

Duurzame energietechniek

Vierde druk

ir. Joop Ouwehand
ir. Trynke Papa
dr. ir. Bram Entrop
drs. Jan de Geus

Boom

Woord vooraf

Duurzame energie staat in de aandacht. Niet verwonderlijk als we bedenken dat er grote risico's kleven aan onze huidige energievoorziening gebaseerd op fossiele brandstoffen zoals aardolie, aardgas en steenkool. Bij de verbranding van fossiele brandstoffen komt CO₂ in de atmosfeer en dat is de belangrijkste van de zogeheten broeikasgassen die tot klimaatverandering kunnen leiden. Ook raken fossiele brandstoffen ooit uitgeput. Regio's zoals Noord-Amerika en Europa raken steeds meer afhankelijk van import, met alle politieke risico's van dien.

Duurzame energiebronnen zijn energiebronnen die niet uitputbaar zijn. De bekendste zijn waterkracht, bio-energie, windenergie en zonne-energie. Door duurzame energiebronnen te gebruiken wordt de emissie van broeikasgassen, die het gevolg is van het gebruik van fossiele energiebronnen, teruggedrongen. De mogelijkheden ervoor zijn over de hele wereld ongeveer in gelijke mate aanwezig. Het beleid van veel landen en zeker ook het Europees beleid is erop gericht het benutten van duurzame energiebronnen de komende decennia sterk uit te breiden. Veel bedrijven zien in de toepassing van duurzame energie kansen voor nieuwe producten en diensten.

Duurzame energietechniek, eerder verschenen onder de titel *Toegepaste Energietechniek deel 2 – Duurzame energie*, behandelt de principes die aan de winning van duurzame energie ten grondslag liggen. Alle duurzame energiebronnen komen hierbij hoofdstukgewijs aan bod. Enkele belangrijke componenten in duurzame energiesystemen – energie-opslag en waterstoftechnologie – worden in aparte hoofdstukken behandeld. In ieder hoofdstuk wordt, behalve op de basisprincipes, ook ingegaan op de praktische toepassingsmogelijkheden in verschillende situaties. Rekenvoorbeelden en praktijkvoorbeelden worden gebruikt om dit toe te lichten. Aan het eind van het boek wordt aandacht besteed aan de samenhang van alle duurzame energiemaatregelen, de toekomstverwachtingen en het overheidsbeleid.

Het boek is in eerste instantie bedoeld voor studenten in het HBO. Het boek is echter ook geschikt voor andere geïnteresseerden die bijvoorbeeld in hun beroepspraktijk met duurzame energie geconfronteerd worden. Voor begrip van de meeste behandelde stof is een algemene natuurwetenschappelijke achtergrond op HAVO- of VWO-niveau voldoende. Voor sommige onderdelen – dat geldt met name voor de behandeling van de principes van zonnewarmtesystemen en warmtepompen – zal een volledig begrip alleen mogelijk zijn met enige aanvullende basiskennis op het gebied van warmte- en stromingsleer en thermodynamica.

Het boek sluit goed aan op *Toegepaste Energietechniek deel 1*, een boek dat de belangrijkste soorten energietechnische apparaten en systemen behandelt en wordt gebruikt in het HTO. Beheersing van de stof in *Toegepaste Energietechniek deel 1* is geen voorwaarde voor begrip van het nu voor u liggende boek. Wel is het zo dat beide boeken samen een compleet beeld geven van de belangrijkste technologieën die in onze energievoorziening een rol spelen.

Duurzame energie is wereldwijd in ontwikkeling. Dit boek beschouwt de perspectieven dan ook mondiaal. Het is echter geschreven voor het Nederlandse taalgebied, en waar voorbeelden worden gegeven zijn deze dan ook veelal uit Nederland of België afkomstig. Ook veel statistische gegevens en beschouwingen over energiebeleid richten zich op de Europese Unie of meer specifiek op Nederland of België.

Deze vierde druk van het boek is geheel geactualiseerd. Enkele hoofdstukken zijn uitgebreid om nieuwe ontwikkelingen op het gebied van duurzame energie te kunnen behandelen. Bovendien zijn enkele nieuwe analysevragen toegevoegd en verbeteringen aangebracht.

Joop Ouwehand is oud-docent en voormalig lid en projectleider binnen het lectoraat Duurzame Energievoorziening van Saxion Hogescholen. Trynke Papa en Jan de Geus zijn aan dit lectoraat verbonden als docent/onderzoeker. Bram Entrop is verbonden aan de faculteit Engineering Technology van de Universiteit Twente.

In memoriam Wim Gilijamse

Tot zijn overlijden begin 2012, was Wim Gilijamse lector Duurzame energie. Wim heeft veel betekend voor de ontwikkeling van duurzame energie in Nederland. Wij zijn hem vooral veel dank verschuldigd voor zijn grote bijdrage aan de totstandkoming van de uitgave *Duurzame energietechniek*.

Den Haag, januari 2017

de uitgever

Inhoud

Woord vooraf *iii*

Symbolenlijst *xiii*

Leeswijzer *xv*

1 Energie, duurzame energievoorziening en beleid 1

- 1.1 Inleiding 1
 - 1.1.1 Wat is duurzaamheid? 2
 - 1.1.2 De huidige energievoorziening 3
 - 1.1.3 Duurzame energiebronnen 5
 - 1.1.4 Duurzame energievoorziening 8
- 1.2 Technologieontwikkeling en toekomstverwachtingen 11
 - 1.2.1 Status en recente ontwikkelingen 12
 - 1.2.2 Energiescenario's en energietransitie 17
- 1.3 Beleidsdoelstellingen en beleidsinstrumenten 19
 - 1.3.1 Regulerende energiebelasting (REB) 20
 - 1.3.2 Subsidies 21
 - 1.3.3 Kyoto-mechanismen 24
 - 1.3.4 Regelgeving 25
 - 1.3.5 Ondersteuning onderzoek en demonstratie 27
 - 1.3.6 Burgerinitiatieven en lokale overheden 27
- 1.4 Opgaven 28
- 1.5 Literatuur 29

2 Zonne-energie 31

- 2.1 Inleiding 31
- 2.2 Eigenschappen van zonlicht 31
- 2.3 Energie-uitwisseling 34
- 2.4 Zonnestraling op aarde 34
 - 2.4.1 Directe zonnestraling 35
 - 2.4.2 Diffuse straling 36
- 2.5 Zonnestraling op een plat, hellend vlak 37
- 2.6 De situatie voor Nederland 41
 - 2.6.1 Zonnestraling op vlakken met verschillende oriëntatie 42
 - 2.6.2 Zonnestraling op gevels van gebouwen 43
- 2.7 Beschaduwing 44
- 2.8 Meting van zonnestraling 46
- 2.9 Opgaven 47
- 2.10 Literatuur 47

3 Passieve zonne-energie 49

- 3.1 Inleiding 49
- 3.2 Energiegebruik in gebouwen 49
 - 3.2.1 Warmtebalans 50
 - 3.2.2 Energieprestatie gebouwen 56
- 3.3 Energiewinst beglazingssystemen 58
 - 3.3.1 Toetreding zonnestraling 59
 - 3.3.2 Rendement beglazingssystemen 60
 - 3.3.3 Translucent isolatiemateriaal 61
- 3.4 Ontwerpprincipes passieve zonne-energie 62
 - 3.4.1 Directe winning 63
 - 3.4.2 Indirecte winning 64
 - 3.4.3 Oriëntatie en zonering 66
 - 3.4.4 Warmteopslag in de gebouwconstructie 66
- 3.5 Passief koelen 67
 - 3.5.1 Stedelijk klimaat 67
 - 3.5.2 Zonwering 67
 - 3.5.3 Koelen met buitenlucht 68
 - 3.5.4 Gebruik van bodemkoelte 70
- 3.6 Integraal ontwerp van PZE-gebouwen 71
 - 3.6.1 PZE-kantoorgebouw 71
 - 3.6.2 Passivhaus 72
- 3.7 Opgaven 74
- 3.8 Literatuur 75

4 Thermische benutting van zonne-energie 77

- 4.1 Inleiding 77
- 4.2 Zonnecollectoren voor warm tapwater en verwarming 79
- 4.3 Concentrerende collectoren 86
 - 4.3.1 Concentratiefactor 88
 - 4.3.2 Rendementsvergelijking vlakke en CPC-collectoren 89
- 4.4 Ontwerp van zonneboilers 91
 - 4.4.1 Ontwerpregels voor zonneboilerinstallaties 91
 - 4.4.2 Bepaling van de warmwatervraag 93
 - 4.4.3 Systeemconfiguratie en regeling van zonneboilers 95
 - 4.4.4 Collectorselectie en dimensionering 97
 - 4.4.5 Buffervaten 98
 - 4.4.6 Pompen, regeling en beveiliging van zonneboilers 102
 - 4.4.7 Systeemverliezen en systeemrendement 104
- 4.5 Energiebijdrage van een zonneboiler 108
- 4.6 Toepassingen van zonthermische systemen 109
 - 4.6.1 Zonneboiler voor warmtapwater 109
 - 4.6.2 Zonneboilersystemen voor flatgebouwen 111
 - 4.6.3 Zonnegascombi voor verwarming en warm tapwater 112
- 4.7 Koelen met zonne-energie 112
 - 4.7.1 Zonne-energie ondersteunde Desiccant Evaporative Cooling (DEC) 115
 - 4.7.2 Zonne-energie aangedreven absorptiekoelmachine 117

- 4.8 Opgaven 118
- 4.9 Literatuur 120

5 Elektriciteit uit zonne-energie 121

- 5.1 Inleiding 121
- 5.2 Fotovoltaïsche energie – principe 122
 - 5.2.1 Achtergrond 122
 - 5.2.2 Licht op materie 123
 - 5.2.3 Licht in zonnecellen, transmissie 123
 - 5.2.4 Zonnecellen 126
 - 5.2.5 Materialen 126
 - 5.2.6 Diodewerking 127
 - 5.2.7 De P/N-overgang 128
 - 5.2.8 De opbouw van een zonnecel 129
 - 5.2.9 De werking van een zonnecel 130
 - 5.2.10 Energieopbrengst 132
 - 5.2.11 Verliezen 135
 - 5.2.12 De verschillende typen zonnecellen 135
- 5.3 Fotovoltaïsche energie – zonnepanelen en -systemen 137
 - 5.3.1 Van zonnecel naar zonnepaneel 137
 - 5.3.2 Van paneel naar systeem 142
- 5.4 PV-systemen in de praktijk 149
 - 5.4.1 Installatie van PV-systemen 149
 - 5.4.2 Onderhoud 154
 - 5.4.3 Exploitatie 155
- 5.5 Kunststof zonnecellen 156
- 5.6 Opslag 160
- 5.7 Concentrated solar power 161
 - 5.7.1 De technologie 161
 - 5.7.2 Technologie 163
 - 5.7.3 Vooruitzichten 169
 - 5.7.4 Scenario's 170
- 5.8 Vooruitzichten 172
- 5.9 Opgaven 173
- 5.10 Literatuur 175

6 Windenergie 177

- 6.1 Inleiding 177
- 6.2 Windsnelheid 177
 - 6.2.1 Snelheidsprofiel 178
 - 6.2.2 Windsnelheidsverdeling 180
- 6.3 Vermogenslevering uit de wind 180
 - 6.3.1 Energie in de wind 180
 - 6.3.2 Het Betz-optimum 182
 - 6.3.3 Vermogen 184
 - 6.3.4 Opbrengst van een windturbine 185

- 6.4 De windturbine 187
 - 6.4.1 Typen turbines 187
 - 6.4.2 Werking van een windturbine 190
 - 6.4.3 Afmetingen 191
 - 6.4.4 Vermogensregeling 193
 - 6.4.5 Grote windturbines 195
 - 6.4.6 Kleine windturbines 196
 - 6.5 Windparken 201
 - 6.6 Offshore windenergie 204
 - 6.6.1 Ontwerpeisen voor offshore windturbines 205
 - 6.6.2 Fundering en installatie 206
 - 6.6.3 Netkoppeling van offshore windparken 208
 - 6.6.4 Exploitatie en onderhoud 209
 - 6.6.5 Kosten van offshore windparken vergeleken met onshore windparken 210
 - 6.6.6 Toepassingen offshore windenergie 210
 - 6.7 Lokale effecten 211
 - 6.8 Kosten 212
 - 6.9 Vooruitzichten 213
 - 6.10 Opgaven 215
 - 6.11 Literatuur 219
-

7 Waterkracht 221

- 7.1 Inleiding 221
- 7.2 Waterkracht 222
 - 7.2.1 Basisvergelijkingen 223
 - 7.2.2 Verliezen en rendementen 224
 - 7.2.3 Waterturbines 226
 - 7.2.4 Toepassingen in grootschalige waterkrachtinstallaties 232
 - 7.2.5 Kleinschalige waterkracht 236
 - 7.2.6 Waterkracht in Nederland en België 236
- 7.3 Golfenergie 239
- 7.4 Energie uit getijden 242
 - 7.4.1 Opwekken van getijdenenergie met behulp van bassins 244
 - 7.4.2 Opwekken van getijdenenergie door het benutten van de getijdenstromingen 245
- 7.5 Blauwe energie 247
 - 7.5.1 Osmotische druk, het PRO-proces 248
 - 7.5.2 Omgekeerde dialyse, het RED-proces 250
 - 7.5.3 Vergelijking PRO met RED 251
 - 7.5.4 Blauwe energie in Nederland 253
 - 7.5.5 Vooruitzichten 254
- 7.6 Aquatische biomassa 254
- 7.7 Energie uit temperatuurverschillen in de oceaan 257
 - 7.7.1 OTEC 257
 - 7.7.2 Sea Water Air Conditioning 259
 - 7.7.3 Ontziltling 260
 - 7.7.4 Toekomstperspectief 260

- 7.8 Opgaven 261
 - 7.9 Literatuur 264
-

8 Energie uit biomassa 265

- 8.1 Inleiding 265
 - 8.2 Conversie van biomassa 266
 - 8.2.1 Karakterisering van biomassa 266
 - 8.2.2 Conversiemethoden en eindproducten van de biomassaconversie 266
 - 8.2.3 Milieu en de energetische conversie van biomassa 267
 - 8.3 Eigenschappen van biomassa 268
 - 8.3.1 Classificatie van biomassa 268
 - 8.3.2 Energie-inhoud van biomassa 269
 - 8.4 Bewerking van biomassa 271
 - 8.4.1 Verkleinen van houtachtige biomassa 272
 - 8.4.2 Zeven en sorteren 272
 - 8.4.3 Verdichten 272
 - 8.4.4 Drogen van biomassa 273
 - 8.4.5 Kosten van bewerkingen 274
 - 8.5 Verbranding van biomassa 275
 - 8.5.1 Stookinrichtingen 277
 - 8.5.2 Emissies bij verbranding van biomassa 280
 - 8.6 Biomassavergassing 283
 - 8.6.1 Vergassingstheorie en vergassingsprincipes 284
 - 8.6.2 Gaskoeling en gasreiniging 287
 - 8.6.3 Gastoepassingen 288
 - 8.7 Pyrolyse van biomassa 288
 - 8.8 Anaërobe vergisting van biomassa 290
 - 8.8.1 Anaërobe vergisting 292
 - 8.8.2 Bepalende factoren voor de gasproductie 292
 - 8.8.3 Toepassing van anaërobe vergisting 294
 - 8.8.4 Uitvoeringsvormen vergistinginstallaties 294
 - 8.8.5 Nabehandeling van het biogas 296
 - 8.9 Vloeibare biobrandstoffen 296
 - 8.9.1 Productie en eigenschappen van vloeibare biobrandstoffen 297
 - 8.9.2 Milieutechnische aspecten 299
 - 8.9.3 Toepassing van vloeibare biobrandstoffen in verbrandingsmotoren 300
 - 8.10 Onderzoek en ontwikkeling 300
 - 8.11 Opgaven 302
 - 8.12 Literatuur 302
-

9 Warmtepompen 305

- 9.1 Inleiding 305
- 9.2 Warmtepompprincipes 306
 - 9.2.1 Werking van de warmtepomp 306
 - 9.2.2 Compressiewarmtepomp 308
 - 9.2.3 Thermisch aangedreven warmtepompen 309

- 9.3 Warmtefactor van warmtepompen 311
 - 9.3.1 Mechanische compressiewarmtepomp 311
 - 9.3.2 Warmtefactor van een thermisch aangedreven warmtepomp 319
 - 9.3.3 Verbruik primaire energiedragers 326
 - 9.4 Kringloopmedia voor warmtepompen 328
 - 9.4.1 Koudemiddelen voor mechanische compressiemachines 328
 - 9.4.2 Kringloopmedia voor absorptie- en diffusieapparaten 330
 - 9.4.3 Milieuaspecten van koudemiddelen 331
 - 9.5 Warmtebronnen en verwarmingssystemen 332
 - 9.5.1 Warmtebronnen 333
 - 9.5.2 Verwarmingssystemen 340
 - 9.6 Regeling en bedrijfsvoering 341
 - 9.6.1 Monovalent warmtepompsysteem 342
 - 9.6.2 Bivalent warmtepompsysteem 342
 - 9.7 Systeemuitvoeringen 344
 - 9.8 Opgaven 347
 - 9.9 Literatuur 349
-

10 Geothermische energie 351

- 10.1 Inleiding 351
 - 10.2 Potentieel van geothermische energie 352
 - 10.3 Geothermische systemen 357
 - 10.3.1 Overzicht 357
 - 10.3.2 Elektriciteit en warmte 357
 - 10.3.3 Directe stoombenutting 358
 - 10.3.4 Voorbehandeling en geothermische warmtebenutting 359
 - 10.3.5 Gesloten-kringinstallaties 360
 - 10.3.6 Geothermische WKK-koppeling 363
 - 10.3.7 Benutting voor verwarmingsdoeleinden 363
 - 10.3.8 Andere geothermische systemen 364
 - 10.4 Toepassingen in Nederland 366
 - 10.5 Milieuverontreiniging 369
 - 10.6 Vooruitzichten 370
 - 10.7 Opgaven 371
 - 10.8 Literatuur 373
-

11 Energieopslagsystemen 375

- 11.1 Inleiding 375
- 11.2 Actieve voelbare warmteopslagsystemen 377
 - 11.2.1 Kleinschalige actieve warmteopslagsystemen 377
 - 11.2.2 Grootschalige actieve warmteopslagsystemen 379
 - 11.2.3 Lucht als medium in een warmteopslagsysteem 385
 - 11.2.4 Middellange- en lange-termijnopslag 385
 - 11.2.5 Warmteopslag in de bodem 386

- 11.3 Latente warmteopslagsystemen 391
 - 11.3.1 Eigenschappen Phase Change Materials 392
 - 11.3.2 Uitvoeringsvarianten Phase Change Materials 395
 - 11.3.3 Toepassingen van latente warmteopslagsystemen 399
 - 11.4 Chemische warmteopslag 401
 - 11.5 Elektrische opslagtechnologieën 405
 - 11.5.1 Elektromagnetische opslagtechnologieën 407
 - 11.5.2 Elektromechanische opslagtechnologieën 408
 - 11.5.3 Elektrochemische opslagtechnologieën 411
 - 11.6 Implementatie van nieuwe opslagconcepten 416
 - 11.7 Opgaven 418
 - 11.8 Literatuur 419
-

12 Waterstoftechnologie 421

- 12.1 Inleiding 421
 - 12.2 Waterstofproductie 424
 - 12.2.1 Waterstofproductie uit fossiele brandstoffen 424
 - 12.2.2 Elektrolytische waterstofgeneratie 425
 - 12.2.3 Thermolyse 428
 - 12.2.4 Huidige waterstofproductie 430
 - 12.3 Opslag, transport en distributie van waterstof 430
 - 12.4 Energie uit waterstof 435
 - 12.4.1 Inleiding 435
 - 12.4.3 Verbrandingsmotoren 437
 - 12.5 Brandstofcellen 439
 - 12.5.2 Wat is een brandstofcel? 440
 - 12.5.3 Werkingsprincipe van brandstofcellen 441
 - 12.5.4 Thermodynamica van de brandstofcel 443
 - 12.5.5 Praktische uitvoering 445
 - 12.5.6 Brandstofcelsysteem 446
 - 12.5.7 Karakteristieke eigenschappen van brandstofcellen 447
 - 12.6 Vooruitzichten 449
 - 12.7 Evaluatie brandstofcellen – brandstofcellen commercieel 451
 - 12.8 Toekomstperspectieven waterstoftechnologie 453
 - 12.9 Opgaven 454
 - 12.10 Literatuur 456
-

13 Duurzame energiesystemen 459

- 13.1 Inleiding 459
- 13.2 Duurzame energie in woningen 461
- 13.3 Duurzame energie in transportsystemen 464
- 13.4 Energieneutrale wijken en bedrijventerreinen 466
- 13.5 Duurzame energie in de landbouw 469
- 13.6 Transitie naar een duurzame energievoorziening 470
 - 13.6.1 De waterstofeconomie 472
 - 13.6.2 Alternatieven voor de waterstofeconomie 473

- 13.7 Ketenrendementen 474
- 13.8 Opgaven 478
- 13.9 Literatuur 479

A Eenheden en conversiefactoren 481

B1 Eigenschappen van vlakke vloeistofgekoelde collectoren 483

- B1.1 Energieabsorptie van de vlakke collector 483
- B1.2 Thermische eigenschappen vlakke collector 485
 - B1.2.1 Spectrale absorptie en emissie van een vlakke collector 489
- B1.3 Collectorafdekking 491
- B1.4 Verliezen en rendement van vlakke collectoren 493

B2 Opbrengstberekening volgens de f-chart-methode 496

- B2.1 Dekkingsgraad f 496
- B2.2 Verandering collectoroppervlak 499
- B2.3 Verandering van de opslagcapaciteit bij gelijkblijvend collectoroppervlak 500

C Antwoorden bij de analysevragen 502

D Soorten brandstofcellen *online*

De online bijlage is beschikbaar via www.duurzameenergietechniek.nl.

Trefwoordenregister 506

Symbolenlijst

Onderstaande lijst is een weergave van de meest gebruikte symbolen. In de tekst komen meer symbolen voor, waarvan de betekenis ter plaatse wordt uitgelegd.

symbool	omschrijving	eenheid
A	oppervlakte	m^2
c_p	soortelijke warmte	$J/(kgK)$
C_p	vermogenscoëfficiënt (windturbine)	–
d	dikte	m
D	rotordiameter (windturbine)	m
E	energiehoeveelheid	J
f	dekkingsgraad zonne-energiesysteem	–
F'	efficiencyfactor zonnecollector	–
F_R	warmteopbrengstfactor zonnecollector	–
G_T	totale globale straling (zon)	W/m^2
G_{dif}	diffuse straling (zon)	W/m^2
G_{dir}	directe straling (zon)	W/m^2
G_{sc}	zonneconstante	W/m^2
h	enthalpie	J/kg
H	ingestraalde hoeveelheid energie (zon)	J/m^2
H	verval (hoogteverschil bij waterkracht)	m
H_o	stookwaarde	kJ/kg
I	stroom	A
m_n^3	normaalvolume	m^3
p	druk	Pa
P	vermogen	W
Q	warmtehoeveelheid	J
q	warmtestroom	W
q_{iw}	interne warmteproductie (gebouw)	W
q_{rv}	warmtebehoefte ruimteverwarming (gebouw)	W
q_{tr}	transmissieverlies (gebouw)	W
q_{ve}	ventilatieverlies (gebouw)	W
q_{zon}	zonnestraling (gebouw)	W
R	warmteweerstand	$(m^2K)/W$
R_c	warmteweerstandconstructie	$(m^2K)/W$
T	temperatuur	$^{\circ}C$
T_a	omgevingstemperatuur	$^{\circ}C$
T_{bi}	binnenluchttemperatuur	$^{\circ}C$
T_{bu}	buitentemperatuur	$^{\circ}C$
T_{in}	temperatuur inlaat	$^{\circ}C$
U	inwendige energie	J
U	warmtedoorgangcoëfficiënt	$W/(m^2K)$
U_L	warmteverliesfactor zonnecollector	$W/(m^2K)$
V	spanning	V

v	windsnelheid	m/s
W_c	compressiearbeid	J
ZTA	zontoetredingsfactor	–
α	absorptiecoëfficiënt	–
β	hoek met het horizontale vlak	°
δ	declinatiehoek (zon)	°
ϵ_w	warmtefactor (warmtepomp)	–
ζ_w	warmtefactor thermische warmtepomp	–
η	rendement	–
η_{pze}	rendement passieve zonne-energiesysteem	–
η_z	benuttingsfactor zonne-energie	–
λ	warmtegeleidingscoëfficiënt	W/(mK)
λ	golflengte straling	μm
λ	snellopendheid (windturbine)	–
ρ	dichtheid	kg/m^3
Φ	breedtegraad	°
Φ	warmtestroom (zonnecollector)	W of W/m^2
Φ_m	massastroom	kg/s
Φ_v	volumestroom	m^3/s
τ	transmissiecoëfficiënt	–

Leeswijzer

Dit boek behandelt de mogelijkheden om duurzame energie te benutten. Voor alle duurzame energiebronnen afzonderlijk wordt inzicht gegeven in de aard van de bron, de beschikbaarheid en de technologieën die er zijn om uit de duurzame energiebron secundaire energiedragers te produceren, zoals elektriciteit, warmte of brandstoffen.

De technologiebeschrijvingen gaan uit van beschikbare technologie, maar op terreinen die nog sterk in ontwikkeling zijn, worden ook toekomstperspectieven geschetst. Op kostenaspecten wordt beknopt ingegaan, en waar relevant ook op andere aspecten die de toepassing bepalen, zoals hinder.

Deze leeswijzer geeft per hoofdstuk aan welk niveau van voorkennis noodzakelijk is om de behandelde materie te kunnen begrijpen en toepassen. Het boek is in eerste instantie geschreven en samengesteld voor personen met een technische of fysieke HBO-opleiding of vergelijkbare kwalificatie. Veel onderwerpen zijn echter ook voor niet technisch opgeleiden te bestuderen.

Hoofdstuk 1 – Energie, duurzame energievoorziening en beleid

Dit hoofdstuk is voor iedere lezer die in het thema ‘Duurzame Energievoorziening’ is geïnteresseerd, te volgen. De inhoud gaat vooral over de vragen waarom duurzame energie, welke technieken zijn beschikbaar en hoe ondersteunt de overheid de introductie van duurzame energie beleidsmatig.

Hoofdstuk 2 – Zonne-energie

Dit hoofdstuk gaat specifiek in op wat de aard van de zonnestraling is, hoeveel daarvan op aarde aankomt en welke factoren bij de benutting van deze straling van belang zijn.

De paragrafen 2.2 tot en met 2.5 gaan over de fysische eigenschappen van zonnestraling. Om het golfkarakter van zonnestraling en warmtestraling te kunnen doorgronden, moet de lezer diepgaande kennis hebben van de fysica van deze vormen van straling.

De daaropvolgende paragrafen vereisen technisch inzicht en rekenvaardigheid.

Hoofdstuk 3 – Passieve zonne-energie

Voor de paragrafen 3.2 (warmtebalans en energieprestatie) en 3.3 (beglazingssystemen) is kennis van wis- en natuurkunde noodzakelijk. De overige paragrafen zijn met enig technisch inzicht goed te volgen voor de meer algemeen geïnteresseerde lezer.

Hoofdstuk 4 – Thermische benutting van zonne-energie

De paragrafen 4.1 tot en met 4.3 en bijlage B1 gaan voornamelijk over de technieken en berekeningsregels voor de winning van thermische energie en voor heet tapwaterbereiding, verwarming en koeling. Deze zijn met voldoende algebraïsche rekenvaardigheid goed te volgen.

Voor paragraaf 4.4 over het ontwerp van een zonneboiler is behalve technisch inzicht algebraïsche rekenvaardigheid vereist. Bij de overige paragrafen en de bijlagen B.1 en B.2 wordt hoofdzakelijk een beroep gedaan op technisch inzicht.

Hoofdstuk 5 – Elektriciteit uit zonne-energie

Voor de meeste niet-technische lezers is dit hoofdstuk voor een flink deel goed te volgen. Voor de paragraaf 5.2 is een technische of natuurkundige achtergrond nodig. Als deze paragraaf wordt overgeslagen of globaal bestudeerd, is de rest van het hoofdstuk nog steeds te volgen.

Hoofdstuk 6 – Windenergie

Dit hoofdstuk is ook voor de niet-technische lezer goed te begrijpen. Paragrafen die mogelijk minder interessant zijn voor globaal geïnteresseerden zijn paragraaf 6.3.1 over de hoeveelheid energie in wind, paragraaf 6.3.2 over het Betz-optimum en paragraaf 6.4.4 over windturbines. Als deze paragrafen worden overgeslagen is de rest nog te volgen.

Hoofdstuk 7 – Waterkracht

Paragrafen die mogelijk minder interessant zijn voor globaal geïnteresseerden zijn de beschrijvingen van de diverse turbines in paragraaf 7.2.3 en de uitleg van de werking van het PRO en het RED-proces (blauwe energie) in de paragrafen 7.8.2 en 7.8.3. Als deze paragrafen worden overgeslagen, is de rest van het hoofdstuk nog goed te volgen voor de niet-technische lezer.

Hoofdstuk 8 – Energie uit biomassa

Dit hoofdstuk gaat over wat onder biomassa wordt verstaan, hoe deze geschikt gemaakt wordt voor de energetische conversie (verbranding, vergassing, gasbereiding en vloeibare brandstoffen). Dit hoofdstuk kan door elke geïnteresseerde lezer worden gevolgd en het biedt oriëntatie in het brede veld van de energetische benutting van biomassa.

Hoofdstuk 9 – Warmtepompen

Om het principe van een warmtepomp (de paragrafen 9.2 en 9.3) goed te begrijpen, is diepgaande kennis vereist van de thermodynamica. De overige paragrafen, over de media voor een warmtepomp en over de ontwerp kant van de warmtepompsystemen, zijn voor elke bestudeerder van de materie goed te volgen.

Hoofdstuk 10 – Geothermische energie

Voor de meeste niet-technische lezers is dit hoofdstuk voor een flink deel goed te volgen. Voor paragraaf 10.3.5 over gesloten kringinstallaties is een technische of natuurkundige achtergrond noodzakelijk.

Hoofdstuk 11 – Energieopslagsystemen

Voor de meeste niet-technische lezers is dit hoofdstuk goed te volgen.

Hoofdstuk 12 – Waterstoftechnologie

Voor de meeste niet-technische lezers is dit hoofdstuk voor een flink deel goed te volgen. Paragrafen die een technische of natuurkundige achtergrond nodig hebben, zijn 5.3.1 tot en met 5.3.8. Als deze paragrafen worden overgeslagen of globaal bestudeerd, is de rest nog steeds te volgen.

Hoofdstuk 13 – Duurzame energiesystemen

Dit hoofdstuk over duurzame energiesystemen – van woning tot de energievoorziening van onze gehele samenleving – is voor de aandachtige lezer goed te volgen.

1 Energie, duurzame energievoorziening en beleid

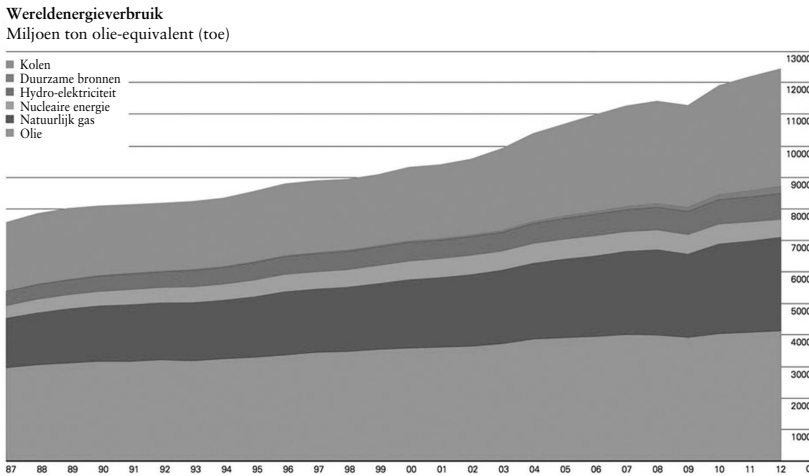
1.1 Inleiding

Zonder energie staat alles stil. Dit geldt om te beginnen voor het leven zelf. Al het plantaardig en dierlijk leven is afhankelijk van het invangen van zonne-energie. Dit invangen gaat direct – in het geval van planten door middel van fotosynthese – of indirect – in het geval van dieren die planten of andere dieren eten. In dit biologische opzicht functioneert de mens niet anders dan andere dierlijke levensvormen. Wel anders is dat de mens er door technologieontwikkeling in is geslaagd steeds grotere hoeveelheden energie voor zich te laten werken, om in steeds meer en steeds complexere behoeften te voorzien. De ontdekking van het vuur kan als eerste stap worden gezien. Plantaardig materiaal bleek niet alleen als voedsel te kunnen dienen, maar het bleek ook verbrand te kunnen worden. Door het verbranden van met name hout kon men zich warmen en voedsel beter verteerbaar maken. Tot ongeveer 150 jaar geleden was het verbranden van hout de belangrijkste vorm van energieconversie.

De volgende grote stap in energietechnologie hangt samen met de industriële revolutie. De mechanisatie van productieprocessen kon alleen tot stand komen dankzij een bron van mechanische arbeid die de spierkracht van mens en dier ver te boven ging. Deze bron was de omzetting van warmte in mechanische arbeid, en de eerste technologie die dit kon verwezenlijken was de stoommachine. Maar de behoefte aan brandstof verveelvoudigde nu en er moest worden gezocht naar een nieuwe energiebron. Na de stoommachine heeft de energietechnologie zich stormachtig ontwikkeld. Ten behoeve van transport en aandrijving van machines werden diesel- en benzinemotoren ontwikkeld. De generator zorgde voor omzetting van mechanische arbeid in elektriciteit, waardoor een heel nieuwe reeks van processen van energie kon worden voorzien. Kachels en verwarmingsketels bleken meer comfort te kunnen bieden dan het houtvuur, en waren ook gewenst gezien de milieuschadelijke gevolgen van houtvuren in dichtbevolkte gebieden. Verbranding was de enige manier om energie vrij te maken uit brandstoffen. De behoefte aan brandstoffen nam dus steeds verder toe. Naast steenkool werden in toenemende mate ook aardolie en aardgas ingezet (zie figuur 1.1). Steenkool, aardolie en aardgas zijn zogeheten fossiele energiebronnen: zonne-energie die honderden miljoenen jaren geleden werd vastgelegd in de vorm van koolwaterstoffen in plantaardig en dierlijk materiaal.

Deze ontwikkelingen hebben ertoe geleid dat onze maatschappij voor een groot deel afhankelijk is van deze fossiele brandstoffen. In de EU draaide de energievoorziening in 2014 voor ruim 75% op fossiele brandstoffen. In Nederland en België waren deze percentages in 2015 respectievelijk 95% en 91%. Olie blijft 's werelds belangrijkste brandstof – in 2013 30,9% van het wereldenergieverbruik. Olie heeft nu dertien jaar

achter elkaar aan marktaandeel verloren. Het aandeel van duurzame energiebronnen steeg in 2013 tot 13,4% in het wereldenergieverbruik.¹



FIGUUR 1.1

Wereldenergieverbruik tot 2012. Het verbruik stijgt doordat opkomende economieën meer verbruiken

Energie is niet zomaar een product. Het is een levensvoorwaarde voor al onze maatschappelijke processen. Daarom is het ook zo'n groot probleem dat onze huidige energievoorziening – bijna geheel gebaseerd op het verbranden van fossiele brandstoffen – niet duurzaam is. Om dit in te zien definiëren we in deze paragraaf 1.1 wat we eigenlijk onder duurzaamheid verstaan, waarom onze huidige energievoorziening niet duurzaam is en wat duurzame energie is. In paragraaf 1.2 gaan we in op de toekomstverwachtingen en technologie-ontwikkeling, paragraaf 1.3 gaat over het beleid in de wereld, het beleid binnen de Europese Unie en het nationale beleid van Nederland en België voor de verduurzaming van de energievoorziening. Tot slot volgt er in paragraaf 1.4 een kort overzicht van de hoofdstukken waaruit dit boek bestaat. Hoofdstuk 1 eindigt met kennisvragen in paragraaf 1.5.

1.1.1 Wat is duurzaamheid?

Onder duurzaam verstaan we in het algemeen iets dat lang meegaat. Zo spreken we van duurzame gebruiksgoederen en dan bedoelen we apparaten zoals koelkasten en wasmachines. Zo kan een duurzame samenleving worden gezien als een samenleving die lang meegaat. Onze huidige samenleving kan niet duurzaam genoemd worden vanwege de grote roofofbouw die we plegen op het milieu, maar ook bijvoorbeeld vanwege de ongelijke welvaartsverdeling in de wereld. Om nu te zeggen dat we streven naar een duurzame samenleving kan wel wat verwarring opleveren. Het lijkt dan namelijk alsof we ons een ideale wereld kunnen voorstellen waarin alle problemen

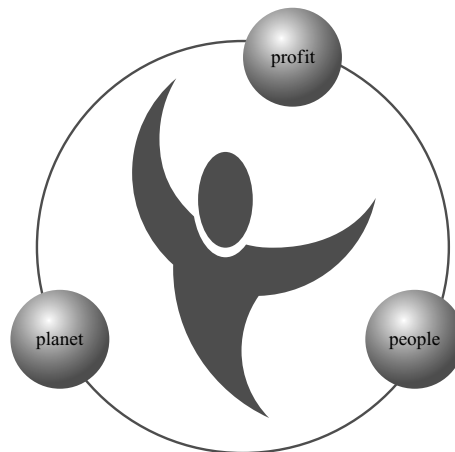
1. Verbruik van energie is volgens de eerste hoofdwet van de Thermodynamica natuurkundig beschouwd niet mogelijk. In veel officiële bronnen spreekt men echter wel over energieverbruik. Het gaat daarbij om het verbruik van fossiele energiebronnen.

opgelost zijn. Om te benadrukken dat er in de samenleving voortdurend veranderingen zullen plaatsvinden, spreken we liever van een ‘duurzame ontwikkeling’.

Het begrip duurzame ontwikkeling is geïntroduceerd in het in 1987 door de World Commission on Environment and Development uitgebrachte rapport *Our Common Future*. Het is daar gedefinieerd als een ontwikkeling waarbij de behoeften van de huidige generatie worden bevredigd zonder de mogelijkheden weg te nemen dat volgende generaties hun behoeften kunnen bevredigen.

Zo kan een duurzame samenleving worden gezien als een samenleving die zich volgens deze definitie duurzaam ontwikkelt. Onze samenleving kan niet duurzaam genoemd worden vanwege de grote roofbouw die we plegen op onze natuurlijke voorraden (resources) en de – daarmee samenhangende – aantasting van het milieu. Daarnaast worden deze natuurlijke voorraden zeer ongelijk geconsumeerd.

In de meest brede uitwerking van het begrip duurzame ontwikkeling wordt deze ‘generatietoets’ toegepast op zowel ecologische, sociaal-culturele als economische ontwikkeling. Duurzaamheid in ecologische zin betekent beperking van de belasting van ons milieu en het behoud van biodiversiteit. Mensen moeten kunnen leven in een gezonde en veilige leefomgeving, te midden van een vitale natuur, en zonder aantasting van de wereldwijde biodiversiteit of de uitputting van natuurlijke hulpbronnen. Maar duurzaamheid in brede zin is meer dan alleen milieu. Het betekent ook dat armoede, honger en achterstanden in opleidingsniveau worden aangepakt. In grote delen van de wereld bestaan op deze punten grote ontwikkelingsachterstanden. Het aanpakken van deze ongelijkheden in sociaal-culturele en economische zin past in een bredere opvatting van duurzame ontwikkeling. In deze brede opvatting van duurzaamheid wordt wel gesproken van de drie P’s: people (het sociaal-culturele aspect), planet (het ecologische aspect) en profit (het economische aspect).



FIGUUR 1.2
People, planet, profit
– de brede opvatting
van duurzaamheid

1.1.2 De huidige energievoorziening

Of we nu een brede of een smalle duurzaamheidsdefinitie hanteren, de wijze waarop wij thans in onze energiebehoefte voorzien kan niet als duurzaam worden aange-merkt. Aan het gebruik van fossiele brandstoffen zijn grote risico's verbonden die

zich deels pas op langere termijn manifesteren en daardoor volgende generaties zullen treffen.

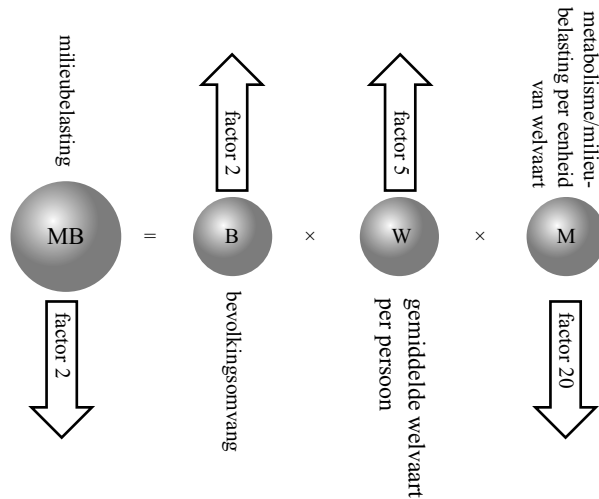
- *Bij de verbranding van fossiele brandstoffen komen afvalproducten vrij.* De belangrijkste stoffen die in de atmosfeer terechtkomen, zijn stikstofoxiden (NO_x), zwaveldioxide (SO_2) en kooldioxide (CO_2). Mogelijke gevolgen van de emissies van NO_x en SO_2 zijn gezondheidsschade en verzuring. Deze emissies kunnen door technische maatregelen worden voorkomen. Maar dat geldt niet voor de emissie van CO_2 die immers onlosmakelijk verbonden is met het verbranden van koolstofhoudende brandstof. CO_2 , in kwantitatieve zin, is verreweg de belangrijkste van de zogeheten broeikasgassen die tot klimaatverandering kunnen leiden. De risico's van klimaatverandering worden breed onderkend en om deze risico's te verminderen, heeft een groot aantal landen waaronder Nederland en België zich verplicht tot een reductie van broeikasgassen in het kader van het zogeheten Kyoto-protocol. Daarnaast heeft de EU aan alle lidstaten het zogenaamde 20/20/20-beleid voorgeschreven: in 2020 20% energiebesparing, 20% reductie van de uitstoot van broeikasgassen en 20% meer duurzaam opgewekte energie ten opzichte van het referentie jaar 1990. Winning van fossiele brandstoffen kan ook tot directe (milieu) schade leiden. Denk hierbij aan de recente olie lekkages bij oliewinning in de Golf van Mexico en de schade aan gebouwen en infrastructuur ten gevolge van aardbevingen in Groningen door aardgaswinning.
- *De voorraden fossiele brandstoffen zijn eindig.* Voor aardolie en aardgas worden de economisch winbare reserves geschat als toereikend voor ongeveer 50 jaar op het huidige verbruiksniveau. Met de voorraden steenkool kunnen we veel langer toe. Nieuwe vondsten en verbeterde winningsmethoden verleggen het moment van uitputting verder naar de toekomst. Toch mag worden verwacht dat de winning van met name aardolie en aardgas over enkele decennia zal afnemen.
- *De voorraden fossiele brandstoffen zijn regionaal geconcentreerd.* Het meest in het oog loopt de dominante positie van het Midden-Oosten in de levering van aardolie. De EU heeft een slechte voorraadpositie. In 2006 werd de helft van de benodigde energie geïmporteerd. In dat jaar verwachtte men de komende vijftien jaar een verdere stijging tot 70%, maar tot 2014 bleef het importpercentage vrij constant, iets boven 50%. Nu is bijvoorbeeld de winning van aardolie en aardgas in de Noordzee inmiddels over zijn hoogtepunt heen, en is daar binnen de EU geen vervanging voor. Aan deze importafhankelijkheid zijn wereldpolitieke risico's verbonden. Het beperken van deze risico's is een belangrijke doelstelling van het energiebeleid binnen de EU.

Ons gebruik van fossiele brandstoffen moet dus drastisch worden verminderd. En de problemen zijn zo groot dat het niet gaat om een procentje eraf, maar om een inderdaad zeer forse vermindering. En dat terwijl ons welvaartsniveau groeit. De omvang van de opgave komt tot uiting in het begrip 'factor 4': een halvering van ons beslag op eindige grondstoffen bij een verdubbeld welvaartsniveau maakt het noodzakelijk de efficiency waarmee we deze grondstoffen benutten met een factor 4 te verbeteren. Kijken we op wat langere termijn, dan kunnen we hier ook nog de mondiale bevolkingsontwikkeling bij betrekken en de grote inhaalslag die de nu nog minder ontwikkelde landen zouden moeten maken. Een belangrijke component van duurzame ontwikkeling op mondiaal niveau is immers dat de bevolking in veel landen zich nog aan een vaak schrijnende armoede moet ontworstelen. Zo wordt er ook wel gesproken

van verbetering van de milieubelasting per eenheid product met een 'factor 20' (zie figuur 1.3).

FIGUUR 1.3

Een halvering van de totale milieubelasting bij een verdubbeling van de wereldbevolking en een vervijfvoudiging van de welvaart maakt het nodig dat de milieubelasting per eenheid product met een factor 20 daalt



Ons gebruik van fossiele brandstoffen moet dus zeer drastisch worden verminderd. De opgave is over te schakelen op energiebronnen die niet opraken en waar geen risico's voor het klimaat aan verbonden zijn. Deze vinden we in de vorm van zogeheten duurzame energiebronnen.

1.1.3 Duurzame energiebronnen

Onder duurzame energiebronnen verstaan we energiebronnen die hernieuwbaar zijn. Dit staat in contrast met fossiele energiebronnen die wel opraken. Ook splijtbaar materiaal, zoals dat in kerncentrales wordt gebruikt, is eindig en valt dus niet onder de duurzame energiebronnen. Figuur 1.4 geeft een overzicht van de hernieuwbare energiebronnen die op aarde beschikbaar zijn.

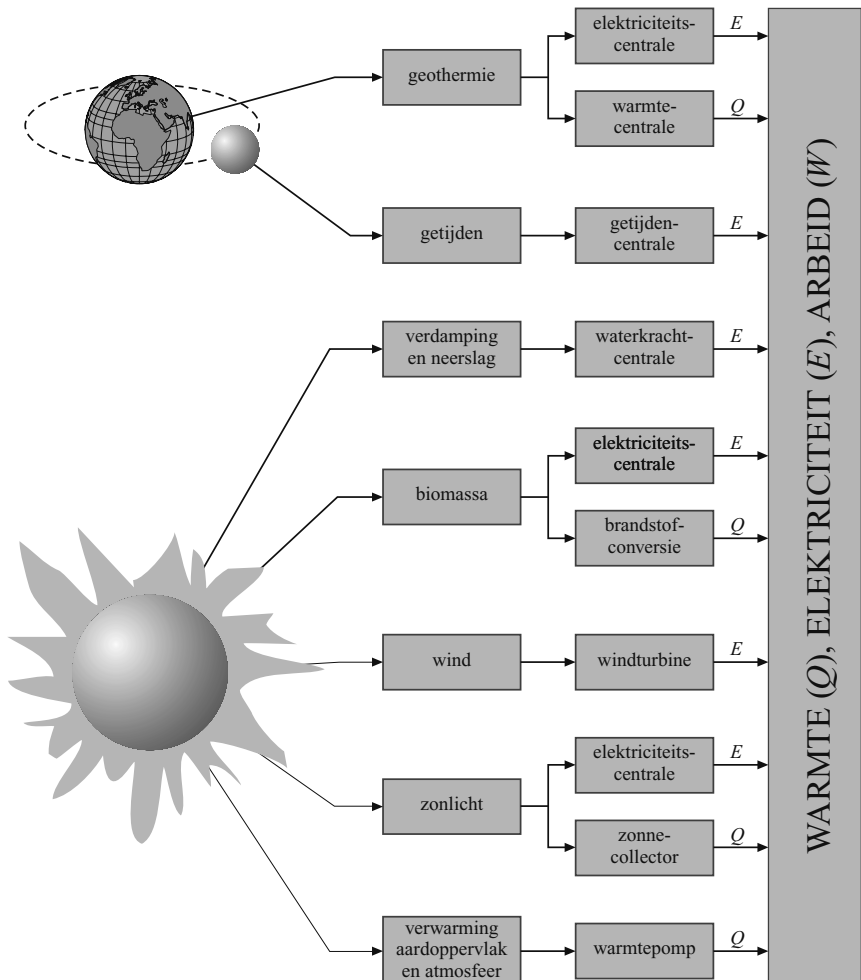
Mogelijkheden voor de benutting van deze duurzame bronnen worden hierna kort toegelicht en in de navolgende hoofdstukken beschreven.

Drijvende kracht achter de meeste duurzame energiebronnen is de zonnestraling die de aarde bereikt. Directe benutting van deze zonnestraling noemen we zonne-energie.

Het benutten van energie uit wind is mogelijk dankzij drukverschillen in de atmosfeer, die echter ook weer hun oorsprong hebben in zonnestraling die in de atmosfeer en aan het aardoppervlak is geabsorbeerd.

Bio-energie is het benutten van de in de vorm van organische verbindingen in planten en dieren opgeslagen energie – de zogeheten biomassa – die zijn oorsprong vindt in fotosynthese en dus ook in zonnestraling.

Waterkracht is het benutten van de energie in vallend of stromend water, en daarbij is de oorsprong de door de zon aangedreven cyclus van verdamping en neerslag.



FIGUUR 1.4

Zonne-energie is de oorsprong van de meeste duurzame energiebronnen

Ook wordt door de zon onze omgeving opgewarmd en kunnen we door middel van warmtepompen deze lage-temperatuurwarmte – in bijvoorbeeld bodem of buitenlucht – benutten voor verwarmingsdoeleinden.

Eveneens duurzaam is het benutten van warmte uit de bodem, dit wordt geothermische energie genoemd. We moeten daarbij onderscheid maken tussen warmte die uit de ondiepe bodem en warmte die uit de diepe bodem wordt onttrokken.

Warmte die in de ondiepe bodem (10 – 150 meter) is opgeslagen en daaraan onttrokken kan worden is in feite opgeslagen zonne-energie (vooral in de zomer). Daarnaast wordt in de winter aan de ondiepe bodem onttrokken door uitstraling en afkoeling

door convectie. De temperatuur is op ca. 10 meter diepte het gehele jaar constant 10 tot 12 °C. In de winter kan de bodem daarom worden gebruikt om warmte te genereren met een warmtepomp (zie hoofdstuk 9), in de zomer om koude te genereren op ca. 10-12 °C. Men onderscheidt open en gesloten bodemsystemen, die meestal WKO (Warmte-Koude-Opslagsysteem) worden genoemd.

Aan de diepe bodem (vanaf ca. 1000 meter) kan warmte worden onttrokken met een hoger temperatuurniveau. Op ca. 2000 meter bedraagt de temperatuur 90 °C. Dit wordt aardwarmte genoemd. Aardwarmte komt voor een relatief gering deel (30 procent) voort uit de restwarmte van de tijd van het ontstaan van de aarde (accretie), voor een groter deel (70 procent) uit radioactieve vervalprocessen, die in de aardkorst al vele miljoenen jaren voortdurend warmte hebben opgewekt en dit vandaag nog steeds doen.

Verder hebben we nog de mogelijkheid om energie uit getijdewebewegingen te halen. Hiervan is de oorsprong ook niet in de zon gelegen, maar in de beweging van de maan om de aarde.

Blue energy is het benutten van de energie die wordt gewonnen uit het verschil in zoutconcentratie tussen zoutwater in de zee en zoetwater van rivieren.

De oorsprong van energie – en dus ook duurzame energie – is dus in alle gevallen kernenergie: de zon is een grote kernfusiereactor, in de diepe aarde zorgen radioactieve vervalprocessen (atoomsplitsing) voor het genereren van warmte.

In plaats van over duurzame energiebronnen spreken we ook wel over ‘blijvende energiebronnen’ of ‘hernieuwbare energiebronnen’. De laatste benaming komt ook overeen met de in de Engelstalige literatuur gebruikte term ‘renewable energy’ en de in het Duits gebruikte term ‘erneuerbare Energie’. Zonne-energie is ook duurzaam in die zin dat onze zon volgens astronomische berekeningen nog ca. 4,3 miljard jaar actief zal blijven. Het is waarschijnlijk dat de mensheid dan allang is uitgestorven.

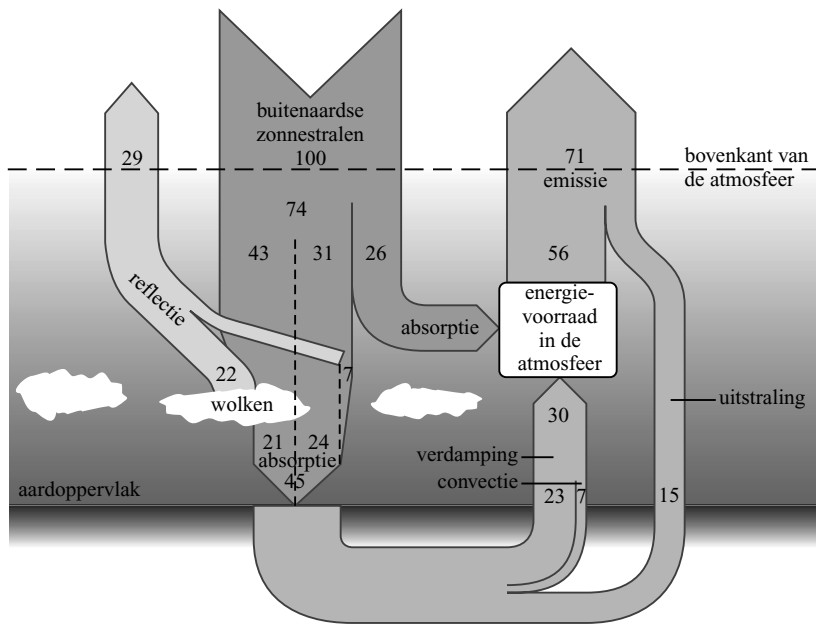
Met het overschakelen op duurzame energiebronnen worden niet alleen de problemen van uitputting en importafhankelijkheid aangepakt. Ook wordt de emissie van CO₂ erdoor voorkomen en daarmee worden de risico's van klimaatverandering teruggebracht, waardoor de bijdrage aan de klimaatverandering afneemt. Bij het gebruik van bio-energie komt weliswaar CO₂ vrij, maar dit is CO₂ die ook aan de atmosfeer is onttrokken zodat er per saldo geen extra CO₂ in de atmosfeer terecht komt.

Het potentieel aan zonne-energie op aarde is enorm. De buitenzijde van de atmosfeer ontvangt gemiddeld 1370 watt aan zonnestraling per m². Dit komt neer op een jaarlijkse energiehoeveelheid van $5,6 \cdot 10^{24}$ J/jaar – meer dan 10 000 maal de mondiale energiebehoefte. Hiervan reflecteert 29% in de atmosfeer, 26% wordt geabsorbeerd en 45% bereikt het aardoppervlak. Figuur 1.5 laat zien hoe via verdamping, convectie en warmtestraling vanaf het aardoppervlak uiteindelijk alle energie weer als warmtestraling in de ruimte verdwijnt.

Is kernenergie op aarde ook duurzaam?

Er gaan wel geluiden op om ook in kerncentrales met uranium opgewekte energie tot de duurzame energie te rekenen. Bij het gebruik van kernenergie komen immers geen broeikasgassen vrij, en de voorraden splijtbaar materiaal zijn groot. En op kosmische schaal - met de zon als voorbeeld - is kernenergie 'normaal'. Helaas zullen we bij grootschalig gebruik van kernenergie ook tegen de eindigheid van deze voorraden aanlopen. De tijdschaal hiervoor is vele ordegroottes lager dan de berekende actieve periode van de zon. Ook zijn er risico's aan het gebruik van kernenergie verbonden. Het geproduceerde radioactief afval blijft voor lange tijd gevaarlijk - en dan hebben we het over tienduizenden jaren.

Splijtbaar materiaal kan bovendien voor niet-veedzame doeleinden worden gebruikt. Het hanteren van deze risico's vraagt om een stabiele samenleving en een stabiele internationale rechtsorde. Aan deze voorwaarden lijkt op dit moment niet voldaan. Kennelijk is kernenergie op kosmische schaal mogelijk - daaraan dankt de zon zijn functie - en levert kernenergie op 'menselijke' schaal nogal wat problemen op. Zonder de illusie te hebben dat de discussie over nut en noodzaak van kernenergie hiermee volledig is behandeld zullen we de gangbare terminologie blijven hanteren en kernenergie niet onder de duurzame energiebronnen rekenen.



FIGUUR 1.5
Energiestromen in de
aardatmosfeer

1.1.4 Duurzame energievoorziening

Het potentieel van alle duurzame energiebronnen tezamen is dus zeer groot. Maar dat maakt nog niet dat het realiseren van een duurzame energievoorziening een eenvoudige zaak is. De opgave is om de ons beschikbare duurzame energiebronnen om te zetten in secundaire energiedragers (zie kader) die we als eindgebruiker kunnen benutten, en om te zorgen dat deze secundaire energiedragers beschikbaar zijn op het juiste moment, op de juiste plaats, met minimale milieueffecten, en tegen aanvaardbare kosten. Pas als dat gelukt is kunnen we spreken van een duurzame energievoorziening.

Zoals we zagen, speelt duurzame energie in onze huidige energievoorziening nog maar een kleine rol. Wel is bij vele burgers, organisaties en overheden een sterke ambitie aanwezig om de komende decennia het aandeel duurzame energie geleidelijk te laten toenemen, met als einddoel een volledig duurzame energievoorziening. We noemen de belangrijkste knelpunten en problemen die hiervoor overwonnen moeten worden.

- *Investeringskosten.* De op dit moment op wereldschaal meest gebruikte duurzame energiebronnen – waterkracht en traditionele biomassa-abnutting – zijn wat kostprijs betreft concurrerend met fossiele brandstoffen. Echter, uitbreiding van het aandeel duurzame energie in de energievoorziening vraagt om ontwikkeling en gebruik van nieuwe energieconversietechnologie zoals windenergie, zonne-energie en biobrandstoffen. Deze nieuwe technologieën zijn in veel gevallen nog duurder dan de conventionele conversietechnologieën, maar de kostprijs per opgewerkte kilowattuur voor windenergie en zon-PV zijn inmiddels zo sterk gedaald dat toepassing op grotere schaal op gang komt. Verdere kostprijzdaling is nog noodzakelijk. Zo zijn de kosten van zonnecellen in de afgelopen zeven jaar meer dan gehalveerd en er is zicht op nog verdere kostprijzdalingen. Ook recente aanbestedingen voor off-shore windparken laten zien dat technologieverbetering en schaalvergroting de concurrentiepositie van windkracht verbeterd heeft.

Energiedragers, energieconversie, energiesystemen en energiefuncties

Energie kent vele verschijningsvormen: mechanische energie, chemische energie, nucleaire energie, thermische energie, elektromagnetische energie.

Primaire energiedragers zijn vormen van energie zoals we die in de natuur aantreffen en die nog geen bewerking hebben ondergaan. Zoals we al zagen, zijn de meest gebruikte primaire energiedragers de fossiele brandstoffen zoals steenkool, aardolie en aardgas. Uit deze brandstoffen is de chemische energie te benutten door bijvoorbeeld verbranding. Ook duurzame energiebronnen zijn primaire energiedragers. Voorbeelden zijn de potentiële energie van water in een stuwmeer, de elektromagnetische energie in zonnestraling, de kinetische energie in de wind, de chemische energie in organische verbindingen van biologische aard.

Eindgebruikers van energie hebben in het algemeen behoefte aan energie in meer hanteerbare vorm, zoals elektriciteit, warmte of transport brandstoffen.

Dit noemen we *secundaire energiedragers*.

Om deze uit primaire energiedragers te maken, is *energieomzetting* of *energieconversie* nodig. De hele keten van energieconversie, energieopslag en energietransport noemen we een *energiesysteem*.

Het uiteindelijke doel van een energiesysteem is het vervullen van zogeheten *energiefuncties* bij de eindgebruikers. In woningen bijvoorbeeld zijn de belangrijkste energiefuncties: ruimteverwarming, warmwaterproductie, verlichting, ventilatie, voedselkoeling, reiniging en communicatie. In de dienstensector vinden we gelijksoortige energiefuncties. In de transportsector is de energiefunctie het verplaatsen van mensen of goederen, en deze wordt uitgedrukt in personenkilometers of tonkilometers. In de industrie zijn energiefuncties gerelateerd aan het productieproces, waarbij functies als verhitten, drogen, vernalen of verspanende bewerkingen veel energie kunnen vragen.

- *Beschikbaarheid.* Voor een deel van de duurzame energiebronnen geldt dat ze niet op elk tijdstip beschikbaar zijn. Dit geldt met name voor zonne-energie en windenergie waarbij de beschikbaarheid afhangt van het tijdstip op de dag en van de meteorologische omstandigheden. Naarmate het aandeel van deze energiebronnen in een totale energievoorziening groter wordt, wordt de noodzaak van

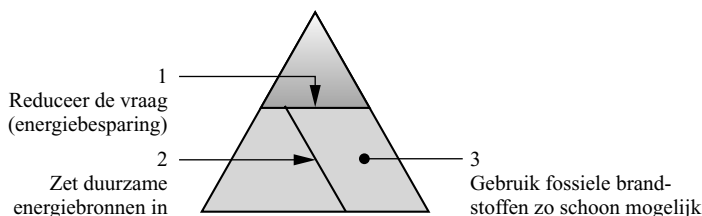
energieopslag ook steeds groter. Dit maakt de energievoorziening complexer en duurder. Omdat een duurzame energievoorziening naar haar aard extensief en decentraal is, is een andere energie-infrastructuur nodig. De bestaande top-down energie-infrastructuur, ontwikkeld in een tijd dat energieconversie centraal plaatsvond, voldoet niet langer. Deze infrastructuur moet 'slim' worden om vraag en aanbod – ook beïnvloed door grillig aanbod van wind- en zonne-energie – goed te matchen. Men spreekt in dit verband over 'Smart Grids'. Een mogelijke oplossing wordt gezien in de overschakeling op waterstof als secundaire energiedrager. Zoals we nog zullen laten zien, kan waterstof op lange termijn in zowel opslag als transport van duurzame energie een belangrijke rol gaan spelen. Ook is het mogelijk deze waterstof om te zetten in methaan (CH_4) om injectie in het aardgasnet mogelijk te maken.

- *Ruimte.* Toepassing van duurzame energie vraagt ruimte. Het ruimtebeslag moet concurreren met andere vormen van ruimtebenutting zoals landbouw, wonen, recreatie en natuur. Met name in dichtbevolkte delen van de wereld zoals in Nederland en België kan dit belemmeringen opleveren voor de ontwikkeling van duurzame energiebronnen. Zoals we nog zullen zien, zijn ook oplossingen voor dit knelpunt voorhanden in de vorm van meervoudig ruimtegebruik en het minimaliseren van hinderaspecten. Voorbeelden daarvan zijn het gebruik van daken voor het plaatsen van zonne-energie-installaties, het plaatsen van windturbines op zee, of het winnen van bio-energie uit afvalstromen.

Hoewel oplossingen voor alle knelpunten voorstelbaar zijn, zal de overschakeling op een duurzame energievoorziening een proces zijn van vele decennia. De opgave wordt groter naarmate het energiegebruik verder toeneemt. Om te voorkomen dat de opgave onuitvoerbaar wordt, is het noodzakelijk om efficiënt met energie om te gaan. Hierin is al veel bereikt in de afgelopen decennia, bijvoorbeeld: huizen en andere gebouwen worden steeds beter geïsoleerd waardoor er minder verwarmingsenergie nodig is, elektrische apparaten worden steeds efficiënter, in de basisindustrie wordt per eenheid product steeds minder energie gebruikt. Verbetering van de energie-efficiency is dus iets anders dan afzien van comfort of welvaartsgroei. Het gaat om het energie-extensiever maken van onze economie, dat wil zeggen dat we de welvaartsgroei realiseren zonder dat het energiegebruik evenredig meegroeit. We spreken ook wel van een 'ontkoppeling' van welvaartsgroei en energiegebruik.

In de overgangsfase naar een duurzame energievoorziening zullen we nog lange tijd fossiele brandstoffen blijven gebruiken. Deze periode kan worden opgerekt als we fossiele brandstoffen zo efficiënt mogelijk gebruiken. Ook hierin is al veel bereikt. Elektriciteitscentrales bijvoorbeeld worden steeds efficiënter, onder andere door benutting van de afvalwarmte van elektriciteitsproductie. Een ander voorbeeld letterlijk dicht bij huis is de zogeheten hoogrendementsverwarmingsetel, die warmte voor de verwarming van gebouwen opwekt met minimale verliezen naar de omgeving en met benutting van de warmte in de rookgassen. Sommigen zijn van mening dat het gebruik van fossiele brandstoffen zelfs duurzaam genoemd mag worden als we erin slagen de CO_2 die bij de verbranding ervan vrijkomt af te vangen en op te slaan (zie kader Schoon fossiel).

Om te benadrukken dat het overschakelen op een duurzame energievoorziening meer inhoudt dan alleen het inzetten van duurzame energiebronnen gebruiken we het begrip ‘energieladder’ of ‘trias energetica’ (zie figuur 1.6).



FIGUUR 1.6

Trias Energetica. (1) Besparen in de kern, (2) zoveel mogelijk duurzame energie inzetten en (3) de restvraag naar energie invullen met schone fossiele energie met maximaal rendement. Een benadering ‘van binnen naar buiten’ maximaliseert de effectiviteit van duurzame energie en optimaliseert de energie-economie

Schoon fossiel

Sommigen betogen dat uitputting van fossiele brandstoffen voorlopig geen probleem is. Met name van steenkool zijn de voorraden nog groot en bovendien minder regionaal geconcentreerd dan die van aardolie of aardgas. Van de geschetste risico's die aan het gebruik van fossiele brandstoffen verbonden zijn, blijft dan de emissie van CO₂ en de daaraan verbonden klimaatverandering over. Dat laatste probleem kan worden opgelost door de CO₂ die vrijkomt bij de verbranding van fossiele brandstoffen af te vangen en op te slaan. Afvangen is vooralsnog alleen voorstelbaar bij grote installaties zoals kolencentrales ofvergassingsinstallaties die

waterstof uit steenkool maken. Opslag van CO₂ zou dan kunnen gebeuren in geologische formaties zoals lege aardgasvelden of niet-winnbare kolenlagen. Deze aanpak van de energievoorziening noemen we wel *schoon fossiel*. De secundaire energiedragers die bij eindgebruikers worden ingezet zijn daarbij elektriciteit, waterstof of restwarmte. Deze veroorzaken bij gebruik geen emissie van CO₂ en worden daarom wel *klimaatneutrale energiedragers* genoemd. Om-trent de risico's van CO₂-opslag en de potentiële opslagcapaciteit van geologische formaties bestaan nog veel vragen. Ervaring is er nog nauwelijks mee opgedaan.

1.2 Technologieontwikkeling en toekomstverwachtingen

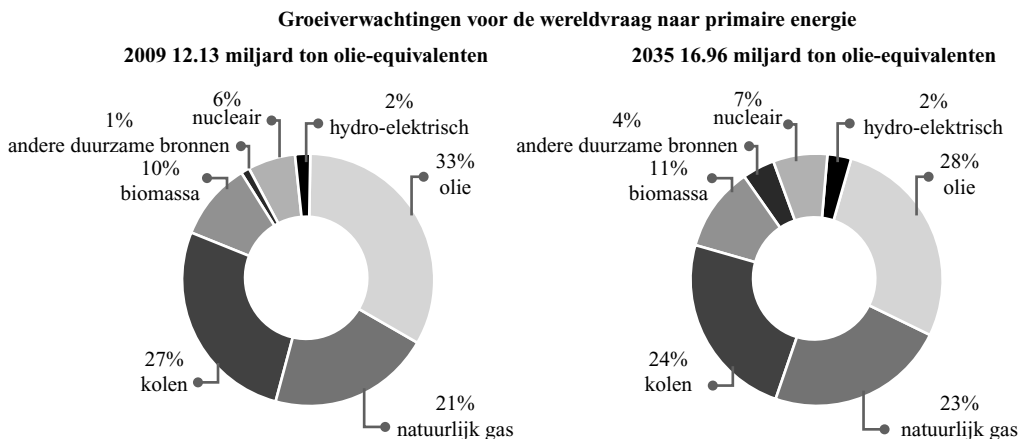
In hoofdstuk 1 hebben we laten zien dat onze huidige energievoorziening vrijwel geheel afhankelijk is van de inzet van fossiele brandstoffen: steenkool, aardolie en aardgas. Aan deze afhankelijkheid zijn grote risico's verbonden: klimaatverandering, uitputting van voorraden en politieke risico's vanwege importafhankelijkheid. Een duurzame energievoorziening houdt in dat wij zo efficiënt mogelijk omgaan met energie én overschakelen van fossiele brandstoffen op duurzame energiebronnen. In deze paragraaf wordt behandeld hoever we daar mee zijn en wat overheden doen om deze ontwikkeling te stimuleren.

Eerst geven we een overzicht van de status van de diverse duurzame energietechnologieën zoals die in dit boek worden behandeld. Daarbij wordt aangegeven hoe snel de duurzame energieproductie groeit en hoe de kostenontwikkelingen zijn. Door middel van scenario's wordt verkend in hoeverre deze ontwikkelingen kunnen worden doorgetrokken. Vervolgens wordt ingegaan op de beleidsdoelstellingen van de EU en de nationale overheden en worden de beleidsinstrumenten behandeld die kunnen worden ingezet om de beleidsdoelstellingen daadwerkelijk te behalen.

1.2.1 Status en recente ontwikkelingen

Wereldwijd werd in het jaar 2010 11% (ECN) van het primaire energiegebruik uit duurzame energiebronnen betrokken. Eind 2013 was dit percentage tot 12,6% gestegen. In figuur 1.7 is te zien welke aandelen de verschillende duurzame energiebronnen hierin hebben. De belangrijkste bijdrage komt van zogeheten 'traditionele' biomassa: hout- en mestverbranding. Verder spelen waterkracht en geothermische energie een rol. Zonne- en windenergie zien we nog nauwelijks in de statistieken terug. Deze verhoudingen ondergaan de laatste jaren een snelle verandering. In tabel 1.1 is te zien hoe de wereldwijde productie van duurzame elektriciteit in 2005 was samengesteld, maar ook hoe de groei hiervan is geweest in de jaren 2002-2005. Zonne-energie en windenergie blijken nu de grootste groeiers te zijn.

In Nederland werd in het jaar 2012 4,4% van het primaire energiegebruik uit duurzame energiebronnen betrokken. Een onderverdeling van de Nederlandse productie van duurzame energie is gegeven in figuur 1.8. De belangrijkste bijdragen komen uit bio-energie en windenergie. Bio-energie in Nederland is voornamelijk verbranding van biomassa in afvalverbrandingsinstallaties (AVI's), speciale biomassacentrales en kolencentrales. Ook in Nederland zien we een groei van de benutting van verschillende duurzame energiebronnen. Ter illustratie is in tabel 1.2 weergegeven welke groei zonnewarmte, PV, wind en warmtepompen de afgelopen jaren hebben doorge maakt.

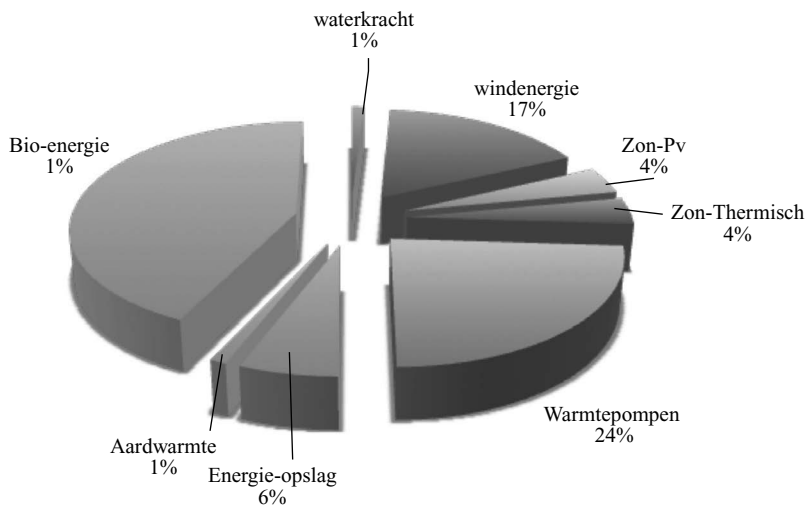


FIGUUR 1.7 Ontwikkeling van de wereld-energievraag 2011-2035 (Bron: IEA World Energy outlook, 2011)

TABEL 1.1 Mondiale productie van elektriciteit uit duurzame bronnen in 2005 en groeitempo 2002-2005 [Bronnen: World Energy Council, Survey on Energy Resources, 2007; European Photovoltaic Industry Association, 2008]. Alleen elektriciteit, dus exclusief warmteproductie uit zon, aardwarmte en biomassa en exclusief biobrandstoffen

Duurzame energiebron	Productie 2005 TWh (el)	Groei 2002-2005 %
Waterkracht	2836	8
Aardwarmte	58	15
Wind	106	82
Zon PV	6	140

De kosten van energie uit duurzame energiebronnen lopen sterk uiteen. Met name nieuwe technologieën zoals PV waren erg duur, maar het lijkt erop dat de bekende wet van Moore ook enigszins opgaat voor PV-panelen. Op dit moment is de terugverdientijd van PV-panelen ongeveer zes jaar, waardoor ze voor bestaande en redelijk geïsoleerde woningen tot de meest rendabele investeringen behoren. Ook de kostprijs van wind – met name wind op land – daalt voortdurend. Dit leidt in Duitsland, waar het percentage zon- en windenergie het hoogst is van Europa, op zeker momenten tot grote overschotten en dus tot grote prijsdalingen. Ten gevolge van de duurzame opwekking wordt de energievoorziening sterk gedecentraliseerd, terwijl verbruikers van energie tegelijkertijd ook producenten worden: prosumers. Dit heeft twee belangrijke consequenties.



FIGUUR 1.8 Geplande verdeling duurzame energie in Nederland in 2020. In 2020 moet het aandeel duurzaam opgewekte energie tot 14% zijn gestegen (ca. 314 PJ/jaar). Dit betekent ruwweg een toename met een factor 3,3 ten opzichte van het huidige niveau (4,4 %, 96 PJ/jaar, CBS)

	1990	1995	2000	2005	2010	2012	2013	2014**	2014**
Eindverbruik van hernieuwbare energie	PJ								% van totaal hernieuwbaar
Windenergie ¹	0,2	1,1	2,7	7,3	16,2	17,8	19,3	21,0	18,9
wind op land	0,2	1,1	2,7	7,3	13,5	15,0	16,7	18,3	16,5
wind op zee					2,8	2,8	2,6	2,7	2,4
Zonne-energie, totaal	0,1	0,2	0,5	0,8	1,2	1,9	2,9	3,9	3,5
zonnestroom	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,8	1,8	2,8	2,5
zonnewarmte	0,1	0,2	0,5	0,7	1,0	1,1	1,1	1,1	1,0
Aardwarmte en bodemenergie	–	0,0	0,2	0,6	2,5	3,3	4,1	4,9	4,4
Buitenluchtenergie	–	0,0	0,0	0,1	0,5	1,0	1,2	1,6	1,4
Biomassa totaal	21,5	24,2	31,4	48,4	71,6	78,9	76,7	79,1	71,4
afvalverbrandingsinstallaties	4,1	4,3	9,1	9,8	14,1	17,9	18,5	19,0	17,1
bij- en meestoken biomassa in centrales	0,0	0,0	0,8	13,1	12,9	11,3	6,9	–	–
biomassaketels bedrijven, elektriciteit	0,4	0,4	1,0	1,4	4,4	4,9	5,3	–	–
biomassaketels bedrijven, alleen warmte	1,7	1,9	2,2	4,1	5,5	5,3	5,5	7,5	6,8
biomassa bij huishoudens	13,2	13,8	14,5	16,1	17,1	17,5	17,9	18,4	16,6
stortgas	0,2	1,3	1,1	0,9	0,7	0,5	0,5	0,5	0,4
biogas uit rioolwaterzuiveringsinstallaties	1,4	1,7	1,8	1,7	1,8	1,9	2,0	2,0	1,8
biogas uit co-vergisting van mest ²				0,0	3,4	3,7	3,7	4,1	3,7
overig biogas	0,5	0,8	1,0	1,1	2,1	2,6	3,4	3,9	3,5
vloeibare biotransportbrandstoffen	0,0	0,0	0,0	0,1	9,6	13,4	12,9	15,1	13,6

¹ Inclusief normalisatieprocedure uit de EU-Richtlijn hernieuwbare energie.

² Tot en met 2004 onderdeel van overig biogas.

	1990	1995	2000	2005	2010	2012	2013	2014**	2014**
Eindverbruik van hernieuwbare energie	PJ								% van totaal her-nieuwbaar
<i>Energievorm</i>									
Elektriciteit	2,9	5,1	10,3	26,8	42,2	45,0	43,1	42,7	38,5
Warmte	19,2	20,8	24,8	30,7	40,7	45,7	49,4	54,1	48,8
Vervoer	0,0	0,0	0,0	0,1	9,6	12,5	12,1	14,1	12,7
Totaal eindverbruik hernieuwbare energie	22,1	25,9	35,1	57,6	92,4	103,3	104,6	110,9	100,0
Berekening aandeel hernieuwbare energie									
Totaal bruto energetisch eindverbruik ³	1 819	2 035	2 140	2 230	2 306	2 185	2 185	1 980	
	%								
Aandeel hernieuwbare energie in bruto energetisch eindverbruik	1,2	1,3	1,6	2,6	4,0	4,7	4,8	5,6	

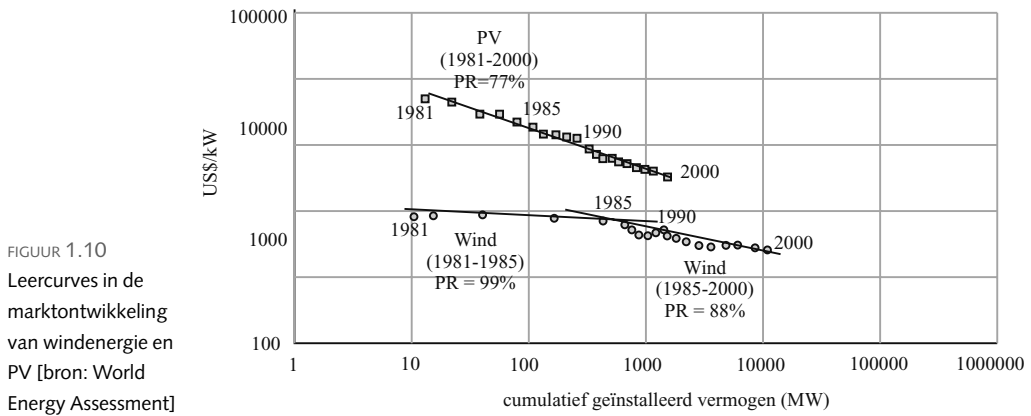
³ Berekend volgens definities uit de EU-Richtlijn hernieuwbare energie.

Daarnaast ontstaat er grote behoefte aan energie-opslag, met name aan elektriciteits-opslag. Dit is dé bottleneck van de energietransitie: elektriciteitsopslag in batterijen is duur en legt een groot beslag op schaarse materialen (o.a. Lithium). Naast 24-uurs opslag is er ook behoefte aan seizoensopslag. Deze laatste is zeer kostbaar vanwege de vereiste omvang. In veel gevallen is opslag in biomassa (bijvoorbeeld hout) een goede optie.

In landen met een groot hoogteverschil is opslag in de vorm van pompcentrales aantrekkelijk, maar de natuurlijke mogelijkheden hiervan zijn beperkt. Daarnaast is het van groot belang dat netbeperkingen – met name de cross border-capaciteiten – worden vergroot. Tussen Nederland en Noorwegen is in dit verband de Norned kabel, een HVDC (High Voltage Direct Current, 450 kV) kabel, aangelegd, waarmee de overschotten en tekorten aan (duurzame) elektriciteit verminderd kunnen worden.

In de nieuwe technologieën zit echter ook het grootste potentieel om nog tot kostenverlaging te komen. Kostenverlaging komt tot stand door leereffecten, technologieverbetering en schaalvoordelen. Van groot belang daarbij is dat het marktvolume geleidelijk toeneemt. Dat marktvolume en kostenverlaging hand in hand gaan, wordt weergegeven in de zogeheten leercurves (zie figuur 1.10). Het tempo van prijsverlaging wordt weergegeven met de zogeheten PR (Progress Ratio). Een PR van 88%

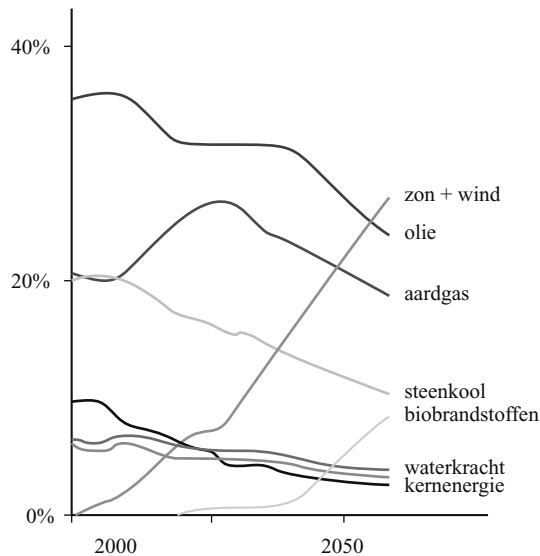
voor windelektriciteit betekent dat bij een verdubbeling van de cumulatieve geïnstalleerde capaciteit de prijs met $100 - 88 = 12\%$ daalt. Voor PV – met een PR van 77% – is dit percentage dus zelfs $100 - 77 = 23\%$. Voor biobrandstoffen gelden soortgelijke kostenontwikkelingen. Als deze trends doorzetten, zullen in de komende decenia steeds meer duurzame energie toepassingen concurrerend worden met energie uit fossiele brandstoffen.



1.2.2 Energiescenario's en energietransitie

Uit de gegevens uit de vorige paragraaf blijkt dat de ontwikkeling van de duurzame energie op dit moment snel verloopt. Daarbij zijn de volgende vragen van belang: kan de ontwikkeling in het huidige tempo doorgaan, hoe lang duurt het voor we een volledig duurzame energievoorziening bereiken en welke duurzame energietoepassingen zullen op termijn de belangrijkste rol gaan spelen? De toekomst van onze energievoorziening laat zich uiteraard moeilijk voorspellen. Om toch inzicht te krijgen in de mogelijke ontwikkelingen maken we wel gebruik van *energiescenario's*. Een energiescenario is een schets van een mogelijke toekomstige ontwikkeling van de gehele energievoorziening, gebaseerd op aannames over de toekomstige energievraag per sector en per energiedrager, het toepassingspotentieel van de diverse energietechnologieën, toekomstige energieprijzen, technologieontwikkelingen en kostenontwikkelingen. Sommige scenario's geven aan dat het aandeel duurzame energie al rond het jaar 2050 gestegen kan zijn tot zo'n 50% van de totale energievraag. Als voorbeeld wordt in figuur 1.11 weergegeven hoe volgens een door Shell ontwikkeld scenario het aandeel van de verschillende duurzame energietechnologieën zich tot het jaar 2050 zou kunnen ontwikkelen. In deze scenario's groeien vooral zon, wind en biobrandstoffen. Dit zijn ook de technologieën die op dit moment al een sterke groei doormaken en waarvan nog veel verwacht wordt ten aanzien van kostenverlaging.

FIGUUR 1.11
De ontwikkeling van
het energieaanbod
volgens een
energiescenario van
Shell



Voor de overgang naar een duurzame energievoorziening zullen nog de nodige knelpunten en problemen moeten worden overwonnen. Het is een veranderingsproces van lange duur waar de hele maatschappij bij betrokken is. Een dergelijk veranderingsproces noemen we een *transitie*. Een transitie wordt gekenmerkt door complexiteit en onzekerheid. Een transitie is complex omdat er zo veel verschillende partijen bij betrokken zijn, en onzeker omdat het verloop ervan onvoorspelbaar is. Voorbeelden van transities zijn de industriële revolutie die begon in de 19^e eeuw, en de overgang naar een informatica-samenleving – een transitie waar we nog middenin zitten. Zo is de ontwikkeling van slimme regelsystemen, slimme meters en software die de ‘smart grids’ besturen onmisbaar om duurzame bronnen optimaal te kunnen inzetten. Daarnaast leidt ‘lean production’ (productie met een sterk gereduceerd grondstof-, water- en energiegebruik) tot een autonome verlaging van de energievraag, die zoals eerder betoogd een *conditio sine qua non* is voor de transitie naar een ook in energetisch opzicht duurzame samenleving.

Doelstelling van de energietransitie is het energiesysteem de komende decennia om te bouwen naar een duurzame energievoorziening. Hierin is een belangrijke rol weggelegd voor: gemeenten, provincies, gewesten, nationale overheden, EU en internationale lichamen zoals OECD en UN. De overheidsrol is essentieel, omdat er zeer grote maatschappelijke belangen in het geding zijn én omdat de gewenste veranderingen niet vanzelf door marktwerking tot stand zullen komen. Overheden hoeven daarbij niet zelf de benodigde investeringen te doen, maar zij zullen wel voldoende gunstige randvoorwaarden moeten scheppen. In paragraaf 1.3 zal nog worden aangegeven welke beleidsinstrumenten de verschillende overheden tot hun beschikking hebben om de ontwikkeling van duurzame energie te stimuleren.

Innovatie is een voorwaarde voor de energietransitie. De basiskennis is al aanwezig om het hele scala aan mogelijkheden van gebruik van duurzame energiebronnen te benutten. De technologieën worden ook vrijwel allemaal al toegepast. Maar om deze nu nog verspreide toepassingen uit te kunnen bouwen tot een duurzame energievoorziening, en dit te doen tegen aanvaardbare kosten en met een aanvaardbare ruimtelijke inpassing, is nog veel innovatie nodig. Voorbeelden van dergelijke innovaties zullen we in de volgende hoofdstukken tegenkomen: nieuwe zonneceltypen, steeds grotere windturbines, vergassing van biomassa, brandstofcellen.

Innovatie gaat niet altijd over nieuwe technologie. Ook in organisatie, beheer en marketing kunnen innovaties worden doorgevoerd. Een voorbeeld daarvan is de introductie van groene stroom: als een energieafnemer overstapt op groene stroom verandert er bij die afnemer niets, maar wordt wel gewaarborgd dat er financiële middelen vrijkomen om ergens in het energiesysteem te investeren in duurzame energie. Zoals we in hoofdstuk 13 over duurzame energiesystemen zullen zien, vraagt de trend naar steeds meer decentrale energieopwekking ook om innovaties in het beheer van deze systemen.

1.3 Beleidsdoelstellingen en beleidsinstrumenten

In navolging van het Kyoto-protocol werd in het najaar van 2015 in het Klimaatakkoord van Parijs vastgelegd dat de deelnemende landen zich inspannen de stijging van de gemiddelde temperatuur op aarde te beperken tot 2 °C en te streven naar een stijging van maximaal 1,5 °C. Om het klimaatakkoord in werking te laten treden verplichten de deelnemende landen zich dit te ratificeren. De doelstellingen voor het energiebeleid in het algemeen en de toepassing van duurzame energie in het bijzonder vinden we vooral op nationaal niveau en bij de Europese Unie.

De algemene doelstelling van het energiebeleid van de EU is het verminderen van de risico's van klimaatverandering én het verminderen van afhankelijkheid van geïmporteerde fossiele brandstoffen.

Voor het jaar 2020 heeft de EU in 2008 als doelstelling geformuleerd dat de emissies van broeikasgassen met 20% – gereduceerd moeten zijn, oplopend tot 30% in 2030. Voor het aandeel van duurzame energie in de energievoorziening is door de EU een aparte doelstelling van 20% in 2020 vastgesteld. In 2007 heeft Nederland deze doelstelling van 20% weliswaar overgenomen als leidraad voor het beleid, maar deze is inmiddels aangepast tot 14% in 2020 en 16% in 2023. België hanteert vooralsnog een doelstelling van 13% duurzame energie in 2020.

De overheid, zowel op Europees niveau als op nationaal niveau, heeft dus beleidsdoelstellingen geformuleerd. Van belang is te bekijken hoe die overheid ervoor kan zorgen dat deze doelstellingen ook worden gehaald. In onze liberale markteconomie is het in het algemeen niet de overheid zelf die het initiatief neemt tot de bouw van duurzame energiesystemen. Dat zal moeten gebeuren door de energieafne-

mers of door ondernemingen in de energiesector.² Wel kan de overheid de randvoorwaarden scheppen waardoor de benodigde initiatieven en investeringen worden bevorderd. Daarvoor heeft de overheid verschillende zogeheten *beleidsinstrumenten* beschikbaar. De behandeling hiervan kan niet volledig zijn, omdat het aantal varianten erg groot is en de toepassing ervan ook zeer aan veranderingen onderhevig is. We gaan uit van een onderverdeling naar het soort beleidsinstrument en geven voorbeelden van recente toepassingen.

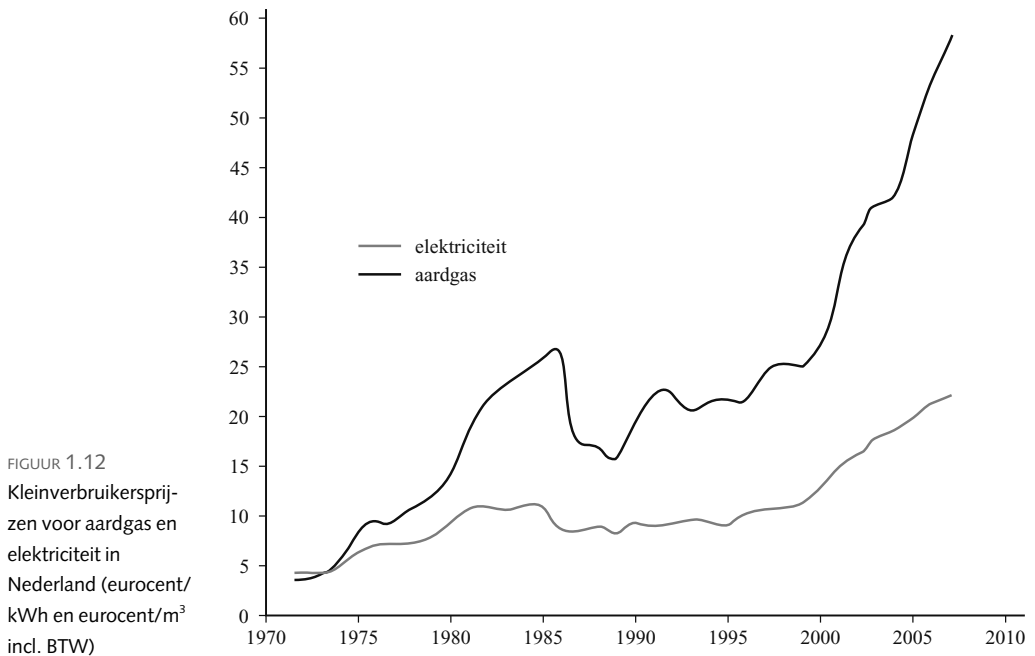
1.3.1 Regulerende energiebelasting (REB)

De prijs van fossiele brandstoffen kan sterk fluctueren. Als leidraad geldt in veel gevallen de prijs van ruwe aardolie. Deze is in het verleden fors gestegen onder invloed van de oliecrises van 1973 en 1978-1980. Na een daaropvolgende geleidelijke daling is aan het begin van deze eeuw opnieuw een sterke stijging opgetreden onder invloed van dreigende schaarste. Stijgende prijzen op de internationale oliemarkten vinden energieafnemers terug in een stijging van de prijzen van benzine, dieselolie, aardgas en elektriciteit. Van grotere invloed echter is meestal dat de overheid door middel van accijnzen belasting heft op energie. De *energiebelasting*, en de heffing voor de *opslag van duurzame energie (ODE)*, vertoont een stijgende tendens. Dit past bij de zogeheten ‘vergroening’ van het belastingstelsel: belasting op inkomen wordt verlaagd en belastingen op grondstofgebruik of milieubelastende activiteiten worden verhoogd. Figuur 1.12 laat de stijging van de gas- en elektriciteitsprijs voor kleinverbruikers zien tot 2010. De stijging wordt voornamelijk veroorzaakt door de stijgende energiebelasting, die sinds 1998 werd ingevoerd plus de btw-heffing in de eindprijs van het product.³ Het effect van deze energiebelasting is dat energieafnemers eerder zullen investeren in energiebesparing of duurzame energie. De terugverdientijd van de investering wordt immers korter naarmate de uitgespaarde kosten van de energie-inkoop hoger zijn.

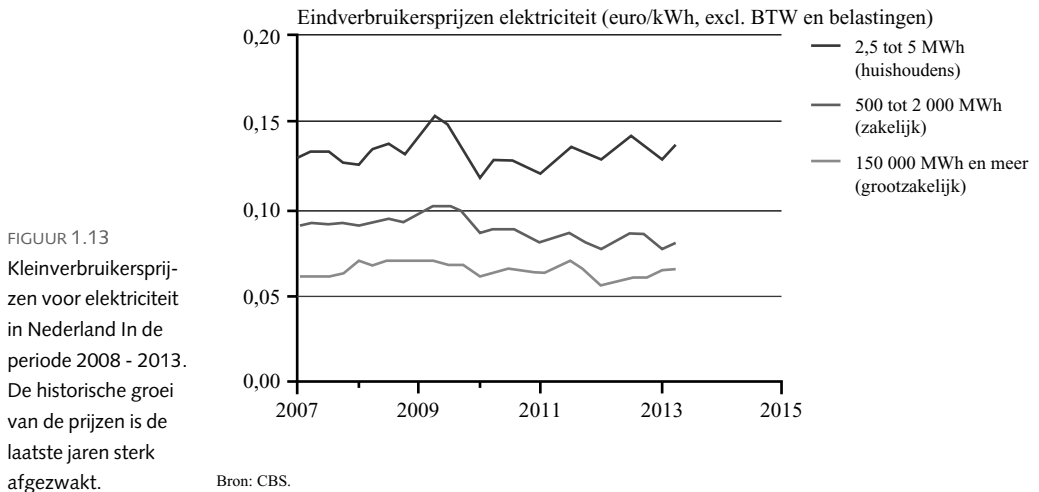
Figuur 1.13 toont dat de prijzen voor elektriciteit de laatste jaren stabiliseren. Omdat de aardgasprijzen nog wel stijgen, wordt elektriciteit relatief goedkoper ten opzichte van aardgas. Dit is gunstig voor elektrische warmtepompen en ongunstig voor WKK-installaties. Door de productie van duurzame energie vrij te stellen van energiebelasting kan de toepassing van duurzame energie worden gestimuleerd. Als bijvoorbeeld producenten van biodiesel over hun product geen belasting hoeven af te dragen, verbetert de concurrentieverhouding met de uit aardolie geproduceerde diesel. Een gehele of gedeeltelijke accijnsvrijstelling voor biobrandstoffen wordt in diverse Europese landen toegepast.

2 In 2013 werd het Energieakkoord tussen bedrijven, overheid en belangenorganisaties gesloten om stappen te zetten ter verduurzaming van de nationale energievoorziening en de te realiseren energiebesparing.

3 Voor aardgas was het belastingaandeel in 2016 53% en voor elektriciteit 26%.



Elektriciteitsprijs



1.3.2 Subsidies

Een variant op de vrijstelling van energiebelasting is de belasting wel te heffen, maar deze te compenseren met een subsidie op de productie van duurzame energie. Een voorbeeld is de Nederlandse regeling Stimulering Duurzame Energieproductie (SDE). Hierbij wordt dus niet de investering in productiemiddelen voor duurzame

energie gesubsidieerd, maar wordt een subsidie ontvangen op de geproduceerde duurzame energie. Per duurzame energietechnologie gelden er verschillende subsidiebedragen (zie tabel 1.3). De subsidie bestaat uit een productiesubsidie per kWh, per GJ warmte of per Nm³ gas, waarbij de subsidiebedragen zodanig zijn vastgesteld dat de meerkosten ten opzichte van de marktprijs van referentietechnologie worden vergoed.

Voor particulieren geldt in Nederland voor de teruggeleverde elektrische energie de ‘Salderingsregeling’. De aan het elektriciteitsnet teruggeleverde elektriciteit wordt in mindering gebracht op de bruto geleverde hoeveelheid elektriciteit. Deze regeling wordt in 2016 of begin 2017 door de minister geëvalueerd en uiterlijk in 2020 eventueel afgeschaft.

Voorbeeld: stel dat de kostprijs van grijze elektriciteit € 0,05/kWh bedraagt en de kosten van duurzame elektriciteit uit wind op zee € 0,12/kWh, dan wordt dit verschil (€ 0,07/kWh) gesubsidieerd. Dit heeft tot gevolg dat de markt als het ware niet merkt dat duurzame energie duurder is dan conventionele fossiele energie.

Het onderzoeksinstituut ECN maakt regelmatig exploitatieberekeningen waaruit de subsidiebedragen worden afgeleid. De subsidie wordt gegarandeerd voor een periode van vijftien jaar voor geothermie, waterkracht, wind en PV, en voor acht of twaalf jaar voor biomassa. De bedragen worden jaarlijks bijgesteld aan de hand van de energieprijzen: als de elektriciteitsprijs stijgt, daalt de subsidie, en als de elektriciteitsprijs daalt, wordt meer subsidie toegekend. De totale opbrengst per kWh (electriciteitsprijs plus subsidie) blijft hierdoor constant over de gehele subsidieperiode van twaalf respectievelijk vijftien jaar. Naast duurzame elektriciteit wordt ook de productie van groen gas gesubsidieerd, waarbij de subsidiebedragen gelden per geproduceerde m³ gas. Duurzame warmte is ook opgenomen in de SDE+-regeling.

TABEL 1.3 Basisbedragen SDE+ (Tabel 1.3 geeft de SDE+-regeling voor 2013 weer. Voor de actuele regeling zie www.rvo.nl).

	Pg	Energie-product	Basis-bedrag	Eenheid	Vollast-uren*	Vollasturen samenge-steld
Bodemenergie en aardwarmte	49	<i>Warmte</i>	11,8	[€/GJ]	5500	–
Diepe geothermie	50	WKK	24,0	[€/GJ]	5000/4000	4158
Windenergie						
Wind op land, uiterst windrijk	46	<i>Elektriciteit</i>	7,0	[€/kWh]	3300	
Wind op land, zeer windrijk	46	<i>Elektriciteit</i>	8,0	[€/kWh]	2800	
Wind op land, uiterst windrijk	46	<i>Elektriciteit</i>	9,0	[€/kWh]	2400	
Wind op land, windrijk	46	<i>Elektriciteit</i>	9,5	[€/kWh]	2200	

	Pg	Energie-product	Basis-bedrag	Eenheid	Vollast-uren*	Vollasturen samengesteld
Wind op land, weinig windrijk	46	<i>Elektriciteit</i>	9,3	[€ct/kWh]	3000	
Wind op zee	54	<i>Elektriciteit</i>	16,0	[€ct/kWh]	4000	
Energie uit water						
Laag verval (<5 m)	45	<i>Elektriciteit</i>	11,8	[€ct/kWh]	7000	
Bestaande waterstaatkundige voorzieningen	46	<i>Elektriciteit</i>	6,2	[€ct/kWh]	4300	
Energie uit vrije stroming	55	<i>Elektriciteit</i>	25,5	[€ct/kWh]	2800	
Osmose	55	<i>Elektriciteit</i>	49,3	[€ct/kWh]	8000	
Zonne-energie						
Zon-PV (>15 kW _p)	52	<i>Elektriciteit</i>	14,8	[€ct/kWh]	1000	
Zonthermie	51	<i>Warmte</i>	33,3	[€/GJ]	700	

* Notatie bij WKK-opties: vollasturen elektriciteit/vollasturen warmtelevering.

Kenmerken SDE+-subsidie: een integraal budgetplafond

Voor een heel kalenderjaar wordt een maximumbedrag vastgesteld voor alle SDE + subsidies tezamen die in dat jaar worden toegekend. Voor 2016 is dit: 5 miljard euro.

Kenmerken SDE+: een gefaseerde openstelling

De SDE+ wordt in fasen gedurende het kalenderjaar opengesteld. Men begint met het laagste basisbedrag per categorie in fase 1, en dit basisbedrag loopt op in volgende fasen. Bijvoorbeeld, fase 1 (begin van het jaar) heeft een basisbedrag van 7 cts/kWh en fase 6 (einde van het jaar) 15 cts/kWh.

Voor iedere technologie geldt een maximumbasisbedrag waarboven geen subsidie wordt uitgekeerd. In fase 1 kunnen kosteneffectieve technologieën met een basisbedrag lager of gelijk aan 7 cts/kWh (2013) een aanvraag indienen. Ten opzichte van technologieën met een hoger maximumbasisbedrag hebben aanvragers in fase 1 een grotere kans dat er voldoende budget is. De bedoeling is dat men op een zo laag mogelijk basisbedrag inzet, om op die manier met de beschikbare middelen zoveel mogelijk duurzame energieopwekking te bewerkstelligen.

In België bestaat geen subsidieregeling zoals de Nederlandse SDE, maar wordt gewerkt met een quotumverplichting voor leveranciers van elektriciteit, waarbij een bepaald percentage van de door hun geleverde elektriciteit uit duurzame bronnen

moet worden geproduceerd (zie paragraaf 1.3.4). Uitzondering is PV, waarvoor in Vlaanderen een relatief hoge productiesubsidie van 0,45 €/kWh wordt gegeven. Deze komt bovenop de ‘normale’ elektriciteitsprijs en bovenop fiscale investeringspremies voor zowel particulieren als bedrijven.

Subsidies zoals via de SDE bevorderen de productie van duurzame elektriciteit. Dit is vooral van belang voor die duurzame energietechnologieën die nog niet kunnen concurreren met elektriciteitsproductie uit fossiele brandstoffen. De maatschappelijke voordelen van duurzame energie boven fossiele brandstoffen worden in deze subsidie tot uitdrukking gebracht. Deze marktstimulering kan van tijdelijke aard zijn. Zoals we gezien hebben in paragraaf 1.2.1 is het voor het bereiken van kostenverlagingen van belang dat er een marktvolume ontstaat, zodat een leercurve kan worden doorlopen. Na verloop van tijd kan de subsidie worden verminderd en uiteindelijk geheel worden afgeschaft. Een efficiënte besteding van overheidsmiddelen in de vorm van subsidies vereist een inschatting van enerzijds het belang van de technologie in een toekomstige energievoorziening en anderzijds een inschatting in hoeverre kostenverlaging inderdaad mogelijk is.

Behalve met productiesubsidies zoals de SDE kan de marktontwikkeling van duurzame energie ook worden gestimuleerd door middel van *investeringsubsidies*. Voor ondernemers zijn dat veelal subsidies in de vorm van belastingvoordelen. In Nederland is er de zogeheten energie-investeringsaftrek (EIA). Deze houdt in dat voor een reeks van maatregelen – zowel op het gebied van energiebesparing als duurzame energie – een percentage van de investering in mindering kan worden gebracht op de belastbare som. In België geldt een vergelijkbare belastingvermindering voor ondernemers. Een andere belastingmaatregel die investeringen in duurzame energie voor ondernemers aantrekkelijker maakt, is een vervroegde afschrijving op deze investering. Dit biedt ondernemers een rente- en liquiditeitsvoordeel. In Nederland is daarvoor de zogeheten VAMIL (Vrije Afschrijving MILieu-investeringen) van kracht. Investeerders kunnen belastingvoordeel verkrijgen op investeringen in duurzame energie via zogeheten groenfinanciering, wat inhoudt dat de rente-inkomsten uit deze investeringen zijn vrijgesteld van belastingheffing.

In Nederland kunnen particulieren een investeringssubsidie krijgen voor technologieën op het gebied van duurzame warmte. De subsidie geldt alleen voor bestaande woningen en niet voor nieuwbouw. Subsidiebedragen in 2016 zijn € 500 voor een zonneboiler, voor een biomassaketel € 80/kW met een maximum van € 3200, voor een pelletkachel minimaal € 500 en voor een warmtepompinstallatie tussen € 500 en € 2.500.

1.3.3 Kyoto-mechanismen

Een variant op de energiebelasting is het belasten van de emissie van CO₂. Dit is een verfijning van de energiebelasting omdat niet zozeer het energiegebruik zelf, maar de milieubelasting veroorzaakt door het energiegebruik wordt belast. Duurzame energie wordt hierdoor gestimuleerd, omdat deze geen CO₂-emissie veroorzaakt. Het in geld waarderen van de reductie van CO₂-emissies speelt een belangrijke rol in de uitvoering van het Kyoto-protocol. Zoals in paragraaf 1.3 aangegeven gelden in het kader van dit Kyoto-protocol voor de EU als geheel en voor de lidstaten afzonderlijk

doelstellingen om de emissies van broeikasgassen te reduceren. Dit zal vooral moeten gebeuren door reductie van CO₂-emissie, omdat dit verreweg het belangrijkste broeikasgas is. Omdat klimaatverandering een wereldwijd probleem is, en het daarom niet uitmaakt waar precies de emissiereducties plaatsvinden, is via de zogeheten Kyoto-mechanismen de mogelijkheid geschapen om de emissiereductie daar te laten plaatsvinden waar deze het goedkoopst kan worden gerealiseerd. Aan de emissiedoelstellingen die een land heeft, kan dan niet alleen worden voldaan door maatregelen in het eigen land, maar ook door maatregelen in andere landen.

De drie Kyoto-mechanismen zijn:

- *Joint Implementation (JI)*. Hierbij investeren industrielanden in maatregelen in Centraal- en Oost-Europa. Daar is nog veel resultaat te behalen met eenvoudige en dus goedkope maatregelen, zoals het verhogen van de efficiency in de elektriciteitsproductie. De emissiereductie die hierdoor wordt behaald, wordt aan het investerende land toegerekend. De bepaling van deze emissiereductie is in het algemeen goed mogelijk, omdat de ontvangende landen ook een emissiedoelstelling en dus een emissieregistratie hebben.
- *Clean Development Mechanism (CDM)*. Hierbij investeren industrielanden in maatregelen in ontwikkelingslanden. Een verschil met JI is dat ontwikkelingslanden geen eigen emissiedoelstelling hebben en het moeilijker is vast te stellen welke emissiereductie een investeringsproject heeft opgeleverd. Voor deze vaststelling zijn wel regels opgesteld en er is een toezichtorgaan dat de uitvoering van deze regels controleert. Ook wordt er op aandringen van de ontwikkelingslanden zelf getoetst of projecten ook in bredere zin bijdragen aan een duurzame ontwikkeling.
- *Internationale emissiehandel (Emission Trade, ET)*. Via emissiehandel kunnen industrielanden onderling emissiereducties verhandelen. Dit maakt het mogelijk dat landen die hun Kyoto-doelstelling niet halen emissiereducties kopen bij landen die het beter doen dan hun Kyoto-doelstelling. Internationale emissiehandel kan ook tussen bedrijven plaatsvinden. De Europese Unie heeft hiervoor in 2005 een eigen CO₂-emissiehandelssysteem opgezet. Dit systeem is bedoeld voor een aantal energie-intensieve bedrijfstakken zoals elektriciteitsproductiebedrijven, raffinaderijen en bedrijven in de metaal-, voedingsmiddelen-, papier- en chemische industrie. Voor deze bedrijven zijn emissieplafonds vastgesteld. Bedrijven die boven hun plafond uit dreigen te komen, kunnen emissiereducties kopen bij bedrijven die binnen hun plafond blijven.

Deze Kyoto-mechanismen zullen ook in het post-Kyoto-tijdperk, tussen 2012 en 2020, een rol blijven spelen.

1.3.4 Regelgeving

De tot nu toe behandelde beleidsinstrumenten zijn zogeheten financiële instrumenten. Deze leiden tot stimulering van duurzame energie door de kosten/baten-verhouding te beïnvloeden. Een ander soort beleidsinstrument is het opstellen van regels die het toepassen van duurzame energie of energiebesparende maatregelen verplicht stellen; in Nederland worden vanaf 1992 in het 'Bouwbesluit' bindende eisen opgelegd met betrekking tot minimale isolatiedikten bij de bouw van gebouwen. Binnen de EU

is een richtlijn van kracht die aan de lidstaten verplichtingen oplegt ten aanzien van het aandeel duurzame elektriciteit.

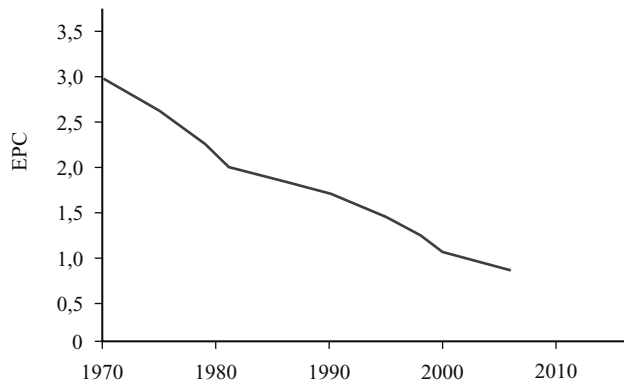
De lidstaten kunnen op hun beurt energieleveranciers verplichten een bepaald percentage van de door hun geleverde elektriciteit uit duurzame bronnen te betrekken. In België geldt een dergelijke verplichting voor energieleveranciers: 2% in 2004 toenemend tot 6% in 2010.

Regelgeving die al enige tijd van invloed is op de ontwikkeling van energiebesparing en duurzame energie is de bouwregelgeving. In 1995 is in Nederland de Energie Prestatie Coëfficiënt (EPC) geïntroduceerd voor woningen en in 1998 voor kantoorgebouwen. De EPC is een maat voor het beslag op fossiele brandstoffen dat samenhangt met het zogeheten gebouwgebonden energiegebruik: ruimteverwarming, ventilatie, koeling, warm-tapwatergebruik en verlichting. Bij toepassing van duurzame energie wordt het beslag op fossiele brandstoffen verminderd en daardoor de EPC verlaagd. In het Bouwbesluit is wettelijk vastgelegd dat voor nieuw te bouwen woningen de EPC niet boven een bepaalde norm – de energieprestatienorm – mag uitkomen.

De vorderingen op het gebied van energiebesparing in gebouwen laten zich aflezen in figuur 1.14. Sinds 1975 hebben eerst de isolatievoorschriften en later de energieprestatienormering geleid tot een gestaag dalend energiegebruik. We kunnen constateren dat nieuwbouwwoningen zoals die nu gebouwd worden nog maar een derde van de energie gebruiken in vergelijking met wat dertig jaar geleden gebruikelijk was. Deze vermindering is tot stand gekomen door het steeds beter isoleren van woningen en het toepassen van steeds efficiëntere verwarmingsketels. Al bij het normniveau dat vanaf het jaar 2000 van kracht was (EPC = 1,0) wordt ook de toepassing van zonneboilers en warmtepompen gestimuleerd. Dit zal de komende jaren nog sterker het geval zijn: sinds 2011 is een EPC van 0,6 vereist, in 2015 een EPC van 0,4, terwijl in 2020 de eis geldt: EPC = 0. Mits de aanscherping van de norm geleidelijk gaat en tijdig wordt aangekondigd, blijkt deze regelgeving voor consumenten ook tot kostenbesparing te leiden. Marktpartijen spelen in op de regelgeving met nieuwe producten en omdat deze meteen op grote schaal worden toegepast, blijft de meerinvestering beperkt. In combinatie met de stijgende energieprijzen leidt dit tot netto kostenvoordelen bij de consument. De bouwregelgeving heeft in het verleden steeds innovatie bevorderd en kan dat in de toekomst blijven doen ten gunste van duurzame energie.

Sinds 2003 is een EU-richtlijn van kracht – de Energy Performance in Buildings Directive (EPBD) – die een systeem zoals de Nederlandse energieprestatienormering verplicht stelt voor alle lidstaten. Deze energieprestatienormering geldt niet alleen voor nieuwe woningen, maar ook voor andere nieuwbouw zoals kantoren, scholen, winkels, enzovoort. Ook bij ingrijpende renovatie moet aan de nieuwbouwnormen worden voldaan. Daarnaast verplicht de EPBD dat alle gebouwen worden voorzien van een energiecertificaat dat aangeeft hoe de energetische kwaliteit is. Duurzame energie geldt ook voor dit certificaat als een verbetering van de energetische kwaliteit, zodat de invoering van deze energiecertificaten de toepassing van duurzame energie in gebouwen kan bevorderen.

FIGUUR 1.14
Energieprestatie-
verbetering van
nieuwbouwoningen
1970-2006



1.3.5 Ondersteuning onderzoek en demonstratie

In paragraaf 1.2.2 is al aangegeven dat er nog veel innovatie nodig is om tot een duurzame energievoorziening te komen. We zagen dat de marktontwikkeling van innovatieve technologie kan worden bevorderd door marktstimulering via energiebelastingen of subsidies, en door regelgeving in de energiesector of bouwsector. Voordat een nieuwe technologie op de markt kan komen, moet deze echter eerst worden ontwikkeld. We onderscheiden daarin meestal enkele ontwikkelingsfasen: aantonen dat het werkt (proof of principle), aantonen dat het op de juiste schaal en in de juiste context werkt (proof of concept), het maken en testen van prototypes, veldtesten, en ten slotte het uitvoeren van demonstratieprojecten. De hele ontwikkeling kent aanzienlijke risico's, omdat tot op het laatst onzeker is of er een marktrijp product uit voortkomt. Innovatie en productontwikkeling worden daarom vaak door de overheid ondersteund. Dit geldt des te meer voor innovaties die een maatschappelijk doel dienen, zoals het geval is bij de verduurzaming van onze energievoorziening. De eerste fasen van de ontwikkeling worden vaak uitgevoerd bij door de overheid gefinancierde onderzoeksinstituten. In Nederland zijn dat de Nederlandse organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek (TNO) en het Energieonderzoek Centrum Nederland (ECN). In de latere fasen van het ontwikkelingswerk ligt het initiatief meer bij ondernemingen, die daarbij ook aanspraak kunnen maken op financiële ondersteuning van de overheid. De ondersteuningsregelingen zijn te divers om hier allemaal te behandelen. Wel opgemerkt mag worden dat de EU bij de ontwikkeling en demonstratie van innovaties in onze energievoorziening een steeds grotere rol speelt.

1.3.6 Burgerinitiatieven en lokale overheden

Energie- en CO₂-belasting, subsidies, regelgeving en innovatiestimulering zijn de beleidsinstrumenten die de overheid kan inzetten om de ontwikkeling van duurzame energie te stimuleren. Zoals we hebben gezien, wordt dit soort regelingen meestal op Europees of nationaal niveau vastgesteld. Daardoor worden betere randvoorwaarden voor duurzame energie geschapen. De initiatieven tot toepassing van duurzame energie worden echter vaak op lokaal niveau genomen. Daarbij spelen burgers, lokale gemeenschappen en lokale overheden zoals gemeenten een belangrijke rol. Be-

slissingen worden daarbij ook lang niet altijd alleen op grond van een kosten/batenafweging genomen. Maatschappelijke betrokkenheid kan daarbij een grote rol spelen. Zo bestaat bijvoorbeeld in Nederland een groot aantal windmolencoöperaties waarin een aantal burgers gezamenlijk het initiatief heeft genomen om windturbines te financieren en te laten bouwen. Op veel plaatsen zijn het bewoners zelf die het initiatief nemen tot het bouwen van wijken met veel duurzame energie. Veel ondernemingen passen duurzame energie toe als onderdeel van een bedrijfsstrategie die duurzaam ondernemen voorop stelt.

Gemeenten zijn vaak van doorslaggevend belang bij het toepassen van duurzame energie. Zij kunnen het initiatief nemen tot plaatsing van windturbines of biomassa-centrales. De gemeentelijke gebouwen kunnen worden gebruikt om de mogelijkheden van zonne-energie en warmtepompen aan burgers te demonstreren. In stedelijke herstructurering hebben gemeenten vaak de leiding en daarbij kunnen ze hun invloed gebruiken om duurzame energie toe te passen. Initiatieven van burgers of bedrijven in de energiesector zijn voor de realisatie vaak afhankelijk van medewerking van gemeenten. Veel gemeenten hebben in het kader van lokaal klimaatbeleid eigen doelstellingen en actieprogramma's opgesteld. In Nederland is een subsidieregeling in werking waarbij gemeenten voor de uitvoering van deze actieprogramma's extra middelen krijgen toegekend. Door heel Europa heen hebben ruim 1000 gemeenten en regio's zich aangesloten bij het Klimaatverbond. De hierbij aangesloten gemeenten hebben afgesproken zich extra in te spannen om de risico's van klimaatverandering te beperken.

1.4 Opgaven

Kennisvragen

- 1 Wat wordt verstaan onder duurzaamheid?
- 2 Welke risico's zijn verbonden aan onze afhankelijkheid van fossiele brandstoffen?
- 3 Wat wordt bedoeld met een 'factor 4' en een 'factor 20' efficiencyverbetering?
- 4 Wat zijn duurzame energiebronnen?
- 5 Welke duurzame energiebronnen hebben hun oorsprong in zonne-energie? En welke hebben een andere oorsprong?
- 6 Wat zijn primaire energiedragers?
- 7 Wat zijn secundaire energiedragers?
- 8 Wat zijn de belangrijkste knelpunten bij het overschakelen op duurzame energiebronnen, en hoe kunnen deze worden overwonnen?
- 9 Welke soorten maatregelen worden onderscheiden in de 'Trias Energetica'?
- 10 Welke duurzame energiebronnen worden op dit moment wereldwijd het meest toegepast? En hoe ligt dat in Nederland?
- 11 Wat is een leercurve en welke grootheid wordt gebruikt om de snelheid van het leerproces aan te geven?
- 12 Welke duurzame energiebronnen vertonen op dit moment de grootste groei?
- 13 Wat wordt bedoeld met de transitie naar een duurzame energievoorziening?
- 14 Waarom leidt verhoging van de energiebelasting tot meer toepassing van duurzame energie?

- 15 Welke soorten subsidies kunnen worden onderscheiden in de stimulering van de toepassing van duurzame energie?
- 16 Wat zijn Kyoto-mechanismen?
- 17 Welke soorten regelgeving kunnen stimulerend werken op de toepassing van duurzame energie?
- 18 Waarom stelt de overheid nu al een EPC-eis voor 2020?
- 19 Wat is de bedoeling van de fasering van de SDE+-regeling?

1.5 Literatuur

- Energieonderzoek Centrum Nederland, Petten, ECN-O-15-033, *Nationale energieverkenning 2015*,
Energietransitie: klimaat voor nieuwe kansen, gezamenlijk advies van de VROM-raad en de Algemene Energieraad, Den Haag, 2004.
- Europese Commissie, 'Een Europese strategie voor duurzame, concurrerende en continue geleverde energie voor Europa', *Groenboek*, 2006.
- Gilijamse W., *Met het oog op morgen – werken aan een duurzame energievoorziening*, lectorale rede, Saxion Hogescholen, 2004.
- Interdepartementaal Onderzoekprogramma Duurzame Technologische Ontwikkeling, *DTO visie; technologie, sleutel tot een duurzame welvaart*, ten Hagen & Stam, Den Haag, 1997.
- Platform Communication on Climate Change (PCCC), *De kleine vraagbaak van het Kyoto-protocol*, 2005.
- Statistische gegevens over de ontwikkeling van het energiegebruik zijn te vinden op de websites: www.europa.eu.int/comm/eurostat, www.oecd.org, www.mineco.fgov.be en www.energie.nl.
- Weizsäcker, Ernst von , Amory B. Lovins and L. Hunter Lovins, *Factor four – doubling wealth, halving resource use, the new report to the club of Rome*, Earthscan, London, 1997.
- World Commission on Environment and Development, *Our Common Future*, Oxford University Press, 1987. Naar de voorzitter van deze commissie wordt dit rapport ook wel het 'Brundtland-rapport' genoemd.
- SDE+, Brochures in 2013 en 2016, AgentschapNL, 2013 en RVO.
- World Energy Council, *Survey on Energy Resources*, 2007.

Enkele websites met statistische gegevens en gegevens over energiebeleid:

- www.energie.nl www.mineco.fgov.be
- www.minez.nl
- www.europa.eu.int/comm/energy