

# De materialentransitie

Van weggooimaatschappij naar  
duurzaam gebruik van materialen

Peter Arnoldy



Eburon  
Utrecht 2022

*“We are the first generation  
to know we are destroying our planet  
and the last one that can do anything about it.”*

TANYA STEELE,  
Chief Executive van het Wereld Natuur Fonds in Engeland,  
30-10-2018

ISBN 978-94-6301-415-1

Academische Uitgeverij Eburon, Utrecht  
[www.eburon.nl](http://www.eburon.nl)

Omslagontwerp: Textcetera, Den Haag

© 2022 P. Arnoldy. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden veeelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of op enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de rechthebbende.

# Inhoud

<b>Voorwoord</b>	9
<b>1 Inleiding</b>	17
1.1 De behoefte aan materialen	17
1.2 Materialen en broeikasgassen	18
1.3 Materialen in allerlei soorten	20
1.4 Materialen en materialentransitie	22
1.5 De bijdrage van materialen aan het klimaatprobleem	23
1.6 Bevolkingsgroei en rijkdom	26
1.7 Over dit boek	30
<b>2 De geschiedenis van materialen</b>	33
2.1 Inleiding	33
2.2 Vanaf prehistorie tot industriële revolutie	34
2.3 De industriële revolutie, 1760-1850	39
2.4 De steenkooleeuw, 1850-1950	43
2.4.1 De ontwikkeling van wetenschap en techniek	43
2.4.2 De ontwikkeling van de consumentenmarkt	45
2.4.3 Nieuwe bouwstenen en materialen	47
2.4.4 Materialen vanuit groene grondstoffen	48
2.4.5 Materialen vanuit steenkool	49
2.4.6 De opkomst van aardgas en aardolie	52
2.4.7 Het ontstaan van de petrochemie	56
2.4.8 Olefines uit de stoomkraker	58
2.4.9 In en na de Tweede Wereldoorlog, een overgangstijd	60
2.5 De aardolie-eeuw, 1950-heden	62
2.5.1 De petrochemie vanaf 1950	64
2.5.2 De rol van aardgas in de aardolie-eeuw	70
2.5.3 De rol van steenkool in de aardolie-eeuw	70
2.5.4 De rol van groene voedingsmiddelen in de aardolie-eeuw	71
2.6 De materialenontwikkelingen buiten de petrochemie	73
2.6.1 Kalksteen	73
2.6.2 Metalen	74
2.6.3 Hout en ontbossing	77
2.6.4 Natuurlijke vezels	80
2.7 Winning van grondstoffen	80

2.8 Afval en recycling	82
2.9 Fossiele brandstoffen en economie	87
<b>3 Grenzen aan de materialengroei</b>	91
3.1 Inleiding	91
3.2 Meer behoefte aan materialen	91
3.3 Uitputting van grondstoffen	93
3.4 Peak oil	94
3.5 De beschikbaarheid van grond	96
3.6 Economische groei en duurzaamheid	104
3.7 Welvaart en welzijn	105
3.8 Recente cijfers	106
<b>4 Oplossingsrichtingen</b>	109
<b>5 Afval en recycling</b>	115
5.1 De afvalhiërarchie	116
5.2 Preventie	120
5.3 Hergebruik van producten	122
5.4 Inzameling van afval	123
5.5 Mechanische recycling	125
5.6 Chemische recycling	129
5.7 Verbranding	130
5.8 Storten	131
<b>6 Groene producten</b>	133
6.1 Groene voedingen	134
6.2 Biotechnologie	135
6.3 Nieuwe bouwstenen	137
6.4 Biologische en chemische routes	138
<b>7 CO<sub>2</sub> als voeding</b>	141
7.1 CO <sub>2</sub> vangen: Carbon Capture and Storage (CCS)	141
7.2 CO <sub>2</sub> als product	144
7.3 CO <sub>2</sub> als grondstof	144
<b>8 Certificering</b>	147
8.1 Productieketens	147
8.2 Eigenschappen van producten	149
8.3 CO <sub>2</sub> -compensatie	149

<b>9 Techniek</b>	151
9.1 Verhogen van de efficiëntie van bestaande processen	151
9.2 Duurzame processen en producten	152
9.2.1 Duurzame petrochemie	153
9.2.2 Biologische afbreekbaarheid	155
9.3 Afval en recycling	157
9.4 Gebruik van hernieuwbare energie	158
9.4.1 Hogetemperatuurwarmte	158
9.4.2 Elektrificatie	158
9.4.3 Groene waterstof	159
9.5 Transitieprocessen per industrie	161
9.5.1 De koolstofindustrie	161
9.5.2 De metaalindustrie	164
9.5.3 De cementindustrie	166
<b>10 Economie</b>	167
10.1 CO <sub>2</sub> -beprijzing	167
10.2 Andere acties	169
<b>11 Gedrag</b>	171
11.1 De consument	172
11.2 De producent	176
11.3 De overheid	177
<b>12 Slot</b>	183
<b>Verwijzingen</b>	185
<b>Bijlagen</b>	189
Bijlage 1 Anorganische hulpstoffen in de chemie (1760-1950)	190
Bijlage 2 Elektriciteit in de steenkooleeuw	194
Bijlage 3 Nieuwe koolstofhoudende materialen in de steenkooleeuw	196
Bijlage 4 Toepassingen van groene voedings in de steenkooleeuw	198
Bijlage 5 Toepassing van steenkool als grondstof in de steenkooleeuw	203
Bijlage 6 Petrochemische producten uit aardgas	211
Bijlage 7 De eerste petrochemische producten (voor 1950)	214
Bijlage 8 Overzicht van de huidige, grote petrochemische materialen	218
Bijlage 9 Waardeketens op basis van de nieuwe <i>base chemicals</i> van de petrochemie (vanaf 1950)	228
Bijlage 10 Chemische routes voor de omzetting van groene voedings	243

Bijlage 11	Biologische routes voor de omzetting van groene voedingen	256
Bijlage 12	Overzicht van belangrijke metalen	265
Bijlage 13	Eindigheid van grondstoffen voor materialen	267
Bijlage 14	De huidige productie van grondstoffen en producten, inclusief de bijbehorende CO <sub>2</sub> -productie	269
Bijlage 15	Groene voedingen voor materialen	271
Bijlage 16	Mechanische recycling	276
Bijlage 17	Chemische recycling	282
Bijlage 18	Groene waterstof	289
Bijlage 19	CO <sub>2</sub> – opslag en grondstof	296
Appendix 1	Woordenlijst	299
Appendix 2	Afkortingen	302
Appendix 3	Eenheden	308
<b>Levensloop</b>		<b>309</b>

## Voorwoord

‘Ongemak’ is voor mij het woord dat past bij de presentatie van mijn boek over de materialentransitie, de transitie in materialengebruik die nodig is vanwege de klimaatproblemen ten gevolge van het broeikaseffect. Met een geweten dat knarst, waarbij ook calvinistisch getinte woorden als ‘schaamte’ en ‘schuldgevoel’ horen. Omdat het boek weliswaar geschreven moet worden, maar ikzelf een deel van het probleem ben, als rijk mens. Horend bij de rijkste 10% op deze aarde, die in staat is geweest om in twee generaties een klimaatprobleem te creëren dat nauwelijks meer beheersbaar lijkt. Rijk, met meer dan voldoende geld om alles te kopen wat mijn hartje begeert. Alles wat nodig is: voedsel, kleding, een plek om te wonen. En meer dan dat: altijd geld over om meer te kopen, materialen (of populairder gezegd: spullen) om het leven nog aangenamer te maken. Of zelfs dingen te kopen die minder nuttig zijn, en soms overbodig. Niemand die me lijkt tegen te houden in mijn gulzigheid en consumptiedrang.

### **GEDRAG**

Ik probeer mezelf in te tomen, zuiniger te zijn, bewuster en selectiever te consumeren, omdat ik begrijp dat de optelsom van al die consumptie leidt tot een catastrofe. Maar het is lastig om je gedrag te veranderen als individuele consument, als je niet kunt zien hoe jouw gedragsverandering bijdraagt aan de oplossing voor de wereld. Er is een rol voor iedere consument, maar zelfs voor alle consumenten samen lijkt het probleem te groot. Ook overheid en politiek spelen een grote rol, om overkoepelend beleid te maken dat ons de goede kant op stuurt, en gelukkig kunnen we in veel landen democratisch de overheid kiezen die ons daarbij zal moeten helpen. Daarnaast hebben producenten een grote rol. Veel producenten van materialen zijn grote bedrijven, vaak multinationals, met soms net zo veel omzet als een nationale overheid en daardoor veel financiële armslag. Zij kennen de technologische kant van de oplossing. Zij moeten helpen om los te komen van het kortetermijngewin, en om samen met consumenten en overheid te zoeken naar de gewenste langetermijnoplossing.

De meeste consumenten realiseren zich best dat er een probleem is rond het klimaat, hoewel er altijd ‘klimaatontkenners’ zullen blijven. In actie komen om het probleem op te lossen, is lastig. Veel mensen doen wel iets en denken dan snel dat dat voldoende is. Bijvoorbeeld: ‘Ik eet al minder vlees’, of: ‘Ik vlieg minder’, of: ‘Ik scheid al mijn afval’. Maar het klimaatprobleem is zo groot, dat iedereen dit alles zal moeten doen en nog veel meer.

### **GRENZEN AAN DE GROEI**

Ik ben geboren in Nederland in 1956 en opgegroeid in een periode waarin milieuvervuiling een groot probleem wordt en de eindigheid van grondstoffen in zicht komt. Geboeid lees ik als 17-jarige het net uitgekomen ‘Rapport van de Club van Rome’, in de periode van de eerste oliecrisis (Meadows et al., 1972). Dit rapport beschrijft voor het eerst dat er grenzen zijn aan exponentiële groei. Grenzen aan de groei van bevolkingsaantallen, van welvaart en consumptie. Grenzen aan de beschikbaarheid van grond en grondstoffen en aan de draagkracht van milieu en klimaat. Aan de hand van modellen laat dit rapport de dramatische gevolgen zien – uiteindelijk – voor de mensheid, voor levensverwachting en bevolkingsgrootte, door verslechtering van voedselvoorziening en gezondheid. Hoeveel kritiek er ook kan zijn op deze modellen, bij teruglezen van dit vijftig jaar oude rapport treft het mij hoe raak de analyse van het principe van grenzen aan de groei toen al was. Ik heb onder andere uit dit rapport destijds mijn motivatie ontleend om scheikunde te studeren en werk te zoeken waarin ik, als klein radertje in een grote machine, mijn kleine praktische bijdrage zou kunnen leveren aan verbetering van het milieu.

### **KLIMAAT EN UITPUTTING**

Nooit is er een soort geweest op deze aardbol die zo dominant is geweest als de mens nu. Wij, de mensen, zijn met steeds meer, bijna 8 miljard. En gemiddeld per persoon consumeren we steeds meer. Daarmee hebben we steeds meer invloed op onze planeet. Grondstoffen raken uitgeput, en we beïnvloeden de natuur in toenemende mate door bijvoorbeeld ontbossing om landbouw en veeteelt mogelijk te maken, en door productie van afval en broeikasgassen. Broeikasgassen beïnvloeden het klimaat doordat ze de temperatuur verhogen, met allerlei ongewenste effecten. Temperatuurverhoging leidt tot het schuiven van klimaatzones, met invloed op natuur en leefbaarheid. Denk aan het uitsterven van soorten en de toename van insectenplagen. Het zorgt voor verdroging van gebieden, wat gevolgen heeft voor beschikbaarheid van drinkwater en voedsel, en leidt tot een grotere kans op bosbranden. Temperatuurverhoging leidt ook tot meer orkanen en meer neerslag, waardoor er meer overstromingen ontstaan. Tot slot leidt het tot het smelten van landijs, waardoor de zeewaterspiegel zal gaan stijgen, met als gevolg: nog meer overstromingen en onleefbaarheid van laag gelegen gebieden. De aarde kan op deze manier deze mensenmassa niet meer dragen. Het is waarschijnlijk dat hongersnood en grootschalige migratie zullen toenemen. Door competitie om beschikbare grondstoffen en om bewoning van door klimaatwijzigingen minder bedreigde gebieden, liggen oorlogen op de loer. Om dit te voorkomen, zal er veel moeten gaan veranderen, en snel. Onder andere het grootschalige gebruik van fossiele grondstoffen moet op de schop.



Koolzuurgas of kooldioxide (CO<sub>2</sub>) lijkt in zijn eentje verantwoordelijk voor driekwart van de opwarming van de aarde door broeikasgassen, de overige kwart komt hoofdzakelijk voor rekening van drie andere broeikasgassen: methaan, lachgas en een serie fluorhoudende stoffen. Fossiele, koolstofhoudende brandstoffen – aardolie, aardgas en steenkool – zijn verantwoordelijk voor vrijwel de hele CO<sub>2</sub>-productie, met name vanaf de start van de industriële revolutie. Daarnaast komt CO<sub>2</sub> ook vrij bij ontbossing, momenteel zo'n 10% van de totale CO<sub>2</sub>-productie. Om de temperatuurverhoging en de daarbij behorende klimaatverandering beperkt te houden, moeten we alle broeikasgassen aanpakken. Ieder geval zullen we CO<sub>2</sub> als grootste boosdoener moeten aanpakken.

Het internationale klimaatakkoord van Parijs uit 2015 zorgt voor een politieke doorbraak: we streven nu naar een beperking van de temperatuurverhoging tot 1,5 °C, maximaal 2 °C in 2100. Dit vraagt om een wereldwijde reductie van CO<sub>2</sub>-uitstoot van zo'n 50% in 2050 en 100% in 2100. Omdat de productie van broeikasgassen – de voetafdruk – veroorzaakt door mensen in welvarende, vaak westerse landen veel hoger is dan elders, zal de CO<sub>2</sub>-uitstoot hier ook meer en sneller gereduceerd moeten worden. Deze landen moeten aansturen op een halvering van de CO<sub>2</sub>-uitstoot in 2030 en een totale stop – CO<sub>2</sub>-neutraal, koolstofneutraal of klimaatneutraal – in 2050. Grote organisaties en landen beginnen hun ambities vorm te geven in 2021:

- De klimaatwet van de EU (*Green Deal*) mikt op 55% reductie in 2030 en 100% reductie in 2050 (ten opzichte van referentiejaar 1990).
- De VS willen 50-52% reduceren per 2030 (ten opzichte van 2005).
- China belooft om in 2060 koolstofneutraal te worden, na een piek in emissies rond 2030.
- De VN-campagne '*Race to zero*' streeft naar netto nul toevoeging van CO<sub>2</sub> aan de atmosfeer op wereldschaal in uiterlijk 2050.

We moeten toe naar een *low carbon economy*, dat wil zeggen met weinig of geen gebruik van fossiele, koolstofhoudende grondstoffen. Ook de uitputting van fossiele grondstoffen komt eraan, hoewel minder snel dan de klimaatveranderingen, en dat is een tweede reden om het gebruik van fossiele grondstoffen snel sterk te verminderen.

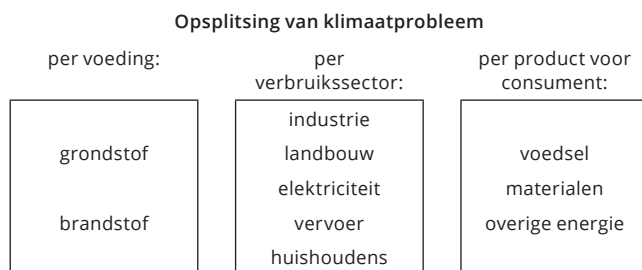
## ENERGIE, VOEDSEL EN MATERIALEN

Er zijn meerdere manieren om het klimaatprobleem op te knippen in hapbare brokjes. Vaak wordt het klimaatprobleem afgeschilderd als een energieprobleem. Grofweg klopt dat ook wel als we kijken naar de voeding of bron van het probleem, de fossiele grondstoffen: zo'n 90% hiervan wordt direct gebruikt als brandstof, vanwege zijn energie-inhoud, en slechts 10% wordt gebruikt als grondstof. In deze benadering ligt de nadruk op het verminderen van het verbruik van fossiele brandstof, door te

investeren in isolatie en alternatieven zoals wind, zon, waterkracht, aardwarmte en volgens sommigen ook deels kernenergie. Maar veel fossiele grondstoffen worden verbruikt buiten ons zicht, in grootschalige installaties waar we geen grip op hebben. We lijken er niets aan te kunnen doen. Deze indeling helpt ons als consumenten niet goed om te zien waar we zelf kunnen bijdragen aan de oplossing.

Door beleidmakers wordt het klimaatprobleem vaak anders opgeknipt, per verbruikssector: industrie, landbouw, vervoer, huishoudens, elektriciteitsproductie. Al die sectoren dragen significant bij en vragen om specifieke beleidsmaatregelen, maar ook die indeling in sectoren helpt ons als consumenten niet echt. Het kan bijvoorbeeld leiden tot verwijten aan vervuilende sectoren zoals de industrie, zonder besef dat de producten van die sectoren uiteindelijk gebruikt worden door dezelfde consument.

Het beste lijkt het mij om het klimaatprobleem op te delen in productgroepen zoals die herkenbaar bij de consument terechtkomen. Die indeling naar producten maakt het namelijk mogelijk voor de consument om inzichtelijk te krijgen hoe hij zelf bijdraagt aan het klimaatprobleem, en hoe hij kan helpen het ook weer op te lossen. Onderstaande figuur geeft de verschillende indelingen voor toekenning van bijdragen aan het klimaatprobleem.



Grofweg zijn er drie grote productgroepen die we allemaal moeten aanpakken om het klimaatprobleem op te lossen (met percentages uit TABEL 1.6):

1. Voedsel (27% van het probleem). Met name vleesconsumptie en intensieve veehouderij, met groot beslag op grond voor productie van veevoer – waardoor ook ontbossing plaatsvindt – en met gebruik van veel kunstmest.
2. Materialen, onze spullen (39%). Het betreft hier zowel de grondstoffen voor materialen (met name de fossiele grondstoffen) als de fossiele energie die nodig is om hieruit materialen te maken en ze aan de consument te leveren.
3. Overig energiegebruik (34%). Dit is het deel van de energie dat niet direct gerelateerd is aan voedsel of spullen. Het gaat hierbij vooral om verbruik door consumenten, zoals energie voor verwarming, elektriciteit en mobiliteit.

Zo bezien komen we er niet uit met alleen zonnepanelen op ons dak en minder vlees eten. We zullen ook serieus moeten kijken naar onze consumptie, naar onze materialen, onze spullen.

### **MATERIALEN ALS AFVALPROBLEEM**

Hoeveel we aan materialen verbruiken, is voor iedereen goed zichtbaar aan de hoeveelheid vast afval die we produceren. Zelfs plastic zwerfafval, een klein deel van het totaal aan afval, begint een probleem te worden. Niet minder dan 8 miljoen ton (3%) van de plastics verdwijnt elk jaar in de oceanen, dat is 1 kg per wereldburger. Er wordt gezegd dat, bij doorzetten van de huidige trends, in 2050 de oceanen in gewicht evenveel plastics als vis zullen bevatten.

### **DE MATERIALENTTRANSITIE**

Het probleem met materialen is nog groter dan dit: er is een directe relatie met het klimaatprobleem. Zoals we praten over de klimaattransitie of de energietransitie, zo moeten we het ook hebben over de materialentransitie, als onderdeel van de klimaattransitie. Het woord transitie (overgang) geeft aan dat het gaat om een ingrijpende en structurele maatschappelijke verandering. In het geval van materialen: om een wezenlijk andere manier om met spullen om te gaan, die leidt tot aanzienlijk minder productie van CO<sub>2</sub> en andere broeikasgassen. Het mes zal gezet moeten worden in hoe we met materialen omgaan en in het bijzonder met de koolstofhoudende materialen zoals plastics. Net zoals bij energie gaat het bij materialen om het inzetten van hernieuwbare grondstoffen en om besparing. Aan de energiekant hebben we hernieuwbare energiebronnen nodig (zon, wind, waterkracht, aardwarmte, biomassa) en energiebesparing. Zo zullen aan de materialenkant behalve materialenbesparing (minder gebruiken, meer recyclen) met name hernieuwbare koolstofhoudende voedingen (groene voedingen, biomassa) een grotere rol gaan spelen, naast het gebruik van groene waterstof (uit groene stroom) en misschien ook CO<sub>2</sub> als grondstof. De takken van sport die de CO<sub>2</sub>-producerende materialen maken – de (petro-)chemie en de staal- en cementindustrie – zullen daardoor danig veranderen.

### **GROENE VERSUS FOSSIELE GRONDSTOFFEN**

Biomassa, groene voeding, is van oudsher de enige koolstofhoudende grondstof, maar wordt vanaf de start van de industriële revolutie (1760) geleidelijk verdrongen door fossiele grondstoffen. In eerste instantie door steenkool, en vanaf de Tweede Wereldoorlog door aardolie en aardgas. In de gewenste materialentransitie zal met name biomassa als hernieuwbare grondstof weer de leidende rol op zich moeten nemen, op grotere schaal dan vroeger en met gebruik van moderne technieken zoals biotechnologie. Dat alles natuurlijk binnen de beperking van onze aarde,

bijvoorbeeld zonder verdere ontbossing. Fossiele grondstoffen moeten we alleen willen blijven gebruiken als daar in bepaalde toepassingen bijzondere voordelen aan zitten en er geen groene alternatieven zijn.

### **VELE VISIES OP MATERIALENGEBRUIK EN TECHNOLOGIE**

Verschillende mensen kijken anders naar het materialenprobleem. Dit boek benadrukt de invloed van materialen op het klimaatprobleem. Sommigen benadrukken het afvalelement, anderen hebben specifieke opvattingen over het gebruik van materialen. Sommigen willen geen materiaal van dierlijke oorsprong gebruiken. Veganisten willen dieren op geen enkele manier gebruiken, niet voor voedselproductie maar ook niet voor materialen. Sommigen willen geen dieren gebruiken als ze gedood worden alleen vanwege hun bont. Anderen hebben problemen met bepaalde materialen waarvoor ontbossing nodig is geweest, zoals soja of palmolie. Weer anderen hebben principiële problemen met de genetische modificatie (genetische manipulatie) die op grote schaal wordt gebruikt in de biotechnologie voor de omzetting van plantaardige voedingsmiddelen.

In dit boek vallen onder groene voedingsmiddelen alle biovoedingen, van zowel plantaardige als dierlijke oorsprong. Zeker in het verleden is de rol van dieren in de productie van materialen aanzienlijk geweest, bijvoorbeeld voor de productie van wol, leer, zeep en lijn. In de toekomst zullen, gezien de grote schaal waarop groene, hernieuwbare voedingsmiddelen nodig zijn ter vervanging van fossiele bronnen, vooral plantaardige bronnen nodig zijn, omdat die veel efficiënter zijn in grondgebruik. Gebruik van recent ontboste gronden voor de productie van groene grondstoffen is waarschijnlijk niet te voorkomen, zolang als verdere ontbossing maar gestopt wordt. Genetische manipulatie is zeer waarschijnlijk nodig als technologie om nieuwe, groene processen mogelijk te maken, met hoge productiviteit en hoge selectiviteit naar gewenste producten. Maar zolang het gaat om de productie van materialen in plaats van voedsel, lijkt het een zeer veilige technologie.

### **DIT BOEK**

Veel publicaties gaan over het klimaatprobleem zelf: het beschrijven van het probleem, het bewijzen dat het bestaat. Andere boeken gaan vooral over hernieuwbare energie. Weer andere gaan over het voedselvraagstuk, hoe we over kunnen gaan naar een meer vegetarische levensstijl met minder vlees- en zuivelconsumptie. Dit boek gaat vooral over de grote bijdrage van materialen aan het klimaatprobleem, zo'n 40%. Materialen betreffen alle stoffen of gebruiksgoederen die we in onze rol van consumenten gebruiken in ons leven, maar die niet voor voedsel of als brandstof door ons ingezet worden. Daar is tot nu toe relatief weinig over geschreven. Het gaat over alle materialen, onze spullen-economie, en de verschillende manieren om

het materialenprobleem aan te pakken; de materialentransitie als onderdeel van de klimaattransitie.

Er wordt wel veel geschreven over onderdelen van die materialentransitie, maar niet over de materialentransitie als geheel. Veel informatie is beschikbaar en vooral via internet goed toegankelijk, maar de informatie is vaak ongeordend, en de vele spelers in dit veld bieden vooral hun eigen ideeën met veel enthousiasme aan, met wisselende realiteitszin. Dit boek doet een poging om het geheel te beschrijven op een toegankelijke en geordende manier. Er is gepoogd om dit te doen in begrijpelijke taal voor een brede groep geïnteresseerde lezers, niet alleen voor hen die beschikken over een technische opleiding. Klimaatverandering en de maatregelen die nodig zijn om die te voorkomen gaan iedereen aan. Er is gekozen voor een hoofdstuk die vloeiend gelezen kan worden. Voor wie er dieper in wil duiken zijn er bijlagen met technische details. Het boek is in het Nederlands geschreven, voor een Nederlands publiek, maar het probleem wordt geschetst op wereldschaal. Alleen het Nederlandse perspectief geven, zou de problemen vertekenen.

Het schrijven van dit boek vraagt om kennis op het gebied van chemie en chemische technologie (toegepaste chemie), met name als het gaat om de complexe wereld van petrochemie en plastics. Ervaring is nodig om de grote hoeveelheid informatie kritisch te verwerken, op waarde te schatten, rijp en groen te onderscheiden. Mijn achtergrond – met een opleiding in de chemie en werkervaring in de chemie en de chemische technologie – maakt het me mogelijk om een breed veld te overzien en te beoordelen, maar ook onderwerpen dieper te analyseren. Ook vele anderen hadden het boek kunnen schrijven. Ik hoop het onderwerp recht te doen.

## 1.1 De behoefte aan materialen

Voedsel, energie en materialen hebben we nodig om te leven. Allereerst zijn er allerlei basisbehoeften. Daaronder vallen behalve voedsel en energie – voor verwarming en koken – ook materialen, bijvoorbeeld voor de bouw van huizen en voor kleding. Maslow ontwikkelt in 1943 zijn behoeftepiramide. Hij onderscheidt vijf soorten universele behoeften van de mens:

1. lichamelijke behoeften – ademhalen, eten en drinken, seks, slapen, kleden en onderdak, maar ook bijvoorbeeld sport en comfort;
2. de behoefte aan veiligheid en zekerheid – lichamelijke veiligheid, werkzekerheid, gezondheid, beschermd eigendom (huisvesting);
3. sociale behoeften – vriendschap, liefde, familie, seksuele intimiteit;
4. behoefte aan waardering – erkenning, vertrouwen, respect voor jezelf en anderen;
5. behoefte aan zelfverwerkelijking – persoonlijke ontwikkeling, creativiteit, spontaniteit.

Voor de meeste behoeften zijn ook materialen nodig. De behoeften worden op volgorde vervuld, te beginnen bij 1 olopend naar 5. Maar alle mensen hebben uiteindelijk alle vijf types behoeften. Zelfs de oermens is waarschijnlijk niet alleen bezig geweest met overleven en voedsel verzamelen, maar ook met zelfverwerkelijking door religie en kunst zoals tekenen, muziek en dans. In de loop van de tijd heeft de mens geleerd om zijn milieu steeds meer naar zijn hand te zetten. De gereedschappen en materialen die daarvoor nodig zijn worden steeds geavanceerder en hebben de naam gegeven aan verschillende ontwikkelingsstadia van de mens, zoals de steentijd, de bronstijd en de ijzertijd.

Tot aan de industriële revolutie (1760) blijft de behoefte aan materialen bescheiden en binnen de grenzen van de draagkracht van de aarde. Grondstoffen voor energie en materialen zijn beperkt beschikbaar: hout en turf voor energie; hout, metalen, wol, steen, keramiek en glas voor materialen. Maar vanaf de industriële revolutie ontstaat eerst een geleidelijke en dan een steeds snellere groei van het verbruik van energie en grondstoffen op basis van de overvloedige en steeds goedkopere fossiele grondstoffen. De welvaart groeit: na vervulling van de elementaire behoeften (voldoende voedsel, warmte, kleding, beschutting) blijft er steeds meer geld over. Waar vroeger alleen adel voldoende rijk was om zich met weelde of luxe te omringen, houden nu

ook burgers – eerst alleen de rijkste en daarna steeds grotere groepen – geld over na vervulling van de meest primaire levensbehoeften. Dat geld gaat naar voedsel, energie en materialen. Meer en gevarieerder voedsel; dit leidt tot minder honger en betere gezondheid. Meer energie, voor bijvoorbeeld verwarming en een minder vochtige en gezondere woonomgeving, maar ook voor verlichting, waardoor de dag verlengd kan worden. En later voor mobiliteit. En ook: meer en betere materialen. Materialen worden gebruikt voor alle mogelijke behoeften in de piramide van Maslow, van geneesmiddelen (gezondheid) tot een lekker matras (slapen, comfort), van hardloopschoenen (sport) tot muziekinstrumenten (zelfverwerkelijking).

Naarmate er meer geld over is en materialen heel goedkoop worden, komt ook verspilling om de hoek kijken. En bij verspilling gaat het niet meer om het bevredigen van de Maslow-behoeften, het gaat voorbij zelfverwerkelijking. De behoefte tot verspilling is een activiteit die Maslow niet aan zag komen. We kunnen nu meer uitgeven en meer consumeren dan we nodig hebben, uit een soort gulzigheid. We kunnen meer voedsel nuttigen dan we nodig hebben, en meer ‘slechte’ dingen eten: te zoet en zout (onder andere snoep) en te vet (onder andere vlees en alcohol). Obesitas, suikerziekte en hart- en vaatziekten zijn voor een groot deel welvaartsziekten die hiermee te maken hebben. Door overvloed aan voedsel ligt voedselverspilling op de loer. Onmatig gebruik geldt ook voor energie. Er lijkt geen grens te zijn aan onze mobiliteit met auto's en vliegtuigen. Letterlijk: *the sky is the limit*. Meer vakanties per jaar wordt normaal, en daarbij geldt: hoe verder weg hoe beter. Infrarood kachels maken het mogelijk in de winter horeca buiten te gebruiken.

Ook bij materialen, onze spullen, speelt verspilling een rol. Denk aan aankoop van overmatige hoeveelheden kleding en schoenen. Veel waren van slechte kwaliteit worden goedkoop gekocht (fast fashion), weinig gebruikt en gemakkelijk, soms onversleten, weer weggegooid. We worden verleid door reclame om iets wat goed is, te vervangen door iets wat nog beter lijkt te zijn. Banken helpen ons om op krediet te kopen. We zijn uit op de nieuwste smartphone, de laatste mode, de nieuwste auto, een upgrade van de keuken of badkamer, eindelijk nieuwe meubels. Veel mensen houden van shoppen. Zo produceren we ook veel afval. Wie zonder zonde is werpe de eerste steen.

## 1.2 Materialen en broeikasgassen

Vrijwel altijd komt er CO<sub>2</sub> vrij bij de productie en het transport van materialen, omdat daarvoor fossiele energie wordt gebruikt. Daarnaast leveren de koolstofhoudende producten nog extra CO<sub>2</sub> op, omdat ze na vaak kortdurend gebruik (veelal binnen één jaar) afgedankt worden en in CO<sub>2</sub> worden omgezet in een vuilverbrandingsoven, een rioolzuiveringsinstallatie of in het milieu.

Als materialen gemaakt worden uit natuurlijke, groene oftewel biograndstoffen, die via fotosynthese gemaakt zijn uit CO<sub>2</sub>, dan is er sprake van een kringloop van CO<sub>2</sub> en wordt er geen extra CO<sub>2</sub> bij gevormd, het gehele proces heet dan CO<sub>2</sub>-neutraal. Als ze daarentegen gemaakt worden uit fossiele grondstoffen, dan is er sprake van CO<sub>2</sub>-productie. Soms hebben materialen een lange levensduur, veel meer dan één jaar, soms tot wel honderd jaar of meer. Bij dit duurzamere gebruik van materialen komt er bijna geen CO<sub>2</sub> vrij vanuit fossiele grondstoffen, maar hebben groene grondstoffen nog steeds het CO<sub>2</sub>-voordeel: zij leggen dan CO<sub>2</sub> vast in materialen (zie TABEL 1.1). Bewuster met materialen omgaan kan dus soms leiden tot een daling in plaats van een stijging van de CO<sub>2</sub>-productie, zoals bij duurzaam houtgebruik of de productie van duurzame plastics uit biovoedingen.

TABEL 1.1

Het effect van type grondstof op de CO<sub>2</sub>-productie.  
NB: bij materialenproductie wordt ook energie verbruikt die voor extra CO<sub>2</sub>-emissie zorgt; dat is in deze tabel niet meegenomen.

Grondstoffen voor materialen	Verbranding na:	
	Kortdurend gebruik (1)	Langdurig, duurzaam gebruik (2)
fossiel	toename van CO <sub>2</sub> -productie (meest voorkomend)	bijna CO <sub>2</sub> -neutraal
natuurlijk	CO <sub>2</sub> -neutraal	afname van CO <sub>2</sub> -productie, CO <sub>2</sub> -negatief

(1) Meestal veel korter dan één jaar.

(2) Meestal veel langer dan tien jaar.

Naast CO<sub>2</sub> zijn er ook andere broeikasgassen. De belangrijkste zijn methaan, lachgas en fluorhoudende stoffen (zie TABEL 1.2). Ze komen in wisselende hoeveelheden vrij bij de winning en verbranding van fossiele brandstoffen, bij landbouw, in de industriële productie, bij consumenten en afvalverwerking. Bij materialenverbruik gaat het behalve om CO<sub>2</sub> ook om de uitstoot van al deze drie broeikasgassen. Methaan, als bijproduct van vele activiteiten bij winning en gebruik van fossiele stoffen, en als product van vergisting op afvalstortplaatsen. Lachgas, als bijproduct van sommige chemische processen, voor de productie van salpeterzuur, adipinezuur en hydroxylamine. Fluorchemicaliën dragen bij via lekkage van koelmiddelen.

*Ook waterdamp houdt warmte vast, maar wordt toch niet benoemd als broeikasgas, omdat het niet onafhankelijk bijdraagt aan de opwarming van de aarde. Waterdamp is niet de oorzaak van het broeikaseffect, maar zorgt voor een versterking van het effect van de echte broeikasgassen: doordat bij hogere temperatuur meer water verdampt, wordt het broeikaseffect vergroot.*



TABEL 1.2

Overzicht van de bijdrage van de verschillende broeikasgassen aan het broeikaseffect (2017). Bijdrage van diverse bronnen aan de productie van specifieke broeikasgassen: +++ dominante rol, ++ grote rol, + beperkte rol.

Broeikasgas	GWP (1)	Concentratie in de atmosfeer (ppmv)	Bijdrage (% van totaal CO <sub>2</sub> -equivalent) (2)	Bronnen		
				Fossiele brandstoffen	Landbouw (inclusief veeteelt en ontbossing)	Overigen: industrie, consument, afval, divers
kooldioxide	1	410	72	+++	++	+
methaan	28	1,9	19	++	++	+
lachgas	265	0,33	6	+	+++	+
fluorhoudende gassen	116-23500	circa 0,001	3			+++

- (1) GWP: *Greenhouse Warming Potential*, opwarmpotentieel van stoffen gedurende honderd jaar na emissie, in vergelijking tot CO<sub>2</sub> (IPCC, 2014). De GWP moet je vermenigvuldigen met de concentratie van de stof in de lucht om de bijdrage aan het broeikaseffect uit te rekenen; de GWP van CO<sub>2</sub> is weliswaar heel laag, maar de concentratie van CO<sub>2</sub> is heel hoog.
- (2) Olivier & Peters (2020; daarin: tabel 2.1). Totaal 54,6 Gt (miljard ton) CO<sub>2</sub>-equivalenten in 2017. 'Equivalent' betekent dat gecorrigeerd is voor verschillen in effectiviteit (GWP) als broeikasgas, waarbij alle gassen omgerekend zijn naar de effectiviteit van CO<sub>2</sub>.

### 1.3 Materialen in allerlei soorten

Materialen zijn meestal vaste stoffen, stoffen die je veilig vast kunt pakken, maar ze kunnen ook vloeibaar zijn, zoals verf of wasmiddelen. In uitzonderlijke gevallen kunnen ze zelfs (deels) gasvormig zijn, zoals koelmiddelen. Veel stoffen bestaan uit metaal, glas, keramiek en beton. Steeds meer stoffen worden gemaakt uit koolstof, zoals de plastics.

Materialen vormen een grote familie van zeer verschillende stoffen. Ze kunnen gebruikt worden als bouwmaterialen voor huizen en bedrijven, voor keukens en badkamers; als energiematerialen, voor energie-isolatie, windmolens, zonnepanelen, accu's, batterijen, warmtepompen en ledlampen; als vezels voor kleding en ander textiel; als rubber en leer voor schoeisel; als materialen voor vervoersmiddelen zoals auto's, treinen, schepen, fietsen en e-bikes. En als verpakkingsmateriaal.

Veel materialen zijn consumentenartikelen. Ze worden gebruikt voor wonen: meubilair, verlichting, verf, tapijt, gordijnen, bedden met matrassen en kussens; voor koken en eten: apparaten zoals fornuis, magnetron, koelkast/vriezer en afwasmachine, en vele andere, vaak elektrische keukenapparaten zoals koffiezetapparaat en airfryer. Er zijn materialen voor hygiëne en reiniging, zoals zeep, wasmiddel en scheerapparaat, en witgoed, zoals wasmachine en wasdroger. Er zijn ook materialen voor persoonlijke verzorging, zoals cosmetica en reukstoffen. Denk ook aan

communicatiegoederen, waaronder kranten, tijdschriften, reclamedrukwerk en veel elektronica: radio en tv, computers/internet, smartphones, printers. En denk aan vrijetijdsbesteding en hobby's, zoals sportartikelen, foto-/filmattributen, muziek-cd's en -instrumenten.

Er zijn nog meer categorieën materialen. Er zijn veel hulpstoffen nodig zoals kleurstoffen, weekmakers, brandvertragende stoffen, voedseladditieven, koelmiddelen en katalysatoren. Verder zijn er geneesmiddelen, anticonceptie en medische hulpmiddelen; landbouwmaterialen zoals kunstmest, landbouwchemicaliën,<sup>1</sup> landbouwplastic, machines. Er zijn ook drogerende, vaak verslavende materialen, die ons van de werkelijkheid wegleiden, zoals soft- en harddrugs, tabak en alcohol. En tot slot oorlogsmaterialen, waaronder veel voertuigen en ander wapentuig, munitie en oorlogsgassen.<sup>2</sup>

Allerlei grondstoffen worden gebruikt: zowel anorganische, niet-koolstofhoudende stoffen zoals mineralen en metalen, als organische, koolstofhoudende stoffen, van fossiele of natuurlijke bron. Er zijn maar weinig stoffen die onbewerkt gebruikt kunnen worden in de vorm zoals ze in de natuur voorkomen. Meestal is mechanische bewerking nodig: hakken, splijten, zagen, snijden, boren, vervezelen of persen. Vaak zijn er chemische bewerkingen nodig en die gebeuren zowel buiten als binnen wat we de 'chemische industrie' noemen. Buiten de chemische industrie wordt veel chemie gebruikt, bijvoorbeeld bij extractie van metalen in mijnbouw, reductie van ertsen tot metalen, bereiding van cement en beton, en productie van glas, bakstenen, keramiek en papier. Binnen de chemische industrie vindt nog meer chemie plaats. Ook de meeste groene, milieuvriendelijke producten zijn vaak met behulp van chemie geproduceerd.

In de petrochemie worden eindproducten gemaakt via vele tussenproducten, door gebruikmaking van meerdere processen in serie, waarbij meerdere chemische reacties (synthesen) worden uitgevoerd. Die tussenproducten komen nooit op de markt voor consumenten en worden vaak chemicaliën genoemd. De eindproducten van de chemie zijn natuurlijk ook chemicaliën (namelijk: stoffen door chemie gemaakt), maar ze worden zelden zo genoemd, wanneer ze niet als zodanig herkend worden en zonder voorzorgen veilig gebruikt kunnen worden, zoals wasmiddelen of

---

1 | Behalve kunstmest worden vooral stoffen bedoeld die leven selectief doden: herbicides (onkruidverdelgers), fungicides (schimmeldodende stoffen), stoffen voor bodemontsmetting (tegen aaltjes), pesticiden om insectenplagen te bestrijden. Door voorstanders en industrie betiteld als 'gewasbeschermings- of bestrijdingsmiddelen'. Door critici 'landbouwgif' genoemd. Ik noem ze in dit boek relatief neutraal 'landbouwchemicaliën'.

2 | Chemicaliën die gebruikt worden bij oorlogsvoering. Giftige stoffen die doden, verstikken of het zenuwstelsel aantasten, wereldwijd verboden per verdrag (1997). Eufemistisch 'chemische wapens' of 'strijdgassen' genoemd. Door critici 'gifgassen' genoemd. In dit boek noem ik het 'oorlogsgassen'.

plastics. Overigens, niet alle eindproducten zijn veilig. Denk aan medicijnen, drugs, landbouwchemicaliën, explosieven en oorlogsgassen.

## 1.4 Materialen en materialentransitie

In dit boek gebruik ik het woord ‘materialen’ als overkoepelend woord voor de hele familie van stoffen. En voor de benaming van de gewenste transitie gebruik ik ‘materialentransitie’. Er zijn meer woorden die een beschrijving van stoffen kunnen geven, zoals ‘producten’, ‘goederen’, ‘spullen’, ‘waren’, soms ook ‘chemicaliën’, maar het woord ‘materialen’ lijkt het meest passend.

Materialen onderscheiden zich van twee grote, andere categorieën: voedsel en brandstoffen. Verder geeft het woord ‘materialen’ het meest van alle woorden aan dat het gaat om stoffen in brede zin, die nuttig toegepast kunnen worden, in allerlei functies en in alle aspecten van ons leven. ‘Materialen’ staat in dit boek voor alle, meestal vaste, stoffen met nuttige (of minder nuttige) toepassingen, uitgezonderd voedingsstoffen en brandstoffen. ‘Spullen’ is een populairdere, iets denigrerende beschrijving van materialen en is gebruikt voor de ondertitel van het boek. Het woord ‘spullen’ geeft aan dat we soms materialen gebruiken die we minder nodig hebben. Een woord dat ook aangeeft dat we minder kunnen en moeten gebruiken, dat we afscheid moeten nemen van onnodige materialen, dat we moeten ‘ontspullen’ en vooral minder spullen moeten kopen.

Het woord ‘materialentransitie’ wordt niet vaak gebruikt in publicaties, en dan meestal nog in beperkte zin: bijvoorbeeld voor het benoemen van deelonderwerpen, zoals de circulaire economie, de waterstofeconomie, de recycling van materialen, de afvalproblematiek van met name plastics, of de uitputting van grondstoffen. Vaak is ook de bredere context niet duidelijk: het belang van zo’n onderwerp binnen het geheel van de materialentransitie. In dit boek gebruik ik het begrip ‘materialentransitie’ in bredere zin. Zoals het woord ‘energietransitie’ wordt gebruikt voor de overgang naar een duurzame energievoorziening, zo is de materialentransitie de overgang naar duurzaam gebruik van materialen, met alles wat nodig is om dat voor elkaar te krijgen, van grondstof tot en met afval, als onderdeel van de klimaattransitie.

Het bevorderen van duurzaamheid (sustainability) is waar we het over hebben bij de materialentransitie. Duurzaamheid komt op de kaart door het rapport-Brundtland (1987). Duurzame ontwikkeling wordt in dit rapport gedefinieerd als: ontwikkeling die aansluit op de behoeften van het heden zonder het vermogen in gevaar te brengen van toekomstige generaties om in hun eigen behoeften te voorzien. ‘Duurzaam’ is vooral een ecologisch en biologisch begrip: een duurzaam biologisch systeem is voor onbepaalde tijd divers en productief. Duurzaamheid gaat bij materialen om zo zuinig mogelijk grondstoffen verbruiken en gebruikmaken van

herwinbare (hernieuwbare) bronnen, zodat er geen sprake is van uitputting; en om materialen met een lange levensduur, met zo min mogelijk verbruik. In zeer brede zin wordt onder duurzaamheid veel meer begrepen, waaronder bijvoorbeeld het voorkomen van armoede, honger en slechte arbeidsomstandigheden bij productie van materialen. De VN heeft in 2015 zeventien *Sustainable Development Goals* vastgelegd, met concrete doelstellingen voor 2030.

## 1.5 De bijdrage van materialen aan het klimaatprobleem

Materialen, onze spullen, dragen op verschillende manieren bij aan het broeikas-effect, met name via de productie van CO<sub>2</sub>. Fossiele *grondstof* is nodig voor de koolstofhoudende materialen, zoals plastics. Deze materialen worden vroeger of later weer verbrand, waarbij CO<sub>2</sub> vrijkomt. Fossiele *brandstof* wordt verbruikt bij de productie van alle materialen, op basis van fossiele en natuurlijke grondstoffen, metalen en mineralen. Verbruik van fossiele *brandstof* vindt ook plaats buiten de eigenlijke materialenprocessen om, bij mijnbouw, de productie en het vervoer van grondstoffen en het vervoer van producten tussen fabrieken en van fabriek via tussenhandel naar consument.

TABEL 1.3 laat zien dat het verbruik van fossiele *grondstof* 928 of 1251 Mtoe per jaar is, afhankelijk van het al dan niet meerekenen van het gebruik van steenkool voor staalproductie. Het betreft 15% van alle aardolie, 7% van het aardgas en 1-10% van de steenkool. Dat is in totaal 8-11% van alle fossiele voedingen (11.533 Mtoe), zeg afgerond 10%. Daarnaast is er een veel grotere hoeveelheid fossiele *brandstof* benodigd voor de productie en het transport van materialen. De energie voor de productie van materialen is vervat in de sector industrie. Daarnaast is ook een deel van de sector transport materiaalgerelateerd, en wel het transport van grondstof, tussen- en eindproducten.

TABEL 1.4 berekent de huidige wereldwijde bijdrage van materialen aan het klimaatprobleem. 94% van de grondstoffen wordt gebruikt voor materialen, 6% is benodigd voor ammoniakmest die meer hoort bij de voedselproductie. De bijdrage van transport aan materialen is grof geschat op 15% van alle transport: 70% is personenvervoer, 30% is vrachtvervoer, waarvan circa de helft voor materialen. Verder hebben koolstofhoudende materialen (op basis van fossiele grondstoffen) in het algemeen niet het eeuwige leven. De gebruikstijd ligt tussen minder dan één maand (denk aan schoonmaakmiddelen, oplosmiddelen en verpakkingen) en tientallen jaren (vloerbedekking, raamkozijnen), maar uiteindelijk wordt bijna alles weer omgezet in CO<sub>2</sub>: in het milieu, bij afvalwaterzuivering of als vast afval bij ongecontroleerde verbranding op stortplaatsen en in vuilverbrandingsinstallaties. In de tabel is aangenomen dat momenteel zo'n 80% van de productie van

koolstofhoudende materialen wordt verbrand tot CO<sub>2</sub>, zij het met een vertraging van maximaal tien jaar.

In totaal lijkt het bij materialen te gaan om zo'n 17,2 Gt (miljard ton) CO<sub>2</sub>-productie en 3,9 Gt CO<sub>2</sub>-equivalent van de andere broeikasgassen. Vergeleken met de totale CO<sub>2</sub>-emissie van 40,6 Gt is dat 42% van alle CO<sub>2</sub>-productie. Vergeleken met het totaal aan broeikasgassen van 54,6 Gt CO<sub>2</sub>-equivalent is het 39% van het totale broeikaseffect. Verder is het de verwachting dat het verbruik van met name de petrochemische producten sterk zal blijven toenemen. Zo is de productie van plastics in het verleden ruim 5% per jaar gegroeid, en daarmee elke 13 jaar verdubbeld. Voor de toekomst is een verdere toename met een factor 4 voorspeld: van 311 Mta (miljoen ton per jaar) plastics in 2014 naar 1112 Mta in 2050 (Ellen MacArthur Foundation, 2018). Dat leidt dan zonder gewijzigd beleid ook tot verdere groei van het verbruik van fossiele grondstoffen voor materialenproductie. Zo zou

**TABEL 1.3**

Overzicht van de primaire inzet en het verbruik van de fossiele brand- en grondstoffen, per sector wereldwijd in 2018  
(*Total Final Consumption; IEA, Fuels and technologies*).

Inzet per sector:	Gebruik van fossiele brand- en grondstoffen (Mtoe of miljoen ton olie-equivalent)				
	Totaal (1)	Direct (2)			Indirect, als elektriciteit (3,4)
		Steenkool	Aardolie (6)	Aardgas (7)	
industrie	3165	797	290	659	805
transport	2839	0	2650	129	34
gebouwen	1736	75	218	531	517
grondstof (voor petrochemie)	928 (8)	52 (8)	662	214	0
commerciële en openbare dienstverlening	1066	30	79	229	413
landbouw en bosbouw	242	16	111	11	59
diversen	212	25	21	4	92
totaal gebruik	10188	995	4031	1777	1920
aandeel van fossiele brandstoffen in elektriciteitsverbruik (1)		2297	176	1389	
primaire/totale inzet van fossiele brandstoffen (5)	11533	3885	4452	3196	

(1) Inclusief 64% energieverliezen bij elektriciteitsproductie.

(2) Direct = exclusief gebruik voor elektriciteit.

(3) Exclusief 64% energieverliezen bij elektriciteitsproductie.

(4) Inclusief bijdrage van niet-fossiele energiebronnen (33%); 1 Mtoe = 11640 GWh elektriciteit.

(5) Inclusief verliezen onderweg bij productie van warmte (15%) en elektriciteit (64%).

(6) Inclusief aardgascondensaat.

(7) Exclusief aardgascondensaat; 1 Mtoe aardgas = 42180 TJ.

(8) Exclusief 323 Mtoe steenkool voor ijzer- en staalproductie.