

WND Conferentie 2022

Junior Academy NRG

Rollenspel Medische Beeldvorming

16 december 2022

Sabrina Brandjes
Bart Verdonschot



Nuclear. For life.

Inhoud

Wie zijn wij?

NRG - Junior Academy NRG (JAN)

Rollenspel Medische Beeldvorming

Nieuwe module - Kernenergie



Nuclear. For life.

Wie zijn wij?

- **Sabrina Brandjes**
 - 28 jaar
 - Amsterdam
 - MSc. Scheikunde (Science for Energy and Sustainability)
UvA/VU
- **Bart Verdonchot**
 - 25 jaar
 - Amsterdam
 - MSc. Natuurkunde (Theoretical Physics), UvA/VU



Over NRG



Nuclear. For Life. Ons onderzoek is belangrijk voor gezondheid en klimaatneutrale energie.



30.000

Patiënten, iedere dag opnieuw geholpen met onze producten.



700

Gemotiveerde medewerkers. Zij maken iedere dag de wereld ietsjes beter



265

Reactor-productiedagen voor onderzoek en medicijnen

- Kernenergie: onderzoek en advies
- Radioactiviteit en straling
- We werken veilig of we werken niet
- Nucleaire medicijnen (medische isotopen): onderzoeken, ontwikkelen en maken
- 65% Europa en 35% wereldwijd
- Medische beeldvormingstechnieken (PET en SPECT-scans) + behandeling van ziektes zoals kanker

Over de HFR

(High Flux Reactor)

Opgestart in November 1961



45 MW vermogen

265 dagen per jaar operationeel

Cruciaal onderdeel van de
Europese nucleaire infrastructuur
voor nucleair-technologisch
onderzoek en de productie van
medische isotopen:

Diagnostische isotopen
Therapeutische isotopen





Nucleair Nederland

Nederlandse kennisbasis en nucleaire infrastructuur

Het *Technopolis-rapport* van 2016 beschrijft de nucleair kennisinfrastructuur in Nederland.

TU Delft en NRG ontwikkelen kennis en competenties die bijdragen aan een veilige toepassing van kern-energie en nucleaire geneeskunde. Er is kennis en expertise op het gebied van bedrijfsduurverlening van kerncentrales opgedaan in het Verenigd Koninkrijk, Zweden en Argentinië.

TU-Delft en NRG doen ook (veelal gezamenlijk) onderzoek naar de ontwikkeling van nieuwe generaties kerncentrales en de ontwikkeling van nieuwe medische isotopen (met PALLAS).

PALLAS werkt aan de realisatie van een nieuwe reactor voor de productie van medische isotopen en onderzoek.



Urenco verrijkt splijtstoffen voor vreedzaam gebruik in kerncentrales over de hele wereld en heeft de Nederlandse staat als aandeelhouder.

COVRA ontwikkelt kennis en competenties op het gebied van radioactief afval en doet onderzoek naar de langetermijnoplossing (eindberging).

EPZ bedrijft al decennia lang in Borssele de enige Nederlandse kerncentrale.



Waarom medische isotopen?

Voor de wereld

Wereldwijd ongeveer 48 miljoen patiënten per jaar

85% diagnostiek, stabiel (met name cardiologie, neurologie, oncologie)

15% therapie, sterk groeiend (met name oncologie)

Diagnostiek: Pet SCAN (bijvoorbeeld F18, C11, Ga68, Rb82)
SPECT Scan (bijvoorbeeld Tc99m)

Therapie: Hyperthyreoidie (I131)
Prostaat- borstkanker (Ir192, I125)
Leverkanker (Y90)
NeuroEndocriene Tumoren (Lu177)

Pijnbestrijding bij botmetastasen (Re186, Sm153, Sr89)



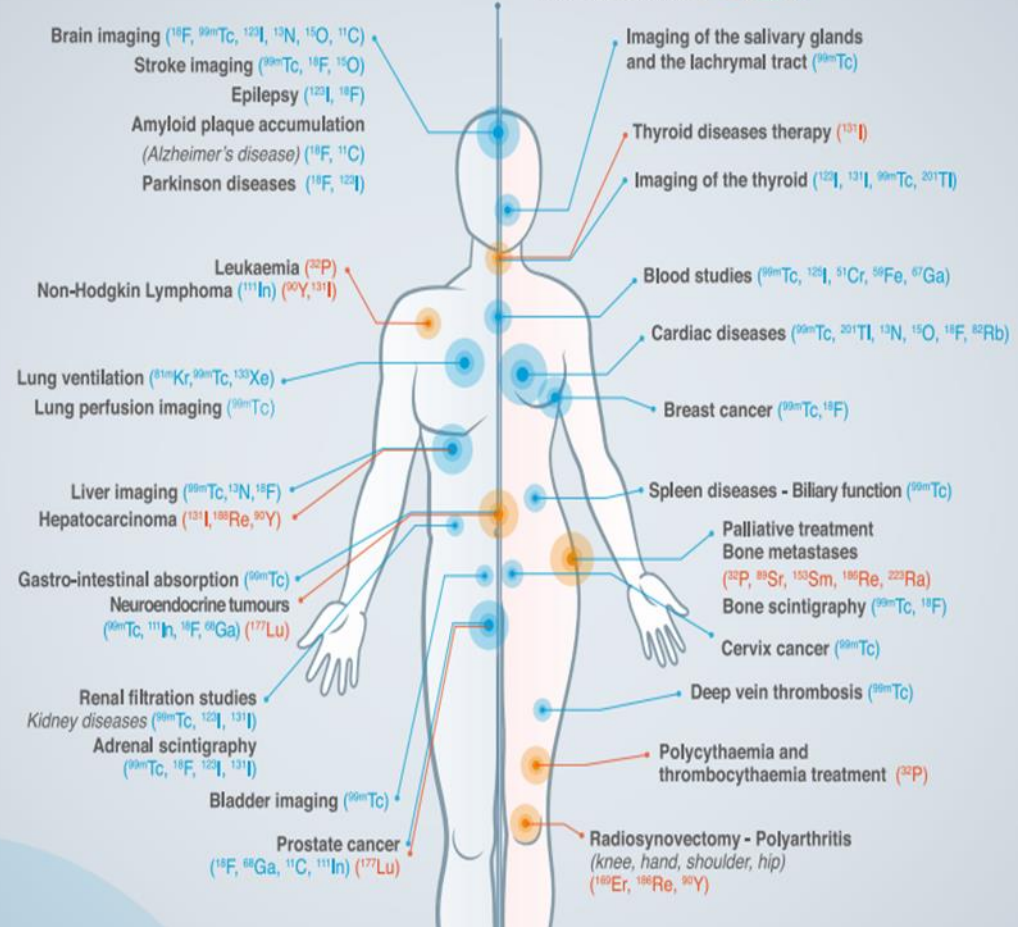
Medische toepassingen

Blauw: Diagnostiek
Rood: Therapie
Bron: AIPES 2017

DIAGNOSIS & THERAPY

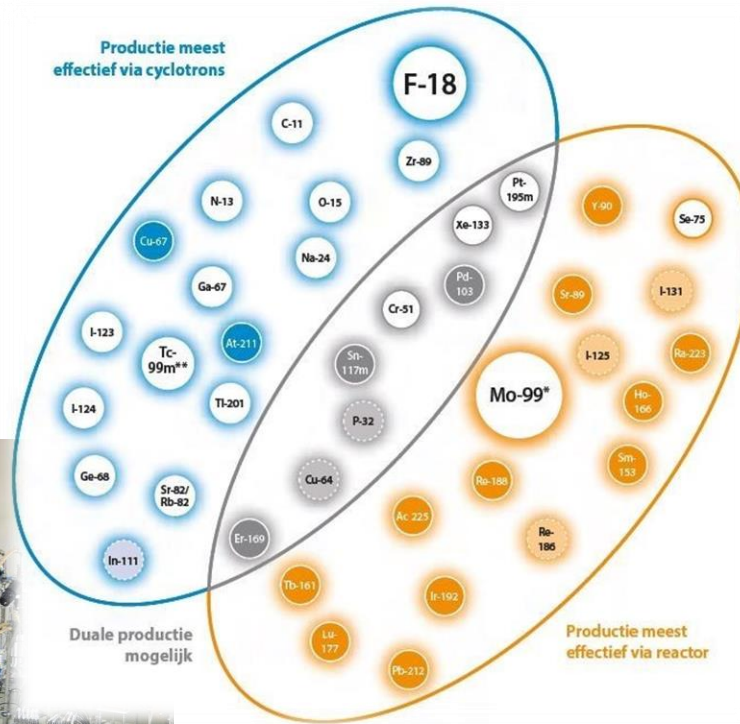
Whole body

- Primary tumors and metastases (^{18}F , ^{11}C)
- Oncology therapy (^{131}I , ^{177}Lu , ^{166}Ho , ^{90}Y)
- Infectious diseases ($^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{67}Ga , ^{18}F)



Isotope	Production	Objective	Indication	Numbers per year
Tc-99m	Reactor	Diagnostic	SPECT	220,000
F-18, In-111, I-123, Ga-67	Cyclotron	Diagnostic	PET	129,000*
Rb82	Reactor	Diagnostic	Myocard PET	4,200
I-131	Reactor	Therapy	Hyperthyroidism	1,846
Ir-192	Reactor	Therapy	Breast/prostate cancer	1,724
Ra-223	Reactor	Therapy	Metastasised prostate cancer	1,100
Y-90	Reactor	Therapy	Liver cancer, Non-Hodgkin's Lymphoma	225
Lu-177	Reactor	Therapy	NE tumours, PSMA	670
Ho-166	Reactor	Therapy	Liver cancer	40
I-125	Reactor	Therapy	Prostate cancer, marker strands	> 1,000
Re-186	Reactor	Pain management	Bone metastases	10-15
Sm-153	Reactor	Pain management	Bone metastases	120
Sr-89	Reactor	Pain management	Bone metastases	22
Er-169	Reactor	Pain management	Bone metastases	10-15

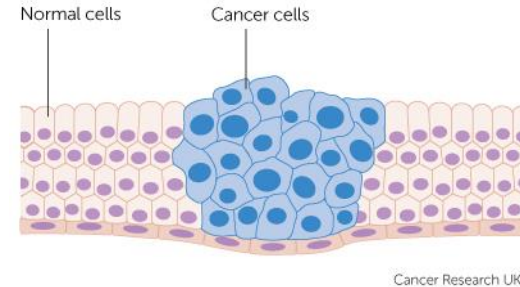
Cyclotron & Kernreactor



Therapeutische isotopen

- Kanker is wereldwijd een van de belangrijkste oorzaken van ziekte en overlijden, met ongeveer 14 miljoen nieuwe gevallen en 8,2 miljoen kanker gerelateerde sterfgevallen in 2012.
- Het aantal nieuwe gevallen zal naar verwacht stijgen met ongeveer 70% de komende 20 jaar.

Type of cancer	Deaths per year
Lung	1,59 miljoen
Liver	745.000
Stomach	723.000
Colorectal	694.000
Breast	521.000
Oesophagus	400.000



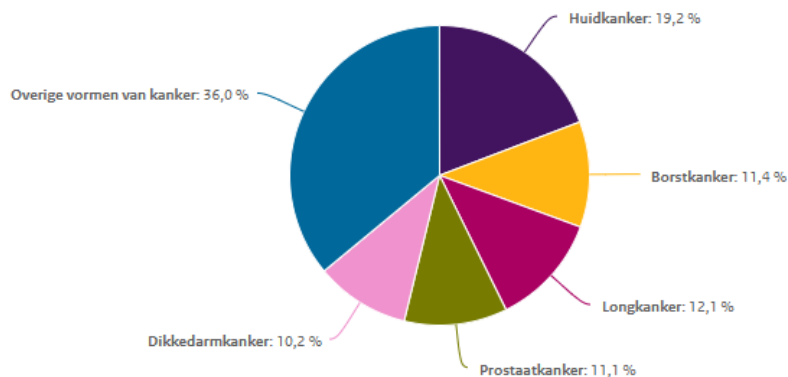
Source: WHO World cancer report 2020

Belang voor Nederland

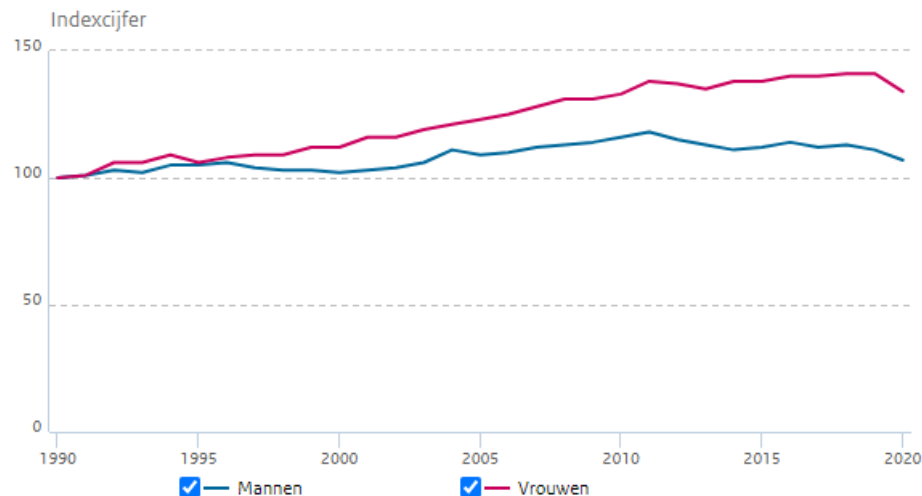
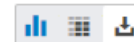
In Nederland worden ongeveer 115.000 nieuwe patiënten met kanker gediagnosticeerd.



Aantal nieuwe gevallen van kanker naar kankervorm 2020



Aantal nieuwe gevallen van kanker 1990-2020



Behandeling met Lu-117 (Lutathera)

Kind, 8 jaar oud, Neuroblastoma

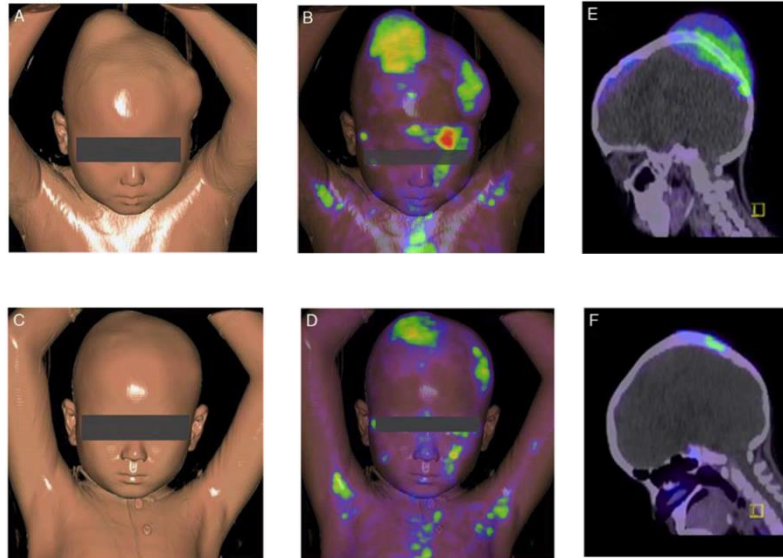
Palliatieve behandeling met Lu-177

DOTATATE + orale temazolamide

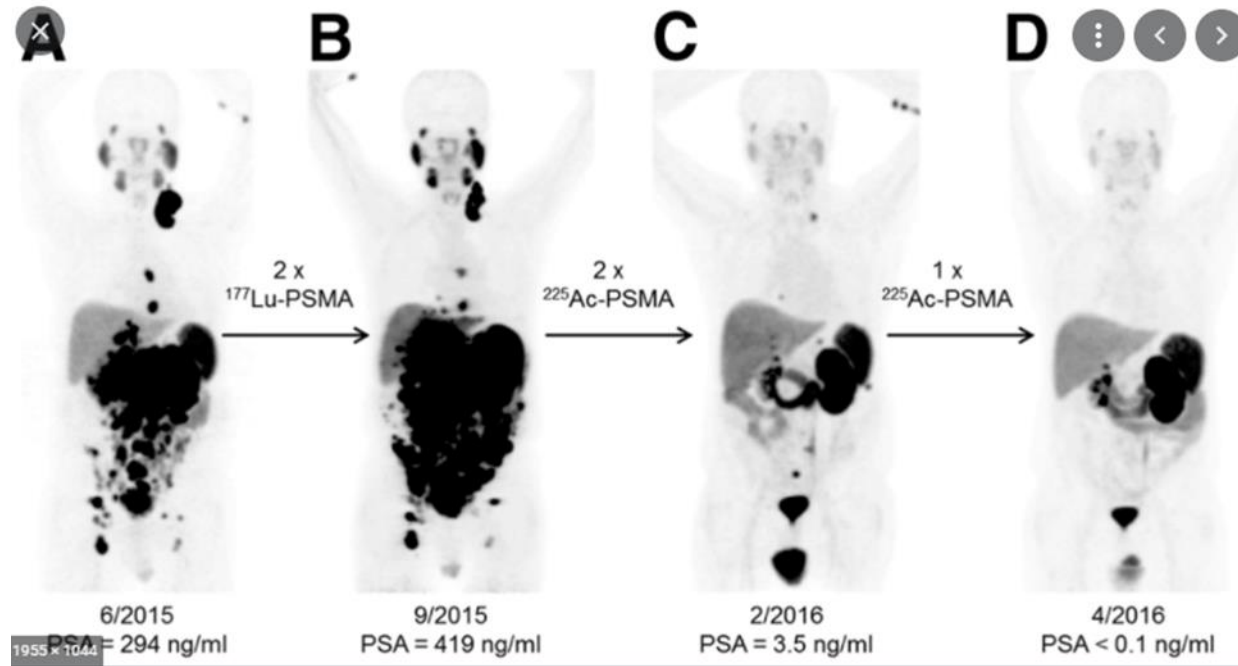
Na 3 maanden: foto C en D

Na 11 maanden: foto F

“Significant clinical improvement from severely compromised to normal functional state”



Behandeling met Lu-117 en Ac-225



Progress in Targeted Alpha-Particle-Emitting Radiopharmaceuticals as Treatments for Prostate Cancer Patients with Bone Metastases
by Chirayu M. Patel

Wat is een radiofarmaceuticum

“Radiopharmaceuticals are unique medicinal formulations containing radioisotopes which are used in major clinical areas for diagnosis and/or therapy”

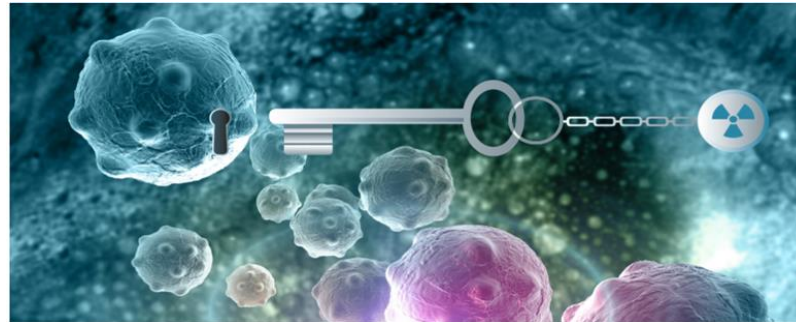
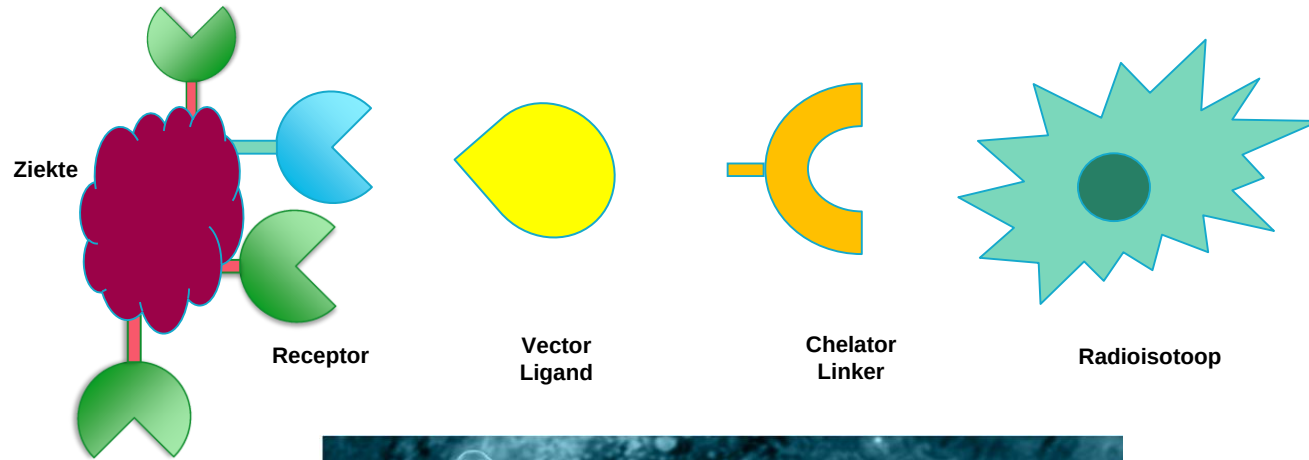
- Radioisotopen in formuleringen voor medisch gebruik
 - Diagnostiek (gamma stralers, beta (+, positronen) stralers)
 - Therapie (Beta (-, elektronen) en alpha stralers, auger-emitters)
- Theranostiek = combinatie van diagnostiek en therapie in 1 middel

• Bron: WHO, document QAS/08.262/FINAL November 2008

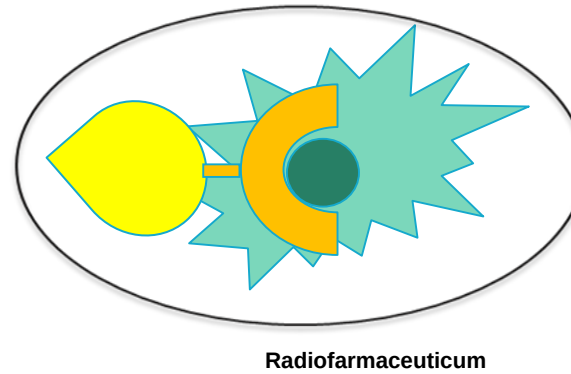
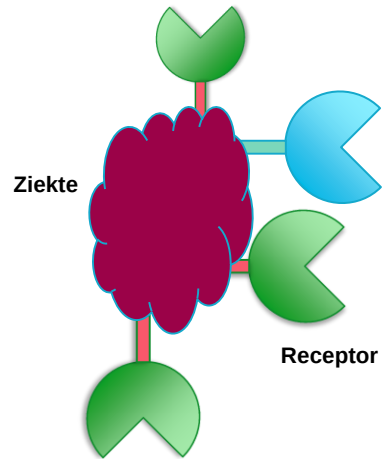
Wat heb je nodig voor een radiofarmaceuticum

- Een geschikt aangrijpingspunt op de tumor of andere aandoening = biologisch target (receptor, enzym, antigeen of ander specifiek deel van de cel)
- Een vector (vector, tracer, ligand, “doelzoeker”) die specifiek en voldoende sterk hecht aan dit target en geen immuunreactie in het lichaam geeft (bijv. monoklonale antilichamen, zouten, eiwitten, peptiden, kleine moleculen)
- Geschikt radioisotoop (actief werkzaam deel voor imaging, therapie of beide, geschikte halfwaardetijd, geschikt stralingsspectrum)
 - Eventueel een stof die de vector bindt (labelen) aan het isotoop (chelator, linker)

Grafisch weergegeven



Radiofarmaceuticum



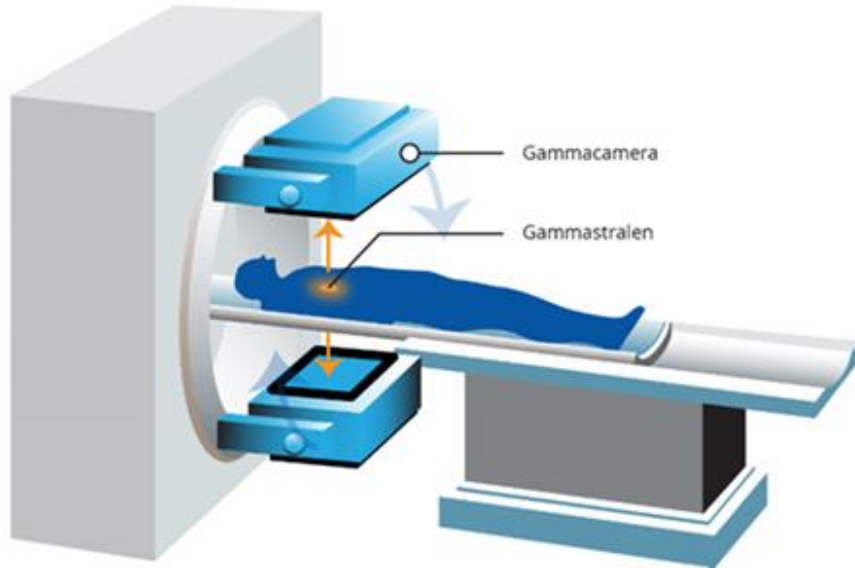
Diagnostiek → Radiofarmaceuticum nodig

Single Photon Emission

Computed Tomography (SPECT)

Gammastraling komt uit het lichaam

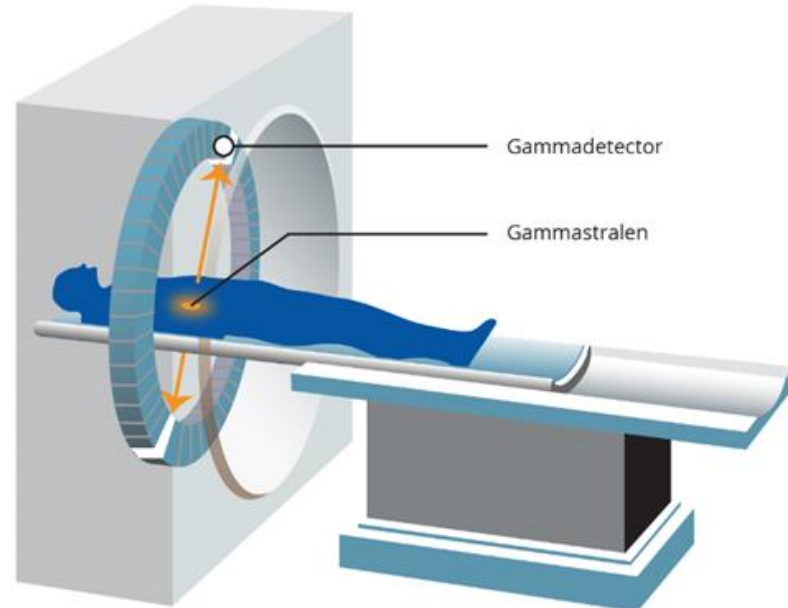
Gammacamera → 3D beeld



Positron Emission Tomography (PET)

Positronstraling (in twee richtingen)

Ring van detectoren → 3D beeld



Junior Academy NRG (JAN)

Doel van het project:

Nucleaire kennis uitdragen naar de samenleving

- Project door trainees
- Radioactiviteit, een abstract begrip
- Belang van radiologische toepassingen
- Ontwikkeld met docenten en vakdidacticus!



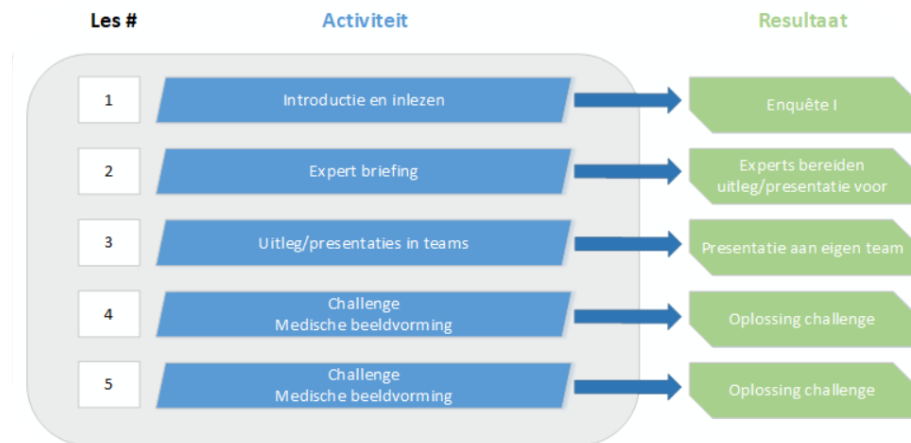
Junior Academy NRG: De lesmodule

Rollenspel Medische Beeldvorming voor 4/5 HAVO/VWO

Het rollenspel geeft een praktijkvoorbeeld van multidisciplinair samenwerken.

Vakgebieden:

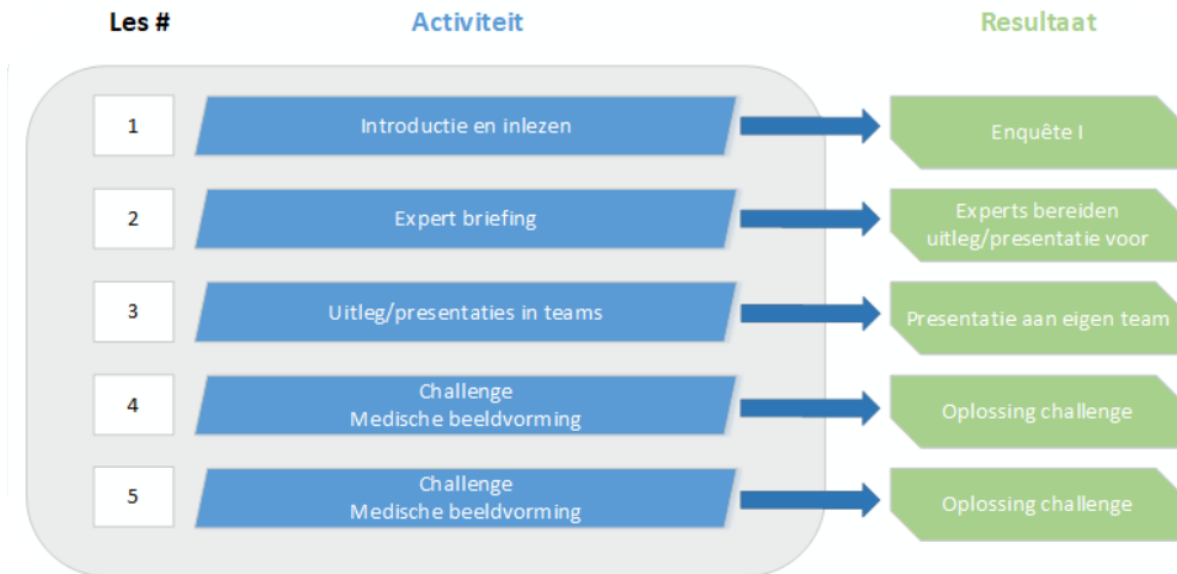
- Natuurkunde
- Chemie
- Transport & Veiligheid
- Geneeskunde



Rollenspel Medische Beeldvorming

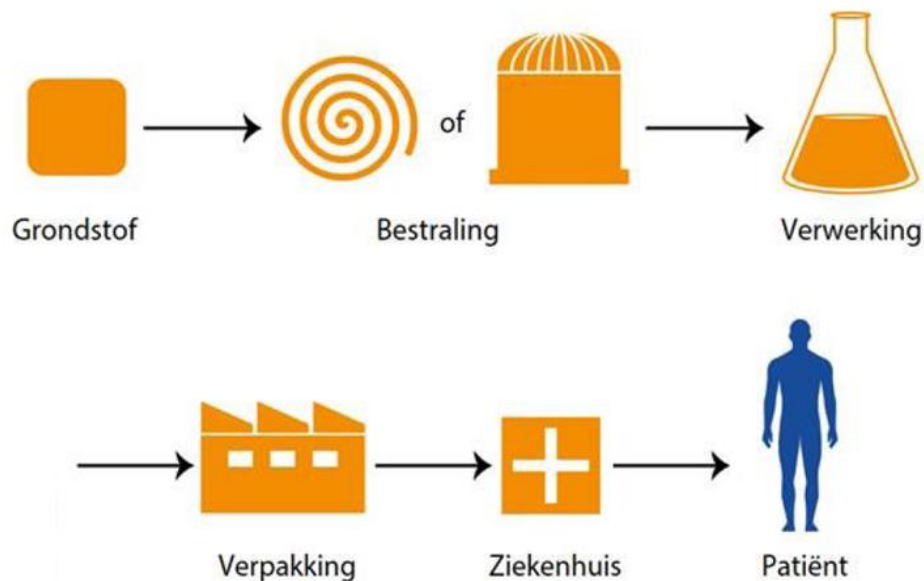
5 Lessen

40 Minuten/les



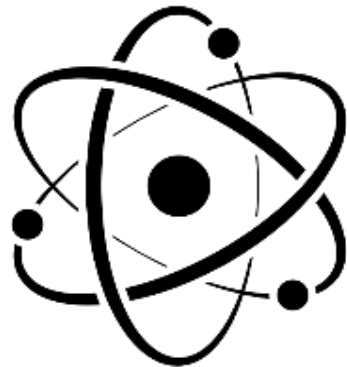
Junior Academy NRG: De case

Bestel precies genoeg radioactief materiaal (het medisch isotoop molybdeen-99) zodat de aankomende 7 dagen, elke dag 3 patiënten een SPECT scan kunnen ondergaan in het ziekenhuis.



Briefing - Natuurkundigen

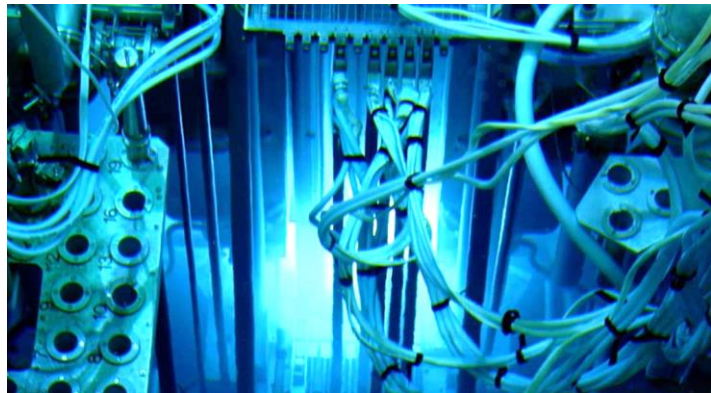
Het produceren van Molybdeen-99 uit Uranium-235 voor het gebruik voor SPECT



- SPECT principes
- Productie Technetium-99m m.b.v. de vervaltijd:

$$N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

- Bestralingsproces van uranium naar molybdeen



Briefing - Artsen

Een diagnose met behulp van medische isotopen

- Technetium-99m
- Interactie radioactief medicijn en kankercel
- Voor- en nadelen van verschillende medische beeldvormingstechnieken
- Diagnose m.b.v. de halveringstijd:

$$A(t) = A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

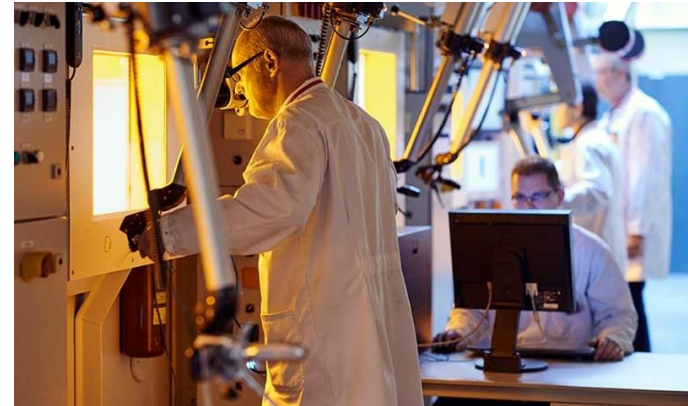


Briefing - Chemici

Het produceren en scheiden van Molybdeen-99

- Productie van Molybdeen-99 uit uranium
- Scheiding van Molybdeen-99 van het restmateriaal
- Scheiding van Technetium-99m van Molybdeen-99 m.b.v. de halveringstijd:

$$N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$



Briefing - Transport en Veiligheid

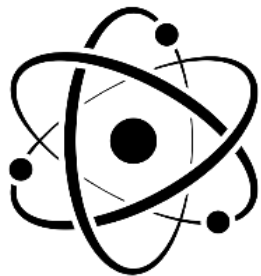
Veilig transport van radioactief materiaal



- Halveringstijden: $m(t) = m_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$
- Halveringsdikten: $I(d) = I_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$
- Geabsorbeerde dosis: $D = \frac{E}{m}$
- Equivalente dosis: $H = w_r D$
- Effectieve dosis: $E = w_t H$



Junior Academy NRG: De experts



Natuurkundige

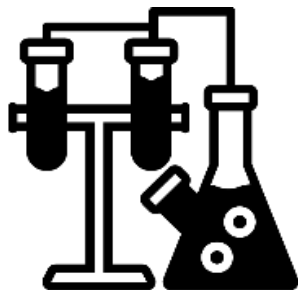
Hoe lang duurt het tot er nog maar 1% van Mo over is bij 99Mo naar 99mTc-verval?

Gebruik $N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$

Arts

Hoeveel procent van de initiële activiteit van 99mTc is na 1 dag (24,0 uur) nog over?

Gebruik $A(t) = A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$



Chemicus

Hoeveel natronloog heb je minimaal nodig om 5 gram 99Mo op te lossen?

De molaire massa van MoO₃ is 144 g/mol, die van NaOH 40 g/mol.

Expert logistiek & veiligheid

Molybdeen zit in een container van lood welke minimaal 75% van de straling moet afschermen. Hoe dik moet deze container zijn?

Gebruik $I(d) = I_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$



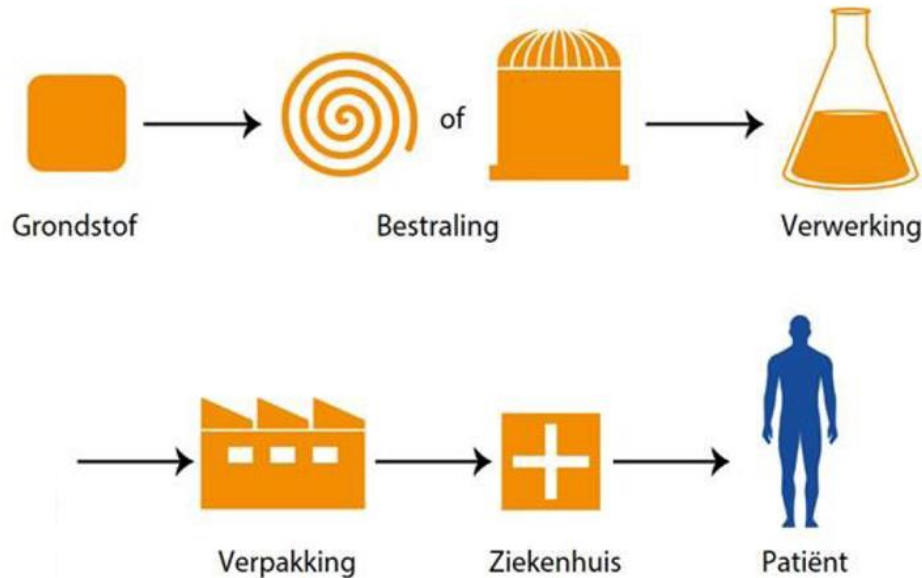
Uitleg aan eigen team

- Leerlingen bereiden uitleg voor aan de rest van hun team
- Elke rol legt stukje expertise uit
- Gezamenlijke opdrachten maken (Quiz)

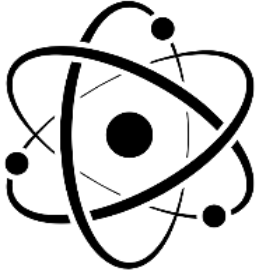


Junior Academy NRG: De challenge

Bestel precies genoeg radioactief materiaal (het medisch isotoop molybdeen-99) zodat de aankomende 7 dagen, elke dag 3 patiënten een SPECT scan kunnen ondergaan in het ziekenhuis.



10 minuten aan de slag! 😊



Natuurkundige

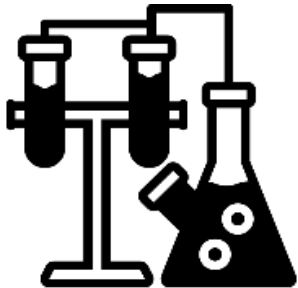
Hoe lang duurt het tot er nog maar 1% van Mo over is bij 99Mo naar 99mTc-veral?

Gebruik $N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$

Arts

Hoeveel procent van de initiële activiteit van 99mTc is na 1 dag (24,0 uur) nog over?

Gebruik $A(t) = A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$



Chemicus

Hoeveel natronloog heb je minimaal nodig om 5 gram 99Mo op te lossen?

De molaire massa van MoO₃ is 144 g/mol, die van NaOH 40 g/mol.

Expert logistiek & veiligheid

Molybdeen zit in een container van lood welke minimaal 75% van de straling moet afschermen. Hoe dik moet deze container zijn?

Gebruik $I(d) = I_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$



Docentenhandleiding & Uitwerkingenboek

Docentenhandleiding:

- Lesopzet en planning
- Voorbereiding en aandachtspunten
- Behandelde onderdelen
- Samenvatting expert kennis

Uitwerkingenboek:

- Expert kennis vragen
- Quiz
- De Challenge met beoordelingsschema



3 Bijlage Samenvatting expertkennis

Hieronder zijn per *expertrol* de essentiële kennisonderdelen van de briefings samengevat. Deze kennis moeten de leerlingen zich eigen maken met behulp van de presentaties, bij voorkeur voordat de *challenge* begint.

3.1 Natuurkundigen

- De werking van een SPECT-scan:
 - o Het radioactieve isotoop technetium-99m (^{99m}Tc), gekoppeld aan een molecuul dat zich aan kankercellen bindt, wordt ingespoten bij de patiënt.
 - o ^{99m}Tc vervalt via gammaverval naar het stabiele ^{99}Tc : $^{99m}\text{Tc} \rightarrow ^{99}\text{Tc} + \gamma$
 - o De gammafotonen die hierbij vrijkomen, worden gemeten door detectoren rondom de patiënt. Zo wordt een afbeelding gemaakt van de locaties in het lichaam waar kankercellen aanwezig zijn.
- Aantal atomen N : het aantal atomen van een radioactieve stof vermindert door verval. De vergelijking voor het aantal atomen op tijdstip t is:

$$N(t) = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

met N_0 het aantal atomen in het begin en $t_{1/2}$ de halveringstijd.

- Halveringstijd $t_{1/2}$ is de tijd waarna de helft van de beginatomen is vervallen.
- Omdat ^{99}Mo een langere halveringstijd heeft dan ^{99m}Tc (^{99}Mo : 65,9 uur, ^{99m}Tc : 6 uur) wordt molybdeen geproduceerd in de reactor, zodat er genoeg tijd is om het te vervoeren naar het ziekenhuis.
- Voor productie van molybdeen worden in de reactor plaatjes met uranium-235 (^{235}U) bestraald met neutronen. Door deze botsing met de neutronen spijten de ^{235}U -atomen in twee kleinere atomen. Bij zo'n botsing is er ongeveer 6% kans dat één van de twee brokstukken ^{99}Mo is.

Junior Academy NRG: Goed ontvangen door scholier én docent

Door actieve werkvorm andere skill set nodig

- Samenwerken
- Presenteren

Probleemgestuurd onderwijs maakt het tastbaar

Uitdagend maar even moeilijk ervaren door alle niveau's

Expertrollen effectief voor leerproces

➤ Nieuwe module in de maak: kernenergie



ALTERNATIEVE WERKVORM

Sabrina weet heel goed waar ze het over heeft. Na haar studie scheikunde ontdekte ze dat de resultaten van onderzoek voor haar vaak niet tastbaar genoeg waren, vandaar de stap naar het bedrijfsleven. 'Kijk naar radioactief materiaal. Je kunt met een formule berekenen op welke momenten de radioactieve straling van het materiaal halveert. In de praktijk is dit belangrijke informatie voor artsen, klinisch fysici en de logistiek. Je hebt een window van twee dagen voor productie en vervoer en in het ziekenhuis is het ongeveer een week bruikbaar voor medische doeleinden.' Bart zag hoe zijn leerlingen hun theoretische kennis verrijkten en samen een oplossing bedachten voor een echte uitdaging. 'Met het oog op het vervolgonderwijs vind ik het zicht krijgen op toepassingen ontzettend waardevol. Bovendien is dit een vorm van probleemgestuurd onderwijs. Kennis blijft zo beter en langer hangen. Het werken met verschillende rollen maakt dit nog effectiever, omdat van elke leerling een serieuze bijdrage aan het geheel wordt verwacht.'

AAN DE SLAG

De pilot vond plaats in tien klassen op scholen verspreid door het land en

beslaat in totaal vijf opeenvolgende natuurkundelessen. Overigens bleek het lesmateriaal ook uitermate geschikt voor het vak nlt. Na uitlog over de opdracht en het formuleren van groepen, verdiepen leerlingen zich in de tweede les in hun rol en de kennis die ze moesten inbrengen. Die rollen zijn arts, natuurkundige, chemicus of expert logistiek en veiligheid. In de derde les wisselen ze kennis met elkaar uit en maken ze gezamenlijk een paar testopgaven. 'Dan is het tijd voor de challenge', vertelt Bart. 'Het gaat erom dat leerlingen vanuit verschillende disciplines samenwerken in de zogeheten molybdeenketen', vervolgt Sabrina. 'Van uranium in de reactor tot toepassing in het ziekenhuis'. Bart vertelt dat het doel van de challenge is om uiteindelijk zo veel mogelijk patiënten te helpen. 'Als extra motivatie geef ik ze hier ook een cijfer voor'.

NOG BETER EN BREED BESCHIKBAAR

'Veel leerlingen vinden natuurkunde een moeilijk vak en zo'n challenge betekent een flinke stap buiten hun comfortzone', zag Bart. 'Maar ik zag ook waar ze tegenaan lopen. Zo kan ik ze een volgende keer nog beter voorbereiden, door extra huiswerk mee te geven en misschien wat meer oefenopgaven te doen'.

Wil je meer weten over de les Medische Beeldvorming? Houd onze site, kopie lesmateriaal, de komende tijd dan goed in de gaten.

Sabrina herkent dit wel. In de enquêtes die we leerlingen na de lessen lieten invullen gaven ze zelf ook duidelijk aan wat er beter kon. Daarbij zijn de gesprekken met docenten, zoals Bart, en observaties van collega-trainees die een aantal lessen bijwoonden ontzettend waardevol. Op basis van deze feedback kwamen we tot een aantal verbeteringen: een creatievere vraagstelling, meer oefeningen en nog meer beeld- en videogebruik. Dit is het eerste lesplanpakket dat we vanuit NRG hebben ontwikkeld voor het voortgezet onderwijs. De ervaringen nemen we mee in het definitieve lesmateriaal dat we eind februari beschikbaar stellen. En een nieuwe groep young professionals bij NRG start met de ontwikkeling van een tweede lesplanpakket over kernenergie. Bart veert enthousiast op. 'Ook die lessen zou ik graag verzorgen voor mijn leerlingen.'



Nieuwe Module: Kernenergie



Nuclear. For life.

Vervolgmodule: Kernenergie

Doel van het project:

Nucleaire kennis uitdragen naar de samenleving

Hoofdvraag:

Hoe past kernenergie in een toekomst zonder fossiele brandstoffen?

Even voorstellen



Cornelis
Zandt

Projectleider +
module-ontwikkelaar

Bart
Verdonshot

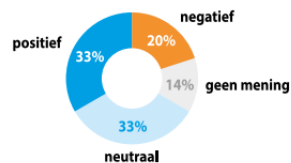
Module-ontwikkelaar

Tessa
de Vries

Communicatie



Meningen over kernenergie



Positief over kernenergie

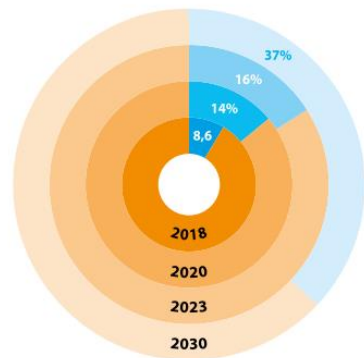
Ongeveer een derde van de bevolking is positief over kernenergie. Bekende argumenten vóór kernenergie zijn 'goedkoop,

Nieuwsgierig naar kernenergie

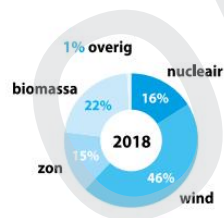


Hongerig naar meer kennis over kernenergie

Ruim een kwart van de bevolking wil meer informatie over de voor- en nadelen van kernenergie.



In Nederland werd in 2018 8,6% van alle energie (elektriciteit en andere energie samen) CO₂-neutraal opgewekt.
In 2020 moet dit 14% zijn, in 2023 16% en in 2030 37%.



Kerncentrale Borssele wekte in 2018 16% van alle CO₂-neutrale elektriciteit in Nederland op.

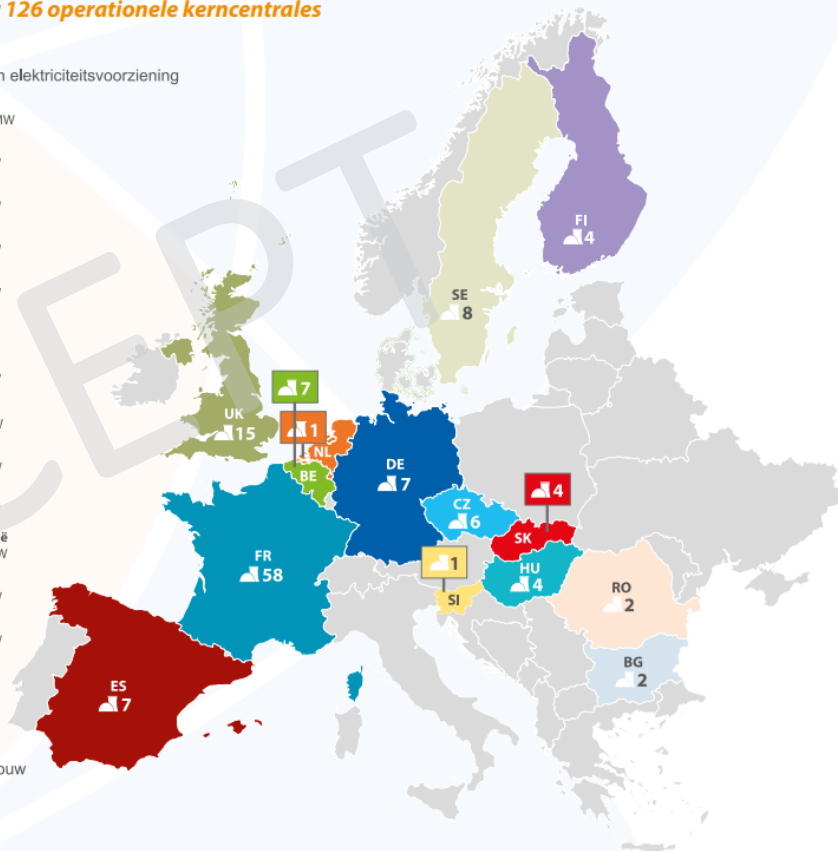
In Europa zijn er 126 operationele kerncentrales

Aandeel kernenergie in elektriciteitsvoorziening

	72% Frankrijk 58 reactors - 63.130 MW
	54% Slowakije 4 reactors - 1.814 MW
	50% België 7 reactors - 5.913 MW
	50% Hongarije 4 reactors - 1.889 MW
	40% Zweden 8 reactors - 8.629 MW
	39% Slovenië 1 reactor - 688 MW
	34% Bulgarije 2 reactors - 1.926 MW
	33% Finland 4 reactors - 2.764 MW
	33% Tsjechië 6 reactors - 3.930 MW
	21% Spanje 7 reactors - 7.121 MW
	19% Groot Brittannië 15 reactors - 8.918 MW
	18% Roemenië 2 reactors - 1.300 MW
	12% Duitsland 7 reactors - 9.515 MW
	3% Nederland 1 reactor - 482 MW

Kerncentrales in aanbouw

	Finland 1 reactor - 1.600 MW
	Frankrijk 1 reactor - 1.630 MW
	Slowakije 2 reactors - 880 MW
	Groot Brittannië 2 reactors - 3.200 MW



Bron: FORATOM - www.iaea.org/pris, 2018

Hoofddoelen

Hoe past kernenergie in een toekomst zonder fossiele brandstoffen?



1) Hoe werkt een kerncentrale?



2) Zijn kerncentrales nodig om aan de elektriciteitsvraag van de fossielvrije toekomst in Nederland te voldoen?



3) Wat is de milieu-impact van kernenergie ten opzichte van andere elektriciteitsbronnen?



4) Wat voor veiligheidsrisico's zijn er bij het gebruik van kernenergie en hoe worden deze zo klein mogelijk gehouden?

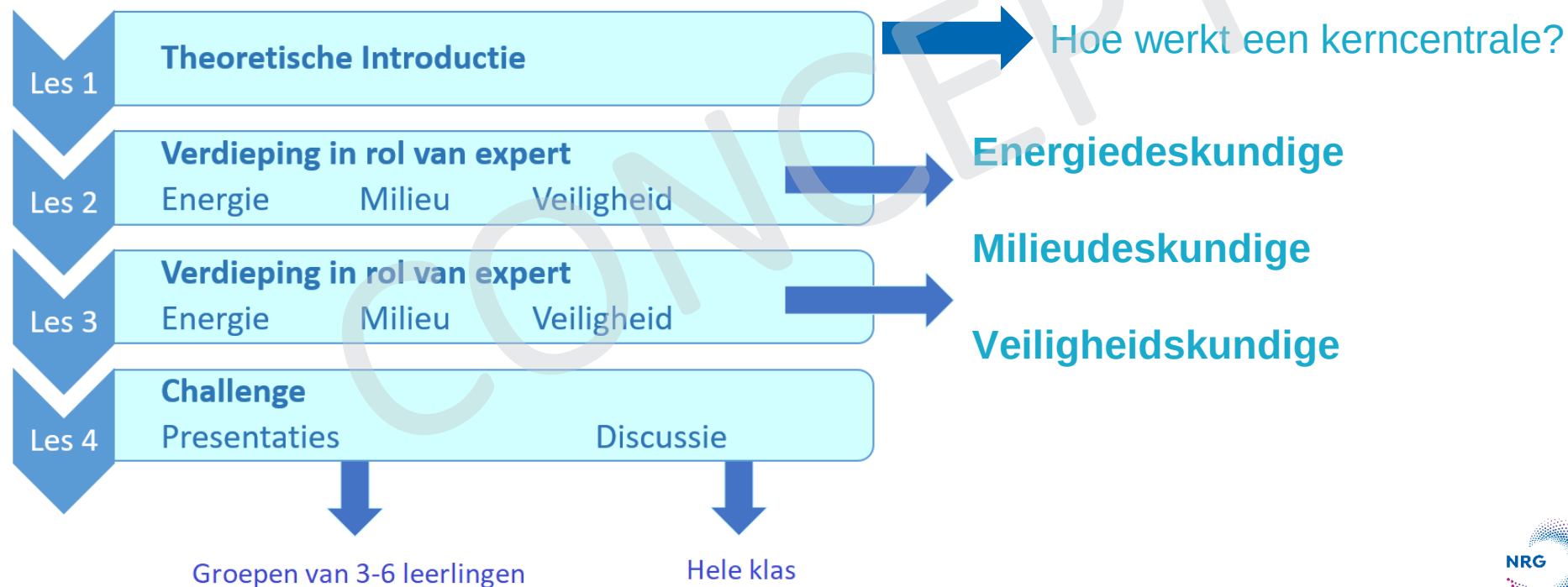


**Natuurkunde
examensyllabus
(E3)**

**Interessante
maatschappelijke &
wetenschappelijke
vragen**

Opzet van de module

In dit rollenspel krijgen leerlingen in de eerste les een algemene uitleg. In Les 2 en 3 wordt de klas in drie 'expertrollen' verdeeld, waar ze hun eigen deel van de module maken. In Les 4 formuleren ze gemixt met de andere expertrollen een antwoord op de hoofdvraag



Klassikaal: Hoe werkt een kerncentrale?

Onderwerpen:

- Massagetal en atoomnummer
- Kernsplijting, splijtingsreacties en verschillende soorten straling
- Massaverschil
- Van atoom naar stroom

Bij stabiele kernsplijting komt er continu energie vrij

Wanneer $^{235}_{92}\text{U}$ -atoom een neutron opneemt wordt deze instabiel. De kern vervalt in twee dochterkernen en twee of drie neutronen. Dit wordt kernsplijting genoemd.

Als precies 1 neutron een nieuw $^{235}_{92}\text{U}$ -atoom aansteekt, is er sprake een stabiele kettingreactie.

Bij elke splijting komt er energie vrij, gemiddeld 200 MeV.

Deze energie is gelijk aan het verschil in massa van het $^{235}_{92}\text{U}$ -atoom en de som van de massa's van de splijtingsproducten. De energie kan je berekenen via de bekende formule van Einstein:

$$E = m \cdot c^2$$

Voorbeeld:



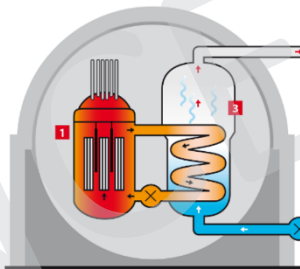
$$1. m_{^{235}_{92}\text{U}} + m_{{}^1_0\text{n}} = m_{{}^{92}_{36}\text{Kr}} + m_{{}^{141}_{56}\text{Ba}} + 3 m_{{}^1_0\text{n}} + \Delta m$$

$$2. \Delta m = (m_{^{235}_{92}\text{U}} + m_{{}^1_0\text{n}}) - (m_{{}^{92}_{36}\text{Kr}} + m_{{}^{141}_{56}\text{Ba}} + 3 m_{{}^1_0\text{n}}) \\ = (235,044 + 1,008) - (91,926 + 140,914 + 3,024) \\ = 0,188 \text{ u}$$

$$3. E = 0,188 \text{ u} = 2,806 \cdot 10^{-11} \text{ J} = 175 \text{ MeV}$$

In een kerncentrale zit een reactorkern waarin een stabiele kettingreactie van $^{235}_{92}\text{U}$ plaatsvindt

Een kerncentrale heeft een reactorkern met splijtstof. De splijtstof bestaat uit een mix van $^{235}_{92}\text{U}$ (~4%) en $^{238}_{92}\text{U}$ (~96%).



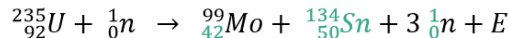
Als de centrale wordt aangezet, wordt de kettingreactie op gang gebracht. Elke kernsplijting resulteert in **meer dan 1** nieuwe splijtingen.

Wanneer de reactor warm is, wordt het kettingproces afgeremd, zodat **precies 1** vrijgekomen neutron en nieuwe splijting veroorzaakt. Er is dan een stabiele kettingreactie.

Dit kan gestuurd worden door de regelstaven. Regelstaven vangen neutronen af en kunnen tussen de splijtstofelementen op en neer bewegen.

Om de reactor af te schakelen worden de regelstaven zo ingesteld dat elke splijting **minder dan 1** nieuwe splijting veroorzaakt. De kettingreactie dooft uit.

Vraag 1: Een geactiveerd $^{235}_{92}\text{U}$ -atoom kan in veel verschillende dochteratomen uiteenvallen. In het voorbeeld zagen we een splijting naar $^{92}_{36}\text{Kr}$ en $^{141}_{56}\text{Ba}$ en 3 neutronen. Wat is de splijtingsreactie waarbij Molybdeen-99 en 3 neutronen ontstaan? Vul de volgende reactievergelijking in.

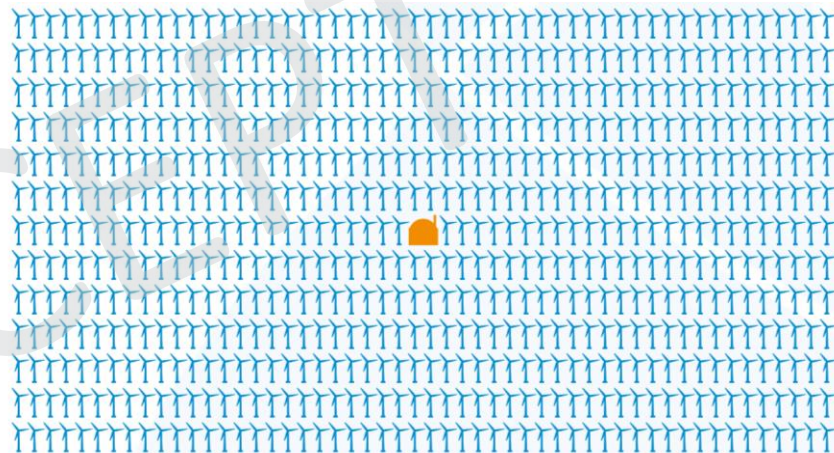


Energiedeskundige

Zijn kerncentrales nodig om aan de elektriciteitsvraag van de fossielvrije toekomst in Nederland te voldoen?

Onderwerpen:

- Een groeiende elektriciteitsvraag: Hoe zit dat in Nederland? Hoe in 2050? → rekenen met kWh
- Vermogensdichtheid van elektriciteitsbronnen
- Beschikbare ruimte in Nederland voor duurzame energie
- Capaciteitsfactor
- Kan er genoeg worden opgewekt in 2050?



600 Windmolens t.o.v. een kerncentrale

Vraag 3: Hoeveel kilogram aan kolen is er nodig voor de volledig elektriciteitsvraag van 120 TWh per jaar als we alleen gebruik zouden maken van kolen? Ga uit van een rendement van 50% voor de omzetting van energie uit kolen naar elektriciteit.

		Geproduceerde elektrische energie [TWh]
Kern		118,3
Wind	Op land	23,7
	Op zee	306,8
Zon		87,7
Totaal		536,5

In de hoofdstukken worden vergeleken:
Kernenergie, zonne- & windenergie en kolen- & gascentrales

Milieudeskundige

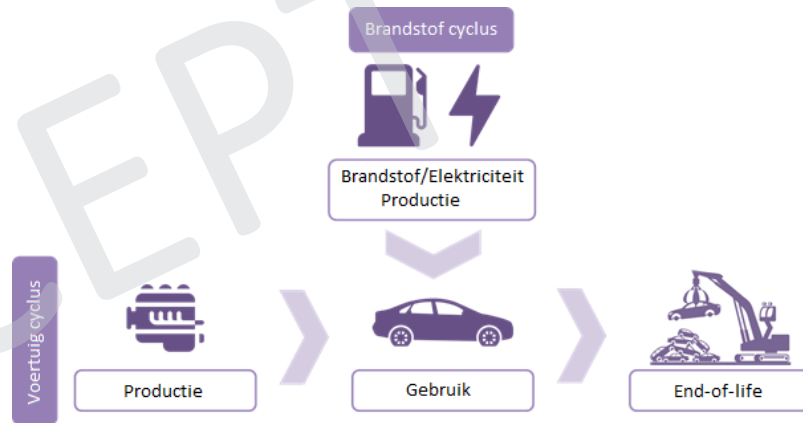
Wat is de milieu-impact van kernenergie ten opzichte van andere elektriciteitsbronnen?

Onderwerpen:

- Het uitzoeken van een Levenscyclus analyse (LCA) en rekenen met CO₂-equivalent → kg CO₂e/MWh.
- Samen met het groepje de uitstoot van elke elektriciteitsbron gedurende de hele levenscyclus uitrekenen

	Kernenergie	Zonne-energie	Windenergie	Kolencentrale	Gascentrale
Vermogen	1000 MW	1 MW	2 MW	800 MW	500 MW
Levensduur	60 jaar	20 jaar	25 jaar	50 jaar	30 jaar
Capaciteitsfactor	0,9	0,4	0,1	0,6	0,6
CO ₂ -equivalent uitstoot [kg CO ₂ -equivalent]					

Vraag 2: Voer een levenscyclus analyse voor een elektrische auto uit. Bereken de uitstoot en uitstoot per kilometer uit voor een elektrische auto door Tabel 7 in te vullen.



Veiligheidskundige

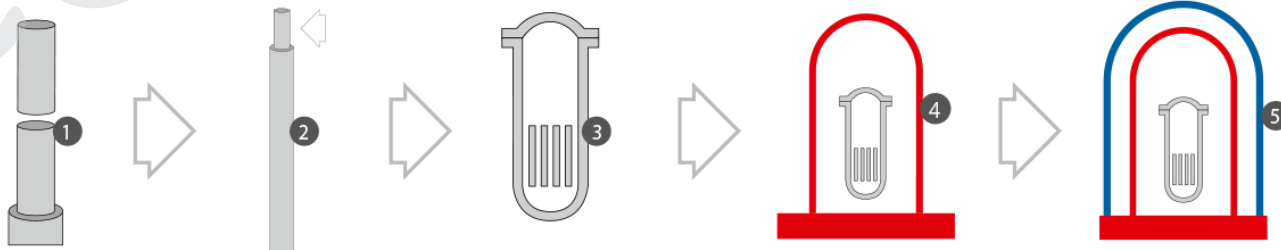
Wat voor veiligheidsrisico's zijn er bij het gebruik van kernenergie en hoe worden deze zo klein mogelijk gehouden?

Onderwerpen:

- De vele functies van water in een kerncentrale: koeling & stoom, moderator en oplosmiddel
- Stralingsbescherming: halveringsdikte

$$I(d) = I(0) \cdot \frac{1}{2}^{d/d_{1/2}}$$

- Besmettingsbescherming: waarom is de buitenkant een koepel?
- Opslag van radioactief afval
- Risicoperceptie: zijn mensen goed in kansen inschatten?



Module: Kernenergie

Hoe past kernenergie in een toekomst zonder fossiele brandstoffen?



Energiedeskundige

Zijn kerncentrales nodig om aan de elektriciteitsvraag van de fossielvrije toekomst in Nederland te voldoen?

Milieudeskundige

Wat is de milieu-impact van kernenergie ten opzichte van andere elektriciteitsbronnen?



Veiligheidskundige

Wat voor veiligheidsrisico's zijn er bij het gebruik van kernenergie en hoe worden deze zo klein mogelijk gehouden?



Interesse?

Bekijk alvast de conceptmodule!

Geïnteresseerd in updates of een pilot draaien? Laat je gegevens achter of stuur een Email naar:

Junior Academy: JuniorAcademy@nrg.eu

Bedankt voor jullie aandacht!

Vragen?

JuniorAcademy@nrg.eu

Of

Cornelis Zandt: zandt@nrg.eu

Bart Verdonschot: verdonschot@nrg.eu

Sabrina Brandjes
Bart Verdonschot



Nuclear. For life.