)	
Target	Product	halfw.tijd	aktiviteit (Bq)	h10 (uSv/h)	h10 (uSv/h)	h07 (uSv/h)
H-2	H-3	12.33 y	1.24e+000	1.24e-009	1.77e-010	1.24e-006
O-17	C-14	5736.47 y	6.68e+000	6.68e-009	9.50e-010	6.68e-006

TE BESTRALEN STOFFEN

ppm
procent
ug
mg
g

1E6 H2O;[1,2H99.98,.02]

Berakt en

06/04/2017, 10:16

Totale massa: mgFaciliteit: [Help](#)Therm. flux: $s^{-1}.m^{-2}$ Epi Therm. flux: $s^{-1}.m^{-2}$ Alpha: Snelle flux: $s^{-1}.m^{-2}$ Bestralingstijd: Afkoeltijd: [Help](#)Cyclische bestraling: [Help](#)Seriebestraling: [Stap 1: Activiteitsberekening](#)[Stap 2: Verpakking van de stoffen](#)[Opslaan in persoonlijke database](#)

Werking BERAKT

Het BERAKT programma berekent de door neutronenbestraling geïnduceerde activiteit als volgt:

Om te beginnen wordt het activeringstempo R (dat is de kans op neutronenvangst per atoom per seconde) berekend met:

$$R = \sigma_0 g(T) \Phi_t + I_0(\alpha) \Phi_e + \sigma_{fast} \Phi_{fast}$$

waarin

- σ_0 de conventionele werkzame doorsnede voor thermische neutronenvangst (m^2)
- $g(T)$ de Westcottfactor die voor niet- $1/v$ reacties aangeeft hoe de werkzame doorsnede varieert met de temperatuur T van de thermische neutronen.
- T de temperatuur van de thermische neutronen
- Φ_t de conventionele thermische neutronenflux ($m^{-2}s^{-1}$), zijnde de integraal over de Maxwell-Boltzmannverdeling van 0 tot ∞ (zie ook Ref. 3)
- $I_0(\alpha)$ de resonantieintegraal als functie van de parameter α
- α een parameter die de afwijking van de ideale $1/E$ relatie tussen flux en neutronenenergie in het epithermische gebied karakteriseert
- Φ_e de epithermische flux bij een neutronenenergie van 1 eV ($m^{-2}s^{-1}$)
- σ_{fast} de werkzame doorsnede voor snelle neutronenvangst (m^2)
- Φ_{fast} de snelle neutronenflux boven 200 keV ($m^{-2}s^{-1}$)

Vervolgens wordt het aantal bestraalde atomen N berekend met

$$N = \frac{w\theta N_{avogadro}}{M}$$

waarin

- w de hoeveelheid bestraalde atomen van iedere element (kg)
- θ het isotopisch voorkomen van ieder isotoop van dat element (fractie tussen 0 en 1)
- $N_{avogadro}$ het getal van Avogadro (6×10^{23} atomen/mol)
- M de atoommassa van het element (g/mol)

Tenslotte wordt de geïnduceerde radioactiviteit A (in Bq) berekend met

$$A = NR \frac{(1 - e^{-\lambda t_{ir}})}{\lambda} e^{-\lambda t_d}$$

waarin

- t_{ir} de tijdsduur van de bestraling (s)
- λ het radioactieve vervaltempo (s^{-1}), gelijk aan $\ln(2)/t_{1/2}$
- t_d de tijdsduur tussen bestraling en moment van activiteitsbepaling (s)

Het eindresultaat wordt gerapporteerd voor ieder radio-isotoop dat gezien de samenstelling van het ingevoerde materiaal een activiteit oplevert van meer dan 1 Bq.

In die gevallen waarin radioactief verval leidt tot het ontstaan van radioactieve dochterisotopen of reeksen daarvan, wordt in gebruik gemaakt van een algoritme dat reeksen van onbeperkte complexiteit door kan rekenen (Ref. 4).

Referenties:

Ref 1: Uitvoeringsregeling stralingbescherming EZ, Bijlage 1 d.d. 30 december 2014.

Ref 2: Monte Carlo verification of the radiation shielding design of the Maastrro Mevion 250 MeV proton therapy treatment room. Version 1.0, 12 juli 2016.

Ref 3: M. Blaauw, P. Bode, M. de Bruin, "An alternative convention describing the (n,γ) activation rate suited for use in the k_0 method of NAA", J.Radioanal.Nucl.Chem. 152 (1991) 507-518

Ref 4: M. Blaauw, "A versatile computer algorithm for Linear First Order Equations", Appl. Radiat.Isot. 44 (1993) 1225-1229