

Rekenen met Energie



Basisboekje behorende bij de 6 workshop van 3 februari tot 10 maart 2021

Maart 2021
Frans Debets
Debets bv

Dit boekje is een aanvulling op de zes workshops die voor 02025 in februari en maart 2021 werden verzorgd.

Deze tekst is met zorg opgesteld, maar fouten kunnen niet worden uitgesloten.

Frans Debets

Inhoud

1.1	Begrippen, eenheden en rekenregels	4
1.2	Wat is de energiewaarde van brandstoffen?	6
1.3	Kilo, mega, giga, tera, peta, exa.....	6
1.4	Vermogen	7
2.1.	Hoeveel energie verbruikt ons land?	9
2.2	Het stroomverbruik.....	10
2.3	Wat gebruikt een huishouden?	11
3.1	De energietransitie.....	13
4.2	Energie uit wind.....	15
4.3	Energie van de zon.....	16
4.4	Over CO ₂	20
5.1	Besparen	22
5.2	Over isoleren	22

1.1 Begrippen, eenheden en rekenregels

In de energietransitie worden diverse **begrippen** gehanteerd. Deze begrippen worden uitgedrukt in **eenheden**. Met deze eenheden kan gerekend worden met behulp van **rekenregels**.

Energie is een moeilijk te doorgronden begrip. We kennen chemische energie; thermische energie; potentiële energie; mechanische energie, etc. Met energie zijn veranderingen teweeg te brengen: iets verwarmen, iets op snelheid brengen, van plaats veranderen. Voor dit natuurkundig begrip worden verschillende eenheden gebruikt.

- **calorie**

Als het om voedsel gaat gebruiken we vaak de eenheid calorie. De definitie is:
Een calorie is de hoeveelheid energie die nodig is om 1 gram water 1 graad Celsius in temperatuur te doen stijgen.

Meestal gebruiken we de kilocalorie, dat zijn 1.000 calorieën. Daarmee kunnen we dus 1 kilogram (of 1 liter) water 1 graad Celsius in temperatuur verhogen.

Een mens heeft per seconde ongeveer 30 calorieën nodig, per uur ongeveer 100.000 calorieën, per dag (24 uur) ongeveer 2.400.000 calorieën of 2400 kilocalorieën (kcal). Hij gebruikt deze energie om zijn eigen stofwisseling op peil te houden en om zijn werk te kunnen doen. Hij zet de chemische energie uit het voedsel om in warmte en arbeid.

Rekenvoorbeeld: met 2400 kcal kan je een badkuip met 80 liter water van 8 graden 30 graden opwarmen tot 38 graden (80 liter * 30 graden = 2400 kcal).

- **Joule**

De in de algemene energieleer gehanteerde eenheid is niet de calorie maar de Joule (J). 1 calorie is 4,18 Joule. 2.400 kcal is dus 10.032 kiloJoule (kJ). Een mens heeft dus ongeveer 10.000 kJ per dag nodig.

Tabel 1: Energiewaarde van voedingsmiddelen

Product	Energiewaarde per product		Nodig voor 2400 kcal of 10.000 kJ
	kcal	kJ	
Koekje	50	209	48 koekjes
100 gram aardappels	75	314	32 x 100 gram aardappels
Een glas frisdrank	100	418	24 glazen frisdrank
Een glas bier	125	523	19 glazen bier
Een handje pinda's	150	627	16 handjes pinda's
Een slagroom gebakje	250	1.045	9 slagroomgebakjes

De eenheid Joule is ook gerelateerd aan massa en hoogte. De formule $E=mgh$ beschrijft dit.

E is in Joule, **m** is in kilogram, **h** is in meter. De **g** = de gravitatieconstante (of valversnelling), deze is $9,8 \text{ m/sec}^2$. Dit ronden we hieronder af op 10.

Als we een gewicht van 1 kg 10 cm (=0,1 meter) omhoog brengen, dan is de hoeveelheid energie: $E= mgh$ dus: $1 \cdot 10 \cdot 0,10 = 1 \text{ Joule}$.

Rekenvoorbeeld: met 10.000 kJ kan je 100 ton (100.000 kg) aan gewicht 10 meter omhoog brengen.

$$100.000 \cdot 10 \cdot 10 = 10.000.000 \text{ J} = 10.000 \text{ kJ}.$$

- **TOE**

In macro economische analyses gebruikt men de eenheid **TOE**: Ton Oil Equivalent, (ongeveer 42 GJ).

- **BTU**

British Thermal Units: **BTU** (1,055 kJ) wordt gebruikt in de Engelstalige wereld. Hij wordt bij ons ook wel gebruikt voor koelsystemen. De definitie is: *de hoeveelheid warmte die nodig is om een pond water één graad Fahrenheit te verhogen.*

- **kWh**

KiloWattuur is ook een eenheid voor energie. Dit wordt in 2.4 uitgelegd.

Tabel 2: omreken tabel voor energie eenheden

	MJ	kcal	TOE	BTU	kWh
MJ	1	238,8	$2,388 \cdot 10^5$	947,8	0,2778
Kcal	$4,18 \cdot 10^{-3}$	1	$1 \cdot 10^{-7}$	3,968	$1,163 \cdot 10^{-3}$
TOE	41870	10^7	1	$3968 \cdot 10^4$	11630
BTU	$1,0551 \cdot 10^{-3}$	0,252	$2,52 \cdot 10^{-8}$	1	$293,1 \cdot 10^{-6}$
kWh	3,6	859,8	$8,598 \cdot 10^{-5}$	3412	1

- **Gebruik huishoudens**

Om de productie van bijvoorbeeld windmolens te beschrijven gebruikt men soms de eenheid "het gebruik van een huishouden". Daarmee wordt bedoeld: de windmolen produceert net zo veel stroom als X-huishoudens per jaar aan stroom gebruiken.

1.2 Wat is de energiewaarde van brandstoffen?

De moderne brandstoffen kenmerken zich door een hoge energie-inhoud.

Tabel 3: Energie-inhoud (afgerond) van brandstoffen

	kJ
Aardappels	3.140 kJ per kg
Aardgas	31.650 kJ per m ³ ¹
Benzine	47.000 kJ per kg (36.000 kJ per liter)
Steenkool	20.000 kJ per kg
Geperste turf	16.000 kJ per kg
Droog hout (25% vocht)	14.000 kJ per kg 10 GJ per m ³ massief

Als een mens 10.000 kJ per dag aan voedsel verbruikt, komt dat dus overeen met het verbruik van ongeveer een kwart liter benzine of eenderde kubieke meter aardgas.

1.3 Kilo, mega, giga, tera, peta, exa

Om het gebruik van te veel nullen te vermijden wordt gewerkt met voorvoegsels: kilo, mega, giga, tera, peta en exa. Elke volgend voorvoegsel is 1.000 keer groter dan de voorgaande. Dus kilo is 1.000 en mega is 1.000 kilo. Peta staat voor een 1 met 15 nullen, of een miljoenmiljard. De afkortingen zijn: k, M, G, T, P, E.

Tabel 4: Voorvoegsels

SI-voorvoegsel	SI letter	Waarde	Hoofd- telwoord	Macht van 10
kilo	k	1.000	duizend	10 ³
mega	M	1.000.000	miljoen	10 ⁶
giga	G	1.000.000.000	miljard	10 ⁹
tera	T	1.000.000.000.000	biljoen	10 ¹²
peta	P	1.000.000.000.000.000	biljard	10 ¹⁵
exa	E	1.000.000.000.000.000.000	triljoen	10 ¹⁸

¹ De waarde 31,65 MJ/ m³ komt vrij bij de verbranding van het gas. Dit noemen we de **onderwaarde**. Bij aardgasverbranding komt waterdamp vrij die bij condensatie ook energie levert. Indien dit wordt meegerekend is de energiewaarde 35,17 MJ per m³. Dit noemen we de **bovenwaarde**. Bovenwaarde = onderwaarde + condensatiewarmte

Ons Groningse gas heeft een vrij lage calorische waarde, hoogcalorisch gas heeft een energiewaarde van circa 34 MJ (**onderwaarde**).

1.4 Vermogen

De eenheden voor energie werden hierboven toegelicht. Een veelgebruikte eenheid voor energie is kilowattuur (kWh). Deze eenheid is afgeleid van twee andere eenheden: de eenheid voor vermogen (Watt), en een eenheid voor tijd (seconde of uur).

- **Vermogen meten we in Watt**

Een apparaat kan arbeid leveren of energie omzetten in een bepaalde tijdsduur. Dit begrip noemen we het vermogen. De eenheid is Watt².

Als er een Joule per seconde wordt omgezet is het vermogen 1 Watt. In formulevorm:

$$W = J/\text{sec}$$

Andersom geldt: als een vermogen van 1 Watt gedurende 1 seconde energie levert, is de hoeveelheid energie 1 Joule. In formulevorm:

$$J = Ws$$

Een elektrisch apparaat met een vermogen van 100 Watt zet dus elke seconde 100 Ws = 100 Joule elektrische energie om in andere vormen van energie.

In praktijk rekenen liever met kiloWatt (=1.000 Watt) en met uren (=3.600 seconden):

$$1 \text{ kilowattuur} = 1.000 \text{ Watt} * 3.600 \text{ seconden} = 3.600.000 \text{ Joule} = 3600 \text{ kJ} = 3,6 \text{ MJ}$$

Hiermee is de kWh om te rekenen naar kJ – beide zijn eenheden van energie.

Rekentip:

Van kWh naar kJ: vermenigvuldigen met 3600

Van kJ naar kWh: delen door 3600

De eenheid **kiloWattuur** is dus ook een eenheid voor energie.

De eerder gebruikte waarden worden in tabel 5 herhaald waarbij de omrekening van kiloJoules naar kiloWatturen is toegevoegd (delen door 3.600).

In dit overzicht is de accu ook opgenomen. De energie-inhoud van een moderne accu is veel lager dan de energie-inhoud van brandstoffen.

² Een andere eenheid is de PaardeKracht (PK). Dat is verwarrend want het betreft niet het begrip "kracht", maar vermogen. De definitie is: **het vermogen om 150 kilogram in een minuut 30 meter op te hijsen.**

1 pk is ongeveer 0,736 [kW](#), en 1 kW is ongeveer 1,36 pk

Tabel 5: *Energiewaarde van brandstoffen in kJ en in kWh*

Brandstof	kJ	kWh
Aardappels	3.140 kJ per kg	0,872 per kg
Aardgas	31.000 kJ per m ³	8,61 per m ³
Waterstof ³	121.000 kJ/kg	33 kWh per kg
Benzine	47.000 kJ per kg 36.000 kJ per liter	13,05 per kg 10 per liter
Steenkool	20.000 kJ per kg	5,55 per kg
Geperste turf	16.000 kJ per kg	4,44 per kg
Droog hout (25% vocht)	14.000 kJ per kg	3,88 per kg
Loodaccu	100 kJ per kg	0,027 kWh per kg
Lithium-ion accu	576 kJ per kg 972 kJ per ltr	0,160 kWh/kg 0,270 kWh/ltr

Energie = Vermogen * Tijd is een belangrijke regel. Als energie en vermogen bekend zijn, kan het aantal uren (op theoretisch vol vermogen) berekend worden. Dit noemen we ook wel het aantal **vollast-uren**: Wh/W = uren.

Hieronder staan de productie (=energie) en het opgesteld vermogen van alle windmolens op land in Nederland (bron: CBS Hernieuwbare Energie in Nederland 2017).

	Aantal windmolens			Vermogen			Elektriciteitsproductie		Effect	
	bijgeplaatst	uit gebruik genomen	opgesteld ¹⁾	bijgeplaatst	uit gebruik genomen	opgesteld ¹⁾	niet genormaliseerd	genormaliseerd ²⁾	vermeden verbruik fossiele primaire energie	vermeden emissie CO ₂
				MW			mln kWh		TJ	Kton
Totaal										
2000	47	9	1 291	38	2	447	829	744	6 745	481
2005	125	69	1 710	166	17	1 224	2 067	2 034	18 348	1 264
2010	28	27	1 973	30	15	2 237	3 993	4 503	38 320	2 583
2015	191	144	2 171	583	58	3 391	7 550	6 917	60 218	4 691
2016	248	88	2 331	923	57	4 257	8 170	8 364	73 216	5 462
2017**	64	125	2 270	84	139	4 202	10 569	9 642	85 838	6 404
Op land										
2015	148	144	2 032	454	58	3 034	6 420	5 882	51 264	3 993
2016	98	88	2 042	323	57	3 300	5 901	6 041	53 907	4 021
2017**	64	125	1 981	84	139	3 245	6 869	6 267	56 475	4 213
Op zee										
2015	43	0	139	129	0	357	1 130	1 035	8 954	698
2016	150	0	289	600	0	957	2 269	2 323	19 309	1 440
2017**	0	0	289	0	0	957	3 700	3 375	29 363	2 190

Bron: CBS.

¹⁾ Aan einde verslagjaar.

²⁾ Volgens de methode uit de EU-richtlijn voor hernieuwbare energie.

³ Bij 1 bar druk heeft waterstof een energiewaarde van 11 kJ; bij 200 bar 2.200 kJ.

In 2017 stond er een vermogen van 3245 MW op land opgesteld die 6869 miljoen kWh produceerde.
De berekende **vollast** was dus: $6869 \text{ miljoen kWh} / 3.245.000 \text{ kW} = 2123 \text{ uren}$.

Op zee was dit:
 $3700 \text{ miljoen kWh} / 957.000 \text{ kW} = 3866 \text{ uren}$.

De **productiefactor** is het vollastdeel in procenten van het jaar (8760 uren), voor wind op land is dat bij 2123 uren vollast: $2123/8760 * 100\% = 24\%$

2.1. Hoeveel energie verbruikt ons land?

We gebruiken twee termen: het **primaire energieverbruik** en het **bruto energetisch eindverbruik**.

Het **primaire energieverbruik**⁴ wordt berekend op basis van alle energiegrondstoffen die in ons land gebruikt worden:

Energiedrager	Energie
10% steenkool	320 PJ
40% olie	1280 PJ
40% gas	1280 PJ
10% kern- en duurzame energie	320 PJ
Totaal	3200 PJ

De grootste gebruiker is de industrie inclusief landbouw en dienstverlening: 1900 PJ (60%). De overige 40% wordt ongeveer gelijk verdeeld over vervoer en de huishoudens.

Het primaire energieverbruik is de afgelopen jaren steeds gestegen: in 1960 werd nog geen 1.000 PJ gebruikt, in 1970 was het 2.000 PJ, in 1980 bijna 3.000 PJ. Na een verlaging in de jaren '80 ging het rond 1995 weer door de 3.000 PJ heen. De afgelopen jaren is het verbruik ongeveer stabiel rond 3200 PJ.

In de circa 3200 PJ is ook opgenomen het gebruik van fossiele brandstof voor onder andere de kunststofindustrie (het niet-energetisch verbruik: circa 650 PJ) en de omzettingsverliezen in de energieproductie (circa 500 PJ). Het verbruik exclusief deze circa 1200 PJ noemen we het **bruto energetisch eindverbruik**, circa 2000 PJ.

Het **bruto energetisch eindverbruik** is het totale energieverbruik van alle eindgebruikers (bedrijven, burgers, overheden) van gas, stroom, benzine, diesel

⁴ Eigenlijk zouden we de uitdrukking energieverbruik niet mogen gebruiken, energie gaat niet verloren, je gebruikt het wel maar je verbruikt het niet...

etc. Dit eindverbruik ligt nu rond 2100 PJ:

1990	1819 PJ
2000	2140 PJ
2005	2296 PJ
2010	2350 PJ
2015	2043 PJ
2017	2084 PJ
2018	2116 PJ = 587 miljoen MWh
2019	2094 PJ = 581 miljoen MWh = 581 miljard kWh = 581 TWh

Dit verbruik is ruwweg verdeeld in: 40% gas, 40% transportbrandstof, 20% stroom (42 PJ of 120 miljoen MWh).

Het **bruto energetisch eindverbruik** is de rekenbasis voor onze duurzame energie doelstelling; het doel van 14% in 2020 is 14% van het eindverbruik:

$$14\% * 2094 \text{ PJ} = 293 \text{ PJ}.$$

Het gebruik van een gemeente of Provincie is eenvoudig te schatten.

Bijvoorbeeld een stad met 100.000 inwoners:

$$100.000/17 \text{ miljoen} * 2000 \text{ PJ} = 11,8 \text{ PJ} = 3,7 \text{ miljard kWh}$$

Als deze stad 14% duurzame energie nastreeft is dat: 1,65 PJ of (delen door 3600) 459 GWh. Dat is ongeveer wat 66 windmolens van 3MW (198 MW) kunnen leveren: $66 * 3\text{MW} * 2300 \text{ uren} = 455 \text{ GWh}$.

Of 455 ha voor zonne-weides (op basis van 1 GWh per ha).

2.2 Het stroomverbruik

Elektriciteit is een steeds belangrijkere vorm van energie geworden. Tussen 1950 en 2005 steeg het elektriciteitsverbruik van ruim 7 mld kWh tot 118 mld kWh, gemiddeld 4,5 procent per jaar. De laatste jaren is de groei afgevlakt, het ligt nu rond 120 TWh. Het hernieuwbare aandeel was in 2019 rond 20%.

	2005	2010	2017	2018	2019
Gebruik in miljard kWh	118.222	122.056	120.750	122.444	122.222
hernieuwbaar	6,3%	9,6%	13,8%	15,1%	17,9%

Tot eind jaren '70 bestond het aanbod van elektriciteit voor het grootste deel uit centrale productie. Daarna is het belang van decentrale productie (vooral met WKK-installaties op gas) en de import van elektriciteit toegenomen. Vanaf 1999 schommelt het aandeel centrale productie tussen 50 procent en 60 procent van het totale aanbod. De import was enkele jaren geleden 20- 30 mld kWh met een export rond 15 mld kWh. Inmiddels is Nederland netto exporteur geworden.

In Nederland wordt elektriciteit vooral geproduceerd door verbranding van fossiele brandstoffen: gas en kolen (olie wordt in Nederland niet gebruikt). Het aandeel van fossiele brandstoffen in de elektriciteitsproductie daalde licht de afgelopen jaren, het aandeel duurzaam groeit (in 2019 ca. 18%)

Stroom uit:	Productie 2018 in mld kWh	2019
Wind	10,1	11
Zon	3,6	5,2
Biomassa	4,7	5,8
Totaal	18,5	22
		Bron: CBS ⁵

De bijdrage van kernenergie aan de Nederlandse elektriciteitsproductie is beperkt tot 4%, vanuit Borssele.

Het totale (alle opweksystemen) opgesteld vermogen steeg van 20 GW rond 2000 tot ca. 35 GW nu. Vooral de toename van het windvermogen is daar debet aan. De gemiddelde vermogensvraag is: 119 TWh/ 8760 uren = 13,6 GW

Groene stroom is populair in Nederland. De afname is veel groter dan de eigen productie, het merendeel van de groene stroom is met certificaten geregeld (garanties van oorsprong - GVO), afkomstig uit het buitenland. Naast de eigen GVO productie van 16 mld kWh werd er in 2018 46 mld aan GVO stroom geïmporteerd. 30% kwam (in 2018) uit Italië; Noorwegen en Spanje ieder 15%. Ook IJsland leverde GVO's. Bron: CBS.

2.3 Wat gebruikt een huishouden?

Het gasverbruik, in 1980 nog rond 3.000 m³ per huishouden per jaar, zakte na 1980 fors. Dit is vooral te danken aan de HR-ketel en de betere isolatie van huizen. Het gemiddelde verbruik van een huishouden ligt nu rond de 1300 - 1.400 m³ aardgas. In de jaren '80 lag het stroomverbruik rond de 3000 kWh, dat is de afgelopen jaren langzaam gestegen tot 3.300 kWh elektriciteit per jaar.

Kolen en huisbrandolie werden in de vorige eeuw nog veel gebruikt, maar zijn nu vrijwel verdwenen. Houtstook is min of meer stabiel gebleven, in ongeveer 1 miljoen huizen is een houtstook installatie. Samen zijn deze houtkachels goed voor 19PJ duurzame energie (15% van onze DE productie). De luchtverontreiniging door particuliere houtstook is relatief groot.

De sterke daling van het gasverbruik in huishoudens geeft al aan wat besparing kan opleveren. Het meeste gas (80%) gaat op aan de ruimteverwarming (15% is voor warmwater en koken is 5%), dus betere verwarmingssystemen en isolatie

⁵ Het CBS-jaaroverzicht wordt elk jaar eind september gepresenteerd over het voorgaande jaar. De 2020 cijfers komen dus in september 2021.

leveren veel voordeel. De huizen die volgens de 2015 voorschriften worden gebouwd, komen met hun gasverbruik ruim onder de 1.000 m³ per jaar. Dan is het de vraag of een gasaansluiting nog wel uit kan, veel nieuwe wijken worden daarom zonder gasaansluiting ontwikkeld. Inmiddels wordt via de wet afgedwongen dat nieuwbouw geen gasinfrastructuur meer krijgt, het beleid is gericht op gasloze wijken. Dit komt vooral voort uit de afbouw van de gaswinning vanwege de bevingen in Groningen.

Voor de moderne woningen is het aardgastijdperk dus alweer voorbij, de huizen worden *all electric*. Of de warmte wordt geleverd via een warmtenet.

De stijging van het elektriciteitsverbruik naar 3.300 kWh per jaar (of 9,3 kWh per dag) is vooral te wijten aan de toename van het **aantal** apparaten. De apparaten zijn wel zuiniger geworden. De grootste verbruikers zijn doorgaans de wasmachine, verlichting en de koelkast; ieder 200 - 500 kWh per jaar. Juist deze systemen zijn de afgelopen jaren veel zuiniger geworden.

Het energieverbruik is steeds de **combinatie** van **vermogen** en **tijd**. De ijskast heeft een klein vermogen (50-80 Watt), maar hij verbruikt veel (200-400 kWh) omdat hij altijd aan staat. Een stofzuiger heeft een groot vermogen, 1.500 W, hij verbruikt dus in een uur 1,5 kWh. Maar met 3/4 uur stofzuigen per week (40 uur per jaar) verbruikt deze stofzuiger slechts 60 kWh per jaar.

Een modern huishouden heeft veel apparaten die voortdurend aan staan: ventilatie, de router, de elektrische klok, de *standby* functie van apparaten (televisie, computers, draadloze boxen). Zij verbruiken per uur heel weinig stroom, maar omdat ze altijd aan staan is het totale verbruik aanzienlijk. De diverse opladers voor telefoon, tablets, stofzuigers, of de ruim 1 miljoen elektrische fietsen in Nederland vragen een forse laadstroom.

Het voordeel van het besparen van elektriciteit is groot, elektriciteit is duur (ongeveer 20 cent per kWh voor een huishouden) en bij de opwekking en het transport gaat veel energie verloren (ca. 60%).

Toch mag niet worden vergeten dat het energieverbruik van een huishouden vooral wordt bepaald door het gasverbruik. We verbruiken in totaal circa 15.000 kWh: circa 12.000 kWh aan gas (= 75%) en circa 3.300 kWh aan elektriciteit (= 25%). De kosten voor gas zijn de grootste kostenpost.

Tabel 6: Gebruik en kosten van een gemiddeld huishouden

	jaarverbruik	MJoule	kWh	%	€
Gas (€0,80/m ³) 31 MJ/m ³	1400 m ³	43.400	12.055	75	1120
Elektriciteit (€0,20 per kWh)	3300 kWh	11.880	3.300	25	660
		55.200	15.355	100	1780

Gas kost de consument €0,80 per m³ gas (=8,8 cent per kWh) en voor stroom betaalt hij €0,20 cent per kWh. Stroom is voor de kleinverbruiker dus ruim 2 keer duurder dan gas per MJ of kWh!

De ruim 7 miljoen huishoudens verbruiken ongeveer 385 PJ (7 miljoen * 55 GJ), in strenge winters is het meer, daarvan is 80PJ elektriciteit. Dat is $80/2000 = 4\%$ van het totale energieverbruik van Nederland of 20% van het totale stroomverbruik.

3.1 De energietransitie

In de laatste decennia van de vorige eeuw werd al gepleit voor een andere energiehuishouding. De Club van Rome vroeg in Grenzen aan de Groei (1972) aandacht voor de eindigheid van de grondstoffen. De oliecrisis en de olieboycot van 1973 confronteerden Nederland met de grote afhankelijkheid van olie en de kwetsbaarheid van onze samenleving. Dit leidde tot de eerste besparingsprogramma's.

Met het rapport Zorgen voor Morgen (1988) en het eerste Nationaal Milieubeleidsplan (1989) werd een basis gelegd voor beleid gericht op het verminderen van emissies, onder andere door de inzet van schonere brandstoffen en minder energiegebruik. In de Wet milieubeheer werd in artikel 2.1 een algemene zorgplicht opgenomen: een doelmatig gebruik van energie is voor iedereen een plicht. In het Activiteitenbesluit art 2.15 is dit nader uitgewerkt tot verplichte maatregelen (de Erkende Maatregelen).

Wereldwijd werd er aandacht gevraagd voor de gevaren van een klimaatverandering. In het Verdrag van Kyoto (1997) spraken landen af de uitstoot van broeikasgassen te verminderen. In aansluiting hierop werden in 2007 door de Europese Unie reductiedoelen afgesproken. Dit leidde tot de hernieuwbare energierichtlijn (2009)⁶ waarin onder andere werd vastgelegd dat de EU in 2020 20% van het energiegebruik op duurzame wijze zou afdekken. Elk land kreeg een eigen opdracht, afhankelijk van de mogelijkheden. De Nederlandse bijdrage werd vastgesteld op 14%.

Tabel 8: De doelen voor 2020 van enkele EU-landen in percentage duurzame energie

Land	Status 2005	Doel 2020
Zweden	39,8	49
Denemarken	17	30
België	2,2	13
Duitsland	5,8	18
Verenigd Koninkrijk	1,3	15
Nederland.	2,4	14

Het eerste kabinet Rutte nam de 14% op in het regeerakkoord, het tweede kabinet Rutte verhoogde het 2020 doel tot 16%. In het SER Energieakkoord van 2013 werd het doel weer gesteld op 14% in 2020 en op 16% in 2023.

⁶ Renewable Energy Directive (RED)

Het percentage is gekoppeld aan het **Bruto Energetisch Eindverbruik**, dat was in 2019 in Nederland 2094 PJ. De 14% is dus: 293 PJ. Nederland haalde in 2019 een percentage van 8,7% (of 181,5 PJ).

3.2 Waarom willen we duurzame energie?

Er zijn meerdere aanleidingen om over te stappen naar duurzame energie. Hieronder worden er vier genoemd.

1 Het klimaat

We gaan ervan uit dat het klimaat verandert en dat dit komt door de ophoping van broeikasgassen in de atmosfeer. Een belangrijk broeikasgas is koolstofdioxide of CO₂. CO₂ komt vrij bij verbrandingsprocessen. Met duurzame energie wordt de uitstoot van CO₂ verminderd.

2 De eindigheid en de beschikbaarheid van de fossiele brandstoffen (ook wel Supply Security)

Over de hoeveelheid fossiele brandstof die nog uit de aarde te halen is, worden jaarlijks dikke rapporten vol geschreven. Dat er op een dag minder gewonnen zal worden dan er verbruikt wordt, lijkt logisch. Wanneer dat zal gebeuren, weten we niet.

De afhankelijkheid van een kleine groep olie- of gasleverende landen leidt tot geopolitieke spanningen. Olie, politieke onrust en oorlog zijn nauw met elkaar verbonden. De prijsfluctuaties zijn groot, deze leiden tot onrust bij de bevolking en afnemende economische groei. Met duurzame energie wordt de afhankelijkheid van de fossiele energie minder.

3 Het milieu

Veel van onze milieuproblemen zijn direct gerelateerd aan het verbruik van fossiele brandstoffen. SO_x, NO_x, roet en fijnstof zijn gekoppeld aan de verbranding van fossiele brandstoffen. Olierampen en aantasting van het milieu (bijvoorbeeld aardbevingen in Groningen) bij de winning en vervoer⁷ zijn klassieke milieuthema's. Nucleaire straling en kernafval zijn ook milieuthema's, zeker na de kernramp van Fukushima in 2011.

4 Economische bedrijvigheid

Duurzame energie kan nieuwe bedrijvigheid opleveren. Veel landen stimuleren duurzame energie om deze nieuwe industrie een ontwikkelkans te geven. Het succes op dat gebied wordt doorgaans niet in Megawatt of vermeden CO₂-uitstoot uitgedrukt, maar in arbeidsplaatsen of economische groeipercentages.

Het Nederlandse duurzame energiebeleid is gebaseerd op een mix van bovenstaande overwegingen, maar het klimaat is nu het belangrijkste. Het beleid richt zich op de in het Kyoto protocol en de op de klimaatconferenties (o.a. Parijs

⁷ Voorbeelden van "klassieke" milieurampen met olietankers: de Torrey Canyon (maart '67), de Amoco Cadiz (maart '78), de Exxon Valdez (maart '89), de explosie in 2010 van het boorplatform Deep Water Horizon in de Golf van Mexico.

2015) afgesproken doelen en de door de EU en eigen Nederlandse afspraken, zoals het Klimaatakkoord) voor de vermindering van CO₂-uitstoot en de opwekking van duurzame energie.

4.1 Duurzame energie

Wereldwijd wordt gezocht naar nieuwe energiebronnen die niet leiden tot CO₂-uitstoot en die niet ten koste gaan van de fossiele voorraden. Energie uit waterkracht of wind zijn voorbeelden van CO₂ neutrale energie uit niet-fossiele bron. Veel technieken die worden gebruikt zijn doorgaans oeroude technieken die verbeterd zijn: windmolens, heetwaterbronnen, vergisting, verbranding en zonneboilers.

4.2 Energie uit wind

Windmolens kennen we goed in Nederland. Rond 1850 stonden er ongeveer 9.000 molens in ons land. Na de opkomst van de stoommachine en de andere moderne technieken verloor de windmolen zijn functie, er zijn nu nog 1.170 oude molens over. Zo'n oude molen ontwikkelde 40 - 50 kW. In de jaren '70 begon de windmolen terug te keren als opwekker van elektriciteit. De eerste molens hadden een klein vermogen, 85 kW was in de jaren '80 al een grote jongen. De molens werden echter steeds groter en sterker. Nu zijn molens van 100 meter hoogte of meer en een wiek lengte van 45 meter (van as tot tip) met vermogens tot 4 MW al normaal, de eerste molens van 12 MW worden nu geplaatst.

De Nederlandse molens leverden in 2019:

aantal	PJ	GWh
Wind op land 1981 MW	28,56	7935
Wind op zee 289 MW	12,86	3573
totaal	41,42	11.508 (=11,5 TWh)

Het Nederlandse stroomverbruik is circa 120.000 GWh, dus ongeveer 9,5% wordt afgedekt door molens.

In overheidsnota's wordt wel gesproken over de windproductie in 2020, de *target* (uit het energieakkoord 2013) is: 6.000 MW op land en 4.000 MW op zee (deze doelen worden niet gehaald). Daarmee kan 25% van onze elektriciteitsbehoefte gedekt worden (mits deze behoefte de komende jaren niet veel verder doorgroeit). De nieuwe doelen voor 2050 liggen hoger, gesproken wordt over 75 GW op zee en 11 GW op land waarmee 1400 PJ (388 TWh) kan worden opgewekt.

4.3 Energie van de zon

De zon straalt elke dag voldoende energie naar de aarde om onze energiebehoefte ruim te dekken. De hoeveelheid zonne-vermogen die wereldwijd instraalt is 175 PWatt, terwijl we ongeveer 14 TWatt nodig hebben, minder dan 0,01% van wat de zon ons levert.

Het probleem is echter dat het nog niet zo eenvoudig is deze energie op te vangen en te benutten.

➤ fotovoltaïsche (PV) systemen

Een methode is het gebruik van zonnecellen of fotovoltaïsche (PV) systemen. Er zijn meerdere technieken voorhanden, maar een goede, moderne zonnecel heeft een rendement van circa 17% - 25%. Per m² wordt in Nederland tijdens de zonnige uren circa 1.000 Watt ingestraald, de oogst met PV-cellen is dan 170 Watt - 250 Watt per m². Dit vermogen onder zonnige omstandigheden wordt het piekvermogen genoemd en uitgedrukt in Wattpiek (Wp).

Het standaardoppervlak van het paneel is 1,6 m².

Bij 170 Watt per m²: $1,6 * 170W = 272$ Watt per paneel

Bij 250 Watt per m²: $1,6 * 200W = 400$ Watt per paneel

Een PV-systeem in Nederland produceert ongeveer 850 - 900 vollast uren per jaar (aan de kust wordt 1.000 uur wel gehaald)⁸. Een paneel levert per jaar dus:

$272 \text{ Watt} * 900 \text{ uur} = 245 \text{ kWh} = 882 \text{ MJ}$

$400 \text{ Watt} * 900 \text{ uur} = 360 \text{ kWh} = 1296 \text{ MJ}$

Om het verbruik van een huishouden (3400 kWh per jaar) te dekken zijn ca. 9 - 14 panelen voldoende.

De systemen worden vaak op daken gebouwd. De 7 miljoen Nederlandse woningen hebben samen een dakoppervlakte van circa 165.000.000 m² of 16.500 hectare of 165 km², naast ongeveer 100 km² daken van bedrijven en instellingen. Niet alle daken zijn echter geschikt.

PV-systemen gericht op het zuiden met een goede hellingshoek leveren de meeste energie op. Omdat bij deze opstelling systemen niet dicht bij elkaar kunnen staan vanwege schaduwvorming, wordt ook wel gekozen voor oost-westopstelling. Bij deze opstelling is de productiepiek rond het middaguur lager, de oost georiënteerde panelen vangen meer ochtend zon en de west georiënteerde systemen vangen meer avondzon.

Om een grote productie te halen, is plaatsing op percelen van meerdere hectares in het vrije veld nodig.

PV-stroom is duurder dan de vrije marktprijs van stroom. PV-stroom heeft daarom nog subsidiegeld.

De Wp prijs zakt de laatste jaren vrij snel. Een compleet systeem voor particulieren kost nu inclusief montage circa €0,75 per Wp. Voor grote

⁸ Met de EU site <http://sunbird.jrc.it/pvgis/apps/pvest.php> zijn berekeningen te maken voor elke locatie in Europa.

veldinstallaties is de Wp prijs onder de 50 cent.

De vrije marktprijs van stroom ligt rond 3-4 cent per kWh, de particulier betaalt ongeveer 20 cent per kWh (vooral vanwege de belasting + BTW). De zelfgeproduceerde stroom vervangt de dure inkoop, daarmee is de investering na ongeveer 8 – 9 jaar terugverdiend. De eigen productie hoeft niet direct te worden gebruikt, het mag verrekend worden met de gebruikte hoeveelheid (dit heet salderen). De salderingsregeling wordt de komende jaren afgebouwd.

Via de regeling Verlaagd Tarief (ook wel bekend als de Postcoderoos regeling) worden de deelnemers vrijgesteld van de energiebelasting.

➤ Zonnewarmte

Een andere manier om de zonne-energie te benutten is het opvangen van de warmte met zonnecollectoren. In de zuidelijke landen van Europa zijn veel daken voorzien van een eenvoudige zonnecollector waarmee het warme tapwater van het huishouden wordt verzorgd. Ook in Nederland is een zonneboiler een zinvolle optie om de warmwatervoorziening duurzamer te maken (de Nederlandse productie is circa 1 PJ). Er zijn systemen voor het tapwater en er zijn systemen waarbij de zonnewarmte ook de centrale verwarming of de warmtepomp ondersteunt.

De systemen benutten circa 25 - 35% % van de ingestraalde energie.

Per GJ is ongeveer 0,85 m² nodig bij een vlakke-plaatcollector, of: de productie is 1,17 GJ per m² per jaar.

Een zonnewarmtesysteem van 2,5 m² vlakkeplaatcollector (= 3 GJ) en 100 liter opslagvat kost inclusief installatie en BTW ongeveer €2.800. Als vuistregel geldt dat een zonnewarmtesysteem ongeveer €950 per GJ kost. Vacuümbuiscollectoren zijn ongeveer €250 per GJ duurder. Voor de opslag van warm water kan een opslagvat geïnstalleerd worden, maar dit verhoogt de kosten.

Een opbrengst van 3 GJ vermijdt de inkoop van ongeveer 100 m³ gas. Uitgaande van een gasprijs van 70 cent is het voordeel € 70,-. Het financieel rendement is derhalve ruim 2%. In veel projecten worden subsidies toegepast om de aanschafprijs te verlagen. Gas is per GJ veel goedkoper dan stroom, dit bepaalt het terugverdienverschil met PV. Daar waar de zonnewarmte elektriciteit vervangt (bv in gasloze woningen), wordt de rekensom gunstiger.

Er zijn systemen waarin PV (elektriciteitsproductie) en warmtebenutting gecombineerd worden. Naast de eenvoudige bovenbeschreven zonneboilers zijn er systemen die de zonnewarmte met spiegels concentreren en daarmee zo'n hitte genereren dat er stoom geproduceerd wordt waarmee een generator wordt aangedreven die stroom produceert. In Spanje staan meerdere van deze systemen die meerdere hectaren groot zijn.⁹

⁹ Zie o.a. <http://www.abengoasolar.com>.

Bio Energie

Bio Energie is eigenlijk ook een vorm van energie uit de zon, het is de energie die opgeslagen is in biomassa. Denk aan het verbranden van hout of organisch afval, het vergisten van mest, oogstresten of bermgras, het gebruiken van biodiesel of ethanol als transportbrandstof of het vergassen van hout. De gebruikte biomassa bevat de energie die is opgeslagen tijdens het leven van het organisme.

Van de totale duurzame energieproductie (2019) was 106,3 PJ (58,5%) afkomstig uit biomassa. Daarvan werd 15,7 PJ opgewekt bij de verbranding van afval, dit bestaat voor ongeveer 50% uit biomassa. Houtstook bij particulieren was 16,3 PJ.

Omdat de aarde veel biologische productiecapaciteit heeft en de geoogste massa weer wordt aangevuld door hergroei noemen we dit duurzame of hernieuwbare grondstoffen. In de regelgeving wordt biomassa als CO₂ neutraal gezien. De wijze waarop de grondstof omgezet wordt voor de energieproductie noemen we de conversietechniek.

Hieronder worden twee conversietechnieken toegelicht.

- **Verbranden**

De oermens hield zich al in leven met het verbranden van biomassa. Veel van wat de natuur produceert is brandbaar en heeft een hoge energiewaarde.

Tabel 10: Energiewaarde van diverse brandstoffen

	kWh	MJ	
Olie	10 per liter	36 per liter	
Aardgas	8,6 per m ³	31 per m ³	
Hout: geperste pellets of briketten	4,9 per kg	17,6 per kg	
Droog hout (25% vocht)	3,88 per kg	14 kJ per kg	10 GJ/m ³ massief
Hout (30% vocht)	3,5 per kg	12,6 kJ per kg	9 GJ/ m ³ massief
Turf	4,44 per kg	16 kJ per kg	

Hout is een belangrijke alternatieve brandstof. Het laat zich makkelijk bewerken en bewaren en heeft een hoge energiewaarde, 2,5-3 kg hout vervangt 1 m³ aardgas. Hout is in veel landen de belangrijkste brandstof voor ruimteverwarming. Dit geldt voor de derdewereldlanden, maar ook in landen als Duitsland, Zweden of Oostenrijk is hout een belangrijke energiebron. Ook in Nederland is hout nooit weggeweest. Volgens recent onderzoek zijn er circa 1 miljoen houtkachels en openhaarden in particuliere woningen¹⁰ die samen circa

¹⁰ Statusoverzicht Houtkachels in Nederland, Ir. J. Koppejan (Procede Biomass BV) Enschede,

16 PJ aan energie leveren. De moderne houtstook met geavanceerde ketels en warmtedistributie groeit sterk. Vooral de middelgrote installaties van 250 kW tot 1,5 MW kunnen goed concurreren met aardgas.

De houtproductie in Nederland is relatief gering. Ons land heeft een van de laagste bospercentages van Europa. Toch is het Nederlandse bosareaal sterk gegroeid, nadat in de 18^e eeuw het bos bijna was verdwenen.

Circa 30% van het landoppervlak van de wereld (145 miljoen km²) is bebost (40 miljoen km² of 4 miljard hectare). Europa heeft het grootste bosgebied (1 miljard hectare), 80% daarvan ligt in Rusland en de voormalige Russische staten.

Gemiddeld staat er in het Nederlandse bos nu zo'n 200 m³ hout per hectare. Jaarlijks groeit dit aan met circa 9 m³. Hiervan wordt 60% geoogst.

(Gemeentelijk) snoeiafval kan een zinvolle bestemming krijgen in een lokale verbranding, bijvoorbeeld bij een zwembad.

Voorbeeld: een verwarmd openluchtbad verbrandt in het zomerseizoen circa 30.000 m³ gas, dat kost €21.000. Het gas kan vervangen worden door 3 kg snoeihout (12 GJ per kg) per m³ gas (31 GJ per m³), dus ongeveer 100.000 kg = 100 ton. De snoeihoutsnippers kosten €15 - €25 per ton, totaal dus €1500 - €2500. Zo'n project communiceert gemakkelijk: "ons eigen hout, gesnoeid door onze eigen mensen voor ons eigen zwembad".

Verbranding leidt echter tot ernstige luchtverontreiniging. Er is veel discussie over de CO₂ neutraliteit.

- **Vergisten**

Bij vergisting zetten micro-organismen organische grondstoffen om in biogas. Dit is een mengsel van vooral CO₂ en CH₄ (methaangas). Dit gasmengsel kan gebruikt worden als brandstof voor een gasmotor. Als deze een generator aandrijft wordt er elektriciteit geproduceerd. Een kubieke meter biogas produceert circa 2,5 kWh elektriciteit. Het gas kan ook bewerkt worden tot het de aardgaskwaliteit heeft, dit "groen gas" kan dan in het gasnet worden gepompt. Gebruik als transportbrandstof is ook mogelijk.

De meeste vergisters bestaan uit een groot vat (de reactor) waar in een zuurstofarm (anaeroob) milieu de methaanproducerende bacteriën biogas produceren. Dit wordt voorafgegaan door een complex proces waarin verschillende bacteriesoorten een deel van het omzettingsproces mogelijk maken. De bacteriestammen houden zichzelf in stand mits de temperatuur, de voeding en de menging adequaat zijn.

De voeding (het substraat) kan bestaan uit organisch afval, bijvoorbeeld keukenafval, mest of landbouwproducten als maïs, suikerbieten en gras.

Doorgaans wordt gewerkt met een vloeibare massa waarin de om te zetten stoffen zijn opgenomen (circa 5% droge stofgehalte) en waarin met roerwerken de massa wordt gemengd. De verblijftijd ligt rond de 20-40 dagen, de

temperatuur rond de 37°C (mesofiel) of rond 55°C (thermofiel). Na de vergisting blijven de minder makkelijk afbreekbare delen over, dit wordt digestaat genoemd. Digestaat is een (onder strenge voorwaarden) toegelaten organische meststof met veel stikstof. De mineralen (zoals fosfaat en kalium) zijn nog volledig aanwezig.

Tabel 9: *Biogasopbrengst uit biomassa*

Substraat	Biogasproductie van het verse materiaal in m ³ per ton
Runderdrijfmest	20 - 30
Varkendrijfmest	20 - 35
Kippenmest	70 - 90
Snijmaïs	180 - 220
Bieten	180 - 220
Glycerine	600 - 700

Een hectare maïs met een opbrengst van 60 ton per ha. levert dus ongeveer 12.500 m³ biogas op. Daarmee kan ongeveer 30.000 kWh stroom gemaakt worden, dat is het stroomverbruik van 9 huishoudens. Als het biogas gezuiverd wordt naar aardgaskwaliteit, wordt dit circa 9.000 m³ aardgas. Een hectare maïs levert dus het aardgasverbruik van ongeveer 6 huishoudens (circa 1.400 m³ per huishouden).

Het vergisten van mest met (toegelaten) andere stoffen noemen we co-vergisting. Er staan in Nederland staan circa 110 co-vergistinginstallaties bij agrarische bedrijven (in Duitsland staan er 8.000).

Bij waterzuiveringen wordt het zuiveringslib vergist.

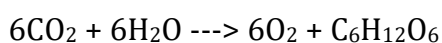
De bijdrage aan de duurzame energieproductie is:

	Productie in 2019 in PJ
Co-vergisting	5
Gas uit rioolwaterzuiveringen	2,2

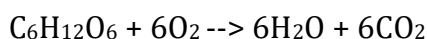
4.4 Over CO₂

CO₂ bevindt zich onze atmosfeer. Als een plant groeit, verbruikt hij water uit de bodem en CO₂ uit de lucht om suikers te vormen. Bij dit proces is de zon de energieleverancier. Daarbij komt zuurstof (O₂) vrij als bijproduct.

De reactievergelijking is:



Als de plant afsterft en wordt afgebroken verloopt het proces andersom:



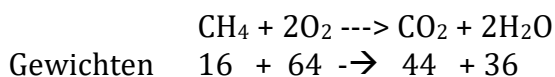
Hierbij wordt zuurstof verbruikt en komen water en CO₂ vrij. Dit proces vindt ook plaats in ons lichaam, wij ademen de lucht in, halen daaruit de zuurstof om ons voedsel te verbranden en blazen bij het uitademen de CO₂ uit die vrijkomt bij het verbranden van het voedsel. Een mens ademt ongeveer 800 gram CO₂ per dag uit. (We verbranden ongeveer 600 gram suiker per dag).

Zuurstof is, naast stikstof, ruim aanwezig in de lucht¹¹, circa 20% is zuurstof. Van CO₂ is er maar heel weinig: 0,04%. Voor zo'n lage concentratie gebruiken we de eenheid *deeltjes per miljoen* (parts per million = ppm). Het gehalte stijgt op dit moment met iets minder dan 2 ppm per jaar. Dertig jaar geleden was het nog 335 ppm en voor aanvang van de industriële revolutie was de CO₂ concentratie ongeveer 280 ppm. De CO₂ concentratie bij het meetstation in Hawai kwam in april 2013 op 400 ppm. Inmiddels wordt 415 ppm gemeten.

Dit zijn gemiddelde waarden. In de zomer leggen planten CO₂ vast en omdat het landoppervlak op het noordelijk halfrond veel groter is dan op het zuidelijk halfrond ligt het CO₂ gehalte van de atmosfeer lager wanneer het zomer is op het noordelijk halfrond. In de winter als veel plantenmateriaal wordt afgebroken, ligt het hoger. De jaarlijkse variatie als gevolg hiervan bedraagt circa 7 ppm. In tuinbouwkassen wordt het CO₂ gehalte kunstmatig verhoogd, bijvoorbeeld door het verbranden van gas, tot circa 600 ppm. Dit versterkt de groei van de planten. In slecht geventileerde ruimtes waarin veel mensen zijn, bijvoorbeeld een kantoor of schoollokaal, loopt het CO₂ gehalte snel op, 2.000 ppm is niet abnormaal in een kantoor of een klaslokaal. Bij een concentratie van 10.000 ppm treedt benauwdheid op.

Voorbeeld: Een kamer van 40 m² bevat ongeveer 100.000 liter lucht, daarin zit 0,04% of 40 liter CO₂ of 80 gram. Een persoon ademt 33 gram per uur uit. Met vijf personen in de kamer verdubbelt de hoeveelheid CO₂ dus al in een half uur.

Bij verbranding wordt elk koolstofatoom met twee zuurstofatomen verbonden uit de lucht. Dit verklaart waarom een hoeveelheid brandstof meer CO₂ produceert dan het eigen gewicht. Uitgaande van de atoommassa¹² komt bij de verbranding van 16 gram methaan (CH₄) komt 44 gram CO₂ vrij:



Aardgas bestaat voor 70% (gewicht) uit methaan, daarnaast zijn er kleine hoeveelheden andere koolwaterstoffen aanwezig die ook CO₂ leveren. Bij

¹¹ Stikstof heeft de hoogste concentratie: 78% van de lucht bestaat uit stikstof, dat is 780.000 ppm.

¹² H= 1 C= 12 O= 16
 1 mol CO₂ is: 44 gram, koolstof (C) is het 12/44 deel.
 1 mol CH₄ is: 16 gram

aardgas komt per m³ circa 1.8 kg CO₂ vrij.

Een moderne, zuinige dieselauto die 20 km of meer rijdt op 1 liter diesel, is in vergelijking met een benzineauto, een aantrekkelijke optie als de CO₂-uitstoot maatgevend is. Een nadeel van de dieselmotor is echter dat hij door de hoge temperatuur veel stikstof uit de lucht oxideert naar NO_x. De uitstoot van het schadelijke NO_x van een dieselmotor is echter veel hoger dan van een benzinemotor.

Per jaar produceren Nederlandse bedrijven en huishoudens samen circa 200 megaton (200 miljoen ton) CO₂ equivalenten door de verbranding van fossiele brandstoffen. Dit is de afgelopen 20 jaar stabiel gebleven, de beoogde daling verloopt moeizaam. Per Nederlander (toegerekend) dus 12 ton, dat is 32 kg per dag. Heel wat meer dan de 1,7 kg huisvuil die de Nederlander dagelijks produceert.

De feitelijke uitstoot per huishouden is circa 8 ton, 22 kg per dag.

Wereldwijd is de uitstoot door fossiel brandstofverbruik circa 35 – 40 miljard ton CO₂ (circa 9 – 10 miljard ton C).

Het Nederlandse aandeel is 200 miljoen / 35 miljard = 0,6%

Bij de Nederlandse stroomproductie komt 400- 500 gram CO₂ per kWh vrij. Door de stijging van fossielvrije opwekking en de vervanging van inefficiënte centrales door moderne centrales met een hoger rendement zal dat nog verder kunnen dalen. De toename van kolencentrales remde deze vermindering. Ook kernenergie verlaagt de gemiddelde uitstoot van CO₂. In de jaren '90 lag de CO₂-emissie nog boven de 700 gram per kWh.

5.1 Besparen

Dit hoofdstuk noemt enkele termen uit de wereld van energiebesparing.

Bij de overgang naar een duurzame energie-economie wordt wel uitgegaan van een driestappenbenadering die eind jaren '90 werd bedacht: de Trias Energetica, hierin is besparen de eerste stap.

5.2 Over isoleren

Warmtegeleidingscoëfficiënt (U), warmte weerstand (R), thermische geleidbaarheid (λ).

Warmte uit een gebouw gaat verloren door geleiding (conductie), door luchtstromen (convectie) of door straling. Tocht is veel voorkomend, warme lucht verdwijnt door kieren en koude lucht stroomt binnen. Door muren en ramen verdwijnt de warmte door geleiding en straling.

Bij het zoeken naar isolatiemogelijkheden in gebouwen zijn de ruimten met de hoogste temperaturen het belangrijkste. Bij verwarmde ruimtes is het temperatuurverschil tussen binnen en buiten groot, het energieverlies is daar dus ook groot.

De geleiding van warmte door muren en ramen wordt gemeten met de **U waarde** (warmtedoorgangscoefficiënt): dit is de hoeveelheid warmte (energie) die per seconde per m² en per graad temperatuurverschil (tussen binnen en buiten) verloren gaat. Energie per seconde is J/sec en dat is het vermogen (Watt).

De eenheid voor de **U waarde** is **W/m².K**

Een hoge U-waarde betekent een thermisch slecht isolerende wand, een lage U-waarde betekent een thermisch goed isolerende wand.

Het warmtetransport (of energieverlies) wordt bepaald door de warmteweerstand van de constructie (bv. de muur). De warmteweerstand is afhankelijk van de thermische geleidbaarheid en de dikte van de laag.

De warmteweerstand van een laag wordt bepaald met:

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

R is de warmteweerstand in m².K/W (dus het omgekeerde van de U waarde).

d de dikte van de laag in m

λ de thermische geleidbaarheid in W/(m.K) van het materiaal van de laag.

De thermische geleidbaarheid λ van een materiaal kan opgezocht worden in tabellen met de eigenschappen van diverse materialen.

Voorbeeld: Een buitenmuur is opgebouwd uit de volgende lagen:

Laag 1: Verdicht gewapend beton, λ = 2,38 W/m.K, dikte = 0,09 m

Laag 2: Isolatie, λ = 0,0326 W/m.K, dikte = 0,045 m

Laag 3: Licht beton, λ = 0,89 W/m.K, dikte = 0,15 m

De warmteweerstand van elke laag is dan:

$$\text{Laag 1: } R_1 = \frac{0,09}{2,38} = 0,0378$$

$$\text{Laag 2: } R_2 = \frac{0,045}{0,0326} = 1,3804$$

$$\text{Laag 3: } R_3 = \frac{0,15}{0,89} = 0,1685$$

Aan elke zijde van de wand blijft een dun luchtlaagje plakken. De dikte en daarmee de warmteweerstand van dit luchtlaagje is afhankelijk van de omstandigheden. Voor de buitenzijde van een wand (buitenzijde buitenmuur) wordt als rekenwaarde de waarde 0,04 m².K/W gebruikt en voor de binnenzijde van een wand een waarde van 0,13 m².K/W.

Hiermee kunnen we de totale warmteweerstand van de constructie (R_c) berekenen.

$$R_c = 0,13 + 0,0378 + 1,3804 + 0,1685 + 0,04 = 1,757$$

Merk op dat de isolatielaag (1,3804) voor bijna 80% bepalend is voor de R_c waarde.

De U-waarde in **W/m².K** van de muur is dan:

$$U = \frac{1}{1,757} = 0,57$$

Wat betekent dit? Per m² muur gaat 0,57 J per seconde verloren voor elke graad temperatuurverschil. Een buitenmuur in een woonkamer van 30 m² verliest op een koude dag (15 graden verschil tussen binnen en buiten) per dag:

$$0,57 * 30 * 15 * 3600 * 24 = 22 \text{ MJ, dat is } 0,7 \text{ m}^3 \text{ gas per dag.}$$

Per 1 januari 2015 gelden de volgende minimale R_c -waarden voor nieuwbouw:

- Vloeren $R_c \geq 3,5 \text{ m}^2 \text{ K/W}$
- Gevels $R_c \geq 4,5 \text{ m}^2 \text{ K/W}$
- Daken $R_c \geq 6,0 \text{ m}^2 \text{ K/W}$

Vanaf 2021 wordt de nieuwe BENG norm gehanteerd, deze heeft een andere grondslag dan de EPC methode.

Voor onze voorbeeldmuur met de R_c van 1,757 moet de isolatielaag drie keer zo dik zijn om deze norm te halen. Het dikker maken van de andere onderdelen levert weinig op.

Vensters zijn zwakke plekken. Modern dubbelglas heeft een lagere U waarde (= hogere R waarde).

- Enkel glas: 5,7 W/m²K (R= 0,175)
- Dubbel glas: 3 W/m²K (afhankelijk van spouw en dikte glasplaten)
- HR glas: 1,6 - 2,0 W/m²K
- HR+ glas: 1,2 - 1,6 W/m²K
- HR++ glas: minder dan 1,2 W/m²K (R= 0,83)

Isoleren vermindert niet alleen het energieverbruik en de kosten, maar verhoogt ook het wooncomfort. Het ventileren van de woonruimte mag echter niet vergeten worden. De norm is 0,9 liter per seconde per m² vloer. Dus voor een kamer van 40 m² moet per uur worden geventileerd: $0,9 * 40 * 3600 = 130 \text{ m}^3$. Een standaard Warmte Terugwinningventilatie (WTW) voor een woning haalt op stand 1 circa 120 m³ per uur.

=====

maart, 2021
Frans Debets
Debets bv

fransdebets@debetsbv.nl en rekenenmetenergie.substack.com