

Docentenhandleiding

Kernenergie

Hoe past kernenergie in een toekomst zonder fossiele brandstoffen?



Energie



Milieu



Veiligheid

Van atoom naar stroom

© NRG 2023

Alle rechten zijn voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, gekopieerd, gepubliceerd, opgeslagen, aangepast of gebruikt in welke vorm dan ook, online en offline, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van NRG.

Docentenhandleiding lesmodule Kernenergie

Junior Academy NRG

In deze docentenhandleiding voor de lesmodule Kernenergie van Junior Academy NRG wordt een overzicht gegeven van de lesopzet, geadviseerde voorbereiding, aandachtspunten, onderdelen van het curriculum en een beoordelingsmodel. Dit lespakket is een invulling van het keuzesubdomein E3 Kern- en deeltjesprocessen voor vwo klassen en een aanvulling op het subdomein B2 Medische Beeldvorming voor havo/vwo klassen. Deze lesmodule heeft vooral het doel de leerling een beter gevoel te laten ontwikkelen over de onderwerpen radioactiviteit en diens duurzaamheid, waarbij ze gaan nadenken en discussiëren over de maatschappelijke impact van de verschillende manieren om elektrische energie op te wekken.

De werkzaamheden van Junior Academy NRG vormen onderdeel van het onderzoeksprogramma PIONIER dat NRG uitvoert in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken en Klimaat. Figuren zonder bronvermelding zijn met toestemming van EPZ in deze module gebruikt, of zijn gemaakt door een illustrator, Pepijn Berghout, waarvan de rechten bij NRG liggen. Deze module is opgezet en geschreven door: Cornelis Zandt, Tessa de Vries, Bart Verdonschot en Maura Baars.

Inhoud

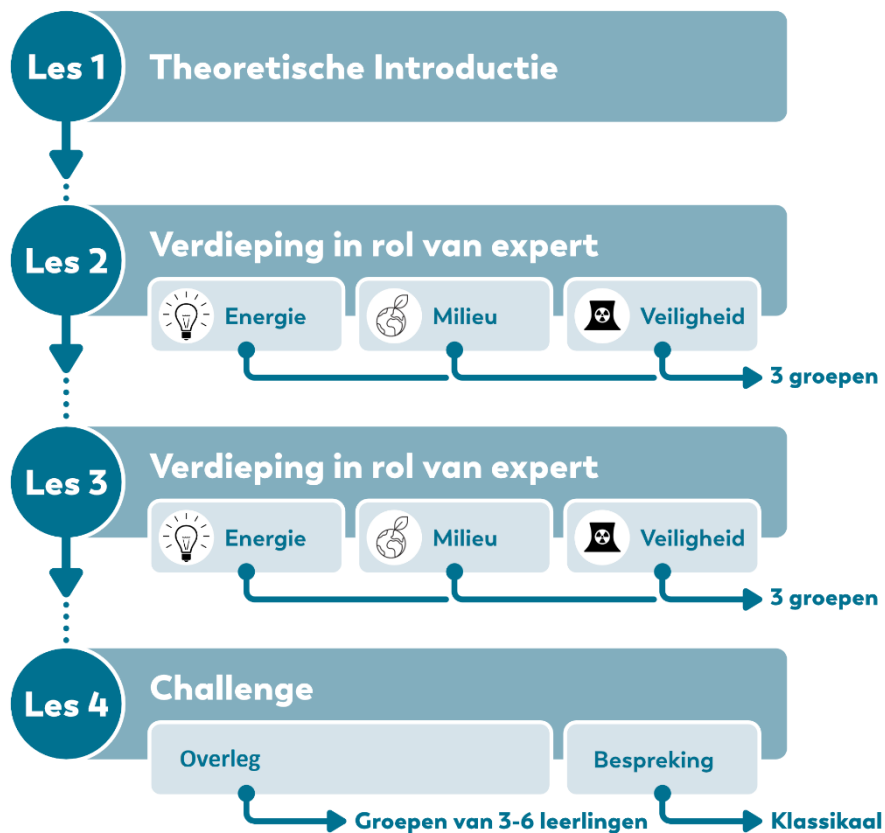
1	Overzicht	2
1.1	Lesopzet en planning	2
1.2	Leerdoelen	3
1.2.1	Sociale leerdoelen	3
1.2.2	Theoretische leerdoelen	3
1.2.3	Leerdoelen per expertrol	4
1.3	Lessen	5
1.4	Vorbereiding en aandachtspunten	6
1.5	Behandelde onderdelen	7
2	Samenvatting expertkennis	8
2.1	Energiedeskundigen	8
2.2	Milieudeskundigen	9
2.3	Veiligheidskundigen	10

1 Overzicht

Dit lespakket is gericht op klas 4 en 5 van havo/vwo. Het is opgezet in vier lessen van elk 50 minuten, inclusief opstart en afsluiting. Hieronder is in meer detail beschreven wat de lessenverdeling inhoudt, welke leerdoelen er worden behandeld, waar tijdens de voorbereiding aan gedacht moet worden en op welke onderdelen van het examenprogramma havo/vwo dit lespakket aansluit.

1.1 Lesopzet en planning

In **Figuur 1** is een overzicht van de lessenreeks gegeven, verdeeld over vier lessen. De lessen zijn gebaseerd op de expertmethode. Na een klassikale theoretische introductie in de eerste les, wordt de klas verdeeld in drie groepen en ontwikkelt iedere groep in de tweede en derde les een expertise in een aspect van elektriciteitsbronnen. Vervolgens gaat in de laatste les een gemixt team van experts met elkaar overleggen, waarin ze hun opgedane kennis combineren om hun eigen antwoord te formuleren op de hoofdvraag: *“Hoe zouden jullie een toekomst zonder fossiele brandstoffen inrichten?”*. Het is in principe de bedoeling dat de leerling al het werk in de lessen kan afronden, dus huiswerk geven en maken is niet nodig. Er is een mogelijkheid om een extra les met verdiepende stof toe te voegen na de theoretische introductie.



Figuur 1: Overzicht van de lessen in de module Kernenergie

1.2 Leerdoelen

In deze lessenserie gaan de leerlingen aan de slag met leerdoelen. De onderstaande leerdoelen komen voor in de lesmodule, waarvan er een aantal specifiek zijn voor een expertrol. Deze staan beschreven bij de leerdoelen per expertrol. Hierbij is het wel de bedoeling dat de experts hun kennis, met behulp van de leerdoelen, overdragen aan de andere leerlingen. De leerlingen zullen dus niet intensief aan de slag gaan met de leerdoelen van andere expertrollen maar zouden tijdens de challenge er wel meer over moeten horen (ook met behulp van kijkvragen).

1.2.1 Sociale leerdoelen

1. De leerling weet de inbreng van zijn/haar rol uit te leggen en te onderbouwen;
2. De leerling leert samen te werken en samen tot een plan te komen.

1.2.2 Theoretische leerdoelen

Theorieles

de leerling kan...

1. Onderscheid maken tussen de kerndeeltjes (elektron, proton en neutron);
2. Het atoommodel uitleggen;
3. De notatie van kern met deeltjes toepassen;
4. De massa van een isotoop bepalen (m.b.v. BINAS);
5. Uitleggen wat een isotoop is;
6. Het verschil tussen α , β , γ -straling uitleggen;
7. Een vervalreactie opstellen (m.b.v. BINAS);
8. Uitleggen dat er bij kernsplijting energie vrijkomt;
9. Uitleggen hoe deze energie 'buitgemaakt' kan worden en hoe deze naar elektriciteit wordt omgezet (hoe een kerncentrale werkt);
10. Rekenen met $E = P \cdot t$;
11. Uitleggen waarom er een kettingreactie optreedt en dat er energie bij vrijkomt;
12. Berekenen/inschatten hoeveel energie vrijkomt bij splijting van 1 kg Uranium-235;
13. Begrijpen dat er warmte vrijkomt bij splijtingsreacties;
14. Begrijpen waarom er gekoeld moet worden in een reactorkern;
15. Benoemen hoe stroom wordt opgewekt met een stoomturbine;
16. Benoemen waarom er meerdere circuits in een kerncentrale zijn;
17. De hoofdonderdelen in een kerncentrale aanwijzen en uitleggen;
18. Een hoeveelheid uranium omzetten in een hoeveelheid energie voor huishoudens;

Verdiepende lesstof

De leerling kan...

19. Herkennen dat er een verschil is in massa tussen losse deeltjes en een volledige kern;
20. De wet van behoud van energie uitleggen;
21. Het massadefect berekenen (m.b.v. gegevens uit BINAS);
22. Het energiedefect berekenen met de formule: $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$;
23. De eenheden u, MeV en Joule omrekenen;
24. Begrippen 'subkritisch', 'kritisch' en 'superkritisch' uitleggen.

1.2.3 Leerdoelen per expertrol

Energiedeskundige

De leerling kan...

1. De toekomstige verwachte elektriciteitsvraag benoemen en beantwoorden of hier in de toekomst aan voldaan kan worden;
2. Benoemen waarom de elektriciteitsvraag steeds meer toe zal nemen;
3. Het geïnstalleerd vermogen van verschillende elektriciteitsbronnen berekenen;
4. De capaciteitsfactor van verschillende elektriciteitsbronnen berekenen;
5. Beredeneren waarom we (nog) niet volledig elektriciteit kunnen opwekken met zonne- en windenergie;
6. Een vergelijking maken tussen de benodigde hoeveelheid massa kolen en uranium om dezelfde hoeveelheid elektrische energie te produceren.

Milieudeskundige

De leerling kan...

1. Onderscheid maken tussen de CO₂-voetafdruk van de verschillende elektriciteitsbronnen;
2. Uitleggen wat het CO₂-equivalent inhoudt;
3. Uitleggen wat een levenscyclusanalyse inhoudt;
4. De bouw- en totale CO₂-voetafdruk voor verschillende elektriciteitsbronnen berekenen en de verschillen hiertussen identificeren.

Veiligheidskundige

De leerling kan...

1. Rekenen met de formule voor de halveringsdikte: $I(d) = I(0) \cdot \frac{1}{2}^{d/d_{1/2}}$;
2. De impact van straling op het menselijk lichaam uitleggen en benoemen hoe je de stralingsblootstelling zo laag mogelijk kan houden;
3. Uitleggen welke functies water in een reactorkern heeft;
4. Benoemen welke veiligheidslagen er gebruikt worden in een kerncentrale;
5. Vertellen hoe er met radioactief afval wordt omgegaan en om hoeveel onbruikbaar afval het gaat;

1.3 Lessen

1. In de eerste les wordt door de docent een algemene theoretische introductie gegeven, waarna er opdrachten voor de leerlingen volgen. De leerlingen kunnen zich in deze les alvast inlezen over de drie expertrollen die beschikbaar zijn: energiedeskundige, milieudeskundige en veiligheidskundige – en kiezen aan het einde van de les welke rol ze op zich willen nemen. De leraar kan ook zelf de klas opsplitsen in drie groepen om ervoor te zorgen dat er een gelijke verdeling gemaakt wordt.

2 en 3. De tweede en derde les is de expertbriefing. Hierin zullen de leerlingen voor hun expertrol een stuk theorie bestuderen en een aantal opdrachten maken. Ze mogen hierbij samenwerken met leerlingen met dezelfde expertrol, maar elke leerling moet uiteindelijk individueel in staat zijn de hoofdpunten uit hun expertbriefing uit te leggen. In les 4 zal namelijk iedere expert de essentie van de inhoud van hun briefing overbrengen op experts uit een andere groep. Verderop in dit document in **Samenvatting expertkennis** is per expertrol samengevat welke hoofdpunten er per hoofdstuk zijn, en dus wat leerlingen moeten kennen en kunnen doorgeven aan andere experts.

4. In de vierde les worden de expertrollen gemixt en overleggen ze samen over het antwoord op de hoofdvraag: *“Hoe zouden jullie een toekomst zonder fossiele brandstoffen inrichten?”*. Hierbij worden er groepjes van drie tot zes leerlingen gevormd, waarbij er minstens één van elke expert aanwezig is. Dit kan dus betekenen dat er meerdere dezelfde experts in een groepje zitten, wat afhankelijk is van de grootte van de klas. Zie Tabel 1 voor een opzet van de groepsindeling.

De experts starten met het delen van de opgedane kennis binnen hun briefing. Hiervoor krijgen ze in totaal 15 minuten en dus 5 minuten per expertrol. De leerlingen die luisteren naar de experts beantwoorden hierbij luistervragen, welke geprint kunnen worden (zie Bijlage 2). Vervolgens gaat het hele groepje met de kennis waarover ze nu beschikken, uitgebreid overleggen over hun visie van een fossielvrije toekomst. Hier krijgen ze ongeveer 20 minuten voor. Als een groepje dat nodig heeft, staan er in hoofdstuk 6 van het werkboek een aantal vragen om het overleg op weg te helpen.

Tot slot delen de verschillende groepjes kort hun antwoord op de hoofdvraag met de hele klas, inclusief argumenten. Er hoeft geen presentatie gemaakt te worden en het mag door één persoon per groep verteld worden. Als hieruit een klassikale discussie ontstaat, wordt dat natuurlijk aangemoedigd, maar het belangrijkste is dat elke leerling een beter beeld krijgt van mogelijke antwoorden en argumenten.

Opmerking: het doel van deze module is niet om leerlingen te overtuigen over de voordelen van kernenergie, maar om ze genoeg informatie te geven om serieus deel te kunnen nemen aan de discussie rond dit onderwerp. Er is daarom geen fout antwoord op de hoofdvraag.

Tabel 1: Expertverdeling voor de module. Hier krijgt iedere leerling één unieke expertrol (energiedeskundige, milieudeskundige of veiligheidskundige).

	Groep 1		Groep 2		Groep 3		Groep 4		Groep 5	
Energiedeskundigen										
Milieudeskundigen										
Veiligheidskundigen										

1.4 Voorbereiding en aandachtspunten

Als voorbereiding voor de docent is het doornemen van het werkboek en deze handleiding voldoende. Ter ondersteuning zijn er twee PowerPoints, één voor de theoretische introductie en één voor de verdiepende lesstof, beschikbaar om tijdens de les te gebruiken en te delen met de leerlingen. Daarnaast is er bestand met uitwerkingen voor de opdrachten meegeleverd.

Deze lesmodule is een volledig pakket wat in de lessen gebruikt kan worden. Natuurlijk mag u hier ook een eigen draai aan geven door bijvoorbeeld zelf passende informatie toe te voegen of de werkvorm uit de laatste les passend te maken voor de klas. Voel u vrij om de lesmodule geschikt te maken naar eigen voorkeur.

De leerlingen krijgen te maken met rekenopgaven. De rekenvaardigheden zijn niet het hoofddoel. Het gaat erom dat de leerlingen nadenken over de verschillende situaties met berekende uitkomsten en deze vergelijken met elkaar. Hieruit kunnen de leerlingen een mening vormen en gebruiken tijdens de laatste les. **Let erop dat, om goed deel te kunnen nemen aan de het overleg in de laatste les, het belangrijk is voor de leerlingen om na twee lesuren klaar zijn met alle opgaven van hun expertrol.** Het verschilt per niveau wat dit betekent voor de voortgang na één lesuur, maar het kan van belang zijn dit extra in de gaten te houden.

Bijlagen: in de bijlage onder aan dit document staan twee print-outs om te gebruiken tijdens de les:

- Bijlage 1 hoort bij Hoofdstuk 7 (Milieudeskundige). U kan de tabel één keer printen zodat de leerlingen binnen de expertise het samen kunnen invullen. Een andere optie is dat u de tabel wel meerdere keren print en aan elke leerling binnen de expertise geeft. Zo hebben zij de gegevens ook voor zichzelf en kunnen ze dit later terugkijken.
- Bijlage 2 hoort bij de laatste les waarbij leerlingen, die luisteren naar het verhaal van één van de andere experts, luistervragen invullen. Zo wordt de leerling de mogelijkheid gegeven vragen te stellen aan de expert als een bepaald leerdoel nog niet behandeld is. De leerlingen kunnen de antwoorden typen of opschrijven in hun schrift. U kunt ervoor kiezen om voor iedere leerling de luistervragen te printen of om het los op een digitale omgeving te zetten/te mailen. De leerlingen hoeven de vragen van hun eigen expertise niet te beantwoorden. De luistervragen zijn gebaseerd op de leerdoelen die bij de hoofdstukken van de expertises beschreven staan.

Afwijking havo: Hoofdstuk 7 (Veiligheidskundige) – opgave 9 & 10

Bij deze opgaven wordt een vergelijking omgeschreven met behulp van logaritmes, wat havo-leerlingen niet hoeven te kunnen. De volgende formule kan voor havo bij deze vraag gegeven worden, zodat het alleen ingevuld hoeft te worden:

$$d = d_{1/2} \cdot \log_{0.5}(x)$$

waarbij, $x = \frac{I(d)}{I(0)}$. Deze waarde is in opgave 9 en 10 respectievelijk 0,01 en 0,001.

1.5 Behandelde onderdelen

Met dit lespakket ontwikkelt de leerling meer gevoel voor het onderwerp radioactiviteit en de duurzaamheid hiervan. Het is een gedeeltelijke aanvulling op syllabus specificatie 2 uit subdomein B2, Medische beeldvorming. Voor vwo is dit ook een invulling voor het keuzesubdomein E3, Kern- en deeltjesprocessen (uit: havo en vwo syllabus centraal examen 2023 – versie 2). Aan te bevelen, maar niet noodzakelijk, is dat leerlingen bekend zijn met Specificatie 1 met betrekking tot de de emissie en absorptie van elektromagnetische golven / fotonen. Alle stof en opgaven zijn geschikt voor zowel havo als vwo leerlingen.

De begrippen uit specificaties 2 van subdomein B2 die **niet** expliciet worden behandeld of genoemd in dit lesmateriaal, zijn te zien in Tabel 2.

Tabel 2: Niet behandelde onderdelen/begrippen uit specificaties 2 van subdomein B2

havo, <u>niet</u> behandeld/genoemde begrippen	vwo, <u>niet</u> behandelde/genoemde begrippen
<ul style="list-style-type: none"> Berekeningen met (equivalente) dosis Activiteit uit een (N,t)-diagram bepalen Vakbegrippen: ioniserend en doordringend vermogen*, dracht*, röntgenstraling, kosmische straling, bestraling*, besmetting*, effectieve totale lichaamsdosis in relatie tot stralingsbeschermingsnormen, dosimeter, eV Contexten: nucleaire diagnostische geneeskunde, stralingsbescherming* 	<ul style="list-style-type: none"> Berekeningen met (equivalente) dosis Activiteit op een bepaald moment berekenen en bepalen uit een (N,t)-diagram bepalen Vakbegrippen: ioniserend en doordringend vermogen*, dracht*, röntgenstraling, kosmische straling, bestraling*, besmetting*, effectieve totale lichaamsdosis in relatie tot stralingsbeschermingsnormen, dosimeter Contexten: nucleaire diagnostische geneeskunde, stralingsbescherming*

*Wel expertrol specifiek behandeld

2 Samenvatting expertkennis

Hieronder zijn per *expertrol* de essentiële kennisonderdelen van de briefings samengevat. Deze kennis zullen leerlingen zich eigen maken met behulp van de opdrachten in elk onderdeel.

2.1 Energiedeskundigen

- Grootte van het probleem: niet alleen moet de huidige elektriciteitsvraag verduurzaamd worden, maar ook de stijging van de vraag in 2050 (exacte getallen geven een idee, maar zijn niet het belangrijkste)
 - Stijging o.a. doordat huishoudens fossiele apparaten vervangen door elektrische apparaten
- Energie in de context van elektriciteit wordt gegeven in Wh: de energie die iets met een vermogen van 1 W in 1 uur opwekt of verbruikt.
- Piekvermogen is het hoogste elektriciteitsverbruik op één moment in een jaar, gegeven in W.
- Energiedichtheid is de maximale hoeveelheid energie die in theorie uit 1 kg van een bepaalde brandstof gehaald kan worden, gegeven in J/kg. Voor ${}^{235}_{92}\text{U}$ is dit meerdere ordes groter dan voor fossiele brandstoffen.
- Voor sommige elektriciteitsbronnen is meer oppervlakte beschikbaar, maar is de vermogensdichtheid – het vermogen dat kan worden opgewekt per km^2 – kleiner. Gecombineerd geeft dit een inzicht in mogelijk geïnstalleerd vermogen.
- Capaciteitsfactor = $\frac{\text{werkelijke elektriciteitsproductie}}{\text{maximale elektriciteitsproductie}} \cdot 100\%$
- Beschikking over genoeg gegevens om zelf een indeling te maken om aan de elektriciteitsbehoefte van 2050 te voldoen.

2.2 Milieudeskundigen

- De levenscyclusanalyse (LCA) van een proces is het analyseren van de uitstoot die vrijkomt bij de ontwikkeling, het gebruik en de afvalverwerking van dat proces.
- CO₂-equivalent is een maatstaf voor de bijdrage van een broeikasgas t.o.v. CO₂ over dezelfde periode (standaard 100 jaar).
 - Via voorbeeld met elektrische auto: er zijn altijd uitgestoten broeikasgassen bij de levenscyclus van een product.
- De CO₂-voetafdruk is de hoeveelheid uitgestoten broeikasgassen bij een bepaald product of proces in kg CO₂-equivalent. Per MWh als verschillende elektriciteitsbronnen met elkaar vergeleken worden.
- Inzicht in CO₂-voetafdruk (in kg CO₂-equivalent per MWh) voor de volgende elektriciteitsbronnen: kernenergie, zonne-energie, windenergie, kolencentrales en gascentrales.
 - Uitstoot van de bouw en afvalverwerking wordt gegeven.
 - Uitstoot van de operationele fase wordt berekend aan de hand van grafieken of informatie uit de tekst.

2.3 Veiligheidskundigen

- Hoofdprincipe bij een nucleaire installatie: het gebeurt veilig of het gebeurt niet.
- Ioniserende straling is schadelijk omdat het schade kan aanrichten aan het DNA in cellen, wat de kans op kanker verhoogt.
- Stralingsbescherming bij externe bestraling door fotonen, via drie maatregelen: afstand, afscherming, tijdsduur.
 - Effectiviteit van afscherming verschilt per materiaal en is afhankelijk van de energie van de fotonenstraling. De stralingsintensiteit $I(d)$ die overblijft na een bepaalde dikte door een materiaal wordt gegeven door:

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

met $I(0)$ de beginintensiteit, d de dikte van het materiaal en $d_{1/2}$ de halveringsdikte van het materiaal in centimeters. De halveringsdikte is afhankelijk van de fotonenergie en het materiaal.

- Water is een van de belangrijkste onderdelen van een kerncentrale met betrekking tot de veiligheid.
 - De twee belangrijkste functies van water: koeling van de kern en als stoom voor de turbine.
 - Twee andere genoemde functies, maar niet essentieel om te weten voor de leerling: als moderator om neutronen af te remmen en als oplosmiddel om bijvoorbeeld boor in op te lossen voor het invangen van neutronen.
- Een bekend voorbeeld van een ongeluk is de meltdown: incident waarbij de reactorkern oververhit raakt door verlies aan koelvermogen met als gevolg het smelten van de brandstofelementen
- Radioactieve besmetting betekent dat radioactieve elementen zich op of in het lichaam bevinden. Er is kans op besmetting als er door een ongeval radioactieve vrijzetting plaatsvindt.
- Vijf veiligheidslagen binnen een kerncentrale minimaliseren het effect van een ongeluk om radioactieve besmetting te voorkomen.
- De buitenste veiligheidslaag is vaak een koepel om t.o.v. een kubusvorm een impact van binnen én buiten effectiever op te kunnen vangen.
- De hoeveelheid radioactief afval om aan de gemiddelde jaarlijkse elektriciteitsbehoefte van één persoon te voldoen is 5 – 10 gram. Door het afval in containers op te slaan, neemt de stralingsintensiteit snel af.
- Er wordt veel onderzoek gedaan naar het recyclen en verminderen van radioactief afval. Dit is vergelijkbaar met de status van andere CO₂-vrije elektriciteitsbronnen.

Bijlage 1: Vergelijking van de CO₂-voetafdruk van verschillende elektriciteitsbronnen, milieudeskundige

	Kerncentrale	Zonne-energie	Windenergie	Kolencentrale	Gascentrale
Vermogen	1.000 MW	1,00 MW	2,00 MW	800 MW	500 MW
Levensduur	60 jaar	20 jaar	25 jaar	50 jaar	30 jaar
Capaciteitsfactor	0,9	0,1	0,4	0,6	0,6
CO ₂ -equivalent uitstoot [kg CO ₂ -eq]					
Bouwvoetafdruk [kg CO ₂ -eq MW ⁻¹]					
Gemiddelde CO ₂ -voetafdruk [kg CO ₂ -eq MWh ⁻¹]					

Bijlage 2: Luistervragen Challenge

Nu gaan de experts vertellen over hun opgedane kennis. Om de kennis zo goed mogelijk te verwerken, krijg je een aantal luistervragen per expertrol. Luister dus goed naar het verhaal en noteer je antwoorden. Is een vraag niet beantwoord? Dan kan je deze alsnog stellen aan de expert die op dat moment aan het woord is. De vragen die bij jouw expertrol horen hoeft je niet in te vullen.

Energiedeskundige

1. *Noem een reden waarom de elektriciteitsvraag groter wordt.*
2. *Hoe groot is de verwachte elektriciteitsvraag in 2050?*
3. *Wat is de verhouding tussen de benodigde hoeveelheid kolen en uranium om dezelfde hoeveelheid elektrische energie te produceren?*
4. *Welke verschillende factoren zorgen ervoor dat er (nog) niet volledig elektriciteit kan worden opgewekt met zonne- en windenergie?*
5. *Welke schone energiebron heeft het grootste geïnstalleerd vermogen?*
6. *Kan er in de toekomst, na alle berekeningen, voldaan worden aan de verwachte elektriciteitsvraag?*

Milieudeskundige

1. *Wat houdt een levenscyclusanalyse in?*
2. *Hoe worden verschillende broeikasgassen met elkaar vergeleken wat betreft de invloed op het broeikaseffect?*
3. *Hoe is de verdeling van de levensduur van de verschillende elektriciteitsbronnen?*
4. *Welke elektriciteitsbron heeft de grootste CO₂-voetafdruk?*
5. *Welke elektriciteitsbron heeft de laagste CO₂-voetafdruk?*

Veiligheidskundige

1. *Hoe wordt er voor gezorgd dat de stralingsblootstelling zo laag mogelijk gehouden wordt bij radioactieve bronnen?*
2. *Hoe kan je de stralingsintensiteit van deeltjes- en fotonenstraling verminderen?*
3. *Welke functies heeft het water in een kerncentrale?*
4. *Hoe zijn de veiligheidslagen in een kerncentrale opgebouwd, van splijtstofelement tot de buitenste laag?*
5. *Hoeveel onbruikbaar radioactief afval wordt er geproduceerd? (verschillende schalen: kerncentrale, huishouden, persoon)*
6. *Waar wordt er voor CO₂-vrije elektriciteitsbronnen, waaronder kernenergie, vergelijkbaar onderzoek naar gedaan?*