

Noteer niet uitsluitend de antwoorden, maar ook je redeneringen (in correct Nederlands) en de formules die je gebruikt hebt! Maak daar waar nodig een schets van de situatie. Let op het juiste aantal significante cijfers en vergeet de eenheden niet! Maak de opgaven in de juiste volgorde en werk netjes.

**Met potlood geschreven tekst wordt niet gecorrigeerd!  
Het gebruik van Tipp-Ex is niet toegestaan.**

**Opgave 1**

**Protonentherapie**

Voor het bestralen van tumoren maakt men meestal gebruik van gammastraling. Onderzoekers pleiten voor de bouw van drie centra in Nederland voor bestraling met protonen. Zij hebben het gedrag van protonen in water onderzocht en beweren dat deze manier voordelen heeft boven bestralen met gammastraling.

Onderzoek naar het gedrag van protonen in water is van belang voor eventuele medische toepassingen, omdat protonen zich in water hetzelfde gedragen als in biologisch weefsel.

In nevenstaande afbeelding is de energie van protonen uitgezet tegen de indringdiepte. Het gaat hier om protonen die met een energie van 200 MeV water binnendringen.

De energieafname per centimeter wordt 'stopping power' genoemd met de eenheid MeV/cm.

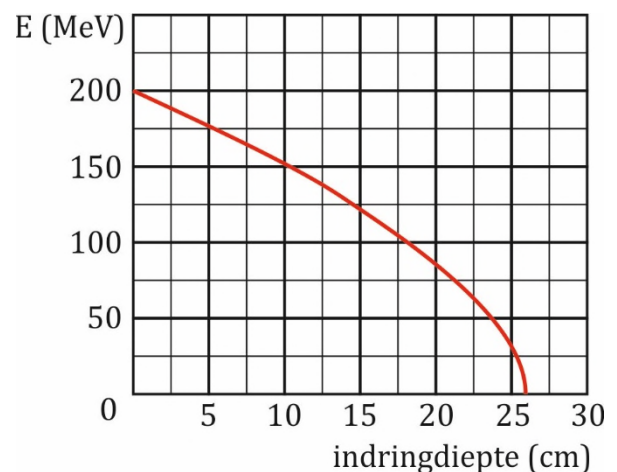
Uit nevenstaande afbeelding is af te leiden dat de stopping power aan het begin veel kleiner is dan aan het eind.

a) **Bepaal** tot welke indringdiepte de stopping power voor deze protonen in water kleiner is dan 10 MeV/cm.

In een onderzoek naar de bestraling van tumoren doet men een experiment waarbij een bolletje paraffine beschoten wordt met protonen. Het bolletje is bevestigd op een plaat. Het geheel bevindt zich in een bak met water. Zie nevenstaande afbeelding. Protonen gedragen zich in paraffine hetzelfde als in water. Men stelt drie eisen aan de bestraling:

Men stelt drie eisen aan de bestraling:

- het water ontvangt een lage stralingsdosis;
- het bolletje ontvangt een hoge stralingsdosis;
- de plaat ontvangt een stralingsdosis gelijk aan nul.

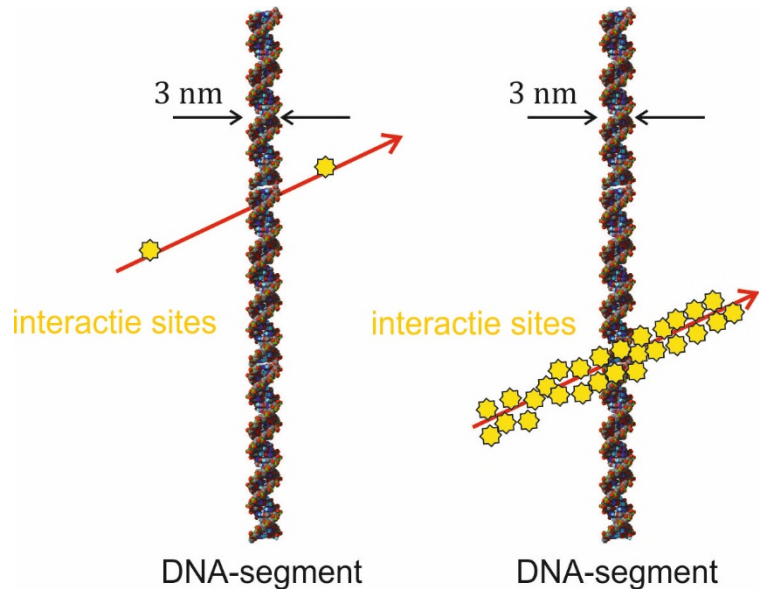


b) **Leg uit** dat de linkerkant van de plaat zich moet bevinden op een afstand van 26 cm van de plaats waar de protonen het water binnenkomen. Bespreek daarbij alle drie de eisen.

Protonen met een hogere beginenergie komen in water verder dan protonen met een lagere beginenergie. Stel dat men de plaat met het bolletje 10 cm meer naar links zou plaatsen.

c) Welke beginenergie moeten de protonen hebben om opnieuw aan dezelfde eisen te voldoen?

De protonen geven hun energie af door interactie met watermoleculen. Gemiddeld wordt per interactie een energie van 72 eV afgegeven. In nevenstaande afbeelding zijn twee segmenten getekend van een DNA-keten. De pijl stelt de baan van een proton voor. Bij het linker DNA-segment is de stopping power klein, namelijk ongeveer 2,5 MeV/cm, en liggen twee opeenvolgende interacties op nanoschaal betrekkelijk ver uit elkaar.

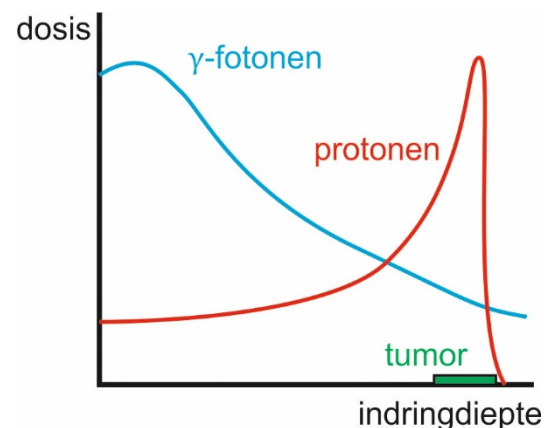


Bij het rechter DNA-segment is de stopping power groot,

namelijk 800 MeV/cm, en liggen de interacties zo dicht op elkaar dat een gebiedje met de breedte van een DNA-keten op meerdere plaatsen geraakt wordt.

d) Maak met een **berekening** aannemelijk dat bij het rechter DNA-segment het aantal 'interaction sites' goed is weergegeven.

Op verschillende plaatsen in de wereld worden hoogenergetische protonen al gebruikt om tumoren te bestralen. Ook in Nederland is de protonentherapie in opkomst. Voorstanders wijzen op de voordelen die de bestraling met protonen heeft ten opzichte van bestraling met gammastraling (fotonen). Hun argumenten worden gevisualiseerd weergegeven in nevenstaand diagram.



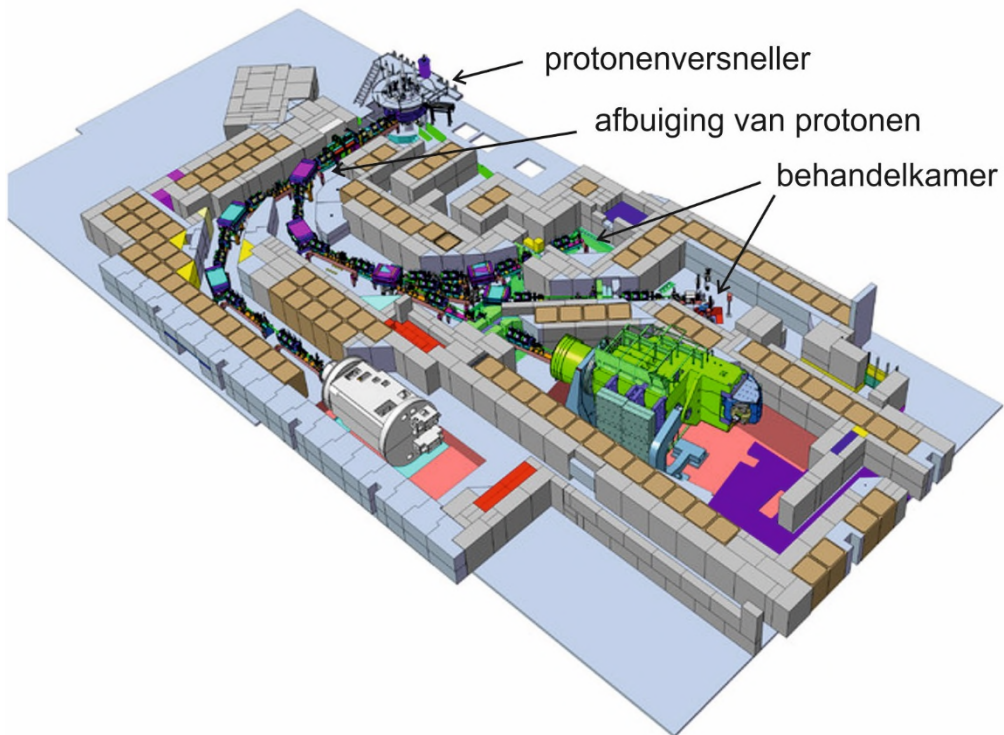
e) Leid uit nevenstaand diagram één voordeel af van protonenbestraling ten opzichte van bestraling met fotonen.

Bij een buitenlandse kliniek voor radiotherapie bij kinderen behandelt men tumoren die vlak onder de huid zitten. Daarvoor gebruikt men protonen met veel minder energie. De kliniek beschikt over een protonenversneller die protonen levert met een snelheid van  $9,0 \cdot 10^6$  m/s. De protonen worden vanuit stilstand versneld in een elektrisch veld.

f) **Bereken** de grootte van de spanning, waarmee deze protonen versneld worden.

g) Hoe groot is de energie in MeV waarmee de protonen de versneller verlaten?

Op weg van de protonenversneller naar de behandelkamer worden de protonen afgebogen. Zie onderstaande afbeelding. Daarvoor zijn sterke afbuigmagneten nodig.



We beschouwen protonen die daarbij een deel van een cirkelbaan doorlopen waarvan de straal 3,0 m bedraagt. Zie nevenstaande afbeelding.

- h) **Bepaal** de richting van het magnetisch veld in de afbuigmagneten.
- i) **Bereken** de sterkte van het magnetisch veld die nodig is om deze protonen deze baan te laten doorlopen.

