

# Studie rond de haalbaarheid van hernieuwbare energie

Kenneth Hollevoet  
Studentennummer: 01810461

Promotoren: Christof Dauwels, Paul Vander Haeghen

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van Master of  
Science in de industriële wetenschappen: elektrotechniek: elektrotechniek

Academiejaar: 2022-2023



# Studie rond de haalbaarheid van hernieuwbare energie

Kenneth Hollevoet  
Studentennummer: 01810461

Promotoren: Christof Dauwels, Paul Vander Haeghen

Masterproef ingediend tot het behalen van de academische graad van Master of  
Science in de industriële wetenschappen: elektrotechniek: elektrotechniek

Academiejaar: 2022-2023

# Toelating tot bruikleen

“De auteur geeft de toelating deze masterproef voor consultatie beschikbaar te stellen en delen van de masterproef te kopiëren voor persoonlijk gebruik. Elk ander gebruik valt onder de beperkingen van het auteursrecht, in het bijzonder met betrekking tot de verplichting de bron uitdrukkelijk te vermelden bij het aanhalen van resultaten uit deze masterproef.”

“The author gives permission to make this master dissertation available for consultation and to copy parts of this master dissertation for personal use. In the case of any other use, the limitations of the copyright have to be respected, in particular with regard to the obligation to state expressly the source when quoting results from this master dissertation.”

Kenneth Hollevoet, 25 mei 2023

# Woord vooraf

Met trots presenteer ik u de masterproef van de opleiding industrieel ingenieur in de elektrotechniek, geschreven in het kader van mijn afstuderen aan de universiteit. Het onderwerp van deze masterproef is de studie rond de haalbaarheid van hernieuwbare energie, onder begeleiding van mijn promotor, Christof Dauwels.

Allereerst wil ik dhr. Dauwels bedanken voor zijn waardevolle begeleiding gedurende het hele onderzoeksproces. Ik kon altijd bij hem terecht met mogelijke vragen. Hij bracht me altijd op nieuwe inzichten hoe ik de verschillende onderwerpen moest aanpakken. Dit leidde tot het schrijven van een geslaagde en volledige masterproef.

Daarnaast gaat mijn dank ook uit naar mijn familie en vrienden. Zij steunden mij niet alleen tijdens mijn masterproef, maar gedurende mijn hele opleiding. Ook hielpen ze mij met het overlezen van mijn masterproef.

Ik hoop dat deze masterproef bijdraagt aan een beter begrip van de mogelijkheden en uitdagingen van hernieuwbare energie, en dat het bijdraagt aan de verdere ontwikkeling van duurzame oplossingen voor onze energiebehoeften.

## Abstract

# Study of the feasibility of renewable energy

Kenneth Hollevoet

Supervisor(s): Christof Dauwels and Paul Vander Haeghen

**Abstract:** In this study, the focus is on the different possibilities of renewable energy sources in Belgium. More specifically, it examines whether renewable energy growth is sufficient to meet demand. The study also examines various ways to make this feasible, including the comparison of different nuclear power plants, the expansion of offshore wind energy and the increasing demand for solar panels. In addition, the study contains a brief overview of electric cars and other forms of energy generation. Finally, a conclusion was formed on all the main findings.

**Keywords:** renewable energy, nuclear energy, wind energy, solar panels, electric vehicles, climate goals

## I. Introduction

The concern about climate change and its impact on the environment and society is increasing among the population. Clear objectives have therefore been set regarding to the growth of renewable energy and the reduction of fossil fuels in Belgium. This research focuses on the various ways in which these objectives can be achieved. The study examines whether the set objectives are sufficient to meet the rising demand for electricity in the future.

The first part deals with the various objectives of the country regarding to the reduction of their greenhouse gases. Subsequently, different nuclear power plants are compared with each other to show which will be the safest and most environmentally friendly in the future. A third part deals with various projects at sea and on land to expand the energy network in Belgium, to make it sustainable and more reliable. The next part outlines various problems within the energy generation of solar energy and its storage. The chapter on electric cars gives a brief overview of their advantages and disadvantages and the ways in which they can be charged. The last chapter briefly talks about other types of energy generation. All this together results in a calculation to determine the future consumption and yield in order to determine whether the objectives of renewable energy are feasible.

## II. Background

Measures must be taken to prevent global warming and extreme weather conditions. Belgium is therefore a major polluter. With a 9,1 Mton CO<sub>2</sub>-equivalent per inhabitant, they are much above the European average of 8,4. Belgium has attended the conference

in Paris and has signed a commitment to reduce its greenhouse gases by 35% by 2030 compared to 2005. This can be done in various ways, such as developing renewable energy projects and phasing out the use of fossil fuels. However, the use of various renewable energy sources can have a negative effect on the environment.

### III. Nuclear power plants of the future

The CO<sub>2</sub> emissions of nuclear power plants are comparable to those of renewable energy, but they deliver much more energy per kg of fuel and their operational costs are low due to their long life. That is why nuclear energy is an important source of generation. The two plants with the most advantages are modular and thorium plants. Both work with the refrigerant sodium, which has many advantages.

Modular plants operate at low pressure, which has already solved the disadvantage of PWR plants. In addition, such a plant is quickly built and consists of few parts, which causes fewer problems. The waste production is also much lower than the traditional power plants.

Thorium power plants also operate at low pressure and use a freeze plug to avoid a meltdown. Thorium is safer than uranium because it splits less quickly during extraction and less waste is created after use.

The legal nuclear phase-out in Belgium is currently planned for 2035 after the extension of the youngest power stations. If the application for the extension of the oldest power stations goes through, a large saving can already be made. This will also help to reduce emissions and import less.

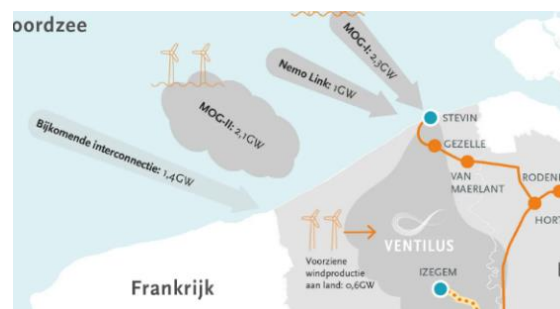
### IV. Growth of offshore wind energy

The construction of the Princess Elisabeth Zone at sea is one of the energy projects that ensures a more sustainable Belgium. This project will increase offshore capacity from 2,3 GW to 5,8 GW. For the time being, 2,1 GW of this project is already in operation. According to calculations by Elia, the maximum offshore wind energy is 8 GW. In addition, this energy island will connect various offshore wind farms.

To make the integration of renewable energy easier and to increase security of supply, the Nemo-link interconnection was installed. This interconnection with the United Kingdom can transport 1 GW at 400 kV DC. In addition, there will be a second interconnection, called Nautilus.

The Stevin project ensures that the power of the Nemo link and the first wind farm is brought on land. This high-voltage substation can transport up to 3 GW. A second high-voltage substation will have to be built for the Princess Elisabeth Zone in order to bring this capacity ashore.

All this power together can be distributed throughout Flanders with the Ventilus project. This is the first high-voltage line in Belgium at 380 kV<sub>AC</sub> that can transport 6 GW. The route and the choice of aboveground or underground has not yet been determined because the population does not agree with the fact that such large currents are involved. This can cause all kinds of negative health effects.



## V. Challenges in decentralized RES in low voltage

There is now an inverter capacity of 6,47 GW of solar panels in Belgium. According to studies, the target would be to expand this to 11,6 GW by 2030 and to 18 GW by 2040. This switch to renewable energy does have some problems. A first problem is that wind and solar energy are weather dependent and storage must therefore be provided. From this research follows that the following home batteries are good choices for solar energy storage: lithium-ion, lithium-sulphur, lithium-iron phosphate and solid-state batteries. In addition, another problem may arise due to the simultaneity of generation in the street. If there are too many solar panels in the street, the voltage in the street will rise and the inverter will switch off. Some solutions for this are:

- Distribute inverters in the street on the different phases depending on the distance to the transformer.
- Provide storage
- Shift consumption over time.
- Lay panels in the east-west direction
- Undersize the inverter
- Place an OLTC transformer in the street
- Raise the cable section in the street or lay the cables parallel

## VI. The feasibility of renewable energy

To estimate the total consumption, there has been worked with the increase in electric vehicles and electric heat pumps. The increase in population is compensated by the increasing efficiency. Based on the planned energy projects related to wind energy and other energy generation, an estimate has been made of the total future yield. This takes into account the statutory

closure and an extension of the older plants for the nuclear power plants. This showed that in the future there will not be enough electricity production in Belgium to meet the rising demand. As a result, a lot of electricity will have to be imported or nuclear power plants will have to be built in parallel with the development of the various renewable energy projects.



# Inhoudsopgave

<b>TOELATING TOT BRUIKLEEN .....</b>	<b>4</b>
<b>WOORD VOORAF .....</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>6</b>
<b>INHOUDSOPGAVE .....</b>	<b>9</b>
<b>1 LIJST VAN FIGUREN .....</b>	<b>13</b>
<b>2 LIJST VAN TABELLEN.....</b>	<b>16</b>
<b>3 INLEIDING .....</b>	<b>17</b>
<b>4 KLIMAATVERDRAG.....</b>	<b>19</b>
4.1 HET VN-KLIMAATVERDRAG.....	19
4.2 HET PROTOCOL VAN KYOTO .....	19
4.3 OVEREENKOMST VAN PARIJS.....	20
<b>5 BROEIKASGASSEN IN BELGIË .....</b>	<b>21</b>
<b>6 DE HUIDIGE KERNCENTRALES.....</b>	<b>23</b>
BELGISCHE KERNCENTRALES.....	23
SOORTEN REACTOREN .....	25
<i>Drukwaterreactor (PWR)</i> .....	25
<i>Thoriumreactor (of gesmolten zoutreactor, MSR)</i> .....	26
<i>Kleine kernreactoren (SMR's)</i> .....	28
<i>Kernfusie</i> .....	29
ALGEMENE VOOR- EN NADELEN KERNENERGIE.....	31
<i>Voordelen</i> .....	31
<i>Nadelen</i> .....	32
KERNAFVAL .....	32
<i>Classificatie</i> .....	32
<i>Beheer van radioactief afval</i> .....	33
<i>Oplossingen</i> .....	34
Recyclage.....	34
Opslag.....	35
Transmutatie .....	35
<i>Impact</i> .....	36
HAALBAARHEID VAN KERNENERGIE .....	39
<b>7 STUDIE VAN DE BUURLANDEN EN HUN IDEEËN OP VLAK VAN ELEKTRICITEIT .....</b>	<b>40</b>
NEDERLAND .....	41
FRANKRIJK .....	45
DUITSLAND .....	50
VERGELIJKING.....	53
<b>8 STUDIE NAAR WINDMOLENPARKEN OP ZEE.....</b>	<b>56</b>
OSY MOG .....	57
STEVIN PROJECT .....	59

NEMO-LINK.....	59
VENTILUS PROJECT.....	60
PRINSES ELISABETH ZONE .....	63
TRANSPORT VAN ELEKTRICITEIT .....	64
<i>Gekende problemen</i> .....	67
STOCKAGE VAN ELEKTRICITEIT .....	68
<i>Hydro pomp- en turbine energie</i> .....	68
<i>Energie-atol (energiedonut)</i> .....	69
<i>Opslag door gecomprimeerde energie (CAES)</i> .....	70
<i>Oceaan batterij</i> .....	71
<i>Vliegwiel</i> .....	71
<i>Batterijen</i> .....	72
Lithium-ion batterij.....	74
Solid-state batterij .....	74
Lithium-zwavelbatterij.....	75
Lithium-ijzer fosfaatbatterij.....	75
<i>Waterstof</i> .....	76
<i>SMES of supergeleidende magnetische energieopslag</i> .....	77
<i>Supercondensator</i> .....	78
<i>Thermische opslag</i> .....	78
HAALBAARHEID VAN WINDENERGIE .....	79
<b>9    STUDIE VAN HERNIEUWBARE ENERGIE VIA ZONNEPANELEN .....</b>	<b>81</b>
WERKING ZONNECEL.....	81
STOCKAGE VAN ELEKTRICITEIT .....	82
<i>Batterijen</i> .....	83
Lithium-ion batterij.....	83
Loodzuurbatterij .....	83
Zoutwaterbatterij .....	83
Lithium-zwavelbatterij.....	84
Lithium-ijzerfosfaatbatterij.....	84
Solid-state batterij .....	84
Vanadium redox flow batterij.....	85
<i>Hybride opslag</i> .....	85
<i>Waterstof</i> .....	86
<i>thermische opslag</i> .....	86
<i>Energieput</i> .....	87
MILIEUASPECT .....	88
<i>Zonnepanelen</i> .....	88
<i>Batterij</i> .....	89
<i>Waterstof</i> .....	89
BEREKENING.....	90
<i>Situatieschets</i> .....	90
<i>Algemeen</i> .....	91
Capaciteitstarief .....	91
Zelfvoorziening .....	91
Zelfconsumptie .....	91
Gegevens van batterijen.....	92
<i>Lion batterij</i> .....	93
Initialisatie .....	93
Berekeningen zonder opslag .....	93
Berekeningen met opslag .....	94
<i>Redox flow batterij</i> .....	97

Initialisatie .....	97
Berekeningen zonder opslag .....	97
Berekeningen met opslag .....	97
<i>Algemeen besluit</i> .....	99
UITDAGINGEN BIJ DECENTRALE RES IN LAAGSPANNING .....	99
HAALBAARHEID VAN ZONNE-ENERGIE .....	104
<b>10 STUDIE NAAR HET ELEKTRISCH WAGENPARK .....</b>	<b>105</b>
ELEKTRISCH DE TOEKOMST .....	105
<i>Milieuaspect</i> .....	105
<i>Kosten</i> .....	106
<i>Actieradius</i> .....	107
<i>Opslag</i> .....	108
<i>Samengevat</i> .....	108
CONTROLESTRATEGIEËN EV (ONT)LADEN .....	109
<i>Situatieschets</i> .....	109
<i>Ongecoördineerd laden</i> .....	109
<i>Gecoördineerd laden</i> .....	110
<i>V2G</i> .....	113
<i>Casestudie</i> .....	115
EVOLUTIE VERBRUIK .....	116
<i>Elektrische voertuigen</i> .....	117
<i>Warmtepompen</i> .....	118
<i>Totale verbruik</i> .....	119
<b>11 ANDERE SOORTEN ENERGIEOPWEKKINGEN .....</b>	<b>120</b>
BIOMASSA .....	120
<i>Werking</i> .....	120
<i>Milieuaspect</i> .....	121
FOSSIELE BRANDSTOFFEN .....	122
<i>Werking</i> .....	122
<i>Milieuaspect</i> .....	123
WATERKRACHT .....	124
<i>Werking</i> .....	124
HAALBAARHEID VAN ANDERE ENERGIEOPWEKKINGEN .....	125
<i>Biomassa</i> .....	125
<i>Fossiele brandstoffen</i> .....	126
<i>Waterkracht</i> .....	128
<i>Opslag</i> .....	128
<i>Totale opbrengst</i> .....	129
<b>12 CONCLUSIE .....</b>	<b>130</b>
KERNCENTRALES .....	130
<i>Voordelen</i> .....	130
<i>Nadelen</i> .....	130
LOPENDE PROJECTEN IN BELGIË .....	132
<i>Voordelen</i> .....	132
<i>Nadelen</i> .....	132
WINDENERGIE IN BELGIË .....	132
<i>Voordelen</i> .....	132
<i>Nadelen</i> .....	133
ZONNE-ENERGIE .....	133

<i>Voordelen</i> .....	133
<i>Nadelen</i> .....	133
ELEKTRISCH WAGENPARK .....	134
<i>Voordelen</i> .....	134
<i>Nadelen</i> .....	134
OVERIGE ENERGIEOPWEKKINGEN .....	134
<i>Voordelen</i> .....	134
<i>Nadelen</i> .....	135
OFFSHORE WINDENERGIE.....	137
<i>Hydro pomp- en turbine Energie-atol (energiedonut)</i> .....	137
<i>Voordelen</i> .....	137
<i>Nadelen</i> .....	137
<i>Compressed Air Energy Storage (CAES)</i> .....	137
<i>Voordelen</i> .....	137
<i>Nadelen</i> .....	137
<i>Oceaan batterij</i> .....	138
<i>Voordelen</i> .....	138
<i>Nadelen</i> .....	138
<i>Batterijopslag</i> .....	138
<i>Waterstofopslag</i> .....	138
<i>Voordelen</i> .....	138
<i>Nadelen</i> .....	138
ZONNE-ENERGIE.....	139
<i>Batterijopslag</i> .....	139
<i>Thermische opslag</i> .....	139
<i>Voordelen</i> .....	140
<i>Nadelen</i> .....	140
<i>V2G</i> .....	140
<i>Voordelen</i> .....	140
<i>Nadelen</i> .....	140
<b>13 BIBLIOGRAFIE.....</b>	<b>143</b>
<b>14 BIJLAGEN.....</b>	<b>151</b>
14.1 EVOLUTIE GEÏNSTALLEERD VERMOGEN NEDERLAND .....	151
14.2 EVOLUTIE GEÏNSTALLEERD VERMOGEN FRANKRIJK.....	152
14.3 EVOLUTIE GEÏNSTALLEERD VERMOGEN DUITSLAND .....	153
14.4 VERGELIJKING VAN TOTALE CO <sub>2</sub> -UITSTOOT .....	154
14.5 SCOPE VAN HET MOG-PROJECT.....	154
14.6 HET TRAJECT VAN HET STEVIN PROJECT.....	155
14.7 KAART MOGELIJKE TRAJECTEN VOOR VENTILUS.....	156
14.8 MATERIALEN IN EEN TYPISCH SILICIUM FOTOVOLTAÏSCHE ZONNECEL .....	157
14.9 CAPACITEITSTARIEF.....	157
<i>Residentieel/KMO</i> .....	157
<i>Industrieel/GO</i> .....	158
14.10 EMS-MODEL VOOR MEER ZELFVOORZIENING MET BESS.....	159
14.11 MATLAB-CODE LITHIUM-ION BATTERIJ.....	160
14.12 MATLAB CODE REDOX FLOW BATTERIJ .....	161
14.13 IMPACT AANKOMST- EN VERTREKUR .....	163
14.14 EVOLUTIE ELEKTRISCHE VOERTUIGEN .....	164
14.15 CIJFERGEGEVENS VOORSPELLING TOTALE VERBRUIK.....	165

# 1 Lijst van figuren

FIGUUR 1: DE EVOLUTIE VAN DE UITSTOOT VAN BROEIKASGASSEN EN CO <sub>2</sub> IN BELGIË .....	21
FIGUUR 2: VERDELING VAN DE VERSCHILLENDE GASSEN IN HET JAAR 2020 (VERKLARING VAN 2022) .....	22
FIGUUR 3: ERNSTIG GETROFFEN GEBIEDEN BIJ RAMP .....	23
FIGUUR 4: WERKING KERNCENTRALE MET DRUKWATERREACTOR .....	25
FIGUUR 5: WERKING VAN KERNCENTRALE MET THORIUMREACTOR .....	26
FIGUUR 6: DE RADIOTOXITEIT IN FUNCTIE VAN DE BEWAARTIJD VAN HET AFVAL .....	27
FIGUUR 7: SNELLE NEUTRONENREACTOR MET NATRIUM ALS KOELMIDDEL .....	29
FIGUUR 8: DE FUSIEREACTIE .....	30
FIGUUR 9: CO <sub>2</sub> -UITSTOOT VAN VERSCHILLENDE ENERGIEBRONNEN .....	31
FIGUUR 10: CLASSIFICATIE VAN AFVAL IN BELGIË .....	33
FIGUUR 11: ONDER WATER OPSLAG VAN VERBRUIKTE SPLIJTSTOFELEMENTEN .....	33
FIGUUR 12: NUCLEAIRE BATTERIJ .....	34
FIGUUR 13: GEOLOGISCH OPSLAGPROJECT IN FINLAND .....	35
FIGUUR 14: RADIOACTIVITEIT VAN KERNBRANDSTOF ZONDER RECYCLAGE (RECHTS), MET RECYCLAGE (MIDDEN) EN MET TRANSMUTATIE (LINKS) .....	36
FIGUUR 15: DOORDRINGEND VERMOGEN VAN VERSCHILLENDE SOORTEN STRALING .....	37
FIGUUR 16: RADIOACTIEVE STRALING NA ZOVEEL JAREN IN DIEPE KLEILAGEN ONDER DE GROND .....	38
FIGUUR 17: WERKELIJKE EN TOEKOMSTIGE GESCHATTE OPBRENGST VAN DE KERNCENTRALES .....	40
FIGUUR 18: EVOLUTIE VAN DE UITSTOOT VAN CO <sub>2</sub> EN BROEIKASGASSEN IN NEDERLAND .....	41
FIGUUR 19: VERDELING VAN HET GEÏNSTALLEERD VERMOGEN IN NEDERLAND (2022) .....	42
FIGUUR 20: BINNENLANDSE ENERGIEPRODUCTIE VAN NEDERLAND .....	43
FIGUUR 21: EVOLUTIE VAN DE VERSCHILLENDE SOORTEN ENERGIEBRONNEN IN NEDERLAND .....	44
FIGUUR 22: NUCLEAIRE INSTALLATIES IN NEDERLAND .....	45
FIGUUR 23: EVOLUTIE VAN DE UITSTOOT VAN CO <sub>2</sub> EN BROEIKASGASSEN IN FRANKRIJK .....	46
FIGUUR 24: VERDELING VAN HET GEÏNSTALLEERD VERMOGEN IN FRANKRIJK (2022) .....	47
FIGUUR 25: ELEKTRICITEITSPRODUCTIE VAN FRANKRIJK T.E.M. 2022 .....	48
FIGUUR 26: FRANSE KERNCENTRALES .....	49
FIGUUR 27: EVOLUTIE VAN DE UITSTOOT VAN CO <sub>2</sub> EN BROEIKASGASSEN IN DUITSLAND .....	51
FIGUUR 28: VERDELING VAN GEÏNSTALLEERD VERMOGEN IN DUITSLAND (2022) .....	52
FIGUUR 29: ELEKTRICITEITSPRODUCTIE VAN DUITSLAND IN 1990 .....	53
FIGUUR 30: ELEKTRICITEITSPRODUCTIE VAN DUITSLAND IN 2022 .....	53
FIGUUR 31: TOTALE UITSTOOT VAN BROEIKASGASSEN .....	54
FIGUUR 32: UITSTOOT PER HOOFD VAN DE BEVOLKING .....	55
FIGUUR 33: BRONNEN VOOR ELEKTRICITEITSPRODUCTIE PER LAND (2022) .....	55
FIGUUR 34: EVOLUTIE GEÏNSTALLEERD VERMOGEN WINDENERGIE IN BELGIË .....	57
FIGUUR 35: AANSLUITINGEN EN WINDMOLENZONES IN DE NOORDZEE .....	58
FIGUUR 36: ONDERZEESE INTERCONNECTOR MET HET VERENIGD KONINKRIJK (NEMO-LINK) .....	59
FIGUUR 37: OVERZICHT VERMOGEN UITWISSELINGEN VAN WINDMOLENPARKEN OP ZEE EN LANDINWAARTS .....	60
FIGUUR 38: RELATIE TUSSEN AFSTAND TOT DE LIJN EN MAGNEETVELDSTERKTE OP DE GROND (HOOGTE > 6M BIJ 380 kV) .....	61
FIGUUR 39: VERGELIJKING VAN HET MAGNEETVELD VAN EEN ONDERGRONDSE EN BOVENGRONDSE HOOGSPANNINGSLIJN .....	62
FIGUUR 40: VERMOGEN UITWISSELING TUSSEN HET ENERGIE-EILAND EN LAND .....	64
FIGUUR 41: HVDC XLPE ONDERZEESE KABEL GEBRUIKT BIJ NEMO LINK .....	65
FIGUUR 42: ONDERZEESE XLPE KABEL GEBRUIKT BIJ DE TRANSITIE VAN MOG-I NAAR LAND .....	65
FIGUUR 43: VEREENVOUDIGING VAN STUKJE KABEL MET LENGTE $\Delta x$ .....	66
FIGUUR 44: KOSTEN I.F.V. DE AFSTAND VAN GELIJKSTROOMKABELS VS. WISSELSTROOMKABELS .....	66
FIGUUR 45: POMPCENTRALE AAN LAND .....	69

FIGUUR 46: ONDER WATER OPSLAG RESERVOIR .....	69
FIGUUR 47: WERKING ENERGIEDONUT.....	70
FIGUUR 48: ENERGIEOPSLAG DOOR GECOMPRIMEERDE LUCHT.....	70
FIGUUR 49: OCEAAN BATTERIJ .....	71
FIGUUR 50: VLIEGWIEL .....	72
FIGUUR 51: TOEPASSINGSGEBIEDEN VAN OPSLAGTECHNOLOGIEËN .....	72
FIGUUR 52: OPLADEN (RECHTS) EN ONTLADEN (LINKS) VAN EEN LITHIUM BATTERIJ.....	74
FIGUUR 53: WERKING VAN LITHIUM-ION BATTERIJ (LINKS) EN VAN SOLID-STATE BATTERIJ (RECHTS).....	75
FIGUUR 54: SCHEMATISCH DIAGRAM VAN EEN TYPISCHE LI-S-CEL.....	75
FIGUUR 55: WERKING VAN LITHIUM-ZWAVEL BATTERIJ .....	76
FIGUUR 56: WATERSTOFOPSLAG .....	77
FIGUUR 57: SUPERGELEIDENDE MAGNETISCHE ENERGIEOPSLAG (SMES) .....	77
FIGUUR 58: WERKINGSPRINCIPE VAN EEN SUPERCONDENSATOR .....	78
FIGUUR 59: WERKELIJKE EN TOEKOMSTIGE GESCHATTE OPBRENGSTEN VAN WINDENERGIE .....	80
FIGUUR 60: WERKELIJKE EN TOEKOMSTIGE GESCHATTE OPBRENGST VAN KERN- EN WINDENERGIE .....	80
FIGUUR 61: EVOLUTIE GEÏNSTALLEERD VERMOGEN ZONNE-ENERGIE IN BELGIË.....	81
FIGUUR 62: VORMING UITPUTTINGSZONE (LINKS), BEWEGING ELEKTRONEN DOOR ZONLICHT (MIDDEN), GELIJKSTROOM VOEDT VERBRUIKER (RECHTS).....	82
FIGUUR 63: ELEKTRISCH SCHEMA VAN EEN ZONNEPANEEL MET BYPASS DIODES .....	82
FIGUUR 64: VEREENVOUDIGING VAN DE OPBRENGST EN HET VERBRUIK .....	83
FIGUUR 65: INVLOED VERMOGEN VAN BATTERIJ OP ZELFVOORZIENING .....	84
FIGUUR 66: DIMENSIONERING HYBRIDE OPSLAG .....	86
FIGUUR 67: HORIZONTAAL SYSTEEM (LINKS) EN VERTICAAL SYSTEEM (RECHTS) VAN BOORGAT THERMISCHE ENERGIEOPSLAG (BTES).....	87
FIGUUR 68: SCHEMATISCHE WEERGAVE OPSLAGTECHNIEK MET PUTTEN.....	87
FIGUUR 69: OPBOUW ZONNEPANEEL.....	88
FIGUUR 70: OPBRENGST EN VERBRUIK OVER EEN HEEL JAAR .....	90
FIGUUR 71: ZELFVOORZIENING MET BATTERIJ.....	91
FIGUUR 72: ZELFCONSUMPTIE MET BATTERIJ.....	92
FIGUUR 73: BATTERIJGEGEVENS LION BATTERIJ.....	93
FIGUUR 74: BEREKENINGEN ZONDER BATTERIJ.....	93
FIGUUR 75: BEREKENINGEN MET VERSCHILLENDE CAPACITEITEN.....	94
FIGUUR 76: RESULTATEN IN TABELVORM.....	95
FIGUUR 77: TERUGVERDIENTIJD IN JAREN VAN LITHIUM-ION BATTERIJ .....	95
FIGUUR 78: TOTALE WINST GEDURENDE DE LEVENSDUUR VAN DE LITHIUM-ION BATTERIJ IN EURO .....	96
FIGUUR 79: WINSTEN VAN EERSTE TIEN CAPACITEITEN EN DIE VAN 71 kWh (LITHIUM-ION) .....	96
FIGUUR 80: BATTERIJGEGEVENS REDOX FLOW BATTERIJ.....	97
FIGUUR 81: TERUGVERDIENTIJD IN JAREN VAN REDOX FLOW BATTERIJ .....	97
FIGUUR 82: TOTALE WINST GEDURENDE DE LEVENSDUUR VAN DE REDOX FLOW BATTERIJ IN EURO .....	98
FIGUUR 83: TOTALE WINSTEN VAN DE EERSTE TIEN CAPACITEITEN EN DIE VAN 97 EN 98 kWh (REDOX FLOW).....	99
FIGUUR 84: STIJGING VAN DE PENETRATIEGRAAD .....	100
FIGUUR 85: VERMOGEN OMVORMER IN FUNCTIE VAN NETSPANNING.....	101
FIGUUR 86: SPANNINGSSTIJGING AFHANKELIJK VAN DE AFSTAND TOT DE TRANSFORMATOR .....	102
FIGUUR 87: TRANSFORMATOR MET AUTOMATISCH REGELSYSTEEM.....	103
FIGUUR 88: HET VERBRUIK AFSTEMMEN OP DE OPBRENGST .....	103
FIGUUR 89: WERKELIJKE EN TOEKOMSTIGE GESCHATTE OPBRENGST VAN ZONNE-ENERGIE .....	104
FIGUUR 90: WERKELIJKE EN TOEKOMSTIGE GESCHATTE OPBRENGSTEN VAN KERN-, WIND- EN ZONNE-ENERGIE .....	105
FIGUUR 91: VERGELIJKING VAN BATTERIJCAPACITEIT EN BEREIK VAN ELEKTRISCHE WAGENS .....	107
FIGUUR 92: DOM LADEN OF ONGECOÖRDINEERD LADEN .....	110
FIGUUR 93: CONTROLESTRATEGIE ONGECOÖRDINEERD LADEN .....	110
FIGUUR 94: SLIM LADEN OF GECOÖRDINEERD LADEN MET OPTIMALISATIE ZELFCONSUMPTIE .....	111
FIGUUR 95: CONTROLESTRATEGIE GECOÖRDINEERD LADEN MET OPTIMALISATIE ZELFCONSUMPTIE.....	111

FIGUUR 96: GECOÖRDINEERD LADEN MET OPTIMALISATIE ZC EN PIEKREDUCTIE .....	112
FIGUUR 97: CONTROLESTRATEGIE GECOÖRDINEERD LADEN MET OPTIMALISATIE ZELFCONSUMPTIE EN PIEKREDUCTIE (1) .....	112
FIGUUR 98: CONTROLESTRATEGIE GECOÖRDINEERD LADEN MET OPTIMALISATIE VAN ZELFCONSUMPTIE EN PIEKREDUCTIE (2) .....	113
FIGUUR 99: V2G LADEN MET OPTIMALISATIE ZELFCONSUMPTIE .....	113
FIGUUR 100: CONTROLESTRATEGIE V2G MET OPTIMALISATIE VAN ZELFCONSUMPTIE .....	114
FIGUUR 101: V2G LADEN MET OPTIMALISATIE ZELFCONSUMPTIE EN PIEKREDUCTIE .....	114
FIGUUR 102: CONTROLESTRATEGIE MET OPTIMALISATIE VAN ZELFCONSUMPTIE EN PIEKREDUCTIE .....	115
FIGUUR 103: CONSTRUCTIESTAPPEN VERBRUIK .....	117
FIGUUR 104: STIJGINGSPERCENTAGE VAN ELEKTRISCHE WARMTEPOMPEN T.O.V. 2022 .....	119
FIGUUR 105: TOTALE WERKELIJKE EN TOEKOMSTIG GESCHATTE VERBRUIK IN BELGIË .....	119
FIGUUR 106: EVOLUTIE GEÏNSTALLEERD VERMOGEN BIOMASSA IN BELGIË .....	120
FIGUUR 107: VERGISTEN EN VERBRANDEN VAN BIOMASSA .....	121
FIGUUR 108: EVOLUTIE GEÏNSTALLEERD VERMOGEN FOSSIELE BRANDSTOFFEN IN BELGIË .....	122
FIGUUR 109: WERKING THERMISCHE CENTRALE .....	123
FIGUUR 110: EVOLUTIE GEÏNSTALLEERD VERMOGEN WATERKRACHTCENTRALE .....	124
FIGUUR 111: STUWDAMCENTRALE (LINKSBOVEN), POMPCENTRALE (RECHTSBOVEN), GETIJDENCENTRALE (LINKSONDER) EN RIVIERCENTRALE (RECHTSONDER) .....	125
FIGUUR 112: WERKELIJKE EN TOEKOMSTIG GESCHATTE OPBRENGST VAN BIOMASSA .....	126
FIGUUR 113: WERKELIJKE EN TOEKOMSTIG GESCHATTE OPBRENGST VAN FOSSIELE BRANDSTOFFEN .....	127
FIGUUR 114: WERKELIJKE EN TOEKOMSTIG GESCHATTE ELEKTRICITEITSOPBRENGST DOOR KERN-, WIND-, ZONNE-ENERGIE EN OVERIGE ENERGIEOPWEKKINGEN .....	129
FIGUUR 115: WERKELIJKE EN TOEKOMSTIG GESCHATTE ELEKTRICITEITSOPBRENGST DOOR KERN-, WIND-, ZONNE-ENERGIE EN OVERIGE ENERGIEOPWEKKINGEN T.O.V. HET WERKELIJK EN GESCHATTE ELEKTRICITEITSVERBRUIK .....	136
FIGUUR 116: HET PRINCIPE VAN EEN ENERGIEGEMEENSCHAP .....	142

## 2 Lijst van tabellen

TABEL 1: OPVOLGING VAN DE GETEKENDE KLIMAATAKKOORDEN DOOR BELGIË.....	21
TABEL 2: WETTELIJKE SLUITING (EN SLUITING INDIEN VERLENGING) VAN KERNCENTRALES .....	24
TABEL 3: IMPACT OP DE STRALINGSDOSIS EN WAAR KOMT HET VOOR.....	37
TABEL 4: OPVOLGING VAN DE GETEKENDE KLIMAATAKKOORDEN DOOR NEDERLAND.....	41
TABEL 5: STIJGINGSPERCENTAGE VAN GEÏNSTALLEERD VERMOGEN IN NEDERLAND (2015-2022).....	42
TABEL 6: OPVOLGING VAN DE GETEKENDE KLIMAATAKKOORDEN DOOR FRANKRIJK.....	45
TABEL 7: STIJGINGSPERCENTAGE VAN GEÏNSTALLEERD VERMOGEN IN FRANKRIJK (2015-2022).....	48
TABEL 8: OPVOLGING VAN DE GETEKENDE KLIMAATAKKOORDEN DOOR DUITSLAND.....	50
TABEL 9: STIJGINGSPERCENTAGE VAN GEÏNSTALLEERD VERMOGEN IN DUITSLAND (2015-2022).....	52
TABEL 10: GEBRUIKTE KABELS VOOR TRANSPORT VAN WINDENERGIE OP ZEE.....	64
TABEL 11: VERSCHILLENDE OPSLAGSYSTEMEN VOLGENS OPSLAGDUUR EN TYPE ENERGIE .....	68
TABEL 12: VERSCHILLENDE TYPES BATTERIJEN MET HUN KENMERKEN .....	73
TABEL 13: VERGELIJKING VAN VERSCHILLENDE TYPES THUISBATTERIJEN MET * = LAAG EN ** = HOGER .....	85
TABEL 14: BATTERIJEGEVEENS .....	92
TABEL 15: SAMENVATTING VAN DE BELANGRIJKSTE CONCLUSIES VAN BEIDE BATTERIJEN.....	99
TABEL 16: VERGELIJKING CO <sub>2</sub> -UITSTOOT TUSSEN ELEKTRISCHE WAGEN EN BENZINEWAGEN.....	105
TABEL 17: PRIJSVERGELIJKING ELEKTRISCHE AUTO VS. BENZINEWAGEN .....	107
TABEL 18: SAMENVATTING VAN ENKELE KENMERKEN VAN GEBRUIKTE BRANDSTOFFEN BIJ AUTO'S.....	108
TABEL 19: RESULTATEN VAN DE CASESTUDIE .....	116
TABEL 20: GEVEENS BEREKENING VERBRUIK ELEKTRISCHE VOERTUIGEN.....	117
TABEL 21: WETTELIJKE SLUITING (EN SLUITING INDIEN VERLENGING) VAN KERNCENTRALES.....	135
TABEL 22: VERSCHILLENDE TYPES BATTERIJEN MET ELK HUN SPECIFICATIES EN VOOR- EN NADELEN.....	139



## 3 Inleiding

De voorbije jaren zijn er veel klimaatveranderingen te zien in het nieuws zoals overstromen, aardbevingen, te warm klimaat... Deze klimaatverandering heeft niet alleen een impact op het milieu maar ook op de mens. Dit allemaal heeft geleid om sneller de overstap te maken naar hernieuwbare bronnen om zo de fossiele bronnen weg te werken. België wil daarom tegen 2050 volledig CO<sub>2</sub>-neutraal zijn. Ditzelfde doel hebben ook nog vele andere landen in Europa. Dit onderzoek richt zich op de haalbaarheid van hernieuwbare energie in België en onderzoekt de uitdagingen en mogelijkheden voor een duurzame energietoekomst voor het land. Hierbij wordt met het financieel aspect geen rekening gehouden.

De transmissienetbeheerder Elia heeft dan ook ambitieuze doelstellingen om de uitstoot in België drastisch te verminderen om te voldoen aan de Europese klimaatdoelstellingen. Om deze doelstellingen te bereiken, wordt in België dan ook veel onderzoek gedaan naar de verschillende takken van duurzame energie. Hierbij wordt gekeken of deze bronnen wel technisch en economisch haalbaar zijn. Er zijn echter nog veel uitdagingen en obstakels die moeten worden overwonnen voordat hernieuwbare energiebronnen op grote schaal kunnen worden ingezet in België. Zo zijn er bijvoorbeeld nog steeds vragen over de financiering en de regelgeving van deze projecten, en over de integratie van hernieuwbare energie in het elektriciteitsnetwerk.

Wat is nu juist de relevantie van deze studie? Theoretisch draagt dit onderzoek bij aan de ontwikkeling van kennis over de mogelijkheden en uitdagingen van hernieuwbare energie in België. Het kan onder andere ook bijdragen aan het verbeteren van bepaalde publieke en/of politieke beslissingen en het creëren van een meer duurzame energie-infrastructuur in het land. Praktisch gezien kan het bijdragen aan het ontwikkelen van strategieën voor het stimuleren van hernieuwbare energieprojecten, zoals de financiering en regelgeving ervan. Daarnaast kan de studie ook helpen om de stabiliteit, de betrouwbaarheid en de integratie van groene energie in het energienetwerk te verbeteren. Bovendien kan het onderzoek ook bijdragen aan het vergroten van het bewustzijn van hernieuwbare energie onder de bevolking en de industrie, en het bevorderen van de overgang naar een duurzame en klimaatneutrale samenleving.

In deze scriptie wordt onderzocht als de opgestelde doelstellingen in verband met hernieuwbare energie voldoende zijn om aan de stijgende elektriciteitsvraag te voorzien in de toekomst. Verschillende manieren en oplossingen worden ook teruggegeven om ons land volledig klimaatneutraal te maken.

Om dit te onderzoeken wordt in een eerste hoofdstuk de verschillende bijeenkomsten aangehaald waar landen doelstellingen opstellen om hun broeikasgassen te verminderen. Een tweede hoofdstuk geeft de doelstellingen van België terug die ze in verschillende klimaatverdragen ondertekend hebben. In een derde hoofdstuk worden de verschillende soorten kerncentrales in België besproken en er wordt onderzocht of kerncentrales de toekomst kunnen zijn. Daarnaast zal expliciet berekend worden wat de opbrengst van deze centrales in België hebben naar de toekomst toe. Bij een vierde hoofdstuk worden ook even de doelstellingen i.v.m. de reductie van broeikasgassen van de buurlanden opgesomd. Daarnaast zal hun elektriciteitsproductie en evolutie van broeikasgassen vergeleken worden met die van België en Zweden. In een vijfde hoofdstuk worden verschillende projecten besproken om de windmolenparken in de Noordzee

uit te breiden. Ook wordt dieper ingegaan op het transport en de verschillende stockagemogelijkheden van het overschot van deze elektriciteit. Opnieuw zal een berekening volgen van de opbrengst van deze nieuwe windparken op zee. Het zesde hoofdstuk gaat dieper in op de duurzame energiebron zonne-energie. Hiervan worden verschillende stockagemogelijkheden besproken en wordt gekeken of zonnepanelen en de stockage ervan wel goed voor het milieu is. Een dimensionering van een batterijopslag vervolledigt dit plaatje. Uiteindelijk wordt op basis van gemaakte doelstellingen van Elia en de voorgaande evolutie nog een berekening gedaan over de toekomstige opbrengst van zonnepanelen. Een niet te vergeten hoofdstuk is zeven. Hier wordt gekeken of elektrisch de toekomst is en worden verschillende laadstrategieën besproken die in de toekomst nodig zijn voor het capaciteitsstarief. Een berekening van het verbruik van het toenemend aantal elektrische voertuigen en warmtepompen sluit dit hoofdstuk af. In een laatste hoofdstuk worden de overige energieopwekkingen in België besproken. Ook hiervan wordt op basis van gemaakte doelstellingen de totale toekomstige opbrengst van deze energieopwekkingen berekend. Om af te ronden worden alle resultaten kort nabesproken in de conclusie.

## 4 Klimaatverdrag

Het doel van een klimaatverdrag is om de uitstoot van broeikasgassen te reduceren en zo ongewenste gevolgen van de klimaatverandering te voorkomen. Doordat niet alle landen alle verdragen hebben ondertekend, bestaan er verschillende bijeenkomsten:

- Conference of the Parties (COP): partijen die het verdrag van 1992 (VN-klimaatverdrag) ondertekend hebben
- Meeting of the Parties to the Kyoto Protocol (CMP of MOP): partijen die het Kyoto-Protocol ondertekend hebben
- Parties to the Paris Agreement (CMA): partijen die zijn toegetreden tot het Akkoord van Parijs

### 4.1 Het VN-klimaatverdrag

De belangrijkste bijeenkomst van de internationale klimaatonderhandelingen is de COP. Het VN-klimaatverdrag van 1992 moest zorgen voor een stabilisering van de concentraties van broeikasgassen in de atmosfeer, zodat gevaarlijke antropogene verstoring van het klimaatsysteem voorkomen wordt. Dit verdrag biedt alleen nog maar een algemeen kader om de emissies van de industrielanden in 2000 tot het niveau van 1990 terug te brengen. Hoe ze dit moeten doen, wordt niet duidelijk aangehaald. Dit verdrag zal de klimaatverandering duidelijk nog niet tegengaan. Ook België ondertekende dit verdrag.

### 4.2 Het protocol van Kyoto

De daaropvolgende belangrijkste vergadering was COP3 of het Kyoto-protocol van 1997. Hier zijn industrielanden overeengekomen om de uitstoot van hun broeikasgassen van o.a. CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O en nog een aantal fluorverbindingen met gemiddeld 5,2% te verminderen tegen 2012 ten opzichte van in 1990. Dit reductiepercentage hangt af van wat de economische kracht van het land is. De VS moest bijvoorbeeld 7% reduceren en Japan 6%. België ondertekende dit protocol al in 1998 en moest 7,5% aan uitstoot van broeikasgassen reduceren. Maar door de houding van de VS en de late ratificatie (bekrachtigen van een internationaal verdrag) van Rusland duurde het tot 2005 vooraleer dit in werking trad. Toen waren wetenschappers al van mening dat deze doelstelling nog altijd onvoldoende was en spraken ze al van een volgend Kyoto-protocol.

Bij het tweede Kyoto-protocol engageerden 37 industrielanden, waaronder ook België zich om hun uitstoot met 18% te verminderen (t.o.v. 1990) tegen 2020. Toch wilden sommige industrielanden met een belangrijke uitstoot zoals Canada, Japan en Rusland geen nieuwe engagementen aangaan. De landen die wel akkoord gingen met het tweede Kyoto-protocol vertegenwoordigen maar 15% van de globale uitstoot van broeikasgassen. De ratificatie van deze periode is nog steeds niet in werking getreden en verloopt heel moeizaam.

## 4.3 Overeenkomst van Parijs

De conferentie in Parijs in 2015 (COP21) verliep heel vlot en was zeer ambitieus. De belangrijkste punten in dit akkoord zijn:

- De temperatuurstijging ruim onder de 2°C t.o.v. de pré-industriële periode
- De transitie maken naar een koolstofarme maatschappij
- De capaciteit van landen verhogen om zich aan te passen aan klimaatopwarming
- Van rijke landen wordt verwacht dat ze ontwikkelingslanden financieel steunen bij het terugbrengen van hun eigen uitstoot.

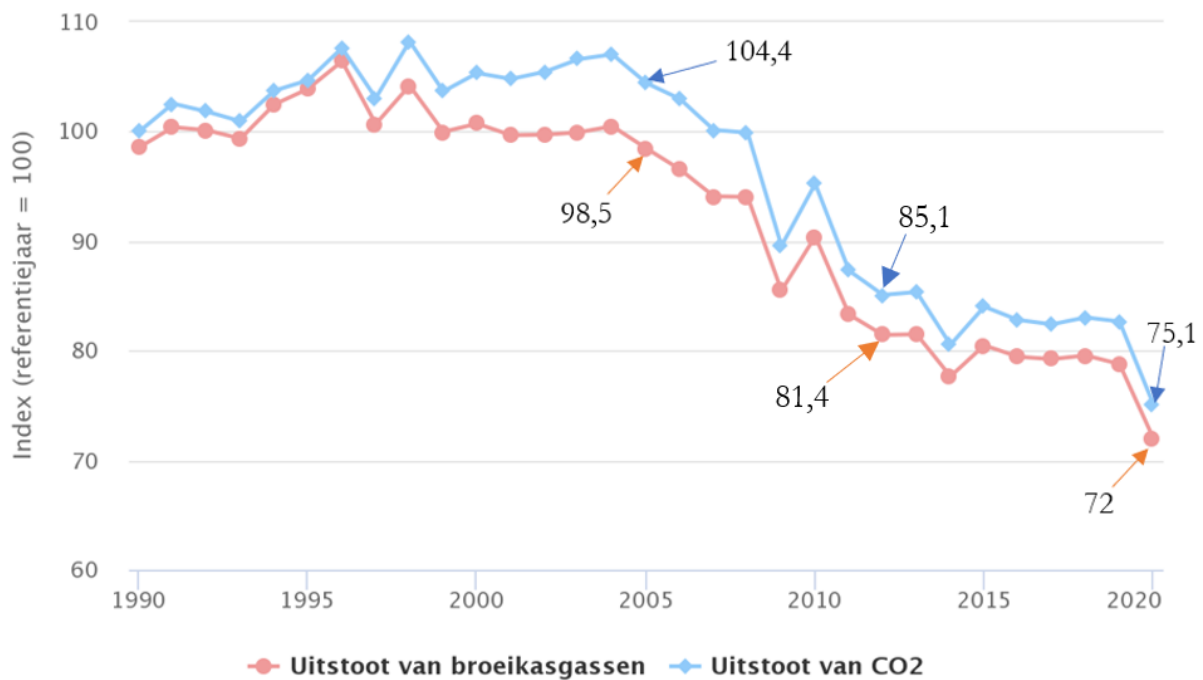
Concreet betekent dit een vermindering van 80 tot 95% van de uitstoot van broeikasgassen t.o.v. 1990 en dit tegen 2050. Dit betekent dus dat de energie bijna volledig duurzaam moet opgewekt worden.

Dit was dan ook de basis van de toekomstige akkoorden, omdat dit het eerste rechtvaardige akkoord is, omdat zowel van de ontwikkelde landen als de ontwikkelingslanden en groei landen inspanningen worden gevraagd. Het jaar nadien trad dit akkoord al in werking.

Nu wil de EU zijn leiderschap tonen en wil een reductiedoelstelling van 40% tegen 2030 (t.o.v. 1990). Ze wil zelfs het eerste klimaatneutrale continent worden tegen 2050. België kreeg een doelstelling van -35% tegen 2030 (t.o.v. 2005).

(klimaat.be, 2019)

## 5 Broeikasgassen in België



Figuur 1: de evolutie van de uitstoot van broeikasgassen en CO<sub>2</sub> in België

(klimaat.be, 2019)

Op Figuur 1 zien we vanaf 2005 een duidelijke daling van de broeikasgassen en CO<sub>2</sub>-uitstoot in België. Dit was dan ook het jaar waarin het protocol van Kyoto I in werking trad. Hierbij wordt gerekend t.o.v. het referentiejaar 1990 met een referentieniveau 100. In 1990 was de uitstoot van broeikasgassen iets meer dan 140 Mton CO<sub>2</sub>-eq<sup>1</sup>. Tussen 2019 en 2020 is er voor de CO<sub>2</sub>-uitstoot een afname van maar liefst 7,6%. Voor de uitstoot van broeikasgassen in deze periode is er een afname van 6,8%. De COVID-crisis zorgt voor zowel de sterke afnamen in de broeikasgassen als die in CO<sub>2</sub>-uitstoot. De CO<sub>2</sub> staat ook nauw verbonden met het energieverbruik dat beïnvloed wordt door de weersomstandigheden.

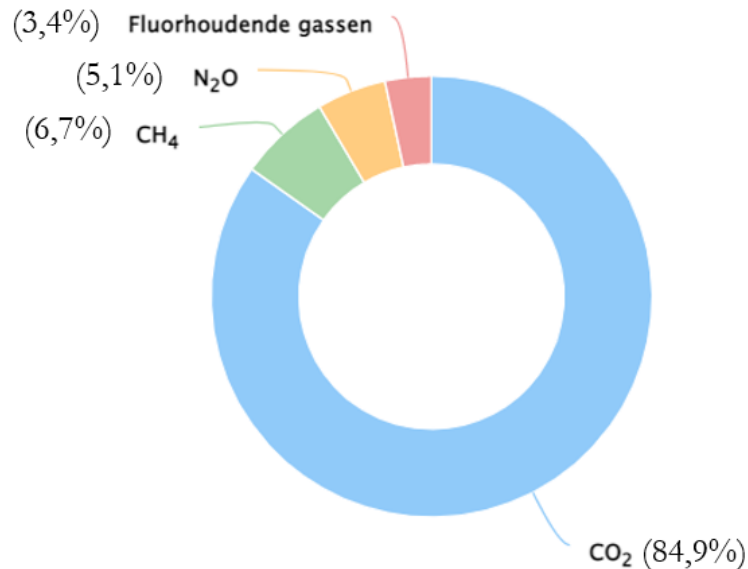
Tabel 1: Opmvolging van de getekende klimaatakkoorden door België

Doel reductie (broeikasgassen)	Ten opzichte van welk jaar	Tegen welk jaar moet het bereikt zijn	Werkelijke reductie aan broeikasgassen	Werkelijke reductie aan CO <sub>2</sub>
<b>7,5% (Kyoto I)</b>	1990	2012	18,6%	14,9%
<b>18% (Kyoto II)</b>	1990	2020	28%	24,9%
<b>35% (Parijs)</b>	2005	2030	...	...

<sup>1</sup> Koolstofdioxide-equivalent is een maat om aan te geven hoeveel een gegeven hoeveelheid broeikasgas bijdraagt aan de opwarming van de aarde. Het aardopwarmingsvermogen (GWP=global warming potential) voor methaan over 100 jaar is bijvoorbeeld 21.

In Tabel 1 is duidelijk te zien dat België zijn ondertekende klimaatakkoorden al heeft bereikt. Nu is het nog wachten op de werkelijke resultaten van 2030. Al wil Vlaanderen streven naar 100% hernieuwbare energie tegen 2050.

Het meest voorkomende broeikasgas in België is koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>). Op Figuur 2 is te zien hoeveel elk broeikasgas vertegenwoordigt van de totale uitstoot. Elk van deze gassen kent een daling t.o.v. 1990.



Figuur 2: Verdeling van de verschillende gassen in het jaar 2020 (verklaring van 2022)

(klimaat.be, 2019)

Welke sectoren zorgen nu juist voor deze uitstoten? Op kop staat de opwekking van energie in de industrie. In de industrie is er enorm veel energie nodig, in de vorm van onder andere warmte of elektriciteit. Nu zijn er al heel wat technologische verbeteringen ingevoerd, waardoor de uitstoot enorm is verminderd. Deze verbeteringen zullen na verloop van tijd toch moeten vervangen worden door duurzame energiebronnen. Daarnaast komen er nog heel wat uitstoten door de verbranding in de industrie. In de ijzer- en staalindustrie wordt bijvoorbeeld veel overgestapt op elektrische ovens wat de uitstoot in de industrie aanzienlijk vermindert.

Natuurlijk is er nog het bekende wegvervoer, waarvan de uitstoten alleen maar blijven stijgen. Het aantal voertuigen kent een toename van 66% sinds 1990. In de loop der jaren zijn er al heel wat verbeteringen i.v.m. de emissies van motoren en hun rendementen uitgevoerd. Een voorbeeld daarbij is o.a. de uitlaatgassen laten vermengen met AdBlue. Daarnaast zal de opkomst van de elektrische wagens ook zorgen voor een verder dalende trend van de CO<sub>2</sub>-uitstoten. Deze elektriciteit moet dan wel duurzaam opgewekt zijn.

Ook komen er steeds meer gebouwen te staan en dus steeds meer brandstofverbruik. In de winter al wat meer dan in de zomer. In 2020 was er toch een serieuze daling in het verbruik merkbaar. Dit kan te wijten zijn aan de hoge energieprijzen en de warme winter in dat jaar. Om de doelstellingen van 2050 te halen lanceerde de Vlaamse regering het Renovatiepact met als doel gebouwen te renoveren en minder nieuwe gebouwen te plaatsen. Ook is er voor nieuwbouw vanaf 1/1/2014 of vanaf 1/3/2017 voor energetische renovaties een minimumaandeel aan

hernieuwbare energie opgelegd. Er kan op verschillende manieren hieraan voldaan worden. De keuze kan gemaakt worden tussen volgende maatregelen: een zonneboiler; een PV-installatie; een ketel, kachel of WKK op biobrandstof; een warmtepomp; een warmteboiler; stadsverwarming en -koeling of participatie in een project voor productie van hernieuwbare energie.

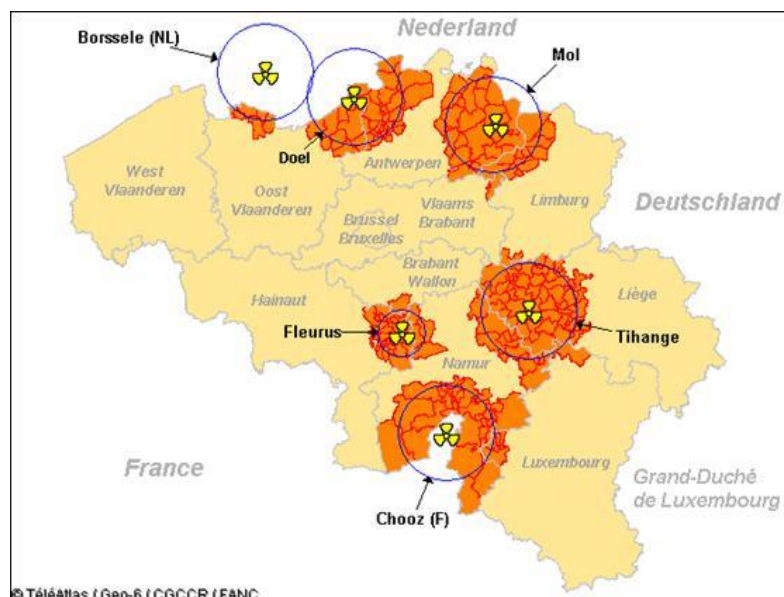
(Bouwen en verbouwen)  
(klimaat.be, 2019)

## 6 De huidige kerncentrales

Volgens een nieuw VN-rapport (2022) is koolstofneutraliteit tegen 2050 nog steeds mogelijk. Daarvoor moet de uitstoot van fossiel sneller afgebouwd worden en zijn er onder andere massale investeringen in kernenergie nodig. De meningen over kernenergie zijn verdeeld. Velen zien namelijk een groot gevaar in kerncentrales. Kernenergie is nochtans een essentiële koolstofarme elektriciteits- en warmtebron die bijdraagt tot koolstofneutraliteit. Om een mogelijke klimaatramp in de toekomst te voorkomen moet snel de overstap gemaakt worden naar CO<sub>2</sub>-arme oplossingen, inclusief het gebruik van kernenergie.

### Belgische kerncentrales

België telt momenteel zeven kerncentrales (PWR), vier centrales in Doel en drie in Tihange. Samen zijn ze goed voor een vermogen van ongeveer 6.000 MW. Deze centrales zorgen voor de ruime helft van de elektriciteitsproductie in België. Daarnaast zijn er nog het Studiecetrum voor Kernenergie en Belgoprocess in Mol-Dessel en het Nationaal Instituut voor Radio-elementen in Fleurus. In Figuur 3 is te zien welke gebieden getroffen zullen worden als zich een ramp voordoet met een bepaalde centrale.



Figuur 3: Ernstig getroffen gebieden bij ramp

In Tabel 2 zijn de voorlopig wettelijke sluitingen te zien van de verschillende centrales in België. De wettelijke sluiting van de centrales is al eerder verlengd geweest omwille van het veiligstellen van de bevoorradingszekerheid. Doordat ze ruim de helft van onze elektriciteitsproductie voorzien, zal de sluiting van de laatste centrale een enorme verandering teweegbrengen. Ze wekken i.t.t. de hernieuwbare energiebronnen (vb. zon- en windenergie) ook 's nachts energie op. Dit zorgde namelijk voor het lagere nachttarief. Tot eind 2022 zou de laatste kerncentrale al in 2025 sluiten. Er zou dan een tekort aan bevoorrading zijn in de volgende twee winters, dus heeft de regering in januari in 2023 samen met Engie beslist om twee centrales tien jaar langer open te houden.

Tabel 2: Wettelijke sluiting (en sluiting indien verlenging) van kerncentrales

	Vermogen [MWe]	Inbedrijfstelling	Wettelijke sluiting
<b>DOEL 1</b>	445	15/02/1975	15/02/2025 (of 15/02/2027)
<b>DOEL 2</b>	433	01/12/1975	01/12/2025 (of 01/12/2027)
<b>DOEL 3</b>	1006	01/10/1982	23/09/2022
<b>DOEL 4</b>	1039	01/07/1985	01/07/2035
<b>TIHANGE 1</b>	962	01/10/1975	01/10/2025 (of 01/10/2027)
<b>TIHANGE 2</b>	1008	01/06/1983	01/02/2023
<b>TIHANGE 3</b>	1038	01/09/1985	01/09/2035

Door de sluiting van de laatste centrale, zal dan waarschijnlijk nog elektriciteit moeten geïmporteerd worden uit het buitenland. Uit Frankrijk zal dit voornamelijk afkomstig zijn van kerncentrales, uit Nederland van gas en import uit Duitsland is dan van bruinkool en steenkool. Het probleem is dat België dan vooral 's nachts een energietekort heeft en overdag niet, omdat er dan zon en wind is. Onze buurlanden hebben namelijk hetzelfde probleem, waardoor hun overschot 's nachts maar beperkt zal zijn en zij kennen overdag ook een overproductie door de zon en wind. Stel nu dat er 's nachts een overschot is bij de buurlanden, is de kans nog klein dat het hernieuwbare energie is.

Andere landen in Europa en erbuiten beslisten om hun kerncentrales langer dan 40 jaar open te houden. Alle onderdelen kunnen worden vervangen, met uitzondering van het reactorvat om de levensduur ervan te verlengen. In België werd in januari beslist om de jongste centrales nog tien jaar langer open te houden. Daarvoor zijn nog aanpassingen nodig en zullen de centrales waarschijnlijk stil liggen tussen 2025 en eind november 2026. Om de winters van 2023 en 2024 nog te bevoorraden blijven ze dan nog in gebruik. Het probleem zit hem dan in de winters van 2025-2026 en 2026-2027. Daarvoor heeft de regering de vraag ingediend bij Engie om ook de sluiting van de oudste centrales Doel 1, Doel 2 en Tihange 1 voor twee winters uit te stellen.

(nucleair FORUM, 2022)

(Kerncentrales in België, 2022)

(Kempeneers, 2011)

(Federale regering wil ook oudste kerncentrales enkele winters langer openhouden, 2023)

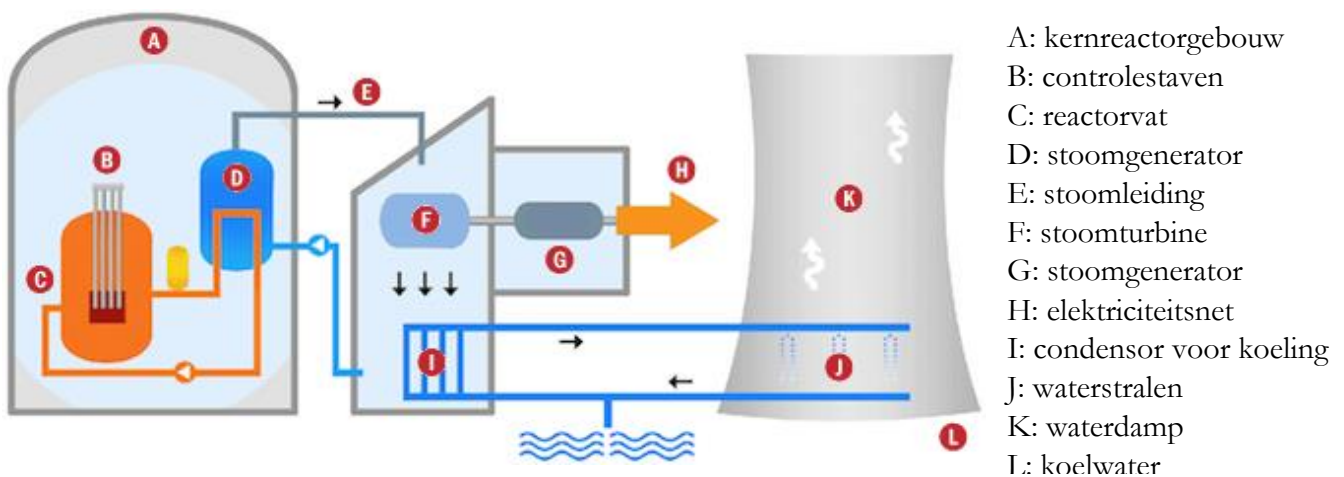


## Soorten reactoren

Er bestaan veel verschillende soorten kernreactoren die in een kerncentrale gebruikt kunnen worden. Doordat er in België enkel drukwaterreactoren aanwezig zijn, zullen eerst deze besproken worden. Daarna zullen de reactoren, waarvan de ontwikkeling op dit moment het verst gevorderd is besproken worden. Deze reactoren zijn nog veiliger en verminderen de afvalproductie aanzienlijk.

### Drukwaterreactor (PWR)

In Figuur 4 zijn de elementen aangeduid die nodig zijn in een kerncentrale met een hogedrukreactor. Hierbij wordt meestal water gebruikt als moderator. Deze heeft als taak neutronen te vertragen, zodat deze langer in de buurt van een uraniumkern zullen blijven. Zo zullen ze sneller geabsorbeerd worden door een uraniumkern en een splijting veroorzaken. Een te efficiënte splijting kan dan weer leiden tot een nucleaire explosie. Via controlestaven kan de geproduceerde energie gecontroleerd worden. Hoe dieper de staven, hoe minder energie er vrijkomt en dus hoe minder snel het water opwarmt. Als dat water onder hoge druk (155 bar) in het reactorvat binnenkomt, warmt het op en gaat het naar de stoomgenerator. Dit gebeurt onder hoge druk, zodat er geen dampbellen rond de splijtstofelementen gevormd worden. Dit zou de warmteoverdracht en de taak van het water als moderator negatief beïnvloeden. Het water uit de secundaire kring stroomt op lage druk, zodat het makkelijker gaat koken en neemt de warmte op in de stoomgenerator. Deze stoom drijft de turbine aan en zo wordt elektriciteit opgewekt. Voordat de stoom terug naar de stoomgenerator gaat, wordt deze eerst nog afgekoeld door een condensor. Dit is om het verschil tussen begin- en eindtemperatuur zo groot mogelijk te maken, dit verhoogt namelijk het rendement.



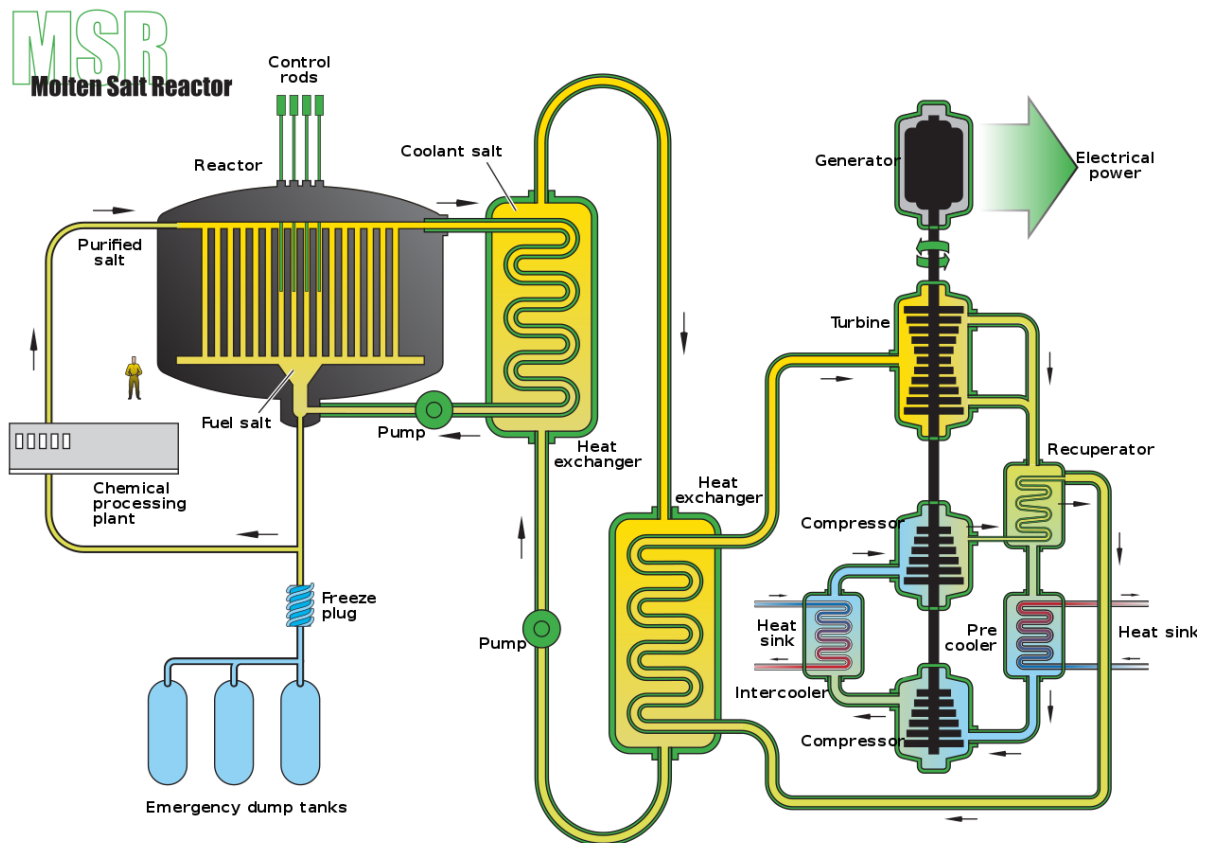
Figuur 4: Werking kerncentrale met drukwaterreactor

(Nuclear reactors, 2020)

	voor		na 4 jaar is splijtstof uitgewerkt	
Verloop van de kernsplijting:	4% $U_{235}$	⇒ splijting	1% Plutonium	} gerecycled tot nieuwe splijtstof
	96% $U_{238}$		1% $U_{235}$	
			93% $U_{238}$	
			5% afval warmte	

### Thoriumreactor (of gesmolten zoutreactor, MSR)

Buiten uranium- en plutonium is ook thorium een interessante grondstof om kernenergie uit op te wekken. Thorium werd nooit eerder gebruikt, omdat er bij de reactie geen plutonium vrijkomt dat geschikt is om kernwapens mee te maken. Dit zou bijdragen aan de overeenkomst die de regeringen wereldwijd hebben ondertekend, waarin staat om hun voorraad aan kernwapens terug te dringen. De eerste thoriumreactor zal binnenkort openen bij de stad Wuwei in China.



Figuur 5: Werking van kerncentrale met thoriumreactor

(Gesmoltenzoutreactor, 2022)

De werking van een kerncentrale met een thoriumreactor verloopt op dezelfde manier als deze met een drukwaterreactor. Toch zijn er enkele verschillen i.v.m. de splijtingsreactie. Thorium zelf is niet splijtbaar en dus niet direct als splijtstof te gebruiken in een kernreactor. Het kan echter wel door bestraling met neutronen omgezet worden in het splijtbare uranium-233.

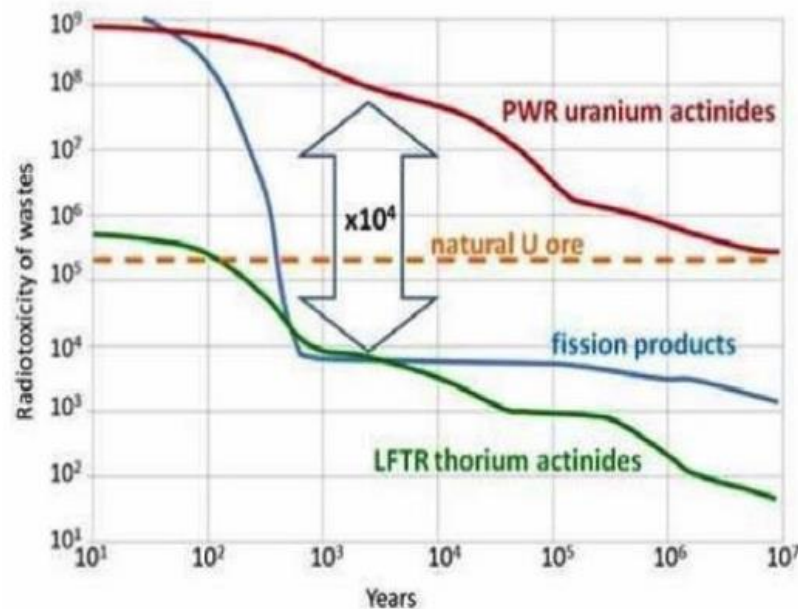
In de reactor bevindt zich het gesmolten zout (bevat uranium-fluoride of plutonium-chloride) dat

wordt opgewarmd door splijtingsreacties. Het hete zout gaat vervolgens door een warmtewisselaar en geeft daar zijn warmte af aan een tweede zout-circuit. Dit zout kan dan via een tweede warmtewisselaar stoom maken en zo de turbines aandrijven. Het zout neemt hier eigenlijk de functie van zowel de splijtstofstaven als van het water over.

De 'Freeze plug' is een prop gestold zout die continu gekoeld wordt. Als de elektriciteit uitvalt (zoals in Fukushima) of de temperatuur van het zout te hoog oploopt, smelt deze prop door. Dan komt het zout in de opslagtanks, zo kan de reactorkern niet smelten (geen meltdown mogelijk). Een oorzaak van het ongeval in Fukushima was dat de elektriciteit uitviel en dat de reactorkern niet meer gekoeld werd door de koelpompen, waardoor meltdown ontstond.

Een verschil met de PWR-centrales is dat de druk van het gesmolten zout gelijk is aan de buitendruk. De druk binnen de reactor staat dus niet onder hoge druk. Dit vergroot de veiligheid.

In Figuur 6 wordt het schadelijk effect van de vrijkomende straling uitgezet tegen de bewaartijd van het afval. Ter vergelijking is in de figuur ook de radiotoxiteit van het oorspronkelijke erts weergegeven. Het oorspronkelijke erts vormt geen risico voor mens of dier.



Figuur 6: De radiotoxiteit in functie van de bewaartijd van het afval

(Greaves)

Wanneer de toxiciteit van het kernafval vervalt onder de waarde van het oorspronkelijke erts, vormt het geen risico meer voor de omgeving. Dan kan je besluiten dat het thoriumafval slechts 300 jaar gevaarlijke straling afgeeft. Dat betekent dat dat afval veel korter moet bewaard worden dan het afval bij PWR-centrales.

Een ander belangrijk voordeel is dat er steeds een deel van het gesmolten zout kan afgetapt worden. De splijtingsproducten kunnen dus continu uit het zout gehaald worden via chemische processen om zo de afvalstoffen te verwijderen en nieuwe brandstof (thorium) toe te voegen. Zo moeten de splijtstoffen niet steeds gewisseld worden.

## Kleine kernreactoren (SMR's)

Small modular reactors zijn minireactoren in de vorm van modules. Hun vermogen ligt niet hoger dan 300 MW, terwijl die van de klassieke centrales meer dan 1000 MW kunnen halen. De grote voordelen zijn dat ze goedkoop, klein en dus weinig onderhoud nodig hebben en een maximale flexibiliteit bieden om zich aan de elektriciteitsbehoefte aan te passen. Daarnaast kunnen ze niet alleen elektriciteit opwekken, maar ook warmte en waterstof. Doordat ze zo klein zijn, hebben ze ook veel minder onderdelen. Hierdoor neemt de veiligheid toe. Ze kunnen dieselgeneratoren vervangen op plaatsen die niet over een elektriciteitsnet beschikken. SMR-concepten omvatten thermische neutronenreactoren en snelle neutronenreactoren, beide gebruiken ook kernsplijting om warmte of straling te produceren.

Thermische neutronenreactoren gebruiken een moderator om de neutronen te vertragen. De meest voorkomende moderators in thermische reactoren zijn licht water ( $\text{H}_2\text{O}$ ), zwaar water ( $\text{D}_2\text{O}$ ) en koolstofdioxide ( $\text{CO}_2$ ). De splijtstof die daarbij gebruikt wordt is  $\text{U}_{235}$ . Opnieuw zal het water door de splijtingsreactie opgewarmd worden om zo via warmtewisselaars stoom te produceren en een turbine aan te drijven.

Bij een snelle neutronenreactor is geen moderator nodig, daar is  $\text{Pu}_{239}$  de splijtstof. Deze kan beter snelle neutronen absorberen. Toch is de kans op splijting relatief lager dan bij een thermische reactor, waardoor de kern verrijkt moet worden met splijtstoffen. De snelle neutronen zorgen voor meer kinetische energie en dus meer warmte. Als alle neutronen zouden kunnen geabsorbeerd worden, zou dit ideaal zijn, maar praktisch is dit niet haalbaar. De werking ervan wordt afgebeeld in Figuur 7 en komt goed overeen met deze van de klassieke kerncentrale. Tot nu toe gebruiken alle commerciële reactoren die gebouwd zijn natrium als koelmiddel. De redenen daarvoor zijn:

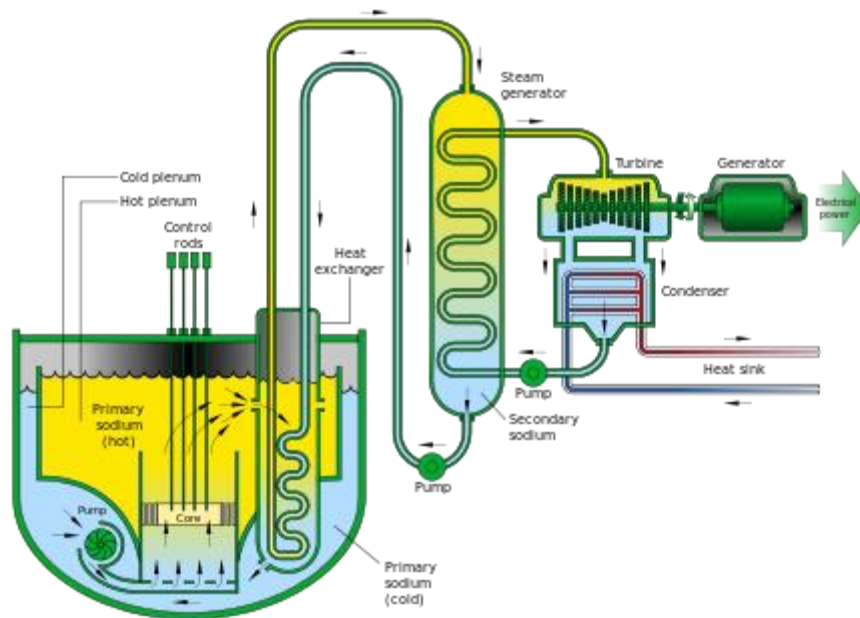
- Het kookpunt van natrium ( $883^\circ\text{C}$  bij 1 atm.) ligt veel hoger dan dat van water ( $100^\circ\text{C}$  bij 1 atm.). Doordat deze van water zo dicht bij de bedrijfstemperatuur ( $320^\circ\text{C}$ ) ligt, moet het onder hoge druk staan, zodat geen dampbellen ontstaan. Dit beïnvloedt de warmteoverdracht namelijk in negatieve zin.
- Doordat de thermische geleidbaarheid van water ( $0,6 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) lager is dan die van natrium ( $141 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) fungeert water als moderator en vertraagt het de neutronen.
- De atoommassa van natrium (23) is groter dan die van waterstof (1) en zuurstof (16) in water, waardoor neutronen meer energie verliezen door botsingen met waterstof en zuurstof. Natrium remt de neutronen dus minder af.
- De soortelijke warmtecapaciteit van natrium is  $1.230 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  en deze van water is  $4.180 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ . Dit betekent dat natrium sneller kan afkoelen en dus de reactor beschermt tegen oververhitting.
- Natrium zal niet corroderen met het staal van de reactor.

Een groot voordeel van reactoren met snelle neutronen is dat ze al hun brandstof kunnen gebruiken en dus veel meer energie kunnen halen uit een hoeveelheid brandstof. Hierdoor is de hoeveelheid afval ook veel minder. De levensduur van het afval is ook aanzienlijk verminderd.

Daarnaast zal in de toekomst de voorkeur naar deze centrales gaan, omdat ze snel gebouwd en opgestart kunnen worden. Dit helpt o.a. om de kosten te verlagen en de bouwtijd te verkorten in vergelijking met andere centrales. Bovendien kunnen er bij zo'n centrales meer geavanceerde

veiligheidstechnologieën gebruikt worden om ongelukken te voorkomen of gevolgen ervan te beperken.

Een nadeel is dat natrium heftig kan exploderen als het in contact komt met water. De breuk van de stoomgenerator zou een gevaarlijk scenario kunnen zijn. Doordat natrium vast is bij kamertemperatuur moeten alle buizen en warmtewisselaars verwarmd worden voordat een nucleaire operatie kan starten.



Figuur 7: Snelle neutronenreactor met natrium als koelmiddel

(Kloosterman)

China wil een grote speler worden op het gebied van kernenergie. De bouw van de eerste SMR in de stad Shandong werd in 2022 afgerond en deze werd dan ook op het net aangesloten. Wereldwijd is dit de eerste SMR die commercieel gebruikt wordt.

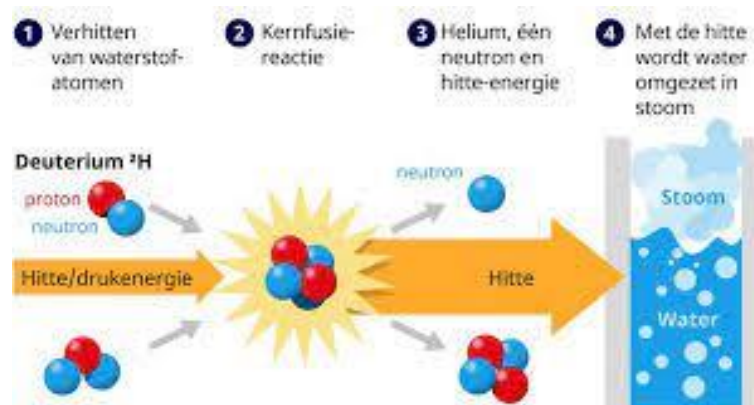
Daarnaast heeft Rusland ook een in werking (AK-100), maar deze levert enkel stroom aan het noordwesten van Rusland. Ook in de Verenigde staten zijn er plannen om SMR's te bouwen en te testen. Dit zijn dan centrales die werken met dezelfde technologie als PWR-centrales. Het Amerikaanse bedrijf NuScale Power uit Oregon werkt samen met de Belgische onderzoeksinstituut SCK-CEN om de mogelijkheid te onderzoeken SMR's in België te plaatsen.

## Kernfusie

Kernfusie is het samensmelten van de kernen van twee waterstofatomen (licht element) om zo onbeperkte energie te produceren. Bij het samensmelten van zwaardere elementen zoals ijzer kost de reactie juist energie. Het samensmelten van een deuterium (waterstof met een neutron en een positron) met een tritium (waterstof met twee neutronen en een positron) vormt een heliummolecuul, een neutron en energie. Deze samensmelting gebeurt natuurlijk niet vanzelf. Dit moet onder heel hoge temperatuur gebeuren, het moet wel honderden miljoenen graden zijn. De deeltjes bewegen dan heel snel, waardoor de kernen kunnen fuseren. Als iets verwarmd wordt,

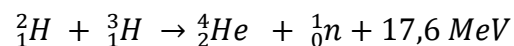
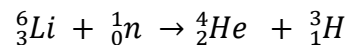
zet het uit en dus wordt de dichtheid lager. De kans dat ze elkaar dan tegenkomen is kleiner. Daarom moet ook de druk heel hoog zijn. Om de atomen zo heet te krijgen dat ze plasma vormen, wordt er een elektrische stroom door het gas gestuurd of worden ze bestraald met microgolfstraling. Er bestaat geen materiaal dat bestand is tegen deze temperaturen. Daarom wordt dit plasma door een magnetisch veld op zijn plaats gehouden. Zo komt het niet in contact met de wand van de reactor en kan er geen meltdown optreden.

Kernfusie is een schone manier van energie opwekken, er komen namelijk geen broeikasgassen en weinig radioactief afval vrij. Alleen de reactorwand wordt radioactief door het vrijkomen van neutronen. Dit is dan zelfs geen langdurig radioactief afval. Daarnaast kan kernfusie gezien worden als duurzame energiebron, omdat de grondstoffen die daarvoor nodig zijn nog voor miljoenen jaren voorradig zijn. Dit zijn namelijk waterstof en lithium. Lithium is nodig om tritium te kweken.



Figuur 8: De fusiereactie

(Wetenschappers wekken recordhoeveelheid energie op met kernfusie, 2022)



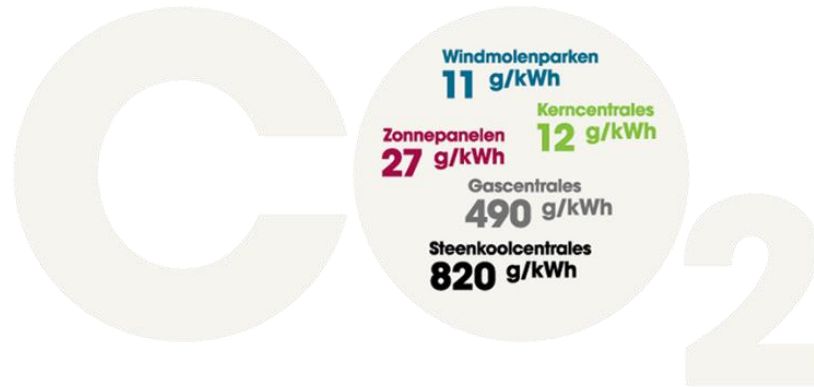
Een groot nadeel is dat er heel veel energie nodig is om de druk en temperatuur zo hoog te houden. Deze is zelfs hoger dan wat het opbrengt. Dit kan deels opgelost worden door de machine te vergroten, zo wordt bij eenzelfde temperatuur en druk meer energie geleverd.

Wie vandaag de dag aan kernfusie denkt, moet de link leggen met ITER. Dit is een demonstratiemodel op grote schaal, waarvan de bouw in 2010 in het Zuid-Franse Cadarache is begonnen. Eind 2017 werd aangekondigd dat 50% van alle activiteiten die nodig zijn om het eerste plasma te produceren, zijn uitgevoerd. Voorlopig staat gepland dat het model klaar moet zijn in 2035. Een van de belangrijkste doelstellingen hierbij is om aan te tonen dat de fusiereacties geen impact hebben op de bevolking en het milieu en dat fusie ook op aarde als energiebron kan gebruikt worden.

## Algemene voor- en nadelen kernenergie

### Voordelen

- CO<sub>2</sub>-uitstoot is vergelijkbaar met die van hernieuwbare energie.



Figuur 9: CO<sub>2</sub>-uitstoot van verschillende energiebronnen

(nucleair FORUM, 2022)

- Geen hoeveelheid SO<sub>2</sub>- of NO<sub>x</sub>-uitstoot die schadelijk is voor het leefmilieu of klimaat.
- Kernenergie is zeer zuinige energie. Steenkool wekt bijvoorbeeld maar 3 kWh/kg steenkool op en één kilogram uranium wekt 40 000 kWh energie op. Bij kernfusie kan 1 kg kernfusie materiaal evenveel energie opwekken als 10 miljoen kg steenkool. Dat betekent dat kernfusie tot wel 10 miljoen keer meer energie kan opwekken bij eenzelfde hoeveelheid materiaal.
- Uranium gaat niet zoals zon en wind oneindig lang meegaan, maar er zit nog meer dan genoeg uranium in de aardbodem. Dit heeft als gevolg dat uranium ook goedkoop is. Thorium is nog meer dan uranium aanwezig in de aardbodem. Voor kernfusie wordt waterstof en lithium gebruikt en deze zijn nog voor miljoenen jaren voorradig.
- Een kerncentrale gaat heel lang mee, want doorheen de jaren kunnen de onderdelen elk apart vervangen worden. Enkel het reactorvat kan niet vervangen worden. Er wordt hier wel gesproken van 60 tot 80 jaar.
- Een kerncentrale is een grote zekerheid op constante bevoorrading, zelfs 's nachts.
- Doordat de gevolgen van een ongeluk zo nefast kunnen zijn, wordt er op alle mogelijke manier rekening gehouden met veiligheid. Het gebouw is vb. beveiligd tegen vliegtuigcrashes, aardbevingen, ...
- Een kerncentrale produceert relatief weinig afval. Er wordt geprobeerd om dit radioactief afval zoveel mogelijk af te breken.
- Eenmaal een kerncentrale is gebouwd, heeft het relatief lage operationele kosten in vergelijking met andere energiebronnen. Dit komt door de lange levensduur en de lage brandstofkost.

## Nadelen

- De gevolgen van een nucleair incident kunnen groot zijn. Zoals bij de kernrampen van Tjernobyl en Fukushima, waarvan de gevolgen nog steeds voelbaar zijn. Alles wordt eraan gedaan om het risico op een ongeluk tot het minimum te beperken.
- De straling van het radioactief afval is zeer schadelijk voor levende organismen.
- Net zoals bij alle ertsen is ook uraniumwinning en -verwerking (of thorium) zeer belastend voor het leefmilieu.
- Grond, water en lucht zijn vervuild met radioactieve straling
- Verouderd radioactief materiaal uit de mijnen wordt doorverkocht en geraakt o.a. in de woningen van mensen

(Nuclear reactors, 2020)

(Alles over kerncentrales, kernenergie en nucleaire energie!, 2022)

(nucleair FORUM, 2022)

(Rohde, 2021)

(Kernfusie, 2022)

## Kernafval

Er bestaan verschillende soorten kernafval die in meerdere of mindere mate radioactief zijn. Radioactief materiaal kan uit kerncentrales komen, maar ook uit ziekenhuizen, researchcentra en universiteiten. De kernbrandstof, het vervangen van onderdelen in een kerncentrale, veiligheidsbrillen en -schoenen, spuitnaalden, filters... zijn allemaal radioactief.

### Classificatie

Classificatie van dit afval is nodig, zodat het transport, de opslag en de behandeling ervan op een manier gebeurt die bescherming biedt voor het milieu en de menselijke gezondheid. Deze indeling gebeurt op basis van de soort straling, de hoeveelheid en hoelang de stof radioactief blijft. De soorten straling kunnen laagactief, middelactief of hoogactief zijn en elke straling heeft ook een levensduur, nl. kortlevend of langlevend<sup>2</sup>. Op Figuur 10 zijn de drie categorieën te zien van afvalstoffen die in België gehanteerd worden. Daarbij omvatten het laag- en middelactief afval meer dan 95% van het volume, maar minder dan 10% van de radioactiviteit.

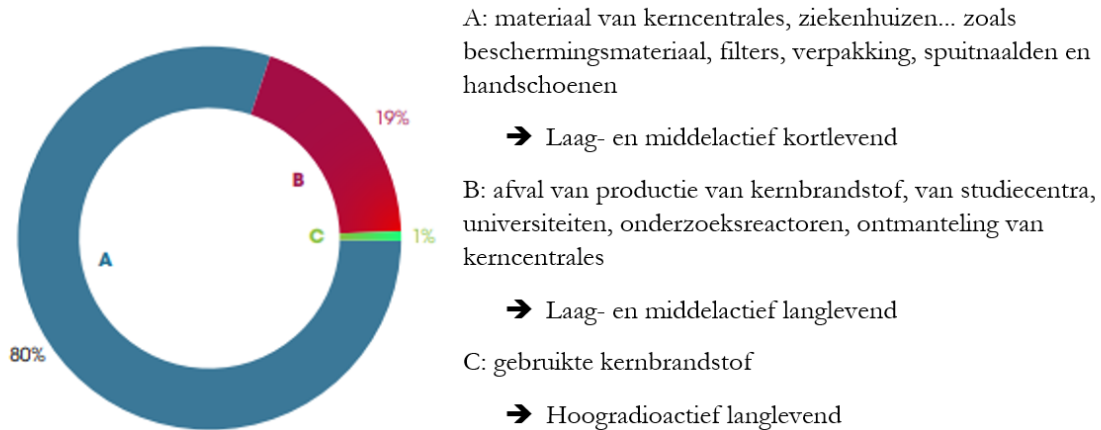
---

<sup>2</sup> Kortlevend: halveringsperiode van het afval is minder dan 30 jaar

Langlevend: halveringsperiode van het afval is meer dan 30 jaar

Halveringsperiode: de tijd waarin de helft van de oorspronkelijke radioactiviteit verval





Figuur 10: Classificatie van afval in België

(Wat is radioactief afval, 2022)

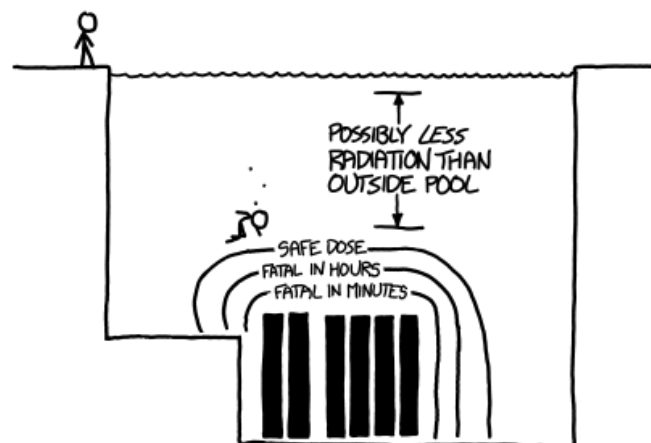
Om hoeveel afval gaat het nu werkelijk?

- Totale hoeveelheid kernafval/persoon/jaar = 500 gram
- Hoogradioactief afval/persoon/jaar = 5 gram

### Beheer van radioactief afval

Het grote doel is om mens en milieu te beschermen tegen deze radioactiviteit. Dit kan door dit afval in de eerste plaats te voorkomen of de hoeveelheid en activiteit ervan te beperken. Soms kan een deel ervan zelfs hergebruikt worden.

Momenteel worden de verbruikte splijtstofelementen tijdelijk opgeslagen op de sites van de kerncentrales van Doel en Tihange. Deze worden onder water opgeslagen (zie Figuur 11) in een bekken te Tihange en droog in een container te Doel. Deze opslagruimten beginnen hun maximale opslagcapaciteit te bereiken. In Tihange is de bouw gestart van een nieuwe droge opslaginstallatie voor SF<sup>2</sup>, deze zou moeten operationeel zijn in 2023. Ook in Doel wordt een nieuwe droge opslag voor SF<sup>2</sup> gebouwd en zal in 2025 klaar moeten zijn.



Figuur 11: Onder water opslag van verbruikte splijtstofelementen

(Munroe, 2020)

In België wordt het geconditioneerd<sup>3</sup> radioactief afval tijdelijk opgeslagen op de site van Belgoprocess. Ze beschikken over acht bunkergebouwen voor de verschillende soorten afval. Daarnaast beschikt België voorlopig nog over geen bergingsinstallaties. Met berging wordt bedoeld dat de splijtstof of het afval niet teruggehaald wordt en dus definitief daar opgeslagen wordt. NIRAS<sup>4</sup> heeft echter wel een vergunning aangevraagd voor een oppervlakteberging in Dessel die geschikt is voor afval van categorie A.

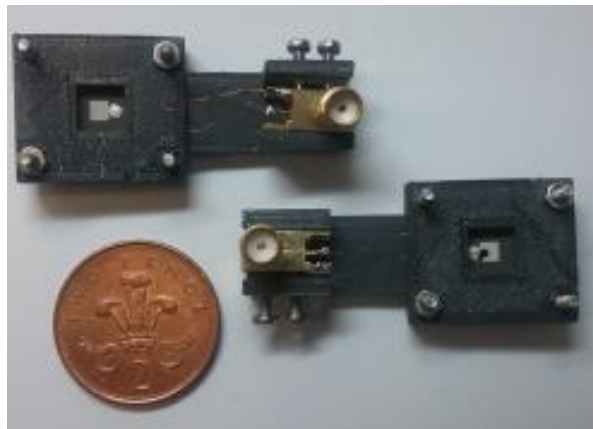
## Oplossingen

Er bestaan verschillende oplossingen voor dit radioactief afval: recyclage, opslag en transmutatie.

### Recyclage

Een splijtstof die vier jaar in een reactor zit, wordt meestal vervangen door nieuwe splijtstof, omdat het rendement afneemt. 95% van de oude splijtstof is nog steeds bruikbaar, slechts 5% is afval. Dus recycling is perfect mogelijk. Nadelen hierbij zijn dat het rendement veel lager is, omdat het geen natuurlijk uranium meer is en dat het opwerkproces duur is. Bij het opwerken wordt het afval uit de oude splijtstof gehaald, zo kan de gerecycleerde splijtstof opnieuw in de reactor gebruikt worden.

De universiteit van Bristol onderzoekt om het kernafval in diamanten in te kapselen om batterijen van te maken (zie Figuur 12). Kernafval met C-14 geeft enkel bètastralen af. De diamant absorbeert deze stralen en zorgt zo voor bewegende elektronen in de diamant en dus stroom. Doordat diamant zo hard is, houdt het de radioactiviteit binnen. Dit koolstof-14 vormt zich in grafietstaven, een materiaal dat als moderator kan werken. Een groot voordeel van deze batterijen is dat ze niet gevoelig is voor extreme omstandigheden. Ook is ze heel klein door de enorm grote energiedichtheid en ze kan gedurende 7746 jaar op volle kracht werken.



*Figuur 12: Nucleaire batterij*

(nuclear FORUM, 2022)

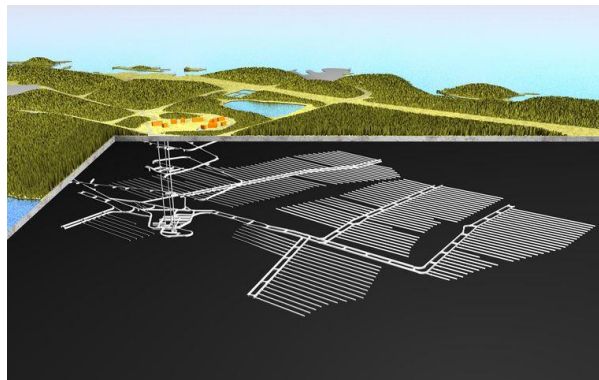
<sup>3</sup> Geconditioneerd radioactief afval: het radioactief afval wordt samengeperst om volume te besparen en in vaten gegoten met beton om een inerte massa te bekomen

<sup>4</sup> NIRAS: Nationale Instelling voor Radioactief Afval en verrijkte Splijtstoffen

## Opslag

Er bestaan verschillende vormen van opslag zoals diep onder de grond of oppervlakteberging. Eerst wordt het afval behandeld in de centrale zelf, daarna wordt het samengeperst en in vaten met beton gegoten (of verglaasd). Deze betonnen vaten zullen dan afhankelijk van het type afval een aantal honderden jaren opgeslagen worden in een loods om dan uiteindelijk onder of boven de grond op te slaan. Dit gebeurt totdat het afval zijn natuurlijke radioactiviteit terug heeft. Daarna heeft het afval zijn natuurlijke radioactiviteit en is het niet meer gevaarlijk voor mens en milieu.

Als het hoogradioactief afval diep onder de grond wordt begraven, moet de grond bestaan uit stabiele kleilagen. Figuur 13 toont het opslagproject van de Finnen. De tombes bevinden zich zo'n 450 m onder de grond en vanaf 2020 komt er tot wel 6500 ton nucleair afval te liggen. Als deze vol zit met nucleair afval worden de schachten gevuld en afgedicht met klei.



*Figuur 13: Geologisch opslagproject in Finland*

(De Finnen geven hun kernafval een permanente rustplek onder de grond)

Bij oppervlakteberging wordt het categorie A-afval aan het aardoppervlak geborgen, omdat het na enkele honderden jaren al zijn grootste deel van radioactiviteit verloren heeft. Hierbij wordt het afval op passieve wijze ingesloten en afgezonderd van mens en milieu. Zo'n project wordt door NIRAS in Dessel uitgewerkt.

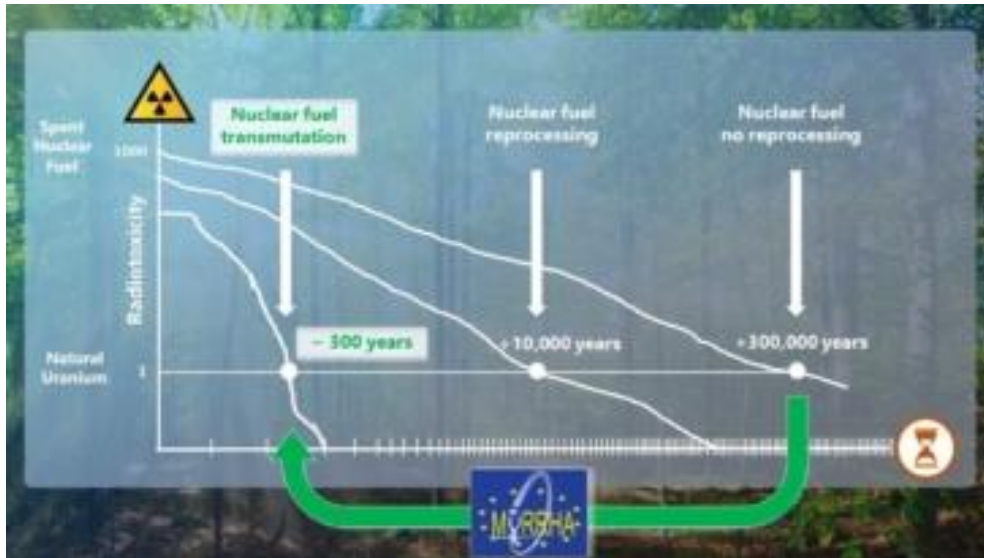
Daarnaast bestaat er ook gasvormig afval. Dit afval wordt 45-60 dagen opgeslagen en dan geloosd in de atmosfeer.

## Transmutatie

Transmutatie is een proces om langlevende radioactieve stoffen om te zetten in stoffen die minder lang leven, minder schadelijk zijn en minder lang warmte afgeven. Voordat dit proces kan optreden, moet de gebruikte kernbrandstof eerst gerecycleerd worden. Op de 5% afval moet dan transmutatie toegepast worden. Op Figuur 14 is de radioactiviteit uitgezet in functie van het aantal jaar. Met recyclage is er minder afval en dus zal sneller de natuurlijke activiteit gehaald worden. Met transmutatie gebeurt dit proces nog sneller, waardoor al na 300 jaar het afval zijn natuurlijke radioactiviteit terug heeft.

Transmutatie kan wel niet meer toegepast worden op afval dat al verwerkt is zoals gecementeerd of verglaasd<sup>5</sup> afval. Transmutatie werkt ook niet het kernafval weg, dus opslag is nog altijd noodzakelijk.

Met transmutatie geeft het afvalproduct minder warmte af, waardoor de bergingsgalerijen dichter bij elkaar kunnen liggen. Dit zou voordelig zijn voor de oppervlakte en dus de kostprijs.



Figuur 14: Radioactiviteit van kernbrandstof zonder recyclage (rechts), met recyclage (midden) en met transmutatie (links)

(nucleair FORUM, 2022)

## Impact

De impact van radioactief afval op de mens en het milieu is afhankelijk van de intensiteit en de duur van de straling.

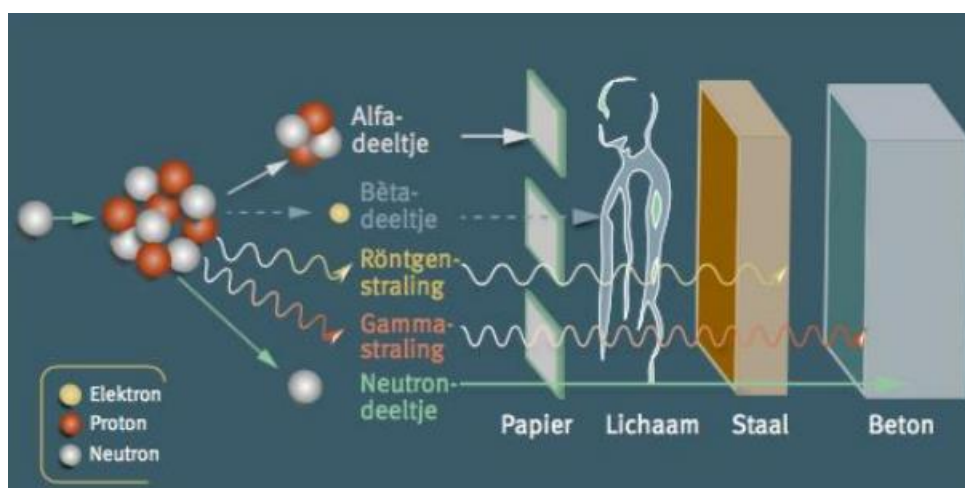
Aan hoeveel straling een mens wordt blootgesteld, kan uitgedrukt worden in Sievert (Sv). Per jaar ontvangt een inwoner van België gemiddeld 4 mSv aan straling als gevolg van natuurlijke en kunstmatige radioactiviteit. Ongeveer 2,4 mSv komt van natuurlijke straling zoals straling uit de ruimte en het inhaleren van radon... Het andere deel is dan afkomstig van medische toepassingen zoals radiologie en nucleaire geneeskunde. Ongeveer 20 mSv/jaar wordt als veilige limiet gezien. Het lichaam is gemaakt om de schade die bij deze grootte van straling ontstaat, te herstellen. Bij een grote hoeveelheid straling kan er blijvende schade aan de cellen ontstaan die het lichaam niet kan herstellen. Doordat deze straling niet voelbaar is, zullen op korte termijn de effecten niet merkbaar zijn. Op lange termijn kan dit kanker of leukemie veroorzaken. Anderzijds zal een te hoge dosis wel merkbaar zijn in brandwonden en/of misselijkheid.

<sup>5</sup> Bij verglaasd radioactief afval wordt het hoograadioactief afval ingesloten door gesmolten glas die dan verstijft. Hierdoor kan de radioactiviteit niet meer weg.

Tabel 3: impact op de stralingsdosis en waar komt het voor

Stralingsdosis	Impact	Komt voor
>4000 mSv op korte duur >500.000 mSv/uur	Dodelijke afloop	
1000 mSv op korte duur	Is nog te behandelen	
10 mSv		CT-scan
5 mSv/uur	Niet ernstig, als bescherming wordt beschermende kledij, overall, handschoenen en een filtermasker voorzien.	Aanraking van laagactief kernafval
5 – 2000 mSv/uur	Gevaarlijk, verwerking gebeurt van op afstand en in gesloten en afgeschermdes ruimtes (betonmuren en loodglas).	Aanraking van middelactief kernafval
>2000 mSv/uur	Hetzelfde als middelactief afval, maar nu nog dikkere muren afhankelijk van de dosis.	Aanraking van hoogactief kernafval
<0,1 mSv/uur op 2 m afstand		Kernafval verglaasd of geconditioneerd.
300.000 mSv/uur	Mensen gaan dood door stralingsvergiftiging na enkele uren.	Na ontploffing naast Tjernobyl-reactor staan

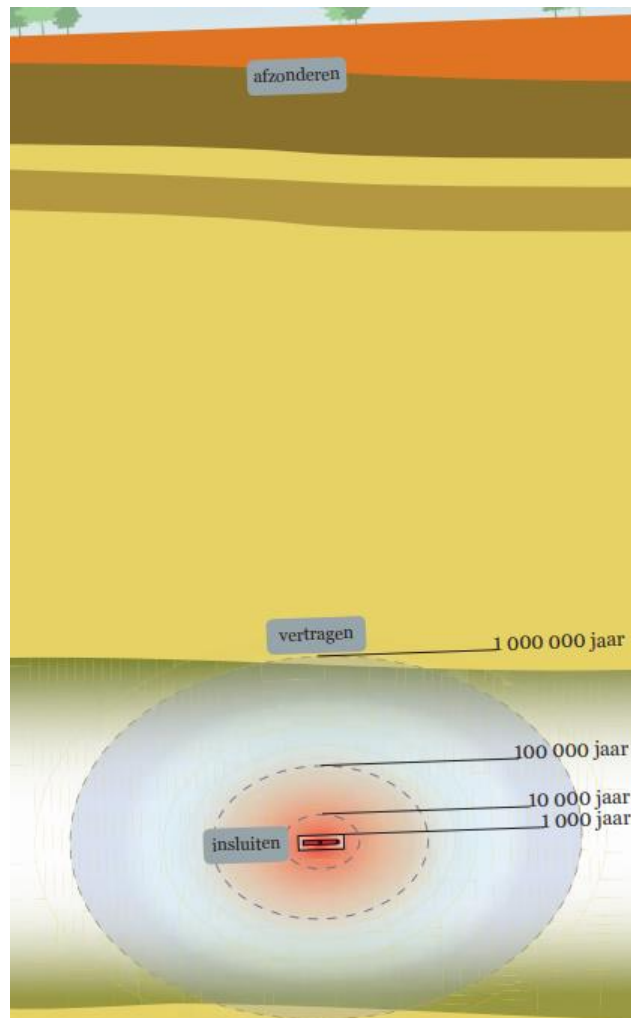
Kernafval zendt nog ioniserende straling en warmte uit. Door het te verglazen of te conditioneren (cementmortel) kan het afval relatief veilig worden opgeborgen in een loods. Splitsstoffen of nucleaire reacties geven neutronenstraling vrij. Zoals te zien in Figuur 15 kan deze straling door beton. Dit kan namelijk tegengehouden worden door de beton dik genoeg te maken of op te slaan onder water. Daarom bestaan de loodsen (afhankelijk van het soort afval) uit heel dikke betonnen wanden.



Figuur 15: Doordringend vermogen van verschillende soorten straling

(UNEP, 2016)

Eerder werd besproken dat kernafval ook onder de grond in kleilagen kan opgeslagen worden. Diepe kleilagen onder de grond zorgen er immers voor dat de straling niet vrijkomt. Klei houdt radioactieve stoffen heel lang vast en is zeer plastisch, waardoor een scheur in de klei vanzelf terug dicht gaat. Na zeer lange tijd kan er straling ontsnappen naar de bovengrond, maar tegen die tijd zal ze al uitgedoofd en niet meer gevaarlijk zijn. Vooral eer ze het onder de grond steken, moet het eerst voor enkele honderden jaren in een loods opgeslagen worden. Dit wordt gedaan, zodat het afval kan afkoelen. Als het afval op hoge temperatuur onder de grond zit, ontstaan er spanningen in de klei en komt het grondwater onder hoge druk, waardoor het klei kan barsten. Figuur 16 toont de evolutie van radioactief afval diep onder de grond in kleilagen.



Figuur 16: Radioactieve straling na zoveel jaren in diepe kleilagen onder de grond

(splijtstoffen)

Dus zowel opslag boven de grond als onder de grond kan als relatief veilig gezien worden i.v.m. radioactieve straling. België heeft voorlopig voor een oppervlakteberging gekozen, omdat er een serieus prijskaartje aan te pas komt bij berging onder de grond.

(Wat is radioactief afval, 2022)

(nucleair FORUM, 2022)

(De Finnen geven hun kernafval een permanente rustplek onder de grond)  
 ("Transmutatie kan de berging van hoogactief en/of langlevend afval optimaliseren maar ondergrondse berging blijft absoluut noodzakelijk", 2019)  
 (Jaarlijkse gemiddelde blootstelling aan ioniserende straling in België, 2020)  
 (spleetstoffen)

## Haalbaarheid van kernenergie

De zeven verschillende kerncentrales hebben samen een vermogen van 5,94 GW en hebben elk jaar een andere opbrengst. Kerncentrales kunnen dan ook om verschillende redenen stil komen te liggen. In de jaren met een lage opbrengst is dan ook de utiliteitsfactor<sup>6</sup> laag. Deze factor werd o.a. gebruikt om de schattingen van de opbrengst in de toekomst te berekenen. Voor de schatting van de opbrengst na 2022 werd een utiliteitsfactor van 0,73 gebruikt. Dat betekent dat de centrales ongeveer 73 % van de tijd in het jaar op vol vermogen werken.

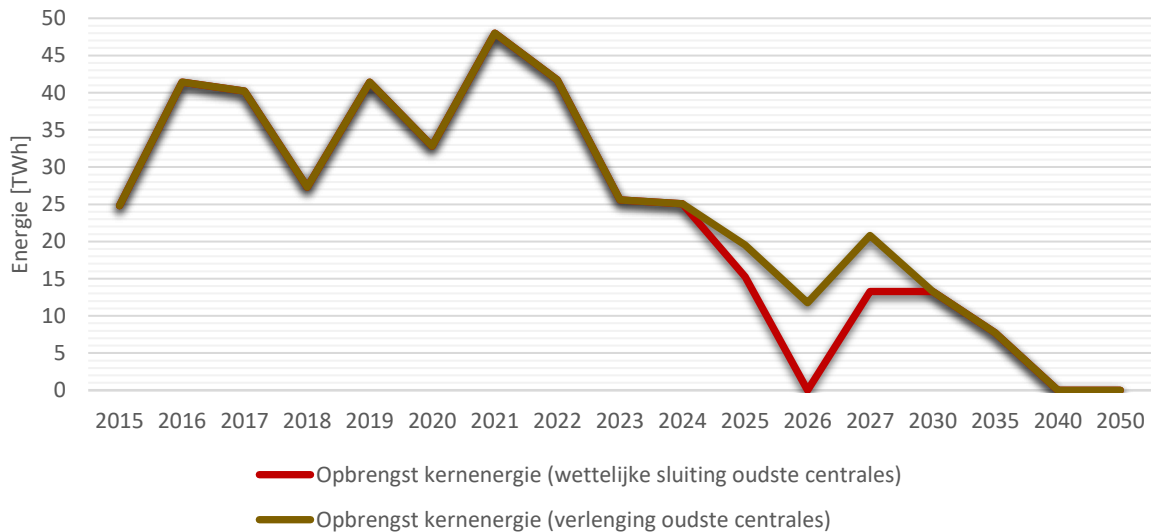
Figuur 17 toont de opbrengst van de kerncentrales in België. De opbrengst na 2022 is geschat voor de wettelijke sluiting van de centrales en als de oudste centrales verlengd zouden worden. In 2015 en 2018 is de opbrengst van de centrales duidelijk minder dan in de andere jaren. Veel centrales ondergingen dan ook groot onderhoud en revisie. Dan moeten ze tijdelijk stil gelegd worden, wat leidde tot minder opbrengst. Veel centrales kenden in deze tijden ook veel technische problemen die moesten opgelost worden. Daarnaast werd Tihange 1 in 2015 gesloten, omwille van kleine scheurtjes in de reactorvaten. In 2015 en 2018 waren ook de prijzen van elektriciteit in Europa laag, waardoor de opbrengsten van de kerncentrales in België werden beïnvloed.

Van september 2022 en februari 2023 zijn al twee centrales in België gesloten. Hierdoor is het totaal geïnstalleerd vermogen in België gereduceerd tot 3,917 GW. Doordat België nog niet genoeg hernieuwbare energie had, werd besloten om de sluiting van de twee jongste centrales (Doel 4 en Tihange 3) met tien jaar te verlengen. Deze kunnen natuurlijk niet zomaar verlengd worden, er moeten nog enkele aanpassingen gebeuren en dus zullen ze stilliggen tussen 2025 en november 2026. Om die winters te overbruggen werd reeds een aanvraag ingediend bij Engie om ook de oudste centrales (Doel 1, Doel 2 en Tihange 1) met twee jaar uit te stellen. Deze aanvraag is nog niet goedgekeurd en dat verschil in opbrengst wordt in Figuur 17 met de rode en bruine lijn erboven aangeduid. Indien de centrales die winters open worden gehouden, zal België in totaal ongeveer 23,53 TWh minder energie moeten importeren. Met een gemiddelde importprijs van € 200/MWh, komt dit neer op een 'besparing' 4,706 miljard euro. Hierbij moeten natuurlijk nog de kosten van het onderhoud en de veiligheidscontroles komen. Deze zijn nog niet gekend, omdat de studie van Engie nog niet klaar is. Als alles volgens plan verloopt zal de laatste centrale momenteel op 1/09/2035 sluiten. Dat betekent dat België tegen dan dat gat met hernieuwbare energie moet opgevuld hebben om zichzelf te kunnen voorzien van elektriciteit. Hou hierbij in het achterhoofd dat 50 % van de elektriciteit in België in 2021 nog afkomstig was van kernenergie. Dus gaat de verandering naar hernieuwbare energie snel moeten gebeuren of zal veel elektriciteit moeten geïmporteerd worden uit het buitenland. Import van energie wil men

<sup>6</sup> Utiliteitsfactor: Deze factor stelt de verhouding voor tussen de effectief geproduceerde elektriciteit en de elektriciteit die gedurende dezelfde periode zou zijn geproduceerd indien de productie-eenheid continu op volle capaciteit had gewerkt. Of anders gezegd hoeveel procent van de tijd de productie-eenheid op volle capaciteit werkt.

vermijden, omdat België dan afhankelijk wordt van het buitenland. Dit kan o.a. leiden tot hogere transportkosten (lange afstand) en dus hogere energieprijzen. Ook is er onzekerheid over de energiemix en kan import dus bijdragen tot een toename van de uitstoot van broeikasgassen.

Al wordt er bij verschillende partijen in België gesproken dat de kernuitstap moet gewijzigd worden. Sommige hebben bijvoorbeeld als doel om tegen 2040 een SMR te bouwen in België en deze tegen 2045 al uit te breiden naar zeven operationele SMR-centrales. Daarvoor is in 2020 een projectgroep gelanceerd om de haalbaarheid van SMR's in België te onderzoeken.



Figuur 17: Werkelijke en toekomstige geschatte opbrengst van de kerncentrales

(public net electricity generation, 2022)

(Kerncentrales in België, 2022)

(CD&V wil kleine modulaire kernreactoren en meer hernieuwbare energie, 2022)

(Federale regering wil ook oudste kerncentrales enkele winters langer openhouden, 2023)

## 7 Studie van de buurlanden en hun ideeën op vlak van elektriciteit

In dit hoofdstuk wordt een bredere kijk aangenomen en wordt de aanpak van de buurlanden bekeken. Daarbij wordt Luxemburg achterwege gelaten. Ook deze buurlanden stelden reductiedoelen op tijdens het klimaatakkoord. Eerst worden de broeikasgassen van elk land besproken om daarna over te gaan hoe ze er elk voor zorgden om hun opgestelde klimaatdoelstellingen te bereiken. Welke energiebronnen worden stilaan stilgelegd en welke zijn aan het groeien per land? Misschien gaan sommige volledig over op kernenergie om hun doelstelling gemakkelijker te bereiken.



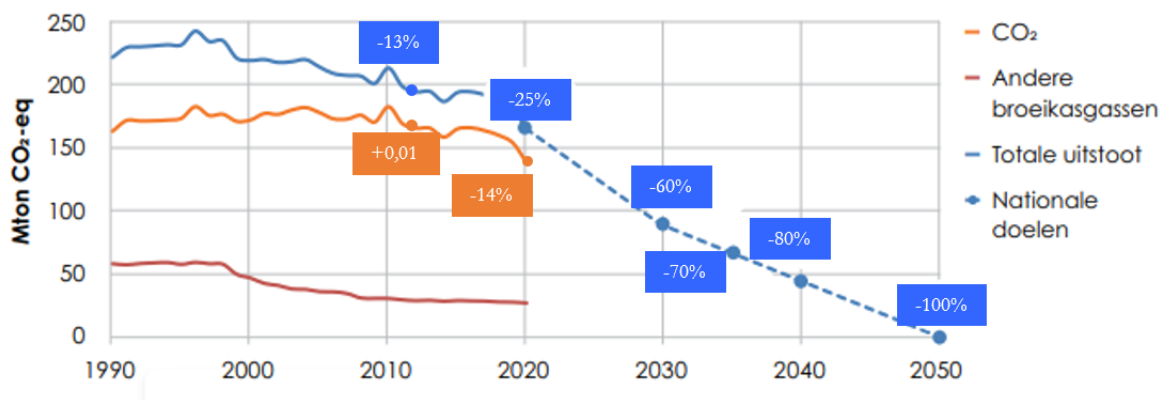
## Nederland

In Tabel 4 zijn de nationale doelstellingen van Nederland opgelijst. Deze doelstellingen zijn gelijkaardig aan deze van België. Behalve ligt hun piek voor 2030 met bijna 15% hoger. In 2012 haalden ze gemakkelijk hun reductie van 6%, ook die van 2020 had veel overschot. Nu een reductie van 49% zal een hele uitdaging worden voor Nederland. Figuur 18 geeft aan dat als ze zo verder doen, dat een reductie van 60% kan gehaald worden tegen 2030. Om zo volledig klimaatneutraal te zijn tegen 2050. Hoe pakken ze dit momenteel aan?

Tabel 4: Opvolging van de getekende klimaatakkoorden door Nederland

Doel reductie (broeikasgassen)	Ten opzichte van welk jaar	Tegen welk jaar moet het bereikt zijn	Werkelijke reductie broeikasgassen	Werkelijke reductie aan CO <sub>2</sub>
6% (Kyoto I)	1990	2012	13%	-0,01%
18% (Kyoto II)	1990	2020	25%	14%
49% (Parijs)	1990	2030	...	...

De uitstoot van broeikasgassen komt voornamelijk uit de industriële sector en tijdens elektriciteitsproductie. Ook de mobiliteit heeft hier een groot aandeel in. De uitstoot van elektriciteitsproductie wordt aangepakt met duurzame energiebronnen en de verbrandingsmotoren worden steeds meer vervangen door elektrische motoren. Vandaar ook de dalende trend.

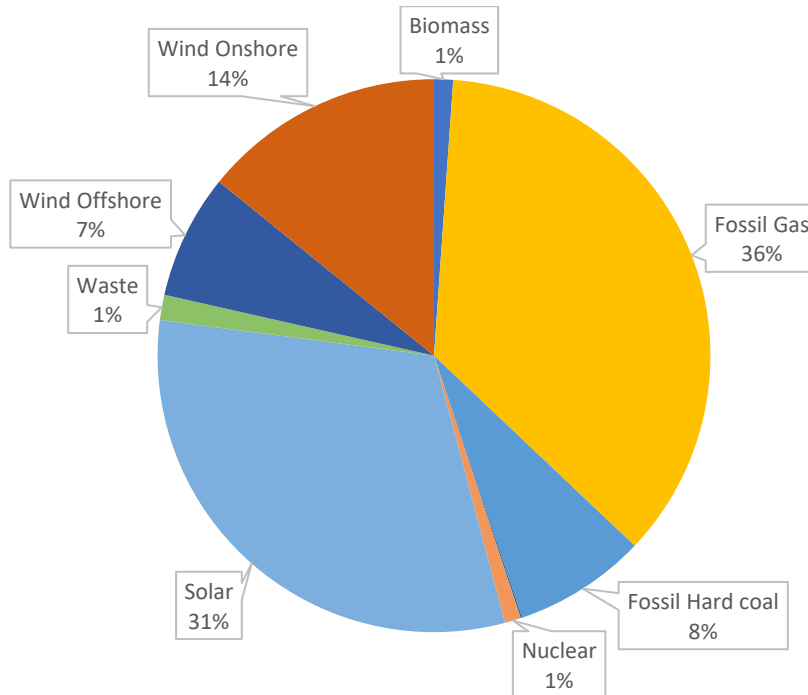


Figuur 18: Evolutie van de uitstoot van CO<sub>2</sub> en broeikasgassen in Nederland

(Energie in cijfers, 2022)

Om deze uitstoot te reduceren, moet ingezet worden op groene energie. Figuur 19 geeft het geïnstalleerd vermogen van Nederland in 2022 terug. In bijlage 14.1 is ook de evolutie van het geïnstalleerd vermogen vanaf 2015 bijgevoegd. Hierbij valt op dat Nederland nog altijd voor een groot deel hun energie opwekt uit fossiele brandstoffen, voornamelijk aardgas. Het aandeel fossiele gassen waarmee elektriciteit wordt geproduceerd is in vergelijking met vorige jaren tot wel 75% gezakt, maar blijft nog de koploper. Deze reductie moet snel vervangen worden door duurzame energie om zichzelf te kunnen voorzien. Tabel 5 geeft aan dat het geïnstalleerd vermogen daarvan maar met 5,41 % is gezakt van fossiele gassen. Dit komt doordat bijna alle gasvelden in Nederland of in de Noordzee nog worden gebruikt, maar enkel in nood en in kleine

hoeveelheden. Het grootste gasveld van Nederland ligt in Groningen, maar door het aardgas weg te halen daalt de druk in de ondergrond, waardoor er aardbevingen ontstaan. Daarom proberen ze de gasproductie in Groningen snel stil te leggen. De bedoeling is om uiteindelijk de gaswinning af te bouwen naar nul. Het aandeel groene energie zoals vb. zonnepanelen en windenergie op zee is t.o.v. 2015 wel meer dan vijftien keer zo groot. Het is dan ook duidelijk dat ze hun reductiedoel van 2030 proberen te halen. De verliezen kennen ook een grote daling. Doordat de productie van aardgas gedaald is en er dus een tekort aan energieproductie is (zie Figuur 20), wordt er minder geëxporteerd en dus dalen de verliezen. Een deel van de fossiele gassen moest omgezet worden van warmte naar elektriciteit, wat ook verliezen gaf. Dit deel wordt nu geproduceerd door de zonne-energie en windenergie, waar direct elektriciteit ontstaat op enkele verliezen na.



Figuur 19: Verdeling van het geïnstalleerd vermogen in Nederland (2022)

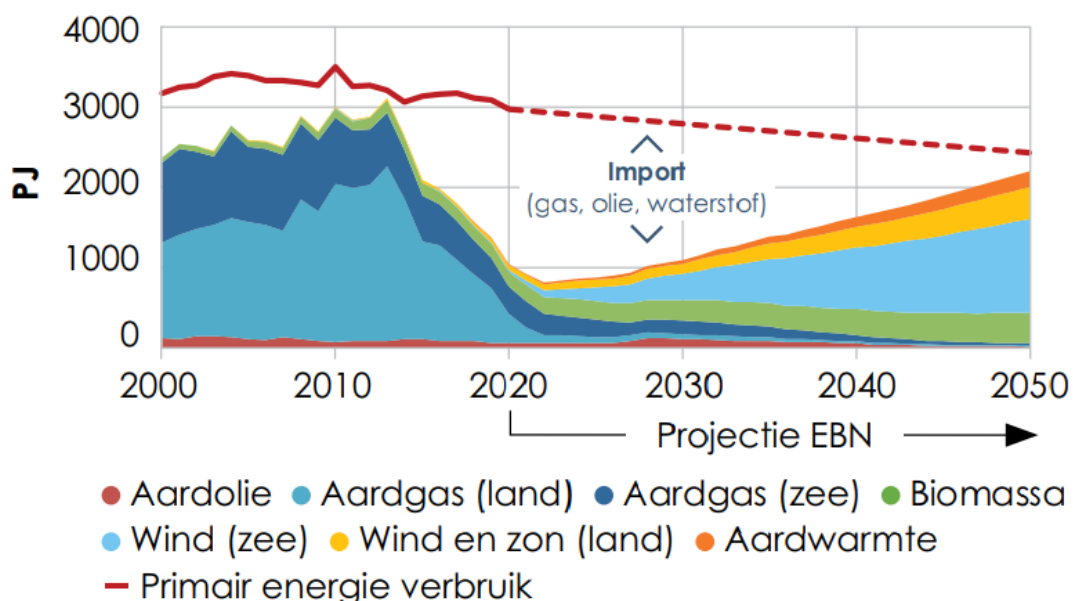
(a.s., 2022)

Tabel 5: Stijgingspercentage van geïnstalleerd vermogen in Nederland (2015-2022)

Energiebron	Stijgingspercentage van 2015-2022 [%]
<b>Windenergie offshore</b>	1547,81
<b>Zonne-energie</b>	1507,40
<b>Windenergie onshore</b>	176,00
<b>Biomassa</b>	43,00
<b>Kernenergie</b>	-1,22
<b>Fossiele gassen</b>	-5,41
<b>Verliezen</b>	-12,20
<b>Fossiele steenkool</b>	-44,90

Figuur 20 geeft aan hoe zelfvoorzienend Nederland is. De plaats tussen de rode lijn en de productie is dan hoeveel energie er van het buitenland moet geïmporteerd worden. De energiewaarden worden uitgedrukt in PJ. Eén TWh (terrawattuur) komt overeen met 3,6 PJ

(petajoule). Voor 2020 wordt het grootste deel van de elektriciteit in Nederland geproduceerd door verbranding van fossiele brandstoffen, zoals aardgas en steenkool. Hernieuwbare energie had toen maar een relatief klein aandeel. Meer dan 60% van het energieproductievermogen was centraal vermogen. Dit betekent dat de energie ergens werd opgewekt zoals in kerncentrales of thermische centrales om deze dan aan het landelijke hoogspanningsnet te leveren. In de komende decennia willen ze zo snel mogelijk de fossiele bronnen gaan vervangen door duurzame bronnen. Door het bijna stoppen met energie winnen uit aardgas, worden ze plots zeer afhankelijk van het buitenland. Tussen 2010 en 2020 is het aandeel van aardgas met ongeveer 75% gezakt. Overgaan naar duurzame bronnen zoals windenergie, waterkracht en zonne-energie heeft het voordeel dat de energie niet vervoerd moet worden naar het bedrijf, maar direct kan gebruikt worden. Dit heet decentrale productie. Het bedrijf produceert en verbruikt zijn energie zelf. In 2020 was er een primair energieverbruik<sup>7</sup> van 2940 PJ en door verliezen daarvan af te trekken krijg je het eindverbruik van 2280 PJ.

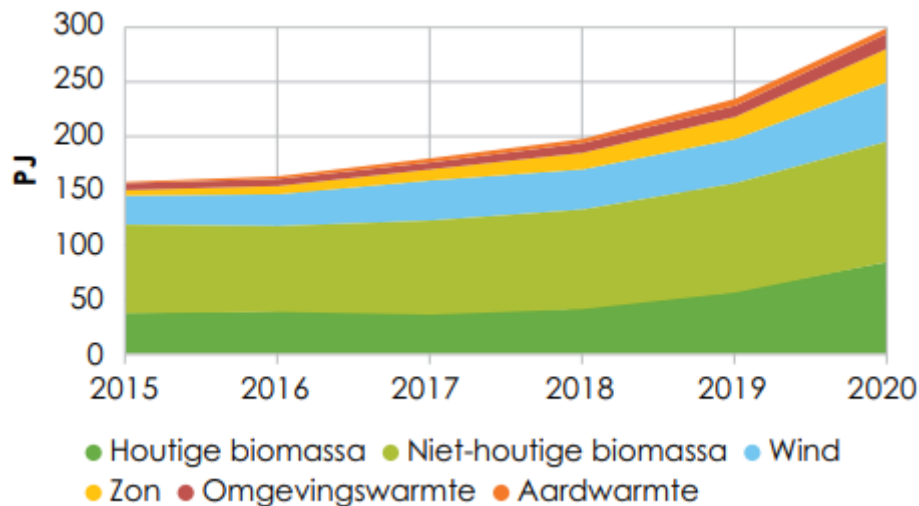


Figuur 20: Binnenlandse energieproductie van Nederland

(Energie in cijfers, 2022)

In 2020 bestaat 300 PJ (10%) van het primair verbruik uit hernieuwbare energiebronnen (zie Figuur 21 en Figuur 20). Tegen 2030 moet dit ongeveer de helft van het primair verbruik zijn. De afgelopen vijf jaar is het aandeel van hernieuwbare energie wel verdubbeld. De vraag is natuurlijk of deze duurzame bronnen flexibel genoeg zijn om aan de bevoorrading te blijven voldoen. Een oplossing daarvoor is opslag.

<sup>7</sup> Primaire energie is de energie die nodig is aan de bron om het uiteindelijke energiegebruik te dekken. Dit gaat dan over de productie, de import en de export. Er gaat namelijk altijd een hoeveelheid energie verloren bij de opwekking, het transport, de verdeling enzovoort.



Figuur 21: Evolutie van de verschillende soorten energiebronnen in Nederland

(Energie in cijfers, 2022)

In 2020 was 1% van het primair energieverbruik (2940 PJ) van Nederland afkomstig van kernenergie. Dit komt volledig uit eigen productie en komt overeen met 40 PJ. In Nederland zijn er op dit moment drie werkende kernreactoren. Een kerncentrale in Borssele, een hoge flux reactor in Petten en een hoger onderwijsreactor in Delft. Enkel deze in Borssele wordt gebruikt om energie op te wekken voor consumenten en bedrijven. De reactor in Petten produceert radioactieve isotopen voor medisch gebruik. Denk aan onderzoek en behandeling van patiënten met hart- en vaatziekten en kanker. Ze wordt ook gebruikt voor onderzoek naar de verbetering van de veiligheid. Deze zal in de toekomst waarschijnlijk vervangen worden door een nieuwe onderzoeksreactor PALLAS. De reactor in Delft is voornamelijk voor onderzoek en onderwijs. Naast PALLAS zal er nog nucleaire installatie komen, genaamd SHINE. Dit zal een deeltjesversneller zijn die ook zal dienen voor het maken van medische isotopen. De vergunningen van beide zijn nog niet in orde, dus de kans is klein dat deze energie leveren tegen 2030.

Die 1% komt dus van die ene kerncentrale in Borssele. Er zijn ook al enkel kerncentrales die niet meer in gebruik zijn, zoals deze in Dodewaard. Deze stopte met energie opwekken in 1997. De Lage Flux Reactor in Petten die diende voor opleidings- en trainingsdoeleinden is gestopt in december van 2010. Daarnaast heeft Nederland wel ambities voor de bouw van een nieuwe centrale die energie opwekt voor de consument. Er gaan gewoon veel jaren voorbij tussen het maken van de plannen en het verlenen van de eerste vergunningen. Er is ook het verrijkingcentrum Urenco in Almelo. Dit is een nucleaire onderneming die verrijkt uranium<sup>8</sup> produceert voor kerncentrales. Verder maken ze ook isotopen voor industriële, medische en onderzoektoepassingen.

In Nederland gaat het radioactief afval voor een periode van minimaal 100 jaar naar het bedrijventerrein van COVRA. Het tot nu toe opgeslagen afval ligt er nog niet zo lang, maar in de

<sup>8</sup> Uranium bestaat hoofdzakelijk uit U<sub>238</sub>, U<sub>235</sub> en U<sub>234</sub>. Doordat enkel U<sub>235</sub> splijtbaar is en de kettingreactie op gang moet worden gehouden, is er meer U<sub>235</sub> nodig. Dit bereiken van een hoger percentage U<sub>235</sub> wordt verrijken genoemd.

toekomst is het de bedoeling om dit in de diepe ondergrond op te bergen. Figuur 22 toont de ligging van verschillende nucleaire installaties in Nederland.



Figuur 22: Nucleaire installaties in Nederland

(Feiten en cijfers, 2022)

(Kernreactoren in Nederland, 2022)

(a.s., 2022)

## Frankrijk

Tabel 6 geeft de klimaatdoelstellingen van Frankrijk terug t.o.v. het jaar 1990. Toen was de uitstoot van Frankrijk iets meer dan 500 Mton CO<sub>2</sub>-equivalent. Ook al was hun reductiedoel in 2012 0%, toch zijn de broeikasgassen met 13% gedaald. De volgende reductiedoelen zijn goed vergelijkbaar met deze van België. Ze liggen in 2020 en 2030 respectievelijk met 2% en 5% hoger. Het doel van 2030 is de uitstoot met 40% verminderen t.o.v. 1990. Hoe zullen ze dit aanpakken en op welke manier wekte Frankrijk de voorbije jaren het meeste van hun energie op?

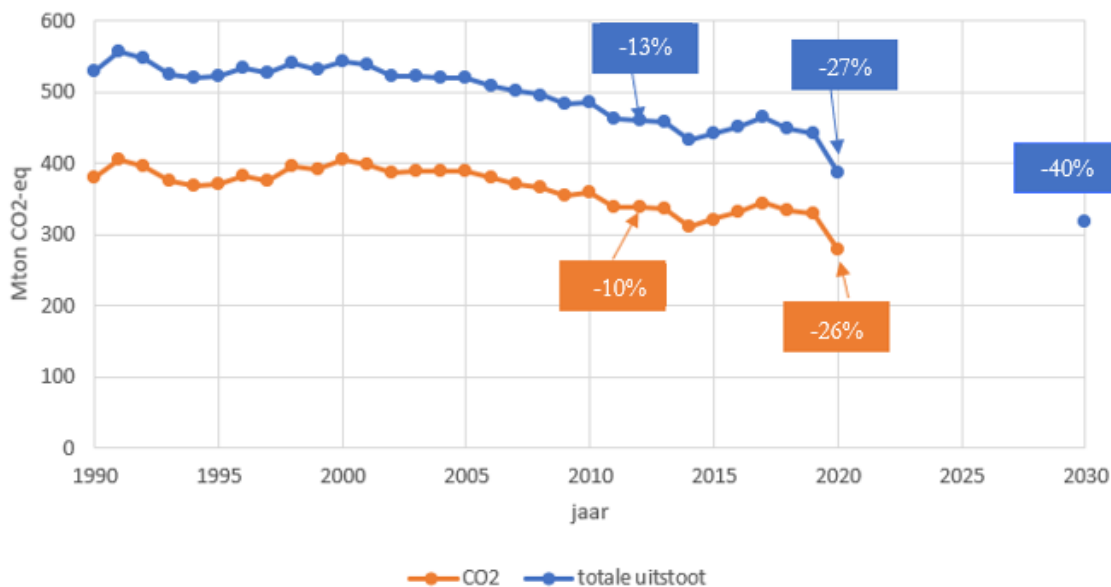
Tabel 6: Opvolging van de getekende klimaatakkoorden door Frankrijk

Doel reductie (broeikasgassen)	Ten opzichte van welk jaar	Tegen welk jaar moet het bereikt zijn	Werkelijke reductie aan broeikasgassen	Werkelijke reductie aan CO <sub>2</sub>
0% (Kyoto I)	1990	2012	13%	10%
20% (Kyoto II)	1990	2020	27%	26%
40% (Parijs)	1990	2030	...	...

De sector met de hoogste emissies in Frankrijk is het transport, gevolgd door de residentiële sector. Door o.a. over te schakelen naar elektrische wagens kan de uitstoot van het transport al

veel verminderd worden. Binnen de woningen niet meer verwarmen op aardgas zal de reductie ook versterken. In Frankrijk valt vooral op dat de uitstoot van de energiesector (elektriciteitsproductie, 9,2%) ver onder het Europees gemiddelde (28% uitstoot) ligt. Dit komt vooral door de energieopwekking met kerncentrales die weinig CO<sub>2</sub> uitstoten.

De dalende trend van 2006 tot 2009 te zien in Figuur 23 is grotendeels toe te schrijven aan de economische vertraging. Het herstel komt er tussen 2015 en 2017, deze stijgende trend geeft de economische groei (en dus meer uitstoot) van Frankrijk aan.

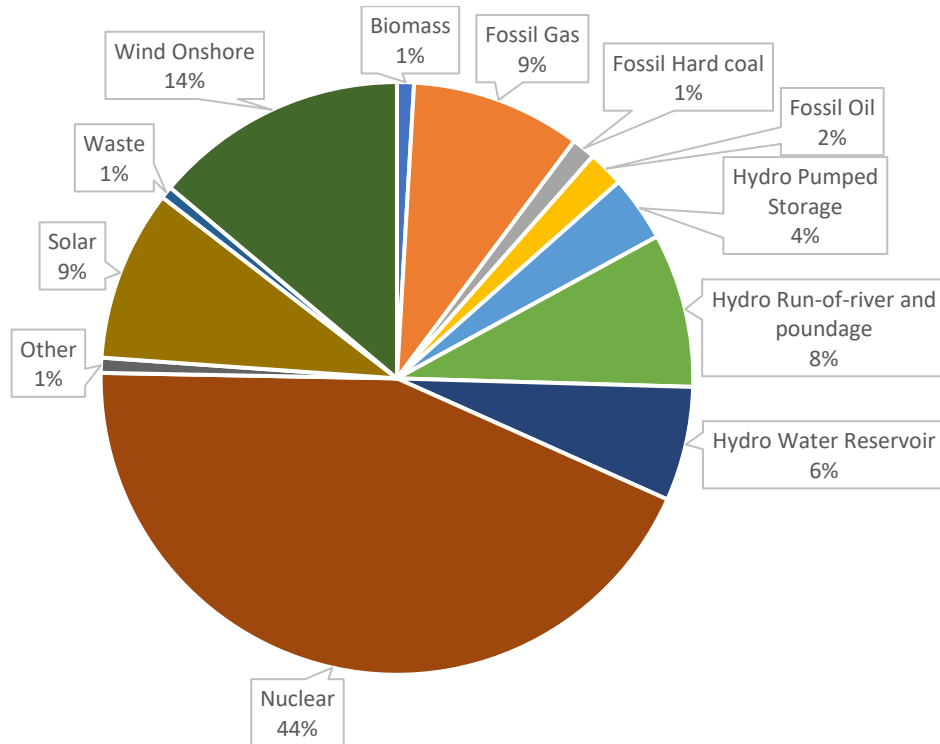


Figuur 23: Evolutie van de uitstoot van CO<sub>2</sub> en broeikasgassen in Frankrijk

(Team, 2021)

Het grote doel voor Frankrijk is het reductiecijfer 40 dat ze in 2030 moeten behalen. Dit kunnen ze enkel bereiken door in te zetten op duurzame energiebronnen. Figuur 24 geeft het geïnstalleerd vermogen van Frankrijk in 2022 terug en bijlage 14.2 bevat nog de evolutie van dat vermogen van 2015 t.e.m. 2022. Uit Figuur 24 kan je afleiden dat bijna de helft van hun geïnstalleerd vermogen bestaat uit kernenergie. Daaruit produceren ze ongeveer 70% van hun elektriciteit. Ze zijn dan ook de grootste energie-exporteur van Europa. Dat waren ze dan toch met hun 58 kernreactoren, want begin 2022 is er een serieuze daling te zien van de productie van kernenergie. Dit komt doordat de helft van de reactoren stilliggen, onder andere voor onderhoudswerken, maar ook door de hitte. Het rivierwater is een lange periode veel te heet geweest, om de reactoren te koelen. Daardoor moest Frankrijk in de eerste helft van 2022 meer energie importeren, dan het kon exporteren. Geen paniek voor de winter, want tegen dan zijn de onderhoudswerken afgewerkt. Alle kerncentrales zullen terug op volle toeren kunnen draaien als de winter er aankomt. Figuur 25 geeft de elektriciteitsproductie van Frankrijk terug van de voorgaande zeven tot acht jaar. Elk jaar is eenzelfde patroon te zien in de productie. Dit komt doordat de energievraag afhankelijk is van het seizoen. In de zomer moet er bijvoorbeeld minder verwarmd worden, en wordt dus de verwarming niet aangestoken. Deze daling in de zomer van 2021 is er wel niet volledig doorgekomen. Dit komt waarschijnlijk door de hoge energieprijzen op de markt en omdat Vladimir Poetin de gaskraan van Rusland heeft toegedraaid.

Daarnaast is 9% van het geïnstalleerd vermogen in 2022 zonne-energie. Dit aandeel is de laatste zeven jaar meer dan verdubbeld (zie Tabel 7). Dit is maar een kleine verandering t.o.v. Nederland waar het met een factor 15 is vermeerderd. Dit komt vooral omdat ze in Frankrijk op kernenergie rekenen en dit is veel milieuvriendelijker dan het aardgas in Nederland. Hetzelfde geldt voor windenergie. Het gebruik van biomassa is wel heel veel toegenomen t.o.v. Nederland. Duurzame energie in Frankrijk zonder kernenergie maakt ongeveer 20% deel uit van de totale energieproductie, terwijl fossiele brandstoffen en kernenergie respectievelijk 10% en 70% deel uitmaken. Frankrijk wil vooral op zeker spelen en neemt kernenergie als grootste energiebron. Terwijl de andere landen voor wind en zon kiezen, omdat de bouw van kerncentrales nog lang duurt en er veel vergunningen nodig zijn om hun doel van 2030 te bereiken.



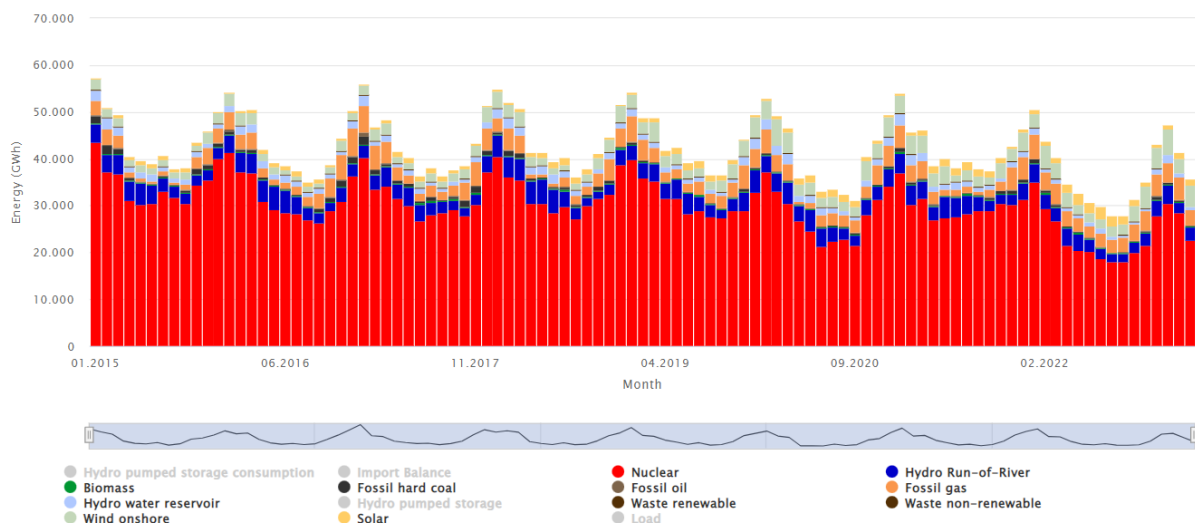
Figuur 24: Verdeling van het geïnstalleerd vermogen in Frankrijk (2022)

(a.s., 2022)

Het gebruik van fossiele brandstoffen neemt wel degelijk af, wat betekent dat Frankrijk bezig is om zijn uitstoot te reduceren.

Tabel 7: Stijgingspercentage van geïnstalleerd vermogen in Frankrijk (2015-2022)

Energiebron	Stijgingspercentage van 2015-2022 [%]
<b>Biomassa</b>	13000,00
<b>Fossil Gas</b>	113,59
<b>Otter</b>	1766,13
<b>Solar</b>	112,47
<b>Wind Onshore</b>	89,07
<b>Hydro Run-of-river and poundage</b>	14,74
<b>Hydro Water Reservoir</b>	6,95
<b>Hydro Pumped Storage</b>	1,71
<b>Nuclear</b>	-2,79
<b>Fossil Oil</b>	-58,59
<b>Fossil Hard coal</b>	-62,25



Figuur 25: Elektriciteitsproductie van Frankrijk t.e.m. 2022

(public net electricity generation, 2022)

Het regeringsbeleid had net zoals België tot doel het aandeel kernenergie in de elektriciteitsopwekking in 2025 terug te brengen naar 50%. Dit werd uitgesteld tot 2035. Deze verlenging is nodig om hun klimaatdoelstellingen te kunnen halen. Als de kerncentrales sluiten, zouden de duurzame energiebronnen Frankrijk niet kunnen voorzien van elektriciteit en zou waarschijnlijk overgegaan worden naar niet duurzame maar zekere energiebronnen. Daarom is er een onderhoudsprogramma ingevoerd en deze heeft twee functies, enerzijds het veiligheidsniveau van de reactoren te verbeteren en anderzijds de werkingsduur van de reactoren te verlengen tot 40 jaar. Dit programma zorgt ervoor dat de helft van de reactoren stilliggen, waardoor de energieprijzen de lucht in schieten. Dit PPE-programma wordt in Frankrijk in cycli van vijf jaar uitgevoerd.

In februari 2022 kondigde president Macron aan om zes nieuwe reactoren te bouwen en misschien zelfs acht. Aangezien ze de komende 30 jaar het verbruik van olie en gas proberen te verminderen, zal er een noodzaak zijn aan elektriciteitsvoorziening. Door dit aan te vullen met nucleaire energie op een koolstofvrije en veilige manier, kan parallel daarmee de opbouw



hernieuwbare energie gebeuren. Zo zal de doelstelling van het klimaatakkoord kunnen bereikt worden en zal er altijd energie voorradig zijn.

Figuur 26 geeft de verschillende kerncentrales van Frankrijk terug. De vetgedrukte plaatsen zijn de opslag van kernafval. Het grootste deel reactoren bestaat uit PWR-reactoren (drukwaterreactoren). De verrijking van uranium gebeurt in Frankrijk zelf, tot op heden gebeurt dit in de Georges-Besse II-fabriek gelegen op de nucleaire site van Tricastin. Daarnaast waren er nog negen gasgekoelde UNGG-eenheden (uranium naturel graphite gaz) gebouwd in Frankrijk, maar tegen 1994 waren ze allemaal buiten gebruik genomen. De bouw van een nieuwe reactor (EPR = European Pressurized Reactor) is in 2007 gestart en zou in 2012 in productie komen. Door verschillende tegenslagen en uitstellen zal deze hopelijk klaar zijn in 2023 en misschien 2024. Dit type reactor gebruikt ook uranium als brandstof, dit maakt het gemakkelijk, omdat ze een binnenlands centrum hebben die verrijkt uranium produceert. Zo'n soort reactor wordt gekozen, omdat het minder kernafval produceert, de duur van onderhoud is minder lang en ze biedt meer flexibiliteit.

Fessenheim bevatte twee PWR-reactoren en deze moesten in 2020 wegens veiligheidsevaluaties en politieke redenen sluiten. Om aan de vraag te voldoen werden vier kolencentrales geopend.



Figuur 26: Franse kerncentrales

(Nuclear Power in France, 2022)

Door het hoge aantal kerncentrales hebben ze ook veel kernafval. Frankrijk zal net als België en Duitsland eerst hun afval recycleren. Daaruit kan 95% hergebruikt worden en 5% wordt gezien als afval. 90% van het radioactief afval (laag- en middelactief) wordt bovengronds opgeslagen als lange termijn oplossing. Het hoogradioactief afval (10%) wordt veilig opgeslagen in een leads in La Hague in afwachting van een bergingsinstallatie diep onder de grond. Het toekomstig centrum

voor opslag van het hoogradioactief afval heet CIGEO. Deze is gelegen te Bure in het oosten van Frankrijk. De bouw ervan zal tot nu toe nog starten in 2022 en zal klaar zijn in 2025.

(Broeikasgasemissies in Frankrijk, 2022)  
 (nuclear FORUM, 2022)  
 (Nuclear Power in France, 2022)  
 (a.s., 2022)

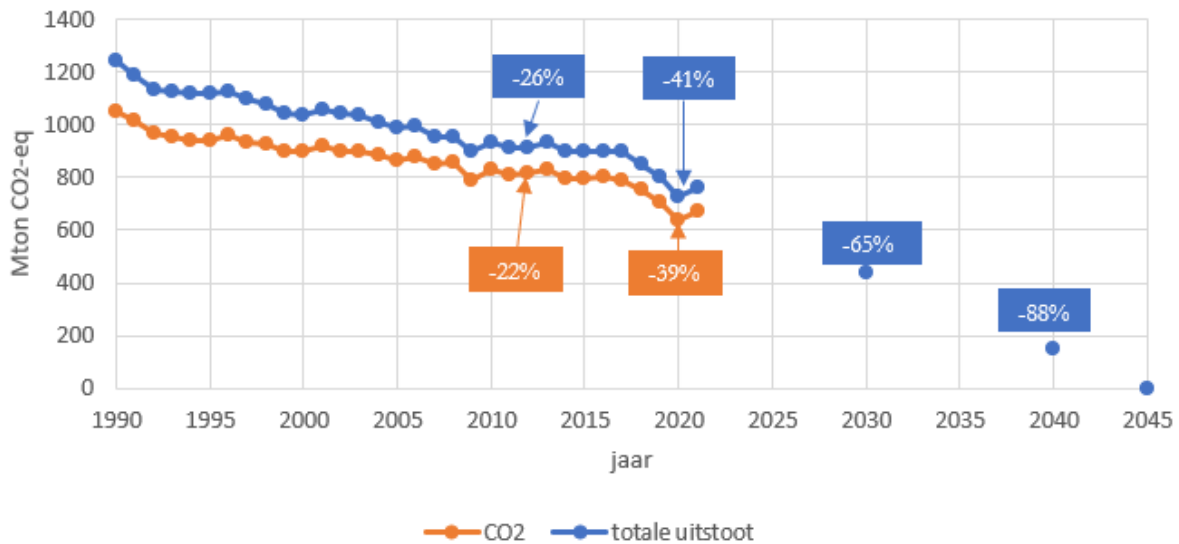
## Duitsland

T.o.v. zijn buurlanden heeft Duitsland grootse plannen om te reduceren in hun uitstoot van broeikasgassen (zie Tabel 8). Terwijl België, Nederland en Frankrijk een reductiedoel hebben van rond de 20% tegen 2020, heeft Duitsland een reductie ondertekend die twee keer zo veel is. Toch hebben ze steeds dit mikpunt bereikt. Op welke manier weten ze grotere reducties te bekomen dan hun buurlanden?

*Tabel 8: Oprolging van de getekende klimaataakkoorden door Duitsland*

Doel reductie (broeikasgassen)	Ten opzichte van welk jaar	Tegen welk jaar moet het bereikt zijn	Werkelijke reductie broeikasgassen	Werkelijke reductie aan CO <sub>2</sub>
<b>21% (Kyoto I)</b>	1990	2012	26%	22%
<b>40% (Kyoto II)</b>	1990	2020	41%	39%
<b>65% (Parijs)</b>	1990	2030	...	...

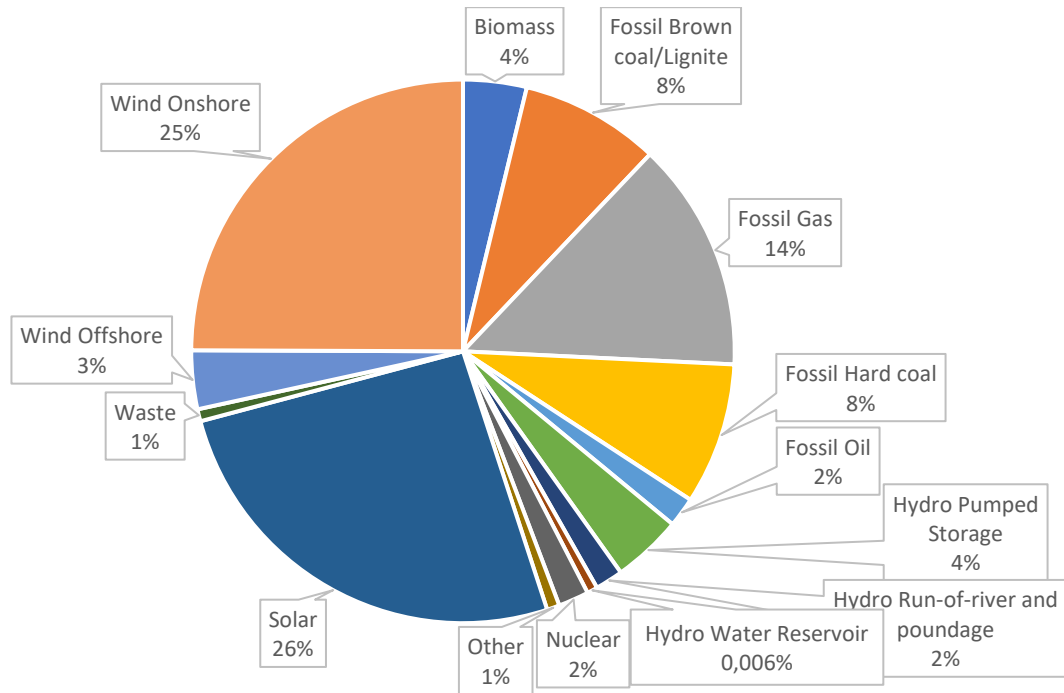
Duitsland heeft een heel grote uitstoot van broeikasgassen. In 1990 is dit iets meer dan 1200 Mton CO<sub>2</sub>-eq., terwijl de uitstoot van Frankrijk iets meer dan 500 Mton CO<sub>2</sub>-eq. was en Nederland had een uitstoot van iets meer dan 200 Mton CO<sub>2</sub>-eq. Duitsland is daarmee de grootste vervuiler, maar probeert ook het snelst klimaatneutraal te zijn. De grootste uitstoot in Duitsland komt uit de industrie gevolgd door het transport. Ze investeren dan ook volop in waterstof en het elektrisch rijden. Ook investeren ze volop in spoorwegen en lokaal openbaar vervoer. Binnen de industrie wordt een prijs aangerekend voor bedrijven die handelen in stookolie, gas, benzine of diesel. Zo zal elke sector geleidelijk aan hun uitstoot verminderen en dit is ook al enkele jaren bezig zoals in Figuur 27 te zien is.



Figuur 27: Evolutie van de uitstoot van CO<sub>2</sub> en broeikasgassen in Duitsland

(Kerstine Appun, 2021)

Tot nu toe is Duitsland nog steeds de grootste vervuiler van Europa, maar zijn uitstoot kent een sterk dalende trend op weg naar een reductie van 65% t.o.v. 1990. Figuur 28 toont het geïnstalleerd vermogen van Duitsland in het jaar 2022. In bijlage 14.3 is de evolutie van dat vermogen vanaf het jaar 2015 terug te vinden. De koplopers in Duitsland zijn windenergie en zonne-energie. Windenergie op zee kent in de laatste zeven jaar de grootste evolutie (zie Tabel 9) en is met een factor zeven toegenomen. Windenergie op zee en op land produceert op jaarbasis ongeveer 25% van de energie (2022). Ook het geïnstalleerd vermogen van zonne-energie is met de helft vermeerderd. Deze voedt Duitsland voor iets meer dan een tiende aan elektriciteit. Kernenergie is hier niet zo gebruikelijk als in Frankrijk en is zelfs met meer dan de helft afgenomen in de laatste jaren. Op drie centrales na heeft Duitsland al al hun andere centrales gesloten. De oorzaak hiervan is vooral de kernramp in Fukushima die Angela Merkel een andere kijk gaf op kernenergie. Daarnaast staat Duitsland wel gekend om zijn kolen. Doordat ze zichzelf een hoge reductie aan broeikasgassen hebben opgelegd, zal dit aandeel moeten verminderen. Dit is de laatste jaren ook gebeurd met ongeveer 40%. Ze hebben dan ook beslist om in 2038 volledig te stoppen met bruin- en steenkool. Toch staan de kolen (bruinkool, harde kolen) nog altijd in voor meer dan 30% van de opgewekte energie in Duitsland.



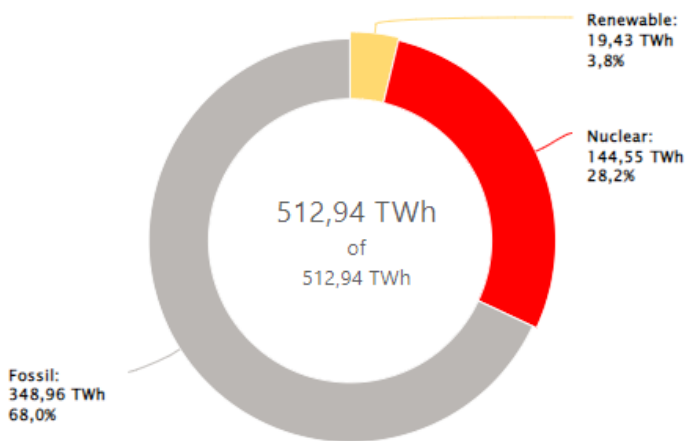
Figuur 28: Verdeling van geïnstalleerd vermogen in Duitsland (2022)

(a.s., 2022)

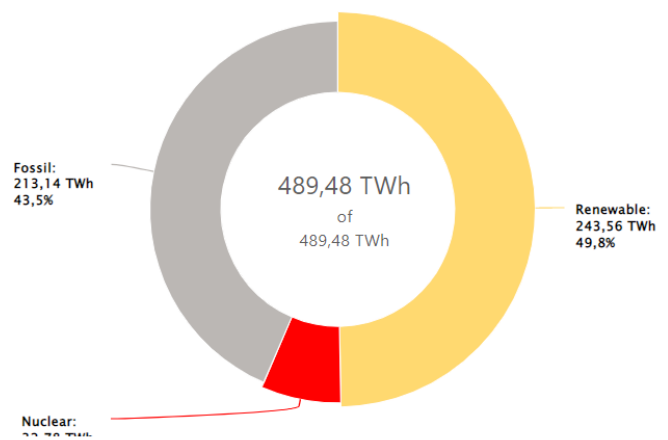
Tabel 9: Stijgingspercentage van geïnstalleerd vermogen in Duitsland (2015-2022)

Energiebron	Stijgingspercentage 2015-2022 [%]
<b>Wind Offshore</b>	684,19
<b>Solar</b>	55,02
<b>Wind Onshore</b>	47,70
<b>Other</b>	37,62
<b>Biomass</b>	24,06
<b>Hydro Pumped Storage</b>	6,68
<b>Fossil Gas</b>	-3,72
<b>Waste</b>	-5,10
<b>Hydro Run-of-river and poundage</b>	-7,30
<b>Hydro Water Reservoir</b>	-7,97
<b>Fossil Brown coal/Lignite</b>	-12,36
<b>Fossil Oil</b>	-12,49
<b>Fossil Hard coal</b>	-28,10
<b>Nuclear</b>	-66,39

Bij Frankrijk en Nederland was het over de jaren heen heel evenwichtig i.v.m. welke energiebronnen er gebruikt werden voor elektriciteitsproductie. Figuur 30 en Figuur 29 geven de evolutie terug van de gebruikte energiebronnen voor elektriciteitsproductie in Duitsland. Duitsland heeft een grote verandering doorgaan wat betreft de gebruikte energiebronnen. In de jaren '90 werden vooral fossiele gassen en kolen gebruikt. Deze maakten bijna 70% van de totale energieproductie uit. Terwijl het grote andere deel bestond uit kernenergie. Toen hadden ze nog meer dan twintig kerncentrales. Vanaf dat de kernramp in Fukushima zich voordeed besloot Merkel om enkele kerncentrales te sluiten om uiteindelijk tot heden nog drie centrales open te houden. Deze energieproductie werd in de loop der jaren vervangen door kolenmijnen die nu ook moeten vervangen worden door duurzame bronnen. Hernieuwbare energie maakte in 1990 maar een mager deel uit van de energieproductie. Door het opstellen van de klimaatakkoorden moest Duitsland wel veranderen. Deze verandering is dan ook duidelijk te zien. Groene energie produceert nu al meer dan de helft van de elektriciteit in Duitsland. Fossiele brandstoffen maken ook nog altijd een te groot deel uit. Tegen 2038 zal dit deel aanzienlijk verminderen als bruinkool-



Figuur 29: Elektriciteitsproductie van Duitsland in 1990



Figuur 30: Elektriciteitsproductie van Duitsland in 2022

(public net electricity generation, 2022)

en steenkoolmijnen dicht gaan.

Begin 2021 waren er nog zes kerncentrales in Duitsland en samen waren deze goed voor een productie van 13%. In 2021 zijn er drie centrales gesloten en deze laatste drie geven op jaarbasis nog maar 7% van de totale energieproductie. De overgebleven reactoren zijn al van het jaar voor 1990 in gebruik en zijn alle drie PWR-reactoren. Momenteel staat nog vast dat er twee tot eind april 2023 open moeten gehouden worden, zodat er nog energie genoeg is voor de winter. Dit ondanks dat de marktprijzen hoog zijn door het uitzetten van de gaskraan in Rusland.

(a.s., 2022)

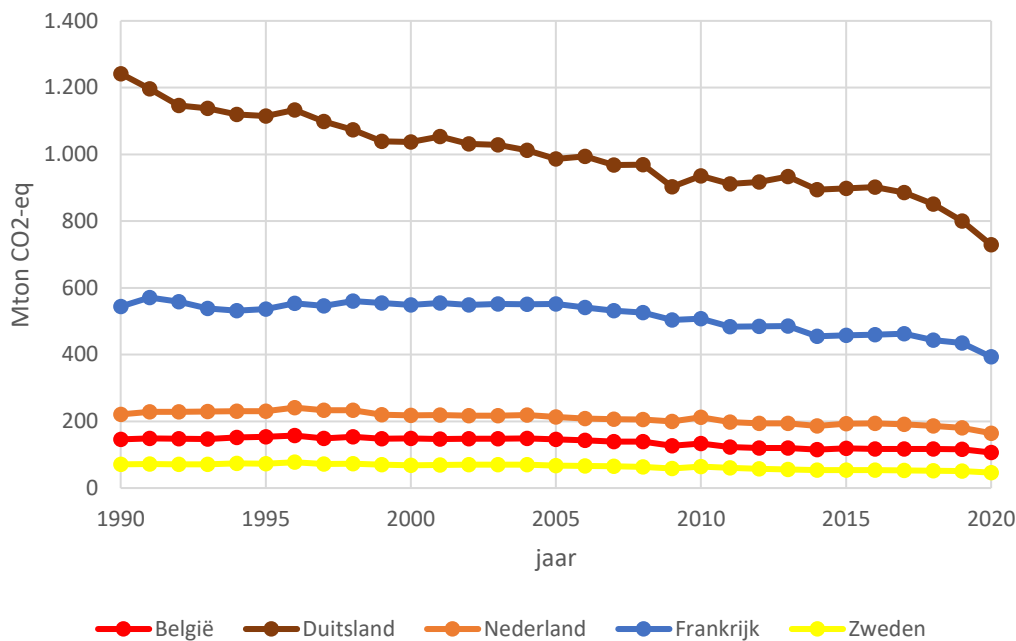
(Nuclear Power in Germany, 2022)

## Vergelijking

Nu wordt België met zijn buurlanden vergeleken o.b.v. de totale uitstoot van broeikasgassen. De vergelijking van de totale uitstoot van CO<sub>2</sub> tussen de landen is terug te vinden in bijlage 14.4. Daarnaast is Zweden de koploper op het gebied van de klimaatdoelstellingen en het opwekken

van groene energie. Als laatste zal een overzicht per land teruggeven worden uit welke bronnen ze voornamelijk energie opwekken.

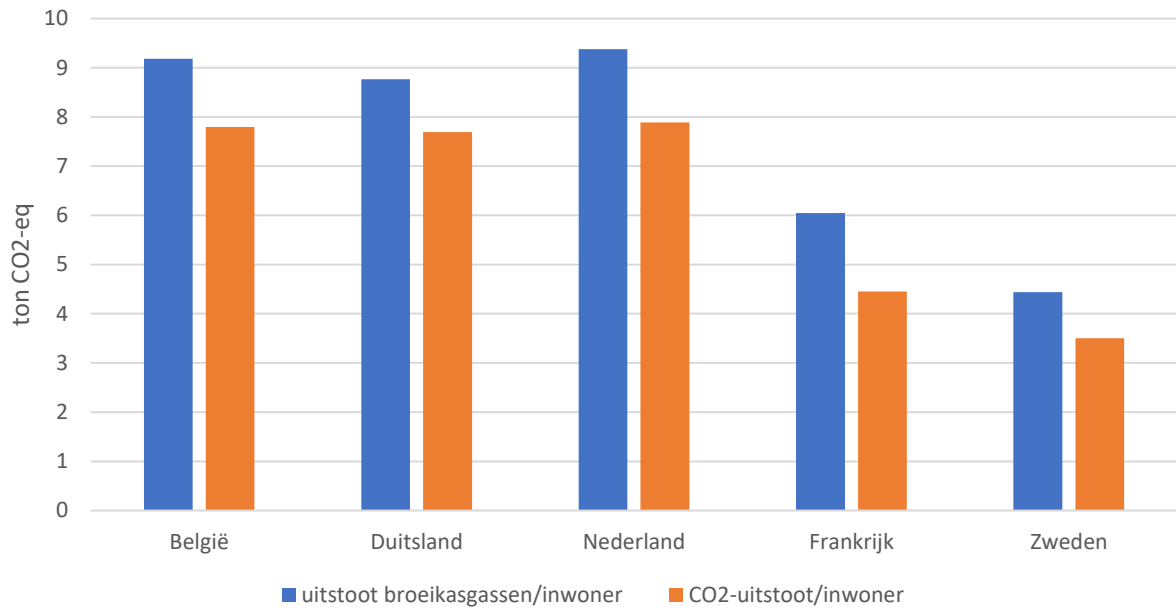
Figuur 31 geeft aan dat Duitsland met veel voorsprong de grootste uitstoot heeft. Ze hebben hoge reductiedoelstelling en dit is ook duidelijk te zien, want de totale uitstoot vertoont in de loop der jaren een sterk dalende trend. Dit komt vooral door het stoppen van de kolenmijnen. Frankrijk vertoont een lichtere daling, maar haalt toch steeds haar doelstellingen. De uitstoot van Frankrijk en Duitsland zijn veel groter dan landen zoals België, Nederland en Zweden, omdat ze veel groter zijn en een veel grotere bevolking hebben. Duitsland heeft tot wel acht keer meer mensen dan Zweden en Frankrijk 6,7 keer meer mensen. Daarom is het misschien beter om te kijken wat de uitstoot per inwoner is. Dit wordt teruggegeven in Figuur 32.



Figuur 31: Totale uitstoot van broeikasgassen

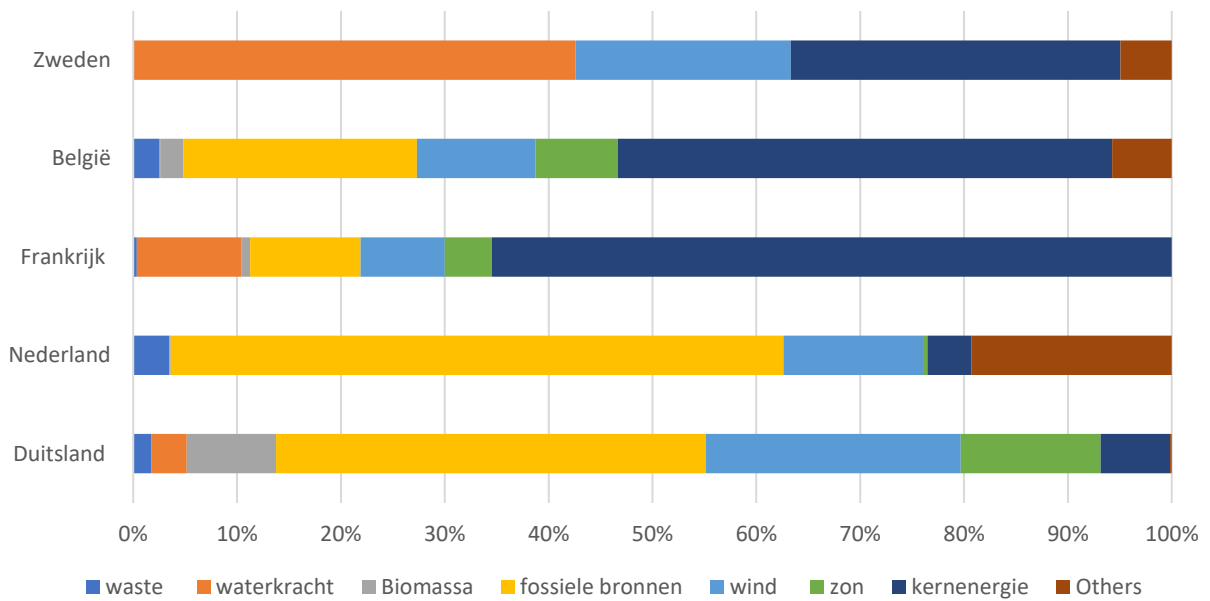
(Team, 2021)

Dit brengt een heel ander beeld naar voren. Nu is Nederland de grootste uitstoter. Om dit te verklaren moet gekeken worden op welke manier er energie opgewekt wordt (Figuur 33). In Nederland wordt voor het grootste deel met fossiele bronnen energie opgewekt. Bij de verbranding van fossiele brandstoffen komt CO<sub>2</sub> in hoge concentraties voor. Deze levert dan ook de grootste bijdrage aan het broeikas effect. Hetzelfde geldt voor Duitsland, maar dit neemt sterk af met de jaren, omdat hun fossiele bronnen tegen 2038 stopgezet worden. België produceert veel van zijn energie door zijn kerncentrales. Ook al is België een klein land, toch is het een grote vervuiler. Zijn grootste uitstoot komt uit de industrie en daarna volgt het transport en residentiële verwarming. Nu dat veel nieuwbouw woningen warmtepompen of zonneboilers zetten kan dit in de toekomst dalen. Doordat Frankrijk voor het grootste deel gebruik maakt van kernenergie (lage uitstoot) is zijn uitstoot per inwoner veel lager. Zweden gebruikt niets van fossiele bronnen. Ongeveer 60% van hun uitstoot is afkomstig uit het buitenland en is ingebed in import.



Figuur 32: Uitstoot per hoofd van de bevolking

(Team, 2021)



Figuur 33: Bronnen voor elektriciteitsproductie per land (2022)

(public net electricity generation, 2022)

(klimaat.be, 2019)

## 8 Studie naar windmolenparken op zee

In dit hoofdstuk worden eerst de windmolenparken in kaart gebracht en de verschillende projecten eromheen die dit tot stand brengen voor o.a. het transport van de elektriciteit naar land. Er zal daarnaast wat dieper ingegaan worden op de gekende problemen rond het transport van die elektriciteit en hoe die juist worden opgelost. Doordat er soms meer wind op zee is en dus meer energie opgewekt wordt dan dat er op land verbruikt wordt, zal deze ergens en op een bepaalde manier opgeslagen worden. Hoe dit juist gebeurt, lees je hieronder.

In 2022 kwam ongeveer 12% van de elektriciteit in België van windenergie. 7% daarvan kwam van windmolens op zee. Uit de formule voor het vermogen van een winturbine kan afgeleid worden dat dit percentage vooral met de windsnelheid te maken heeft. Natuurlijk is het aantal windmolens en de aanwezigheid van wind ook van belang, een jaar met minder wind kan dit percentage enorm naar beneden halen.

$$P = \frac{1}{2} * \rho * \eta * A * v^3$$

Met

$\rho$ : dichtheid van lucht [ $\frac{kg}{m^3}$ ]

$v$ : stromingssnelheid [ $\frac{m}{s}$ ]

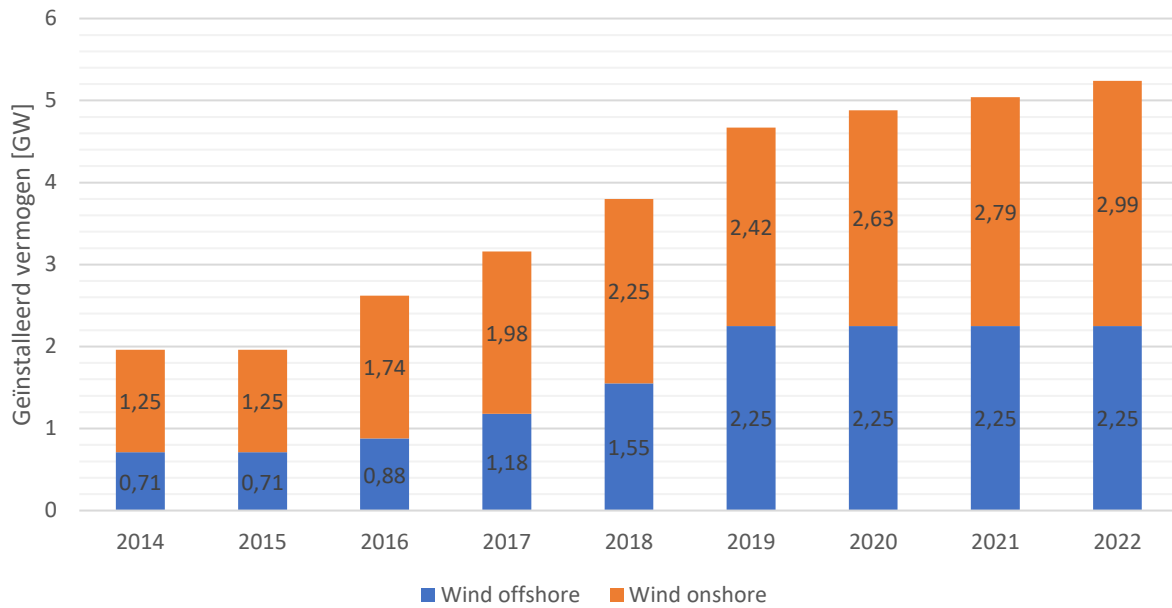
$A$ : oppervlak van de turbinestroming [ $m^2$ ]

$\eta$ : het rendement (generator, aerodynamisch, vermogensregeling) [%]

België wordt een grote vervuiler genoemd, maar doet zijn best om zijn buurlanden te achtervolgen o.a. door het uitbouwen van windmolenparken op zee. De vraag luidt dan: “Waarom gaan niet alle molens naar zee?”. Als het op zee stormt, moeten de molens afgeschakeld worden als bescherming. De molens op land zullen dan vaak op vol vermogen draaien en kunnen dan die vermindering van stroomproductie opvangen. Windmolens op zee vragen wel meer onderhoud, maar doordat het daar vaker en harder waait is hun capaciteitsfactor<sup>9</sup> hoger en dus brengen ze veel meer op. Deze bedraagt op zee gemiddeld 40%, terwijl de molens op land gemiddeld een capaciteitsfactor van ongeveer 24% hebben. Op Figuur 34 is de evolutie van het geïnstalleerd vermogen van windenergie op land en op zee in België te zien.

<sup>9</sup> De capaciteitsfactor is de verhouding van de werkelijk geproduceerde energie tot de energie die de windturbine kan produceren op vol vermogen.





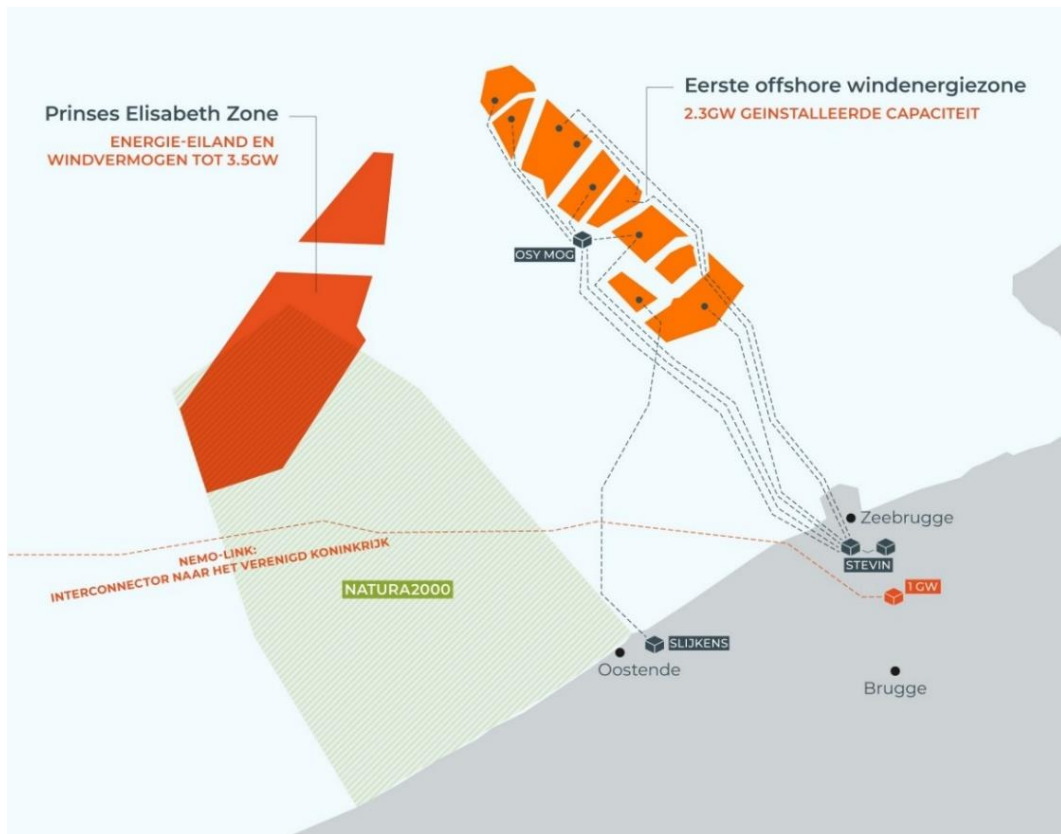
Figuur 34: Evolutie geïnstalleerd vermogen windenergie in België

(public net electricity generation, 2022)

(Steenhorst)

## OSY MOG

Figuur 35 toont de eerste windenergiezone die nu is volgebouwd en waarvan de capaciteit 2,25 GW (op kaart 2,3 GW) bedraagt. Tot 2019 trok elk windmolenpark zijn kabels eigenhandig tot aan land. Dit kan na verloop van tijd voor problemen zorgen en dus werd in 2019 een stopcontact gebouwd, OSY MOG of Offshore Switchyard Modular Offshore Grid genaamd. Dit was een investering van maar liefst €400 miljoen. Hierdoor wordt 40 km aan kabels voor de eerste zone uitgespaard en kunnen er minder fouten op verschillende plaatsen optreden. Het MOG bundelt de geproduceerde elektriciteit van de vier laatste offshore windparken: Mermaid, Northwester 2, Seastar, en Rentel, respectievelijk van boven naar onder op Figuur 35. Met drie hoogspanningskabels van elk 220 kV<sub>AC</sub> en 28 cm dik wordt het schakelplatform verbonden met Stevin-hoogspanningsstation in Zeebrugge en dit gebeurt over een afstand van 40 km. Deze stroomkabels kunnen een pak stroom aan, als één van de drie kabels het zou begeven, volstaan de andere twee ruimschoots om alle stroom van de vier parken naar de Belgische kust te blijven transporteren. Naast de vier parken is er nog ruimte om drie andere windmolenparken in de toekomst aan te sluiten.



Figuur 35: Aansluitingen en windmolenzones in de Noordzee

(Prinses Elisabeth Eiland, 2023)

Waarom is het MOG nu zo belangrijk?

- De aansluiting van toekomstige windparken is mogelijk.
- De impact op het mariene milieu wordt verminderd (minder kabels).
- Nieuwe hernieuwbare energiebronnen kunnen erop aangesloten worden (golfslag- en getijdenenergie, opslag...)
- Op termijn kunnen internationale interconnecties op zee uitgebouwd worden (zie Prinses Elisabeth Zone)
- Minder kabels, minder kosten en meer efficiëntie.

In bijlage 14.5 is een scope van het MOG-project te zien. Daarop is te zien dat de wisselspanning van bijvoorbeeld 33kV (afhankelijk van park) van het windmolenpark eerst via een offshore transformator station omgezet wordt naar een kabel op 220 kV op weg naar het schakelplatform.

(groep, 2019)

(XLPE Submarine Cable Systems Attachment to XLPE Land Cable Systems)

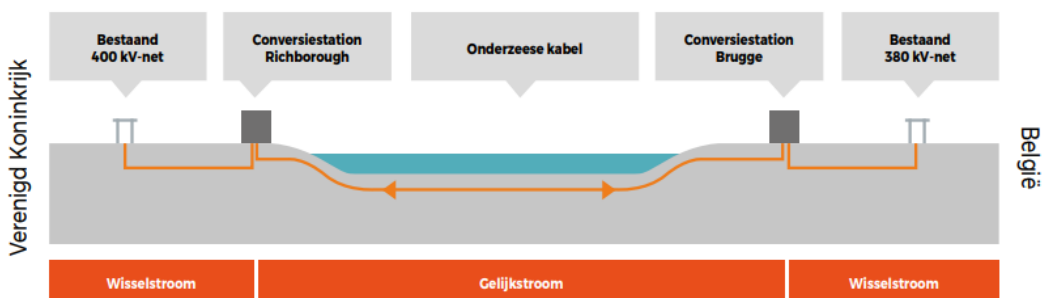
## Stevin project

Het Stevin-station in Zeebrugge is het grootste hoogspanningsstation van België en kan tot 3000 MW transporteren (vergelijkbaar met drie kerncentrales). Het is verbonden met het MOG en transformeert de elektriciteit van de windturbines offshore (220 kV van MOG en 150 kV van oudere windparken) naar 380 kV<sub>AC</sub> (hogere spanning → lagere stroom → minder jouleverliezen) om het vervolgens landinwaarts te transporteren. Ook zal het de decentrale energieproductie transporteren op het hoogspanningsnet. Op deze manier kan de haven van Zeebrugge, West- en Oost-Vlaanderen meer gebruik gaan maken van de opgewekte energie op zee om zo de overgang te maken naar klimaat neutraliteit. Het Stevin-project transporteert ook de elektriciteit van het Nemo-link project (zie verder), zo stijgt ook de bevoorradingzekerheid in Vlaanderen. De nieuwe hoogspanningslijn van 380 kV loopt van Zeebrugge tot in Zomergem. Deze uitbreiding gebeurt zowel ondergronds als bovengronds over een afstand van 47 km. Hierbij worden 21 km nieuwe lijnen gelegd, 16 km van de bestaande lijnen worden hergebruikt en 10 km komt ondergronds te liggen met een tunnel onder het Boudewijnkanaal. Naast het plaatsen van deze nieuwe verbindingen van 380 kV, wordt ook 53 km aan oude bovengrondse lijnen van 150 kV afgebroken. Tegelijk wordt er 35 km aan 150 kV kabels ondergronds gelegd. Het traject van het Stevin project landinwaarts is terug te vinden in bijlage 14.6.

(groep, 2019)  
(Stevin)

## Nemo-link

Nemo-link is een 140 km lange bipolaire hoogspanningskabel tussen Brugge (België) en Richborough (Verenigd Koninkrijk) en kan een vermogen van 1000 MW bij 400 kV transporteren. Op Figuur 36 is te zien dat het transport onder zee gebeurt op gelijkspanning en op land op wisselspanning, de omzettingen naar beide gebeuren in de conversiestations. Het grootste doel van zo'n interconnector op Europese schaal was dat integratie van hernieuwbare energie gemakkelijker wordt (van VK en omgekeerd) om zo de bevoorradingzekerheid te verhogen en de stroomprijzen te verlagen. Deze interconnector werd begin 2019 afgewerkt.



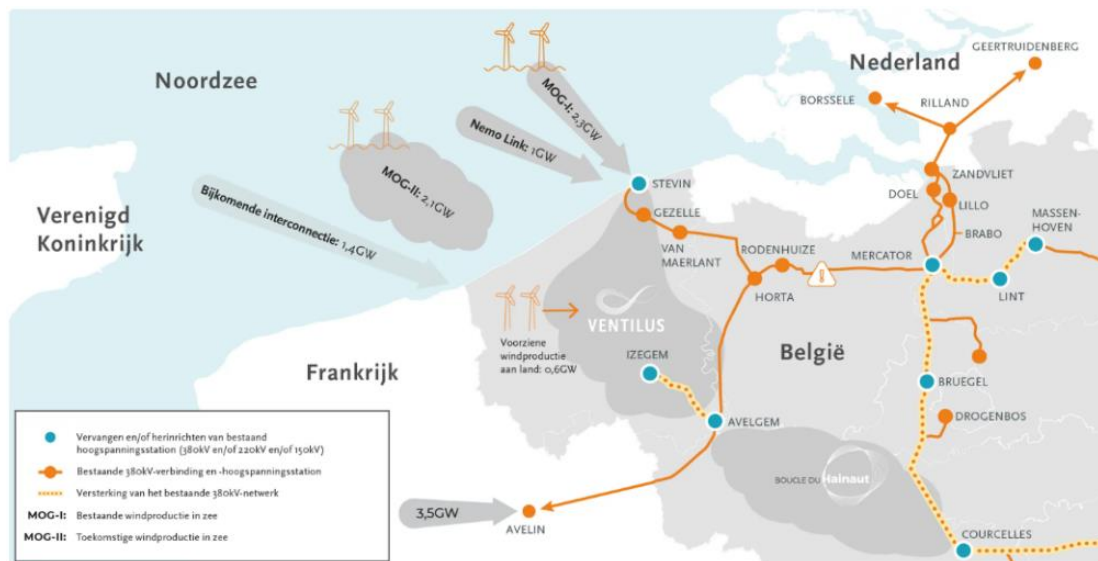
Figuur 36: Onderzeese interconnector met het Verenigd Koninkrijk (Nemo-link)

(groep, 2019)

(groep, 2019)

## Ventilus project

Ventilus omvat een 380 kV<sub>AC</sub> hoogspanningslijn met een capaciteit van 6 GW die zal worden gelinkt aan het Stevintracé en vormt eveneens redundantie aan de Stevin-lijn. Het tracé voor Ventilus ligt nog niet vast en zal gebeuren in samenspraak met de bevolking. Er zijn wel al enkele mogelijke routes uitgetekend (zie bijlage 14.7). Het Stevin-project is momenteel de enige 380 kV<sub>AC</sub>-hoogspanningsverbinding die de kust met het binnenland verbindt. Met Ventilus zal nog meer groene stroom getransporteerd kunnen worden vanop de Noordzee naar het land. Door beide lijnen aan elkaar te verbinden, samen met Nemo-link zal het net bovendien robuuster en betrouwbaarder worden. Zeker nu de kerncentrales gaan sluiten, zal 50 % van de totale elektriciteitsproductie vervangen moeten worden door groene energieopwekking. Daarom worden er steeds meer parken op zee gebouwd om het net steeds meer groener te maken en uit te breiden.



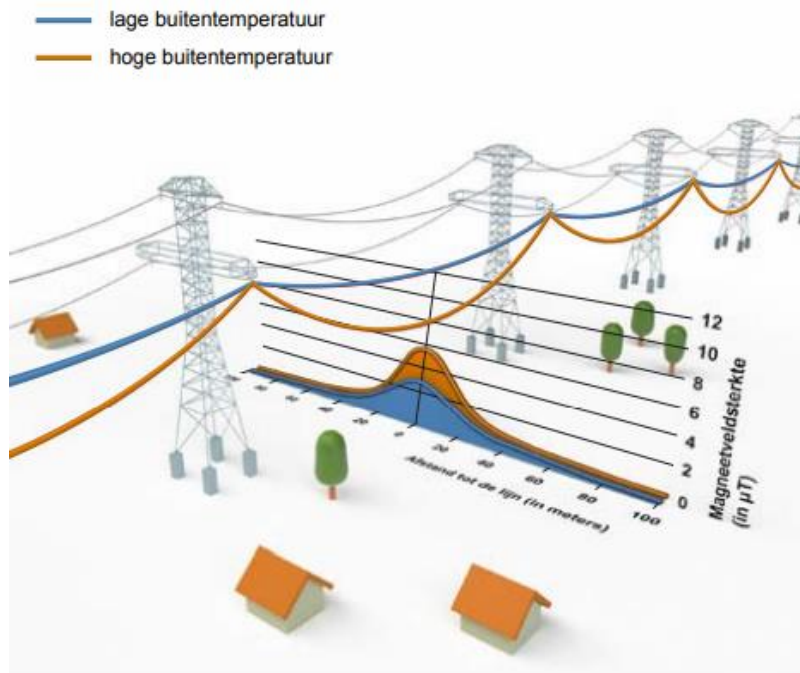
Figuur 37: Overzicht vermogen uitwisselingen van windmolenparken op zee en landinwaarts

(Ventilus, 2023)

De verbinding van Stevin kan ‘maar’ een vermogen van 3 GW transporteren, terwijl de eerste MOG (OSY) en de vier oudere windparken samen een vermogen naar land brengen van ongeveer 2,3 GW en Nemo-link een vermogen van 1 GW. Dit hoogspanningsstation is zo berekend, omdat de windparken niet altijd op vol vermogen draaien en dat de Nemo-link ook dient om energie met het VK uit te wisselen. De bouw van een tweede park (Prinses Elisabeth zone) is zelfs al bezig en dit heeft als gevolg dat nog een tweede hoogspanningsstation gebouwd moet worden. Dit zal opnieuw in Zeebrugge gebeuren. Van daaruit kan dan alle offshore opgewekte energie vervoerd worden via een nieuw project, Ventilus genaamd. Deze zal dat vermogen dan op land op 380 kV<sub>AC</sub> vervoeren.

De bevolking heeft over de uitbreiding met het Ventilus project allerlei kritieke punten naar voor geschoven, omdat deze lijnen met hoge vermogens voorbij 10.000 gezinnen passeren. Deze hoge vermogens (max. 6 GW) wekken echter EM-velden op. Is dit schadelijk voor de omgeving? Zou de verbinding niet beter op gelijkstroom gebeuren en/of ondergronds?

De sterkte van een elektrisch veld (V/m) langs een luchtlijn hangt af van de spanning en de afstand tot de lijn. Dus hoe hoger de spanning, hoe hoger het elektrisch veld. Door beplanting en bebouwing rond de luchtlijn zwakt het veld snel af. Daarnaast is een magnetisch veld (A/m) afhankelijk van de hoeveelheid stroom dat door de lijn gaat, de afstand en de configuratie van de draden (1 of 2 circuits, type mast). Het elektrisch veld in een woning is al snel 10 tot 100 keer zwakker dan daarbuiten, het magnetisch veld daarentegen wordt bijna niet afgezwakt door huizen of planten. Daarom gaat de aandacht van onderzoek eerder naar magnetische velden.



Figuur 38: Relatie tussen afstand tot de lijn en magneetveldsterkte op de grond (hoogte > 6m bij 380 kV)

Uit verschillende onderzoeken i.v.m. het risico op kinderleukemie voor gezinnen wonend in een omgeving van hoogspanningsluchtlijnen is gebleken dat een veldsterkte van meer dan 0,3 à 0,4  $\mu\text{T}$  het risico op kinderleukemie naar schatting 2,7 maal verhoogt. Het risico op hersentumoren wordt daarbij naar schatting met 1,4 maal verhoogd. Tot op heden zijn er nog altijd geen concreet wetenschappelijke bewijzen i.v.m. nadelige gezondheidseffecten als gevolg van langdurige blootstelling aan lage intensiteitsniveaus. Vlaanderen heeft richtlijnen om het aantal woningen die binnen de 0,4  $\mu\text{T}$  corridor vallen te beperken. De absolute limieten liggen op 5 kV/m voor elektrische velden en op 100  $\mu\text{T}$  voor magnetische velden. Als nu specifiek gekeken wordt naar het Ventilus project, waarbij de luchtlijnen aangesloten worden op een vermogen van 4,1 GW met een jaargemiddelde belasting van 30 %, dan zou volgens berekeningen het magnetisch veld 12  $\mu\text{T}$  bedragen. Als alle windmolens tegelijk draaien, zou dat oplopen tot 24  $\mu\text{T}$  (60% van vermogen), het kan zelfs stijgen tot 37  $\mu\text{T}$  (90 % van vermogen). Met behulp van volgende formule kan de afstand berekend worden vanaf de luchtlijn waar die waarden optreden:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d}$$

Met

B: magnetische inductie [T]

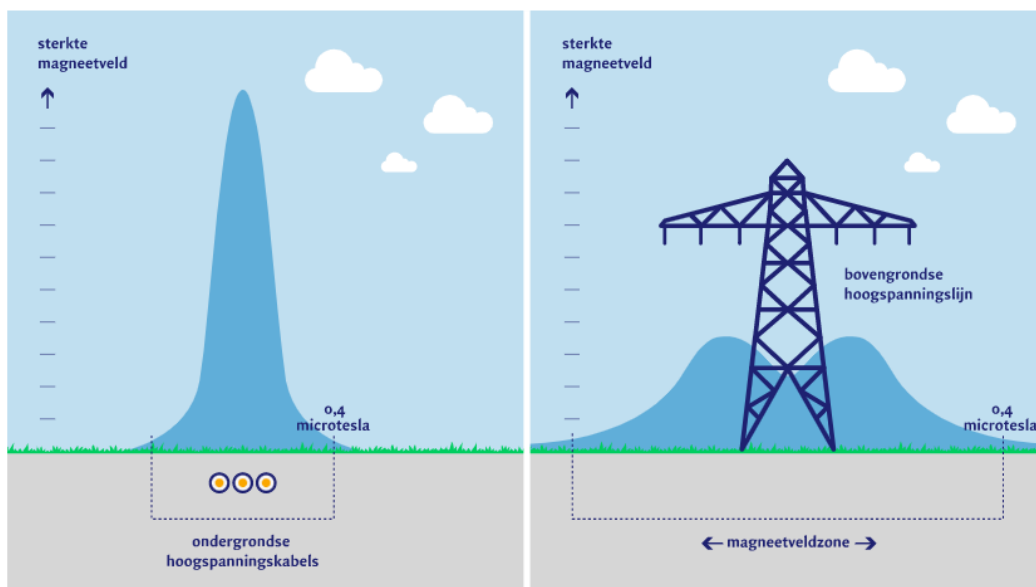
I: stroom door geleider

d: afstand vanaf geleider waar grootte van magnetisch veld optreedt [m]

$\mu_0$ : magnetische permeabiliteit (lucht) =  $4\pi \cdot 10^{-7}$  N/A<sup>2</sup>

Daaruit volgt dat de waarden optreden op een afstand van ongeveer 31 m van de stroomvoerende geleider, dit met een lijnstroom van ongeveer 6229 A, gerekend met een arbeidsfactor van één. De grenswaarde van  $0,4 \mu\text{T}$  treedt dan op op een afstand van 3115 m en voor de absolute limiet van  $100 \mu\text{T}$  is dat 13 m. Als de hoogspanningsgeleider volledig belast wordt met een vermogen van 6 GW, zal de grenswaarde van  $0,4 \mu\text{T}$  bij 90 % belasting bekomen worden op een afstand van 4 km. De absolute limiet hierbij bevindt zich op een afstand van 18 m. Dus gezinnen op een afstand van 4 km zijn veilig gesteld volgens de richtlijnen, indien de kabels voor 90 % zouden belast worden en bovengronds liggen.

Bij het ondergronds plaatsen van de lijnen zal er geen elektrisch veld geproduceerd worden, omdat de velden worden afgeschermd door de isolerende mantel rondom de kabel. Anderzijds zal het magnetisch veld niet tegengehouden worden, dat zal zelfs net boven de kabel sterker zijn dan bij een luchtlijn met eenzelfde stroomsterkte. Het magnetisch veld neemt bij een ondergrondse kabel wel veel sneller af (zie Figuur 39). Een groot nadeel van hoogspanning ondergronds te plaatsen is dat het dubbel zo duur is en dat het energieverlies groter is. In die kosten zitten het plaatsen van extra spoelen... om het reactief vermogen te compenseren en die spoelen leiden eveneens tot verlies en resonanties. Daarnaast kunnen ondergrondse kabels veel moeilijker hun warmte kwijt, waardoor meer kabels parallel moeten liggen en waardoor de kosten terug oplopen.



Figuur 39: Vergelijking van het magnetisch veld van een ondergrondse en bovengrondse hoogspanningslijn

(Waarom kunnen niet alle hoogspanningslijnen ondergronds?)

Werken in gelijkstroom is een optie maar kent enkele belangrijke nadelen. Voor elke overgang van gelijkstroom naar wisselstroom is een conversiestation nodig. Dit maakt het moeilijker om aftakkingen te maken naar andere verbindingen in wisselstroom en elke conversie is een verlies. Ook dient Ventilus als redundantie voor de Stevin-lijn, dus als de Stevin-lijn uitvalt, moet de gelijkstroom van Ventilus eerst omgezet worden en dit wordt op een zeer complexe en nauwgezette manier geregeld. In zo'n systeem wordt bij elke hapering, foute meting of ongekende situatie de installatie afgeschakeld om de hoogtechnologische infrastructuur te beschermen. Hierdoor kan een sneeuwbal effect ontstaan, waardoor alle productie en import in één keer verloren gaat en het hele elektriciteitsnet uitvalt. Dat betekent dat wisselstroom de enig aanvaardbare technologie is voor de uitbouw van Ventilus.

Dankzij Ventilus zou op termijn ook een tweede onderzeese interconnector met het Verenigd Koninkrijk mogelijk zijn. Deze zal Nautilus heten en zal bestaan uit twee interconnecties, één tussen het Verenigd Koninkrijk en het energie-eiland in de tweede zone en één tussen het energie-eiland en België.

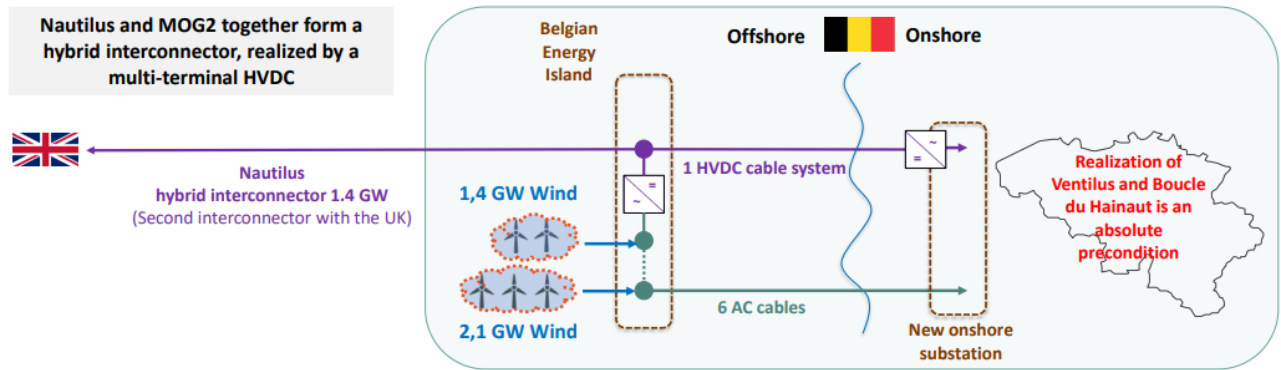
(Ventilus, 2023)

(Gezondheidsraad, 2018)

(Elektrische en magnetische velden, 2023)

## Prinses Elisabeth Zone

Aangezien zone één is volgebouwd, werd al een plan ingediend en goedgekeurd voor een tweede zone, de Prinses Elisabethzone. In deze zone zal zich het eerste kunstmatige energie-eiland ter wereld bevinden dat verschillende windmolenparken op zee zal verbinden met het vasteland en nieuwe verbindingen zal maken met andere landen (Nautilus en/of TritonLink). Het is dus een soort energiehubs. Er zijn al enkele parken in die zone in gebruik. Dit gaat dan over een vermogen van 2,1 GW, dat uitgebreid zal worden naar een vermogen van 3,5 GW windenergie. Opnieuw is in deze zone een stopcontact nodig. Dit wordt MOG-II genoemd en van daaruit zullen zes onderzeese kabels naar land vertrekken. De kabels zullen een vermogen van 2,1 GW kunnen transporteren op een spanning van 220 kV<sub>AC</sub>. Daarnaast zal nog een onderzeese HVDC-kabel van 1,4 GW liggen om de interconnectie te maken met andere omliggende landen. (zie Figuur 40). Als dat vermogen aan land komt, kan het dan getransporteerd worden via de projecten Ventilus (in Vlaanderen) en Boucle du Hainaut (in Wallonië). Dus zonder deze twee laatste projecten kan het energie-eiland niet functioneren. Het volledige project zou klaar moeten zijn tegen 2030. Hiermee zet Elia een belangrijke stap in de uitbouw van het Europees net op zee en de realisatie van de Europese doelstellingen om tegen 2050 300 GW offshore windcapaciteit te hebben.



Figuur 40: Vermogen uitwisseling tussen het energie-eiland en land

(Genêt, Vos, & Steve Van Campenhout, 2022)

(Prinses Elisabeth Eiland, 2023)

(Genêt, Vos, & Steve Van Campenhout, 2022)

## Transport van elektriciteit

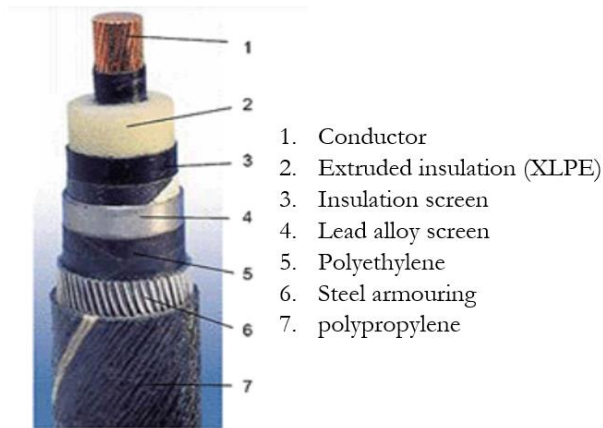
De verschillende windparken op zee produceren heel veel energie en dit moet aan land gebracht worden m.b.v. kabels. De keuze van die kabels is niet altijd even simpel. Er moet o.a. rekening gehouden worden met de afstand, het vermogen, het capaciteif zijn van de kabels ...

Tabel 10 geeft de verschillende gebruikte kabels voor de verbindingen in de Noordzee terug.

Tabel 10: Gebruikte kabels voor transport van windenergie op zee

Project	Type kabel	Vermogen [MW]	Spanning [kV]
Lijnen van windmolens naar MOG-I	Submariene kabel met drie kernen en optische vezels	1030	33 (AC) (<66)
Lijnen van MOG-I naar land	HVAC XLPE submariene kabelsysteem met drie kernen en optische vezels	3000	220 (AC)
Lijnen van MOG-II naar land (ligt er nog niet)	HVAC ? HVDC ?	2100 1400	220 (AC)
Ventilus	Nog niet bekend	6 000	380 (AC)
Nemo link	HVDC XLPE submariene kabelsysteem met optische vezels	1000	400 (DC)





Figuur 41: HVDC XLPE onderzeese kabel gebruikt bij Nemo link

(J-Power Systems Wins Contract with NEMO LINK for HVDC Subsea Interconnector Cable System between UK and Belgium, 2015)



Figuur 42: Onderzeese XLPE kabel gebruikt bij de transitie van MOG-I naar land

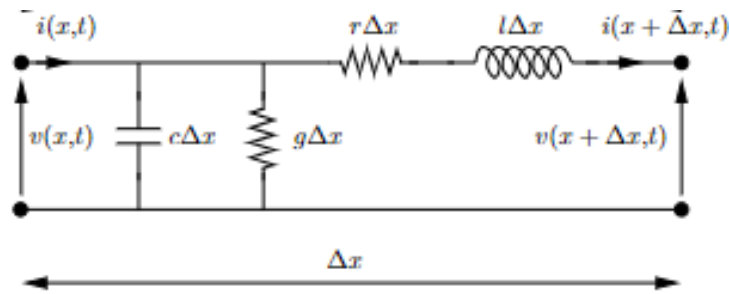
(ZMS, sd)

Figuur 41 en Figuur 42 geven een HVDC- en een HVAC-kabel terug, die in de Noordzee gebruikt worden. De geleiders kunnen samengesteld zijn uit koper of aluminium. De isolatie biedt een effectieve barrière tegen het extreem hoge potentiaalverschil tussen de binnenste en buitenste potentiaaloppervlakken. Daarvoor wordt meestal cross-linked polyethyleen gebruikt (XLPE). De waterbarrièremantel beschermt de isolatie tegen schade veroorzaakt door het binnendringen van water en het pantser (metalen omhulsel) biedt mechanische bescherming. Daarnaast is er nog een buitenmantel die zorgt voor bescherming tijdens transport en diepe begraving, meestal is dit polypropyleen touw. De optische vezels in de onderzeese kabels spelen een rol bij het monitoren en diagnosticeren van temperatuur en vervorming.

Elke kabel kan vervangen worden door meerdere stukjes kabel. In Figuur 43 is een vereenvoudiging van zo'n stukje afgebeeld. Onderzeese kabels zijn zeer capacitief, dit komt omdat ze goed geïsoleerd zijn. Als er hierbij wisselstroom gebruikt wordt (dus met bepaalde frequentie), zal de impedantie van de condensator ( $Z_C = \frac{1}{j2\pi fC}$ ) niet oneindig zijn, waardoor er een capacitieve stroom vloeit. De impedantie van de spoel ( $Z_L = j2\pi fL$ ) zal ook een bepaalde waarde aannemen. Dat betekent dat een deel van de stroom verloren gaat door de capacitieve stroom en door het spanningsverlies over de spoel. In Figuur 44 is dan ook duidelijk te zien dat de kosten van een wisselstroomkabel snel toenemen met de afstand. Daarnaast zal hierbij ook het skineffect<sup>10</sup> een rol spelen. Bij alsmar grotere afstanden neemt de weerstand steeds toe, zodat een wisselstroomkabel onrendabel wordt als gevolg van de hitte-ontwikkeling en de steeds lagere

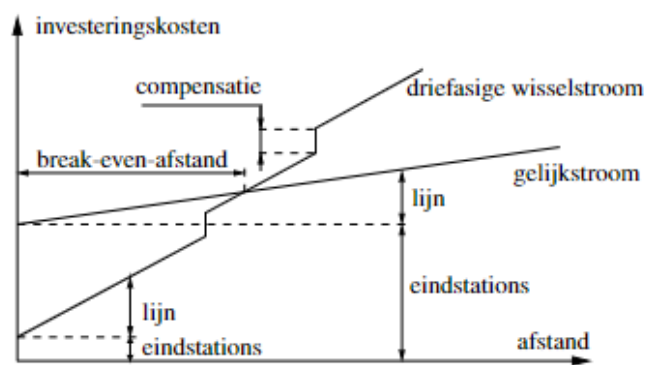
<sup>10</sup> Bij het skineffect zal de stroom bij een hogere frequentie meer aan de buitenkant van de geleider vloeien en dus zal de weerstand toenemen en dus zal er energieverlies optreden.

efficiëntie. De beginkosten van zo'n kabels zijn laag, omdat er geen conversiestations gebruikt moeten worden. De wisselstroom kan direct naar de eindverbruiker getransporteerd worden.



Figuur 43: Vereenvoudiging van stukje kabel met lengte  $\Delta x$

(Vandevelde, 2022)



**break-even-afstand :**

- ca. 500 km voor luchtlijnen
- ca. 50 km voor kabels

Figuur 44: Kosten i.f.v. de afstand van gelijkstroomkabels vs. Wisselstroomkabels

(Vandevelde, 2022)

Bij gebruik van gelijkstroom (frequentie is nul) zal de impedantie van de condensator oneindig zijn, waardoor er geen capacatieve stromen optreden. De impedantie van de spoel zal nul zijn en dus treedt er geen spanningsverlies op. Bij een frequentie gelijk aan nul zal de stroom uniform verdeeld zijn over de geleider en dus zal er geen bijkomende weerstand optreden. In vergelijking met wisselstroom, heeft gelijkstroom enkel actieve stroom wat de verliezen ook een heel stuk lager maakt. Uit het feit dat gelijkstroom maar uit twee kabels bestaat en het voorgaande volgt dat de kosten van een gelijkstroomkabel niet zo snel stijgen met de afstand. Een nadeel is wel dat er bij de eindstations convertoren nodig zijn, wat de initiële kost heel hoog maakt. Dus gelijkstroomkabels zijn de beste keuze bij lange afstandskabels van ongeveer meer dan 50 km. Bij kortere afstanden blijven wisselstroomkabels de beste keuze. Daarnaast is het gebruik van een hoge spanning noodzakelijk, doordat een hoge spanning aanleiding geeft tot een lage stroom en dus lage jouleverliezen in de kabel. Als de spanning bijvoorbeeld verdubbeld, halveert de stroom bij eenzelfde vermogen door de kabel. Het jouleverlies is evenredig met de tweede macht van de stroom en dus zullen de jouleverliezen viermaal zo klein worden. Een lage stroom in de kabel zorgt dan eveneens voor kleinere velden.

## Gekende problemen

Bij het onderzeese transport van energie over lange afstand (DC-kabels) vormen er zich allerlei problemen. Zo'n kabels moeten een groot vermogen transporteren bij een hoog potentiaalverschil (minder energieverlies) en over een lange afstand. Onderzeese kabels beschikken ook over een stalen omhulsel o.a. als bescherming tegen het zoute water met als gevolg dat de kabel enorm dik en zwaar zal zijn. Een boot kan zo'n kabel niet in één keer dragen, dus zal de kabel in stukjes aan elkaar moeten gekoppeld worden. Dit betekent dat de weerstand in de kabel toeneemt en er dus energieverlies optreedt.

De meeste breuken blijven optreden op ondiepe hoogte (300 m) door vissen, ankers, elektrochemische erosie, oververhitting, gedeeltelijke ontladingen (zie verder), boomvorming... Daardoor kan een isolatiefout optreden, waardoor kortsluiting ontstaat. Dat betekent dat de kabels diep genoeg moeten ingegraven worden, maar te diepe ingraving kan de warmteafvoer sterk verhinderen.

Een probleem dat de universiteit van TU Delft volop onderzoekt is dat bij gelijkspanning de polariteit gelijk blijft en er dus ruimteladingen plaatselijk ophopen tussen isolatielaag en stroomdraad, waardoor er kinken ontstaan in de isolatielaag van de kabel. Hierdoor verkort de levensduur van de kabel, vergroot de kans op fouten en kan zelfs een isolatiefout optreden. Deze kabels moeten wel dertig tot vijftig jaar de zee in blijven.

Bij het plaatsen van een stroomkabel onder zee moet men overwegen om kwetsbare habitats waar mogelijk te vermijden. Daarom zal eerst een grondige analyse moeten gemaakt worden van de zee/oceaan waar de kabel zal komen. Er kunnen bijvoorbeeld ook wrakstukken in de weg liggen of enorme hoogteverschillen op bepaalde plaatsen.

Voor een kabel is het van belang dat deze niet te warm wordt, gezien een te hete geleider de kabelisolatie aantast, wat tot snelle veroudering en falen van de kabels kan leiden. De temperatuur van de kabel stijgt afhankelijk van de hoeveelheid stroom, het type kabelsysteem, de spanning en van de bodemomgeving. De ene bodem isoleert namelijk beter dan de andere. De grondige analyse van de bodem helpt bij het dimensioneren van zo'n kabel, toch kunnen er hier en daar hotspots ontstaan door het ophopen van zandgolven of organisch materiaal boven de kabel.

Een laatste probleem dat bij boten kan optreden is dat de stroom door de kabel een magnetisch veld veroorzaakt, waardoor het kompas verkeerd zal werken. Momenteel bestaat er nog veel onzekerheid rond de impact van deze velden op vissen. Hoe groter de stroom hoe groter het veld wordt. Bij het ontwerp van de kabel moet daardoor rekening gehouden worden met eventuele plaatselijke voorschriften betreffende de maximale kompasafwijking. Door de kabels van een bipolair systeem dicht bij elkaar te leggen, zullen de velden elkaar deels opheffen en zal dit effect verminderen. Hierbij vormt zich een ander probleem, want het naast elkaar leggen van de kabels betekent dat de kabels ook sneller opwarmen. De elektrische velden als gevolg van de hoge spanning worden zo goed als volledig tegengehouden door de metalen schermen rondom de geleider. Het magnetisch veld dringt door het metalen scherm.

(J-Power Systems Wins Contract with NEMO LINK for HVDC Subsea Interconnector Cable System between UK and Belgium, 2015)

(NV, 2013)

(Nexans)

(ZMS, sd)  
 (HVDC-zeekabels, 2022)  
 (An Introduction to High Voltage Direct Current (HVDC) Subsea Cables Systems)  
 (Smet, 2017)

## Stockage van elektriciteit

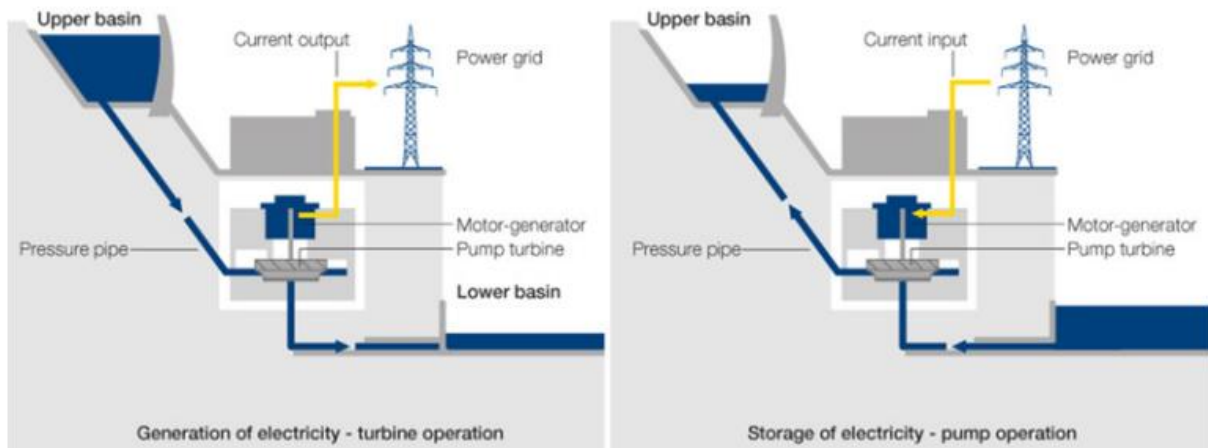
Het grote doel is om zo flexibel mogelijk om te gaan met hernieuwbare energie, want hernieuwbare energiebronnen produceren niet altijd energie als er energie nodig is. Flexibiliteit betekent de variabele productie zoveel mogelijk afstemmen op de variabele consumptie of omgekeerd. Opslagssystemen kunnen voor die flexibiliteit zorgen om zo optimaal mogelijk alle geproduceerde energie te benutten en congestie tegen te gaan. Op dit moment zijn opslagsystemen vaak nog te duur om op grote schaal te worden gebruikt. Ze hebben hoge investeringskosten en een relatief beperkte levensduur. Bovendien zijn er soms ook omzettingsverliezen door van wisselstroom over te gaan naar gelijkstroom en terug. Opslagtechnologieën kunnen onderverdeeld worden in vier categorieën naar gelang het type energie het opslaat: mechanische, elektrische, thermische en chemische energie. Ze kunnen ook onderscheid worden op basis van het tijdsbestek. Tabel 11 geeft de verschillende besproken technologieën terug.

Tabel 11: Verschillende opslagsystemen volgens opslagduur en type energie

Energievorm	Lange termijn	Middellange termijn	Korte termijn
Mechanisch	Hydro pomp en turbine Energiedonut Oceaan batterij	Gecomprimeerde lucht	Vliegwielen
Chemisch		Batterijen Waterstof	
Elektrisch			SMES (Super)condensator
Thermisch	Hoge temperatuur	Lage temperatuur	

### Hydro pomp- en turbine energie

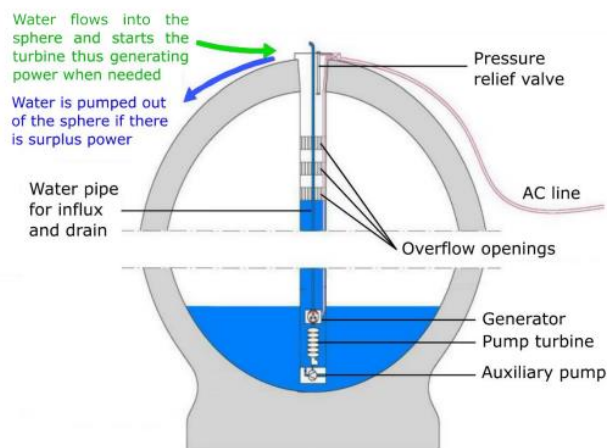
Bij dit mechanisme (zie Figuur 45) wordt water opgepompt naar een hoger gelegen reservoir als de productie groter is dan de vraag. Indien later de vraag hoger is, laat men het water van het hoger gelegen reservoir naar het lager gelegen reservoir stromen om zo turbines aan te drijven die elektriciteit produceren. De capaciteit hangt af van de grootte en hoogte van het hoger gelegen reservoir. Deze technologie kent een vrij hoog vermogen en efficiëntie van ongeveer 70-80 %. Een groot nadeel van deze technologie is de geografische impact. Landen met bergen kunnen hiervan volop gebruik maken, andere landen zoeken oplossingen. Eentje daarvan is zo'n centrale onder water bouwen. Het principe is hetzelfde, maar er bevindt zich nu een reservoir onder water.



Figuur 45: Pompcentrale aan land

(F.Pierie & Someren)

Voor op zee of indien er weinig hoogteverschil is, kunnen voor dit systeem ook reservoirs onder water gebruikt worden. Figuur 46 toont de werking van een veel gebruikt sferisch reservoir voor onder water. Voor een grote capaciteit zijn er dan verschillende grote reservoirs nodig.

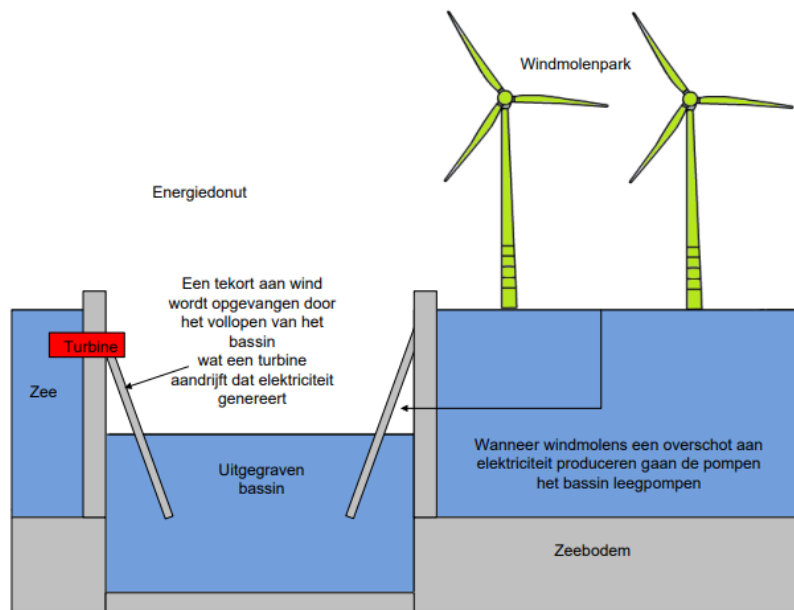


Figuur 46: Onder water opslag reservoir

(Berl, 2017)

### Energie-atol (energiedonut)

De werking van een atol is heel gelijkaardig als de voorgaande technologie. In Figuur 47 is de werking uitgeschreven. In plaats van batterijen, waterstof, CAES... zou dit misschien wel de meest nuttige, gunstige en groene oplossing zijn om de offshore energie op te slaan. In België bevindt zich al een energie-atol voor de kust van Wenduine. In de toekomst zal er nog eentje gebouwd worden voor de kust van Zeebrugge.

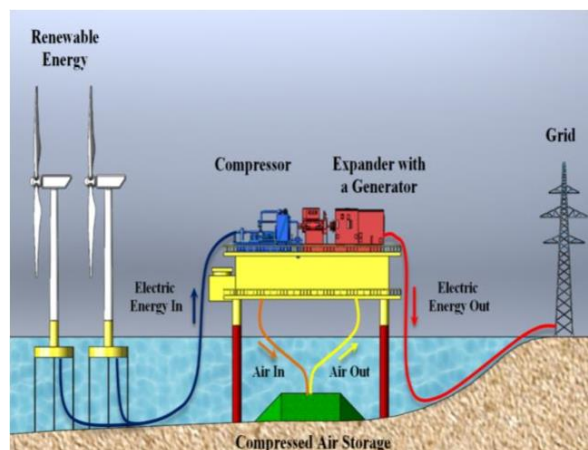


Figuur 47: Werking energiedonut

(Schokkaert, 2014-2015)

### Opslag door gecomprimeerde energie (CAES)

Hierbij zal de overtollige energie een motor aandrijven die op z'n beurt een compressor aandrijft en lucht in een zoutholte of een reservoir onder water duwt. Daar ontstaat lucht onder hoge druk (energie). Bij een grote vraag zal die gecomprimeerde lucht een turbine aandrijven die in verbinding staat met een generator om zo stroom op te wekken. Doordat lucht een gas is, heeft deze techniek een hoge energiedichtheid en kan het een groot vermogen leveren op korte tijd. Anderzijds hangt het vermogen af van het volume van de holte. Een nadeel is dat de lucht moet verwarmd worden voordat het naar de turbine gaat, omdat een hoge temperatuur en druk de efficiëntie en energie-output van de turbine verhogen. Deze warmte komt van de verbranding van aardgas. Figuur 48 toont de werking van dit opslagsysteem offshore. De efficiëntie van zo'n systeem bedraagt ongeveer 80-85 %.



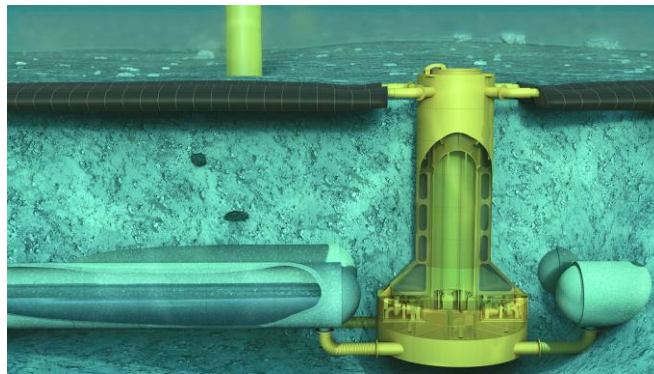
Figuur 48: Energieopslag door gecomprimeerde lucht

(Conceptual schematic of Ocean Compressed Air, 2023)

Een betere techniek is door de warmte gecreëerd door de compressor op te slaan en zo de lucht in een warmtewisselaar op te warmen voordat het naar de turbine gaat. Zo verhoogt de efficiëntie en verlaagt het gebruik van gas, waardoor de elektriciteitsprijs daalt.

### Oceaan batterij

Een heel gelijkaardige werking als voorgaande energieopslag is de oceaan batterij (zie Figuur 49). In 2025 zal dit systeem offshore in gebruik worden genomen. Bij overschot aan energie pompt het systeem water uit de reservoirs in de flexibele blazen op de zeebodem om energie op te slaan als water onder hoge druk. Indien er vraag naar stroom is, zal het water uit de blazen via turbines die generatoren aandrijven terug naar de starre reservoirs stromen. De oceaan batterij zou een efficiëntie van 80 % hebben en een levensduur van meer dan 20 jaar afhankelijk van het gebruikte materiaal. Het systeem lost immers veel problemen van de andere opslagtechnologieën op zoals: ze kunnen niet lekken zoals bij sommige batterijen, heel lange levensduur, kunnen veel energie opslaan, lage kosten, volledig duurzaam ontwerp...

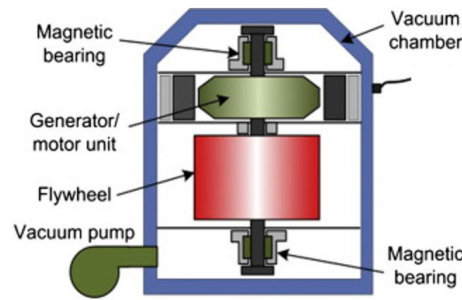


Figuur 49: Oceaan batterij

(Ocean battery, the new utility-scale offshore energy storage, 2022)

### Vliegwiel

In vergelijking met voorgaande opslagtechnologieën, is het vermogen van een vliegwiel veel lager, waardoor dit minder de functie 'opslag' op zee zal hebben. De werking (zie Figuur 50) ervan is als volgt: bij overschot aan energie brengt een motor (een) vliegwiel(en) in beweging ( $P = \text{actief}$  vermogen  $> 0$  in VRS). Indien er vraag naar energie is, zullen de vliegwielen via een rem vertraagd worden ( $P < 0$  in VRS) en werken de motoren nu als generator, waardoor energie terug gestoken wordt. Dit systeem kent een efficiëntie van 95 % en kan zeer snel reageren met het net. Om de efficiëntie zo hoog te houden, worden de vliegwielen vaak in vacuüm gebruikt. Doordat FESS (flywheel energy storage system) snel kan reageren wordt ze niet enkel gebruikt voor opslag, maar ook om korte onderbrekingen op te vangen en de veranderende netfrequentie stabiel op 50 Hz te houden. Door het gebruik van synchrone machines gebeurt dit automatisch. Bij een elektriciteitsoverschot ( $f > 50\text{Hz}$ ) zal de machine als motor werken en dus energie onttrekken (frequentie zal dalen). Bij een groter verbruik ( $f < 50\text{Hz}$ ) zal de machine als generator werken, waardoor ze energie vrijgeeft. Dit soort opslag is voor op korte termijn, omdat hun zelfontlading hoog is.

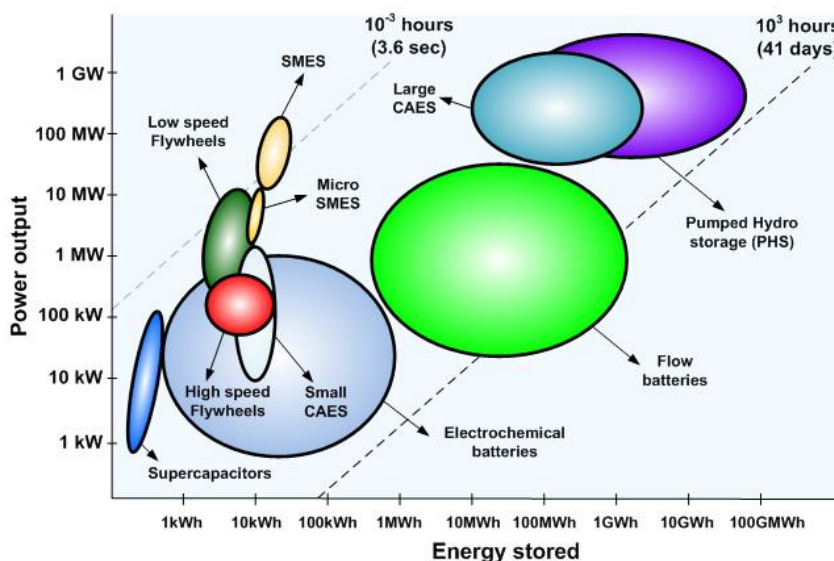


Figuur 50: Vliegwiel

(Lemonwho)

## Batterijen

Er bestaan veel verschillende soorten batterijen. Door de sterke opkomst van hernieuwbare energie en de verhoogde vraag naar opslag wordt sterk ingezet op de ontwikkeling van batterijen. Eerst zullen verschillende types met elkaar vergeleken worden om dan dieper in te gaan op batterijen met de meest gunstige eisen voor offshore energieopslag. De voorkeur voor offshore energieopslag zal niet snel naar batterijen gaan, omdat de massa te groot zou zijn voor een grote hoeveelheid opslag. Ook zijn de vermogens te klein voor de vele windparken. Figuur 51 geeft een duidelijk beeld terug welke keuzes kunnen gemaakt worden voor opslag op zee.



Figuur 51: Toepassingsgebieden van opslagtechnologieën

(Martín, Zamora, Martín, Aperribay, & Eguía, 2011)

Tabel 12 geeft de eigenschappen terug van enkele veel gebruikte batterijen. Bij het maken van de juiste keuze van een batterij voor op zee moeten verschillende aspecten in acht genomen worden. De batterij mag bijvoorbeeld niet lekken in zee, ze moet een groot vermogen hebben en de energiedichtheid moet groot genoeg zijn. Het is ook niet de bedoeling dat deze veel onderhoud vergt en dat ze na enkele jaren al terug vervangen moet worden. De verschillende types die overblijven zijn dan: de solid-state batterij, de lithium-zwavelbatterij en de lithium-ijzerfosfaat batterij.



Tabel 12: Verschillende types batterijen met hun kenmerken

	Lithium-ion accu	Lithium-ion-polymeeraccu	Lithium-zwavelaccu	Lithium-ijzer-fosfaataccu	Loodzuuraccu	Solid-state accu	Vanadium redox flox accu
Efficiëntie	92-97 %	99,8 %	88 %	92 %	80-85 %	99 %	75-80 %
Laadcycli <sup>11</sup>	1000-5000	300-500	1500-4000	2000-10 000	300-2000	10 000	>10 000
DOD <sup>12</sup>	80 %	80-95 %	?	80 %	25-70 %	100	100
Specifieke energie [Wh/kg]	120-220	100-200	450	90-150	30-50	230	10-20
Energiedichtheid [Wh/l]	200-620	300	550	220	50-100	?	16-33
Vermogensdichtheid [W/kg]	190-1200	2800	1750	900	180	750	?
Zelfontladingspercentage [%/dag]	0,10	0,17	0,17	?	0,17	?	?
Celspanning	3,6-3,7 V	3,7 V	2,2 V	3,2 V	2 V	?	1,15-1,55 V
Werkingsgebiedtemperatuurbereik	-20-55 °C	-20-35 °C	-20-45 °C	0-40 °C	-20-40 °C	-20-80 °C	-20-50 °C
Kost per kWh	***	*****	**	***	*	**	****
Voordelen	Hoge energiedichtheid, hoog vermogen, hoge efficiëntie, lange levensduur, lage zelfontlading, lekken niet snel	Hoge efficiëntie, Kan zeer snel laden	Hoge energiedichtheid, lange levensduur, zeer snel laden, goedkoop, veilig	Weinig onderhoud, veilig, lange levensduur, kan snel laden, geen lekken	Lage kost	Hoge efficiëntie, zeer veilig (vast elektrolyt), hoge energiedichtheid, groot temperatuurbereik, lange levensduur, geen lekken, gebruik van volledige capaciteit	Lange levensduur, milieuvriendelijk, gebruik van volledige capaciteit
Nadelen	Op grote schaal kortere levensduur en hogere kost, overlading en overontlading (BMS)	Korte levensduur, onderhoud, explosiegevaar, duur, overlading en overontlading (BMS)	Overlading en overontlading (BMS)	Overlading en overontlading (BMS)	Lage energiedichtheid, korte levensduur, laag vermogen, gelimiteerde DOD, kunnen lekken	Warmteontwikkeling	Hoge kost, lage energiedichtheid, Lekken mogelijk

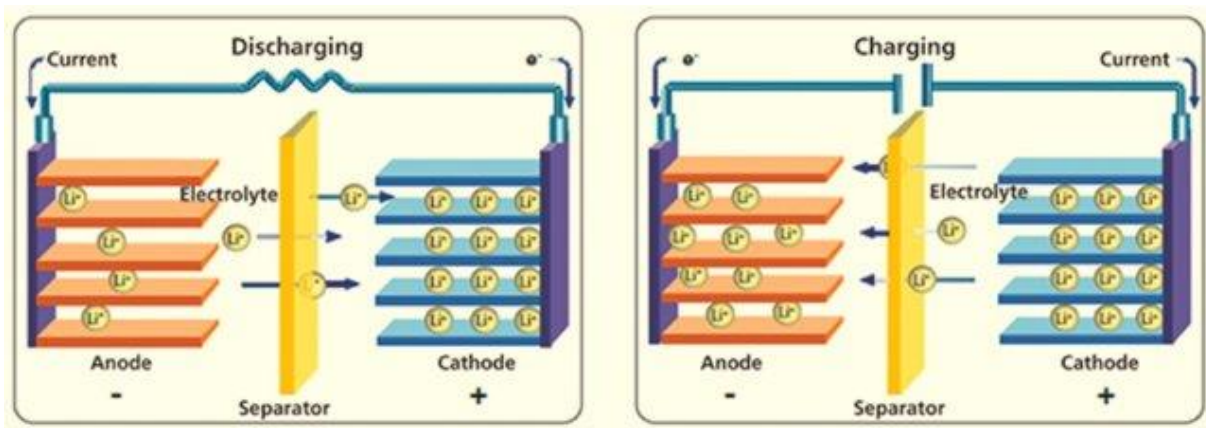
<sup>11</sup> Een laadcyclus is het volledig opladen en ontladen van een oplaadbare batterij.

<sup>12</sup> DOD of Depth of Discharge betekent dat maar zoveel procent van de totale capaciteit van de batterij kan gebruikt worden. Verder ontladen zou de batterij sterk degraderen.

## Lithium-ion batterij

Vooraleer de werking van een solid-state batterij wordt uitgelegd, zal eerst dieper ingegaan worden op de werking van een lithium-ion batterij (zie Figuur 52). De werking van beide is heel gelijkaardig. Een lithium-ion batterij bestaat uit een kathode (positieve pool), een anode (negatieve pool) en een separator (plastic polymeer) die werkt als isolator om kortsluiting te voorkomen. Deze laatste laat enkel lithium-ionen door, dus geen elektronen. De kathode bestaat voornamelijk uit lithiumverbindingen, terwijl grafiet het belangrijkste element van de anode is. Dit alles bevindt zich in een vloeibaar elektrolyt, meestal lithium zout.

Indien er een voeding aan de batterij hangt zal de positieve kant van de voeding de elektronen van het lithium atoom aantrekken (kathode zijde), zodat de anode van de batterij negatief geladen wordt en de lithium-ionen aantrekt doorheen de separator. Zo ontstaat een hoge spanning tussen anode en kathode en is de batterij volledig opgeladen.



Figuur 52: Opladen (rechts) en ontladen (links) van een lithium batterij

(Chawla, Bharti, & Singh)

Tijdens het ontladen zal de gebruiker een spanning vragen, waardoor zo de elektronen vloeien naar de kathode kant en de lithium ionen terug naar hun stabiele atoom willen gaan.

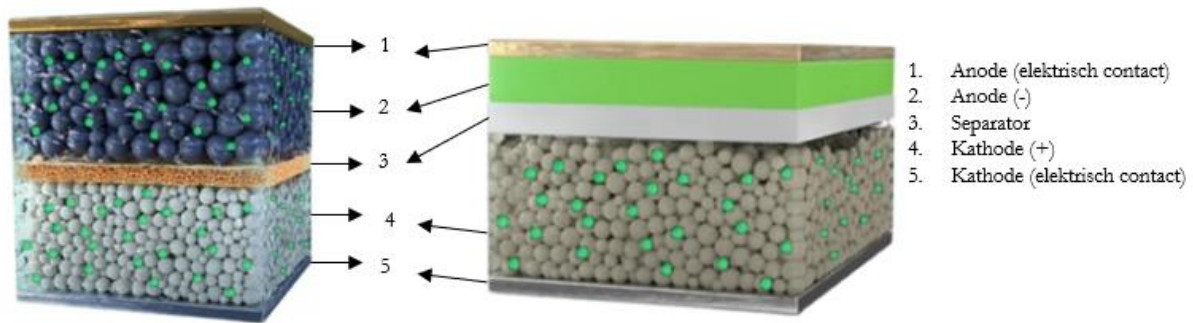
De capaciteit en energiedichtheid kan enorm verhoogd worden door het grafiet te vervangen door silicium, omdat slecht zes koolstofatomen één lithium ion kunnen opnemen. Terwijl één silicium atoom vier lithium ionen kan opnemen.

## Solid-state batterij

Het grote voordeel van een solid-state batterij is dat het vloeibare elektrolyt vervangen is door een vast elektrolyt, waardoor het brand- en explosiegevaar verdwijnt. Dit zorgt er ook voor dat de accu niet zal lekken en er dus geen giftige stoffen in zee kunnen vloeien.

De opbouw te zien in Figuur 53 bestaat ook uit een anode, kathode en als separator een keramisch of vast polymeer. Deze separator werkt hier als isolator, maar ook als elektrolyt. Het volume is kleiner, doordat het grafietgedeelte hier niet aanwezig is. Bij opladen zullen immers de lithium ionen doorheen de separator gaan en zich opstapelen tussen de isolator en het anodemetaal. Bij ontladen keren deze ionen terug naar hun stabiele lithium atoom aan de kathode kant.

Deze soort batterij is nu enkel nog in kleine toepassingen in gebruik, maar wat zeker is, is dat voor grote opslag van energie ze op de markt zullen komen binnen enkele jaren. Er doen zich nog enkele problemen voor die moeten opgelost worden zoals de grote warmteontwikkeling van de batterij.

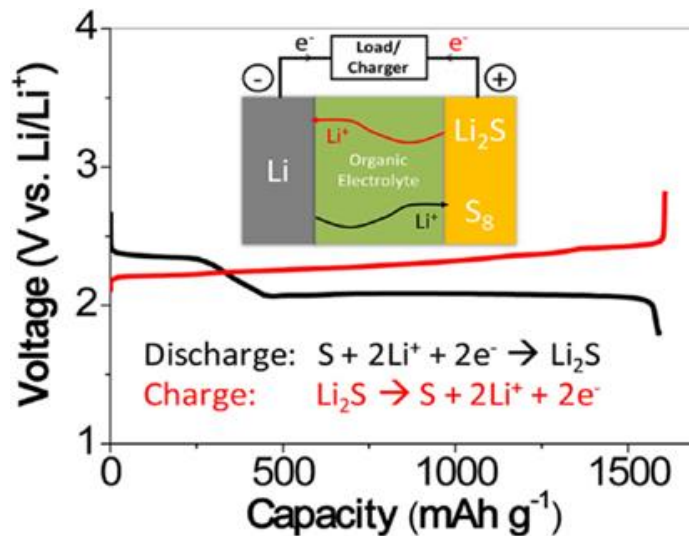


Figuur 53: Werking van lithium-ion batterij (links) en van solid-state batterij (rechts)

(Pastorelli)

### Lithium-zwavelbatterij

In een lithium-zwavelbatterij wordt metallisch lithium gebruikt als negatieve elektrode (anode) en zwavel als positieve elektrode (kathode). De werking ervan wordt afgebeeld op Figuur 54. Doordat zwavel geen goede geleider is, wordt daar een koolstofmatrix gebruikt om de elektronen beter te geleiden. Daarnaast veroorzaakt het oplossen van de polysulfide-tussenproducten het verlies van de zwavelkathode-actieve materialen tijdens laden en ontladen. Dit zijn nog de nadelen waaraan gewerkt wordt. Om deze problemen op te lossen, hebben onderzoekers zich toegelegd op de elektrolyten en de separator.



Figuur 54: Schematisch diagram van een typische Li-S-cel

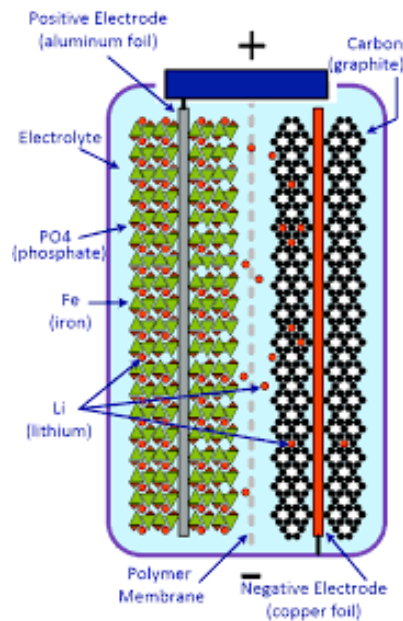
(Angulakshmi & Stephan, 2015)

### Lithium-ijzer fosfaatbatterij

Hierbij bestaat de kathode uit ijzerfosfaat en de anode uit grafiet, omdat grafiet gemakkelijk bindt met lithium. De separator is opnieuw een polymeer en het elektrolyt is vloeibaar zoals bij de lithium-ion batterij. Deze mag niet bestaan uit water, omdat lithium heftig reageert met water.

Figuur 55 geeft het werkingsprincipe terug. Tijdens het opladen vloeien de lithium-ionen van de positieve elektrode naar de grafiet elektrode. Als alle ionen zich bij de grafiet elektrode bevinden, zal de inwendige weerstand toenemen en dus ook de spanning. Hierdoor zal de cel beschadigen. Daarom wordt bij lithium batterijen altijd een BMS-systeem (battery management system) geplaatst om overlading en overontlading te voorkomen.

Tijdens ontladen gaan de lithium-ionen van de grafiet elektrode naar de ijzer-fosfaat elektrode. Om degradatie te voorkomen mag een lithium batterij niet volledig ontladen worden, dus moet er nog wat lithium overblijven op de grafietelektrode.

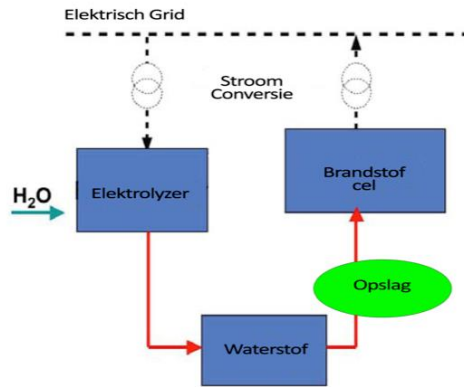


Figuur 55: Werking van lithium-zwavel batterij

(Doigny)

## Waterstof

Het overschot aan groene elektriciteit wordt gebruikt om tijdens de elektrolyse waterstof van water te scheiden. Dit proces heeft een rendement van ongeveer 75 %. De waterstof wordt daarna gecompriëerd en kan opgeslagen worden in ondergrondse grotten, zoutkoepels, uitgeputte olie- en gasvelden en waterstoftanks. Een nadeel van waterstof is dat zijn dichtheid zo laag is, waardoor het veel plaats inneemt. Om veel waterstofgas op te slaan, moet dit dus onder hoge drukken van 200 tot 700 bar gebeuren. Het kan ook vloeibaar gemaakt worden door het af te koelen tot  $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ , zo kan er tot tweemaal zoveel opgeslagen worden. Deze condensatie vergt wel veel energie ( $\pm 30\%$  van energie-inhoud) en zorgt eveneens voor 10 % meer  $\text{CO}_2$ -uitstoot. Daarom wordt waterstofgas meestal onder hoge druk opgeslagen. Indien er een grote vraag naar energie is, zal de brandstofcel gevoed worden met waterstof om zo elektriciteit op te wekken. De waterstof kan ook verbrand worden voor de productie van thermische energie of ten behoeve van transport. Een brandstofcel is niet goedkoop en heeft maar een efficiëntie van ongeveer 55 %. Dat komt uit op een totale efficiëntie van ongeveer 0,41 % bij de productie van elektriciteit. Als de waterstof verbrand wordt voor thermische energie, loopt de efficiëntie op tot 70-80 %.

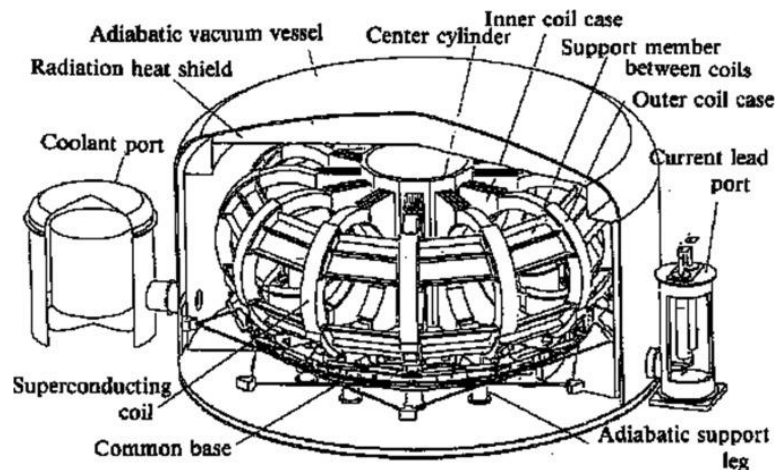


Figuur 56: Waterstofgasopslag

(Waterstofproductie met powerdam)

### SMES of supergeleidende magnetische energieopslag

Dit type energieopslag slaat elektriciteit op in het magnetisch veld van een spoel die bestaat uit een supergeleidende draad met bijna nul energieverlies. Deze draad wordt supergeleidend doordat sommige materialen bij zeer lage temperaturen hun elektrische weerstand verliezen. Daarom is er ook een koelsysteem aanwezig met een bepaalde stof (vb. bij vloeibare stikstof wordt supergeleiding bereikt bij  $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). De wisselstroom moet eerst omgezet worden naar gelijkstroom, aangezien de spoel alleen in staat is om de energie in de vorm van gelijkstroom op te slaan. Bij het ontladen van de spoel zal terug de conversie naar wisselstroom gemaakt moeten worden. Bovendien zijn er mogelijk risicovolle effecten van het magnetisch veld op het menselijk lichaam afhankelijk van de grootte van de stroom. Daarnaast heeft dit systeem een heel korte reactietijd, waardoor het eerder zal gebruikt worden om de frequentie van het net te regelen en korte stroomonderbrekingen op te vangen. Doordat er enkel verliezen optreden bij de conversie ( $\pm 2-3\%$ ) is de totale efficiëntie ongeveer 90-95%. De kosten hiervan zijn nog relatief hoog, waardoor het nog niet veel op grote schaal wordt gebruikt.



Figuur 57: Supergeleidende magnetische energieopslag (SMES)

(Zohuri, 2022)

## Supercondensator

Tijdens het opladen van een condensator zal de ene elektrode elektrische lading opslaan, terwijl de andere elektrode de tegengestelde elektrische lading zal opslaan. Je kan het dus zien als een batterij, maar het op- en ontladen gebeurt sneller. De capaciteit van een condensator wordt gegeven door:

$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

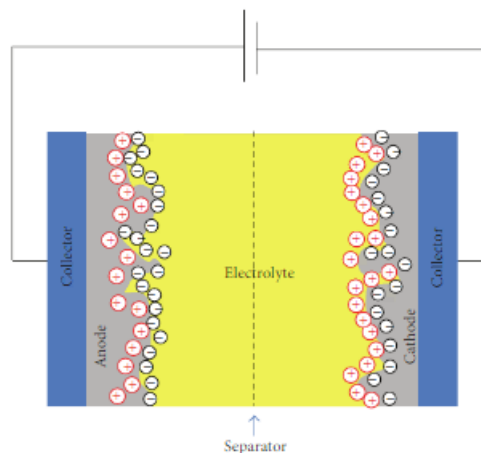
Met

$\epsilon$ : de permittiviteit van het diëlektricum

A: de oppervlakte van de platen

d: de afstand tussen de platen

Een supercondensator heeft dus een groot oppervlak van elektroden en een kleine afstand ertussen. Doordat zo'n condensator een korte reactietijd heeft, grote vermogens kan leveren, weinig onderhoud vergt en een lange levensduur heeft, wordt deze offshore veel gebruikt voor pitch-controlesystemen<sup>13</sup> van windturbinebladen. De beperkingen zijn de hoge zelfontlading, de hoge kosten en de beperkte energiedichtheid.



Figuur 58: Werkingsprincipe van een supercondensator

(Saleem, Desmaris, & Enoksson, 2016)

## Thermische opslag

Er bestaan veel verschillende thermische energieopslagtechnologieën. Deze op lage temperatuur kunnen de energie maar op korte duur opslaan. Daarom is de belangrijkste thermische opslag deze op hoge temperatuur. Bij offshore wind zal de elektriciteit dan moeten omgezet worden naar warmte. Deze warmte kan in de toekomst bijvoorbeeld gebruikt worden voor warmtenetten binnen een stad. Een andere manier is om deze warmte bij grote vraag opnieuw om te zetten naar elektriciteit, maar dit zorgt voor een lage efficiëntie. Een mogelijke oplossing hiervoor is door de elektriciteit van de windmolen op een andere manier op te slaan om dan later de stroom naar de

<sup>13</sup> Pitch-controlesysteem: systeem dat de positie van de bladen zodanig regelt om een optimale opbrengst te verkrijgen of om schade bij harde wind te voorkomen.

verbruiker te sturen. De verbruiker kan dan thuis deze elektriciteit gebruiken voor zijn warmtepomp, elektrische boiler...

(Strobbe, et al., 2015)

(Ocean battery, the new utility-scale offshore energy storage, 2022)

(Schokkaert, 2014-2015)

(F.Pierie & Someren)

(Lima, et al., 2021)

(Energy storage technologies comparison, 2022)

(Pastorelli)

(Doigny)

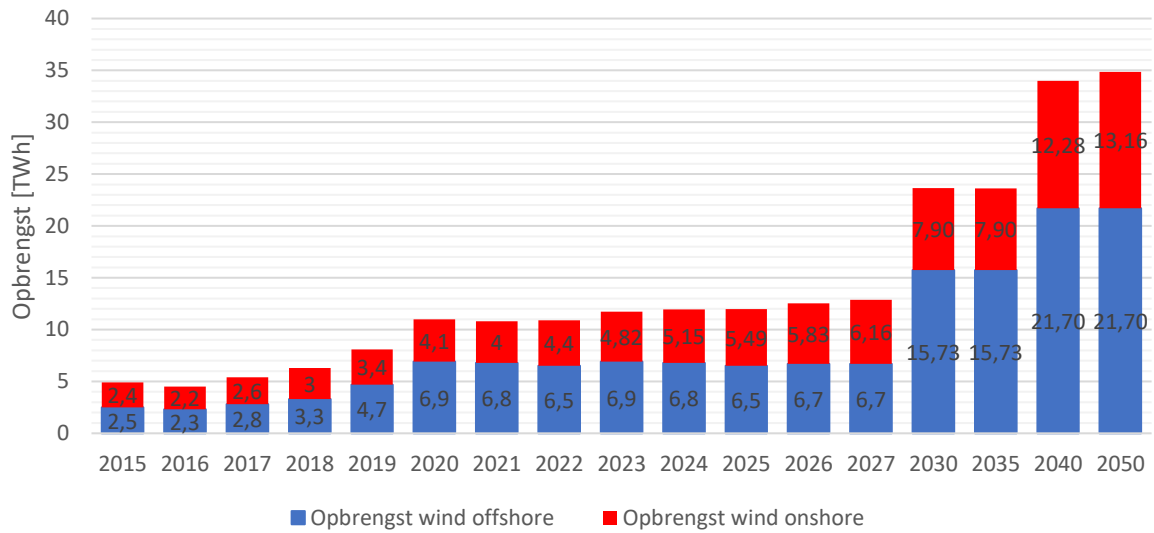
(Zohuri, 2022)

## Haalbaarheid van windenergie

Figuur 59 toont de energieopbrengsten van de windenergie offshore en onshore. Momenteel is het geïnstalleerd vermogen op zee 2,25 GW en deze hadden een opbrengst van 6,5 TWh. Het doel is om de Prinses Elisabeth Zone van 3,5 GW af te hebben tegen 2030. Er staat zelfs nog een derde zone op het plan die zal gebouwd worden in de Noordzee. Volgens berekeningen van Elia is het maximale offshore windvermogen van België geschat op 8 GW. Met de uitbouw van de derde zone is het doel om deze 8 GW te bereiken tegen 2040. De schattingen van de opbrengsten werden opnieuw gedaan met de gemiddelde utiliteitsfactor van voorgaande jaren. Deze gaf een gemiddelde van ongeveer 0,31. Dit hangt vooral af van de snelheid van de wind van dat jaar is. Om de opbrengst van offshore windenergie in 2030 te berekenen, werd volgende formule gehanteerd:

$$E = P * 0,31 * 8760 = 5,8 \text{ GW} * 0,31 * 8760 \text{ uren} = 15,73 \text{ TWh}$$

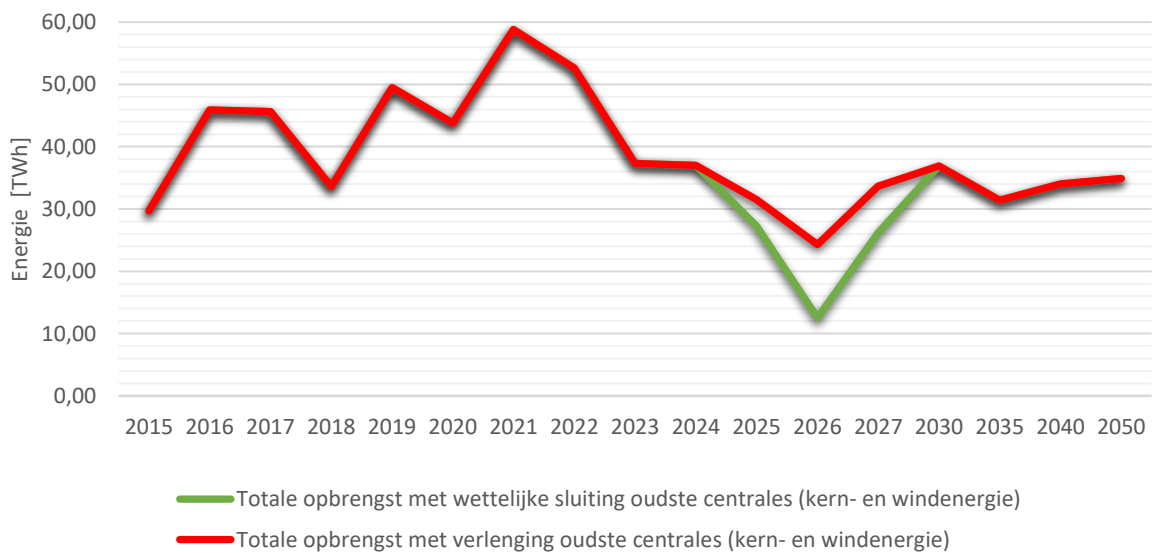
Op land is het vermogen nu ongeveer 2,99 GW, deze had een jaaropbrengst van 4,4 TWh. Het doel is om dit tegen 2030 uit te bouwen tot 5,4 GW, zodat tegen 2050 het maximale onshore vermogen bereikt is van 9 GW. Deze laatste berekening werd opnieuw door Elia gedaan. Voor de windmolens op land werd een load factor van 0,17 gebruikt. Dit is een heel stuk lager dan op zee, doordat de windmolens op land veel minder op volle capaciteit draaien.



Figuur 59: Werkelijke en toekomstige geschatte opbrengsten van windenergie

(public net electricity generation, 2022)

Figuur 60 geeft de totale opbrengst van kern- en windenergie in België terug.



Figuur 60: Werkelijke en toekomstige geschatte opbrengst van kern- en windenergie

(public net electricity generation, 2022)

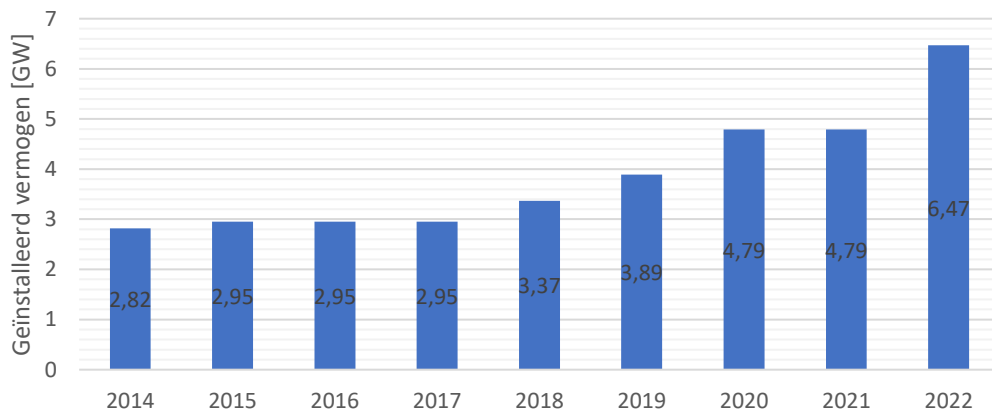
(ELECTRICITY SCENARIOS FOR BELGIUM TOWARDS 2050, 2017)



## 9 Studie van hernieuwbare energie via zonnepanelen

Betaalbare zonnepanelen met een aanvaardbaar rendement bestaan nog niet zo lang, maar hoe wordt nu elektriciteit uit licht gehaald? Is het gebruikte materiaal van de panelen wel goed voor het milieu? Daarnaast zal onderzocht worden als het wel nuttig is om zonnepanelen te leggen voor je huishouden en welke problemen er kunnen voorkomen. Is de installatiekost niet te hoog met wat het opbrengt? Welke invloed heeft de verandering van de terugdraaiende teller naar de digitale meter en hoe zal de burger dit het best aanpakken om zo weinig mogelijk te betalen?

In België kwam eind 2022 7% van de totale elektriciteitsproductie van zonnepanelen. Figuur 61 toont de evolutie van het geïnstalleerd vermogen van zonnepanelen in België. De enorme stijging van 2021 naar 2022 was vooral te danken aan de stijgende energieprijis, maar ook aan de steeds goedkopere panelen. Daarnaast is de aankoop van zonnepanelen geen kost, maar een investering.



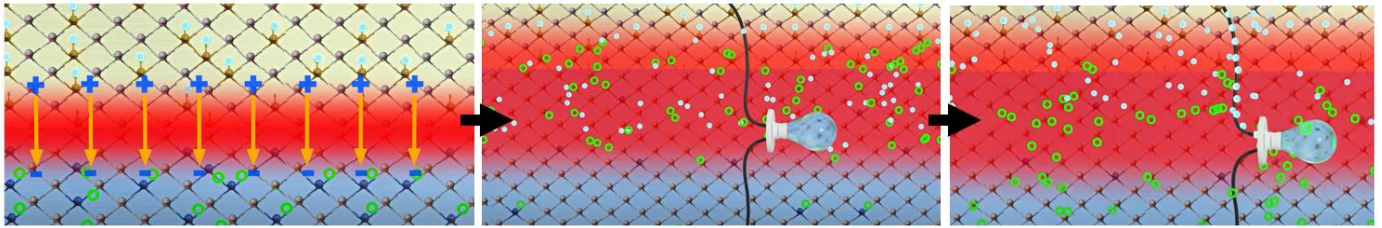
Figuur 61: Evolutie geïnstalleerd vermogen zonne-energie in België

(public net electricity generation, 2022)

### Werking zonnecel

Een zonnepaneel bestaat uit aan elkaar geschakelde zonnecellen. Meestal zijn die cellen opgebouwd uit silicium (halfgeleider). Deze heeft 4 valentie elektronen. Om de elektronen in een bepaalde richting te laten vloeien moeten ze gedoteerd worden (vreemd atoom inbrengen). We gebruiken boor (3 valentie elektronen) voor de p-junctie en fosfor (5 valentie elektronen) voor de n-junctie. Beide juncties tegen elkaar leggen, zorgt voor een uitputtingszone. De overige elektronen dicht bij die zone springen naar de p-zone en er ontstaat in de p-junctie bij de uitputtingszone een negatieve lading. In de n-junctie ontstaat een positieve lading. Dit spanningsverschil zorgt ervoor dat de elektronen maar één richting hebben om naartoe te gaan.

De werking ervan is te zien in Figuur 62. Indien de cel nu bestraald wordt met lichtenergie zullen fotonen ervoor zorgen dat elektronen in de uitputtingszone loskomen en bewegen naar de n-junctie. De gaten bewegen zich naar de p-junctie. Zo wordt gelijkstroom opgewekt. Door er nu een verbruiker aan te hangen, keren de elektronen terug naar de bron en vullen de gemaakte

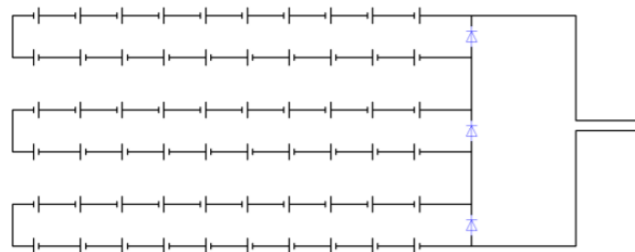


Figuur 62: Vorming uitputtingszone (links), beweging elektronen door zonlicht (midden), gelijkstroom voedt verbruiker (rechts)

(Lesics, 2019)

gaten in de p-junctie op. In de praktijk wordt de n-junctie smaller gemaakt (bovenste laag) dan de p-junctie, omdat de uitputtingszone zo met meer licht wordt bestraald en er zo meer stroom ontstaat.

Als een zonnecel in het paneel beschaduwd, te warm krijgt (hogere temperatuur lijdt tot lager rendement), kapot is of slecht belicht is door het bijvoorbeeld niet reinigen van de panelen, zal het rendement van het paneel drastisch verminderen. Om dit op te lossen worden bypass diodes gebruikt. Ze worden parallel geplaatst over een aantal zonnecellen. Als alle zonnecellen goed belicht zijn, gaat er geen stroom door de bypass diodes. Als nu een zonnecel slecht belicht is, geeft dit een grotere weerstand dan de weerstand over de diode. De stroom kiest dan de weg langs de diode. Doordat dit gebeurt wordt de stroom niet meer zo tegengehouden, waardoor het rendement niet meer zo laag is. De substrating met de slecht belichte zonnecel wordt in dit geval wel niet gebruikt.



Figuur 63: Elektrisch schema van een zonnepaneel met bypass diodes

(Wat zijn by-pass diodes en waar dienen ze voor?)

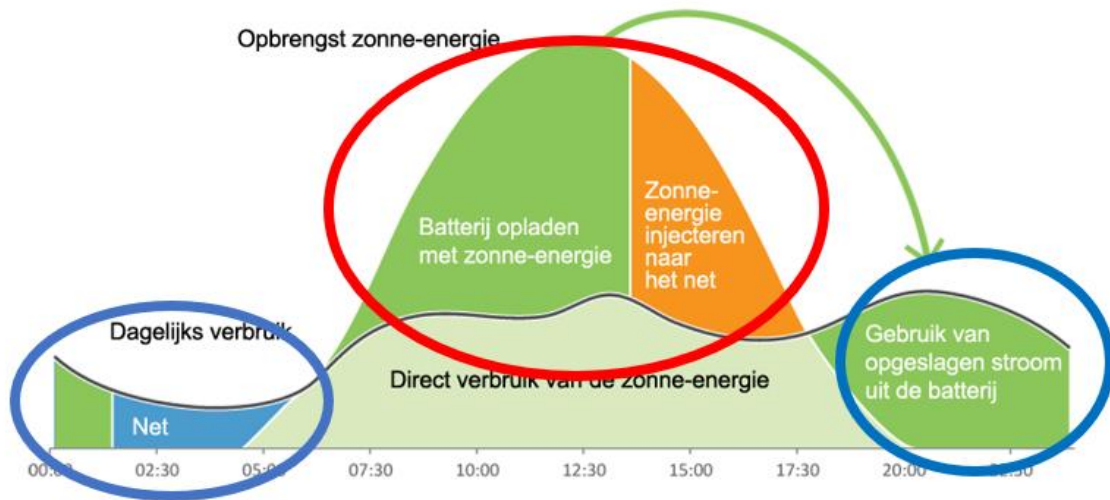
(Lesics, 2019)

(Wat zijn by-pass diodes en waar dienen ze voor?)

## Stockage van elektriciteit

De energie die de zonnecellen opwekken kunnen rechtstreeks verbruikt worden, maar soms is er ook teveel energie opgewekt die dan in het net geïnjecteerd wordt. Die energie kan je later terug uit het net halen, maar dit zal met de digitale meter enige kost (netkosten, verlies t.o.v.

injectietarief...) met zich meebrengen. Dus is het beter om de energie zelf op te slaan. Op basis van de totale energieopbrengst en het totale verbruik kan dan de capaciteit van de opslag berekend worden. Daarbij moet ook rekening gehouden worden met de maximale vermogens van het verbruik en de opbrengst.



Figuur 64: Vereenvoudiging van de opbrengst en het verbruik

(Batterijopslag)

De totale energie, opgebracht door de zonnepanelen die niet direct verbruikt wordt (rode cirkel) is de maximale energie voor opslag. Als de totale energie in de blauwe cirkels kleiner is dan de totale energie van de rode cirkel, kan je je opslag best dimensioneren op basis van de totale energie in de blauwe cirkels. Als je de maximale opslag neemt, zal de batterij onderbenut zijn en zijn efficiëntie zal dalen.

## Batterijen

### Lithium-ion batterij

De bekendste vorm van opslag van zonnestroom is de thuisbatterij. In het hoofdstuk “Studie naar windmolenparken op zee” werden al enkele batterijen besproken. De meest gebruikte thuisbatterij is momenteel de lithium-ion batterij, omdat ze een lange levensduur en een grote capaciteit heeft (zie Tabel 12). Ook is de snelheid van opladen en ontladen groot. Het grote nadeel ervan is dat ze nog altijd relatief duur zijn. Al eerder werd de werking ervan uitgelegd.

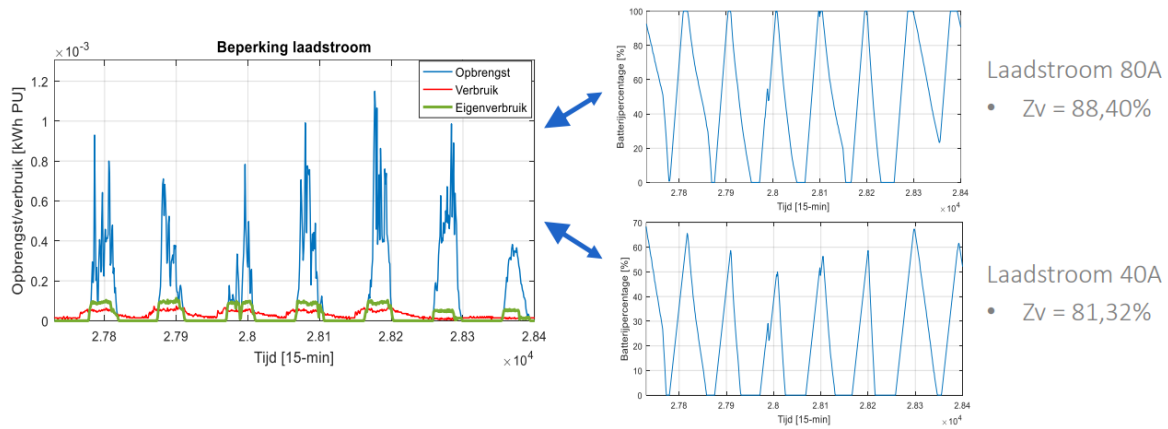
### Loodzuurbatterij

Er bestaan ook goedkopere loodzuurbatterijen, maar deze worden niet veel meer geïnstalleerd. Doordat ze een lage DOD en een lage energiedichtheid hebben, is er voor eenzelfde capaciteit een grotere batterij nodig en dus een grotere kost. Daarnaast hebben ze ook een kortere levensduur en een lagere efficiëntie dan lithium-ion batterijen (zie Tabel 12).

### Zoutwaterbatterij

Een meer milieuvriendelijker en veiliger alternatief is de zoutwaterbatterij. In tegenstelling tot voorgaande batterijen, kan deze veel gemakkelijker gerecycleerd worden. De voordelen zijn dat deze batterij volledig ontladen kan worden, er zijn geen giftige stoffen en de prijs is niet zo hoog.

De nadelen hiervan mogen niet uit het oog verloren worden, want de batterij is niet bestand tegen hoge piekstromen. Dit zal eveneens zorgen voor een lagere zelfvoorziening. Door de lage energiedichtheid zal je eerder de neiging hebben om deze batterij niet te kiezen als thuisbatterij.



Figuur 65: Invloed vermogen van batterij op zelfvoorziening

(Desmet, 2021-2022)

### Lithium-zwavelbatterij

Een andere batterijtechnologie die de toekomst kan voeden, is de lithium-zwavelbatterij. In Tabel 12 kan je zien dat deze batterij vele voordelen heeft t.o.v. voorgaande technologieën. Ten eerste zit er in deze batterij geen kobalt zoals in de lithium-ion batterij en komt zwavel overvloedig voor op aarde. Dit zorgt ervoor dat de prijs lager komt te liggen. Ten tweede is zijn energiedichtheid tot wel vier keer hoger dan die van een lithium-ion batterij. Dat betekent dat de batterij voor eenzelfde capaciteit kleiner en lichter is. Ook kan deze batterij aan hele hoge snelheden laden en ontladen. Dit is zelfs sneller dan de lithium-ion batterij. Het grootste nadeel van deze batterij is dat de interne chemische structuur snel haar eigenschappen verliest, waardoor de levensduur korter is dan die van lithium-ion batterijen. Er wordt verwacht dat deze batterij op de markt zal komen net na de introductie van de solid-state batterij.

### Lithium-ijzerfosfaatbatterij

Een veel besproken en opkomende thuisbatterij is de lithium-ijzerfosfaatbatterij. Deze techniek heeft tal van voordelen. Het grootste voordeel van deze techniek is zijn lange levensduur. Deze kan vele laadcycli doen, dus uitermate geschikt voor een thuisbatterij. Ook ligt zijn laadsnelheid hoog en is zijn energiedichtheid relatief hoog. De energiedichtheid is lager dan die van lithium-ion batterijen en dus wegen lithium-ijzerfosfaatbatterijen meer voor eenzelfde capaciteit. Het grote nadeel van deze batterij is de kostprijs, maar dankzij zijn lange levensduur en weinig onderhoud is deze technologie wel een goede investering.

### Solid-state batterij

Een veel veiligere batterij dan de lithium-ion batterij is de solid-state batterij. Dit komt omdat een vaste elektrolyt wordt gebruikt i.t.t. de voorgaande batterijen, deze zijn namelijk niet-ontvlambaar bij verwarming. Net zoals de zoutwaterbatterij kan ook deze volledig op- en ontladen, dus de volledige capaciteit kan gebruikt worden. Daarnaast zal de batterij lichter zijn dan voorgaande batterij voor eenzelfde capaciteit. Nog twee belangrijke voordelen aan deze batterij zijn de relatief

hoge laadsnelheden en de lange levensduur. De lange levensduur kan namelijk de kost van de investering dekken. Deze zijn al op de markt voor kleine batterijen, en zullen binnen enkele jaren te koop zijn als thuisbatterij.

### Vanadium redox flow batterij

Ondanks het feit dat vanadium zeer zeldzaam is, kan deze batterij goedkoop worden op grote schaal. Dit komt door zijn zeer lange levensduur en de mogelijkheid om volledig te kunnen ontladen. Als thuisbatterij zal de kostprijs hoger liggen dan die van lithium-ion batterijen. In tegenstelling tot de andere batterijen zal de state of health<sup>14</sup> (SOH) van de redox flow batterij bij een hoog aantal laadcycli nog steeds hetzelfde blijven als bij een laag aantal cycli. Daardoor hebben ze zo'n lange levensduur. De capaciteit van lithium-ion batterijen zal namelijk dalen bij een hoog aantal cycli. De redox flow batterij wordt vooral op grote schaal toegepast. Enerzijds om voorgaande redenen en anderzijds omdat de efficiëntie toeneemt naarmate de capaciteit toeneemt en omdat de batterij zwaarder en groter is t.o.v. de andere batterijen. Door de hoge kost op kleine schaal en zijn lage energie per kilogram wordt deze batterij weinig als thuisbatterij gebruikt.

Tabel 13: Vergelijking van verschillende types thuisbatterijen met \* = laag en \*\* = hoger

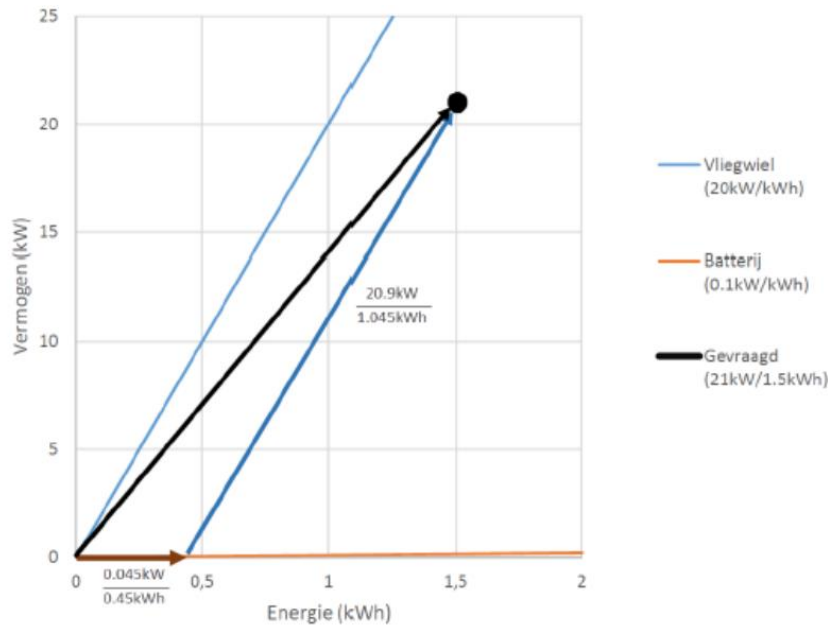
Batterij	Loodzuur batterij	Lithium-ion batterij	Zoutwater batterij	Lithium-zwavelbatterij	Lithium-ijzerfosfaat batterij	Solid-state batterij	Vanadium redox flow batterij
Efficiëntie	**	***	*	***	***	****	*
Levensduur	*	***	**	**	*****	*****	*****
DOD	*	**	***	**	**	***	***
Energiedichtheid	**	***	*	*****	**	****	*
Vermogensdichtheid	**	***	*	****	***	***	?
Prijs	*	***	**	**	***	**	****

### Hybride opslag

Nu de belangrijkste batterijtechnologieën besproken zijn, kan opgemerkt worden dat voor een thuisbatterij de combinatie van energieopslag en vermogen opslag de sleutel tot een optimale oplossing is. Hierbij wordt geen rekening gehouden met de kostprijs. Een hybride opslag (HESS) van FESS (flywheel energy storage system) en BESS (battery energy storage system) zal de snelle vermogensvariëaties kunnen dekken en zal voldoende energie kunnen opslaan. Hierbij worden de nadelen van de ene technologie gecompenseerd door voordelen van de andere technologie. Hieronder wordt een kort voorbeeld gegeven om zo'n hybride opslagsysteem te berekenen. Als de piek van het verbruik 21 kW is en de nodige opslag moet 1,5 kWh bedragen, dan bekom je volgende vergelijkingen:

$$\begin{cases} 21 \text{ kW} = x_1 * 20 \text{ kW/kWh} + x_2 * 0,1 \text{ kW/kWh} \\ 1,5 \text{ kWh} = x_1 \text{ kWh} + x_2 \text{ kWh} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_1 = 1,045 \text{ kWh (vliegwiel)} \\ x_2 = 0,45 \text{ kWh (batterij)} \end{cases}$$

<sup>14</sup> De SOH van een batterij is gedefinieerd als de verhouding van de maximale ogenblikkelijke capaciteit ten opzichte van de maximale capaciteit van de batterij. De capaciteit van een batterij daalt namelijk met het aantal laadcycli. Deze daling wordt veroorzaakt door veroudering en gebruik, daardoor stijgt ook de interne weerstand.



Figuur 66: Dimensionering hybride opslag

(Desmet, 2021-2022)

## Waterstof

De opslag van overtollige zonnestroom kan dus ook gebeuren in opslagtanks van waterstof. De werking hiervan is uitgelegd in het hoofdstuk “Studie naar windmolenparken op zee”. Het voordeel aan waterstof t.o.v. batterijen is dat zijn energiedichtheid per kg tot wel driemaal hoger is en dat het de energie langer kan opslaan. Dat betekent dat een overschot aan energie in de zomer nog in de winter kan gebruikt worden met waterstof. Dit kan gedeeltelijk met batterijen, maar deze lopen langzaam leeg. Stel nu dat een batterij van 6 kWh een zelfontladingspercentage van 0.1 %/dag heeft en dat deze volledig oplaadt in augustus en dan wacht tot februari om te ontladen. Dan zal er in februari nog 4,9 kWh in de batterij zitten. Dit is natuurlijk niet rendabel, want een batterij moet steeds opladen en ontladen en in de winter geraakt de batterij gewoon niet volgeladen.

Ook al is waterstof een schone manier van opslag, toch wordt het maar zelden gebruikt, omdat er een aantal nadelen aan verbonden zijn. Het grote nadeel aan waterstof is dat het onder hoge druk bewaard moet worden, omdat waterstofgas een enorm lage dichtheid heeft en het dus ook veel plaats inneemt. Er moeten dus extra maatregelen genomen worden om te zorgen dat dit gas niet kan ontsnappen. Daarnaast is de prijs van een brandstofcel ook niet goedkoop. T.o.v. een batterij is zijn efficiëntie voor de omzetting naar elektriciteit zeer laag ( $\pm 0,41$  %). Waterstofgas kan ook verbrand worden (efficiëntie  $\pm 70-80$  %) om zo die warmte te gebruiken in bijvoorbeeld warmtenetten, je verwarming in huis...

## thermische opslag

Een voorbeeld van thermische opslag is het gebruik van een elektrische boiler of een warmtepomp in combinatie met zonnepanelen. Doordat een warmtepomp de warme lucht rond de unit gebruikt en een verwarmingselement als back-up en een elektrische boiler enkel elektriciteit gebruikt om het water op te warmen, zal het verbruik van een warmtepomp lager

liggen. Daarnaast zijn warmtepompen wel duurder dan elektrische boilers. De werking van het opslagsysteem gebeurt m.b.v. slimme sturing. Indien er een overschot aan energie is van de zonnepanelen zal de boiler het water opwarmen tot bijvoorbeeld 75 °C i.p.v. 60 °C. Die extra 15 °C is een manier om overtollige stroom op te slaan. Doordat warmte adiabatisch is, kan de boiler gezien worden als een soort batterij waarin makkelijk energie kan opgeslagen worden. Deze overige warmte kan dan bijvoorbeeld 's avonds gebruikt worden als de zon ondergegaan is. Doordat seizoenen geen invloed hebben op de temperatuur in de diepe ondergrond, kunnen bij warmtepompen ook gaten diep in de grond worden geboord. In de zomer kan dan het 'warmtereservoir' (de bodem) aangevuld worden, terwijl in de winter die warmte terug uit de grond kan gehaald worden. Figuur 67 toont de verschillende configuraties i.v.m. 'opslag' onder de grond.

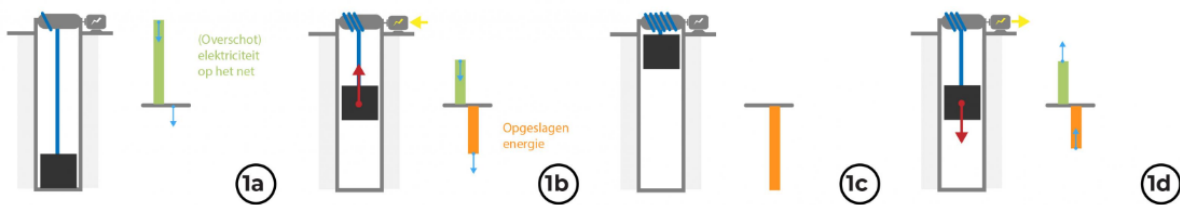


Figuur 67: Horizontaal systeem (links) en verticaal systeem (rechts) van boorgat thermische energieopslag (BTES)

(Gesloten systemen, 2015-2023)

## Energieput

Een weinig gebruikte energieopslag is de energieput. Deze wordt enkel nog op grote schaal gebruikt, maar kan perfect ook thuis gebruikt worden als opslag van zonnestroom. Hierbij is er een diepe put met een lift die een zwaargewicht op en neer kan heffen. Bij een overschot aan zonnestroom zal de lift het gewicht gecontroleerd omhoogheffen. Als er vraag naar energie is, zal de lift het gewicht laten zakken en de generator gekoppeld aan de lift zet de energie dan om in elektriciteit. Figuur 68 toont nog eens de werking van een energieput.



Figuur 68: Schematische weergave opslagtechniek met putten

(Drie innovatieve manieren om energie op te slaan met zwaartekracht, 2021)

(Welke types thuisbatterijen zijn er?, 2019)

(drie batterijtechnologieën die de toekomst kunnen voeden, 2022)

(Desmet, 2021-2022)

(Berg, 2018)

(Ecobouwers-redactie, 2022)

(Gesloten systemen, 2015-2023)

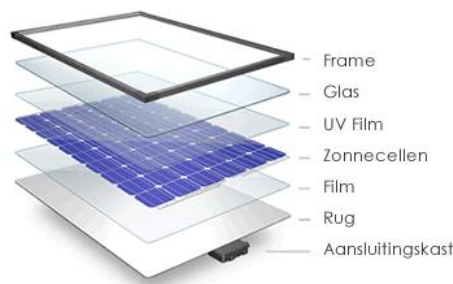
(Drie innovatieve manieren om energie op te slaan met zwaartekracht, 2021)

## Milieuaspect

### Zonnepanelen

Zijn de materialen waaruit zonnepanelen gemaakt zijn en alles eromheen bijvoorbeeld ook de opslag ervan wel milieuvriendelijk? De meeste zonnecellen worden gemaakt uit silicium. Om te doteren kan boor en fosfor gebruikt worden. Bij de ontginning en verwerking van deze elementen komen broeikasgassen vrij. Positief is wel dat deze technieken steeds verbeteren, waardoor de impact op het milieu doorheen de hele productie van zonnepanelen steeds wordt verkleind. Ook bij het smelten van glas en de ontginning van aluminium (frame), koper (draad), tin en lood (soldeermateriaal) komen broeikasgassen vrij. De ontginning van elementen tast ook het milieu en de lokale bevolking aan. De UV-film is gemaakt uit ethyleen vinylacetaat en is een rubberachtig materiaal dat het paneel een langdurige bescherming met minimale prestatievermindering biedt. Ook dit polymeer heeft een grote CO<sub>2</sub>-emissie bij de productie. Niet te vergeten is dat ook het transport van de panelen bijdraagt aan de broeikasgassen van de productieketen. De geproduceerde elektriciteit is wel volledig groen, omdat de grondstof (de zon) niet vervuilend is voor het milieu.

De meest gebruikte materialen voor zo'n paneel te maken, kunnen gerecycleerd worden. Figuur 69 geeft de materialen terug waaruit een zonnepaneel bestaat. Het grote probleem is dat zo'n paneel een robuust en weerbestendig ontwerp heeft. Hierdoor is het heel moeilijk om deze te demonteren. Bedrijven zijn dan ook op zoek naar goedkope technologieën voor het demonteren van panelen. Het lastigste bij de recycling is om de glazen afdekking weg te halen van de zonnecellen eronder, meestal wordt dit deel vaak gewoon versnipperd en verkocht als scherven of laagwaardige korrels. De huidige technologieën voor het recyclen van kristallijn silicium zijn nog inefficiënt en worden niet veel toegepast. Fabrikanten staan ook niet te springen om 30 jaar oud silicium te hergebruiken. Daarnaast kunnen het aluminiumframe en de kabels gemakkelijk hergebruikt worden. In de EU verplicht de wetgeving momenteel dat PV-fabrikanten afvalpanelen moeten recyclen en 80% van hun massa moeten kunnen terugwinnen. Bijlage 0 geeft aan hoeveel procent van het paneel uit een bestaand materiaal bestaat en wat de waarde van elk materiaal is t.o.v. het volledige paneel.



Figuur 69: Opbouw zonnepaneel

(Werking en opbouw zonnepanelen)



## Batterij

Er zijn verschillende opslagsystemen mogelijk voor de stockage van zonne-energie. Thuisbatterijen worden voornamelijk gebruikt als opslag bij zonnepanelen. Ten eerste zijn thuisbatterijen oplaadbaar, wat de milieuvriendelijkheid positief beïnvloedt. In de meest gebruikte thuisbatterijen zit lithium, koper, nikkel, mangaan, kobalt... Het kost veel energie om deze grondstoffen op te graven uit mijnen en te verwerken. Dit zorgt voor de vervuiling van de lucht, water en bodem. Ook zijn sommige grondstoffen schaars, wat soms tot conflicten kan leiden. Er zijn ook meer milieuvriendelijkere batterijen, maar deze worden niet vaak gekozen. Ze laden te traag op, waardoor de zelfvoorziening lager zal zijn. Een betere aanpak zou zijn om een grote batterij te plaatsen bijvoorbeeld in een wijk i.p.v. allemaal kleine batterijen en zo de die batterij onderling te delen. Zo wordt het milieu ook al een stuk minder belast. Hetzelfde geldt voor de omvormer. Een nadeel aan batterijen is dat sommige moeilijk te recyclen zijn en met de juiste expertise behandeld moeten worden door de gevaarlijke vloeistof van sommige.

## Waterstof

Bij de opslag van groene waterstof zijn er twee belangrijke onderdelen i.v.m. het milieu: de elektroden waarmee elektrolyse gebeurt en de brandstofcel. Indien de waterstof verbrand wordt, moet enkel gekeken worden naar de elektroden. Bij verbranding komt er enkel water(damp) vrij, dus is deze stap niet schadelijk voor het milieu. De elektroden bestaan meestal uit de veelvoorkomende elementen nikkel en ijzer. De ontginning en verwerking van deze elementen is wel schadelijk voor het milieu. Ook de brandstofcel bestaat uit twee elektroden die ontgonnen moeten worden. Daartussen zit een elektrolyt die kan bestaan uit verschillende elementen zoals gesmolten lithium, kaliumcarbonaten, zirkonium... Ook de ontginning hiervan zorgt voor schade aan het milieu en de omgeving.

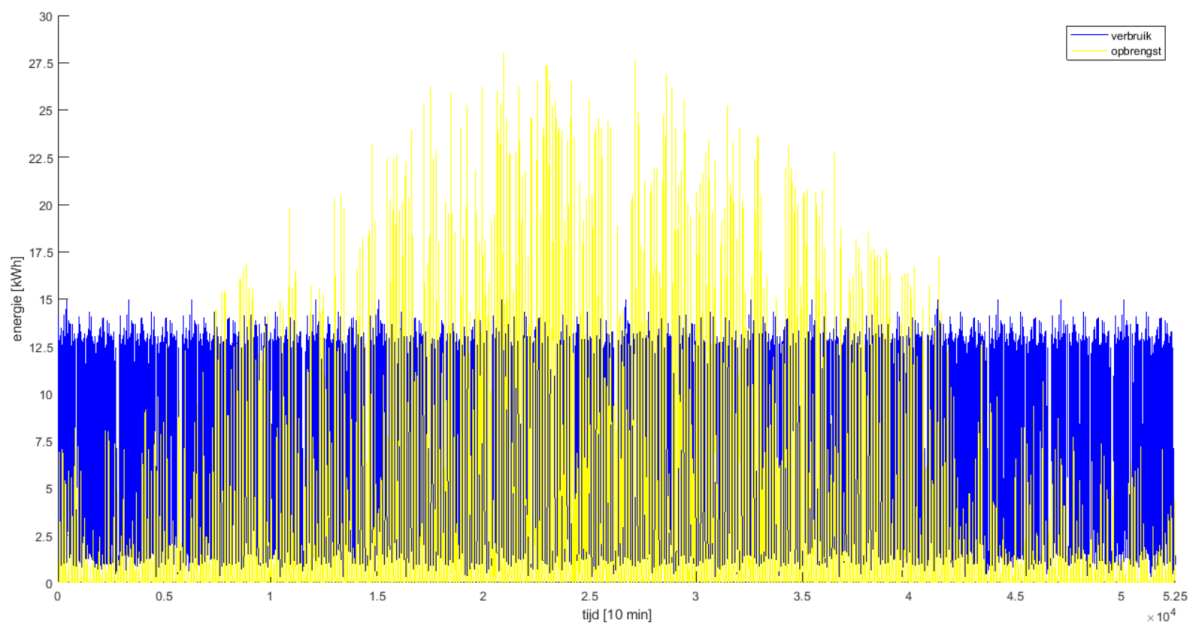
(Peplow, 2022)  
(milieucentraal)

# Berekening

## Situatieschets

De persoon beschikt over een PV-installatie, maar vraagt zich af of hij moet investeren in batterijopslag. Het werkelijke verbruik en opbrengst van de eigenaar wordt gebruikt. Er wordt gerekend met €0,3/kWh om elektriciteit uit het net te halen. Ook wordt er geen rekening gehouden dat de persoon geld kan krijgen bij injectie in het net, dat de batterij een bepaalde degradatie heeft na gebruik, het prosumentarief, etc. Doordat de premies op zonnepanelen per kWp elk jaar halveren wordt ook hiermee geen rekening gehouden. Op twee december 2022 is de premie op een thuisbatterij definitief stopgezet.

Figuur 70 geeft de jaaropbrengst en het jaarverbruik terug. De berekeningen zijn gebeurd op tien minuten data en zowel het belastingsprofiel als het opbrengstprofiel is gegeven van 1 januari 00:00 tot 31 december 23:50.



Figuur 70: Opbrengst en verbruik over een heel jaar

Waarom zou de klant beter kijken voor batterijopslag? Met het prosumentarief moest men betalen op basis van het vermogen van de omvormer en kon men op gelijk welk moment van de dag verbruiken. De terugdraaiende teller kon namelijk niet detecteren op welk tijdstip er opbrengst of verbruik was. Men moest er enkel voor zorgen dat de opbrengst groter of gelijk was dan hun verbruik, zo kreeg men geld terug. Dan diende het net als een grote batterij. Daarom werden vroeger ook de zonnepanelen in de zuid-richting gelegd om zoveel mogelijk opbrengst te hebben. Met het opkomende capaciteitstarief zal men moeten betalen voor het werkelijke verbruik. De grootste kost zal voor de pieken zijn. Dus in de toekomst moet men zorgen om zoveel mogelijk onafhankelijk te zijn van het net en zo veel mogelijk de pieken te reduceren. Dus moet men proberen om het eigenverbruik zoveel mogelijk te laten toenemen. Een mogelijke

oplossing hiervoor is een opslagsysteem. Dit zal zowel zorgen voor een stijging van de zelfconsumptie als voor een stijging van de zelfvoorziening.

In de berekening zal de veel gebruikte lithium-ion batterij vergeleken worden met een redox flow batterij. Voor elke batterij zal apart gekeken worden welke capaciteit zorgt voor de grootste winst binnen zijn levensduur en welke de snelste terugverdientijd heeft.

## Algemeen

### Capaciteitstarief

Het capaciteitstarief is een tarief dat burgers met een digitale meter moeten betalen. Residentieel wordt dit tarief bepaald door het gemiddelde te nemen van de voorgaande twaalf maandpieken. Een maandpiek is de grootste kwartierpiek van die maand. Indien die maandpiek lager ligt dan 2,5 kW, dan wordt 2,5 kW genomen als maandpiek. Industrieel is er ook een toegangsvermogen. Als de maandpiek daarboven ligt, moeten ze nog een extra boete betalen en deze blijft twaalf maanden gelden. In bijlage 14.9 is het capaciteitstarief visueel duidelijk gemaakt.

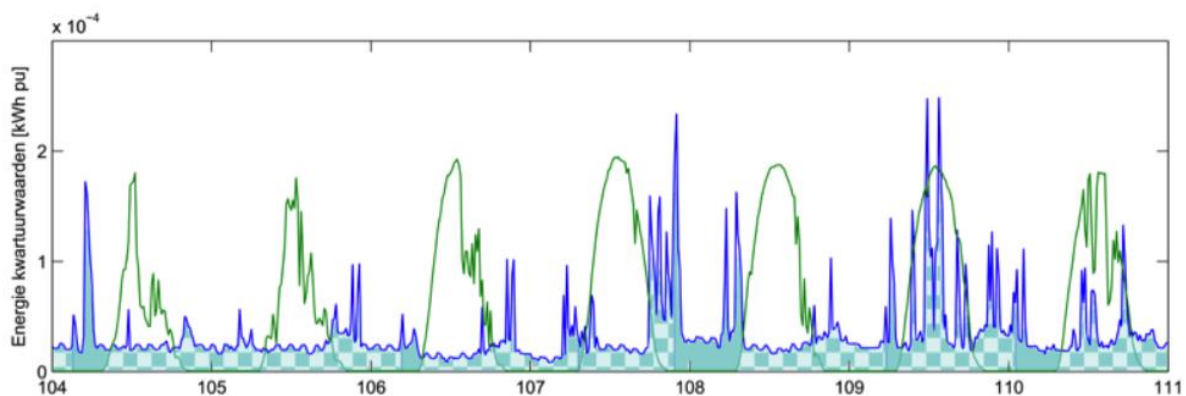
### Zelfvoorziening

De zelfvoorzieningsverhouding  $Z_v$  staat voor het aandeel van de gevraagde energie die je ogenblikkelijk zelf kan voorzien. Het is de verhouding van de gevraagde energie die zelf geproduceerd werd,  $E_{load} - E_{net\_abs}$ , op de totaal gevraagde energie  $E_{load}$ .

$$Z_v = \frac{E_{load} - E_{net\_abs}}{E_{load}}$$

Opmerking:  $Z_v0$  is de zelfvoorziening zonder gebruik van batterij.

Door gebruik te maken van een batterij kan bovenstaande formule aangepast worden door het ontladen van de batterij in rekening te brengen (zie Figuur 71). Zo zal de zelfvoorziening toenemen.



Figuur 71: Zelfvoorziening met batterij

(Decongestie van het distributienet door decentrale opslag)

### Zelfconsumptie

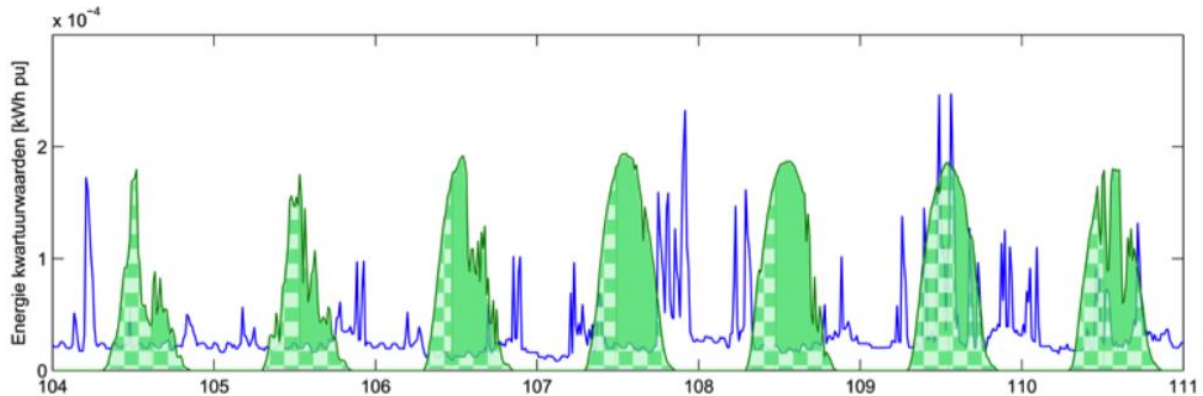
De zelfconsumptieverhouding  $Z_c$  staat voor het aandeel van de opgewekte zonne-energie dat ogenblikkelijk verbruikt wordt in het eigen huishouden. Ze wordt uitgedrukt door de verhouding

van de eigen verbruikte PV-energie  $E_{load} - E_{net\_abs}$  op de totale opgewekte energie  $E_{pv}$  afkomstig van de zonnepanelen.

$$Z_c = \frac{E_{load} - E_{net\_abs}}{E_{pv}}$$

Opmerking:  $Z_c0$  is de zelfconsumptie zonder gebruik van de batterij.

Ook de formule van zelfconsumptie wordt aangepast bij het gebruik van een batterij (zie Figuur 72). De teller is nu de som van de PV-energie nodig om een last te voeden plus de PV-energie nodig om de batterij op te laden. Hierdoor zal de zelfconsumptie toenemen.



Figuur 72: Zelfconsumptie met batterij

(Decongestie van het distributienet door decentrale opslag)

### Gegevens van batterijen

Tabel 14: Batterijgegevens

Technologie	C-rate <sup>15</sup>	Efficiëntie	Levensduur (cycli <sup>16</sup> )	Prijs
Lion	1	90 %	6000	600 €/kWh
Redox flow	0,2	80 %	12000	600 €/kWh

In bijlage 14.10 is het EMS model voor meer zelfvoorziening met een batterij voorgesteld. Daarnaast geven bijlagen 14.11 en 14.12 de MATLAB codes met bijhorende berekeningen van beide batterijen terug.

(Desmet, 2021-2022)

(Decongestie van het distributienet door decentrale opslag)

<sup>15</sup> De C-rate is een maat voor de snelheid waarmee een batterij wordt ontladen in verhouding tot de maximale capaciteit. Stel dat een batterij van 100Ah een C-rate heeft van 1C. Dit betekent dat de batterij kan ontladen aan 100A en dit gebeurt in 1 uur. Indien de C-rate C/2 is dan zal de ontladestroom slechts 50A zijn en de batterij zal dan volledig ontladen zijn na 2 uur.

<sup>16</sup> Als een batterij de helft van zijn batterijlading gebruikt en daarna wordt deze volledig opgeladen. Dit gebeurt de dag erna opnieuw dan telt dit als één laadcyclus.

## Lion batterij

### Initialisatie

Eerst gebeurt de initialisatie (Figuur 73) van de batterijgegevens. In simulink werd ook de efficiëntie van de batterij aangepast naar 90%.

```
%initialisatie Lion batterij
inCrate = 1;
max_cycli = 6000;
prijs_batterij = 600;
```

Figuur 73: Batterijgegevens lion batterij

### Berekeningen zonder opslag

In Figuur 74 wordt de zelfvoorziening, de zelfconsumptie en de kost berekend als er nog geen batterij aanwezig is. De kost is hoeveel euro er moet betaald worden om elektriciteit uit het net te halen. De energie wordt steeds gedeeld door zes om de energie in tien minuten data om te zetten naar kWh data.

```
%berekeningen zonder batterij
inCap = 0.01;
sim NaiveThreshold_selfsufficiency_Labversion;

Eload = sum(simout(:,3))/6

Eload = 3.7226e+05

Enet_abs = sum(max(simout(:,5), 0))/6;
Zv0 = (Eload-Enet_abs)/Eload

Zv0 = 0.2567

kWh_kost0 = (1-Zv0)*Eload*0.3;

Epv0 = sum(simout(:,4))/6

Epv0 = 1.6667e+05

Zc0 = (Eload-Enet_abs)/Epv0

Zc0 = 0.5733

max_batt_cap = Epv0-(Eload-Enet_abs)

max_batt_cap = 7.1115e+04
```

Figuur 74: Berekeningen zonder batterij

De zelfvoorziening is laag en de zelfconsumptie is al hoger. Dit komt omdat er ondergedimensioneerd is. Het jaarverbruik bedraagt 372 260 kWh en de jaaropbrengst is 166 670 kWh. Voor in de toekomst zou ik aanraden om nog zonnepanelen bij te leggen, omdat zonnepanelen een stuk goedkoper zijn dan de aankoop van een batterij. Dit zal het eigen verbruik nog doen toenemen. Te veel overdimensioneren is ook niet goed, omdat elke bijdrage van een paneel dan zal verminderen.

## Berekeningen met opslag

In Figuur 75 worden de capaciteiten van 1 kWh tot 250 kWh onderzocht. Voor elke capaciteit wordt de zelfvoorziening en de zelfconsumptie berekend. Nu wordt ook opnieuw de kost berekend, deze zal minder zijn dan wanneer er geen batterij was. De zelfvoorziening is immers toegenomen. De jaarwinst is dan het verschil tussen de kost zonder batterij en de kost met batterij.

De investering is de prijs die je betaalt bij aankoop van de batterij. Dus hoe hoger de capaciteit van de batterij hoe groter je investering zal zijn.

Het aantal cycli van de batterij wordt berekend met behulp van Edis (discharge energy). Deze geeft de totale energie terug die door de batterij is ontladen doorheen het volledige jaar. Het aantal cycli wordt weergegeven over 15 jaar. Als het aantal cycli 6000 overschrijdt, dan zal de levensduur minder zijn dan 15 jaar. Stel dat het aantal cycli in 15 jaar 12000 is dan werd bv. 6000 cycli bereikt in 7,5 jaren. Dat is dan zijn levensduur. Als de batterij in 15 jaar niet aan 6000 cycli geraakt dan is de levensduur 15 jaar.

```
%berekeningen met verschillende capaciteiten voor batterij
for c = 1:1:cap
inCap = c;
sim NaiveThreshold_selfsufficiency_Labversion;

Eload = sum(simout(:,3))/6;

Enet_abs = sum(max(simout(:,5), 0))/6;
Zv = (Eload - Enet_abs)/Eload;
Epv = sum(simout(:,4))/6;
Zc = (Eload-Enet_abs)/Epv;

kWh_kost = (1-Zv)*Eload*0.3;
kWh_winst = (kWh_kost0 - kWh_kost);
investering = prijs_batterij*inCap;
Edis = -simout(end,6);
cycles = Edis/inCap*15;

if cycles > max_cycli
levensduur = max_cycli/cycles*15;
else
levensduur = 15;
end
```

Figuur 75: Berekeningen met verschillende capaciteiten

In de code van Figuur 76 worden de resultaten in tabelvorm geplaatst. Daarbij is de totale opbrengst de jaarwinst door de batterijen opgebracht maal de levensduur van de batterij. Zoals eerder vermeld wordt hier geen rekening gehouden met de degradatie van de batterij. De totale winst is dan de totale opbrengst verminderd met de investering van de batterij. De terugverdientijd wordt bekomen door de totale investering te delen door de jaarwinst die met de batterij wordt gemaakt.

```

zelfvoorzieningen(c,2) = Zv;
zelfconsumpties(c,2) = Zc;
totale_opbrengst = kWh_winst*levensduur;

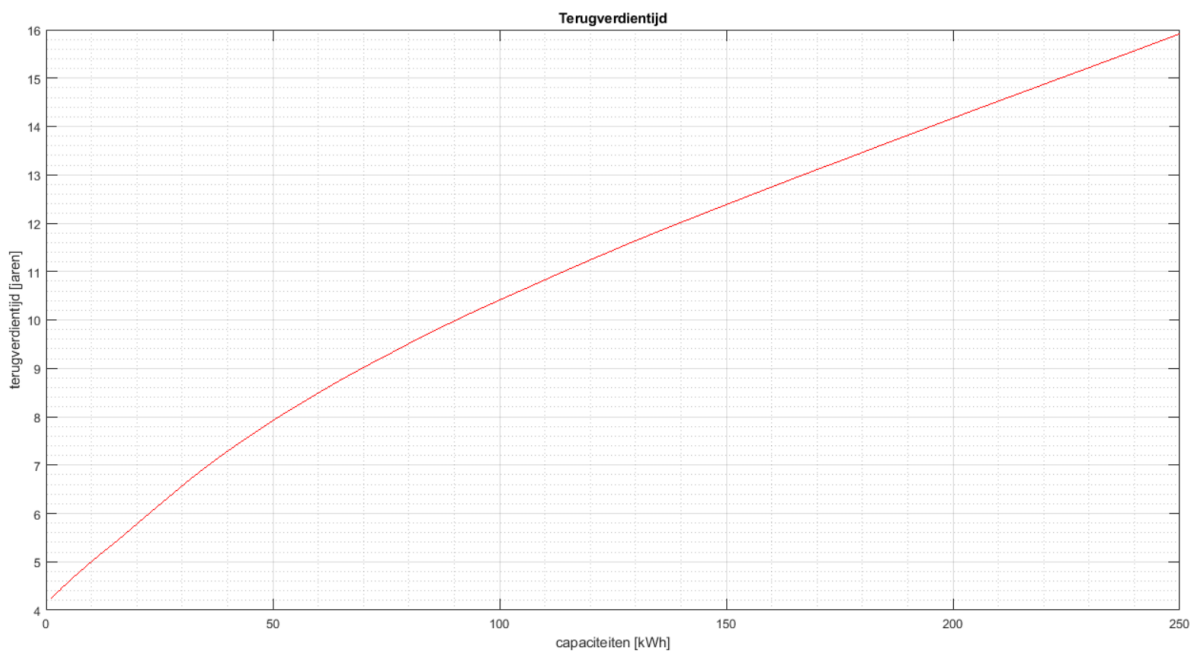
%resultaten in tabellen
kWh_winsten(c,2) = kWh_winst;
totale_opbrengsten(c,2) = totale_opbrengst;
investeringen(c,2) = investering;
winsten(c,2) = totale_opbrengst - investering;
terugverdiertijden(c,2) = investering/kWh_winst;
capaciteiten(c) = inCap;
levensduren(c,2) = levensduur;
end
    
```

*Figuur 76: Resultaten in tabelvorm*

Het uiteindelijke doel is om de investering zo snel mogelijk terug te verdienen, dus een zo snel mogelijke terugverdiertijd en de geaccumuleerde winst te maximaliseren binnen de 15 jaar.

Door de stijgende investering zal ook de terugverdiertijd stijgen met een hogere capaciteit (zie Figuur 77). De snelste terugverdiertijd zal waarschijnlijk bij de laagste investering zijn. Dit is bij een capaciteit van ongeveer 1 kWh.

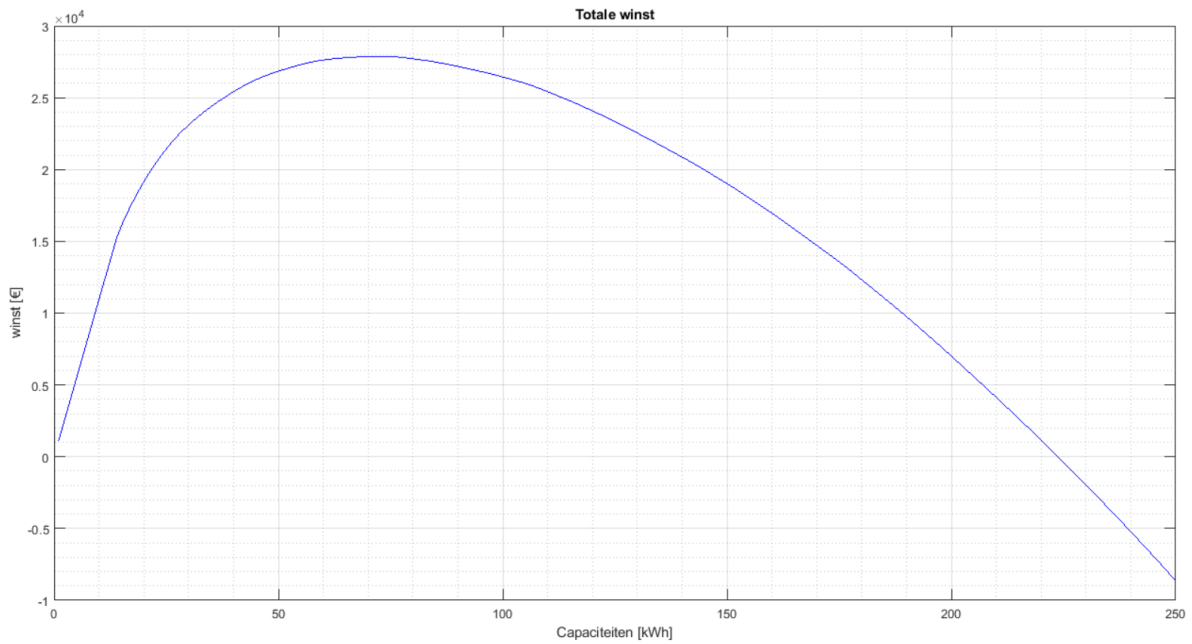
```
plot(capaciteiten, terugverdiertijden(:,2), 'Color', 'red')
```



*Figuur 77: Terugverdiertijd in jaren van lithium-ion batterij*

De totale winst is de totale opbrengst verminderd met de investering. In Figuur 78 daalt de winst op een bepaald moment, dit komt omdat de investering veel te groot wordt t.o.v. de winst. De grootste winst wordt bereikt bij ongeveer 70 kWh (zie verder).

```
plot(capaciteiten, winsten(:,2), 'Color', 'blue')
```



Figuur 78: Totale winst gedurende de levensduur van de lithium-ion batterij in euro

De winst die gemaakt wordt bij een capaciteit van 1 kWh is 1 088 euro. Bij 10 kWh wordt een winst gemaakt van 10 938 euro. De levensduur van deze van 1 kWh is bijna 12 jaar, terwijl de levensduur van deze van 10 kWh iets meer dan 14 jaar is. De grootste winst wordt gemaakt bij 71 kWh. Deze bedraagt € 27 882 en de batterij heeft dan een terugverdientijd van 9 jaar en bijna een maand. Dat vergt een investering van € 42 600. Met deze batterijcapaciteit zal de zelfvoorziening toenemen van 25,67 % naar 29,88 % en zal de zelfconsumptie toenemen van 57,33 % naar 66,73 %.

10 <sup>4</sup> x	1	2
1	0.0001	0.1088
2	0.0002	0.2191
3	0.0003	0.3291
4	0.0004	0.4389
5	0.0005	0.5485
6	0.0006	0.6580
7	0.0007	0.7672
8	0.0008	0.8763
9	0.0009	0.9851
10	0.0010	1.0938
71	0.0071	2.7882

Figuur 79: Winsten van eerste tien capaciteiten en die van 71 kWh (lithium-ion)





## Redox flow batterij

### Initialisatie

In Figuur 80 worden de batterijgegevens van de redox flow geïnitieerd. Ook werd in simulink de efficiëntie aangepast naar 80%.

```
%initialisatie Lion batterij
inCrate = 0.2;
max_cycli = 12000;
prijs_batterij = 600;
```

*Figuur 80: Batterijgegevens redox flow batterij*

### Berekeningen zonder opslag

Dit is net hetzelfde als bij de lithium-ion batterij.

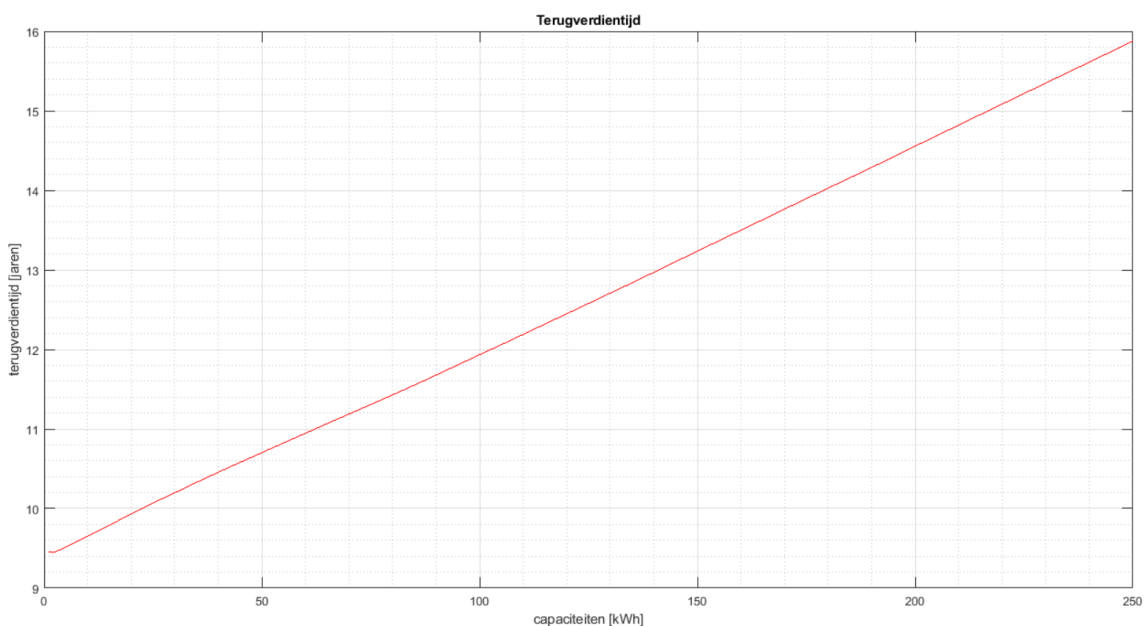
### Berekeningen met opslag

De berekeningen met de redox flow batterij gebeuren op dezelfde manier, waarbij de capaciteiten van 1 kWh tot 250 kWh onderzocht worden met dat verschil dat de C-rate gedaald is naar 0,2 en de efficiëntie van de batterij gezakt is tot 80%. Het aantal cycli dat de batterij maximaal kan doen is verdubbeld.

Op dezelfde manier als bij voorgaande batterij wordt de totale winst, de terugverdientijd, de zelfconsumptie en de zelfvoorziening berekend per capaciteit.

Figuur 81 toont dat de terugverdientijd stijgt naarmate de capaciteit van de batterij groter wordt.

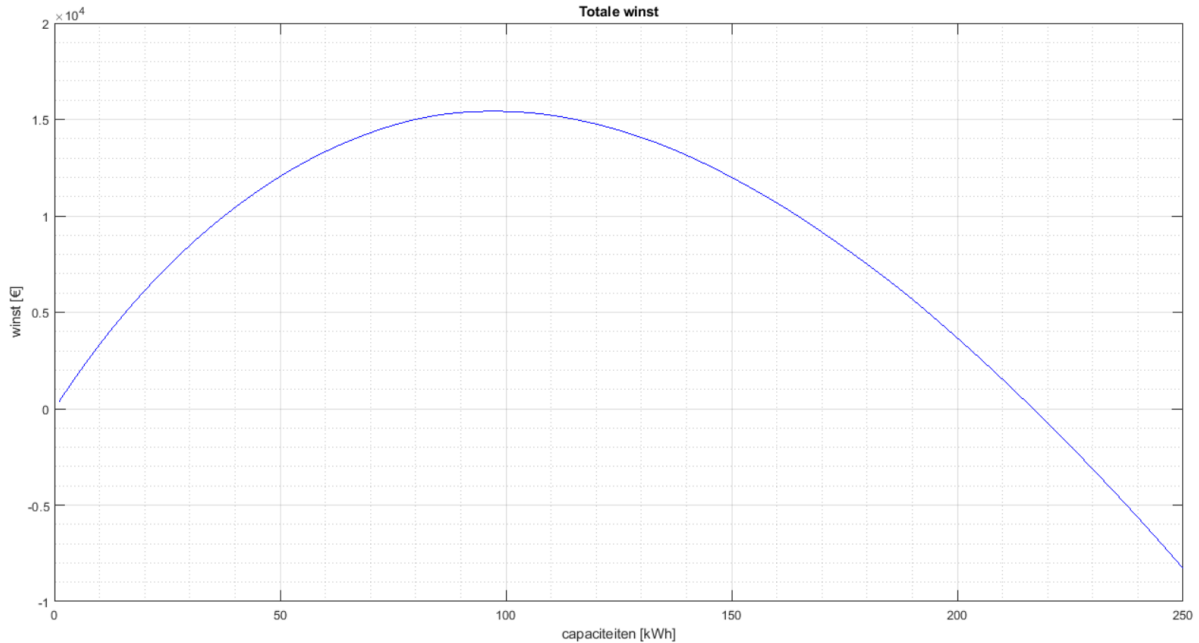
```
plot(capaciteiten, terugverdientijden(:,2), 'Color', 'red')
```



*Figuur 81: Terugverdientijd in jaren van redox flow batterij*

De consument wil natuurlijk een zo groot mogelijke winst halen met de batterij. De totale winst die behaald wordt is de totale opbrengst gedurende de levensduur verminderd met de investering van de batterij. In Figuur 82 daalt de winst plots, dit komt omdat de investering veel te groot wordt t.o.v. de winst. De grootste winst wordt bereikt ergens bij 100 kWh (zie verder).

```
plot(capaciteiten, winsten(:,2), 'Color', 'blue')
```



Figuur 82: Totale winst gedurende de levensduur van de redox flow batterij in euro

De winst die gemaakt wordt bij een capaciteit van 2 kWh is 705 euro. Bij 10 kWh wordt een winst gemaakt van 3323 euro. De grootste winst wordt gemaakt bij zowel 97 als 98 kWh. Deze winst bedraagt 15 425 euro en de terugverdiendtijd van de batterij bedraagt dan iets minder dan 12 jaar. De beste keuze is om deze van 97 kWh te nemen, omdat deze sneller terugverdiend is en de investering € 600 goedkoper is. De investering voor een capaciteit van 97 kWh bedraagt € 58 200. Daarbij zal de zelfvoorziening toenemen van 25,67 % naar 30 % en de zelfconsumptie van 57,33 % naar 67,15 %.

$10^4 \times$	1	2
1	0.0001	0.0351
2	0.0002	0.0705
3	0.0003	0.1053
4	0.0004	0.1393
5	0.0005	0.1729
6	0.0006	0.2059
7	0.0007	0.2383
8	0.0008	0.2701
9	0.0009	0.3014
10	0.0010	0.3323
97	0.0097	1.5425
98	0.0098	1.5425

Figuur 83: Totale winsten van de eerste tien capaciteiten en die van 97 en 98 kWh (redox flow)

## Algemeen besluit

Tabel 15: Samenvatting van de belangrijkste conclusies van beide batterijen

	Capaciteit bij maximale winst	Maximale winst	Investering	Terugverdientijd	Toename zelfvoorziening	Toename zelfconsumptie
<b>Lion</b>	71 kWh	€ 27 882	€42 600	9 jaren	16,40%	16,40%
<b>Redox flow</b>	97 kWh	€ 15 425	€ 58 200	11,86 jaren	16,87%	17,13%

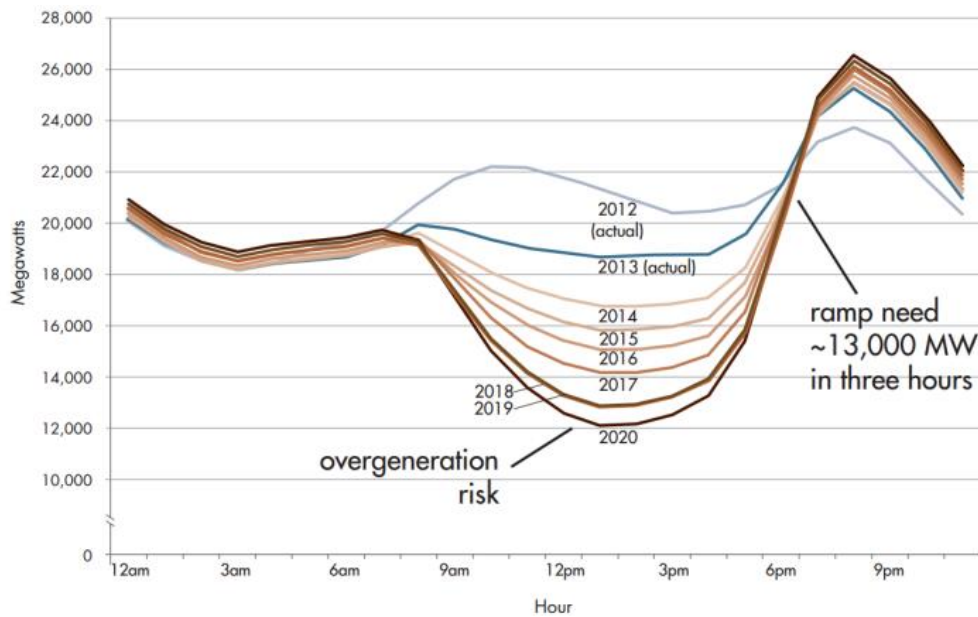
In Tabel 15 is duidelijk dat de Lion batterij een grotere maximale winst heeft ook al is de toename van zelfvoorziening en zelfconsumptie ongeveer hetzelfde. Dit ligt vooral aan het feit dat de maximale winst voor de Redox flow bij een veel hogere capaciteit ligt en dus een hogere investering vraagt. Dus heeft hij maar 3 jaar en een beetje om zuivere winst te maken (levensduur is 15 jaar). Ook heeft de Lion batterij een hogere efficiëntie.

(Desmet, 2021-2022)

## Uitdagingen bij decentrale RES in laagspanning

Nu steeds meer decentraal energie opgewekt wordt, ontstaan er allerlei problemen. Vroeger met de centrales (centrale productie) kon er steeds energie opgewekt worden als er vraag was en omgekeerd. Met hernieuwbare energie is er het probleem dat er enkel opbrengst is als er wind en/of zon is. Daarnaast is de opbrengst ook afhankelijk van de lokale en tijdelijke windvariatiaties

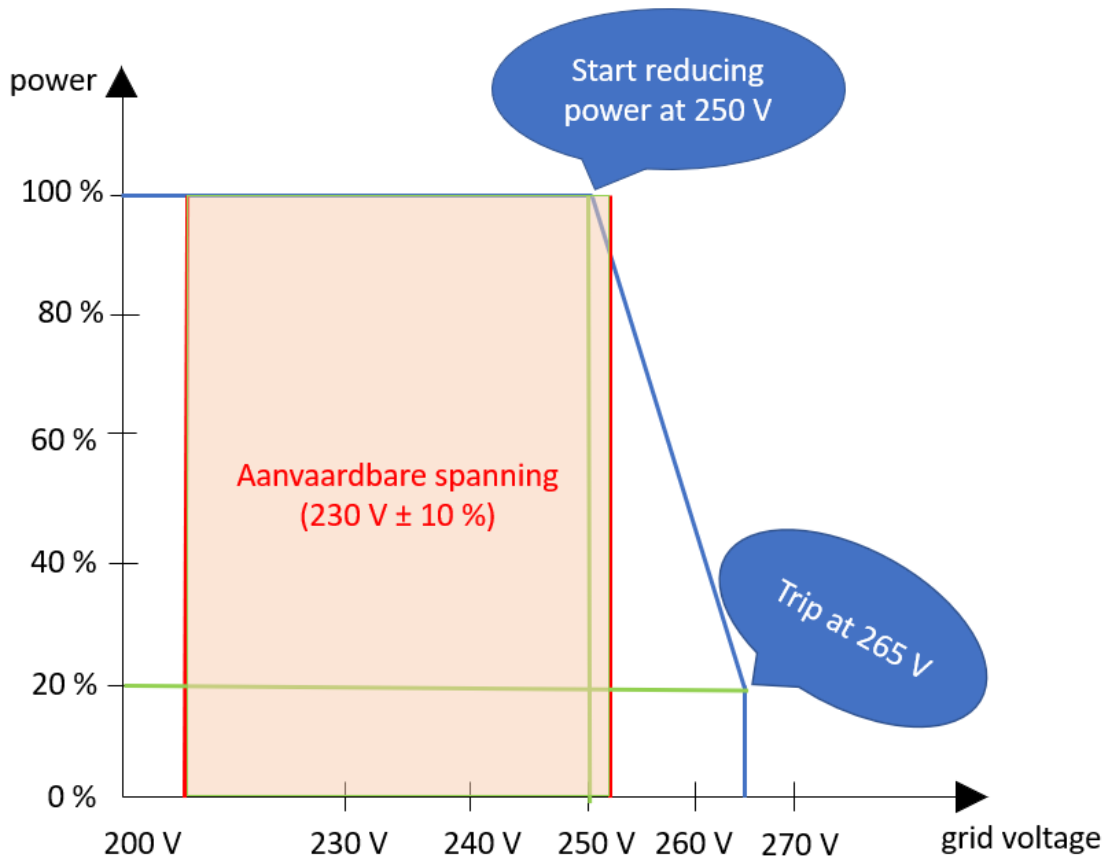
en/of bewolking (seizoenen). Figuur 84 toont aan dat de stijging van decentrale productie zorgt voor een overschot aan energie op het net overdag. Daarna is er een tekort aan energie en vraagt de consument plots veel elektriciteit van het net die er niet altijd is of tijd nodig heeft om te produceren.



Figuur 84: Stijging van de penetratiegraad

(Desmet, 2021-2022)

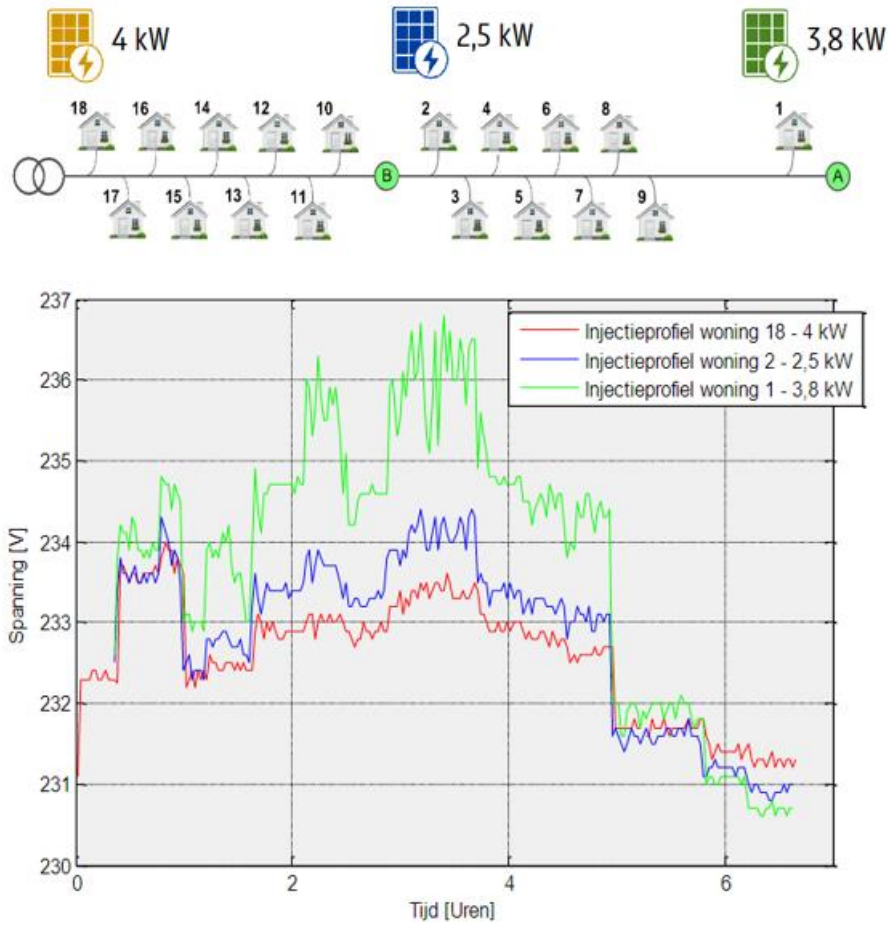
Die overschot aan energie die overdag in het net geïnjecteerd wordt, zorgt voor een spanningsstijging aan de transformator in de straat. Een te grote spanning kan invloed hebben op de levensduur van de meeste huishoudelijke apparaten en kan ook schade aanbrengen aan gevoelige elektronische apparatuur. Die spanningsstijging weerhoudt de klanten ervan om het meeste uit hun PV-panelen te halen. Bij een te grote spanningscongestie (stijging van spanning) zal ook de omvormer zichzelf afschakelen van het net. Dus is er geen opbrengst meer. De klant zal dan op het einde van de maand meer moeten betalen dan hij verwachtte en wordt “kwaad”. In Figuur 85 is te zien dat de omvormer een nominaal vermogen injecteert bij een spanning tot 250 V. Naarmate die toeneemt zal het vermogen zakken. De omvormer schakelt uit bij 265 V en als de overspanning langer dan tien minuten 253 V is, zal hij ook uitschakelen. Dus een teveel aan PV-installaties in de straat zorgt voor overbelasting van het net. De bestaande LS netten zijn dan ook ontwikkeld voor consumptie, waarbij de gelijktijdigheid van het verbruik 0,25 à 0,30 is. Terwijl de gelijktijdigheid van de PV-opbrengst ongeveer 1 is.



*Figuur 85: Vermogen omvormer in functie van netspanning*

Decentrale opwekking zorgt anderzijds wel voor de vermindering van jouleverliezen, doordat het verbruik zich dichterbij de bron bevindt. Om deze overspanning te voorkomen en dus ook te voorkomen dat de aangesloten omvormers van het net schakelen zijn er enkele oplossingen:

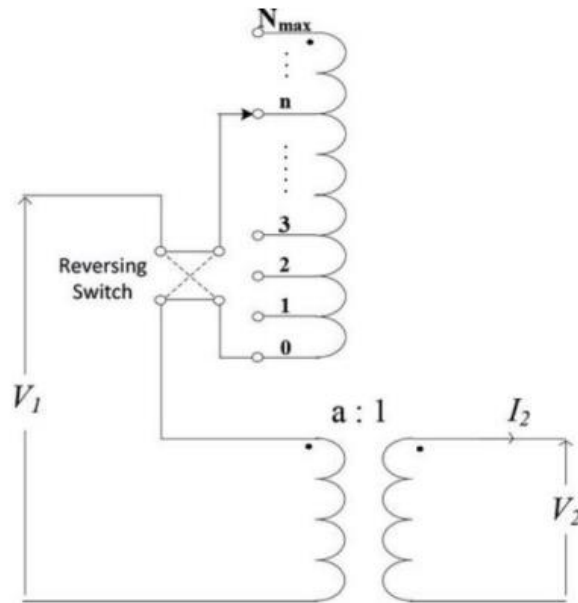
- Als meerdere omvormers op eenzelfde fase injecteren zal de spanning op die fase snel verhogen. Een mogelijkheid hierbij is om sommige van die éénfasige aansluitingen van fase te veranderen, waardoor de fasen meer gebalanceerd zijn.
- Een tweede mogelijkheid is om de kabelsectie te verhogen of de kabels parallel leggen, waardoor de spanningsval daalt.
- Doordat woningen met een PV-installatie verder van de transformator voor eenzelfde spanningsstijging minder stroom kunnen injecteren, is de verdeling van de woningen over de verschillende fasen belangrijk (zie **Figuur 86**). Dit komt door de hoge resistieve weerstand van de kabel in de straat.



Figuur 86: Spanningsstijging afhankelijk van de afstand tot de transformator

(Desmet, 2021-2022)

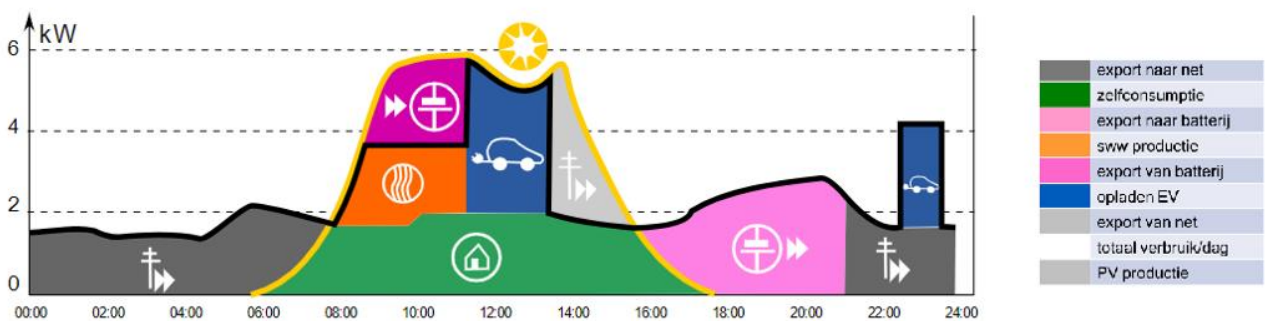
- De DNB sluit een contract af met klanten met PV-panelen dat ze de klanten van het net mogen afschakelen als de netspanning een bepaalde waarde bereikt.
- Als klant de zelfconsumptie verhogen.
- Opslag plaatsen betekent de opbrengst afstemmen op het verbruik. Dit kan ook door bijvoorbeeld de oriëntatie van de panelen te veranderen, maar dan benut je je panelen niet volledig.
- De transformator vervangen door een OLTC-transformator (on load tap changer). Dit is een automatisch regelsysteem, waarbij de secundaire spanning van de transformator wordt geregeld zodat de spanning binnen de grenzen valt. Hierbij duurt elke aanpassing ongeveer 3- 20s. In Figuur 87 wordt de hoogspanningszijde van de transformator aangepast, omdat de laagste stroom zich daar bevindt.



Figuur 87: Transformator met automatisch regelsysteem

(Azzouz, 2020)

- Een andere mogelijkheid is om het eigen verbruik te verhogen door het verbruik af te stemmen op de opbrengst bijvoorbeeld met behulp van domotica.



Figuur 88: Het verbruik afstemmen op de opbrengst

(Desmet, 2021-2022)

- Een andere optie is door de omvormer te onderdimensioneren. Zo zal er minder in het net geïnjecteerd worden, die overschot zal in warmte omgezet worden. Toch zal de zelfvoorziening ongeveer hetzelfde blijven. Dit heet curtailment (= inperking) en gebeurt al bij de offshore windparken bij een teveel aan energie op het net.

Sommige van deze puntjes zullen ook zorgen voor een verlaging van het capaciteitsstarief, zoals: de zelfconsumptie en zelfvoorziening verhogen m.b.v. opslag, oost-west panelen plaatsen en het verbruik afstemmen op de opbrengst. Indien opslag gebruikt wordt, zal die opslag meestal dienen om enkel de pieken te reduceren.

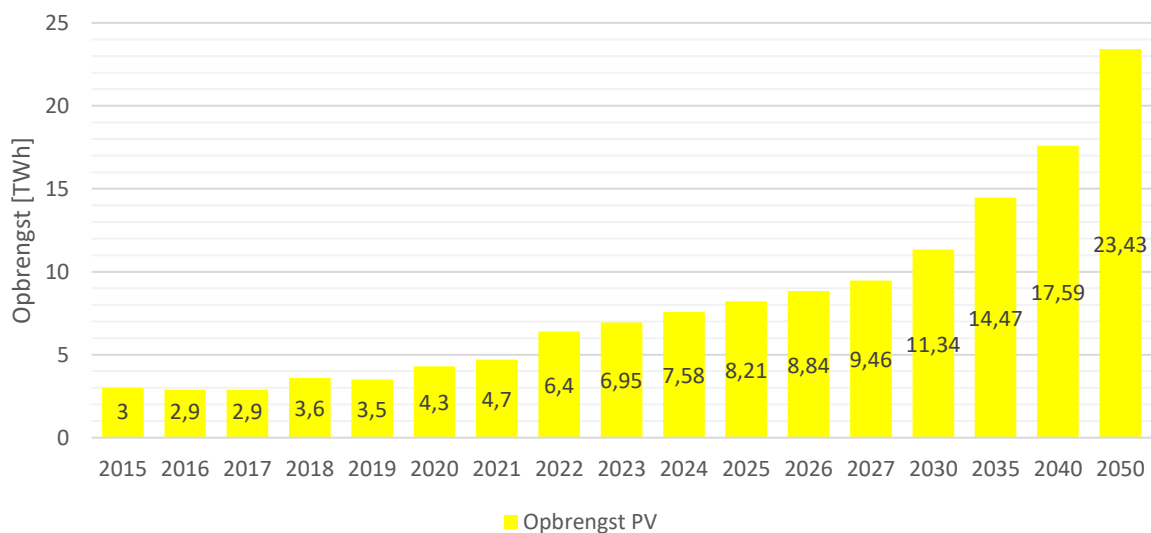
Het probleem zit hem in de variabiliteit van hernieuwbare energie. Vooral dan in de avond en 's nachts. Er is dus nooit geen zekerheid van energiebevoorrading. Daarom is flexibiliteit om vraag en aanbod zo goed mogelijk op elkaar af te stemmen belangrijk. Opslagssystemen kunnen dit

oplossen, maar ideale opslagsystemen die goed zijn voor het milieu en weinig plaats innemen met een aanvaardbare energiedichtheid zijn er momenteel nog weinig van.

(Desmet, 2021-2022)

## Haalbaarheid van zonne-energie

Het totaal omvormervermogen van zonnepanelen in België bedraagt 6,47 GW. Dat is goed voor een zonneopbrengst van 6,4 TWh (zie Figuur 89). Daaruit komt voort dat de panelen 11 % van het jaar op vol vermogen van de omvormer gedraaid hebben. Als je in deze tijden zou bellen naar installateurs dan zal je de panelen nog niet direct op je dak krijgen. Het is namelijk zo druk en iedereen wil in zonnepanelen investeren door de hoge energieprijzen. België heeft dan ook als doel om tegen 2030 11,6 GW aan zonnepanelen geïnstalleerd te hebben. Samen zou dit goed zijn voor een opbrengst van 11,34 TWh. Tegen 2040 zou men dit willen verhogen tot een vermogen van 18 GW. Volgens Elia zou er 40 GW aan vermogen kunnen liggen op alle daken in België.



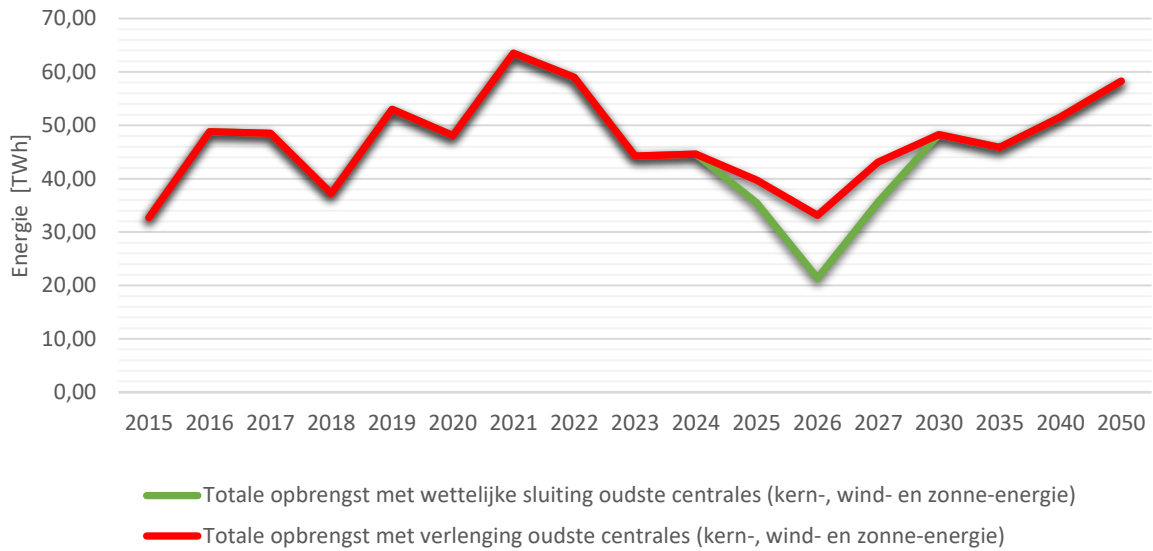
Figuur 89: Werkelijke en toekomstige geschatte opbrengst van zonne-energie

(public net electricity generation, 2022)

Momenteel zijn er geen operationele drijvende zonneparken in de Noordzee van België, maar er zijn verschillende projecten in ontwikkeling. Het grootste project dat momenteel in ontwikkeling is, is het North Sea Energy Park-project. Dit project omvat de bouw van een drijvend zonnepark van ongeveer 1000 MW voor de Belgische kust. Het project is een samenwerking tussen verschillende bedrijven, waaronder Elicio, Deme, Tractebel, en het Havenbedrijf Antwerpen. Het zonnepark zal ongeveer 2,5 keer zo groot zijn als het grootste drijvende zonnepark ter wereld op dit moment, dat zich in China bevindt. Het project bevindt zich nog in de ontwikkelingsfase en er zijn nog geen concrete plannen voor de bouw ervan. Naast het North Sea Energy Park-project zijn er nog andere projecten in ontwikkeling in België, waaronder het Blue Cluster-project.

Figuur 90 geeft de totale opbrengst van kern-, wind- en zonne-energie terug. De opbrengsten na 2022 zijn puur geschat op basis van de gemiddelde utiliteitsfactor en de doelstellingen.





Figuur 90: Werkelijke en toekomstige geschatte opbrengsten van kern-, wind- en zonne-energie

(public net electricity generation, 2022)

(ELECTRICITY SCENARIOS FOR BELGIUM TOWARDS 2050, 2017)  
 (De Nul en DEME testen drijvende zonnepanelen voor onze kust, 2023)  
 (North Sea Energy, sd)

## 10 Studie naar het elektrisch wagenpark

### Elektrisch de toekomst

#### Milieuaspect

Ze zijn stiller, schoner en rijden milieuvriendelijker. Daarom moet iedereen de keuze maken voor een elektrische wagen. Dan is er natuurlijk ook een pak extra stroom nodig. Stel nu dat alle diesel en benzine wagens vervangen worden door een elektrische wagen. Volgens berekeningen van de VUB is er dan 17,1 TWh extra stroom nodig. Dat komt overeen met een installatie die gedurende een heel jaar 1952 MW vermogen opwekt ofwel twee kerncentrales van 1000 MW. Die twee centrales kunnen ook vervangen worden door 610 extra windmolens op zee of 1 220 aan land. De keuze om elektrisch te gaan is vooral, omdat de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot van een elektrische auto 60 % lager zou zijn dan auto's met een uitlaat (zie Tabel 16).

Tabel 16: Vergelijking CO<sub>2</sub>-uitstoot tussen elektrische wagen en benzinevagen

CO <sub>2</sub> -uitstoot [kg] bij	Productie	Accu	220 000 km rijden	Totaal CO <sub>2</sub> -uitstoot [kg]
Elektrische auto	7000	4000	7000	18 000
Benzineauto	7000	0	43 000	50 000

Het grote verschil zit in de uitstoot tijdens het rijden. Een elektrische wagen stoot geen CO<sub>2</sub> of stikstofdioxide uit tijdens het rijden, maar tijdens het laden zal een deel nog uit grijze stroom<sup>17</sup> bestaan. Dit zal in de toekomst evolueren tot nog meer groene stroom, waardoor het getal 7000 nog zal dalen. En dus zal een elektrische auto alleen maar milieuvriendelijker worden, zeker als er gebruik gemaakt wordt van slim laden (zie verder).

De accu wordt gemaakt uit kostbare grondstoffen zoals lithium, kobalt... Tijdens de ontginning komt namelijk CO<sub>2</sub> vrij. Kobalt wordt bijvoorbeeld met de hand uit de grond gehaald in illegale mijnen in Congo. Dit is gevaarlijk en bij wet verboden. De sluiting van die mijnen is geen oplossing, want de arbeiders zullen dan geen werk meer hebben en dat zal leiden tot armoede. Een andere aanpak is door de situaties waarin ze werken te verbeteren of kobalt in de batterij te vervangen. Dat laatste is zeer moeilijk, want kobalt zorgt voor een langere levensduur van de batterij.

## Kosten

De aankoop van een EV is in veel gevallen nog duurder dan die van brandstofauto's, daarnaast kunnen bedrijven wel veel elektrische wagens volledig aftrekken van hun belastingen. Als je kijkt naar de maandelijkse kosten, bespaar je toch al snel met een EV t.o.v. auto's op brandstof. Dat komt doordat de kosten van elektrisch rijden, onderhoud en belastingen een stuk lager zijn. Hieronder een opsomming van de fiscale voordelen van een elektrische wagen in Vlaanderen:

- Volledige vrijstelling in het Vlaams Gewest van BIV bij aankoop van een 100 % elektrische auto.
- Volledige vrijstelling van de jaarlijkse verkeersbelasting (taks) bij de aankoop van een 100 % elektrische auto.
- Koop je een 100 % elektrische bedrijfswagen die je ook privé gebruikt, dan zal je minder VAA-kosten betalen. Dat zal in 2022 neerkomen op 2,4 % à 3,43 % (=  $6/7 * 4 \% * \text{ouderdomspercentage}$ ) van de aanschaffingswaarde (met een minimum van € 1400). Voor een brandstofauto is dit tot 15,43 % van de aanschaffingswaarde.
- Sommige lokale gemeenten bieden subsidies aan aan particulieren, wanneer ze een 100 % elektrische wagen kopen of leasen. In Gent is de premie momenteel € 4500.
- De aankoop van een elektrische wagen is voor zelfstandigen meestal 100 % aftrekbaar. De fiscale voordelen op brandstof- en hybride wagens worden afgebouwd in de komende jaren.

Een nadeel aan een elektrische auto is momenteel nog de grotere aanschafkost. Dit komt omdat de batterij bestaat uit zeldzame metalen. Die prijs is wel al veel gezakt met tien jaar geleden. De vele software die zorgt voor de veiligheid, het laden en op temperatuur houden van de batterij kost ook wat geld. Doordat de batterijen voor een gunstige mobiliteit zwaar zijn, moeten de metalen van de wagen lichter gekozen worden. Deze zijn dan ook duurder. Er wordt verwacht dat de aanschafprijzen van EV's nog verder zal dalen in de toekomst.

<sup>17</sup> Daarvoor is de CO<sub>2</sub>-emissiefactor voor de stroommix van 2023-2040 aangehouden. De emissiefactor is gebaseerd op een voorspelling van de grijs-groene stroommix tussen 2022-2040.

Tabel 17: Prijsvergelijking elektrische auto vs. benzinewagen

	Prijs	Energie	Verbruik	BIV	Taks (jaarlijks)	VAA (jaarlijks)	Totaal	Prijs/km
<b>VW-golf 1.0TSI 81 kW (benzine)</b>	€ 30 660	1,7 €/l	5,3 l/100 km	€ 171,69	€ 129,12	€ 4730,84	€ 64141	0,64 €/km
<b>VW ID.3 58 kWh (elektrisch)</b>	€ 45 110	0,40 €/kWh	16,6 kWh/100 km	€ 0	€ 0	€ 1547,27	€ 59 486	0,59 €/km

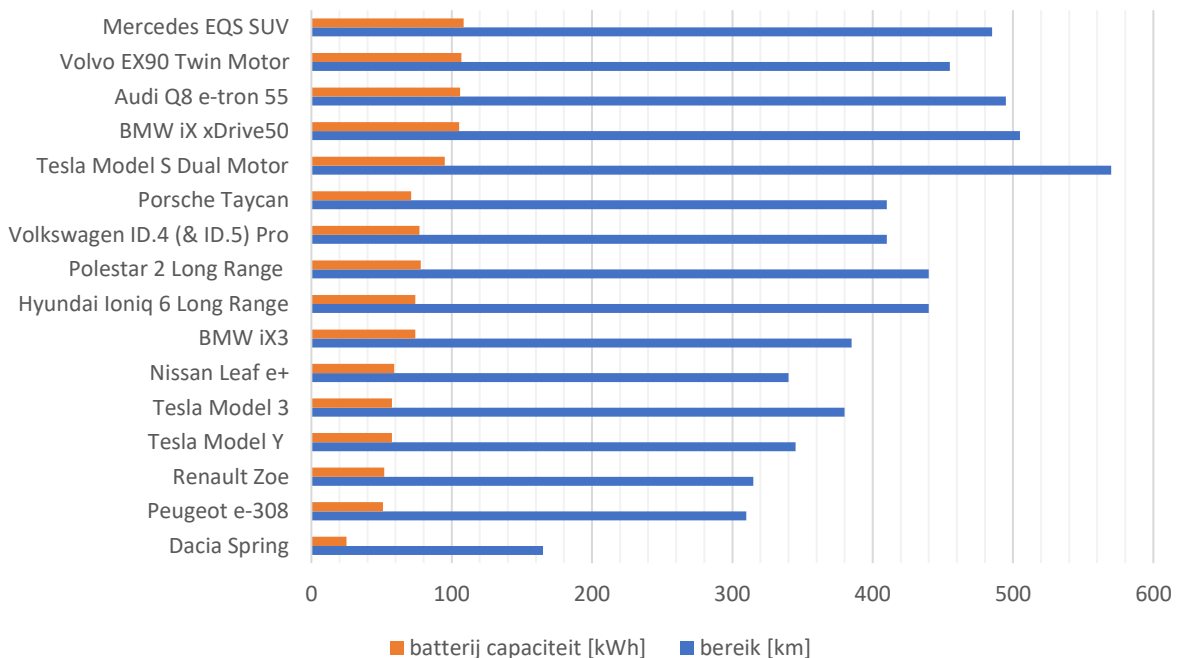
Opm.:

- Berekening over vijf jaar met 20 000 km/jaar,
- Onderhoud, verzekering en subsidies niet meegerekend

Uit Tabel 17 volgt dat ondanks de hoge aanschafprijs van een elektrische wagen, deze per gereden km toch goedkoper is dan een benzinewagen. Dit ondanks het feit dat er geen BIV en taks moet betaald worden en doordat de VAA-kost lager ligt. Daarnaast krijg je voor een elektrische wagen nog subsidies en zijn de onderhoudskosten lager, doordat de motor minder onderdelen bevat. Als je de EV oplaadt met een slimme controlestrategie met je eigen zonnepanelen, kan de prijs/km nog dalen tot 0,53 €/km.

### Actieradius

Wat de mensen vaak tegenhoudt om een elektrische wagen te kopen, is het aantal kilometers dat met de batterijen kan gereden worden. Hoe ver een EV rijdt, hangt natuurlijk af van het merk en het model. Het bereik wordt bepaald door de capaciteit van de batterij. Figuur 91 toont de verschillende batterijcapaciteiten en hun actieradius van verschillende modellen.



Figuur 91: Vergelijking van batterijcapaciteit en bereik van elektrische wagens

(Electric Vehicle Database)

Naar de toekomst toe is het de bedoeling om de energiedichtheden van batterijen te verhogen, zodat ook kleine wagens een grote actieradius hebben. Grote wagens hebben nu ongeveer een gemiddelde actieradius van 425 km, terwijl kleinere wagens een bereik van gemiddeld 230 km hebben. Natuurlijk hangt dit af van o.a. het weer, rijstijl, bandenspanning... De energiedichtheid van diesel en benzine is veel groter dan die van een batterij, daarom wegen elektrische wagens meer en moeten lichtere metalen gebruikt worden. Dit drijft de kost naar omhoog.

### Opslag

De meeste modellen uit Figuur 91 hebben NCM-batterijen. De tesla model S Dual Motor en Audi Q8 e-tron 55 hebben een NCA-batterij. Fabrikanten hebben de voorkeur voor Lithium-nikkel-kobalt-mangaanoxide (NCM) en lithium-nikkel-kobalt-aluminiumoxide (NCA) batterijen i.p.v. LFP-batterijen. De tesla model Y en model 3 hebben een LFP-batterij. Dit komt o.a. doordat de energiedichtheid van NCM ( $\pm 230\text{-}250 \text{ Wh/kg}$ ) en die van NCA ( $\pm 322 \text{ Wh/kg}$ ) batterijen veel hoger ligt (LFP  $\rightarrow \pm 150 \text{ Wh/kg}$ ). Met deze batterijen zullen de wagens verder kunnen rijden met eenzelfde gewicht. LFP-batterijen worden voornamelijk gebruikt in voertuigen die weinig kilometers moeten afleggen, zoals stadsbussen. Indien de fabrikant voor LFP-batterijen kiest, komt dit voornamelijk omdat ze veiliger zijn. Ze zullen veel minder snel verbranden bij kortsluiting. Daarnaast presteert de LFP-batterij beter bij hogere temperaturen, NCA en NMC-batterijen presteren beter bij lagere temperaturen. Bij  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  zal bijvoorbeeld de LFP-batterij slechts 55 % van zijn capaciteit vrijgeven, terwijl de NMC-batterij 70 % vrij kan geven. Dus NMC-batterijen zijn een betere keuze bij lage temperaturen.

Als de fabrikant een grote actieradius met een hoog rendement en laag gewicht nastreeft, dan zal hij best kiezen voor NMC/NCA-batterijen. LFP-batterijen worden het meest aanbevolen voor energieopslag als thuisbatterij, omdat veiligheid en een lange levensduur dan belangrijk zijn.

Je kunt ze nog niet kopen elektrische wagens met solid-state batterijen, maar ze zijn in de maak. Deze batterijen zijn nog efficiënter en hebben een nog langere levensduur. Ook zal de actieradius groter zijn en zal sneller geladen kunnen worden. Doordat de elektrolyt bij deze batterij vast is, zal ook de veiligheid verhogen en het risico op brand verlagen.

### Samengevat

Tabel 18 geeft een samenvatting van belangrijke kenmerken tussen de verschillende gebruikte brandstoffen van voertuigen.

Tabel 18: Samenvatting van enkele kenmerken van gebruikte brandstoffen bij auto's

Technologie/brandstof	Klimaat	Luchtkwaliteit	Aanschafkost	Gebruikskost	Actieradius
Benzine	👎👎	👍	👍	👎	👍👍
Diesel	👎	👎👎	👎	👍	👍👍👍
LPG, CNG	👎	👍	👎	👍👍	👍👍
Biodiesel	👍👍*	👎	👎	👍*	?
Alcohol	👍👍*	👍	👍	👎*	👍
Waterstofmotor	👍*	👍👍👍	👎👎	👎👎	👎
Waterstofbrandstofcel	👍👍*	👍👍👍	👎👎👎	👎👎👎	👎
Batterij-elektrisch	👍👍👍*	👍👍👍	👎👎👎	👍👍👍	👎👎👎

\*: afhankelijk van productie

(Alles over elektrische auto)

(Sergeant, 2023)

(Huang, 2020)

(Elektrisch rijden: welke subsidies en voordelen krijg ik?, 2023)

## Controlestrategieën EV (ont)laden

Eerder werd aangehaald dat het milieu belangrijk was, daar kan nog meer aan gewerkt worden door zoveel mogelijk groene energie te gebruiken voor je EV. Dus zijn controlestrategieën wel degelijk nodig. Als u bijvoorbeeld thuiskomt en de auto wil opladen op vol vermogen, dan zal met het huidige capaciteitsstarief uw factuur ook de lucht inschieten. Met controlestrategie wordt bedoeld dat de batterij vol is tegen dat u vertrekt. Eerst en vooral moet dit gebeuren met de overvloedige stroom van de zonnepanelen en daarna zal dan moeten geladen worden op een lager vermogen gedurende langere tijd.

### Situatieschets

De woning is voorzien van een zuidgericht PV-park. De eigenaar koopt daarnaast nog een elektrisch voertuig. De gebruiker kan in de bijhorende laadinfrastructuur het vertrekuren en de gewenste lading (SoC<sup>18</sup>) bij vertrek instellen. In onderstaande voorbeelden is het vertrekuren steeds 7u en het aankomsturen 12u. De vergelijking zal gemaakt worden tussen de drie verschillende (ont)laadstrategieën: ongecoördineerd laden, gecoördineerd laden en V2G.

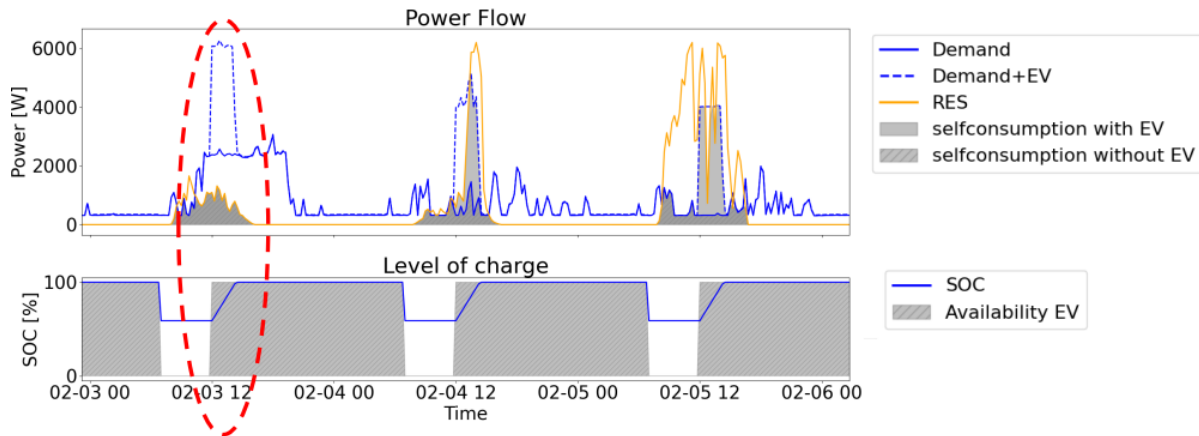
### Ongecoördineerd laden

Met een elektrisch voertuig en de strategie dom laden, laadt het voertuig bij thuiskomst aan vol vermogen. Als het laden samenvalt met de productie van zonne-energie, zal het eigenverbruik stijgen. Dus zal op dat moment de kost dalen, omdat de piek van het laden gereduceerd wordt. Wanneer geladen wordt aan vol vermogen in de avond (geen zonne-energie), zal de energiefactuur stijgen.

In het onderste deel van Figuur 92 is de beschikbaarheid van het voertuig grijs en de SoC is blauw. Bij een thuiskomst rond 12u zal nog een deel voor het laden van de EV kunnen gehaald worden uit zonne-energie. In de rode cirkel is de opbrengst van die dag zeer laag en zal dom laden zorgen voor een enorme piek in het verbruik.

<sup>18</sup> SoC = state of charge van een batterij wordt gedefinieerd als de verhouding tussen de huidige capaciteit en de nominale capaciteit, die de maximale hoeveelheid is die in de batterij kan worden opgeslagen onder STC.  $SoC =$

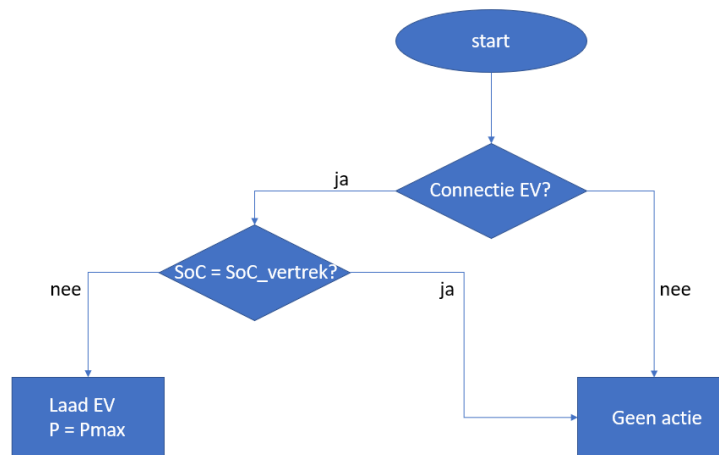
$$\frac{Q(t)}{Q_n(t)} [\%]$$



Figuur 92: Dom laden of ongecoördineerd laden

(Desmet, 2021-2022)

Bij ongecoördineerd laden (zie Figuur 93) wordt dus aan vol vermogen geladen van zodra de stekker ingeplugd is en kan de laadstroom niet geregeld worden. Deze strategie kan dus zorgen voor enorme vermogenspieken, wat nadelig is met het nieuwe tarief.



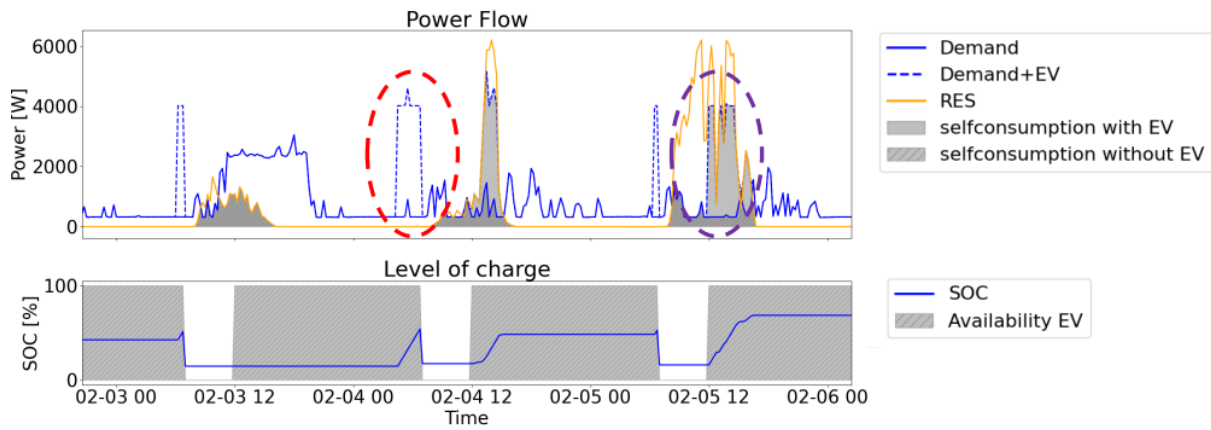
Figuur 93: Controlestrategie ongecoördineerd laden

(Desmet, 2021-2022)

## Gecoördineerd laden

Bij gecoördineerd laden wordt zoveel mogelijk geprobeerd om het eigenverbruik en dus de zelfconsumptie te laten toenemen (en de pieken te reduceren). De gebruiker geeft dan het vertrekkuur en de SoC bij vertrek mee.

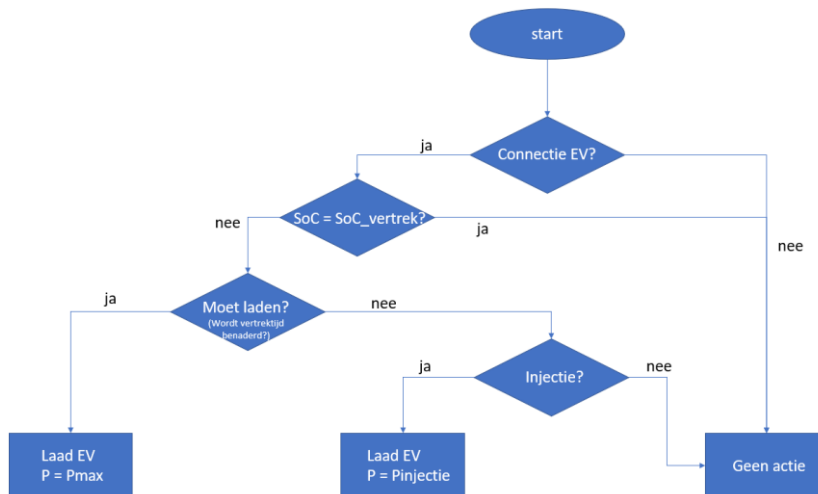
In Figuur 94 is de beschikbaarheid van het voertuig grijs en de SoC is blauw. De EV zal enkel laden, wanneer er een overschot aan energie is. Indien het vertrekkuur dan benaderd wordt en de gewenste SoC is nog niet bereikt, dan zal de batterij verder opladen tot de gewenste SoC bij vertrek aan vol vermogen. Op de eerste dag was de opbrengst te laag en was er geen overschot aan energie. Dus de batterij heeft net voor de vertrektijd op vol vermogen opgeladen. Dat zorgt opnieuw voor een hoge piek (in de factuur).



Figuur 94: Slim laden of gecoördineerd laden met optimalisatie zelfconsumptie

(Desmet, 2021-2022)

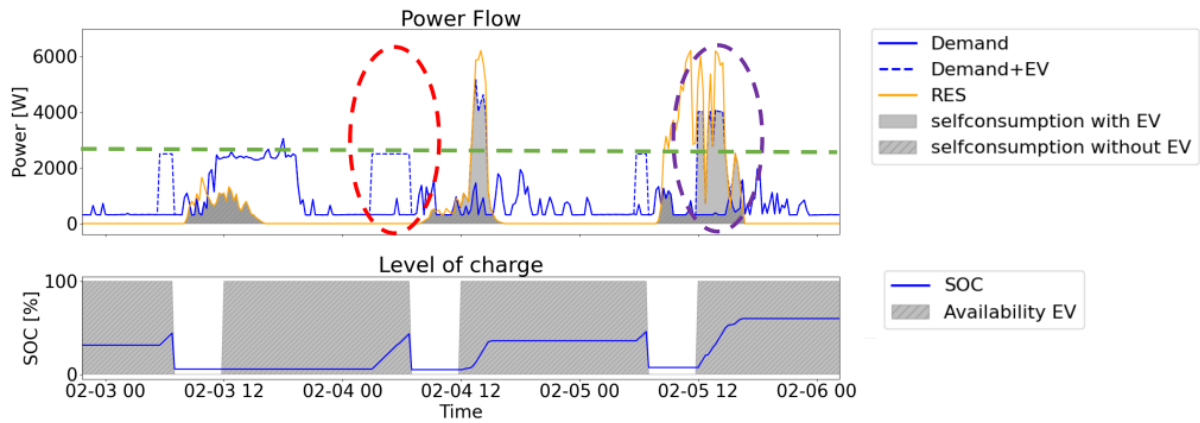
Figuur 95 toont dit principe aan zoals werd toegepast in Figuur 94. Bij gecoördineerd laden is dynamische controle van de laadstroom mogelijk en kan de laadsessie uitgesteld worden in de tijd. Als dit op de juiste manier gebruikt wordt, kan dit zorgen voor een optimalisatie van de zelfconsumptie en een reductie van de vermogenspieken.



Figuur 95: Controlestrategie gecoördineerd laden met optimalisatie zelfconsumptie

(Desmet, 2021-2022)

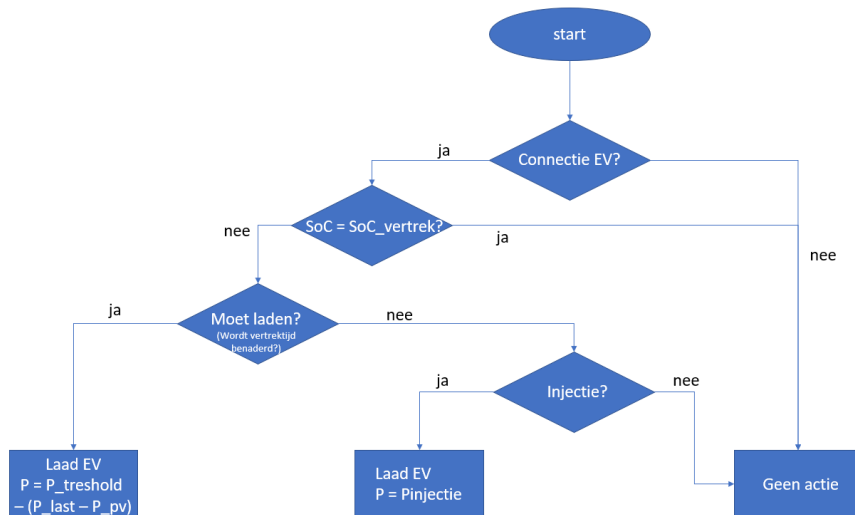
In vorige strategie kon er nog steeds een piek zijn, als er bijvoorbeeld geen overschot was die dag of het verbruik lag te hoog. Om dit op te lossen is er nog een strategie die zich vooral focust op het optimaliseren van de zelfconsumptie en het reduceren van de vermogenspieken.



Figuur 96: Gecoördineerd laden met optimalisatie  $Z_c$  en piekreductie

(Desmet, 2021-2022)

Figuur 96 en Figuur 97 tonen slim laden met een gelimiteerd vermogen, zo kunnen er nooit pieken groter dan de gekozen  $P_{\text{threshold}}$  optreden door het laden van de EV. Anders is het principe hetzelfde als vorige strategie. Voor  $P_{\text{threshold}}$  wordt meestal 2,5 kW gekozen, omdat bij het capaciteitstarief pieken lager dan 2,5 kW toch aan 2,5 kW aangerekend worden.

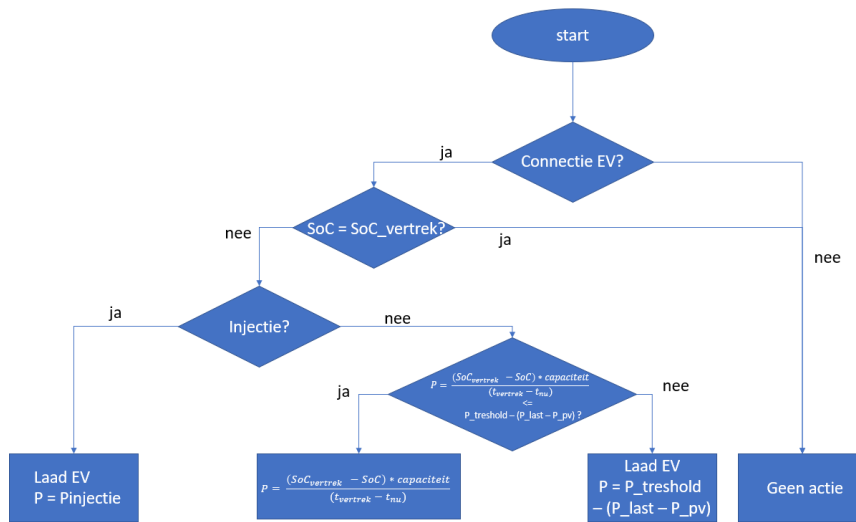


Figuur 97: Controlestrategie gecoördineerd laden met optimalisatie zelfconsumptie en piekreductie (1)

(Desmet, 2021-2022)

Deze strategie kan nog meer geoptimaliseerd worden door te laden aan een laag laadvermogen gedurende de hele nacht bijvoorbeeld of door  $P_{\text{threshold}}$  lager te leggen. Daarvoor moet o.a. ook de SoC van de batterij gekend zijn en de tijd tussen het vertrekuren en het uur wanneer er geen zonnestroom meer is.



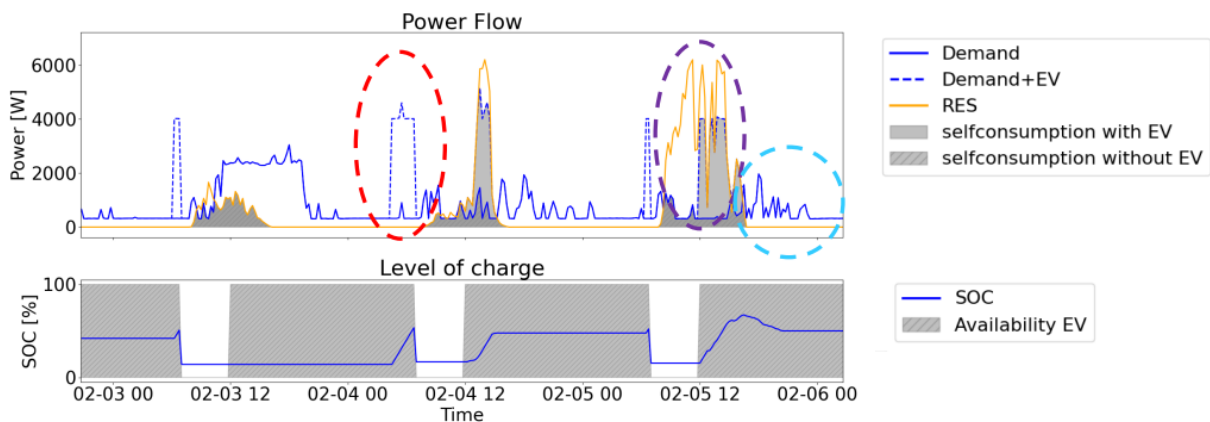


Figuur 98: Controlestrategie gecoördineerd laden met optimalisatie van zelfconsumptie en piekreductie (2)

### V2G

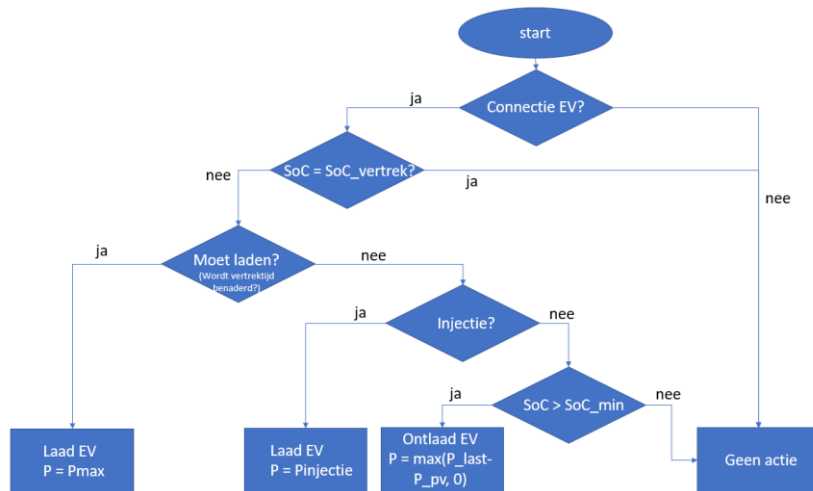
Ook bij V2G (vehicle to grid) wordt zoveel mogelijk geprobeerd om het eigenverbruik en dus de zelfconsumptie te laten toenemen (en de pieken te reduceren). De gebruiker geeft dan het vertrekkuur en de gewenste SoC bij vertrek mee. In vergelijking met gecoördineerd laden kan de wagen bij V2G bidirectioneel laden. Dat betekent dat de batterij van de wagen als mobiele opslag dient voor het huishouden. Niet alle voertuigen kunnen dit.

In Figuur 99 is de beschikbaarheid van het voertuig grijs en de SoC is blauw. De EV zal enkel laden, wanneer er een overschot aan energie is (paarse cirkel). Als het vertrekkuur dan benaderd wordt en de gewenste SoC is nog niet bereikt (rode cirkel), dan zal de batterij verder opladen tot de gewenste SoC bij vertrek aan vol vermogen. Op de eerste dag was de opbrengst te laag en was er geen overschot aan energie. Dus de batterij heeft net voor de vertrektijd op vol vermogen opgeladen. Dat zorgt opnieuw voor een hoge piek (in de factuur). De lichtblauwe cirkel toont dat er een bepaald verbruik uit het net wordt gehaald. Dat verbruik zou kunnen gecompenseerd worden met de mobiele opslag die opgeladen werd, wanneer er een overschot aan energie was en als zijn SoC > SoC\_min. Net voor vertrek zal de batterij dan terug moeten opladen om zijn gewenste SoC te halen.



Figuur 99: V2G laden met optimalisatie zelfconsumptie

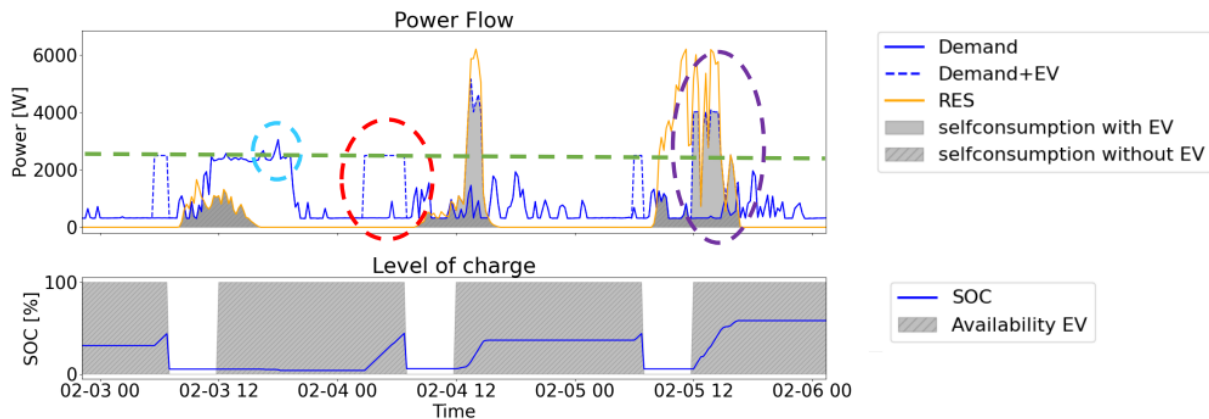
Figuur 100 toont hoe deze strategie geprogrammeerd moet worden. Er kunnen bij deze strategie nog altijd pieken optreden. De piekreductie kan opnieuw gereduceerd worden met een treshold vermogen.



Figuur 100: Controlestrategie V2G met optimalisatie van zelfconsumptie

(Desmet, 2021-2022)

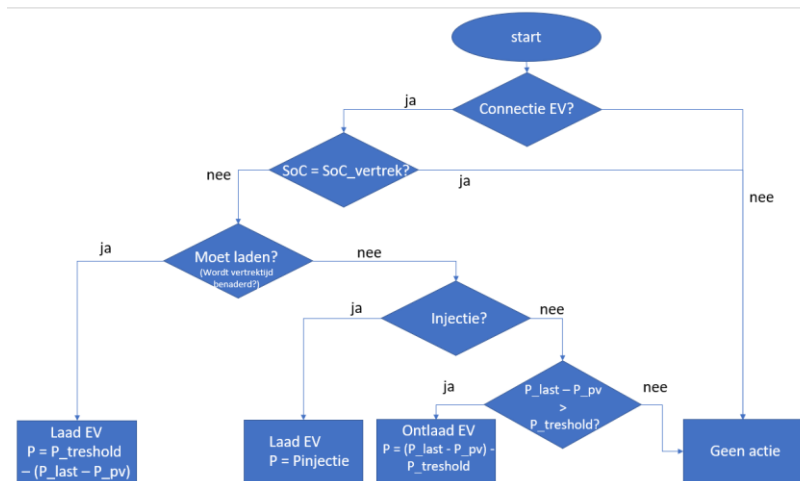
In Figuur 101 zullen de pieken hoger dan een bepaald vermogen opgevangen worden door de mobiele opslag. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn bij de lichtblauwe cirkel. Maar op dat moment was de batterij niet opgeladen en het verbruik bereikte al de drempelwaarde. Opnieuw zal de batterij opladen bij een overschot aan energie (paarse cirkel) en verder laden net voor vertrek met een beperkter vermogen (rode cirkel). Zo ontstaan er geen vermogenspieken.



Figuur 101: V2G laden met optimalisatie zelfconsumptie en piekreductie

(Desmet, 2021-2022)

Figuur 102 toont de strategie van V2G om de pieken in het verbruik boven een bepaalde waarde met mobiele opslag te reduceren. Meestal zal dan net voor het vertrek de batterij nog moeten opladen, omdat deze deels ontladen is in de avond ervoor.



Figuur 102: Controlestrategie met optimalisatie van zelfconsumptie en piekreductie

(Desmet, 2021-2022)

Bij V2G dient de batterij niet enkel als ‘brandstof’ voor de elektromotor, maar ook om verbruikers in huis te voeden. Dit zal een nadelig effect hebben op de levensduur van de batterij, omdat een batterij maar een beperkt aantal cyclussen kan doorlopen. Om de batterij nog minder te laten degraderen, zit er altijd een EMS systeem in de wagen ingebouwd. Zo kan de batterij niet overladen en niet te diep ontladen.

### Casestudie

In de case (zie Tabel 19) is het vertrekkuur 7u en het aankomstuur 12u, daarnaast bedraagt het maximaal laadvermogen 11 kW. Eerst was de PV-installatie niet gedimensioneerd op basis van het verbruik van de EV. Bij de aankoop van een EV werd dan nog het nodige aantal panelen bijgelegd.

Het laden van het elektrisch voertuig zorgt immers voor een stijging van het jaarlijks energieverbruik. Als het laden van de EV samenvalt met de productie van PV-energie, wordt er minder geïnjecteerd op het net en stijgt het eigenverbruik. Ook zullen de zelfconsumptie en de zelfvoorziening toenemen. Dit is het geval bij V2G en gecoördineerd laden. Doordat de wagen voor een lange duur beschikbaar is gedurende de namiddag, heeft het toepassen van bidirectioneel laden geen tot weinig impact op de verdere stijging van de zelfvoorziening. De meerwaarde van V2G t.o.v. gecoördineerd laden is dan ook verwaarloosbaar voor de laadstrategieën maximale zelfconsumptie en piekreductie. Dat komt doordat bij bidirectioneel laden energie in de avond wordt afgegeven, maar deze terug moet opnemen in de ochtend om aan zijn gewenste SOC\_vertrek te komen. Het nadeel om gebruik te maken van bidirectioneel laden is dat de auto overdag beschikbaar moet zijn, wanneer er overschot aan energie is. Anders kan de batterij niet opladen om dan in de avond te ontladen. Als de wagen overdag niet thuis staat, is het beter om gecoördineerd laden met optimalisatie van zelfconsumptie en piekreductie te combineren met statische opslag.

Het spreekt voor zich dat het moment en duur wanneer het EV beschikbaar is, in grote mate de toename van het eigenverbruik zal bepalen. Indien het voertuig om 22u thuiskomt en om 6u alweer vertrekt, dan zal het eigenverbruik, en dus de zelfconsumptie niet toenemen. De

zelfvoorziening zal dan dalen. In bijlage 14.13 zie je voor elke combinatie aankomst- en vertrekkur de toename van het eigenverbruik t.o.v. de situatie zonder EV visueel voorgesteld.

De gemiddelde maandpiek neemt sterk toe door willekeurig te laden. Strategieën die de piekvraag reduceren i.f.v. vraag en aanbod kunnen de maandpiek verminderen.

Tabel 19: Resultaten van de casestudie

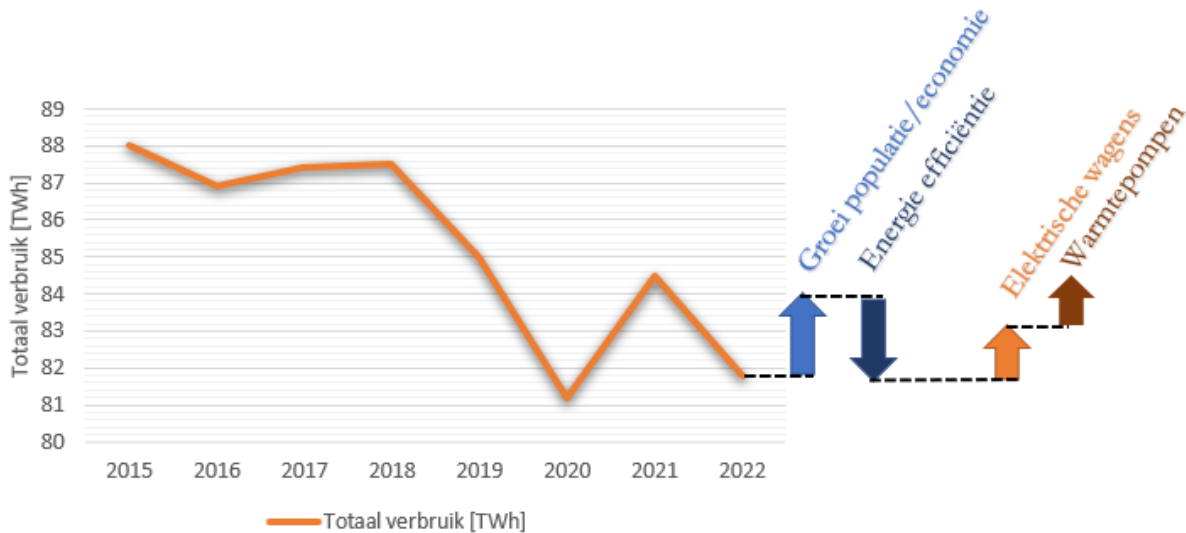
	Geen EV	Ongecoördineerd laden	Gecoördineerd laden		V2G	
			Zc	Zc+piekreductie	Zc	Zc+piekreductie
	\	\				
<b>Jaarverbruik [kWh]</b>	5000	8666	8222	8239	9227	8305
<b>Jaaropbrengst [kWh]</b>	5000	8000	8000	8000	8000	8000
<b>Geïnjecteerde energie [kWh]</b>	3238	5150	3667	3614	3239	3603
<b>Eigenverbruik [kWh]</b>	1762	2850	4333	4386	4761	4397
<b>Aangekochte energie [kWh]</b>	3238	5816	3889	3853	4466	3908
<b>Zelfvoorziening [%]</b>	35,24	32,89	52,70	53,23	51,60	52,94
<b>Zelfconsumptie [%]</b>	35,24	35,63	54,16	54,83	59,51	54,96
<b>Gemiddelde maandpiek [kW]</b>	4,372	12,280	11,043	4,313	11,196	4,313

(Impact EV op residentiële installatie)  
(Desmet, 2021-2022)

## Evolutie verbruik

Om het verbruik in de toekomst te voorspellen, zal eerst moeten gekeken worden vanwaar dit verbruik kan komen. Figuur 103 toont daarvan de verschillende stappen. Ten eerste zal het verbruik toenemen door de toenemende bevolking, daarnaast zal het verbruik afnemen door het verhogen van de efficiëntie. Ook zullen de woningen steeds energiezuiniger worden en zullen individuen en bedrijven steeds meer bewustzijn over energiebesparing. Deze daling is al duidelijk te zien in de laatste vijf jaar. Om de klimaatdoelstellingen te halen en dus steeds minder CO<sub>2</sub> uit te stoten, zullen steeds meer mensen kiezen voor elektrische wagens. Niet alleen daarom, maar ook omdat steeds meer mensen zonnepanelen hebben en dus een elektrische wagen op lange termijn goedkoper is dan een diesel- of benzinewagen (zie eerdere berekening). Vanaf 2026 zullen ook nieuw aangekochte bedrijfswagens 100 % kunnen afgetrokken worden als deze volledig elektrisch zijn of een uitstoot van minder dan 95 g/km hebben. Dit geldt immers niet voor de bestaande bedrijfswagens, deze vallen nog onder de huidige regels. Dus een stijging van

elektrische wagens betekent eveneens een stijging van het verbruik. Daarnaast worden zelfs warmtepompen verplicht in nieuwbouw woningen vanaf 2025. Eerst ging men nog een overgangsfase voorzien met hybride warmtepompen, maar dit is geschrapt. Volgens de regelgeving moeten nu alle nieuwbouw woningen vanaf 2025 een elektrische warmtepomp in huis hebben. Als je weet dat in de berekening is aangenomen dat een elektrische warmtepomp een gemiddeld verbruik van 2500 kWh/jaar heeft, dan zullen deze pompen ook zorgen voor een enorme stijging van het verbruik in België.



Figuur 103: Constructiestappen verbruik

(public net electricity generation, 2022)

## Elektrische voertuigen

In deze berekening worden elektrische autobussen/autocars, personenwagens, speciale voertuigen (campers, brandweerwagens, vuilniswagens...), tractoren, vrachtwagens en motorrijwielen beschouwd. Tabel 20 geeft de gegevens terug die gebruikt worden bij de berekening van het verbruik van elektrische voertuigen. In bijlage 14.14 kan de evolutie van de verschillende elektrische voertuigen teruggevonden worden tot het jaar 2022. Bij de berekening werd een voorspelling gedaan om het aantal elektrische wagens te schatten in de komende jaren. Daarvoor werd aangenomen dat de stijgende trend van elektrische voertuigen blijft aanhouden gedurende de volgende jaren. Voor personenwagens werd een exponentiële groei gebruikt, omdat de bedrijfswagens geëlektrificeerd moeten worden om 100 % te kunnen aftrekken.

Tabel 20: Gegevens berekening verbruik elektrische voertuigen

	Autobus	Personenwagen	Speciale voertuigen	Tractor	Vrachtwagen	Motorrijwielen
<b>Gemiddeld aantal km/jaar</b>	75000	17500	25000	24000	110000	3000
<b>Gemiddeld verbruik [Wh/km]</b>	880	175	600	660	1100	80

Het toekomstig verbruik als gevolg van elektrische voertuigen werd op vier manieren berekend. Een eerste keer op basis van de voorspellingen, dus dat de stijgende trend bleef aanhouden van die bepaalde elektrische voertuigen. Ter verduidelijking hier een voorbeeld: het voorspelde aantal elektrische personenwagens in 2023 is 121807. Dat komt dan neer op een verbruik van:

$$E_0 = 17500 * 175 * 121807 = 0,37 \text{ TWh}$$

Dat is toename van 0,15 TWh aan verbruik t.o.v. het verbruik van elektrische personenwagens in 2022. Toen waren er 71651 elektrische personenwagens (zie bijlage 14.14). Deze berekening werd dan gedaan voor alle soorten elektrische voertuigen.

Een tweede keer werd verondersteld dat de helft van het totale voorspelde voertuigenpark elektrisch wordt. Bijvoorbeeld dat het totaal aantal voorspelde personenwagens in 2023 6.042.985 is. Dan wordt het totale verbruik:

$$E_1 = 0.5 * 17500 * 175 * 6042985 = 9,25 \text{ TWh}$$

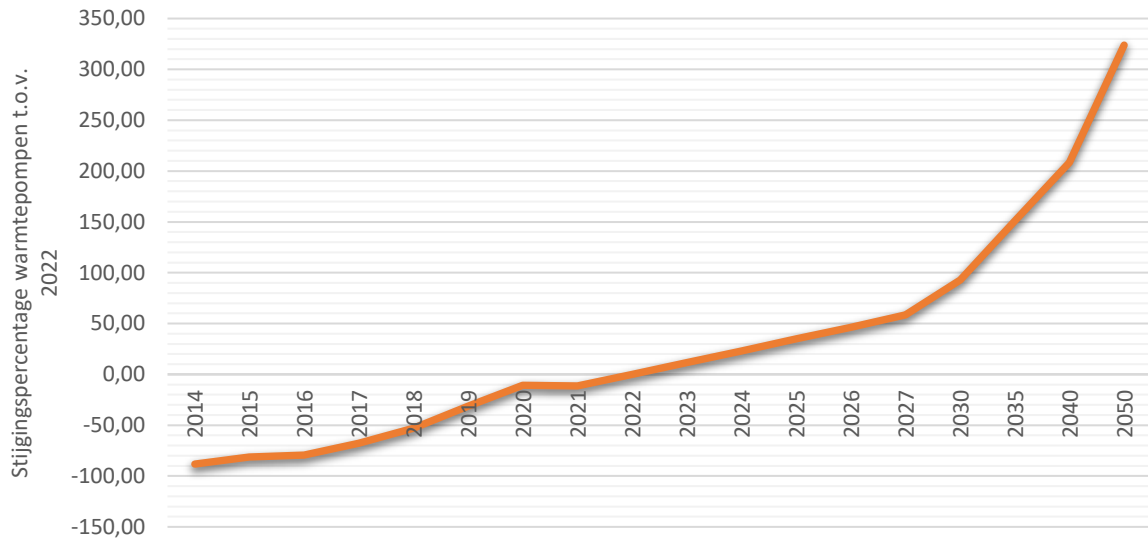
Dit is ongeveer 9 TWh meer dan het verbruik in 2022 van elektrische personenwagens. Opnieuw werd deze berekening gedaan voor alle soorten elektrische voertuigen.

Een derde manier was om volledig elektrisch te gaan, dus dat alle voertuigen van het voertuigenpark elektrisch zouden zijn. Dit is net dezelfde berekening als voorgaande, enkel moet  $E_1$  maal twee gedaan worden.

Een laatste methode is een meer realistische benadering. Hierbij wordt verondersteld dat autobussen/autocars, speciale voertuigen, tractoren en vrachtwagens die een groot vermogen vereisen en soms lange afstanden afleggen in de toekomst niet meer elektrisch rijden. Dat er bij deze soort voertuigen overgeschakeld wordt naar de brandstof methanol of waterstof. Dus dat enkel personenwagens en motorrijwielen elektrisch gaan rijden. Hierbij werd dan aangenomen dat alle personenwagens en alle motorrijwielen elektrisch zijn (maximale verbruik). De berekening is net hetzelfde als  $E_1$  te vermenigvuldigen met twee. Dit wordt hier dan enkel gedaan voor de personenwagens en de motorrijwielen.

## Warmtepompen

Om het totale verbruik te kennen gedurende de volgende jaren, zal ook het verbruik van de elektrische warmtepompen in rekening gebracht moeten worden. Zoals eerder verteld, wordt hier gewerkt met een gemiddeld verbruik van 2500 kWh/jaar. Figuur 104 geeft de toename van elektrische warmtepompen in België terug t.o.v. 2022. Hierbij werd de voorspelling van de volgende jaren opnieuw gedaan met een lineair stijgende trend zoals die van de laatste jaren.

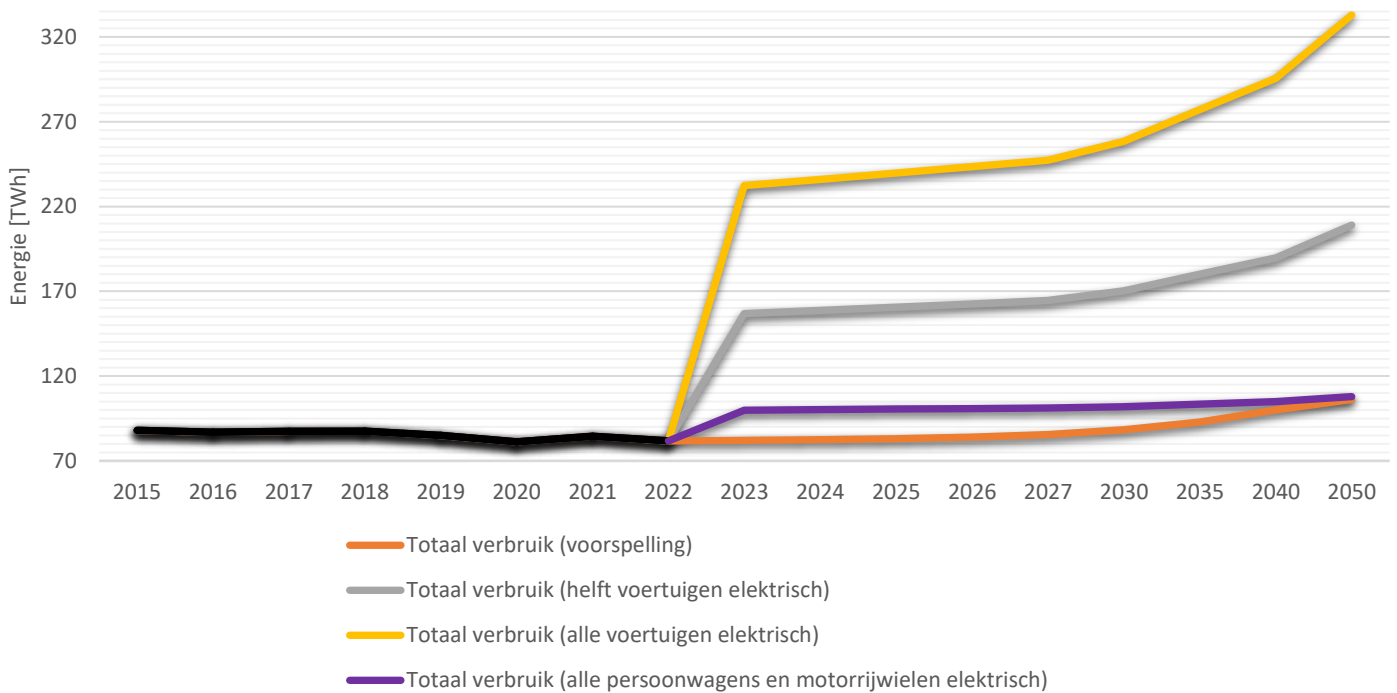


Figuur 104: Stijgingspercentage van elektrische warmtepompen t.o.v. 2022

(Number of heat pumps in operation in Belgium from 2013 to 2020, 2021)

## Totale verbruik

Het totale verbruik van de elektrische voertuigen en de elektrische warmtepompen samen geeft



Figuur 105: Totale werkelijke en toekomstig geschatte verbruik in België

(public net electricity generation, 2022)

dan Figuur 105. In bijlage 14.15 zijn de cijfergegevens van bovenstaande grafiek terug te vinden.

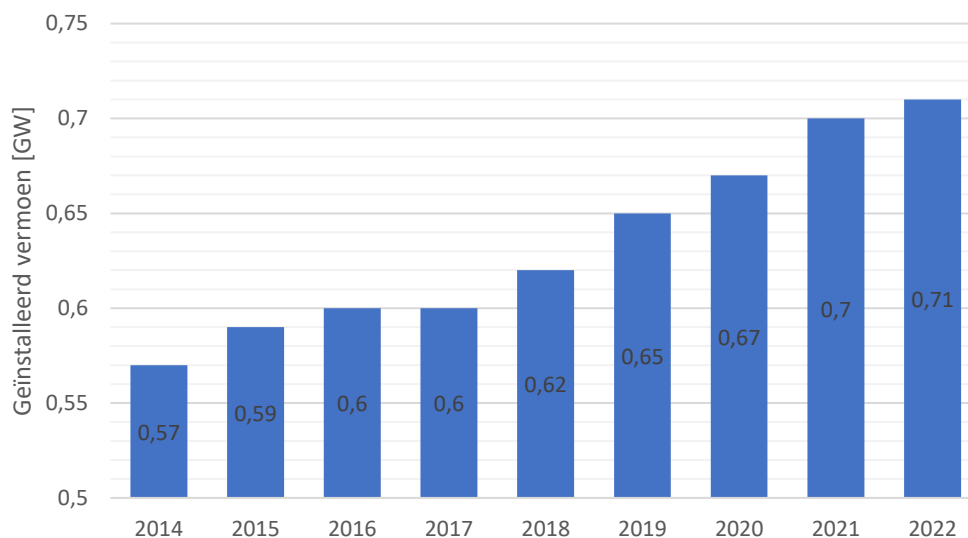
(Voertuigenpark, 2017)  
(Neels, 2022)

## 11 Andere soorten energieopwekkingen

### Biomassa

Biomassa is een stof die wordt geproduceerd door organismen, zoals planten, dieren en ook een biologisch afbreekbare fractie van industrieel en huishoudelijk afval. Voorbeelden van biomassa voor energieopwekking zijn: houtpellets, mest, suikerriet, maïs, koolzaadolie, palmolie en dierlijke vetten.

Figuur 106 toont de evolutie van het gebruik van biomassa in België voor de opwekking van energie. Als bron voor elektriciteit zal de rol van biomassa de komende jaren naar verwachting iets toenemen en daarna terug afnemen, omdat de totale hoeveelheid hernieuwbare energie (zon, wind...) wel zal stijgen. Als warmtebron zal biomassa de komende jaren wel een belangrijke rol spelen. Deze groei is afhankelijk van de ontwikkeling van andere warmtebronnen. Op dit ogenblik zijn er plannen om in België nog twee grote centrales te bouwen. Dit dient voorlopig als 'tussenoplossing'.



Figuur 106: Evolutie geïnstalleerd vermogen biomassa in België

(public net electricity generation, 2022)

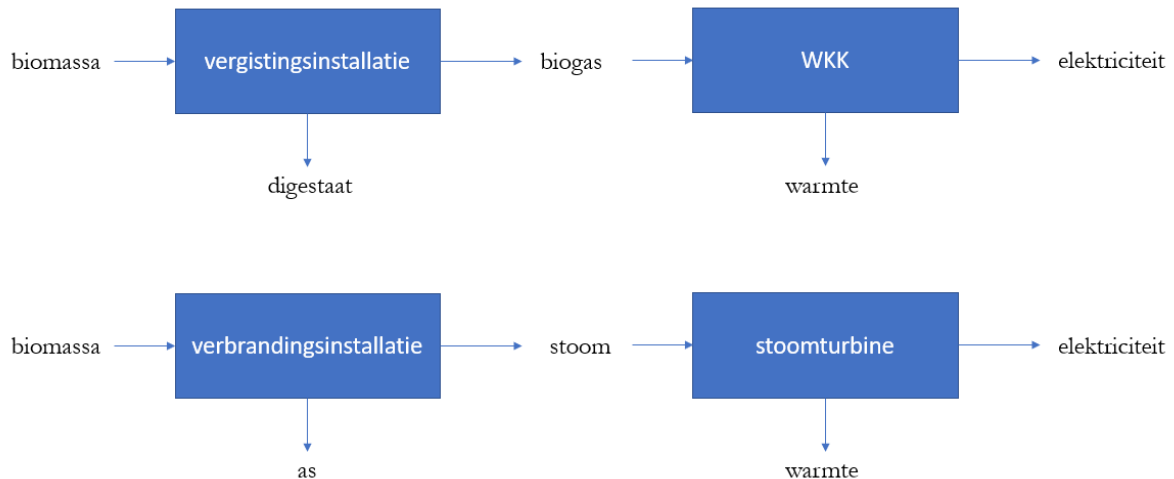
### Werking

Een eerste methode (zie Figuur 107) om elektriciteit en warmte uit biomassa te halen is vergisting. Vergisting is het omzetten van biomassa (vb. GFT, mest, bermgras...) in biogas (vb. methaan, alcohol...) d.m.v. bacteriën en schimmels. Het digestaat is het natte eindproduct, dat als



meststof kan gebruikt worden. Met een warmtekrachtkoppeling kan het gevormde biogas dan omgezet worden in warmte en elektriciteit.

Een tweede methode is de verbranding van biomassa (vb. houtstof uit houtpellets). De hitte van die vlammen wordt afgestaan aan een tweede circuit van koud water onder hoge druk. Die stoom drijft een turbine aan en vervolgens een generator die elektriciteit opwekt.



Figuur 107: Vergisten en verbranden van biomassa

Er bestaan nog andere manieren om elektriciteit uit biomassa op te wekken:

- Biomassa samen met steenkool vermalen en in de ketel van de kolencentrale verbranden.
- Biomassa omzetten in biogas door het vergassen van houtspaanders.

### Milieuaspect

Doordat biomassa op relatief korte termijn aangevuld kan worden, beweert men dat dit een hernieuwbare grondstof is. Toch moet er kritisch gekeken worden naar biomassa. De organismes die de biomassa produceren, nemen de ontstane CO<sub>2</sub> op uit de lucht. Bij de verbranding van de biomassa ontstaat dan opnieuw CO<sub>2</sub>. Dit is theoretisch dan een gesloten kringloop. Werkelijk is dit geen gesloten CO<sub>2</sub>-kringloop, omdat er ook CO<sub>2</sub> vrijkomt bij het produceren, het winnen, het transporteren en het verwerken van de biomassa. Daarnaast zit er een serieuze vertraging tussen de emissie en de opname van de CO<sub>2</sub> uit de lucht, wat op korte termijn leidt tot opwarming van de aarde. Verbranding gaat dan ook snel en het groeien van bossen traag. Ook zal het winnen van biomassa resulteren in ontbossing, het verslechteren van bodem- en waterkwaliteit en het verlies van biodiversiteit. Biomassa is dus geen zuiver hernieuwbare brandstof.

(is hout (of biomassa) duurzaam?, 2023)

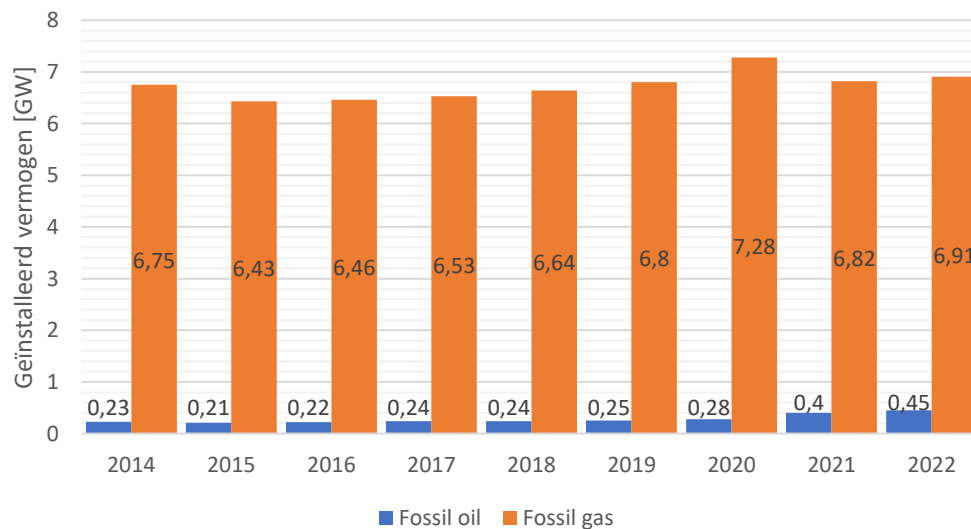
(Biomassa)

## Fossiele brandstoffen

Fossiele brandstoffen zijn koolwaterstofverbindingen die zijn ontstaan uit resten van plantaardig en dierlijk leven. De vorming van deze brandstoffen diep onder de grond duurt tot miljoenen jaren. Hieronder vallen aardolie, aardgas, steenkool en bruinkool.

Figuur 108 toont de evolutie van het gebruik van fossiele brandstoffen in België om energie op te wekken. Volgens de klimaatdoelen moet dit in de volgende jaren sterk dalen. Toch zien we nog geen dalende trend. Dit kan te wijten zijn aan de hoge elektriciteitsprijzen en dat het stoken op gas goedkoper is. Natuurlijk is eigen opgewekte duurzame elektriciteit wel goedkoper. Om dezelfde reden kan ook de stijging van aardolie verklaard worden. Het kan ook liggen aan het feit dat we ons meer focussen om duurzame energie uit te bouwen dan op het terugdringen van fossiele brandstoffen. Door de geleidelijke kernuitstap en de toenemende vraag, zal het gebruik van fossiele gassen de komende jaren waarschijnlijk nog toenemen. Dit komt omdat de projecten rond duurzame energie nog niet direct afgerond zijn. De aardolie wordt in België al jaren niet meer gebruikt voor het opwekken van elektriciteit. Ze kan dienst doen voor de productie van kunststoffen, voor het maken van diesel, kerosine...

Naast aardolie en aardgas heeft steenkool een lange geschiedenis in België, maar na de 19<sup>e</sup> eeuw kende de steenkool een daling tot de sluiting van de laatste Belgische mijn in 1992. Ook veel centrales sloten hun deuren tot de laatste centrale in Langerlo in 2017. Steenkool laat namelijk ook meer CO<sub>2</sub> vrij in de atmosfeer dan aardgas en aardolie.



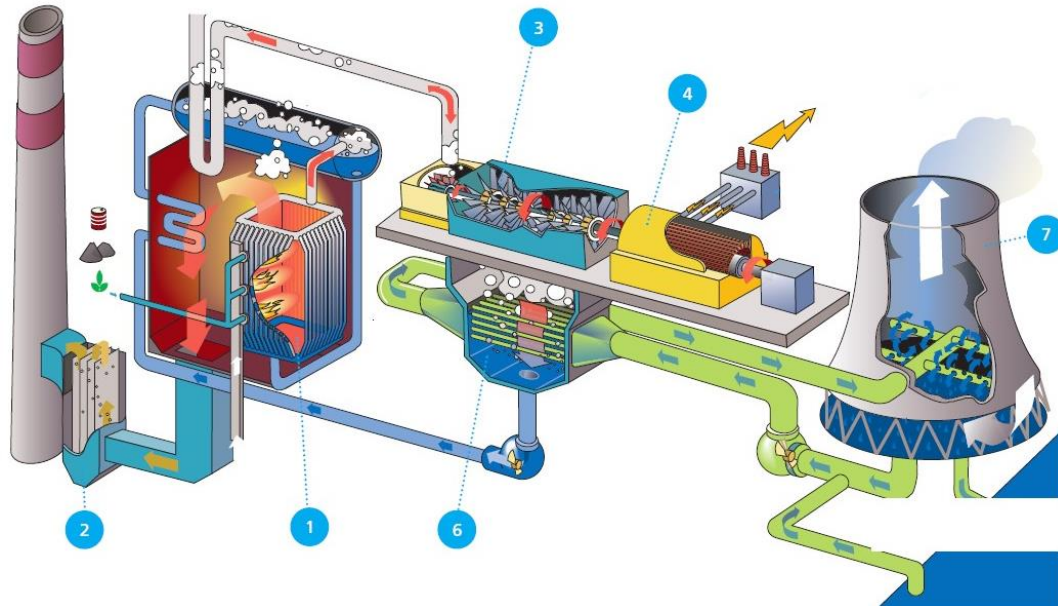
Figuur 108: Evolutie geïnstalleerd vermogen fossiele brandstoffen in België

(public net electricity generation, 2022)

### Werking

Een centrale waarin fossiele brandstoffen worden verbrand, heet een thermische centrale. De werking ervan is te zien in Figuur 109 en is als volgt: in de stoomketel (1) wordt een mengsel van fossiele brandstof met een klein percentage biomassa verbrand. Deze hitte warmt het water onder hoge druk op en vormt zo stoom die de turbine (3) aandrijft. De turbine drijft dan de generator

(4) aan en wekt elektriciteit op. Die stoom wordt na de turbine afgekoeld door water van een koeltoren (7). Zo ontstaat een onderdruk na de turbine, dit verhoogt het rendement van de turbine. De koelpomp pompt het koude water dan terug naar de stoomketel en het proces begint opnieuw. De gassen die bij die verbranding vrijkomen gaan eerst door filters (2) om de schadelijke stoffen minder schadelijk te maken. Daarna gaan ze pas door de schoorsteen.



Figuur 109: Werking thermische centrale

(Fossiele brandstoffen. Thermische elektriciteitscentrale en kerncentrale)

## Milieuaspect

Het staat gekend dat vroeger veel fossiele brandstof werd gebruikt om energie op te wekken. Dit komt voornamelijk, omdat het winnen van deze brandstoffen eenvoudig is en geen hoogstaande techniek nodig heeft. Daardoor is de prijs van de gewonnen energie laag. De verbranding ervan is namelijk zeer schadelijk voor het milieu. Grootschalige verbranding zorgt immers voor veel koolstofdioxide en nog andere broeikasgassen, zwart roet, fijnstof... Deze dragen bij aan de opwarming van de aarde. Roet zorgt voor een donkerdere omgeving en zal daardoor meer zonlicht absorberen.

Ook tijdens de winning en transport van deze brandstoffen treden er risico's op ongelukken en milieuschade op. Bij het boren van olie of gas zijn lekkages bijvoorbeeld moeilijk te controleren, tijdens transport over zee/oceaan kan olie lekken...

Net als bij biomassa is er het probleem dat dat de brandstof sneller verbrand wordt dan dat ze geproduceerd wordt. Dit gebeurt bij fossiele brandstoffen zelfs nog veel sneller. Daardoor is er hier sprake van een eindige voorraad en is het dus geen hernieuwbare energiebron. Een groot voordeel van biomassa en fossiele brandstoffen t.o.v. duurzame energiebronnen is wel dat er meer bevoorradingszekerheid is en dus minder op opslag moet gerekend worden.

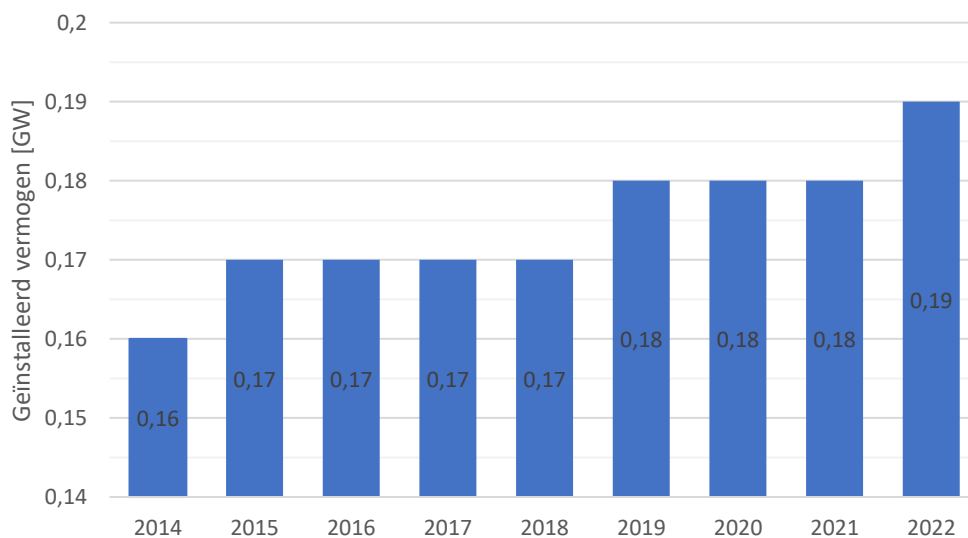
(Wikipedia, 2023)

(Fossiele brandstoffen. Thermische elektriciteitscentrale en kerncentrale)

## Waterkracht

Figuur 110 toont aan dat de energieopwekking met water in België toeneemt. Dit komt o.a. doordat dit type energieopwekking duurzaam is en geen brandstof nodig heeft. T.o.v. andere hernieuwbare bronnen zoals wind en zon, heeft waterkracht wel het voordeel dat het niet afhankelijk is van het weer. Dit zorgt ervoor dat de bevoorradingszekerheid met waterkrachtcentrales hoger is. Zo'n centrales worden voor twee dingen ingezet. Zowel voor het opwekken van energie als voor het stabiel houden van het net. Zo'n centrale kan namelijk zeer snel starten en stoppen. Het enige dat moet gebeuren, is het sluiten of openen van de sluisdeuren.

Toch kent deze vorm van energieopwekking enkele nadelen. De bezwaren zijn vooral van toepassing bij stuwdamcentrales. Bij dit soort centrale houdt een stuwdam het hoger gelegen water tegen, waardoor een kunstmatig meer (stuwmeer) ontstaat. Via sluisen laat men dan water omlaag vallen naar de turbines. Door het tegenhouden van het hoger gelegen water, komt dat water hoger te staan en zal het land overstromen. Dit is dan ten nadele van dieren, planten en soms de lokale bevolking. Daarnaast zullen vissen die willen migreren naar het lageregelegen water de turbines moeten passeren. Dit zal zorgen voor een aanzienlijke mortaliteit.



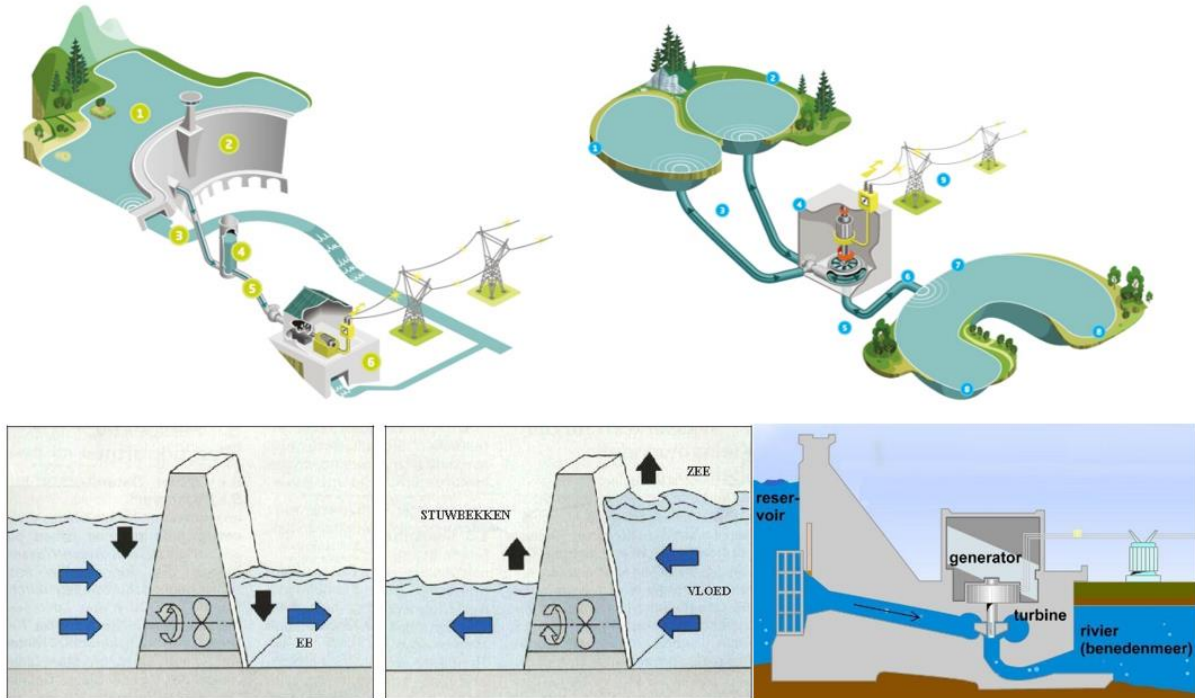
Figuur 110: Evolutie geïnstalleerd vermogen waterkrachtcentrale

(public net electricity generation, 2022)

## Werking

Er bestaan namelijk vier soorten waterkrachtcentrales. Figuur 111 toont die verschillende centrales. De werking van de rivier- en stuwdamcentrale werd al eerder uitgelegd. Pompcentrales houden vooral rekening met de vraag en het aanbod. Indien er een overschot aan elektriciteit is of de prijs staat laag, dan pompen ze water van het lager gelegen gebied naar omhoog. Indien er een piekvraag is, zullen ze snel reageren door water naar beneden te pompen en zo een generator aan te drijven.

Getijdencentrales halen hun energie uit de bewegingen van het water door eb en vloed. Bij vloed stijgt het water hoog en kan het door de dam opgevangen worden. Bij eb stroomt het water dan terug naar zee. De kracht van beide stromingen zal turbines aandrijven die elektrische stroom opwekken.



Figuur 111: Stuwdamcentrale (linksboven), pompcentrale (rechtsboven), getijdencentrale (links onder) en riviercentrale (rechts onder)

(M., 2021)  
(Doucé, 2002-2003)  
(Waterkracht)

(Waterkrachtcentrale, 2023)

(Technieken om energie uit water op te wekken)

## Haalbaarheid van andere energieopwekkingen

### Biomassa

Figuur 112 geeft de werkelijke opbrengst van biomassa in België weer tot 2022. De andere elektriciteitsopbrengsten van biomassa werden geschat met behulp van de utiliteitsfactor. Deze factor is enorm afgenomen de laatste jaren (van 0,47 tot 0,30 in 2022). Dit kan om verschillende redenen verklaard worden:

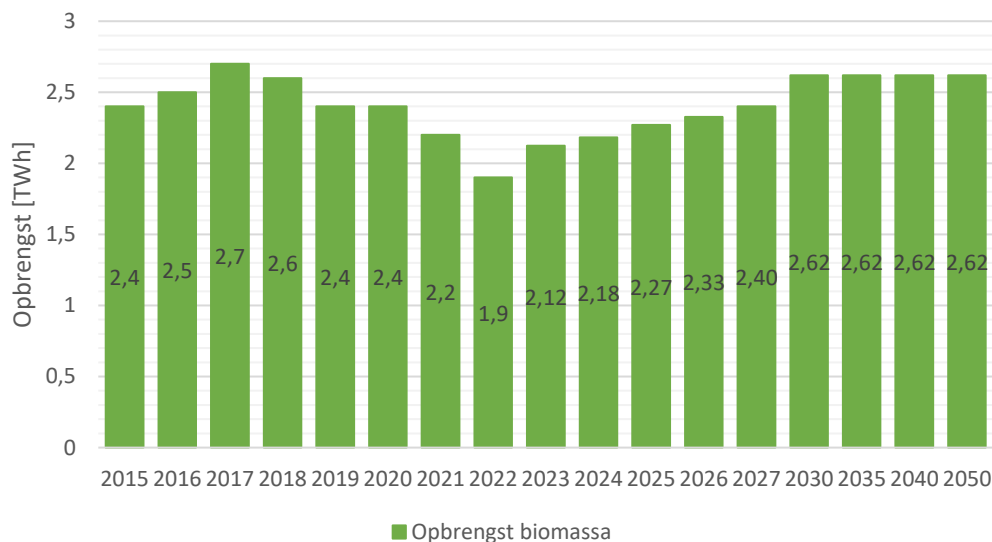
- In België is de beschikbaarheid van biomassa voor energieproductie beperkt, omdat er weinig landbouw- en bosbouwgrond is. Bovendien zijn er beperkingen aan het gebruik van afval als biomassa, omdat er strikte regels zijn voor afvalverwerking en recycling. Hierdoor is er minder biomassa beschikbaar voor energieproductie.
- De afgelopen jaren is er in België veel geïnvesteerd in andere duurzame energiebronnen, zoals zonne-energie en windenergie. Deze energiebronnen zijn goedkoper geworden en

hebben een hoger rendement, waardoor ze aantrekkelijker zijn geworden voor investeerders. Hierdoor is er minder interesse in biomassa-energie.

- Het beleid van de Belgische overheid met betrekking tot biomassa-energie is de afgelopen jaren veranderd. Er zijn strengere regels ingevoerd voor de duurzaamheid van biomassa-energie, waardoor het gebruik van bepaalde soorten biomassa voor energieproductie beperkt is.

Al deze factoren samen zorgden voor een lagere elektriciteitsopbrengst van biomassa in België. Toch blijft biomassa een belangrijke energiebron, omdat het uit restafval geproduceerd kan worden zoals houtsnippers, snoeihout en gras. Door de daling van de utiliteitsfactor werd voor de voorspellingen een factor van 0,33 genomen. Volgens berekeningen van Elia is het maximaal vermogen aan biomassa in België 0,9 GW. Door een geleidelijke stijging van dat vermogen berekende Elia dat dit rond 2030 zou moeten bereikt worden. Met behulp van volgende formule kan dan de opbrengst bij dat vermogen berekend worden:

$$E = 0,9 \text{ GW} * 8760 * 0,33 = 2,62 \text{ TWh}$$



Figuur 112: Werkelijke en toekomstig geschatte opbrengst van biomassa

(public net electricity generation, 2022)

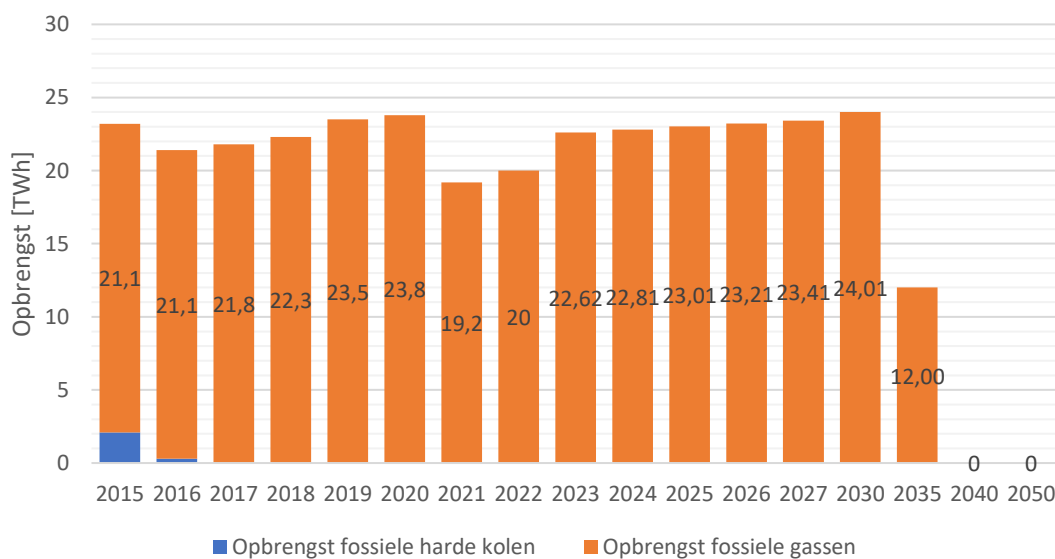
## Fossiele brandstoffen

Er worden in België drie fossiele brandstoffen gebruikt om energie mee op te wekken: harde kolen, olie en fossiele gassen. De steenkoolcentrales zijn al gesloten van de vorige eeuw, doordat de uitstoot ervan heel hoog lag en voor gezondheidsproblemen zorgde van omwonenden. De fossiele olie in België wordt niet gebruikt om elektriciteit op te wekken, maar wel voor o.a. brandstof voor transport, verwarming, industrie... Dit komt omdat olie duurder is en minder efficiënt bij het opwekken van elektriciteit. Figuur 113 toont de opbrengsten van fossiele gassen en fossiele harde kolen. Voor de toekomstige opbrengst werd opnieuw gebruik gemaakt van de utiliteitsfactor. Deze is de laatste jaren ook voor fossiele gassen enorm gedaald (van 0,39 in 2019 naar 0,33 in 2022). Dit is het gevolg van verschillende factoren:

- Toename van hernieuwbare energiebronnen: België heeft de afgelopen jaren veel geïnvesteerd in hernieuwbare energiebronnen, zoals zonne-energie en windenergie. Deze energiebronnen zijn goedkoper geworden en hebben een hoger rendement, waardoor ze aantrekkelijker zijn geworden voor investeerders. Hierdoor wordt er minder geïnvesteerd in fossiele gassen.
- Veel van de oude fossiele gascentrales in België zijn gesloten omdat ze niet meer voldoen aan de strengere emissienormen of omdat ze niet langer economisch rendabel zijn.
- Het beleid van de Belgische overheid met betrekking tot fossiele gassen is de afgelopen jaren veranderd. Er zijn strengere regels ingevoerd voor de uitstoot van broeikasgassen en er zijn subsidies en andere stimuleringsmaatregelen voor hernieuwbare energiebronnen ingevoerd.

Al deze factoren hebben bijgedragen aan de daling van de elektriciteitsopbrengst van fossiele gassen in België. Bovendien is er een groeiende bezorgdheid over de klimaatverandering en de milieu-impact van fossiele brandstoffen, waardoor steeds meer mensen en bedrijven kiezen voor duurzame energiebronnen. Dit zal naar verwachting leiden tot een verdere afbouw van de elektriciteitsopwekking via fossiele gassen in België. Toch is er in de berekeningen rekening gehouden dat het gebruik van fossiele gassen nog even zal stijgen door de kernuitstap en dus een tekort aan energie. Het gebruik van fossiele gassen moet wel volledig stopgezet worden in 2050 om volledig klimaatneutraal te zijn. Dus tot 2030 zal de uitstoot nog even toenemen door het toenemend gebruik van fossiele gassen om minder energie te moeten importeren.

Voor de berekeningen werd aangenomen dat de gascentrales gemiddeld 37 % van de tijd van het jaar op vol vermogen draaien.



Figuur 113: Werkelijke en toekomstig geschatte opbrengst van fossiele brandstoffen

(public net electricity generation, 2022)

## Waterkracht

Volgens studies van Elia ligt het maximum potentieel aan waterkracht in België op 0,2 GW. Dit is gelimiteerd door het reliëf en de lage rivieren in België. Daarom is het ook niet de meest gebruikte energieopwekking in België.

In 2017, 2020 en in 2022 was er in België weinig elektriciteitsproductie van waterkracht vanwege de relatief lage waterstanden in de rivieren en waterwegen in dat jaar. De waterstanden waren gedurende het grootste deel van het jaar lager dan normaal als gevolg van een combinatie van factoren, waaronder een droge lente en zomer en een lager dan gemiddelde regenval in de herfst.

Bovendien waren er in 2020 enkele technische problemen met waterkrachtcentrales, waardoor sommige installaties tijdelijk niet konden worden gebruikt. Dit droeg ook bij tot de verminderde productie van waterkrachtenergie.

Ten slotte was er in 2020 ook sprake van een verminderde vraag naar elektriciteit als gevolg van de COVID-19-pandemie. Dit had een invloed op de energieprijzen en zorgde voor minder productie van elektriciteit van de waterkrachtcentrales.

Om een schatting te maken voor de toekomstige opbrengst werd gewerkt met een utiliteitsfactor van 10,5 %. Bij jaren met veel water in de rivieren was er een gemiddelde utiliteitsfactor van ongeveer 13,5 %. In 2017, 2020 en 2022 was dat maar 6 %.

## Opslag

Er is ook nog wateropslag met het pompen en turbineren. Deze bevat Coo 1, Coo 2 en Plate Taille. Men wil in de toekomst nog een derde in Coo bouwen. Deze zou een productie-eenheid van 600 MW zijn. Indien er overschot aan energie is, dus bijvoorbeeld overdag indien de zonnepanelen te veel injecteren op het net dan zal er water van een lager reservoir naar boven gepompt worden. Dit type opslag dient vooral om het net stabiel te houden. Dus als er plots een grote vraag naar elektriciteit is, kan er water naar het lager reservoir lopen en wordt er elektriciteit opgewekt.

Doordat er in de toekomst veel elektrische wagens zullen zijn, kan ook die opslag gebruikt worden om het net stabiel te houden. Daarvoor moeten de wagens wel bidirectioneel zijn. Dat betekent dat de stroom zowel in de batterij als uit de batterij kan stromen bijvoorbeeld naar het net. Indien deze batterijen gebruikt worden om het net stabiel te houden, moet nog aan een tweede voorwaarde voldaan worden, ze moeten namelijk aangesloten zijn aan het net. Als er bijvoorbeeld in 2050 20 % van de wagens V2G zijn en tegelijkertijd op het net aangesloten dan kan volgende formule opgesteld worden:

$$0,2 * 6407521 * 75000 = 0,096 TWh$$

Hierbij werd aangenomen dat de gemiddelde batterijcapaciteit van een personenwagen 75 kWh was en dat er dan ongeveer 6.407.521 personenwagens in België rondrijden. Er werd enkel rekening gehouden met elektrische personenwagens, omdat vrachtwagens en autobussen overdag steeds moeten rijden en 's nachts heel de tijd moeten opladen. Personenwagens staan overdag stil als de eigenaar aan het werken is.

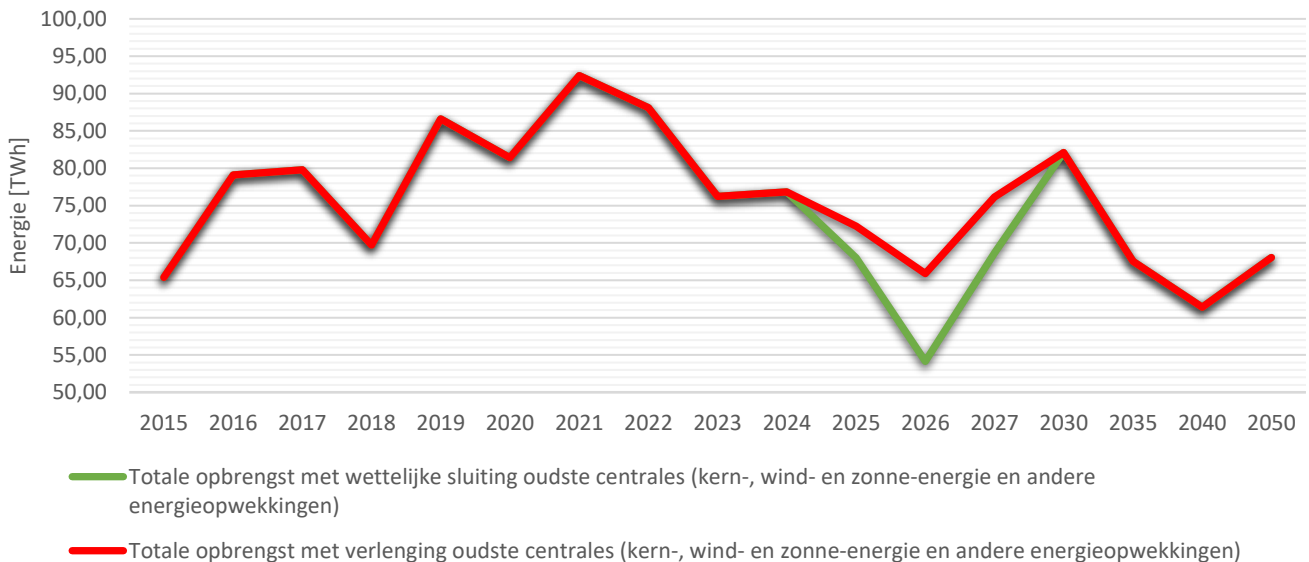


Deze formule moet zelfs nog gecorrigeerd worden, want niet alle auto's zijn op dat moment volladen. Stel dat ze gemiddeld voor 75 % volladen zijn dan moet nog maal een factor 0,75 gedaan worden. Dit komt neer op een opslag van 0,072 TWh.

Dat is genoeg opslag om het net voor een bepaalde duur stabiel te houden.

### Totale opbrengst

Figuur 114 toont de totale geschatte energieopbrengst van zowel kern-, wind- en zonne-energie als de overige energieopwekkingen.



Figuur 114: Werkelijke en toekomstig geschatte elektriciteitsopbrengst door kern-, wind-, zonne-energie en overige energieopwekkingen

(public net electricity generation, 2022)

(ELECTRICITY SCENARIOS FOR BELGIUM TOWARDS 2050, 2017)

(België nog te afhankelijk van fossiele brandstoffen volgens nieuw rapport, Van der Straeten:

“Energie crucialer dan ooit”, 2022)

(klimaat.be, 2019)

## 12 Conclusie

In deze scriptie is onderzocht als de opgestelde doelstellingen in verband met hernieuwbare energie voldoende zijn om aan de stijgende elektriciteitsvraag te voorzien in de toekomst.

Om het land klimaatneutraal te maken en de opgestelde doelstellingen te bereiken, zijn verschillende energiebronnen mogelijk. Uit het onderzoek kunnen dan allerlei voor- en nadelen van elk besproken thema gehaald worden. Hiermee wordt een duidelijk beeld gecreëerd met welke bronnen en via welke weg deze doelstelling best op een klimaatneutrale en veilige manier bereikt wordt.

### Kerncentrales

#### Voordelen

- De CO<sub>2</sub>-uitstoot is vergelijkbaar met die van hernieuwbare energie.
- Produceert geen SO<sub>2</sub>- of NO<sub>x</sub>-uitstoot die schadelijk is voor het leefmilieu of het klimaat.
- Kernenergie is zeer zuinige energie. Steenkool wekt bijvoorbeeld maar 3 kWh/kg steenkool op en één kilogram uranium wekt bijvoorbeeld 40 000 kWh energie op (dit hangt af van de gebruikte reactor). Bij kernfusie kan 1 kg kernfusie materiaal evenveel energie opwekken als 10 miljoen kg steenkool. Dat betekent dat kernfusie tot wel 10 miljoen meer energie kan opwekken bij eenzelfde hoeveelheid materiaal.
- Uranium zal niet zoals zon en wind oneindig lang meegaan, maar er zit nog meer dan genoeg uranium in de aardbodem. Dit heeft als gevolg dat uranium ook goedkoop is. Er is nog meer thorium dan uranium aanwezig in de aardbodem. Voor kernfusie wordt waterstof en lithium gebruikt en deze zijn nog voor miljoenen jaren voorradig.
- Een kerncentrale gaat heel lang mee, want doorheen de jaren kunnen de onderdelen elk apart vervangen worden. Enkel het reactorvat kan niet vervangen worden. Er wordt hier wel gesproken van 60 tot 80 jaar.
- Een kerncentrale is een grote zekerheid op constante bevoorrading, zelfs 's nachts.
- Doordat de gevolgen van een ongeluk zo nefast kunnen zijn, wordt er op alle mogelijke manieren rekening gehouden met veiligheid. Het gebouw is bv. beveiligd tegen vliegtuigcrashes, aardbevingen, ...
- Een kerncentrale produceert relatief weinig afval. Er wordt geprobeerd om dit radioactief afval zoveel mogelijk af te breken.
- Eenmaal een kerncentrale is gebouwd, heeft het relatief lage operationele kosten in vergelijking met andere energiebronnen. Dit komt door de lange levensduur en de lage brandstofkost.

#### Nadelen

- De gevolgen van een nucleair incident kunnen groot zijn. Zoals bij de kernrampen van Tsjernobyl en Fukushima, waarvan de gevolgen nog steeds voelbaar zijn. Alles wordt

eraan gedaan om het risico op een ongeluk tot het minimum te beperken. Mogelijke oplossingen hiervoor zijn:

- Thoriumreactoren werken op lagere druk en vergroten de veiligheid o.a. ook met hun freeze plug om een meltdown te vermijden. Daarnaast is thorium ook minder geschikt om kernwapens te bouwen, dit was wel het geval bij de klassieke centrales.
- SMR's gebruiken natrium als koelmiddel, waardoor ze ook op lage druk werken. Ze hebben minder onderdelen en er kunnen meer veiligheidstechnologieën gebruikt worden bij dit soort centrales. Dit zorgt eveneens voor het vergroten van de veiligheid van dit soort centrales.
- Bij kernfusie kan er geen meltdown optreden, wat de veiligheid verhoogt.
- De straling van het radioactief afval is zeer schadelijk voor levende organismen. Enkele oplossingen hiervoor zijn:
  - Thoriumreactoren produceren minder en minder langlevend afval dan uraniumreactoren.
  - SMR's gebruiken minder brandstof voor eenzelfde energieopwekking, waardoor hun afvalproductie een heel stuk lager ligt.
  - Kernfusie produceert geen langlevend radioactief afval. Er komt namelijk geen afval vrij die honderden jaren radioactief blijft. Theoretisch is het enige afvalproduct helium dat niet radioactief is.
  - Recyclage: 95 % van de oude splijtstof is nog her te gebruiken, slechts 5 % is afval. Dit wordt minder gedaan, omdat na recyclage het uranium niet meer zuiver is en dus het rendement lager ligt. Bij recyclage vermindert de afvalberg en dus de impact op organismen en het milieu.
  - Hoogradioactief afval in betonnen vaten gieten en diep onder de grond opslaan. Dit kan ook in diepe kleilagen onder de grond gebeuren. Zo zal het afval gedurende de periode dat het nog radioactief is geen tot weinig impact hebben op het milieu en de mens.
  - Transmutatie zal er eerder voor zorgen dat het afval sneller zijn natuurlijke radioactiviteit terugkrijgt. Dit kan dan gecombineerd worden met een van bovenstaande om toch veilig te zijn voor organismen en dergelijke.
- Net zoals bij alle ertsen is ook uraniumwinning en -verwerking (of thorium) zeer belastend voor het leefmilieu. Enkele mogelijke oplossingen hiervoor zijn:
  - Bij de keuze van thoriumreactoren is het thorium veel overvloediger aanwezig dan uranium en ook de ontginning ervan brengt minder risico's met zich mee, omdat thorium niet makkelijk splijt. Thorium is dus veiliger voor de omgeving bij de ontginning.
  - SMR's gebruiken natrium als koelmiddel. Bij de ontginning is dit geen gevaarlijke stof.
  - De gebruikte brandstof voor kernfusie is ruim aanwezig in de aardkorst en zijn relatief gemakkelijk te winnen zonder vervuiling of aantasting van de omgeving.
- Verouderd radioactief materiaal uit de mijnen wordt doorverkocht en geraakt o.a. in de woningen van mensen. (zie puntje hierboven)

## Lopende projecten in België

### Voordelen

- De plaatsing van stopcontacten op zee zorgt voor minder kabels, dus minder kosten en meer efficiëntie. Met een stopcontact kunnen in de toekomst meer hernieuwbare bronnen op zee snel aangesloten worden. Van daaruit kan dan makkelijk energie met andere landen uitgewisseld worden.
- Het voordeel van een stopcontact en het Stevin project is dat alles gebundeld wordt, waardoor fouten minder op verschillende plaatsen kunnen optreden.
- Het Stevin project en het Ventilus project vervoeren de elektriciteit op een hogere spanning (380 kV). Dit zorgt eveneens voor minder verliezen in het net, waardoor de kost vermindert.
- Interconnecties (zoals Nemo-link) met het buitenland verhogen de bevoorradingszekerheid.
- Het Ventilus project maakt het mogelijk dat het land kan gebruik maken van zijn offshore opgewekte groene energie, waardoor de bevoorradingszekerheid van het land stijgt en de broeikasgassen zullen dalen.
- Met de uitbouw van het Ventilus project kan het geproduceerd vermogen van de Prinses Elisabeth Zone gedistribueerd worden over het land. Deze tweede zone helpt o.a. ook mee de weggevallen productie van de kerncentrales op te vangen.

### Nadelen

- Het hoge vermogen vervoerd over de hoogspanningslijn van het Ventilus project kan mogelijke gezondheidsproblemen opleveren bij mensen die in de buurt van de kabels wonen. Dit is vooral het geval als de kabels bovengronds komen te liggen. Ondergronds neemt het magnetisch veld veel sneller af, maar zijn de verliezen en de kosten veel hoger.
- De hoge kosten van deze projecten zullen bij de energiefactuur van de consument worden gerekend. Voor de Prinses Elisabeth Zone krijgt België toch 100 miljoen euro van Europa.
- Onderzeese kabels kunnen bepaalde habitats van organismen verstoren. Hiervoor moet dus eerst grondig onderzoek van de zeebodem gedaan worden om het traject van de kabel te bepalen.

## Windenergie in België

### Voordelen

- Windenergie is een duurzame energiebron die bijdraagt aan de vermindering van de klimaatverandering.

- Windturbines kunnen lokaal bij de verbruiker geplaatst worden, wat de verliezen enorm vermindert.
- In vergelijking met zonnepanelen draaien windturbines veel meer van de tijd van het jaar op vol vermogen.

### Nadelen

- Windenergie is weers- en seizoensafhankelijk en werkt niet constant op vol vermogen. Op momenten dat er geen wind is, moet overgeschakeld worden op een andere energiebron.
- Meestal is er op hetzelfde moment wind, waardoor alle turbines op hetzelfde moment opwekken en er een overschot aan energie is.
- De bouw van zo'n turbines kan zorgen voor het habitatverlies van vogels. Ook de bouw van de gebruikte onderdelen kan een impact op het milieu hebben.
- Er is voor de plaatsing van een windturbine voldoende open ruimte nodig.
- Windturbines kunnen geluidsoverlast veroorzaken voor omwonenden.

## Zonne-energie

### Voordelen

- Zonne-energie is een duurzame energiebron die bijdraagt aan de vermindering van de klimaatverandering.
- Zonnepanelen kunnen decentraal energie opwekken, waardoor o.a. de verliezen in het net en dus de netkosten afnemen.
- Zonnepanelen kunnen huishoudens helpen om minder afhankelijk te zijn van het net en meer te besparen.
- Zonnepanelen verhogen de waarde van het huis.

### Nadelen

- Zonnepanelen wekken maar energie op als er zon is en ze werken slechts  $\pm 12\%$  van de tijd van het jaar op vol vermogen.
- De gelijktijdigheid van PV-opbrengst is ongeveer één.
- Teveel zonnepanelen in de straat zorgt voor spanningscongestie, wat slecht is voor toestellen en wat kan leiden tot uitschakeling van de omvormer.
- Zonnepanelen nemen veel plaats in voor een bepaald vermogen, vooral in steden vormt dit een probleem.

## Elektrisch wagenpark

### Voordelen

- EV's rijden stiller.
- EV's zijn milieuvriendelijker.
- Er zijn verschillende soorten slimme laadstrategieën om de pieken te reduceren tijdens het laden, waardoor ook de energiefactuur daalt.
- Elektrische motoren zijn veel efficiënter dan verbrandingsmotoren.
- De totale CO<sub>2</sub>-uitstoot van elektrische wagens is 60 % lager dan de uitstoot van benzine-wagens. In de toekomst zal de uitstoot van elektrische wagens alleen nog maar dalen.
- Bedrijven kunnen veel elektrische wagens volledig aftrekken.
- In het Vlaams Gewest moet geen BIV betaald worden bij de aankoop van een 100 % elektrische wagen.
- Voor elektrische wagens moet geen jaarlijkse taks betaald worden in Vlaanderen.
- De jaarlijkse VAA-kosten van een EV liggen lager dan die van een brandstofauto.
- Afhankelijk van de gemeenten kan een premie aangevraagd worden bij de aankoop van een 100 % elektrische wagen.
- Bij de vergelijking tussen een elektrische wagen en een brandstofauto is op termijn de elektrische wagen een stuk goedkoper per km dan een brandstofauto.

### Nadelen

- De aanschafprijs ligt momenteel nog hoger.
- Het opladen kan lang duren t.o.v. het tanken van een brandstofauto.
- Dom laden zorgt voor enorme pieken in het net.
- De actieradius van een elektrische wagen is nog weinig in vergelijking met een diesel- of benzine-wagen.
- Bij kortsluiting kunnen elektrische wagens branden.

## Overige energieopwekkingen

### Voordelen

- Bij gebruik van biomassa kan het afval nuttig gebruikt worden.
- De totale uitstoot van biomassa is minder dan bij fossiele brandstoffen.
- De prijs van fossiele brandstoffen zoals steenkool is laag, waardoor de elektriciteitsprijs ook laag is.
- Waterkrachtcentrales zijn een volledig hernieuwbare energiebron.
- Waterkrachtcentrales kunnen snel in en uitgeschakeld worden.

- Zowel biomassa, fossiele brandstoffen als waterkracht zijn niet weersafhankelijk, waardoor de betrouwbaarheid van deze energiebronnen hoog is.

## Nadelen

- Het opwekken van energie uit biomassa vormt geen gesloten keten en is dus geen zuiver hernieuwbare bron.
- De voorraad aan fossiele brandstoffen is eindig.
- Fossiele brandstoffen zijn slecht voor het milieu, vooral dan steenkool.
- Stuwdamcentrales kunnen zorgen voor overstroming en verstoring van habitats.
- Dieren in het water kunnen tijdens het turbineren sterven.

Nu een duidelijk beeld is geschetst over de verschillende energiebronnen, kan een besluit gevormd worden over de haalbaarheid van hernieuwbare energie in België t.o.v. het toenemend verbruik.

Doordat het verbruik enerzijds toeneemt met de bevolking en anderzijds afneemt met de stijgende efficiëntie, zal verondersteld worden dat deze elkaar opheffen. Voor het verbruik is enkel rekening gehouden met elektrische voertuigen en elektrische warmtepompen met een gemiddeld verbruik van 2500 kWh/jaar. Daarnaast zal de industrie ook overschakelen naar elektrische ovens. Hou er dus rekening mee dat het verbruik met deze ovens nog een stuk hoger kan liggen. In Figuur 115 zijn er verschillende verbruiken berekend. De oranje lijn toont het verbruik, waarbij de stijgende trend van elk van de elektrische voertuigen zich zou verder zetten. De paarse lijn toont het verbruik, waarbij alle personenwagens en motorrijwielen elektrisch zijn. Hierbij is verondersteld dat vrachtwagens, tractoren en autobussen... op een andere brandstof zullen rijden, omdat deze grotere vermogens vragen en/of langere afstanden afleggen. De grijze lijn toont het verbruik, waarbij verondersteld is dat de helft van alle voertuigen elektrisch is.

Voor de totale opbrengst zijn er twee lijnen te zien. De groene lijn toont de totale opbrengst van wind- en zonne-energie en de overige energieopwekkingen. Hierbij zit ook nog de opbrengst van de kerncentrales indien ze zouden sluiten op het moment dat nu gekend is (zie

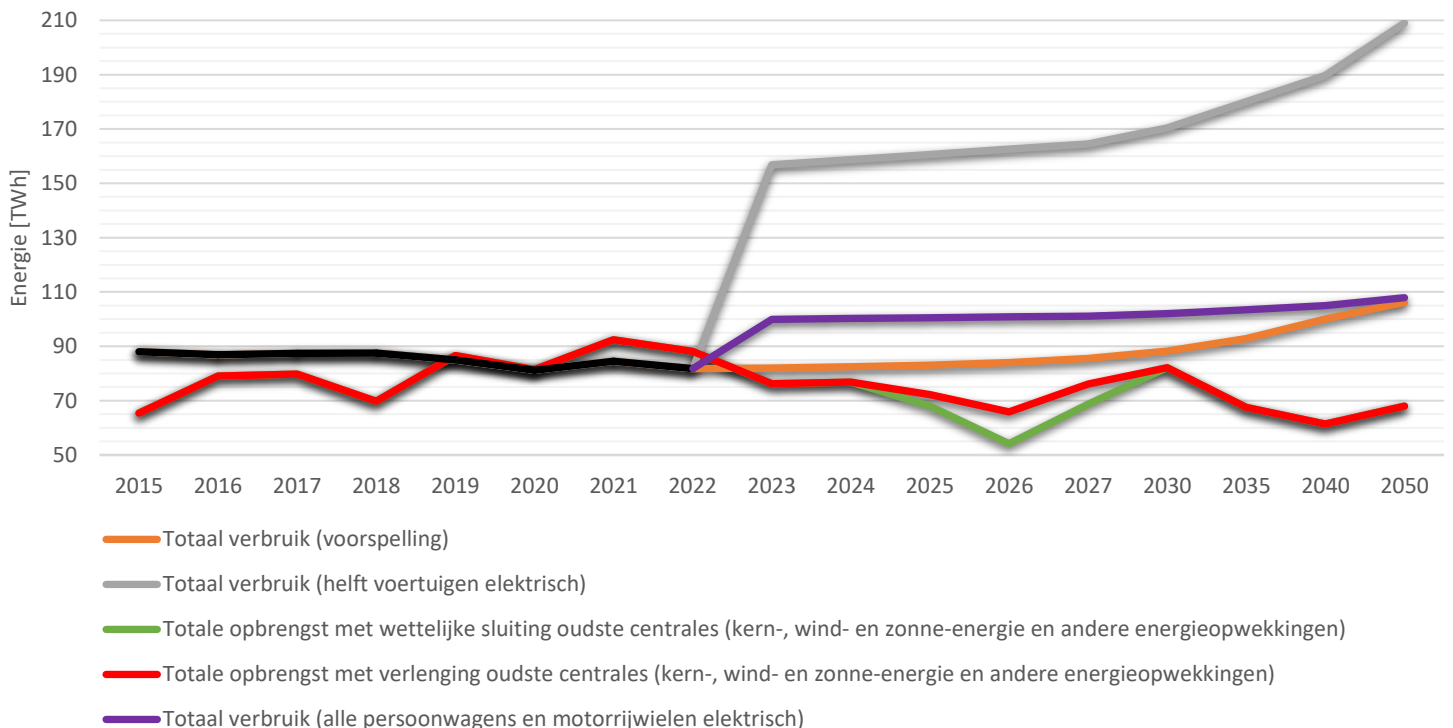
Tabel 21). Doordat de sluiting van de twee jongste centrales met tien jaar verlengd is, moeten aan deze centrales nog enkele aanpassingen gebeuren. Dit gebeurt tussen 2025 en november 2026. Om die winters te overbruggen werd reeds een aanvraag ingediend bij Engie om ook de oudste centrales (Doel 1, Doel 2 en Tihange 1) met twee jaar uit te stellen. Indien deze aanvraag goedgekeurd wordt, volgt de totale opbrengst de rode lijn.

Tabel 21: Wettelijke sluiting (en sluiting indien verlenging) van kerncentrales

	Vermogen [MWe]	Inbedrijfstelling	Wettelijke sluiting
<b>DOEL 1</b>	445	15/02/1975	15/02/2025 (of 15/02/2027)
<b>DOEL 2</b>	433	01/12/1975	01/12/2025 (of 01/12/2027)
<b>DOEL 3</b>	1006	01/10/1982	23/09/2022
<b>DOEL 4</b>	1039	01/07/1985	01/07/2035
<b>TIHANGE 1</b>	962	01/10/1975	01/10/2025 (of 01/10/2027)
<b>TIHANGE 2</b>	1008	01/06/1983	01/02/2023

<b>TIHANGE 3</b>	1038	01/09/1985	01/09/2035
------------------	------	------------	------------

In Figuur 115 is nu duidelijk te zien dat België genoeg energie opwekte in 2021 en 2022, maar een tekort zal hebben in de komende jaren. Indien de aanvraag wordt goedgekeurd om de sluiting van de oudste centrales met twee jaar uit te stellen dan zal al 23,53 TWh minder geïmporteerd moeten worden. Met een gemiddelde importprijs van € 200/MWh, komt dit neer op een ‘besparing’ van 4,706 miljard euro zonder rekening te houden met kosten van onderhoud en veiligheidscontroles. Er zal toch nog een grote hoeveelheid energie geïmporteerd moeten worden uit het buitenland. Als de helft van de voertuigen elektrisch rijdt, is het tekort aan elektriciteit na 2022 gemiddeld 103 TWh/jaar. Bij de meer realistische benadering dat enkel personenwagens en



Figuur 115: Werkelijke en toekomstig geschatte elektriciteitsopbrengst door kern-, wind-, zonne-energie en overige energieopwekkingen t.o.v. het werkelijk en geschatte elektriciteitsverbruik

motorrijwielen elektrisch rijden, is het gemiddelde tekort aan energie na 2022 gelijk aan 33,12 TWh/jaar. Als de stijgende trend van elektrische voertuigen zich voortzet, zal er een tekort zijn van gemiddeld 20 TWh/jaar. Dit alles is dan berekend t.o.v. de wettelijke sluiting van de kerncentrales. Toch is België goed bezig met de uitbouw van hun hernieuwbare energieprojecten en kunnen er enkel nog duurzame projecten en oplossingen bijkomen. Een andere en meer voor de hand liggende oplossing is dat de sluiting van meerdere kerncentrales uitgesteld wordt. Parallel daarmee kan dan de bouw van hernieuwbare energieprojecten voortgezet worden. Daarnaast kan ook nog de bouw van modulaire en/of thoriumcentrales gepland worden, waardoor België meer op zekerheid kan spelen i.v.m. hun energiebevoorrading. Als je weet dat in 2022 met 5,94 GW aan kerncentrales in België een totaal van 41,7 TWh elektriciteit opgebracht werd, dan is de bouw van zeven gelijkaardige centrales genoeg om het verschil met de paarse lijn in Figuur 115 te compenseren.

Om de doelstellingen i.v.m. de reductie van broeikasgassen te behalen moet zoveel mogelijk overgeschakeld worden naar hernieuwbare bronnen. Daarbij is er nog een groot probleem. Zonne- en windenergie zijn seizoens- en weersafhankelijk, waardoor er bijvoorbeeld op momenten dat er geen zon is (’s avonds) geen productie is. Voor dit probleem bestaan er



oplossingen. Eén daarvan is de bouw van meerdere kerncentrales om op zeker te spelen. Daarnaast is het opslaan van de overtollige productie van deze duurzame energiebronnen ook een goede oplossing. De keuze van de juiste opslag voor een bepaalde energiebron hangt echter af van de verschillende factoren zoals de diepte van het water, de kosten, afstand tot de kust, de levensduur... Hieronder worden de beste opslagtechnologieën voor die soort energiebron opgesomd met hun voor- en nadelen.

## Offshore windenergie

### Hydro pomp- en turbine Energie-atol (energiedonut)

#### Voordelen

- Hoge efficiëntie: 70-80%
- Snelle respons
- Lange levensduur
- Opslag is onafhankelijk van grondstoffen, dus milieuvriendelijker dan bv. een batterij
- Weinig milieu-impact
- Op grote schaal inzetbaar

#### Nadelen

- Capaciteit hangt af van grootte en hoogteverschil van reservoirs.
- Er is weinig hoogteverschil in België.
- Water kan verdampen uit het hoger gelegen reservoir, dus de “opslag” loopt stilaan leeg.

### Compressed Air Energy Storage (CAES)

#### Voordelen

- Hoge efficiëntie: 80-85 %
- Op grote schaal inzetbaar
- Opslag is onafhankelijk van grondstoffen, dus milieuvriendelijker dan bv. een batterij
- Heeft geen beperkt aantal cycli, waardoor de levensduur enkel afhangt van de motor, compressor en turbine. Deze kunnen dan ook simpel vervangen worden.

#### Nadelen

- Capaciteit hangt af van volume van de holte.
- Trage respons
- Lucht moet verwarmd worden voordat het de turbine in gaat (met fossiele brandstof), dit is deels opgelost door warmte van de compressor te gebruiken.
- Lucht is een gas en kan gemakkelijk ontsnappen in de holte.
- De toepasbaarheid is beperkt doordat een geschikte holte moet gebruikt worden.

## Oceaan batterij

### Voordelen

- Hoge efficiëntie: 80 %
- Lange levensduur
- Kan niet lekken
- Volledig duurzaam ontwerp, dus zeer milieuvriendelijk

### Nadelen

- Kan een impact hebben op het mariene leefmilieu

## Batterijopslag

Bij het maken van de juiste keuze van een batterij voor op zee moeten verschillende aspecten in acht genomen worden. De batterij mag bijvoorbeeld niet lekken in zee, ze moet een groot vermogen hebben en de energiedichtheid moet groot genoeg zijn. Het is ook niet de bedoeling dat deze veel onderhoud vergt en dat ze na enkele jaren al terug vervangen moet worden. Ook heel belangrijk is het temperatuurbereik waarin de batterijen kunnen werken. Van de verschillende types die onderzocht zijn, blijven enkel volgende types nog over: de solid-state batterij, de lithium-zwavelbatterij en de lithium-ijzerfosfaat batterij. De voor- en nadelen en hun eigenschappen zijn te zien in

Tabel 22.

Een nadeel bij de keuze van batterijen t.o.v. voorgaande opslagtechnieken is dat bij de productie van batterijen er grondstoffen nodig zijn, wat nadelig is voor het milieu. Daarnaast gaan batterijen maar een beperkt aantal cycli mee en degraderen ze na een aantal cycli, wat de efficiëntie doet dalen. Ook is de energiedichtheid per kg veel lager dan voorgaande opslagtechnieken.

## Waterstofopslag

### Voordelen

- De efficiëntie ligt hoger zonder gebruik van een brandstofcel, de waterstof wordt dan verbrand (70-80 %).
- Bij de verbranding van waterstof komt er enkel water vrij en geen giftige stoffen.
- Inzetbaar op grote schaal
- Waterstof heeft een heel hoge energiedichtheid per massa, maar die is laag per volume. Dat betekent dat de opslag onder heel hoge druk moet gebeuren (200-700 bar).

### Nadelen

- Indien waterstof opgeslagen wordt in zoutkoepels, ondergrondse grotten of gasvelden kan steeds een beetje waterstof ontsnappen.
- Waterstof heeft een enorm lage dichtheid.
- Een brandstofcel is duur.
- De efficiëntie is laag bij gebruik van een brandstofcel (0,41 %).

- Bij de productie van een brandstofcel en voor de elektroden voor de elektrolyse zijn er grondstoffen nodig, dus dit is niet zo milieuvriendelijk.

## Zonne-energie

### Batterijopslag

Bij huishoudens thuis is er niet veel plaats voor heel grote opslaginstallaties zoals bij offshore windenergie. De meest gebruikte opslag voor zonne-energie zijn thuisbatterijen. De beste keuze voor zo'n batterijen zijn: lithium-ion batterijen, lithium-zwavelbatterijen, lithium-ijzerfosfaatbatterijen en solid-state batterijen. Onderstaande tabel geeft een snelle blik om deze batterijen te vergelijken. De loodzuurbatterij is ook toegevoegd om een duidelijke vergelijking te kunnen maken met dit ouder type batterij.

Tabel 22: Verschillende types batterijen met elk hun specificaties en voor- en nadelen

Batterij	Loodzuur batterij	Lithium-ion batterij	Lithium-zwavelbatterij	Lithium-ijzerfosfaatbatterij	Solid-state batterij
Efficiëntie	**	***	***	***	****
Levensduur	*	***	**	*****	*****
DOD	*	**	**	**	***
Energiedichtheid	**	***	*****	**	****
Vermogensdichtheid	**	***	****	***	***
Prijs	*	***	**	***	**
Voordelen	Lage kost	Hoge energiedichtheid, hoog vermogen, hoge efficiëntie, lange levensduur, lage zelfontlading, lekken niet snel	Hoge energiedichtheid, lange levensduur, zeer snel laden, goedkoop, veilig	Weinig onderhoud, veilig, lange levensduur, kan snel laden, geen lekken	Hoge efficiëntie, zeer veilig (vast elektrolyt), hoge energiedichtheid, groot temperatuurbereik, lange levensduur, geen lekken, gebruik van volledige capaciteit
Nadelen	Lage energiedichtheid, korte levensduur, laag vermogen, gelimiteerde DOD, kunnen lekken	Op grote schaal kortere levensduur en hogere kost, overlading en overontlading (BMS)	Overlading en overontlading (BMS)	Overlading en overontlading (BMS)	Warmteontwikkeling

### Thermische opslag

De werking van een thermisch opslagsysteem in combinatie met een elektrische boiler en zonnepanelen gebeurt m.b.v. slimme sturing. Indien er een overschot aan energie is van de zonnepanelen zal de boiler het water opwarmen tot bijvoorbeeld 75 °C i.p.v. 60 °C. Die extra 15

°C is een manier om overtollige stroom op te slaan. Doordat warmte adiabatisch is, kan de boiler gezien worden als een soort batterij waarin makkelijk energie kan opgeslagen worden. Deze overige warmte kan dan bijvoorbeeld 's avonds gebruikt worden als de zon ondergegaan is. Dit kan ook bij geothermische warmtepompen, omdat de seizoenen geen invloed hebben op de temperatuur in de diepe ondergrond. Hiervoor bestaan twee soorten systemen, ofwel liggen de buizen in de ondergrond verticaal (300 m onder de grond) ofwel horizontaal (1,2 à 2 m onder de grond). In de zomer kan bij een overschot aan energie de warmte aan de bodem worden afgegeven, terwijl in de winter de warmte terug uit de bodem kan gehaald worden.

#### Voordelen

- Het is een eenvoudig en goedkope methode.
- Warmte is adiabatisch.

#### Nadelen

- De opslagcapaciteit is beperkt.
- De efficiëntie is niet zo hoog, er treden gemakkelijk warmteverliezen op.

### V2G

#### Voordelen

- Netbeheerder kan hiervan gebruik maken om net te stabiliseren.
- V2G kan zorgen voor piekreductie.
- EV-eigenaren kunnen geld verdienen door elektriciteit terug in het net te injecteren.

#### Nadelen

- Bidirectioneel laden heeft een negatief effect op de levensduur van de batterij.
- Om bidirectioneel laden effectief te gebruiken moet de wagen lang genoeg beschikbaar zijn, wanneer er overtollige zonne-energie is. Anders is V2G niet nuttig.
- Bidirectioneel laden heeft extra apparatuur nodig en dit kan leiden tot hogere kosten.

Uit dit onderzoek is dus gebleken dat met de gemaakte doelstellingen i.v.m. hernieuwbare energie en de wettelijke sluiting van de kerncentrales er niet genoeg elektriciteitsopbrengst zal zijn de komende jaren. Het elektriciteitsverbruik zal daarvoor te hoog liggen in de toekomst, waardoor veel elektriciteit zal moeten geïmporteerd worden uit het buitenland.

Een ander belangrijk punt dat overwogen moet worden, is om de groei van duurzame energie te stimuleren bij de burgers. Dit kan door de burgers massaal te laten samenwerken om voor hernieuwbare energie te kiezen. Daarvoor moet dit ook een uitdaging zijn voor hun portefeuille. Hieronder zijn enkele opgesomd:

Een eerste initiatief is dat de burgers kunnen samenwerken met de lokale overheden om maatregelen te implementeren om groene energie in de gemeente te stimuleren. Bijvoorbeeld het invoeren van subsidies of belastingvoordelen zal de burger sneller aanzetten tot de aankoop van bijvoorbeeld zonnepanelen.

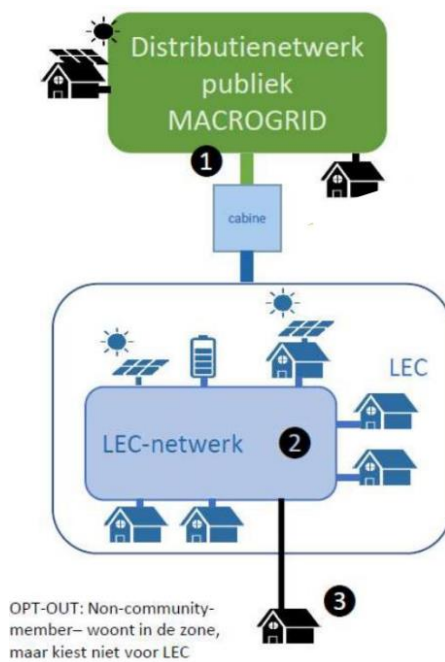
Er kunnen in de gemeente door bepaalde burgers ook lezingen georganiseerd worden. Op die manier zijn de andere burgers meer geïnformeerd over de voordelen om over te stappen naar hernieuwbare energie. Zo weten de burgers beter wat ze kunnen besparen op langere termijn en wat hen dit zal kosten. Met lezingen zal de burger meer weten en zal sneller de overstap naar groene energie gemaakt worden.

Een derde initiatief is al lang bezig en leert iedereen van bij. Op sociale media zijn er veel verschillende platforms te vinden over bijvoorbeeld zonnepanelen, thermische opslag met boilers... Hierin komt allerlei informatie op welke manieren er kan bespaard worden en hoe ze dit elk aanpakken. Als mensen dit lezen, zet dit hen aan om te investeren in groene energie.

Als laatste kan bijvoorbeeld een woonwijk in een gemeente de kosten van een grote installatie delen. Deze installatie kan dan gedimensioneerd worden op basis van de verschillende verbruiken in de wijk. Dit heet een energiegemeenschap. Daarbij wordt ook gebruik gemaakt van een grote batterij en best een grote omvormer (groter rendement). Er moet dan een energiehubs aanwezig zijn die bijhoudt van wie de stroom komt en naar waar de stroom gaat. Stel nu dat huis A west-gerichte zonnepanelen liggen heeft en dat de mensen van huis A niet thuis zijn die dag. Huis B heeft oost-gerichte panelen en zijn verbruik die dag is enorm veel in de avond, dan zal huis B de opbrengst van huis A nodig hebben. De energiehubs kan dit dan registreren als huis B heeft zoveel energie van huis A genomen. Dit wordt zo voor alle huizen in combinatie met de batterij gedaan. Op die manier is gekend hoeveel de huizen elk moeten betalen. Een energiegemeenschap heeft allerlei voordelen:

- Reductie van de pieken
- Verhogen van de zelfconsumptie en zelfvoorziening
- Verhogen van de benutting
- Verhogen van het rendement
- Als iedereen apart zonnepanelen heeft en op hetzelfde moment injecteert, zorgt dit voor een te hoge stroom in de kabels langs straat. Deze kabels zijn te dun daarvoor. Een energiegemeenschap zorgt voor lokale productie en lokaal verbruik, waardoor dit probleem gedeeltelijk opgelost is.

LEC staat voor local energy community.



Figuur 116: Het principe van een energiegemeenschap

(Desmet, 2021-2022)

## 13 Bibliografie

- (sd). Opgehaald van North Sea Energy: <https://north-sea-energy.eu/nl/home/>
- "*Transmutatie kan de berging van hoogactief en/ of langlevend afval optimaliseren maar ondergrondse berging blijft absoluut noodzakelijk*". (2019, oktober 02). Opgeroepen op oktober 2022, van NIRAQ: <https://www.niras.be/%E2%80%9Ctransmutatie-kan-de-berging-van-hoogactief-enof-langlevend-afval-optimaliseren-maar-ondergrondse>
- (2019). Opgeroepen op oktober 2022, van klimaat.be: <https://klimaat.be/>
- (2022). Opgeroepen op oktober 2022, van nucleair FORUM: <https://www.nucleairforum.be/>
- a.s., U. S. (2022). *Installed Capacity per Production Type*. Opgehaald van entsoe: <https://transparency.entsoe.eu/dashboard/show>
- adesign.nl. (2022). *Energie in cijfers*. Nederland. Opgehaald van <https://www.energiein nederland.nl/wp-content/uploads/2022/01/A4-digitaal.pdf>
- Alles over elektrische auto*. (sd). Opgehaald van milieucentraal: <https://www.milieucentraal.nl/duurzaam-vervoer/elektrische-auto/alles-over-elektrische-auto/#:~:text=%E2%82%AC%202.000%20subsidie,-,Elektrische%20auto%3A%20beter%20voor%20klimaat,een%20auto%20met%20een%20uitlaat>
- Alles over kerncentrales, kernenergie en nucleaire energie!* (2022, augustus 11). Opgeroepen op oktober 2022, van Callmepower: <https://callmepower.be/nl/energie/gids/begrijpen/kerncentrales>
- Angulakshmi, N., & Stephan, A. M. (2015, mei 21). *Efficiënte elektrolyten voor lithium-zwavelbatterijen*. Opgehaald van frontiers: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2015.00017/full>
- Azzouz, M. (2020). *Research Trends and Challenges in Smart Grids*. IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.85108
- Batterijopslag*. (sd). Opgehaald van Go-solar: <https://www.go-solar.be/producten/batterijopslag>
- België nog te afhankelijk van fossiele brandstoffen volgens nieuw rapport, Van der Straeten: "Energie crucialer dan ooit"*. (2022, april 20). Opgehaald van HLN: <https://www.hln.be/milieu/belgie-nog-te-afhankelijk-van-fossiele-brandstoffen-volgens-nieuw-rapport-van-der-straiten-energie-crucialer-dan-ooit~a409eaae/>
- Berg, H. v. (2018, mei 31). *Hoe zit het met waterstof?* Opgehaald van zonnefabriek: <https://www.zonnefabriek.nl/nieuws/hoe-zit-het-met-waterstof/>
- Berl, M. (2017, mei 4). *Spheric Under Water Energy Reservoirs*. Zürich, Zwitserland. Opgehaald van [https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/energy-science-center-dam/events/frontiers-presentations/170502\\_FiER\\_Berl.pdf](https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/energy-science-center-dam/events/frontiers-presentations/170502_FiER_Berl.pdf)

- Biomassa*. (sd). Opgehaald van engie: <https://corporate.engie.be/nl/energy/biomassa>
- Bouwen en verbouwen*. (sd). Opgeroepen op oktober 2022, van Vlaanderen: <https://www.vlaanderen.be/minimumaandeel-hernieuwbare-energie>
- Broeikasgasemissies in Frankrijk*. (2022, augustus). Opgehaald van planete energies: <https://www.planete-energies.com/en/medias/close/greenhouse-gas-emissions-france>
- CD&V wil kleine modulaire kernreactoren en meer hernieuwbare energie*. (2022, december 16). Opgehaald van HLN: <https://www.hln.be/binnenland/cdenv-wil-kleine-modulaire-kernreactoren-en-meer-hernieuwbare-energie~ad173fca/#:~:text=Op%20lange%20termijn%20ziet%20CD%26V,operationele%20SMR's%20in%20ons%20land.>
- Chawla, N., Bharti, N., & Singh, S. (sd). Basic working principle of a lithium-ion (Li-ion) battery. *Recent Advances in Non-Flammable Electrolytes for Safer Lithium-Ion Batteries*. Opgehaald van [https://www.researchgate.net/publication/330798113\\_Recent\\_Advances\\_in\\_Non-Flammable\\_Electrolytes\\_for\\_Safer\\_Lithium-Ion\\_Batteries/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/330798113_Recent_Advances_in_Non-Flammable_Electrolytes_for_Safer_Lithium-Ion_Batteries/figures?lo=1)
- (2023, januari 30). *Conceptual schematic of Ocean Compressed Air*. Opgehaald van <http://onlineresize.club/newopen.php?img=https://d3i71xaburhd42.cloudfront.net/7029122430c6b0975580ce1777166dfb7a826f0a/1-Figure1-1.png>
- De Finnen geven hun kernafval een permanente rustplek onder de grond*. (sd). Opgeroepen op oktober 2022, van trouw.nl: <https://www.trouw.nl/nieuws/de-finnen-geven-hun-kernafval-een-permanente-rustplek-onder-de-grond~bd578dac/>
- De Nul en DEME testen drijvende zonnepanelen voor onze kust*. (2023, maart). Opgehaald van KW Thuis in West-Vlaanderen: <https://kw.be/nieuws/economie/haven/de-nul-en-deme-testen-drijvende-zonnepanelen-voor-onze-kust/>
- Decongestie van het distributienet door decentrale opslag*. (sd). Opgehaald van D<sup>3</sup>O: <https://www2.howest.be/d3o/index.html#:~:text=Daar%20waar%20de%20zelfconsumptie%20een,kan%20bespaard%20worden%20in%20energiekosten.>
- Desmet, J. (2021-2022). Flexibel inzetten van hernieuwbare energie. België.
- Doigny, M. (sd). *lithium ijzer fosfaat batterij*. Opgehaald van <http://pics.idemdito.org/nl/batterij/lfp.htm>
- Doucé, F. (2002-2003). Waterkracht. België. Opgehaald van [https://www.joostdevree.nl/bouwkunde2/jpgg/groene\\_stroom\\_85\\_waterkracht\\_filip\\_douce\\_en\\_annick\\_dexters.pdf](https://www.joostdevree.nl/bouwkunde2/jpgg/groene_stroom_85_waterkracht_filip_douce_en_annick_dexters.pdf)
- drie batterijtechnologieën die de toekomst kunnen voeden*. (2022). Opgehaald van Batterij import Nederland BV: <https://www.batterijimport.nl/blog/post/blog-solid-state-batterij-technologie>
- Drie innovatieve manieren om energie op te slaan met zwaartekracht*. (2021, november 4). Opgehaald van hier opgewekt: <https://www.hieropgewekt.nl/kennisdossiers/drie-innovatieve-manieren-om-energie-op-te-slaan-met-zwaartekracht>



- EBN. (2022). *Feiten en cijfers*. Opgehaald van Energie in Nederland: <https://www.energiein nederland.nl/>
- Ecobouwers-redactie. (2022, augustus 18). *Meer halen uit je warmtepomp met slimme sturing*. Opgehaald van Ecobouwers: <https://www.ecobouwers.be/duurzaam-bouwen/artikels/meer-halen-uit-je-warmtepomp-met-slimme-sturing>
- Electric Vehicle Database*. (sd). Opgehaald van Current and Upcoming Electric Vehicles: <https://ev-database.org/#sort:path~type~order=.rank~number~desc|range-slider-range:prev~next=0~1200|range-slider-acceleration:prev~next=2~23|range-slider-topspeed:prev~next=110~350|range-slider-battery:prev~next=10~200|range-slider-towweight:prev~next=0~2>
- (2017). *ELECTRICITY SCENARIOS FOR BELGIUM TOWARDS 2050*. Opgehaald van [https://www.elia.be/-/media/project/elia/elia-site/electricity-market-and-system---document-library/adequacy---studies/2017/20171114\\_electricity-scenarios-for-belgium-towards-2050.pdf](https://www.elia.be/-/media/project/elia/elia-site/electricity-market-and-system---document-library/adequacy---studies/2017/20171114_electricity-scenarios-for-belgium-towards-2050.pdf)
- Elektrisch rijden: welke subsidies en voordelen krijg ik?* (2023, januari 4). Opgehaald van Lumiworld: <https://lumiworld.luminus.be/slimme-investeringen/elektrisch-rijden-welke-subsidies-en-voordelen-krijg-ik/#:~:text=In%202016%20riep%20Vlaanderen%20een,elektrische%20auto%20een%20slimme%20investering.>
- Elia. (2023). *Elektrische en magnetische velden*. Opgehaald van Elia: <https://www.elia.be/nl/duurzaamheid/milieu/elektrische-en-magnetische-velden#:~:text=Het%20elektrisch%20veld%20is%20het,een%20elektrische%20lading%20in%20beweging.>
- Elia. (2023). *Prinses Elisabeth Eiland*. Opgehaald van elia: <https://www.elia.be/nl/infrastructuur-en-projecten/infrastructuurprojecten/prinses-elisabeth-eiland>
- elia. (sd). *Stevin*. Opgehaald van elia: <https://www.elia.be/nl/infrastructuur-en-projecten/infrastructuurprojecten/stevin>
- Energy storage technologies comparison*. (2022). Opgehaald van S&P Global Commodity Insights: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/ci/topic/alternative-battery-technology-review.html>
- ENTSO-E. (2022). *public net electricity generation*. Opgehaald van Energy-charts: <https://energy-charts.info/index.html?l=en&c=BE>
- Europacable. (sd). *An Introduction to High Voltage Direct Current (HVDC) Subsea Cables Systems*. Brussels, Belgium. Opgehaald van [https://europacable.eu/wp-content/uploads/2021/01/Introduction-to-HVDC-Subsea-Cables-16-July-2012\\_.pdf](https://europacable.eu/wp-content/uploads/2021/01/Introduction-to-HVDC-Subsea-Cables-16-July-2012_.pdf)
- F.Pierie, & Someren, C. v. (sd). *Energieopslaglabel: Een methode voor het vergelijken van het volledig spectrum van opslagsystemen*. Groningen, Nederland. Opgehaald van [https://www.netbeheernederland.nl/\\_upload/RadFiles/New/Documents/Rapport%20Hanze%20Hogeschool%20Aanbod%20in%20energieopslag.pdf](https://www.netbeheernederland.nl/_upload/RadFiles/New/Documents/Rapport%20Hanze%20Hogeschool%20Aanbod%20in%20energieopslag.pdf)

- Federale regering wil ook oudste kerncentrales enkele winters langer openhouden.* (2023, februari 3). Opgehaald van HLN: <https://www.hln.be/binnenland/federale-regering-wil-ook-oudste-kerncentrales-enkele-winters-langer-openhouden~a4481e9d/>
- Fossiele brandstoffen. Thermische elektriciteitscentrale en kerncentrale.* (sd). Opgehaald van Energie en milieu: <https://duurzame-energie-pieter.weebly.com/fossiele-brandstoffen.html>
- Genêt, B., Vos, K. D., & Steve Van Campenhout. (2022). MOG2 TF First stakeholder workshop. *Balancing integration, Market integration*, (p. 35). Opgeroepen op april 1, 2022, van [https://www.elia.be/-/media/project/elia/elia-site/users-group/ug/tf-scenarios/2022/20220401/20220401\\_mog2\\_tf.pdf](https://www.elia.be/-/media/project/elia/elia-site/users-group/ug/tf-scenarios/2022/20220401/20220401_mog2_tf.pdf)
- Gesloten systemen.* (2015-2023). Opgehaald van Smart Geotherm: <https://www.smartgeotherm.be/gesloten-systemen/>
- Gesmoltenezoutreactor.* (2022, april 03). Opgeroepen op oktober 2022, van Wikipedia de vrije encyclopedie: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Gesmoltenezoutreactor>
- Gezondheidsraad, J. F. (2018). *Hoogspanningslijnen en gezondheid deel I: kanker bij kinderen.* Den Haag. Opgehaald van <https://www.gezondheidsraad.nl/binaries/gezondheidsraad/documenten/adviezen/2018/04/18/hoogspanningslijnen-en-gezondheid-deel-i-kanker-bij-kinderen/kernadvies-Hoogspanningslijnen-en-gezondheid-deel-I-kanker-bij-kinderen.pdf>
- Greaves, E. D. (sd). *In depth: Cleaner Nuclear Power.* Opgehaald van Thorium Molten Salt Reactor: <https://www.thmsr.com/en/clean/>
- groep, e. (2019). *Hoogspanning op de Belgische Noordzee.* Opgehaald van [file:///C:/Users/kenne/Downloads/20190828\\_ELIA\\_OFFSHORE%20PROJECTS\\_BROCHURE\\_NL%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/kenne/Downloads/20190828_ELIA_OFFSHORE%20PROJECTS_BROCHURE_NL%20(2).pdf)
- Huang, J. (2020, november 6). *Een vergelijking van de NMC / NCA Lithium-ion batterij en LFP Battery.* Opgehaald van POWORKS lithium compounds: <https://poworks.com/nl/een-vergelijking-van-de-nmc-nca-lithium-ion-batterij-en-lfp-battery>
- HVDC-zee-kabels.* (2022). Opgehaald van HoogspanningsNet: <https://www.hoogspanningsnet.com/over-hoogspanningsmasten/luchtlijnen-grondkabels/hvdc-zee-kabels/>
- Impact EV op residentiële installatie.* (sd). Opgehaald van Universiteit Gent: <https://www.ugent.be/ea/emsme/lemcko/nl/meten/mobiele-opslag/impact-op-installatie.htm>
- is hout (of biomassa) duurzaam?* (2023). Opgehaald van De Groene Hoed: <https://www.groenehoedduurzaam.nl/kennisbank/hout-en-pelletkachels/is-hout-duurzaam/>
- Jaarlijkse gemiddelde blootstelling aan ioniserende straling in België.* (2020, juli 06). Opgeroepen op oktober 2022, van Federaal agentschap voor nucleaire controle: <https://fanc.fgov.be/nl/informatiedossiers/wat-radioactiviteit-ioniserende-straling/gemiddelde-blootstelling>

- Kempeneers, E. (2011, april 9). *Nucleair risico en jodiumtabletten*. Opgeroepen op oktober 2022, van (Arbeids)geneeskundige sprokkels: <https://edelhart.kempeneers.org/2011/04/nucleair-risico-en-jodiumtabletten.html>
- Kerncentrales in België*. (2022, februari 24). Opgehaald van Federaal agentschap voor nucleaire controle: <https://fanc.fgov.be/nl/dossiers/kerncentrales-belgie>
- Kernfusie*. (2022). Opgeroepen op oktober 17, 2022, van Chadd: <https://www.mrchadd.nl/academy/vakken/natuur-leven-en-techniek/kernfusie#:~:text=Kernfusie%20is%20het%20samenvoegen%20van,al%20hun%20energie%20uit%20kernfusie>.
- Kernreactoren in Nederland*. (2022, juni 13). Opgehaald van Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming: <https://www.autoriteitnvs.nl/nucleaire-crisis-of-stralingsongeval/kernreactoren-in-nederland>
- Kerstine Appun, F. E. (2021). *Germany's greenhouse gas emissions and energy transition targets*. Germany. Opgehaald van <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-greenhouse-gas-emissions-and-climate-targets>
- Kloosterman, P. d. (sd). *Overzicht van Nieuwe Kerncentrales*. Opgehaald van janleenkloosterman.nl: <http://www.janleenkloosterman.nl/pnr-131-2006-003-rev1.php>
- Lemonwho. (sd). Flywheel free energy generator design. Opgehaald van [https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Flemonwho.blogspot.com%2F2021%2F05%2Fflywheel-free-energy-generator-design.html&psig=AOvVaw2aD2Do037JCCVyXIDn2kAZ&ust=1675172604600000&source=images&cd=vfe&ved=0CBAQjRxoFwoTCPjm-LO27\\_wCFQAAAAAdAAAAABAE](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Flemonwho.blogspot.com%2F2021%2F05%2Fflywheel-free-energy-generator-design.html&psig=AOvVaw2aD2Do037JCCVyXIDn2kAZ&ust=1675172604600000&source=images&cd=vfe&ved=0CBAQjRxoFwoTCPjm-LO27_wCFQAAAAAdAAAAABAE)
- Lesics. (2019). How do Solar cells work? Opgehaald van [https://www.youtube.com/watch?v=L\\_q6LRgKpTw](https://www.youtube.com/watch?v=L_q6LRgKpTw)
- Lima, L. d., Quartier, M., Buchmayr, A., Sanjuan-Delmas, D., Laget, H., Corbisier, D., . . . Dewulf, J. (2021, mei 19). Life cycle assessment of lithium-ion batteries and vanadium redox flow batteries-based renewable energy storage systems. In I. Ieropoulos, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. Elsevier Ltd. Opgehaald van [file:///C:/Users/kenne/Downloads/da\\_Silva\\_Lima\\_et\\_al.\\_2021.\\_LCA.pdf](file:///C:/Users/kenne/Downloads/da_Silva_Lima_et_al._2021._LCA.pdf)
- M., L. (2021, mei 10). *Hoe zet ENGIE nog meer water in elektriciteit om?* Opgehaald van <https://www.engie.be/nl/blog/groener-leven/Waterkracht-productie-coo-groene-energie/>
- Martín, J. S., Zamora, I., Martín, J. S., Aperrribay, V., & Eguía, P. (2011, april 13-15). *Technologieën voor energieopslag voor elektrische toepassingen*. Opgehaald van Energy Storage Technologies: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/almacenamiento/almacenamiento.html>
- milieucentraal*. (sd). Opgehaald van Thuisbatterij: zonne-energie opslaan: <https://www.milieucentraal.nl/energie-besparen/zonnepanelen/thuisbatterij-zonne-energie->

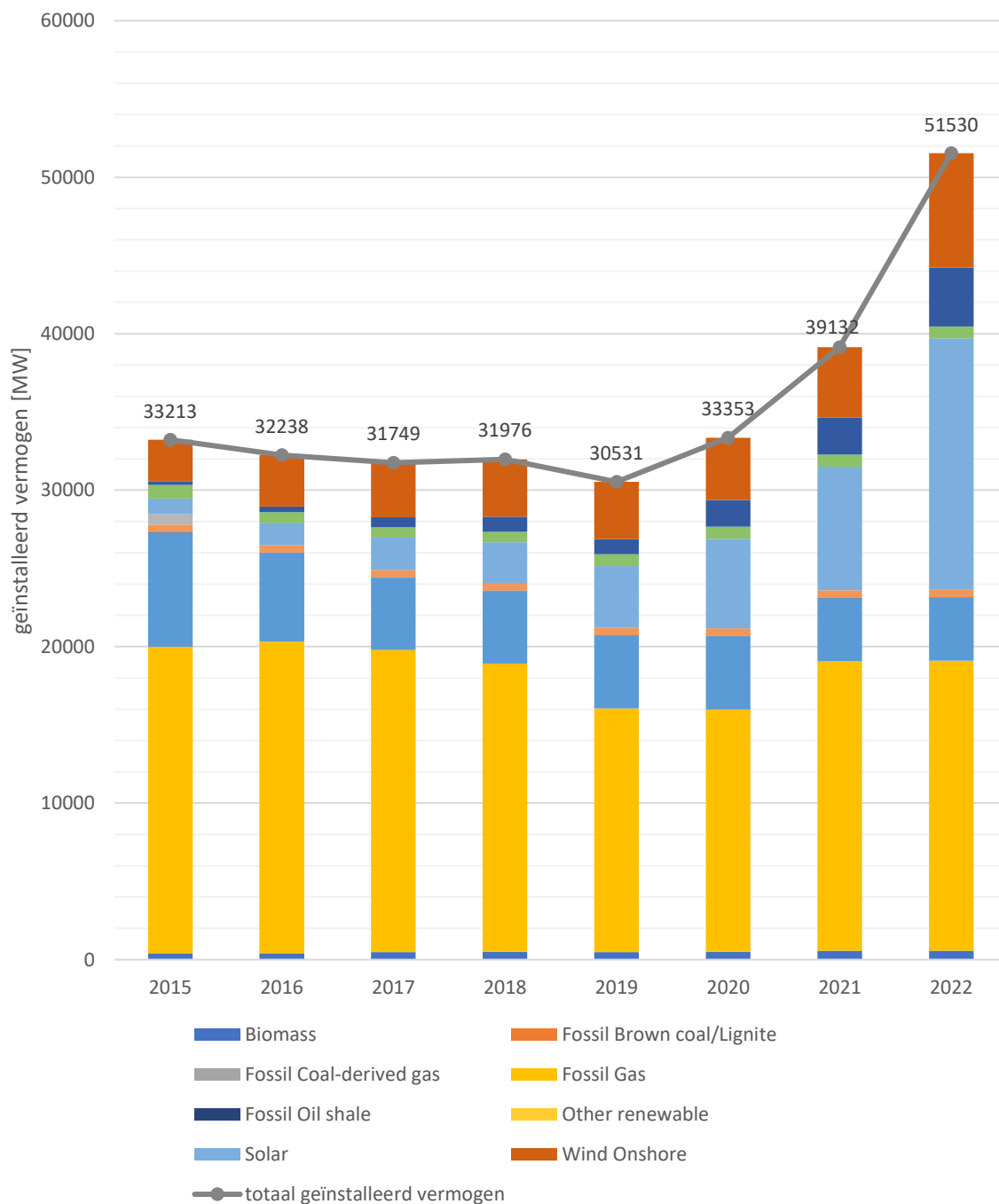
- opslaan/#:~:text=De%20thuisbatterij%20is%20niet%20per,Dat%20belast%20het%20milieu.
- Munroe, R. (2020, januari 20). *Hoe (on)veilig is nucleair afval?* Opgeroepen op oktober 2022, van Quantum univers: <https://www.quantumuniverse.nl/hoe-onveilig-is-nucleair-afval>
- Neels, H. (2022, juni 13). *Verplichting elektrische warmtepomp bij nieuwbouw vervroegd naar 2025*. Opgehaald van Livios: <https://www.livios.be/nl/artikel/64564/verplichting-elektrische-warmtepomp-bij-nieuwbouw-vervroegd-naar-2025/>
- Nexans. (sd). Integrated cable solutions for offshore wind development. *cable solutions*. Frankrijk. Opgehaald van <https://www.nexans.com/en/dam/jcr:717293e8-cb52-4dba-81f3-fd5370159a7b/Nexans%20Offshore%20Wind%20Farm%20WEB.pdf>
- Nuclear Power in France*. (2022, oktober). Opgehaald van World nuclear association: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/france.aspx>
- Nuclear Power in Germany*. (2022). Opgehaald van World Nuclear association: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/germany.aspx>
- Nuclear reactors*. (2020). Opgeroepen op oktober 2022, van nupex: <http://nupex.eu/index.php?g=textcontent/nuclearenergy/nuclearreactors&lang=nl>
- Number of heat pumps in operation in Belgium from 2013 to 2020*. (2021, december). Opgehaald van statista: <https://www.statista.com/statistics/740506/heat-pumps-in-operation-belgium/>
- NV, E. A. (2013). *Aanvraag voor het bekomen van een vergunning voor de aanleg en exploitatie van een HVDC interconnector | Project Nemo Link*. Brussel. Opgehaald van [https://odnature.naturalsciences.be/downloads/mumm/nemo/11-005405vergunningsdossiernemo\\_final11012013.pdf](https://odnature.naturalsciences.be/downloads/mumm/nemo/11-005405vergunningsdossiernemo_final11012013.pdf)
- Ocean battery, the new utility-scale offshore energy storage*. (2022, maart 1). Opgehaald van Powersystems High Voltage Specialists: <https://www.powersystemsuk.co.uk/ocean-battery-the-new-utility-scale-offshore-energy-storage/>
- Pastorelli, A. (sd). *VASTESTOFBATTERIJEN: DE NIEUWE GRENS VAN ELEKTRIFICATIE?* Opgehaald van FLASH BATTERY: <https://www.flashbattery.tech/en/how-solid-state-batteries-work/>
- Peplow, M. (2022, may 22). *Solar panels face recycling challenge*. Opgehaald van c&en: <https://cen.acs.org/environment/recycling/Solar-panels-face-recycling-challenge-photovoltaic-waste/100/i18>
- Rohde, M. (2021, september 10). *Wat is een gesmolten-zout-reactor en is dit een alternatieve energietechnologie?* Opgeroepen op oktober 2022, van Klimaat Helpdesk: <https://www.klimaathelpdesk.org/answers/wat-is-een-gesmolten-zout-reactor-en-is-dit-een-alternatieve-energietechnologie/#:~:text=Dit%20zout%20bevat%20splitsbaar%20materiaal,aan%20een%20tweede%20zout%20circuit.>
- Saleem, M. A., Desmaris, V., & Enoksson, P. (2016). *Performance Enhancement of Carbon Nanomaterials for Supercapacitors*. Hindawi Publishing Corporation. Opgehaald van

- [https://www.researchgate.net/publication/305794634\\_Performance\\_Enhancement\\_of\\_Carbon\\_Nanomaterials\\_for\\_Supercapacitors](https://www.researchgate.net/publication/305794634_Performance_Enhancement_of_Carbon_Nanomaterials_for_Supercapacitors)
- Schokkaert, T. (2014-2015). De opslag van elektriciteit: een economische analyse. België. Opgehaald van [https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/215/257/RUG01-002215257\\_2015\\_0001\\_AC.pdf](https://libstore.ugent.be/fulltxt/RUG01/002/215/257/RUG01-002215257_2015_0001_AC.pdf)
- Sergeant, P. (2023, 2 16). Elektrificatie van voertuigen. *Techboost! 2023*. Gent.
- Smet, L. D. (2017, november 17). *Nieuwe hoogspanningsverbinding België-Verenigd Koninkrijk*. Opgehaald van ENGINEERINGNET: <https://engineeringnet.be/nl/nieuws/item/13839/nieuwe-hoogspanningsverbinding-belgie-verenigd-koninkrijk-artikel>
- splijtstoffen, N. i. (sd). Onderzoeken of het veilig en haalbaar is om radioactief afval te bergen. Brussel, België. Opgeroepen op oktober 2022, van <https://www.ondraf.be/sites/default/files/Onderzoeken%20of%20het%20veilig%20en%20haalbaar%20is%20om%20radioactief%20afval%20te%20bergen.pdf>
- Steenhorst, D. (sd). *Windmolens op zee*. Opgehaald van OLINO duurzame energie: <http://www.olino.org/blog/nl/articles/2017/11/03/windmolen-op-zee/>
- Strobbe, M., (iMinds), K. C., Caenegem, R. V., (Eandis), P. L., (3E), G. L., Moradzadeh, M., & Vandevelde, L. (2015, februari-maart <https://biblio.ugent.be/publication/5876973/file/5876994.pdf>). Achter het stuur van slimme windmolenparken. België.
- Systems, J.-P. (2015, juni 8). J-Power Systems Wins Contract with NEMO LINK for HVDC Subsea Interconnector Cable System between UK and Belgium. *News Release*. Japan. Opgehaald van <https://www.jpowers.co.jp/pr/150608/150608e.pdf>
- Team, E. W. (2021). *EEA greenhouse gases-data viewer*. Copenhagen: EEA. Opgehaald van <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>
- Technieken om energie uit water op te wekken*. (sd). Opgehaald van essent: <https://www.essent.nl/kennisbank/stroom-en-gas/duurzame-energie/technieken-energie-water-opwekken>
- UNEP. (2016). Radiation: Effects and sources. Wenen: UN Publications. Opgehaald van <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/7790>
- Vandevelde, L. (2022). Partim Midden en Hoogspanning. *Transmissielijnen in sinusregime*. België.
- Ventilus. (2023). *Ventilus, onderweg met duurzame energie*. Opgehaald van Ventilus, onderweg met duurzame energie: <https://ventilus.be/>
- Voertuigenpark*. (2017). Opgehaald van STATBEL België in cijfers: <https://statbel.fgov.be/nl/themas/mobiliteit/verkeer/voertuigenpark>
- Waarom kunnen niet alle hoogspanningslijnen ondergronds?* (sd). Opgehaald van Kennisplatform elektromagnetische velden: <https://www.kennisplatform.nl/waarom-kunnen-niet-alle-hoogspanningslijnen-ondergronds/>

- Wat is radioactief afval.* (2022, augustus). Opgeroepen op oktober 2022, van Federaal agentschap voor nucleaire controle: <https://fanc.fgov.be/nl/dossiers/wat-radioactief-afval>
- Wat zijn by-pass diodes en waar dienen ze voor?* (sd). Opgehaald van zonnefabriek: <https://www.zonnefabriek.nl/faq/by-pass-diodes/>
- Waterkracht.* (sd). Opgehaald van energie: <https://energie18.weebly.com/waterkracht-energie.html>
- Waterkrachtcentrale.* (2023, februari 12). Opgehaald van Wikipedia: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Waterkrachtcentrale>
- (sd). *Waterstofproductie met powerdam.* Groningen, Nederland. Opgehaald van <https://www.dynamictidalpower.eu/DTP-ontwikkeling/SWOT/Hydrogen%20full/>
- Welke types thuisbatterijen zijn er?* (2019, juni 27). Opgehaald van Ecobouwers: <https://www.ecobouwers.be/duurzaam-bouwen/artikels/welke-types-thuisbatterijen-zijn-er>
- Werking en opbouw zonnepanelen.* (sd). Opgehaald van ZonnepanelenKopen: <https://www.zonnepanelenkopen.be/zonnepanelen-systeem/werking-opbouw/>
- Wetenschappers wekken recordhoeveelheid energie op met kernfusie.* (2022, februari 09). Opgeroepen op oktober 2022, van NU.nl: <https://www.nu.nl/wetenschap/6183068/wetenschappers-wekken-recordhoeveelheid-energie-op-met-kernfusie.html>
- Wikipedia.* (2023, februari 17). Opgehaald van Fossiele brandstof: [https://nl.wikipedia.org/wiki/Fossiele\\_brandstof](https://nl.wikipedia.org/wiki/Fossiele_brandstof)
- XLPE Submarine Cable Systems Attachment to XLPE Land Cable Systems. (sd). *XLPE Submarine Cable Systems.* doi:<https://new.abb.com/docs/default-source/ewea-doc/xlpe-submarine-cable-systems-2gm5007.pdf>
- ZMS. (sd). *Onderzeese vermogenkabels; Analyse van de vooruitzichten en ontwikkeling van DC-hoogspanningskabels.* Opgehaald van ZMS cable trans more: <https://kvcable.com/>
- Zohuri, B. (2022). Energieopslagtechnologieën en hun rol in hernieuwbare integratie en betekenis van thermodynamische analyse. Opgehaald van [https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/magnetic-energy-storage#:~:text=Superconducting%20Magnetic%20Energy%20Storage%20\(SMES\)%20is%20a%20novel%20technology%20that,quantities%20of%20power%20almost%20instantaneously.](https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/magnetic-energy-storage#:~:text=Superconducting%20Magnetic%20Energy%20Storage%20(SMES)%20is%20a%20novel%20technology%20that,quantities%20of%20power%20almost%20instantaneously.)

## 14 Bijlagen

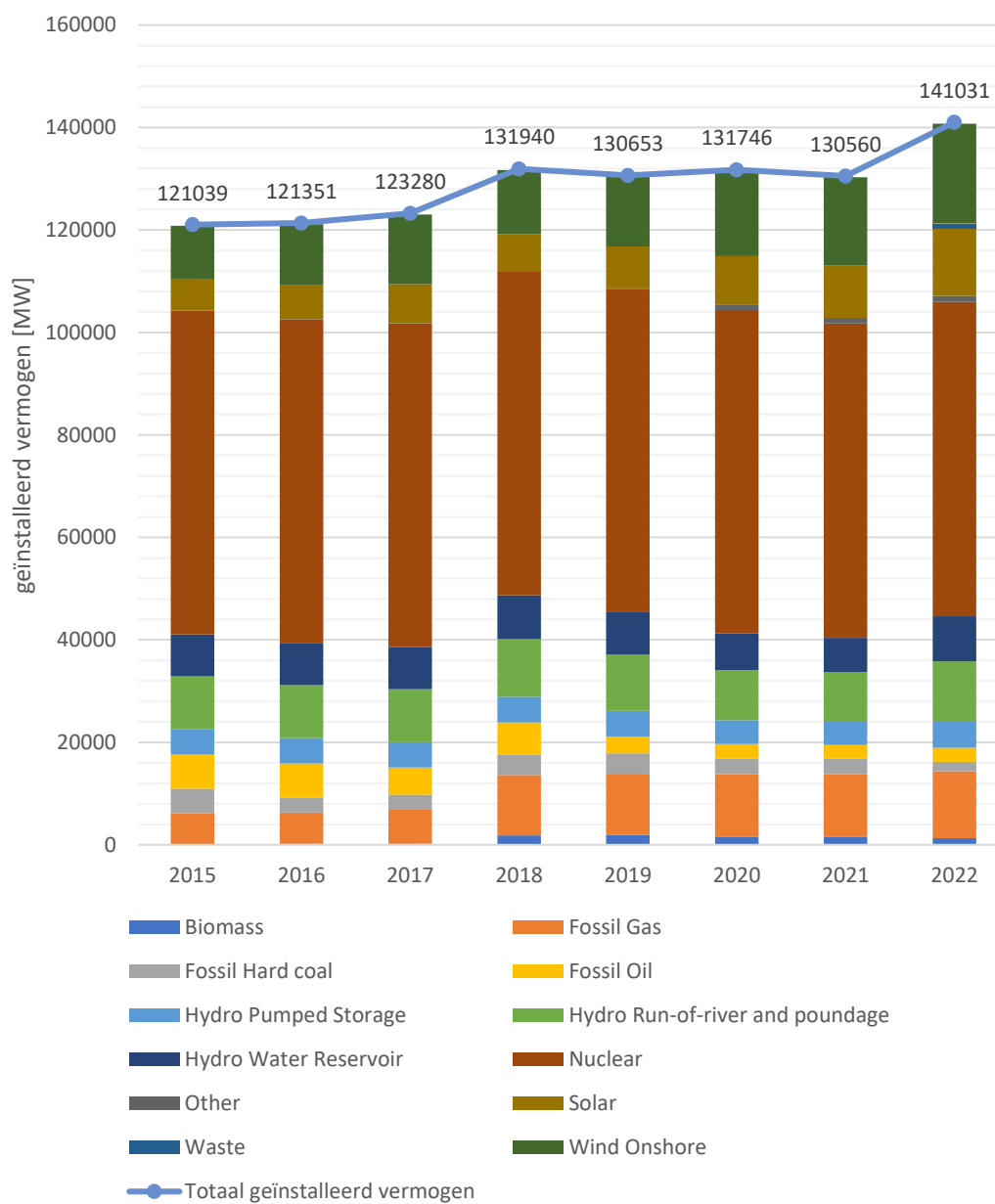
### 14.1 Evolutie geïnstalleerd vermogen Nederland



(a.s., 2022)

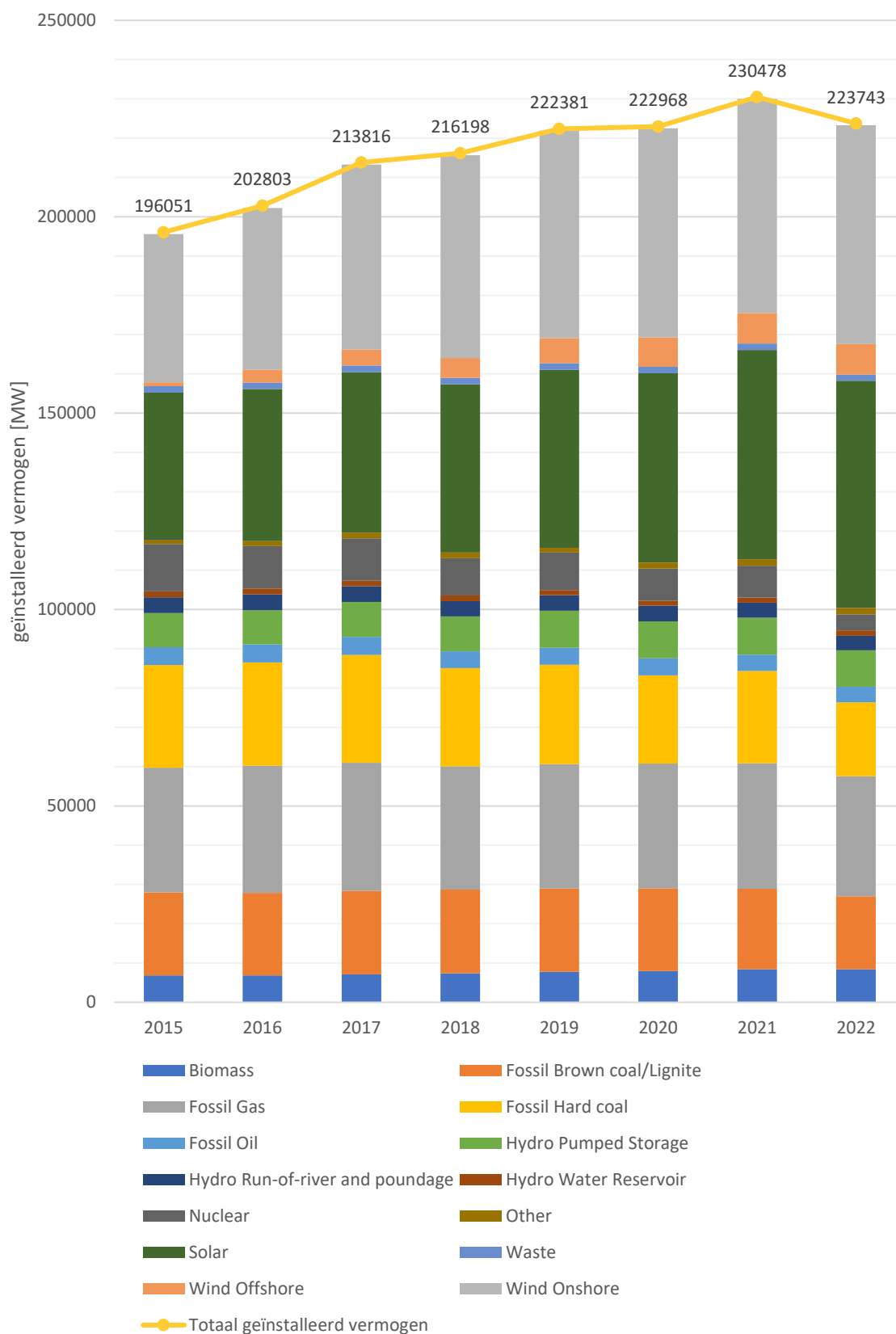
## 14.2 Evolutie geïnstalleerd vermogen Frankrijk

(a.s., 2022)

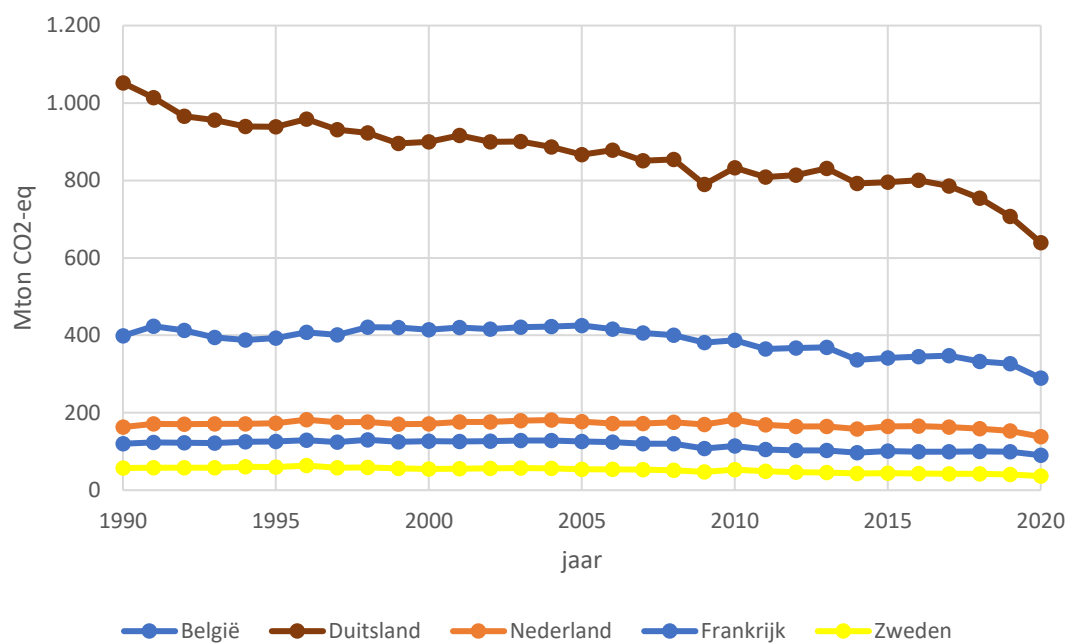




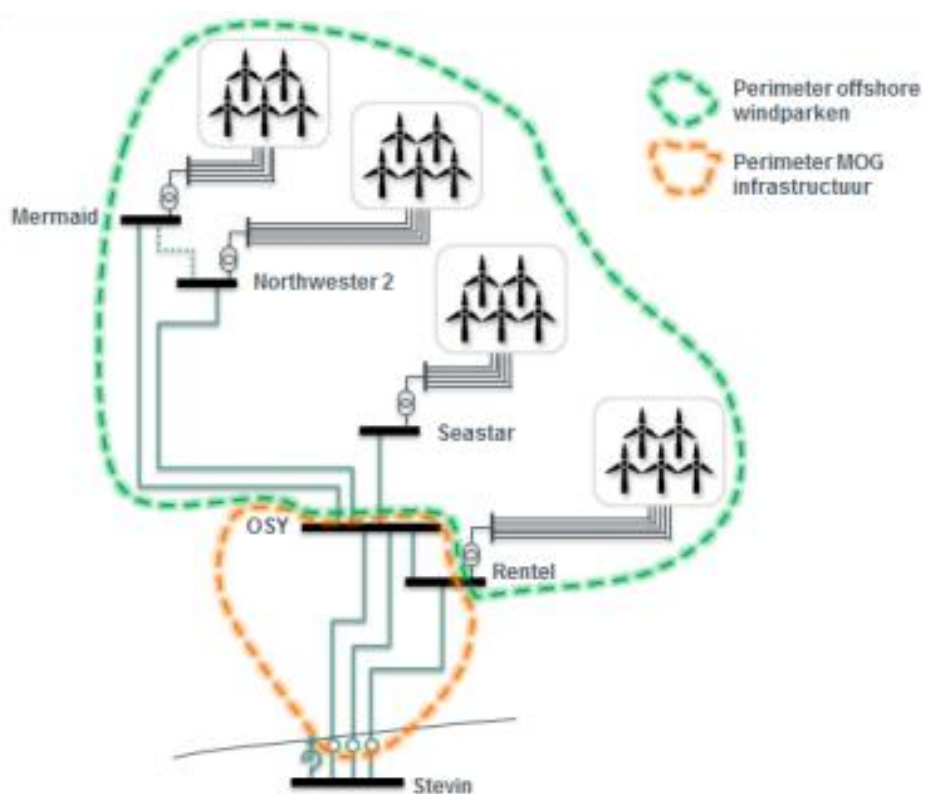
## 14.3 Evolutie geïnstalleerd vermogen Duitsland



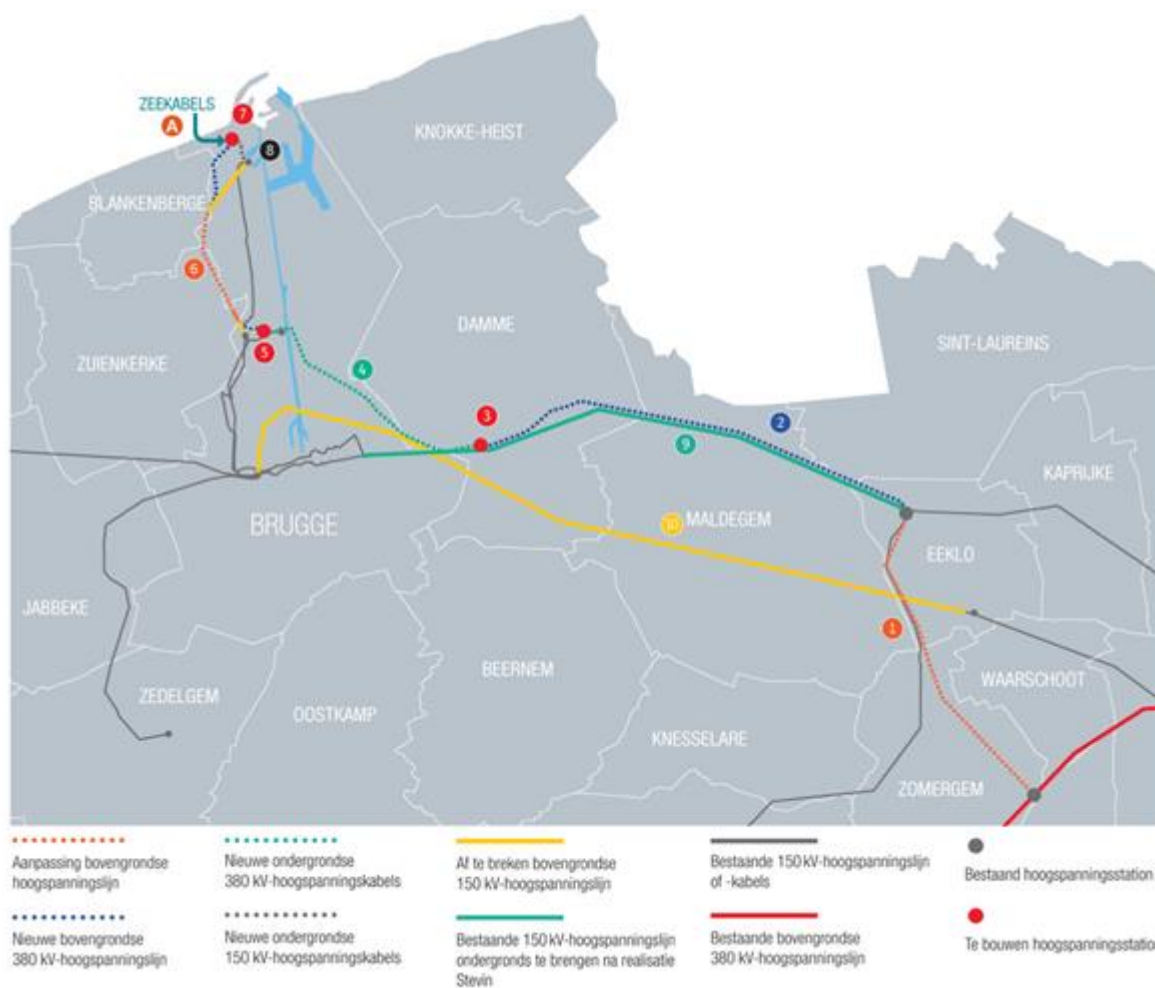
## 14.4 Vergelijking van totale CO<sub>2</sub>-uitstoot



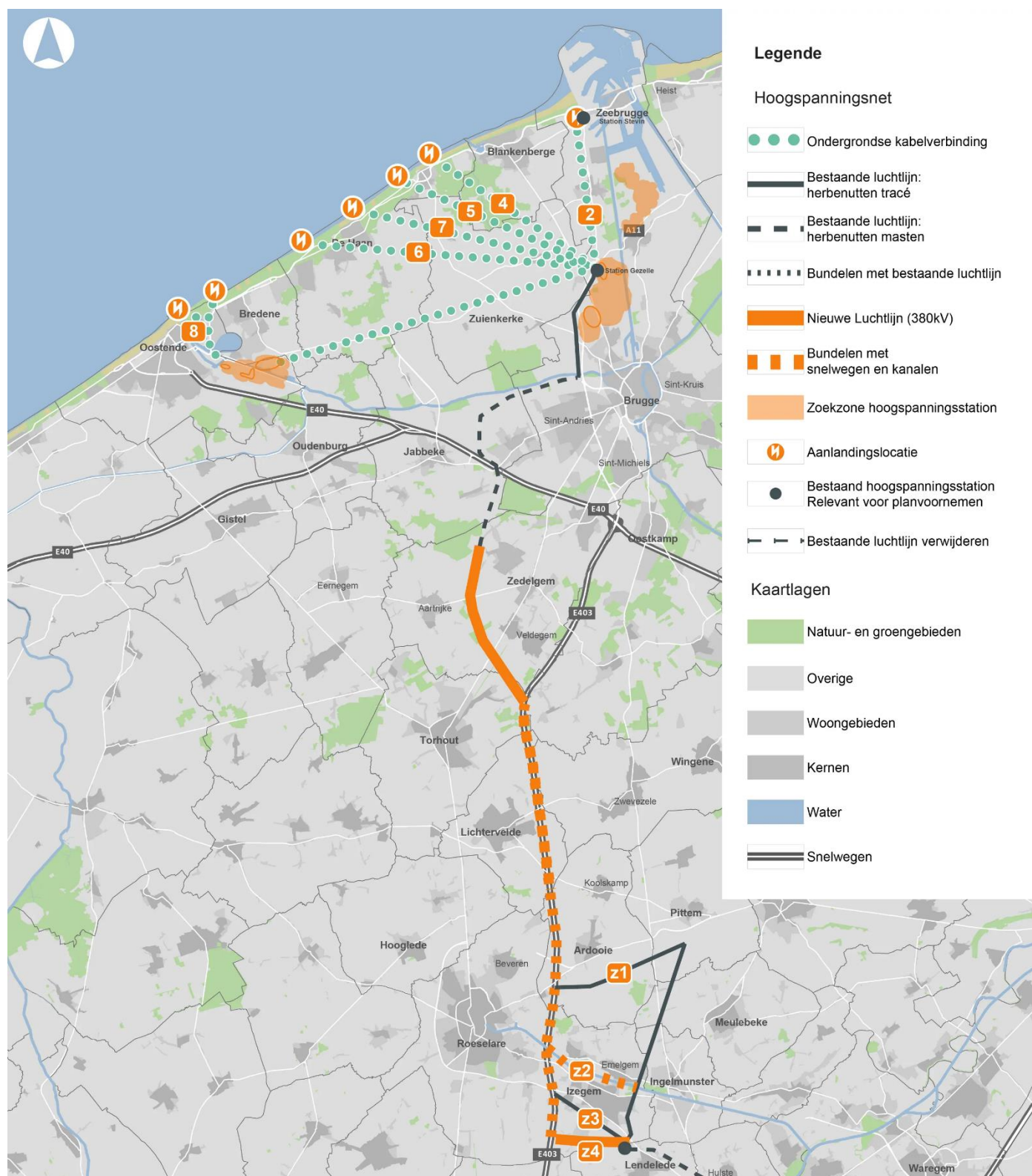
## 14.5 Scope van het MOG-project



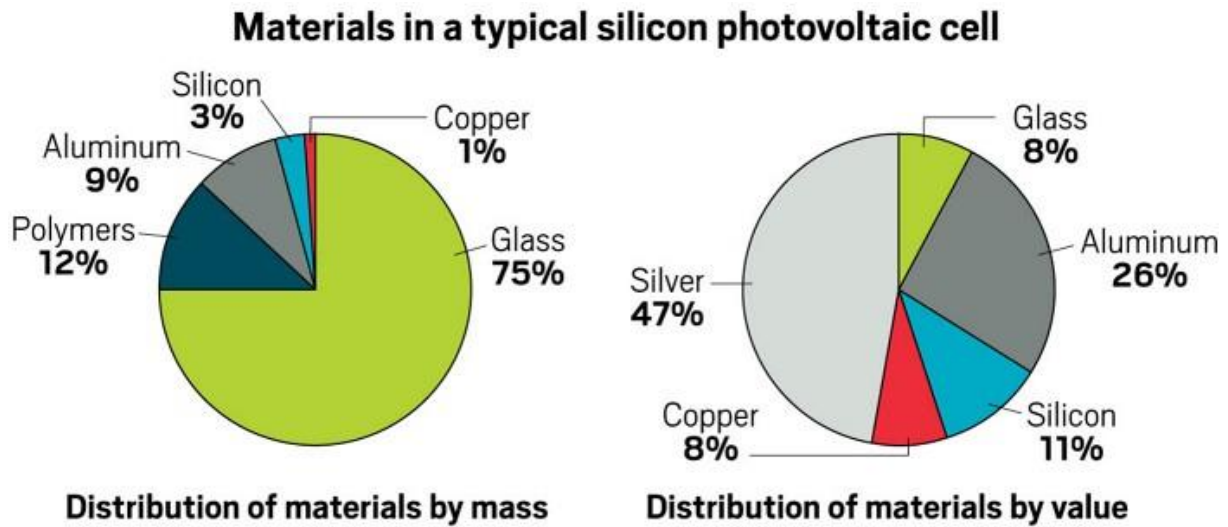
## 14.6 Het traject van het Stevin project



## 14.7 Kaart mogelijke trajecten voor Ventilus

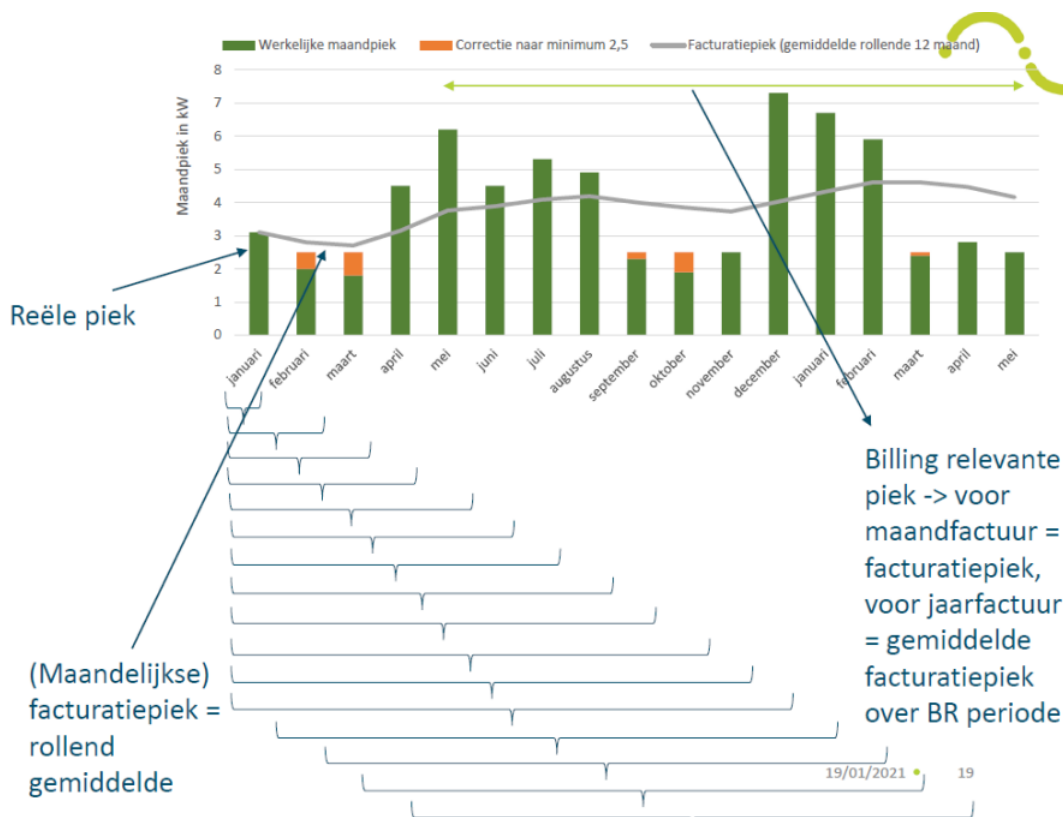


## 14.8 Materialen in een typisch silicium fotovoltaïsche zonnecel

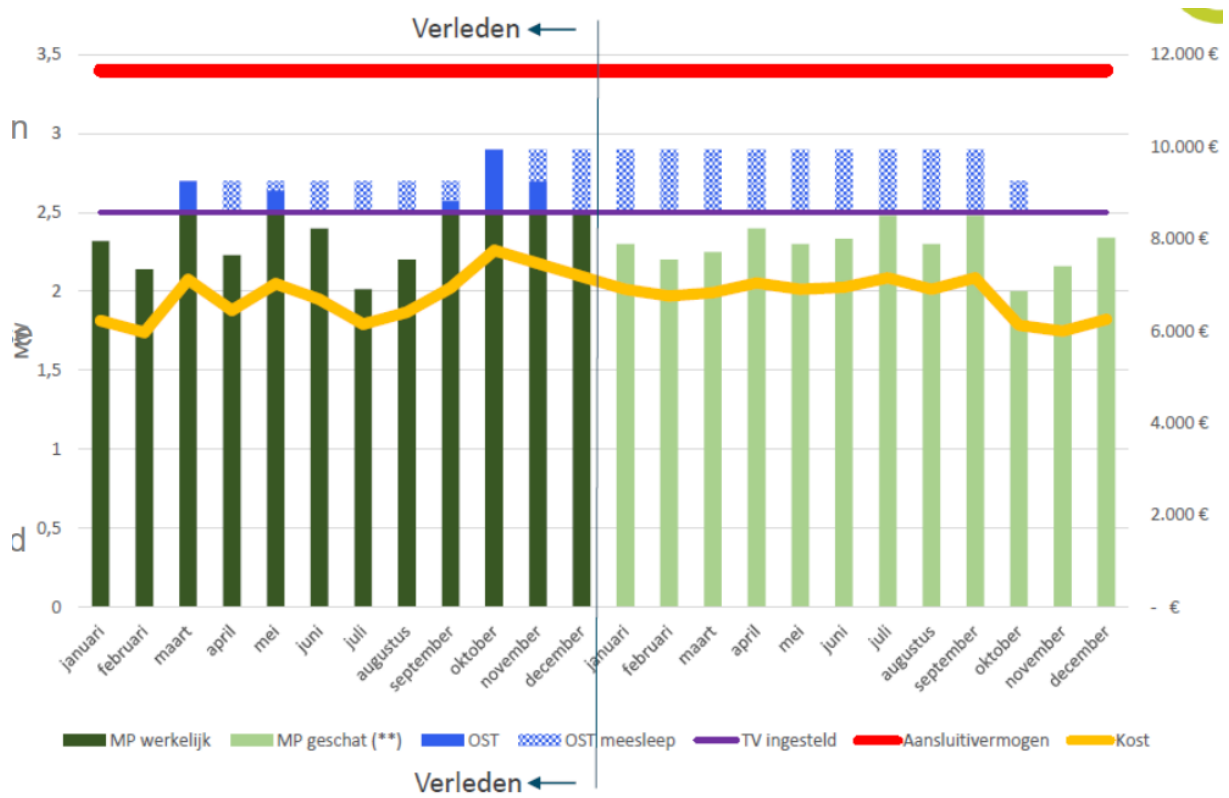


## 14.9 Capaciteitstarief

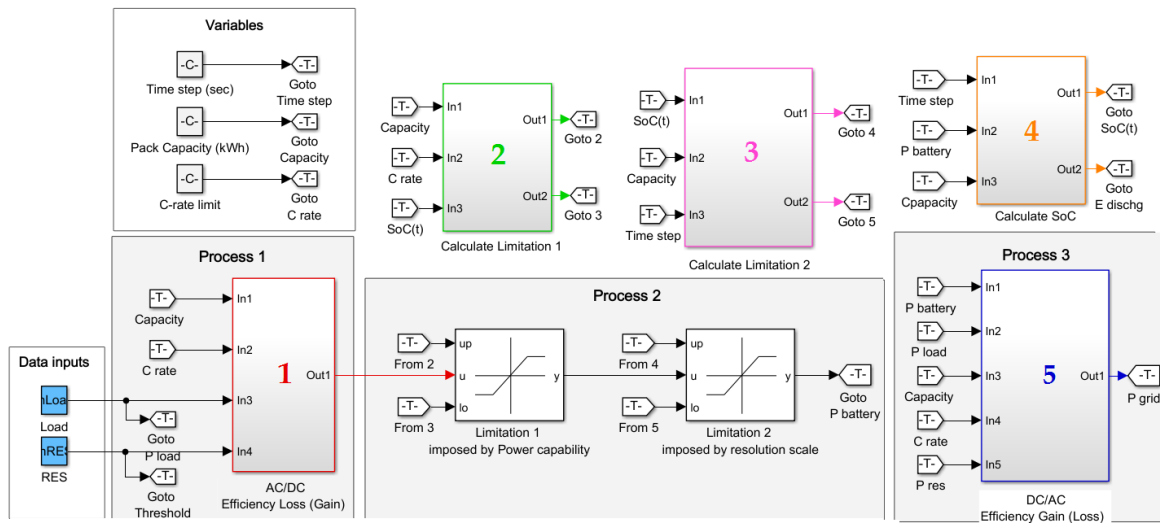
Residentieel/KMO



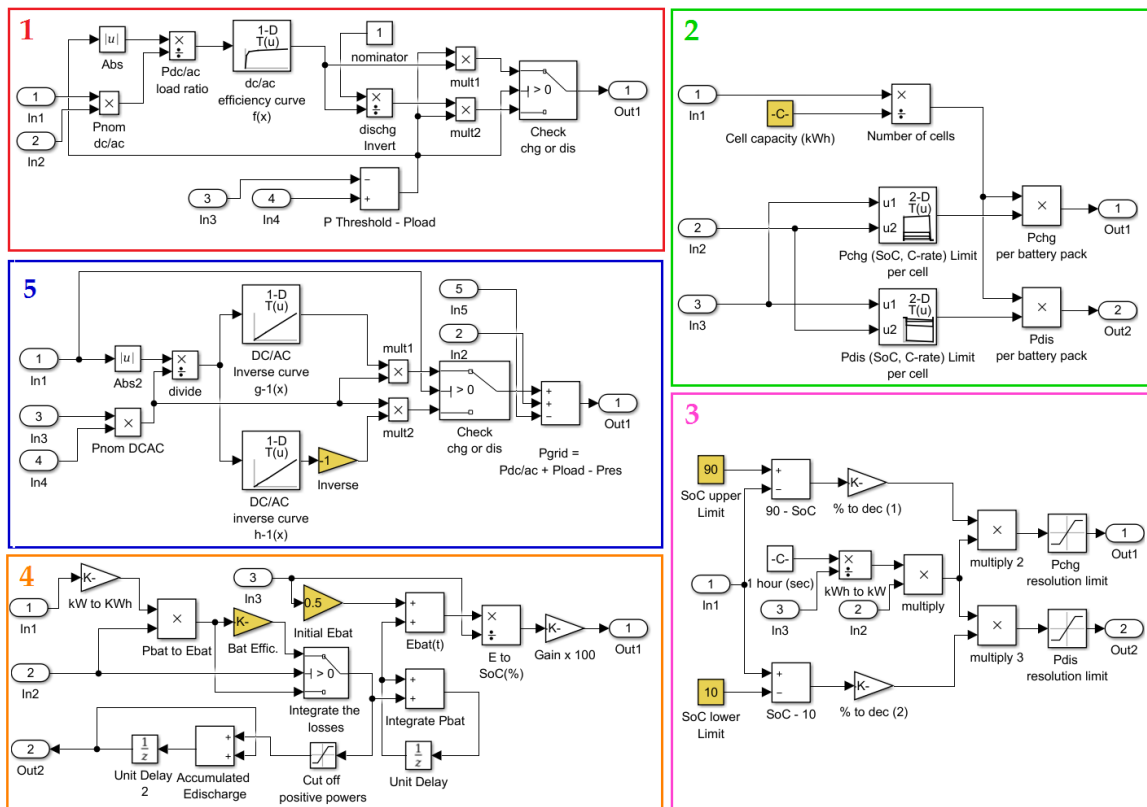
Industrieel/GO



# 14.10 EMS-model voor meer zelfvoorziening met BESS



(a) Main model



(b) Subsystem components

## 14.11 MATLAB-code lithium-ion batterij

```

load('Data_session2.mat')

caps = 250;

%initialisatie
winsten = zeros(caps,2);
terugverdiertijden = zeros(caps,2);
capaciteiten = zeros(caps,1);
totale_opbrengsten = zeros(caps,2);
investeringen = zeros(caps,2);
kWh_winsten = zeros(caps,2);
besparingen = zeros(15,caps);
zelfconsumpties = zeros(caps,2);
zelfvoorzieningen = zeros(caps,2);
levensduren = zeros(caps,2);

%initialisatie Lion batterij
inCrate = 1;
max_cycli = 6000;
prijs_batterij = 600;

%berekeningen zonder batterij
inCap = 0.01;
sim NaiveThreshold_selfsufficiency_Labversion;

Eload = sum(simout(:,3))/6
Enet_abs = sum(max(simout(:,5), 0))/6;
Zv0 = (Eload-Enet_abs)/Eload
kWh_kost0 = (1-Zv0)*Eload*0.3; % =Enet_abs*0.3

Epv0 = sum(simout(:,4))/6
Zc0 = (Eload-Enet_abs)/Epv0

max_batt_cap = Epv0-(Eload-Enet_abs)

%berekeningen met verschillende capaciteiten voor batterij
for c = 1:1:caps
inCap = c;
sim NaiveThreshold_selfsufficiency_Labversion;

Eload = sum(simout(:,3))/6;
Enet_abs = sum(max(simout(:,5), 0))/6;
Zv = (Eload - Enet_abs)/Eload;
Epv = sum(simout(:,4))/6;
Zc = (Eload-Enet_abs)/Epv;

kWh_kost = (1-Zv)*Eload*0.3; % =Enet_abs*0.3
kWh_winst = (kWh_kost0 - kWh_kost);
investering = prijs_batterij*inCap;
Edis = -simout(end,6);
cycles = Edis/inCap*15;

```



```

if cycles > max_cycli
levensduur = max_cycli/cycles*15;
else
levensduur = 15;
end

zelfvoorzieningen(c,2) = Zv;
zelfconsumpties(c,2) = Zc;
totale_opbrengst = kWh_winst*levensduur;

%resultaten in tabellen
kWh_winsten(c,2) = kWh_winst;
totale_opbrengsten(c,2) = totale_opbrengst;
investeringen(c,2) = investering;
winsten(c,2) = totale_opbrengst - investering;
terugverdientijden(c,2) = investering/kWh_winst;
capaciteiten(c) = inCap;
levensduren(c,2) = levensduur;
end

%tabellen overzichtelijk maken met overeenkomstige capaciteiten
zelfvoorzieningen(:,1) = capaciteiten;
zelfconsumpties(:,1) = capaciteiten;
kWh_winsten(:,1) = capaciteiten;
totale_opbrengsten(:,1) = capaciteiten;
investeringen(:,1) = capaciteiten;
winsten(:,1) = capaciteiten;
terugverdientijden(:,1) = capaciteiten;
levensduren(:,1) = capaciteiten;

winsten
investeringen

plot(capaciteiten, zelfvoorzieningen(:,2), 'Color', 'magenta')
plot(capaciteiten, zelfconsumpties(:,2), 'Color', 'green')

plot(capaciteiten, terugverdientijden(:,2), 'Color', 'red')
plot(capaciteiten, winsten(:,2), 'Color', 'blue')

```

## 14.12 MATLAB code redox flow batterij

```

load('Data_session2.mat')

caps = 250;

%initialisatie
winsten = zeros(caps,2);
terugverdientijden = zeros(caps,2);
capaciteiten = zeros(caps,1);
totale_opbrengsten = zeros(caps,2);
investeringen = zeros(caps,2);
kWh_winsten = zeros(caps,2);
zelfconsumpties = zeros(caps,2);

```



```

zelfvoorzieningen = zeros(caps,2);
levensduren = zeros(caps,2);

%initialisatie Lion batterij
inCrate = 0.2;
max_cycli = 12000;
prijs_batterij = 600;

%berekeningen zonder batterij
inCap = 0.01;
sim NaiveThreshold_selfsufficiency_Labversion;

Eload = sum(simout(:,3))/6;
Enet_abs = sum(max(simout(:,5), 0))/6;
Zv0 = (Eload-Enet_abs)/Eload;
kWh_kost0 = (1-Zv0)*Eload*0.3;

Epv0 = sum(simout(:,4))/6;
Zc0 = (Eload-Enet_abs)/Epv0;

max_batt_cap = Epv0-(Eload-Enet_abs)

%berekeningen met verschillende capaciteiten voor batterij
for c = 1:1:caps
inCap = c;
sim NaiveThreshold_selfsufficiency_Labversion;

Eload = sum(simout(:,3))/6;
Enet_abs = sum(max(simout(:,5), 0))/6;
Zv = (Eload - Enet_abs)/Eload;
Epv = sum(simout(:,4))/6;
Zc = (Eload-Enet_abs)/Epv;

kWh_kost = (1-Zv)*Eload*0.3;
kWh_winst = (kWh_kost0 - kWh_kost);
investering = prijs_batterij*inCap;
Edis = -simout(end,6);
cycles = Edis/inCap*15;

if cycles > max_cycli
levensduur = max_cycli/cycles*15;
else
levensduur = 15;
end

zelfvoorzieningen(c,2) = Zv;
zelfconsumpties(c,2) = Zc;
totale_opbrengst = kWh_winst*levensduur;

%resultaten in tabellen
kWh_winsten(c,2) = kWh_winst;
totale_opbrengsten(c,2) = totale_opbrengst;
investeringen(c,2) = investering;
winsten(c,2) = totale_opbrengst - investering;
terugverdientijden(c,2) = investering/kWh_winst;

```

```

capaciteiten(c) = inCap;
levensduren(c,2) = levensduur;
end

```

```

%tabellen overzichtelijk maken met overeenkomstige capaciteiten

```

```

zelfvoorzieningen(:,1) = capaciteiten;
zelfconsumpties(:,1) = capaciteiten;
kWh_winsten(:,1) = capaciteiten;
totale_opbrengsten(:,1) = capaciteiten;
investeringen(:,1) = capaciteiten;
winsten(:,1) = capaciteiten;
terugverdiertijden(:,1) = capaciteiten;
levensduren(:,1) = capaciteiten;

```

```

winsten
investeringen

```

```

plot(capaciteiten, zelfvoorzieningen(:,2), 'Color', 'magenta')
plot(capaciteiten, zelfconsumpties(:,2), 'Color', 'green')

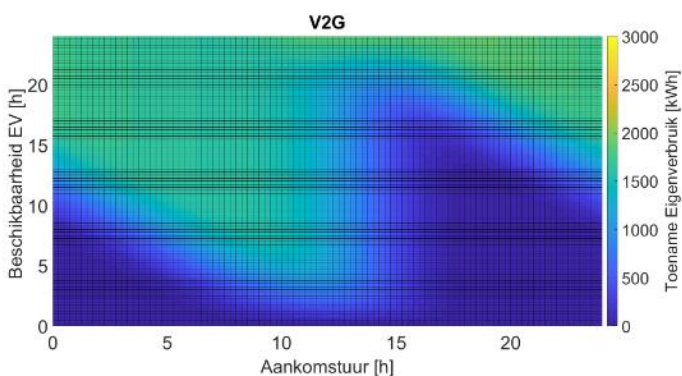
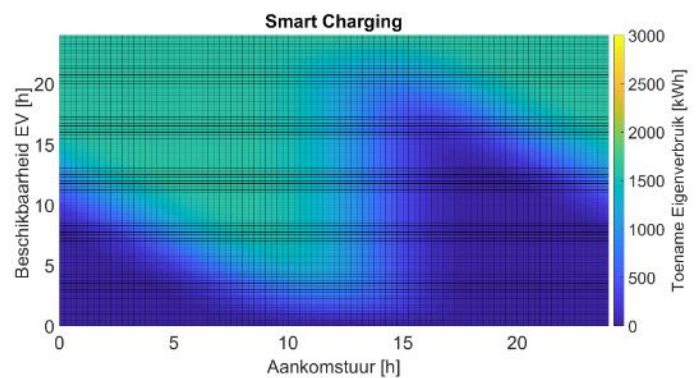
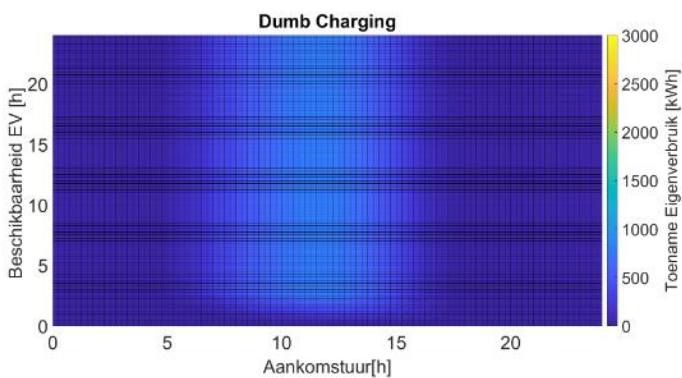
```

```

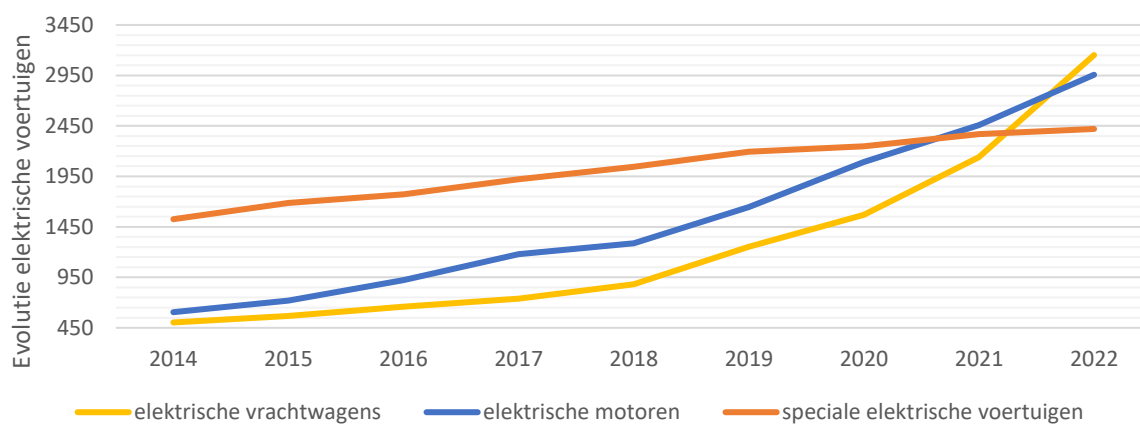
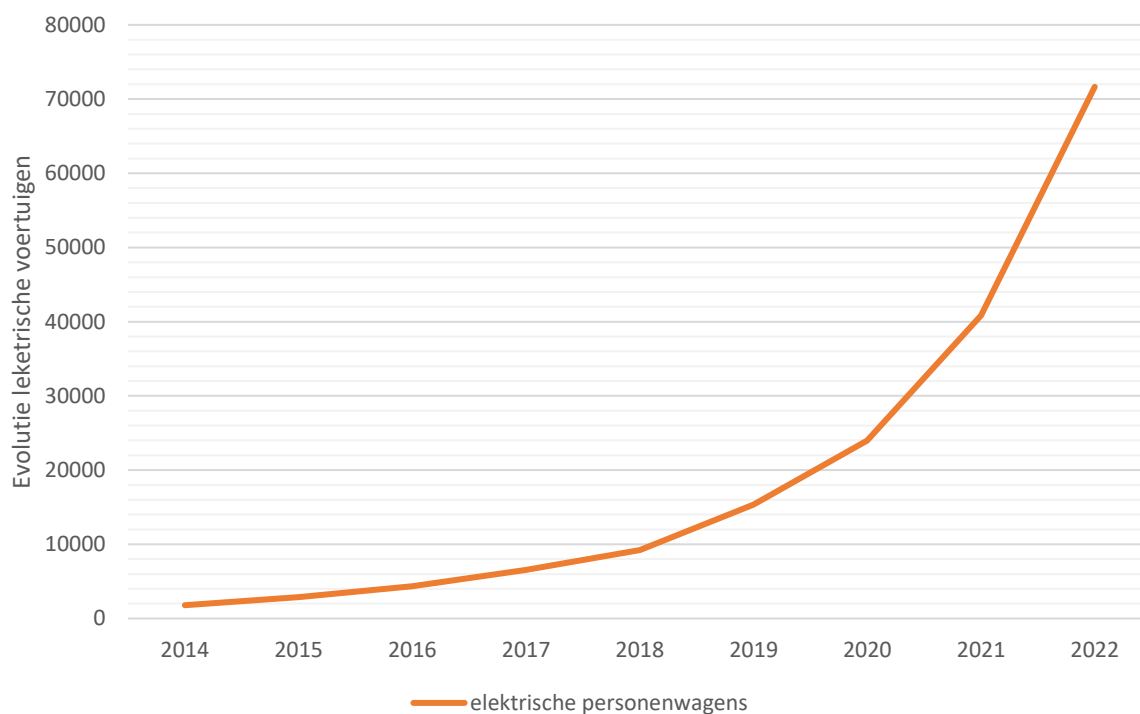
plot(capaciteiten, terugverdiertijden(:,2), 'Color', 'red')
plot(capaciteiten, winsten(:,2), 'Color', 'blue')

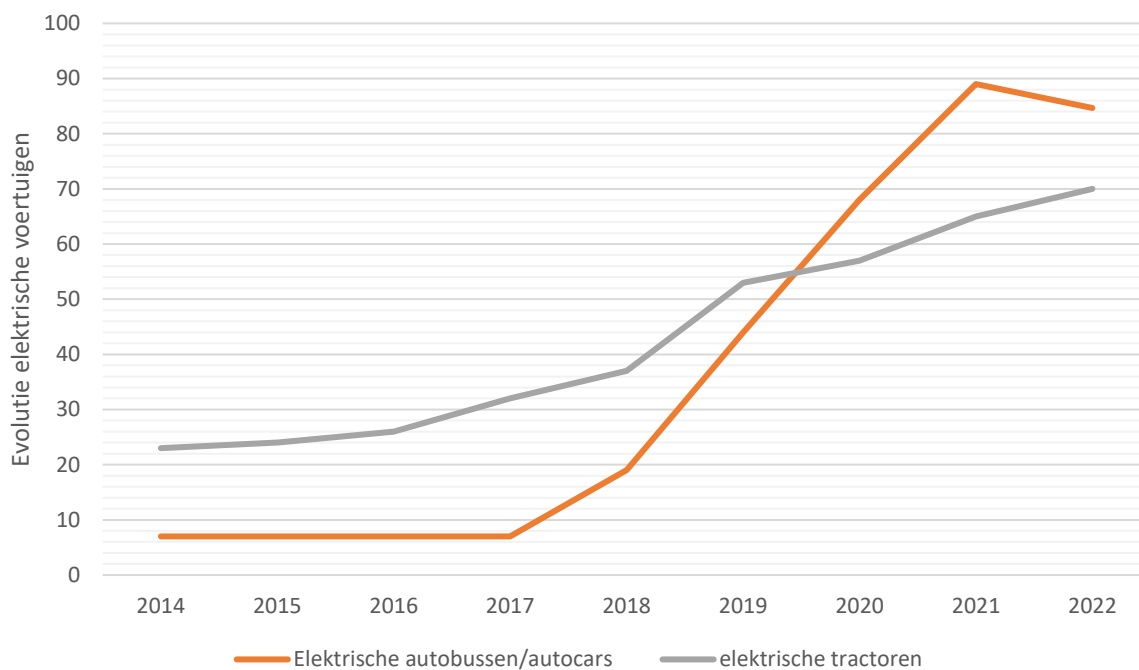
```

## 14.13 Impact aankomst- en vertrekuur



## 14.14 Evolutie elektrische voertuigen





## 14.15 Cijfergegevens voorspelling totale verbruik

jaar	Totaal verbruik (voorspelling) [TWh]	Totaal verbruik (helft voertuigen elektrisch) [TWh]	Totaal verbruik (alle personenwagens en motorrijwielen elektrisch) [TWh]	Totaal verbruik (alle voertuigen elektrisch) [TWh]
2015	88	88	88	88
2016	86,9	86,9	86,9	86,9
2017	87,4	87,4	87,4	87,4
2018	87,5	87,5	87,5	87,5
2019	85	85	85	85
2020	81,2	81,2	81,2	81,2
2021	84,5	84,5	84,5	84,5
2022	81,8	81,8	81,8	81,8
2023	82,049	156,800	99,934	232,303
2024	82,490	158,733	100,228	236,028
2025	83,116	160,670	100,525	239,757
2026	84,051	162,603	100,819	243,483
2027	85,522	164,546	101,122	247,217
2030	88,242	170,346	102,004	258,394
2035	92,850	180,016	103,476	277,024
2040	100,054	189,686	104,949	295,655
2050	106,171	209,025	107,894	332,915