



## Veiligheidsaspecten bij klinisch lasergebruik

FRITS F.M. DE MUL<sup>#†</sup>, MARJOLEIN HILGERINK<sup>‡</sup>, SANNE VAARTJES<sup>†</sup> EN RON VAARTJES<sup>‡</sup>

<sup>#</sup>Frits de Mul was eerder UHD (Associate Professor) Biomedische Optica bij Technische Natuurkunde, Universiteit Twente, daarna in het Dept. Biomedical Engineering, UMCG, Groningen. [www.demul.net/frits](http://www.demul.net/frits); [ffm@demul.net](mailto:ffm@demul.net)

<sup>‡</sup>ZGT (Ziekenhuisgroep Twente), Afdeling Klinische Fysica, Hengelo/Almelo, en

<sup>†</sup>MST (Medisch Spectrum Twente), Afdeling Klinische Fysica, Enschede

‡Ron Vaartjes is tevens voorzitter van de Stichting Laserveiligheid in de Gezondheidszorg:

<http://www.laserveiligheidindegezondheidszorg.nl/>

### Samenvatting

In de *Richtlijn* van de Europese Commissie [EUR06] voor de veiligheid van lasertoepassingen worden procedures gegeven voor het berekenen van de MPE (Maximum Permissible Exposure). Deze kan echter afhankelijk zijn van de hoek waaronder het oog de bron in het focus ziet, en deze hoek hangt af van de te berekenen *Veilige Oogafstand* ("Gevaarsafstand", *Nominal Ocular Hazard Distance - NOHD*). Omdat de *NOHD* echter in een aantal situaties weer afhangt van de MPE is berekening van de *NOHD* dan een iteratief proces. De berekeningsprocedure is opgenomen in het softwarepakket *Hygirad* [Mul10].

### Inleiding

In de klinische praktijk moeten passende veiligheidsmaatregelen (denk aan: laser veiligheidsbril, raamblindering, ruimteontspiegeling, interlockschakeling) worden getroffen om het risico dat het oog (en ook de huid) beschadigd raakt bij lasertoepassingen zoveel mogelijk te verkleinen [Tei06]. Hiervoor is het noodzakelijk voor de laser de *Veilige Oogafstand* (*NOHD: Nominal Ocular Hazard Distance: "Gevaarsafstand"*) te berekenen. *NOHD* is de afstand waarbij de dosis onder de *Maximum Permissible Exposure* (*MPE*) komt en dus veilig is voor het oog. *MPE* is in formulevorm getabelleerd in [EUR06], voor verschillende belichtingstijden en lasergolflengten. In de meest voorkomende situaties is de berekening van *NOHD* rechtstreeks maar in sommige situaties blijkt de berekening echter een iteratief proces te zijn. In dit artikel wordt dit verduidelijkt.

Een tweede aspect is dat de *Richtlijn* [EUR06] geen principieel onderscheid maakt tussen de twee soorten lasers: pulslasers en continue lasers. Wel dienen bij pulslasers de effecten van zowel de enkele puls als van het totaal van pulsen bepaald te worden. Bij een continue laser kan een hele behandeling als één puls worden gezien. Daarom is het nuttig om een eenduidig protocol op te stellen waarin beide soorten kunnen worden opgenomen.

### NOHD-berekening

De berekening van *NOHD* gaat uit van de voorwaarde:

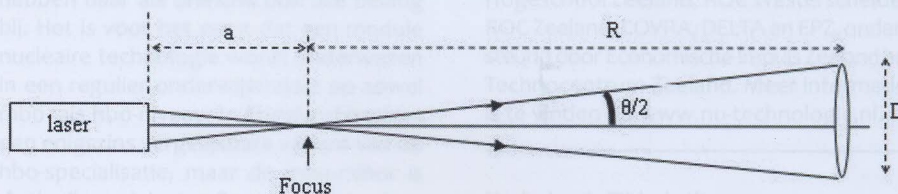
$$\frac{P \cdot PC}{S} \leq MPE \quad (1)$$

waarin *P* het laservermogen [*W*], *S* het belichte oppervlak [*m*<sup>2</sup>], *PC* de *profiel-correlatiefactor* van de laser [-] en *MPE* de *Maximum Permissible Exposure* [*W*·*m*<sup>2</sup>] weergeeft. De *PC* wordt daarbij bepaald door het aantal lobben in de laserbundel. Voor rechthoekig transversale modes *TEM<sub>mn</sub>* zijn er (*m*+1)(*n*+1) lobben en voor circulaire transversale modes *TEM<sub>pl</sub>*; 1 spot met *p* ringen, met 2(*p*+1) lobben per ring als *l* > 0. *PC* geeft ruwweg aan dat de lokale vermogensdichtheid in de ringen en spots hoger is dan het gemiddelde over de hele bundelenvolp. Voor 00-respectievelijk 01- en 10-modes is *PC* = 1 respectievelijk 2 te nemen. *NOHD* is de kleinste afstand waarvoor aan de voorwaarde in *Vergelijking (1)* wordt voldaan.

In *Figuur 1* is de gebruikelijke situatie aangegeven. Het belichte oppervlak in het target kan worden weergegeven door:

$$S = \frac{\pi}{4} \cdot D'^2, D' = D + w \quad (2)$$

waarin de effectieve diameter *D'* kan worden geschreven als de som van *D* en *w*, de waists diameter in het laserfocus.



**Figuur 1.** Belichting van het target (diameter *D*). De diameter van de spot in het laserfocus (de waists) = *w*. De halve divergentiehoek = *θ*/2. De afstanden van de laser tot het focus en van het focus tot het target zijn resp. *a* en *R*.

Aangezien  $D = 2R \cdot \tan(\theta/2)$  volgt hieruit:

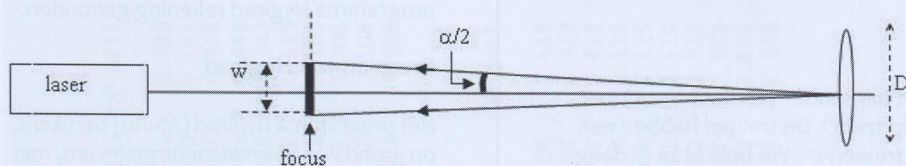
$$\begin{aligned} NOHD = R + a &= \frac{D}{2 \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} + a \\ &= \frac{1}{2 \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \cdot \left[ \sqrt{\frac{4P \cdot PC}{\pi \cdot MPE}} - w \right] + a \quad (3) \end{aligned}$$

Hierin is *a* de afstand van de laserbehuizing tot het focus. Afhankelijk van de constructie van de laserbehuizing kan het focus buiten, op de rand of binnenin de behuizing liggen (*a* > 0, = 0, < 0).

### Nadere analyse

In een aantal gevallen (bijvoorbeeld in het zichtbare gebied) is *MPE* afhankelijk van de koordehoek *α*, zijnde de hoek waaronder een punt in het target de laserspot "ziet", ofwel de hoek die de laserspot opspant, gezien vanuit het target (*Figuur 2*). Hierin is

$$\tan \frac{1}{2} \alpha = \frac{w}{2R} = \frac{w}{2(NOHD - a)} \quad (4)$$



**Figuur 2.** De koordehoek  $\alpha$  die het laserfocus opspant, gezien vanuit het target.

De waarde van  $MPE$  is afhankelijk [EUR06] van de lasergolflengte, de belichtingsduur en een aantal constanten (genoemd CA, CB, CC, CE, T1 en T2). Echter voor een aantal situaties, met name voor golflengten tussen 400 en 1.400 nm en zowel voor korte pulsen als bij continue belichting, zijn enkele van deze constanten (CE en T<sub>2</sub>) zelf ook weer afhankelijk van  $\alpha$ . Omdat  $R = NOHD - a$ , en  $NOHD$  een functie is van  $MPE$ , en  $MPE$  zelf weer een functie kan zijn van  $\alpha$ , resulteert voor de berekening van  $NOHD$  een iteratief proces. Hierin worden de waarden van  $NOHD$ , berekend met **Vergelijking (3)** en **(4)**, stapsgewijs naar elkaar toegebracht. Er is niet altijd convergentie, met name voor grote waarden van de *waist diameter*.

De situaties waarin een dergelijk proces noodzakelijk is komen vooral (maar niet uitsluitend) voor als de belichtingstijd  $\geq 10$  s is en/of de lasergolflengte tussen 400 en 1.400 nm ligt, dus ook in het zichtbare gebied. Er wordt dan onderscheid gemaakt tussen gevallen waarin de koordehoek  $\alpha$  kleiner blijft of juist groter wordt dan gegeven minimum- en maximumwaarden (respectievelijk 1,5 en 100 mrad). Een voorbeeld: als de spotdiameter 1,5 mm is en de  $NOHD$  is kleiner dan 1 m, dan is de koordehoek groter dan 1,5 mrad en is iteratie noodzakelijk.

### Berekening van $NOHD$ en de benodigde bescherming voor het oog

De eis voor bescherming van het oog door middel van een laser veiligheidsbril is [Teio6] dat de bril, gehouden in het centrum van de laserbundel, op 25 cm afstand van de plaats van uittrede van de bundel gedurende 10 s bij de meest ongunstige instelling van de laser, een verzwakking tot onder het  $MPE$ -niveau moet geven.

Dit houdt in dat **Vergelijking (1)** moet gelden voor een onafgebroken belichting van  $t_b$  s in de meest ongunstige situatie voor de laserenergie (of het laservermogen), de laserpulsduur (indien aanwezig) en voor een vastgelegde afstand  $b$  tot het focus, met  $t_b = 10$  s en  $b = 0,25$  m. Voor de

huid gelden overeenkomstige eisen. De transmissie  $T$  en de *Optische Dichtheid*  $OD$  van de bril worden dan volgens de kwadratenwet gegeven door:

$$T = \left[ \frac{b}{NOHD} \right]^2; OD = -^{10} \log T \quad (5)$$

In het algemeen kan een belichtingsschema worden gehanteerd als geschetst in **Figuur 3**.

Hierin wordt de totale behandeling opgebouwd gedacht uit aparte "treinen" pulsen. Het onderscheid tussen pulslasers en continue lasers kan worden ondervangen door de productie van een continue laser te beschouwen als één lange puls (eventueel onderverdeeld in "treinen").

De volgende eisen worden gesteld (zie tabel 2.6 van [EUR06]):

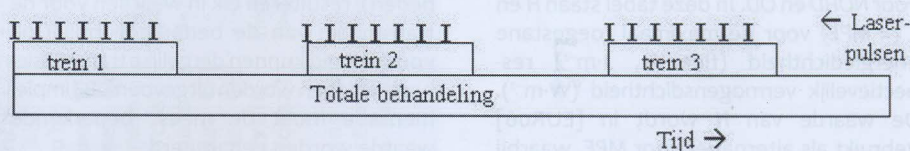
1. De blootstelling ten gevolge van elke afzonderlijke puls in een reeks pulsen mag de blootstellingsgrenswaarde voor een enkele puls met dezelfde pulstijd niet overschrijden.
2. De blootstelling ten gevolge van een groep van pulsen (of subgroep van pulsen in een reeks) die in tijd  $t$  worden afgegeven, mag de grenswaarde voor de blootstelling voor tijd  $t$  niet overschrijden.
3. De blootstelling ten gevolge van een enkele puls binnen een groep pulsen mag niet hoger zijn dan de grenswaarde voor blootstelling aan een enkele puls vermenigvuldigd met de cumulatieve thermische correctiefactor  $C_p = N^{-0,25}$ , waarbij  $N$  het aantal pulsen is. Deze

regel is alleen van toepassing op grenswaarden voor blootstelling die moeten beschermen tegen thermische beschadiging, waarbij alle pulsen die in minder dan  $T_{min}$  worden afgegeven, behandeld worden als een enkele puls. De waarde van  $T_{min}$  is gegeven in tabel 2.6 van [EUR06].

In onze interpretatie van deze eisen gaan we uit van een laser die basispulsen levert met een duur  $\Delta t_p$  en een repetitiefrequentie  $f_p$ . Deze basispulsen worden geleverd in de vorm van "treinen", met een duur van  $\Delta t_t$  en een repetitiefrequentie  $f_t$ . De totale belichtingstijd is  $t_b$ .

We nemen aan dat elke basispuls een energie  $\Delta E_p$  bevat en dus een (gemiddeld) vermogen  $P_p = \Delta E_p / \Delta t_p$  heeft. Elke trein bevat een energie  $E_t = \Delta t_t \cdot f_p \cdot \Delta E_p$  en een gemiddeld vermogen  $P_t = f_t \cdot \Delta E_p$ . Gedurende de totale behandeling met belichtingstijd  $t_b$  wordt dus een energie  $E_b = t_b \cdot f_t \cdot E_t$  geleverd, en is dus het gemiddelde vermogen  $P_b = E_b / t_b = f_t \cdot \Delta t_t \cdot f_p \cdot \Delta E_p$ . Bij continue "treinenloop" (frequentie  $f_t$ ) is het gemiddeld vermogen  $P_b = f_t \cdot \Delta t_t \cdot f_p \cdot \Delta E_p$ .

Op grond van deze eisen moet voor de maximaal mogelijke vermogens voor elk van de tijdsduren (puls, trein en totaal)  $NOHD$  worden berekend, eventueel rekening houdend met de correctiefactor  $C_p$ . Hierbij moeten als tijdsduren de technische gezien maximaal mogelijke waarden worden genomen, met een bovengrens van 10 s (zie boven). De hoogste waarde voor  $NOHD$  geldt als limiterend. Hiermee en met **Vergelijking (5)** kan de *Optische Dichtheid* van de benodigde bril worden berekend.



**Figuur 3.** Schematische weergave van een laserbehandeling. De behandeling kan opgebouwd worden gedacht uit een aantal pulstreinen, elk met een serie aparte pulsen. Voor continue lasers kan de pulsduur gelijk worden gesteld aan de treinduur.



## Voorbeeld

Stel, een pulslaser (golflengte 532 nm) levert basispulsen (elk duur = 5 ns) met 1 kHz in treinen van 20 ms lang, dus 20 pulsen-trein<sup>-1</sup>. De treinen hebben een respectievelijke frequentie van 0,1 s, dus 10 treinen-s<sup>-1</sup>. We belichten 5 s lang, dus met 50 treinen.

Stel elke basispuls heeft 1 MW vermogen, dus  $10^6 \times 5 \cdot 10^{-9} \text{ J} = 5 \text{ mJ}$  energie. Elke trein heeft dus  $20 \times 5 = 100 \text{ mJ}$  energie, ofwel gemiddeld  $100 \text{ mJ} / 20 \text{ ms} = 5 \text{ W}$ . Bij continue "treinenloop" (10 treinen-s<sup>-1</sup>) dus "overall gemiddeld" =  $1.000 \text{ mJ} \cdot \text{s}^{-1} = 1 \text{ W}$ .

### GEGEVENS LASER

### SITUATIE

|                                       | SITUATIE |        |     |
|---------------------------------------|----------|--------|-----|
|                                       | A        | B      |     |
| Golflengte                            | 532      | 532    | nm  |
| (Hele) Divergentiehoek                | 0.0125   | 0.0125 | rad |
| Profielcorrelatiefactor               | 2        | 2      | -   |
| Waist (spot) diameter                 | 400E-6   | 400E-6 | m   |
| Afstand laser - focus (waist)         | 0.3      | 0.3    | m   |
| Basispuls: pulsvermogen               | 1E6      | 1E6    | W   |
| ... of pulsenergie                    | 0        | 0      | J   |
| ...: duur                             | 5E-9     | 5E-9   | s   |
| ...: rep.freq.                        | 1000     | 1000   | Hz  |
| Pulstrein: duur                       | 0.020    | 10     | s   |
| ...: rep.freq.                        | 10       | 0.1    | Hz  |
| ...: puls aan eind trein (ja/nee=1/0) | 0        | 0      | -   |
| ...: aantal pulsen per trein          | 20       | 10000  | -   |
| Totale behandeling: duur              | 5        | 10     | s   |
| ...: aantal treinen in totaal         | 50       | 1      | -   |
| Min. afstand met bril (tbv OD)        | 0.25     | 0.25   | m   |

Tabel 1. Gegevens voorbeeldlaser.

Twee situaties zijn berekend:

A. "normaal" = normaal gebruik, zoals beschreven in het voorbeeld;

B. "eis" = veiligheids-eis: afstand 25 cm, belichting 10 s, ongunstigste situatie.

## Resultaten

In Tabel 1 staan voor de voorbeeldlaser de benodigde waarden van de variabelen voor de NOHD-berekeningen.

In Tabel 2 staan de resulterende waarden voor NOHD en OD. In deze tabel staan  $H$  en  $E$  (= MPE) voor de maximaal toegestane energiedichtheid (fluentie,  $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$ ) respectievelijk vermogensdichtheid ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ). De waarde van  $H$  wordt in [EUR06] gebruikt als alternatief voor MPE, waarbij  $\text{MPE} = H/t$ ;  $t$  = belichtingstijd. Uit deze berekeningen is te zien dat voor OD van de bril de waarde 6,4 genomen moet worden. Ook voor blootstelling van de huid kunnen verzwakkende maatregelen nodig zijn.

## Conclusies

De limiteringen van de blootstelling (exposure) van het oog, berekend voor twee situaties (de "normale" bedrijfs-situatie en die waarbij de belichtingstijd 10 sec is onder de meest ongunstige omstandigheden), resulteren elk in waarden voor de transmissie van de benodigde bril. Ook voor de huid kunnen dergelijke transmissie-berekeningen worden uitgevoerd. Bij implementatie moet de meest beperkende waarde worden gehanteerd.

De afhankelijkheid van MPE van de koordehoek  $\alpha$ , als gevolg van de aanwezigheid van verschillende constanten in de uitdrukking voor MPE, houdt in dat de berekening van NOHD in principe een iteratief proces is.

Hiermee wordt in de berekeningen door het programma Hygirad rekening gehouden.

## Programma Hygirad

Het programma Hygirad [Mul10] berekent, op grond van bovenstaande gegevens, met behulp van [EUR06], de waarden voor NOHD en OD voor de verschillende regimes en situaties. Dit programma, ontworpen als rekenhulp voor de Klinisch Fysicus, kan volgende problemen doorrekenen:

- Voorwaarden en vergunningen voor vervoer van nucliden.
- Beheer en statistiek van stralingsbadges van medewerkers.
- Gegevens voor instellingsvergunningen voor het gebruik van nucliden en radiologische toestellen in instellingen.
- Laboratorium- en milieubelastingen (lucht- en waterlozingen, terreingrens-doses) en controle op overschrijding daarvan van de voor de instelling vergunde waarden.
- Veiligheidsaspecten van klinisch gebruik van lasers.

Het programma is bij de eerste auteur verkrijgbaar.

Nederlands Tijdschrift voor Stralingsbescherming 1(3):16-19; 2010

## Trefwoorden:

lasers; laserveiligheid; klinisch; MPE; NOHD; Hygirad

## Referenties

[EUR06]

Richtlijn 2006/25/EG van het Europees Parlement en de Raad van 5 april 2006 betreffende de minimumvoorschriften inzake gezondheid en veiligheid met betrekking tot de blootstelling van werknemers aan risico's van fysische agentia (kunstmatige optische straling) (19e bijzondere richtlijn in de zin van artikel 16, lid 1, van Richtlijn 89/391/EEG); Publicatieblad van de Europese Unie, 27.4.2006, L 114/38-59.

[Teio6]

Teirlinck CJPM, Vaartjes SR, van Aardenne EM, Laserveiligheid in de Gezondheidszorg. Stichting Laserveiligheid in de Gezondheidszorg, september 2006.

[Mul10]

de Mul FF, 'HYGIRAD-software: Rekenhulp voor de Klinisch Fysicus'. Nederlands Tijdschrift voor Stralingsbescherming 1(2):11-15; 2010.



## A. Situatie: normaal gebruik (H in J/m<sup>2</sup>; E = MPE in W/m<sup>2</sup>)

| BEREKENING    | formule                   | vermogen [W] | CE (*) | T2 (s)(*) | MPE [W/m <sup>2</sup> ] | NOHD [m] | alfa [rad] | T-bril    | OD bril |
|---------------|---------------------------|--------------|--------|-----------|-------------------------|----------|------------|-----------|---------|
| oog: puls     | H=5E-3.CE                 | 1.000E+06    | 1.00   | 10.0      | 1.000E+06               | 127.9    | 3.134E-06  | 3.819E-06 | 5.418   |
| ..id. met CF1 | -- (N=20) CF= 4.729E-01   | ..           | 1.00   | 10.0      | 4.729E+05               | 185.9    | 2.155E-06  | 1.808E-06 | 5.743   |
| ..id. met CF2 | -- (N=1000) CF= 1.778E-01 | ..           | 1.00   | 10.0      | 1.778E+05               | 303.0    | 1.321E-06  | 6.808E-07 | 6.167   |
| oog: trein    | H=18.CE.t^0.75            | 5.000E+00    | 1.00   | 10.0      | 4.786E+01               | 41.53    | 9.702E-06  | 3.624E-05 | 4.441   |
| oog: totaal   | H=18.CE.t^0.75            | 1.000E+00    | 1.00   | 10.0      | 1.204E+01               | 37.06    | 1.088E-05  | 4.550E-05 | 4.342   |
| huid: puls    | H=200.CA                  | 1.000E+06    | 1.00   | 10.0      | 4.000E+10               | 0.906    | 6.597E-04  | 7.609E-02 | 1.119   |
| ..id. met CF1 | -- (N=20) CF= 4.729E-01   | ..           | 1.00   | 10.0      | 1.891E+10               | 1.196    | 4.463E-04  | 4.368E-02 | 1.360   |
| ..id. met CF2 | -- (N=1000) CF= 1.778E-01 | ..           | 1.00   | 10.0      | 7.113E+09               | 1.782    | 2.700E-04  | 1.969E-02 | 1.706   |
| huid: trein   | H=1.1E4.CA.t^0.25         | 5.000E+00    | 1.00   | 10.0      | 2.068E+05               | 0.896    | 6.715E-04  | 7.791E-02 | 1.108   |
| huid: totaal  | H=1.1E4.CA.t^0.25         | 1.000E+00    | 1.00   | 10.0      | 3.290E+03               | 2.494    | 1.823E-04  | 1.005E-02 | 1.998   |

## B. Situatie: 10 s eis (H in J/m<sup>2</sup>; E = MPE in W/m<sup>2</sup>)

| BEREKENING    | formule                    | vermogen [W] | CE (*) | T2 (s)(*) | MPE [W/m <sup>2</sup> ] | NOHD [m] | alfa [rad] | T-bril    | OD bril |
|---------------|----------------------------|--------------|--------|-----------|-------------------------|----------|------------|-----------|---------|
| oog: puls     | H=5E-3.CE                  | 1.000E+06    | 1.00   | 10.0      | 1.000E+06               | 127.9    | 3.134E-06  | 3.819E-06 | 5.418   |
| ..id. met CF1 | -- (N=10000) CF= 1.000E-01 | ..           | 1.00   | 10.0      | 1.000E+05               | 404.0    | 9.909E-07  | 3.830E-07 | 6.417   |
| ..id. met CF2 | -- (N=10000) CF= 1.000E-01 | ..           | 1.00   | 10.0      | 1.000E+05               | 404.0    | 9.909E-07  | 3.830E-07 | 6.417   |
| oog: trein    | H=18.CE.t^0.75             | 5.000E+00    | 1.00   | 10.0      | 1.012E+01               | 89.99    | 4.460E-06  | 7.718E-06 | 5.113   |
| oog: totaal   | H=18.CE.t^0.75             | 5.000E+00    | 1.00   | 10.0      | 1.012E+01               | 89.99    | 4.460E-06  | 7.718E-06 | 5.113   |
| huid: puls    | H=200.CA                   | 1.000E+06    | 1.00   | 10.0      | 4.000E+10               | 0.906    | 6.597E-04  | 7.609E-02 | 1.119   |
| ..id. met CF1 | -- (N=10000) CF= 1.000E-01 | ..           | 1.00   | 10.0      | 4.000E+09               | 2.286    | 2.014E-04  | 1.195E-02 | 1.922   |
| ..id. met CF2 | -- (N=10000) CF= 1.000E-01 | ..           | 1.00   | 10.0      | 4.000E+09               | 2.286    | 2.014E-04  | 1.195E-02 | 1.922   |
| huid: trein   | H=1.1E4.CA.t^0.25          | 5.000E+00    | 1.00   | 10.0      | 1.956E+03               | 6.722    | 6.228E-05  | 1.383E-03 | 2.859   |
| huid: totaal  | H=1.1E4.CA.t^0.25          | 5.000E+00    | 1.00   | 10.0      | 1.956E+03               | 6.722    | 6.228E-05  | 1.383E-03 | 2.859   |

Berekening met: CA = 1.000 | CB = 43.65 | CC = 1.000 | T1 = 100.0 | Tmin = 1.8E-05 (s); (\*) zie Richtlijn EU CF1 en 2  
 = correctiefactoren voor aantallen pulsen (N) in trein resp. totaal: CF = N^(-0.25)  
 T-bril = transmissie bril; alfa = koordehoek waait vanuit target

Tabel 2. Resultaten berekeningen.  
 CA, CB, CC, CE, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>min</sub>: zie [EURO6].

Dit artikel is gepubliceerd in:  
Ned. Tijdschr. V. Stralingsbescherming, 1 (3), 2010, 16-19.

CORRECTIE:

Door een fout bij het gereedmaken van de drukproeven is er een fout geslopen in formule (3).

De correcte formule is:

$$NOHD = R + a = \frac{D}{2 \tan \frac{\theta}{2}} + a = \frac{1}{2 \tan \frac{\theta}{2}} \left[ \sqrt{\frac{4P.PC}{\pi.MPE}} - w \right] + a \quad (3)$$