

Kernenergie geen oplossing voor het broeikas effect

Herman Damveld, Groningen, 13 juni 2021.

Samenvatting

Kernenergie wordt soms duurzaam genoemd omdat het een bijdrage zou leveren aan de oplossing van het klimaatprobleem. Daarbij veronderstelt men dat het broeikasgas CO₂ niet vrijkomt bij kernenergie. Dat is echter onjuist, want er is een niet te verwaarlozen CO₂-uitstoot door o.a. de bouw van een kerncentrale, de winning van de brandstof uranium en de ontmanteling van de centrale. Men noemt dit de indirecte CO₂-uitstoot. Daarover gaat dit artikel.

Hoeveel broeikasgassen zoals CO₂ ontstaan bij de kerncentrale Borssele? Daarover vinden we geen gegevens. We hebben hier een zo betrouwbaar mogelijke schatting gegeven van 78 tot 190 gram CO₂ per kWh, maar we houden ons aanbevolen voor exacte cijfers. Ter vergelijking: bij zonnepanelen gaat het om 48 en bij windmolens om 10-12 gram CO₂ per kWh, aanzienlijk minder dan bij kernenergie.

We gaan ervan uit dat de indirecte CO₂-uitstoot door kernenergie toeneemt met het aantal kerncentrales. Het is niet met 100% nauwkeurig te bepalen hoe die relatie is, daarom moeten we hier volstaan met schattingen.

Voorlopig is er genoeg voorraad uranium. De reden hiervoor is simpel: er zijn veel minder kerncentrales in bedrijf dan in het verleden verwacht werd. Als de verwachtingen uit het verleden waren uitgekomen, zou het uranium al snel op zijn. Dat kernenergie nu naar voren geschoven wordt om de klimaatverandering tegen te gaan, komt doordat er meer uranium beschikbaar is dan men in 1980 dacht.

Volgens een rapport van 23 december 2020 van het Nucleair Energie Agentschap (NEA) in Parijs zijn de bewezen, geschatte en nader aan te tonen voorraden uranium 8 miljoen ton. We geven in dit artikel een rekenvoorbeeld met als conclusie dat die voorraad in 2084 op zal zijn. Een nieuwe kerncentrale in Nederland zou op z'n vroegst in het jaar 2030 gereed kunnen zijn. Uitgaande van een bedrijfstijd van 60 jaar, tot 2090, krijgt een nieuwe kerncentrale te maken met het einde van de uraniumvoorraad.

De bijdrage van kernenergie aan de vermindering van het klimaatprobleem zal beperkt zijn, is onze mening. Volgens het Internationaal Atoom Energie Agentschap (IAEA) is kernenergie nu 10,4% van het wereldwijde elektriciteitsgebruik; het elektriciteitsgebruik is 18,8% van van het wereldwijde energiegebruik.¹ Daarmee is kernenergie nu 2% van het wereldwijde energiegebruik. Op dezelfde manier kunnen we uitrekenen dat volgens het IAEA kernenergie in het jaar 2050 tussen de 1,5 en 3% van het wereldwijde energiegebruik zal leveren.

Hoofdstuk 1

Helpt kernenergie tegen het broeikas effect?

Bij de splijting van uranium in een kerncentrale komen verschillende gevaarlijke radioactieve stoffen vrij, maar er is geen CO₂-uitstoot. Daarom wordt kernenergie soms CO₂-vrij genoemd en zou kernenergie om die reden een rol moeten krijgen bij de vermindering van het broeikas effect. Deze redenering treffen we bijvoorbeeld aan in het op 8 oktober 2018 verschenen klimaatrapport van de Verenigde Naties, het IPCC-rapport.²

Kernenergie draagt echter ook bij aan het broeikas effect. Het gaat dan om de CO₂ die vrijkomt bij de winning en bewerking van uraniumerts, bij de bouw van de kerncentrale, het transport van kernbrandstof, de afbraak van de centrale, enzovoort. Er zijn veel stappen nodig voor er stroom kan worden geproduceerd in een kerncentrale. Bij al deze werkzaamheden zijn machines nodig die benzine of diesel gebruiken en zo CO₂-uitstoot veroorzaken. Dit heet de indirecte CO₂-uitstoot.

Op dit ogenblik worden uraniumertsen gewonnen met gemiddeld zo'n 0,1% uranium: in 1000 kilo gesteente zit een kilo uranium. Er is een aantal berekeningen beschikbaar over de indirecte uitstoot van CO₂ via dit uraniumerts en de verdere bewerking van het uranium. In een tabel bij het in 2014 verschenen klimaatrapport van de Verenigde Naties wordt een uitstoot van CO₂ van bijna 4 tot 110 gram CO₂ per kilowattuur (kWh) genoemd, met als gemiddelde 12 gram CO₂ per kWh.^{3 4} Dit gemiddelde wordt sindsdien vaak genoemd. Voor de onderbouwing werd verwezen naar studies van Lenzen en van Warner en Heath.⁵ Lenzen concludeerde dat het gaat om gemiddeld 65 gram CO₂ per kWh.⁶ Warner en Heath noemden 12-110 gram CO₂ per kWh.⁷ Daar komt nog bij dat Warner en Heath wezen op de onvolledigheid van rapporten waarvan ze voor hun studie gebruik maakten.⁸ Dat zou eerder wijzen op een hogere uitstoot van CO₂.

Waar het getal van 12 gram CO₂ per kWh op is gebaseerd, wordt niet navolgbaar uiteengezet. Wel nauwkeurig beargumenteerd zijn de volgende twee studies.

In een rapport van de energie-analist Jan Willem Storm van Leeuwen dat op 8 juni 2020 verschenen is, berekent hij 139-190 gram CO₂ per kilowattuur (kWh).⁹ Een op 15 juni 2019 verschenen rapport van Mark Z. Jacobson, Professor of Civil and Environmental Engineering, directeur van het Atmosphere/Energy Program van de Stanford University, noemt 78-178 gram CO₂ per kilowattuur.¹⁰ Zie tabel 1. De studies over CO₂-uitstoot noemen voor de fossiele brandstoffen allemaal vrijwel hetzelfde getal. Bij kernenergie zijn er grote verschillen. Vanwege de grote complexiteit van de kernenergiecyclus is het lastig om heel precies de werkelijke CO₂-uitstoot van kernenergie uit te rekenen.

Er is slechts een beperkte hoeveelheid erts met een gehalte van 0,1% uranium. Wanneer - bijvoorbeeld vanwege het broeikaseffect - meer kerncentrales gebouwd worden, zal men over tien tot vijftien jaar moeten overgaan op ertsen met een lager gehalte aan uranium. Dan moet veel meer gesteente afgegraven en verwerkt worden voor eenzelfde hoeveelheid uranium. Daardoor stijgt de indirecte CO₂-uitstoot. Bij een ertsgehalte van 0,02% is de indirecte CO₂-uitstoot door een kerncentrale 300 gram CO₂ per kWh. Bij nog armere ertsen van 0,01% is een kerncentrale verantwoordelijk voor meer CO₂-emissie dan wanneer dezelfde hoeveelheid elektriciteit verkregen zou zijn door aardgas direct te verbranden.^{11 12 13}

Tabel 1

Totale (directe en indirecte) CO₂-uitstoot in gram per kilowattuur^{14 15 16 17 18 19 20 21}

Brandstof	Uitstoot
Aardgas	490
Aardgas met afvang CO ₂	78
Olie	740
Steenkool	820
Steenkool met afvang CO ₂	110
Uranium ertsgehalte 0,1%	78-190
Uranium ertsgehalte 0,02%	300
Zon	48
Wind	10-12

Desgevraagd deelt Storm van Leeuwen mee: “Mijn rapporten berusten op een fysische (thermodynamische) analyse van alle processen die deel uitmaken van het nucleaire energiesysteem van cradle to grave, inclusief de eindberging van het radioactieve materiaal.

Voor zover ik weet heeft vrijwel geen enkele andere studie alle processen en alle energiestromen en CO₂-emissies, directe en indirecte, meegenomen. De meeste studies zijn in feite meta-studies waarin de uitkomsten van een klein aantal oorspronkelijke studies via allerlei, vaak ondoorzichtige, modellen bewerkt worden, soms ook met economische modellen. Voor zover ik heb kunnen beoordelen, hebben alle meta-studies de resultaten van veel andere studies statistisch bewerkt alsof ze volgens dezelfde meetmethode zijn bepaald; dit is niet het geval. Vaak worden daarbij ‘outliers’ (altijd de hoge waarden) weggelaten, zonder te vermelden op grond waarvan het volgens de auteurs hoge waarden zijn.”²²

De CO₂-reis van het uranium voor Borssele

Het uranium voor de kerncentrale in Borssele wordt in mijnen in Kazachstan gedolven. Ter plekke wordt in een chemische fabriek het bruikbare deel uranium uit het erts gehaald. Vervolgens gaat het per vrachtwagen naar een haven en per schip naar Engeland om daar per vrachtwagen naar een fabriek te worden gebracht, waar het gasvormig gemaakt wordt. Met een vrachtwagen, een schip en vervolgens weer een vrachtwagen gaat het naar de verrijkingsfabriek van Urenco in Almelo. Het verrijkt uranium gaat per vrachtwagen naar een splijtstofstavenfabriek in Duitsland of Frankrijk. Daarna bereiken de splijtstofstaven per vrachtwagen of trein de kerncentrale Borssele.

Als de splijtstofstaven uitgewerkt zijn, worden ze per trein of vrachtwagen naar een opwerkingsfabriek in Frankrijk vervoerd. Het kernafval, hoog-, middel- en laagradioactief, wordt bij de COVRA dicht bij de kerncentrale Borssele bovengronds opgeslagen in bunkers. Uiteindelijk zal al het afval ook nog vervoerd moeten worden naar een definitieve berging in zout of klei.²³

Bij al deze werkzaamheden en transporten zijn machines nodig die benzine of diesel gebruiken en zo CO₂-uitstoot veroorzaken.

Samen met de bouw en het bedrijf van de kerncentrale nemen we aan dat de CO₂-uitstoot van de kerncentrale Borssele 78 tot 190 gram per kWh zal zijn. Dat is lager dan de uitstoot van een gascentrale maar in eenzelfde orde van grootte of meer dan wat resteert bij een gascentrale met afvang en opslag van CO₂, aangezien dat niet voor 100% afgevangen kan worden.

Hoofdstuk 2

Uranium: voorraad, winning en marktprijs

Er is nog genoeg uranium voor de komende tientallen jaren. De reden hiervoor is simpel: er zijn veel minder kerncentrales in bedrijf dan in het verleden verwacht werd. Als de verwachtingen uit het verleden waren uitgekomen, zou het uranium al snel op zijn.

Volgens een rapport van 23 december 2020 van het Nucleair Energie Agentschap (NEA) in Parijs zijn de bewezen, geschatte en nader aan te tonen voorraden uranium 8 miljoen ton. We geven hierna een rekenvoorbeeld met als conclusie dat die voorraad in 2084 op zal zijn. Een nieuwe kerncentrale in Nederland zou op z'n vroegst in het jaar 2030 gereed kunnen zijn.

Uitgaande van een bedrijfstijd van 60 jaar, tot 2090, krijgt een nieuwe kerncentrale te maken met het einde van de uraniumvoorraad.

Uraniumwinning tot nu toe

Volgens de in Londen gevestigde World Nuclear Association is vanaf 1945 tot 2019 in totaal wereldwijd bijna 3 miljoen ton uranium gewonnen (zie tabel 2).

Tabel 2
Uraniumwinning 1945-2019 in tonnen

Canada	538.546
Kazachstan	519.472
USA	374.858
Australië	226.289
Duitsland	217.161
Rusland	173.780
Z-Afrika	165.043
Niger	149.361
Namibië	141.048
Tsjechië	111.214
Frankrijk	77.015
Oekraïne	68.932
China	54.029
Overige	148.566
Totaal	2.965.314

Bron: <https://www.world-nuclear.org/information-library/Nuclear-Fuel-Cycle/Uranium-Resources/Supply-of-Uranium.aspx>, december 2020.

Uraniumvoorraad

Volgens een rapport van 23 december 2020 van het Nucleair Energie Agentschap (NEA) in Parijs zijn de bewezen en geschatte voorraden uranium 3,8 miljoen ton. Daar komt nog eens 2,3 miljoen ton bij op grond van redelijk betrouwbare gegevens die nog nader getoetst moeten worden. Samen gaat het dan om 6,1 miljoen ton, die het NEA de ‘geïdentificeerde voorraad’ noemt en die winbaar is tegen kosten van 130 dollar per kilo (tabel 3). Opvallend is dat het NEA in tegenstelling tot eerdere rapporten ook uranium noemt dat winbaar is tegen kosten van 260 dollar per kilo. Bij die prijs is de voorraad 8 miljoen ton uranium. Alle 450 kerncentrales wereldwijd met een opgesteld vermogen van 396.000 Megawatt (MW) gebruikten in 2019 ruim 59.000 ton uranium.²⁴

Tabel 3
Voorraad uranium in tonnen en percentage per land

Australië	1.692.700	28%
Kazachstan	906.800	15%
Canada	564.900	9%
Rusland	486.000	8%
Namibië	448.300	7%
Z-Afrika	320.900	5%
Brazilië	276.800	5%
Niger	276.400	4%
China	248.900	4%
Mongolië	143.500	2%
Oezbekistan	132.300	2%
Oekraïne	108.700	2%
Botswana	87.200	1%
Tanzania	58.200	1%
Jordanië	52.500	1%
USA	47.900	1%
Overige	295.800	5%
Totaal	6.147.800	

Bron: <https://www.world-nuclear.org/information-library/Nuclear-Fuel-Cycle/Urani-um-Resources/Supply-of-Urani-um.aspx>, december 2020.

Hoelang gaat de uraniumvoorraad mee?

Tot het jaar 1980 is 300.000 ton uranium gebruikt.²⁵ Vanaf 1980 tot 2020 is zo'n 2,1 miljoen ton uranium gebruikt. Omdat de voorraad nu 8 miljoen ton bedraagt, kunnen we stellen dat de totale voorraad 10,1 miljoen ton uranium is, waarvan 9,8 miljoen ton uranium vanaf 1980 ingezet kon worden. Hoelang gaat deze voorraad mee? Dat hangt af van de aanname over het aantal kerncentrales. Indien we veronderstellen dat in het jaar 2050 alle gebruik van kolen, gas en olie vervangen zou zijn door elektriciteit uit kerncentrales, dan zou tot het jaar 2050 zo'n 13,5 miljoen ton uranium nodig zijn, staat in de juni-uitgave van het blad Energy Policy.²⁶ In dit extreme geval zou de voorraad rond 2042 op zijn. Daarom hier enkele reële voorbeelden.

Voorbeeld 1

In 1980 publiceerde het Internationaal Atoom Energie Agentschap (IAEA) gevestigd in Wenen rapporten over de International Fuel Cycle Evaluation (INFCE). Het IAEA verwachtte toen dat in het jaar 2000 wereldwijd in het hoge scenario 1.200.000 Megawatt (MW) aan kerncentrales in bedrijf zou zijn (ter vergelijking: dat zijn 1.200 kerncentrales van elk 1.000 MW) die in dat jaar 160.000 ton uranium nodig zouden hebben. In 2025 zou 3.900.000 MW aan kerncentrales in bedrijf zijn die in dat jaar 350.000 ton uranium nodig zouden hebben.²⁷ Een rekensom leert dat 1,9 miljoen ton uranium nodig is vanaf het jaar 1980 tot 2000 en nog eens 6,4 miljoen ton uranium tot het jaar 2025. Samen is 8,3 miljoen ton uranium nodig tot en met 2025. Indien we aannemen dat het scenario van de INFCE zou zijn uitgekomen, dan zou de voorraad in het jaar 2025 nog 1,5 miljoen ton uranium zijn (9,8-8,3 miljoen ton). In het jaar 2030 zou alle uranium dan op zijn.

Voorbeeld 2

Volgens het hoge scenario in bovengenoemd rapport van 23 december 2020 van het NEA is in het jaar 2040 het opgestelde vermogen aan kerncentrales 626.000 MW.²⁸ Tot 2040 hebben die kerncentrales 1,7 miljoen ton uranium nodig, kunnen we uitrekenen met behulp van een tabel van het NEA-rapport (zie tabel 4). Stel dat vanaf 2040 het jaarlijkse gebruik hetzelfde blijft, namelijk 100.000 ton uranium. Dan is de bewezen en geschatte voorraad in het jaar 2061 op. Nog eens 23 jaar later, in 2084 is ook de nader aan te tonen voorraad op.

Tabel 4

Vraag naar uranium tot 2040 in tonnen

	2018	2020	2020	2025	2025	2030	2030	2035	2035	2040	2040
		Low*	High*	Low*	High*	Low*	High*	Low*	High*	Low*	High*
European Union	14 930	18 144	18 224	15 536	16 544	13 856	17 648	10 048	17 520	9 776	17 280
North America	21 520	17 520	18 560	15 552	18 048	14 368	18 000	12 192	17 824	10 400	17 808
East Asia	12 550	17 088	17 616	16 928	20 992	18 448	27 808	19 728	33 888	21 088	40 464
Europe (non-EU)	7 925	6 928	7 392	7 008	7 552	6 720	9 408	7 184	10 096	6 992	10 560
Central and South America	515	560	560	512	560	720	896	1 120	1 552	1 024	1 712
Middle East, Central and South Asia	1 470	1 344	1 616	2 432	3 408	3 840	5 312	5 872	8 496	6 656	10 208
South-eastern Asia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	160	480
Africa	290	288	288	288	288	480	672	384	1 392	544	1 712
Pacific	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
World total	59 200	61 872	64 256	58 256	67 392	58 432	79 744	56 528	90 768	56 640	100 224

* NEA/IAEA estimate.

Bron: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_52716/world-s-uranium-resources-enough-for-the-foreseeable-future-say-nea-and-iaea-in-new-report, 23 december 2020.

Voorbeeld 3

Volgens het NEA-rapport uit 2020 is, zoals hierboven aangegeven, de geïdentificeerde voorraad 8 miljoen ton bij een prijs van 260 dollar per kilo.²⁹ Stel dat alle landen in de jaren tachtig het voorbeeld van Frankrijk hadden gevolgd. Dan zou kernenergie vanaf 2030 zo'n 70% van alle elektriciteit moeten leveren, als alle landen dat aandeel zouden handhaven. We kunnen bij benadering uitrekenen dat de totale geïdentificeerde voorraad van 8 miljoen ton in dit voorbeeld al over 15 jaar, in 2036, op zou zijn.³⁰

Uraniumwinning en marktprijs

Er zit voorlopig genoeg uranium in de grond, maar de vraag is of het eruit gehaald zal worden. Het Internationaal Energie Agentschap (IEA) gevestigd in Parijs gaf namelijk herhaaldelijk aan dat de uraniumproductie van de bestaande mijnen daalde. In 2014 was de productie nog net gelijk aan de vraag, maar in de komende jaren zouden tekorten kunnen optreden. Er moeten nieuwe uraniummijnen in bedrijf komen, wat betekent dat al over een paar jaar investeringsbesluiten genomen moeten worden om een tekort aan uranium te voorkomen, stelde het IEA in 2014 en herhaalde dat in 2018.^{31 32} Het NEA trok op pagina 109 van het rapport van 23 december 2020 eenzelfde conclusie. Daarbij verwees het NEA naar de verslechterde marktomstandigheden van kernenergie en de lage marktprijs van uranium. Bij deze lage prijs zal in het jaar 2040 zo'n 87% van de voorraden die gewonnen kunnen worden tegen een prijs van 80 dollar per kilo, opgebruikt zijn. Maar ook dan zijn "significante investeringen en technische kennis" nodig om deze gewonnen voorraden te kunnen verkopen op de markt.

¹ <https://www.iaea.org/publications/14786/energy-electricity-and-nuclear-power-estimates-for-the-period-up-to-2050>, 2020

² <https://www.ipcc.ch/sr15/>; http://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_spm_final.pdf, 8 oktober 2018; volgens dit rapport zijn in sommige scenario's nieuwe kerncentrales nodig opdat in 2050 zo'n 2,5 keer zoveel elektriciteit uit kerncentrales komt als nu. Zie ook: <http://www.world-nuclear-news.org/Articles/UN-report-shows-increased-need-for-nuclear>, 8 oktober 2018.

³ https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf, Schlömer S., T. Bruckner, L. Fulton, E. Hertwich, A. McKinnon, D. Perczyk, J. Roy, R. Schaeffer, R. Sims, P. Smith, and R. Wiser, 2014: Annex III: Technology-specific cost and performance parameters. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

⁴ Het gaat hier om de zogeheten mediaan. Dat is het middelste getal als je de getallen op volgorde van klein naar groot zet ([https://nl.wikipedia.org/wiki/Mediaan_\(statistiek\)](https://nl.wikipedia.org/wiki/Mediaan_(statistiek))). Waarom de mediaan gebruikt wordt en niet het rekenkundig gemiddelde, wordt niet uitgelegd.

⁵ https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-ii.pdf.

⁶ http://energiasostenible.org/mm/file/GCT2008%20Doc_ML-LCE%26Emissions.pdf, 8 april 2008.

⁷ <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1530-9290.2012.00472.x>, 17 april 2012.

⁸ <https://wisenederland.nl/sites/default/files/images/Kernenergie%20en%20CO2%20november%202018.pdf>, 9 november 2018: De mijnbouwmethoden worden in meer dan de helft van de studies niet onderzocht. Meer dan de helft van de studies besteden geen aandacht aan de kwaliteit van het uraniumerts. Dit kan van grote invloed zijn op de CO₂-uitstoot. De ontmanteling van kerncentrales werd onvolledig meegenomen. Het herstellen van mijnen, dat een groot deel van de CO₂-emissies kan veroorzaken, werd in geen enkele studie meegenomen. De methodes werden meestal niet gedetailleerd genoeg omschreven.

⁹ Jan Willem Storm van Leeuwen, Nuclear Monitor #886, June 8, 2020

CO₂ emissions of nuclear power: the whole picture; in: <http://nuclearfreenw.org/climate.htm>;

¹⁰ <https://web.stanford.edu/group/efmh/jacobson/Articles/I/NuclearVsWWS.pdf>, 15 juni 2019.

¹¹ Jan Willem Storm van Leeuwen, Energy from Uranium, Oxford Research Group, juli 2006, http://www.oxfordresearchgroup.org.uk/publications/briefing_papers/energy_security_and_uranium_reserves_secure_energy_factsheet_4.

-
- ¹² <http://www.peopleplanetprofit.be/beelden/oko-instituut.pdf>, maart 2007.
- ¹³ Jan Willem Storm van Leeuwen, Nuclear Monitor #886, June 8, 2020
CO2 emissions of nuclear power: the whole picture; in: <http://nuclearfreenw.org/climate.htm>;
- ¹⁴ https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf.
- ¹⁵ <http://www.nature.com/articles/s41560-017-0032-9>; <https://www.pv-magazine.de/2017/12/11/indirekte-photovoltaik-emissionen-kein-hindernis-fuer-dekarbonisierung/>, 12 december 2017.
- ¹⁶ <http://www.dont-nuke-the-climate.org/> Jan Willem Storm van Leeuwen, Climate change and nuclear power. An analysis of nuclear greenhouse gas emissions. Commissioned by the World Information Service on Energy (WISE) Amsterdam 24 oktober 2017.
- ¹⁷ http://energiasostenible.org/mm/file/GCT2008%20Doc_ML-LCE%26Emissions.pdf, 8 april 2008.
- ¹⁸ <https://jaspervis.wordpress.com/2019/03/03/hoeveel-co2-kost-al-dat-staal-van-een-windmolen-eigenlijk-2019-update/>, 3 maart 2019.
- ¹⁹ <https://web.stanford.edu/group/efmh/jacobson/Articles/I/NuclearVsWWS.pdf>, 15 juni 2019.
- ²⁰ Jan Willem Storm van Leeuwen, Nuclear Monitor #886, June 8, 2020; CO2 emissions of nuclear power: the whole picture; <http://nuclearfreenw.org/climate.htm>.
- ²¹ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421521002330?via%3Dihub>, Energy Policy, Volume 155, August 2021, 112363 Nuclear energy - The solution to climate change?
- ²² E-mail Jan Willem Storm van Leeuwen aan Herman Damveld, 15-2-2019 14:17.
- ²³ https://www.wisenederland.nl/sites/default/files/images/WISE_klimaat-energie-rapport_A4%20definitief_0.pdf, 9 november 2018.
- ²⁴ https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_52716/world-s-uranium-resources-enough-for-the-foreseeable-future-say-nea-and-iaea-in-new-report, 23 december 2020.
- ²⁵ https://www.oecd-ilibrary.org/nuclear-energy/uranium-2007_uranium-2007-en, pagina 75.
- ²⁶ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421521002330?via%3Dihub>, Energy Policy, Volume 155, August 2021, 112363 Nuclear energy - The solution to climate change?
- ²⁷ <https://www.iaea.org/newscenter/statements/keynote-speech-iaea-international-symposium-nuclear-fuel-cycle-and-reactor-strategies-adjusting-new-realities>, 3 juni 1997; IAEA, International Nuclear Fuel Cycle Evaluation, report Working Group 1, pagina's 30 en 123, gemiddelde van de data.
- ²⁸ https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_52716/world-s-uranium-resources-enough-for-the-foreseeable-future-say-nea-and-iaea-in-new-report, 23 december 2020.
- ²⁹ https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_52716/world-s-uranium-resources-enough-for-the-foreseeable-future-say-nea-and-iaea-in-new-report, 23 december 2020.
- ³⁰ Volgens het IAEA was het totale energiegebruik in 2007, uitgedrukt in ExaJoule (EJ) 510 EJ, waarvan kernenergie 5,9%, dat is 30 EJ. Voor 2030 verwacht het IAEA een wereldwijd energiegebruik van 826 EJ, waarvan 39% elektriciteit ofwel 322 EJ. Stel kernenergie zorgt voor 70% van het elektriciteitsgebruik in 2030, overeenkomend met 225 EJ. Kernenergie gaat dan van 30 EJ naar 225 EJ, dat is 7,5 keer zoveel. Er is dan ook 7,5 zoveel uranium nodig in 2030, d.w.z. 525.000 ton in dat jaar. Bij benadering is gemiddeld tussen 2011 en 2030 jaarlijks zo'n 300.000 ton uranium nodig. Tot en met 2031 is dat 6,3 miljoen ton en tot 2036 zo'n 8 miljoen ton.
- ³¹ <http://www.iea.org/Textbase/nppdf/stud/14/weo2014.pdf>, 12 november 2014, p. 409 en 410.
- ³² <http://www.oecd-nea.org/news/2018/2018-07.html>, 13 december 2018.