Econatuurkunde

oftewel

De entropie van het gazon

Voordracht

gehouden op 29 November 1995

door

J. Lyklema

bij zijn afscheid als hoogleraar in de
Fysische en Kolloidchemie aan de
Landb

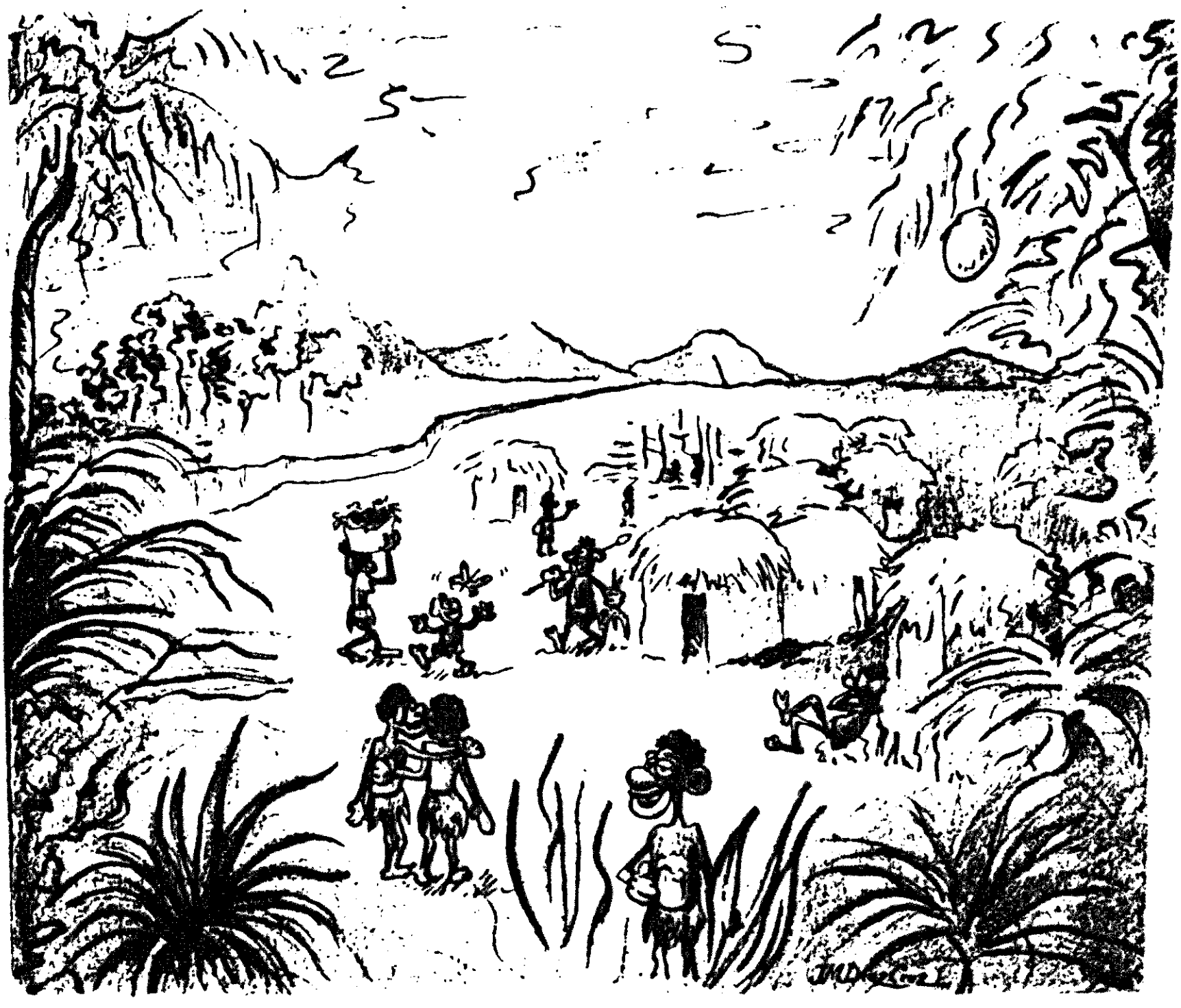
Zesduizendtweehonderdvijftien jaar geleden

Het gebeurde zesduizendtweehonderdvijftien plus of minus honderdzestig jaar geleden. De plaats van handeling: centraal Afrika.

–6215±160 jaar

Figuur 1.

Er woonde daar destijds een stam waarmee het niet slecht ging. Men deed aan primitieve landbouw, er was redelijk wat wild voorhanden, in de bossen



Figuur 2.

rondom konden voedzame noten gevonden worden en de rivier waaraan ze woonden bevatte, zelfs in de droge tijd, water en vis. Zodoende was er sprake van een zekere economische vooruitgang. Ook nam de bevolking toe en zo zien we op fig. 2 een vredig tafereeltje[1].

Op de achtergrond ontwaren we een nieuwe woonwijk in aanbouw. Laten we die nieuwbouw in wat meer detail bekijken. In fig. 3 constateren we dat hier een jonge inwoner bezig is de fundamenten te leggen voor een woning voor hem en zijn aanstaande gezin.

Figuur 3.

Nu mag niet iedereen zomaar overal een huis bouwen, en vroeger kon dat ook niet. Om een bouwvergunning te krijgen is onze man dan ook eerst naar het stamhoofd gestapt, die op zijn beurt het strategisch plan raadpleegde. Nu

---

1) De cartoons in deze voordracht zijn getekend door José-Manuel Diaz-Cruz, Barcelona, Spanje.

was het in die tijd gewoonte dat op het moment dat afspraken moesten worden nagekomen eerst een uitvoerige aanpassing plaatsvond. Voor onze man kwam dat goed uit, want het definitieve bestemmingsplan was in het belang van de vooruitgang juist de vorige avond herijkt. Het stamhoofd verleende dan ook de gevraagde toestemming met de toevoeging dat de bouwer zich diende te houden aan alle regels die "krachtens wet of gewoonte uit zo'n vergunning voortvloeien of zullen voortvloeien".

Onze hoofdpersoon wist wat dat inhield, en zo zien wij hem hier drie vissen klaarleggen om weldra ingegraven te worden bij de eerste paal. En passant valt ons op dat de poes van de buren een meer consumptieve opvatting heeft over de bestemming van de vissen. Op de volgende cartoon zien we dat een compromis tussen consumptie en meer idiële motieven tot stand kwam.

Figuur 4.

Vanwaar deze vissen en om wat voor principes gaat het? Tegenwoordig doen wij zoiets niet meer; het huidige pannenbier heeft een puur consumptieve achtergrond, en we graven geen vissen in bij het leggen van de eerste steen (wat zelden de eerste is). Wat begreep men vroeger niet dat wij nu wel begrijpen? Of begreep men vroeger iets wel dat wij nu niet meer herkennen?

Dank zij gedegen oudheidkundig onderzoek is de achtergrond van het vis-ter-aarde-bestellingsritueel nu bekend. Het was een mythische handeling, lang geleden door goden voorgedaan en de burgers werden geacht zich aan deze regel te conformeren. De achtergrond was, dat het bouwen van een woning feitelijk inbreuk maakt op de natuur. De natuur moest hierbij een klein stapje terug terwille van de vooruitgang en om de natuurgeesten niet al te veel te verontrusten was een offer nodig. Dat offer had een symbolische betekenis; of het nu drie of twee vissen waren, of nog iets anders, deed er niet zoveel toe. Het ging om het principe.

Waarom dit verhaal? Omdat het een zeer fundamenteel probleem der huidige beschaving aansnijdt, namelijk dat van het omgaan van de mens met zijn leefomgeving. Een actueel thema: kranten en tijdschriften rapporteren er regelmatig over. Heeft een natuurwetenschapper er ook iets principiëels over te zeggen? Iets dat uitstijgt boven het geven van getallen of technische oplossingen van alledaagse problemen? Ik zal proberen hierop een bevestigend antwoord te geven.

Uitdagingen voor de fysico-chemicus

In de beginjaren van mijn hoogleraarsbaan in Wageningen heb ik veel gediscussieerd met vakgenoten en niet-vakgenoten over de waarde van natuurwetenschappelijke principes bij het begrijpen van het natuurgebeuren.

Sommigen van hen beschouwden de aanwezigheid van een fysico-chemicus als pure genade: omgaan met de levende natuur is immers het enige ware. Met name denk ik terug aan gesprekken met mijn vroegere college De Wilde, de entomoloog. Hij vond ons, natuurwetenschappers, wel nuttig omdat we vaktechnische bijdragen leverden aan de opleiding van meer biologisch georiënteerden, maar keek toch wat neer op de grondprincipes van waaruit we opereerden omdat je er weinig mee zou kunnen beginnen als het om het echte leven ging. Laat ik eens drie van zijn uitspraken - of noem het gerust uitdagingen - de revue laten passeren, zoals ik ze me herinner.

1. Jullie hebben geen begrip voor de variabiliteit van de natuur.

2. Het beste wat jullie nog hebben is de onzekerheidsrelatie van Heisenberg; dat is goed voor jullie bescheidenheid.

3. Aan de Hoofdwetten der thermodynamica heb je helemaal niets omdat ze alleen achteraf zeggen of iets gekund had.

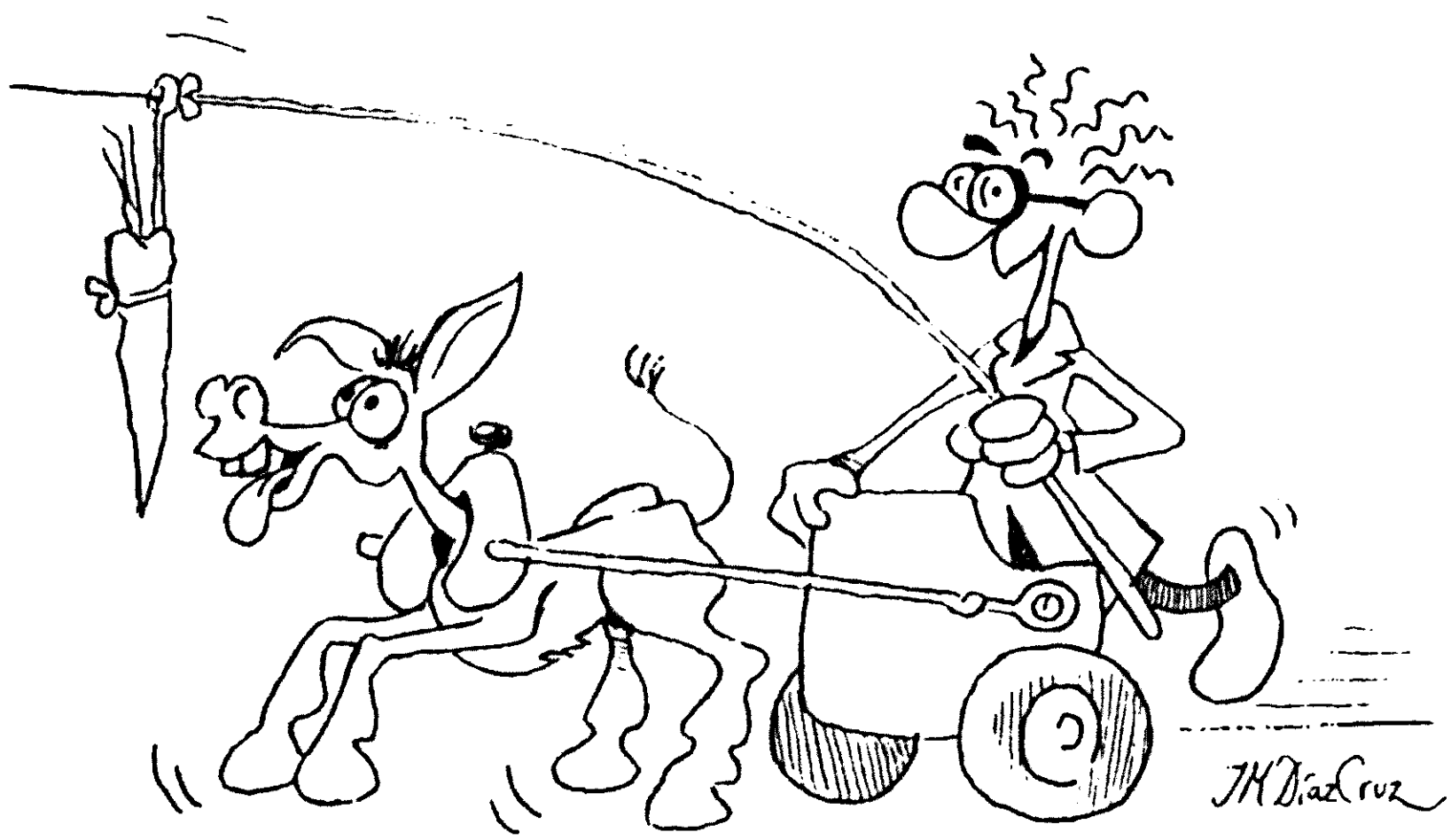
Figuur 5.

Of ik nú denk dat hij toen gelijk had? In elk geval wel t.a.v. punt (1); het beste bewijs daarvoor is dat onder natuurwetenschappers het percentage echtscheidingen relatief gering is. Punt (2) is retoriek. Het Heisenberg principe zegt exact hoe nauwkeurig je van een deeltje tegelijk plaats en snelheid kunt meten; je zou het met hetzelfde recht een zekerheidsrelatie hebben kunnen noemen. Net zo goed als zesduizendtweehonderdvijftien plus of min honderdzestig nauwkeuriger is dan zesduizendtweehonderdvijftien jaar geleden. Daar wil ik het nu niet verder over hebben.

Wel over die *thermodynamische Hoofdwetten.* Wat zijn dat voor wetten en wat hebben we er aan voor het dagelijkse leven?

Hoofdwetten

De Hoofdwetten van de thermodynamica zijn twee natuurwetten waarvan de geldigheid algemeen geaccepteerd is. De status ervan is vergelijkbaar met die van, bijvoorbeeld, de biologische Hoofdwet dat elk menselijk wezen sterfelijk is. Aangezien nog nooit gebleken is dat een van deze Hoofdwetten niet zou opgaan moeten we er mee leren leven, of we willen of niet. In het sociale en politieke verkeer hebben we niet de vrijheid om te stemmen over de vraag wie voor of tegen deze wetten is. Dat kon zesduizendtweehonderdvijftien jaar geleden ook niet en over zesduizendtweehonderdvijftien jaar liggen de kaarten niet anders[1].



Figuur 6.

---

[1] We beschouwen geen extreme omstandigheden, zoals tijdens de oerknal. Ook zal ik de omzetting van energie in massa, en omgekeerd, nu niet aan de orde stellen.

De Eerste Hoofdwet

De Eerste Hoofdwet is tamelijk algemeen bekend als de *Wet tot behoud van energie*. Energie kan niet uit het niets ontstaan of in het niets verdwijnen. We weten dat dat zo is, omdat we geen *perpetuum mobile* kunnen maken, dat is een apparaat dat arbeid verricht zonder energiebron. Mijn cartoonist heeft in fig. 6 een humoristisch voorbeeld getekend van iets wat op een perpetuum mobile lijkt maar het niet is: er wordt wel degelijk energie toegevoerd, en wel via het voedsel voor het paard. Een koets die zonder energiebron alsmaar door kan blijven rijden kunnen we niet maken. Wat we wél kunnen is verschillende vormen van energie in elkaar omzetten, of in warmte. Zonne-energie (stralingsenergie) kan, in een zonnecel, omgezet worden in elektrische. Planten kunnen zonne-energie omzetten in chemische door grote "energierijke" verbindingen te maken (fotosynthese). In een straalkacheltje kunnen we elektrische energie in warmte omzetten en in een benzinemotor wordt chemische energie in mechanische (en een heleboel warmte) omgezet. Al deze omzettingen moeten aan de Eerste Hoofdwet voldoen, als samengevat in fig. 7.

De Eerste Hoofdwet

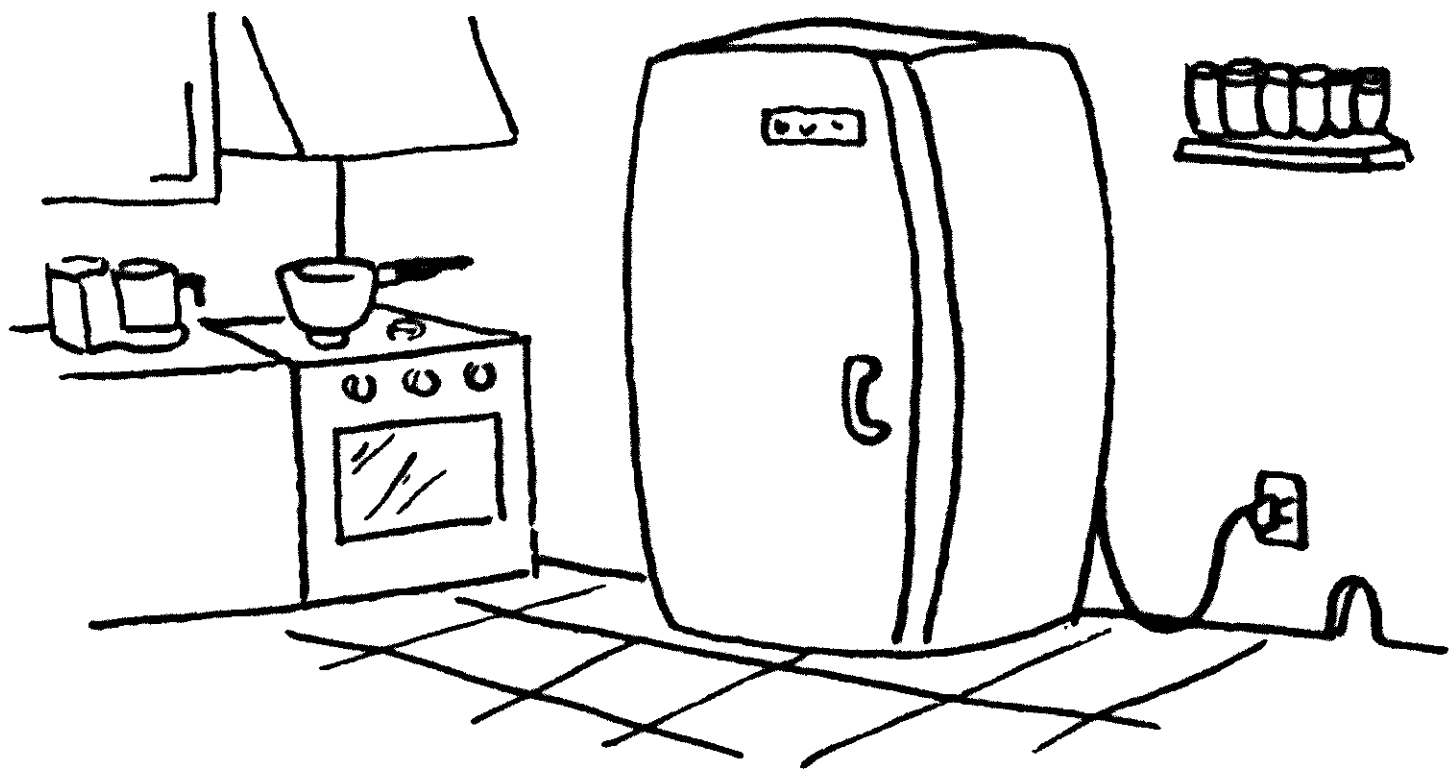
Waarneming: Men kan geen perpetuum mobile maken (dat is een machine die arbeid levert zonder externe energiebron).

Korte formulering: Energie (U) kan niet uit niets ontstaan of in het niets verdwijnen (behoud van energie).

(N.B. Aanpassing formulering voor omzetting massa $\rightleftarrows$ energie.)

Figuur 7.

In de tijd dat ik de propaedeutische colleges fysische chemie gaf heb ik vaak de volgende illustratie gegeven. (Sommigen van U zullen het zich herinneren.) Stelt U zich een kamer voor, die goed van de omgeving is



Figuur 8.

geïsoleerd, inclusief het muizegat zodat er geen warmte in of uit kan. In die kamer staat een werkende koelkast. Nu zetten we de deur van die kast open. De vraag is: wordt het in de kamer warmer of kouder? En hoe veel?

Een beetje ingenieur rekent dat zó voor ons uit. Hij moet daartoe vaststellen hoeveel warmte in het koelaggregraat aan de achterkant wordt ontwikkeld en nagaan of dat meer of minder is dan de warmte die "aan de koude kant" wordt onttrokken. Het kwantitatieve resultaat zal afhangen van het soort koelkast en de gebruikte materialen: de ene koelkast is nou eenmaal efficiënter dan de andere. Maar voor het beantwoorden van de kwalitatieve vraag of het in de kamer warmer of kouder wordt hebben we geen ingenieur nodig omdat de Eerste Hoofdwet daar meteen antwoord op geeft: de kamer is een afgesloten systeem waaraan energie wordt toegevoegd (via het elektrische net), zodat het in de kamer *warmer* moet

worden, en niet kouder. Een ingenieur die niet tot deze kwalitatieve conclusie komt moet zijn berekeningen overdoen. Of octrooi aanvragen op een perpetuum mobile.

De Eerste Hoofdwet in het dagelijks leven

Wat voor rol speelt de Eerste Hoofdwet in het dagelijks leven? Laten we bij die koelkast beginnen en dan de problematiek generaliseren.

In de eerste plaats konden we een uitspraak doen waaraan niet te tornen viel. In energetisch opzicht - en niet alleen daarin! - is een koelkast een milieu-onvriendelijk apparaat: er moet energie bij om hem aan de gang te houden en die energie komt uit eindige voorraden fossiele brandstof. Afgezien van apparaten die voor 100% op zonne-energie lopen, bestaan er principieel geen "groene" koelkasten, al is de ene zuiniger dan de andere. Wij mochten dit ex cathedra beweren omdat we er een algemener principe achter herkenden. Academischer gezegd: we beschouwden het probleem op een hoger niveau van abstractie.

Wat de alledaagse belevingswereld betreft ligt de zaak wat anders. Vrij veel mensen zullen van school nog wel weten dat je geen perpetuum mobile kunt maken. En dus wordt iemand die beweert dat wél te kunnen meewarig naar een zielknijper verezen. Maar of diezelfde Jan Alleman ook overal meteen die Eerste Hoofdwet *herkent* is zeer de vraag. Te meer, omdat het veel mensen niet goed uitkomt. En als iets je niet goed uitkomt ben je al gauw geneigd dat iets te bagatelliseren of te camoufleren met goedklinkende slogans.

Twee illustraties. Als u per trein van Wageningen naar Utrecht reist ziet U vlak voor U het station Utrecht binnenkomt aan Uw rechterhand het in fig. 9 weergegeven aankondigingsbord.

Figuur 9.

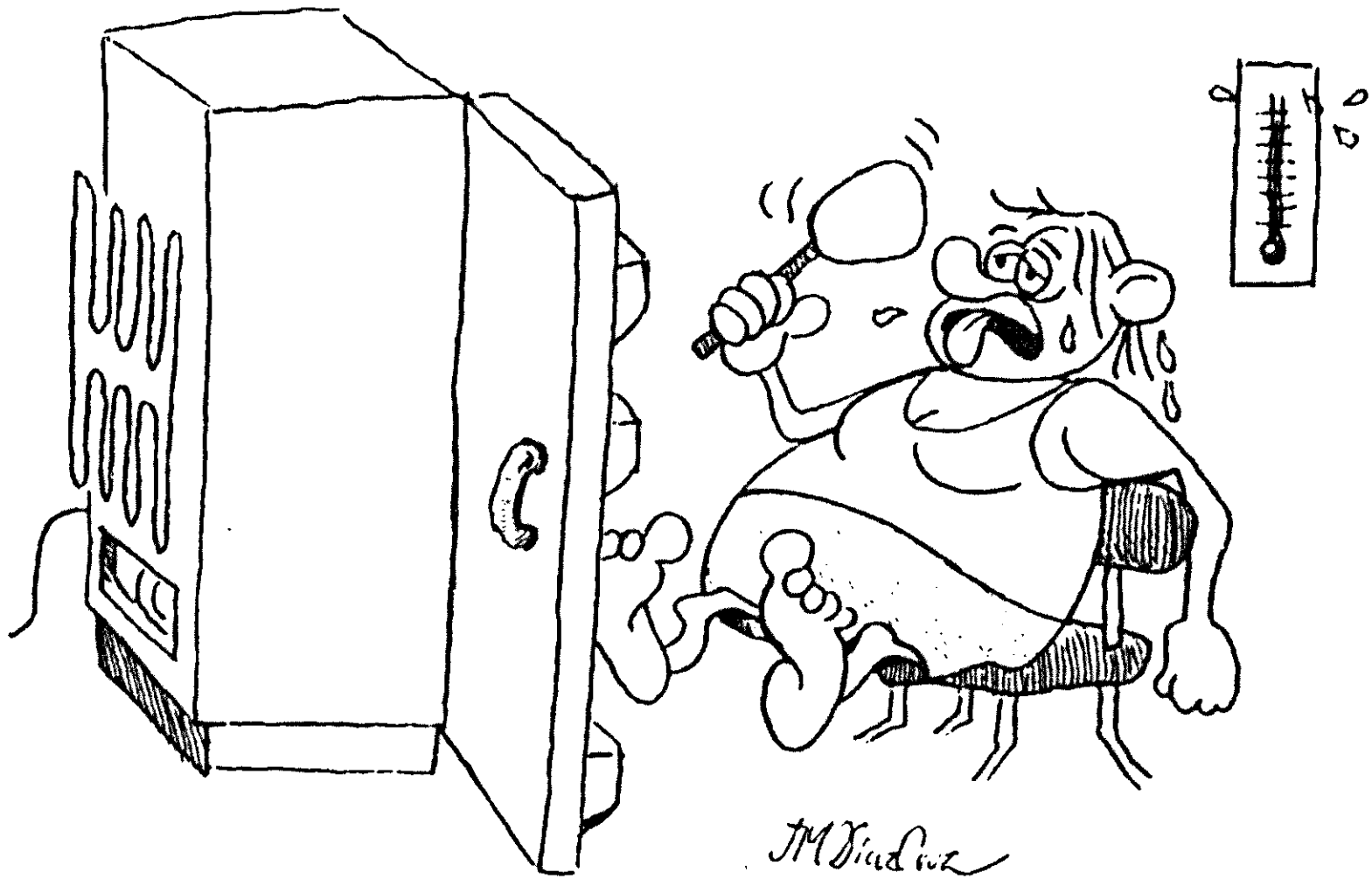
Fout natuurlijk. Ze produceren geen energie maar zetten het alleen maar om, onder andere in warmte. En als je dan toch iets kernachtigs wilt zeggen zou "energiedegradatiebedrijf" beter passen, want warmte is een lagere vorm van energie dan de chemische energie waaruit het is gemaakt. Maar ja dat verkoopt zo slecht.

Een tweede voorbeeld (zie fig. 10) is een recente advertentie (NRC Handelsblad-25 jan. 1995) waarin klanten wordt gesuggereerd dat je het milieu van dienst kunt zijn door een koelkast met een etiketje erop te kopen. Alweer fout. Natuurlijk is het deugdzaam om, als je een koelkast koopt, er een te kiezen met een groen etiket, maar de enige manier om echt het milieu te sparen is: geen koelkast kopen - en dus op warme dagen wat vaker op je fiets naar de supermarkt. Koop je, in de geest van de tijd, toch een koelkast, praat dan niet over je milieubewustheid, ook al zit er een groene sticker op.

AH-NRC 25 jan 1995

Figuur 10.

Mag ik naast dit commerciële aspect ook het sociale naar voren brengen en daartoe mijn tante aan U voorstellen. Zij is een struise Friezin met een warm hart; ze heeft veel voor anderen betekend. Nu ze een dagje ouder wordt loopt ze zo hard niet meer. Bovendien is ze wat aan de corpulente kant en heeft het al gauw te warm. Ze zoekt verkoeling door bij een geopende koelkast te gaan zitten. Met de thermodynamische kennis die wij bezitten weten we dat deze poging gedoemd is te mislukken. Mijn tante echter was van een eenvoudige structuur en kwam niet verder dan de constatering dat "de koelkasten niet meer zijn wat ze waren". Nu kende ze een maatschappelijk werkster die meer verstand van thermodynamica had, en het probleem herkende. Via de gemeenteraad wist ze middelen te



Figuur 11.

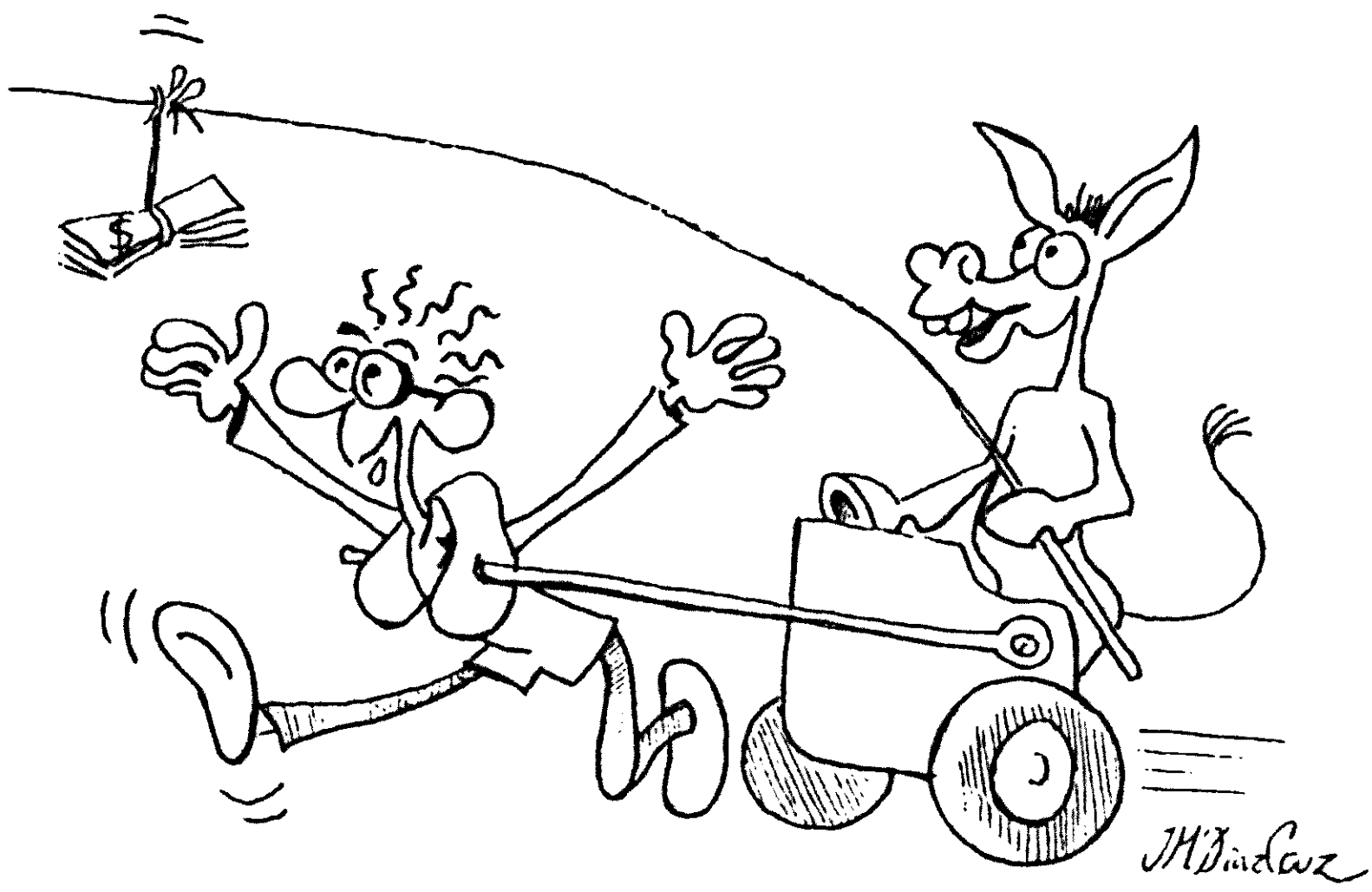
verwerven om mijn tante op medische indicatie aan een airconditioner te helpen. Daarmee was een sociaal probleem opgelost.

Opgelost? Nee, vooruitgeschoven!

Iemand die het nodig heeft krijgt een voorziening ten laste van de algemene middelen maar daarbij wordt wel een beroep gedaan wordt op de eindige hoeveelheid fossiele brandstof die we hebben. Dat betekent dat we met deze sociale voorziening middelen onttrekken aan de generaties na ons. Bijvoorbeeld aan de bewoners van Friesland over zesduizendtweehonderd-vijftien jaar. En die moeten nog geboren worden en kunnen dus niet meebeslissen. De sociale beslissing over mijn tante bergt daarom een verkapt ondemocratisch element in zich. Maar de meesten zijn zich daar niet van bewust. Als een natuurwetenschapper de aanschaf van deze airconditioner zou afstemmen door te wijzen op de Eerste Hoofdwet zou hem

schamper verweten worden geen verstand te hebben van sociale verhoudingen en beslissingen op dat gebied aan terzake deskundige over te laten.

In de genoemde gemeenteraad kwam het niet tot zo'n principiële discussie. Wel werd door een lid van de oppositie de vraag gesteld of iedereen dan recht had op zo'n milieu-onvriendelijk apparaat. Deze draad werd opgepakt door weer een andere gemeenteraadslid, die een prachtige kans zag om voor zijn partij een klinkend succes binnen te halen. Hij had zich zorgen gemaakt over het broeikaseffect en nu kwam hij met het lumineuze denkbeeld de atmosfeer af te koelen tot het gewenste niveau, en de aldus vrijgekomen energie te gebruiken voor de dagelijkse arbeid: openbaar vervoer, stadsverwarming, dienstreizen, koelkasten enz. Volgens de Eerste Hoofdwet moest dat kunnen: omdat energie onvernietigbaar is, is het immers mogelijk om energie volledig te recyclen! Toch klopte er iets niet. Het voorstel was namelijk in strijd met de *Tweede Hoofdwet.*



Figuur 12.

De Tweede Hoofdwet

De Tweede Hoofdwet lijkt misschien wat subtieler en is nog wat minder bekend dan de Eerste, maar de consequenties ervan zijn voor de samenleving minstens even belangrijk. Laten we deze wet daarom wat nader bekijken.
Analoog aan de Eerste Hoofdwet, gebaseerd op het ervaringsfeit dat je geen perpetuum mobile kunt maken, berust de Tweede op het ervaringsprincipe dat je geen *perpetuum mobile van de tweede soort* kunt maken. Mijn cartoonist zag dat als in de voorgaande figuur, maar in werkelijkheid gaat het om een machine die warmte voor 100% omzet in arbeid zonder externe energiebron. In fig. 13 zijn de belangrijkste aspecten op een rijtje gezet. Als het mogelijk zou zijn om warmte zonder meer in arbeid om te zetten zou de

De Tweede Hoofdwet

Waarneming: Men kan geen perpetuum mobile van de tweede soort maken (dat is een machine die warmte in arbeid omzet zonder externe energiebron).

Korte formulering: Warmte is een lagere vorm van energie dan arbeid.

of: Er bestaat een grootheid die entropie heet (S) en die, bij gegeven energie en volume, naar een maximum streeft.

Figuur 13.

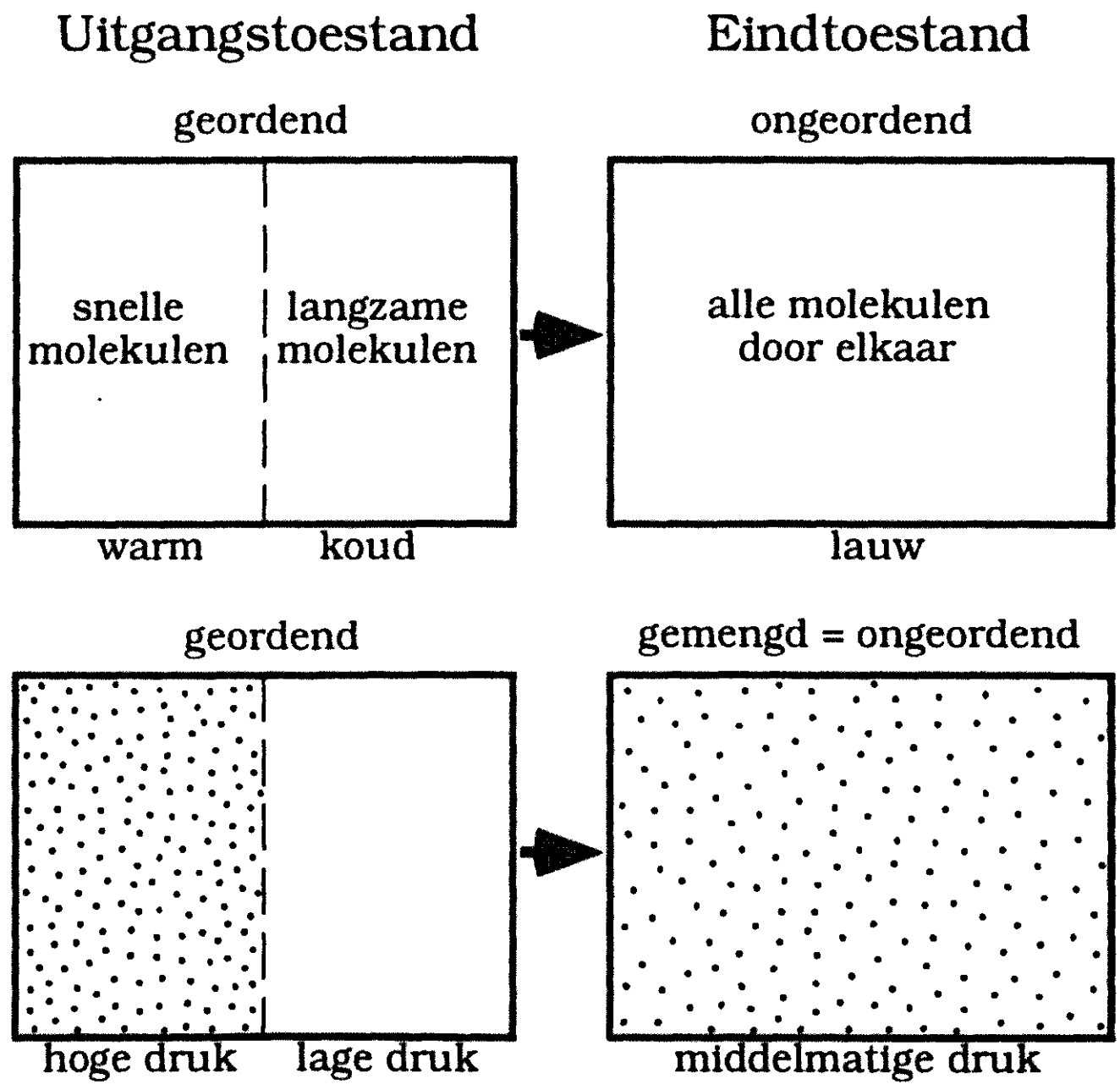
genoemde Friese politicus zijn zin krijgen. Daan zouden we ook een schip op zee kunnen laten varen door de zee rondom af te koelen. Of zouden rivieren stroomopwaarts kunnen stromen door warmte aan de bedding te onttrekken. Hoewel dit alles niet in strijd is met de Eerste Hoofdwet - er gaat

immers geen energie verloren - heeft de ervaring uitgewezen dat zoiets nooit spontaan plaatsvindt. Je ziet het al gebeuren! Auto's op de snelwegen met, in plaats van een motor, een apparaat dat de omgeving afkoelt. Een koelkastauto. De conclusie is dat er in de natuur in gesloten systemen een mechanisme werkt dat de spontane overgang van arbeid in warmte toelaat, maar het tegenovergestelde niet. Warmte kan daarom als een lagere vorm van energie beschouwd worden dan arbeid, en om warmte volledig in arbeid om te zetten is energie van buitenaf nodig.

Het begrip entropie

In de thermodynamica wordt dat allemaal veel netter gezegd. Onder andere wordt nauwkeurig rekening gehouden met de wisselwerking tussen het systeem en z'n omgeving. Op zichzelf ook al een boeiende problematiek, maar die wil ik vandaag niet beklemtonen. Uit de statistische interpretatie van de Tweede Hoofdwet lichten we één element dat verhelderend kan werken. Men kan die natuurtrend namelijk heel goed kwantitatief formuleren door een nieuwe grootheid te introduceren, de *entropie* genaamd, symbool S. Bij constante energie heeft S de neiging toe te nemen. Een proces waarbij S toeneemt verloopt spontaan, maar een proces waarbij S daalt zal niet kunnen plaatsvinden, tenzij van buitenaf wordt ingegrepen. De situatie waarbij S een maximum heeft bereikt is de evenwichtstoestand.

Op moleculaire schaal is de entropie heel goed te visualiseren. De entropie is namelijk een maat voor het aantal manieren waarop we, moleculair gesproken, een systeem met gegeven energie kunnen realiseren. Als de moleculen wat hun posities en snelheden betreft aan veel regels moeten voldoen zijn er weinig van zulke realiseringsmogelijkheden en is de entropie laag. Meestal komt dat er op neer dat systemen die wanordelijker zijn een hogere entropie hebben. In fig. 14 worden twee elementaire



Spontane processen, omdat de entropie toeneemt.
Energie (U) en volume (V) liggen vast.

Figuur 14.

voorbeelden gegeven. In beide gevallen is de begintoestand meer geordend dan de eindtoestand. Ordening betekent een zekere regelmaat, of sortering van de moleculen. De snelle links, de langzame rechts. Of, in een mengsel, de rode links, de groene rechts. Of: alle moleculen links onderin, de rest leeg. (En passant, laat U niet misleiden door het banketbakkersjargon: als je gesorteerde koekjes bestelt doet de verkoopster ze met opzet door elkaar.) In de begintoestand kun je met je systeem nog arbeid verrichten: in de bovenste figuur door via een thermokoppel een stroom te laten lopen, in de onderste door van het drukverschil te profiteren. In de eindtoestand is de entropie maximaal geworden en kan het systeem geen arbeid meer leveren.

We kunnen er niets meer mee beginnen, omdat elke ordening is weggeërodeerd. Sommige noemen dat de entropiedood.

De Tweede Hoofdwet. Maatschappelijk relevantie

We bekijken weer de consequenties van dit tweede principe voor ons dagelijkse functioneren. Helaas komen we tot de ongelegen conclusie dat veel van ons dagelijkse handelen tot zo'n entropieverhoging leidt. Twee voorbeelden om dit te illustreren:

(1) Alle processen waarbij fossiele brandstof wordt gebruikt voor arbeid (bijna alle transport, machines in de industrie en huishouding, voor het aanbrenging van ordening (koelkasten, bouw en instandhouding van structuren) of voor verwarming, leiden tot entropieverhoging. Aanvankelijk zaten de atomen of moleculen relatief geordend bijeen (de koolstofatomen in steenkool of de methylgroepen in de koolwaterstoffen van de ruwe olie), na de verbranding zijn kleine moleculen (CO_2 en H_2O) overgebleven die zich wanordelijk verspreid in de atmosfeer bevinden.

(2) Landbouw kan niet zonder fosfaat, maar na fosfaatbemesting zitten we wel met een bodemverontreiniging. Oorspronkelijk was het fosfor aanwezig in een aantal mineralen, zoals fosfoniet en apatiet. Daarin was het chemisch gebonden en in geconcentreerde, geordende toestand voorhanden. Na gebruik voor fosfaatbemesting is het fosfaat min of meer moleculair verdeeld in de bodem aanwezig in een verdunde toestand van hogere entropie.

Het feit dat energie- en milieuproblematiek eenzelfde basis blijken te hebben, bevestigt dat we het hebben over een algemeen geldig natuurprincipe. Academisch gezegd: we beschouwen het probleem alweer op een hoger niveau van abstractie. Dat het geen wet is die in het dagelijkse leven met vreugde wordt begroet komt omdat hij feitelijk stelt dat veel van

wat ons leven aangenaam maakt (reizen, een comfortabel huis, lekker eten, ...) niet alleen leidt tot uitputting van eindige voorraden (de hoeveelheden fossiele brandstof en fosforhoudende ertsen zijn beperkt), maar bovendien onze leefatmosfeer thermodynamisch in een toestand van erosie brengt. Dat is een toestand waarin weliswaar de totale hoeveelheid energie niet veranderd is, en waarin geen materie vernietigd is, maar waarin geen leven meer mogelijk is, laat staan een comfortabel luxe leventje. Zulke boodschappen horen we nu eenmaal liever niet.

Over recycling en tijdschalen

Deze analyse brengt ons vanzelf op het terrein van de *recycling*. Het is een modewoord geworden: de gedachte heeft bij het grote publiek postgevat dat je gerust een fijn consumptief leven mag leiden als je maar spullen koopt die hergebruikt kunnen worden. De reclame speelt daar slim op in. fig. 15 geeft een voorbeeld van zulk een halve waarheid. Vijf en negentig

Als het gaat om het milieu en de toekomst neemt Mercedes z'n verantwoordelijkheid serieus. Met als tastbaar resultaat motoren die steeds zuiniger worden en minder uitlaatgassen produceren. Autobussen met aardgasmotoren die nauwelijks schadelijke stoffen uitstoten. En een vergevorderd recyclingsprogramma waarbij inmiddels 95% wordt gehaald.

Figuur 15. Uit een advertentie in het NRC-Handelsblad, 23 oktober 1995.

procent hergebruik van een afgedankte Mercedes, die ook nog relatief lang meegegaan is, is natuurlijk een technisch hoogstandje, dat wel, maar het recyclen kost ook wat. Iedereen weet dat het niet voldoende is om je

afdanker op een sloopveldje te rijden, om na een poosje terug te komen en het metaal, glas, de verf, de olie enz. allemaal netjes gesorteerd aan te treffen. De Tweede Hoofdwet stelt dat duidelijk: er zijn externe bronnen (met name energie) nodig om dat hergebruik te realiseren. En daarom hangt er aan hergebruik altijd een ecologisch prijskaartje. Recycling is dus in principe ook milieu-onvriendelijk, al is het ene proces minder schadelijk dan het andere. Werken met bacteriën die chloor-, broom- of fosforverbindingen kunnen afbreken is natuurlijk gunstiger dan met technische processen die agressieve chemicaliën of veel energie kosten. Dan kan het middel zelfs erger zijn dan de kwaal. De firma Hoek Loos maakt voor de radio reclame voor vloeibare stikstof om verfresten uit oude blikjes te halen[1]. Maar het maken van vloeibare stikstof is wel een proces dat zelf veel energie kost. Ontinkten van krantenpapier voor hergebruik staat om deze reden eveneens ter discussie. Of zulke recycling processen ecologisch uit kunnen is een afweging die door milieudeskundigen gemaakt moet worden. We herhalen echter dat het in principe niet 100% ecologisch kan, dus hebben we het de facto alleen maar over het zoveel mogelijk beperken van de schade, niet over het voorkómen ervan.

In het kader van de thermodynamische Hoofdwetten brengt dat me op een principiëler aspect, namelijk dat van de *tijdschaal* waarop een en ander plaatsvindt. Hoe snel worden beperkt voorradige grondstoffen geconsumeerd en hoe snel kunnen ze voor hergebruik geschikt gemaakt worden? Hoe dichter die twee tijdschalen bijeen, des te beter.

Volgens de thermodynamica stijgt de entropie niet alleen met de hoeveelheid grondstoffen die we verbruiken, maar ook met de snelheid waarmee dat gebeurt. Dus met het verbruik per tijdseenheid. De entropie-

---

[1] radioreklame, oktober 1995.

produktie is relatief het geringst voor een zogenaamd *reversibel* proces, dat is een proces waarbij systeem en omgeving voortdurend met elkaar in evenwicht zijn. Dat is pas een ecologisch ideaal: landbouw, nijverheid en ander menselijk handelen zodanig uitvoeren dat aan het ecosysteem geen afbreuk gedaan wordt. We laten de wereld net zo na als we hem aantroffen. Eigenlijk gaat dat in de vrije natuur ook zo: alles wordt in een zodanig tempo gerecirculeerd dat er feitelijk geen afvalprodukten ontstaan. De natuur kan blijkbaar met de Hoofdwetten omgaan[1]. De ontstane situatie komt wel heel dicht bij het ideaal van ultieme duurzaamheid, geleerd na vele miljoenen jaren. De levende natuur kende overigens wel degelijk evolutie, zij het een zeer langzame. Een van de meest pregnante voorbeelden kwam ik tegen in een van de boeken van Edward Abbey, ranger in het Amerikaanse Arches National Park en auteur van o.a. "Desert Solitaire" en "Beyond the Wall". In de extreme klimatologische omstandigheden van de

Bezoekster: "Is there enough water in the desert?"

Ranger: "Yes, mylady, there is exactly enough water in the desert."

Figuur 16.

woestijnen, is vaak toch nog enig leven mogelijk, zij het soms marginaal. Aanpassing aan de barre omstandigheden heeft continuïteit mogelijk gemaakt. We mogen dit uitgebalanceerde ecosysteem duurzaam noemen omdat evolutie en groeisnelheid zich hebben aangepast aan de middelen. Het staat in vrijwel zwart-wit contrast tegenover de geest van de moderne tijd, die groei vooropstelt en de (beperkte) middelen daartoe aanpast. We moeten toch concurreren en de groeiende bevolking voeden? Dat vraagt een

---

[1] We spreken hier van een stationaire toestand (de natuur is een open systeem),

sterke economie. En zo'n sterke economie is toch ook nodig om de milieuproblematiek aan te pakken! Hoe moeten we anders onze milieulasten betalen?

De laatste gedachte is zo ongeveer de ernstigste denkfout die we kunnen maken. In principe is economische groei de kern van het milieuprobleem: meer consumptie, meer transport, meer organisatie ten koste van de omgeving, alles leidt naar entropie verhoging en/of uitputting van eindige

De opbrengst van de artikelen draagt belangrijk bij aan ons natuurbeschermingswerk...

WAT KOOPT Ú VOOR DE NATUUR?

Zeist, najaar 1994

Figuren 17 en 18.

voorraden. Je kunt in principe milieuproblemen niet oplossen door de economie harder te laten draaien, alleen door hem *langzamer* te laten lopen. Des te sneller de groei, des te sneller stijgt de milieubelasting. En als je die dan ook weer met extra milieu-uitgaven wilt bestrijden moet je de economische machine nog weer harder laten draaien en dus weer meer entropie produceren, enzovoort. Een vicieuze escalatie. Helaas zijn er dagelijks voorbeelden van dit onbegrip te vinden in de pers en reclame. Men beschouwe Figs. 17 en 18. De waarheid is dat je niet "iets voor het milieu" moet kopen, maar dat je iets *niet* moet kopen.
Onze posterijen geven telkens postzegels uit in de serie "Natuur en Milieu". Kortgeleden nog, met roofvogels er op. Ze beweren dat ze dat doen dat om op het belang van natuurbescherming te wijzen. Maar als ze het echt meenden zouden ze *minder* postzegels uit moeten geven. Dus blijkt dat ze het niet echt menen, maar een extra inkomstenbron zien liggen die inspeelt op een sentiment van milieuschuld bij de gewone man, de filatelist inbegrepen.

Duurzame ontwikkeling?

In een gesloten systeem, dat "uitgewerkt" is, de entropie maximaal en daarin is dus geen verandering met de tijd meer mogelijk. Een duurzame situatie, maar van ontwikkeling is geen sprake. Voor een gesloten systeem is duurzame ontwikkeling dus een contradictie in terminis. Ontwikkeling is nog wel mogelijk als van buitenaf, vanuit de omgeving van het systeem dus, ingegrepen kan worden. Of die ontwikkeling dan duurzaam genoemd mag worden hangt er maar van af hoe groot de buffervoorraad in de omgeving is. Om dit concreet toe te passen op Moeder Aarde (ik weet nog steeds niet waarom Aarde vrouwelijk is): dit systeem is open wat de energie betreft: er vindt immers instraling van zonne-energie plaats en uitstraling van warmte,

maar wat materiële grondstoffen (ertsen, mineralen, fossiele brandstoffen ...) en ruimte betreft vrijwel gesloten. In dit opzicht is duurzaamheid ten aanzien van grondstoffen een groter probleem dan wat de energie betreft. In de prakijk is de zaak ingewikkelder wegens allerlei koppelingen: als we fosfaat of Mercedessen konden recyclen met uitsluitend zonne-energie zou een oplossing eerder in zicht zijn dan wanneer we daartoe allerlei chemicaliën nodig. Ook hier geldt dat principieel recycling niet tot duurzaamheid kan leiden, alhoewel er wel slimme methoden bedracht worden, en zullen worden, om de schade enigszins te beperken.

Ik kom terug op de snelheid van processen en beperk me weer tot het energieverbruik. Duurzame ontwikkeling zou, wat de energie betreft mogelijk zijn indien de snelheid van vastlegging van zonne-energie in balans is met de snelheid van opsouperen. Fossiele brandstof kan in principe gerecycled worden. Daartoe moeten uit CO_2+H_2O weer grotere moleculen gemaakt worden en die moeten, al dan niet na reductie, opgeslagen worden. Dat kan in de groene plant en in marine organismen onder invloed van zonlicht (fotosynthese). En zo is het in de langvoorbije geschiedenis natuurlijk ook gebeurd. Alleen wordt de opgeslagen fossiele energie geconsumeerd in een fractie van de tijd die nodig is geweest om deze op te slaan, Het komt neer op de kick van het moment, ten laste van de onttrekking van mogelijkheden aan de komende generaties. Het beste woord om dit tot uitdrukking te brengen is vandalisme, al is dit woord wat zwaar aangezet omdat velen niet moedwillig zo slordig met het milieu omspringen. Een ontregelde jongeman die een telefooncel of abri van een bushalte vernielt krijgt ook zo'n kick in een fractie van de tijd die nodig is om de schade te herstellen ten laste van de gemeenschap. Zulk soort vandalisme wordt door iedereen afgewezen als asociaal, maar dat voelt men niet bij het hypersnel consumeren van eindige voorraden energie. Waarom niet? Feitelijk omdat niemand slachtoffers ziet en niemand afstand wil doen van z'n comfortabele

Het moge zo zijn dat er in Nederland mensen zijn die beneden de welstandsgrens leven.

Een veel groter probleem is echter dat er te veel Nederlanders zijn die te ver boven de welstandsgrens leven.

Figuur 19.

leventje. Je hoeft geen socioloog te zijn om te begrijpen dat vanuit dat gezichtspunt weinig neiging bestaat om over vervelende zaken als thermodynamische Hoofdwetten na te denken. Laat staan de consequenties te trekken voor de eigen broekriem. En deze attitude wordt mede gestimuleerd door de alledaagse werkomgeving. Iedereen heeft toch recht op transport, op betaalbare (vlieg)vakanties, op een koelkast, op ruimte, op een goede woning, voldoende en goed voedsel en, zo nu en dan, een afscheidsfeestje. Milieuproblemen zien we wel, maar het herkennen van onszelf en ons levenspatroon als de hoofdschuldigen wordt in de eerste plaats gemaskeerd door het zo duidelijk aanwijsbaar zijn van andere schuldigen. Het verwerken van onze afgedankte auto's is niet onze zorg, maar van de slopersbedrijven. Liefst niet in onze achtertuin (hou je rommel bij je!). Als we in de kwestie van het afzinken van de Brent Spar eerlijkheidshalve zouden afspreken "hij die geen auto rijdt werpe de eerste steen", zou de discussie plots veel rustiger worden. Tevens zouden dan veel minder boorplatforms nodig zijn. In de tweede plaats liggen er afleiders op de loer. Milieuheffingen, ecotax, het kwartje van Kok, ferme politieke uitspraken en schijnoplossingen (ik gaf al voorbeelden). Veel van deze smoezen werken averechts of leggen zo weinig gewicht in de schaal dat ze hoogstens symbolische betekenis hebben: "als je een auto koopt moet je drie vissen ingraven", met in de Tweede Kamer een principiële discussie over de vraag

De regering heeft grote zorg voor het milieu.....

De regering gaat zes miljoen nieuwe woningen bouwen.

"Dit voorjaar zijn de duurzame consumptiegoederen weer goedkoper geworden."

Figuren 20 en 21.

of twee vissen en een graat ook mag. Nog maar eens een paar illustraties. Twee tegenstrijdige constateringen (fig. 20) vinden we in - jawel de troonrede van 1991. En wat zijn dat eigenlijk: duurzame consumptiegoederen? Volksverlakkerij? Het klinkt niet zo paradoxaal als een eetdieet. De brief van de vakbeweging aan de regering van oktober 1994 (fig. 22) bevat veel

De overheid moet bevorderen dat de groei van de economie sociaal en ecologisch verantwoord is. Meer werk en een verbetering van het leefmilieu hoeven geen tegenstrijdige doelstellingen te zijn.

Figuur 22. Uit manifest vakbeweging (NRC-AH, 25 oktober 1994).

zinnige opmerkingen, maar roept ook vragen op. Dat de overheid moet bevorderen dat economische groei sociaal en ecologisch verantwoord is, is een gratuite kreet. Iedereen wil dat natuurlijk. Maar hoe weet de vakbeweging dat meer werk en verbetering van het leefmilieu niet tegenstrijdig hoeven te zijn? En als ze dan in de volgende CAO-onderhandelingen niet alleen meer werk wensen maar ook per werker een hogere beloning vraag je je weer af of ze begrijpen wat ze zeggen met de kreet dat het milieu voorrang krijgt. Doet onze LUW ook mee? Het lijkt er wel op, men zie figuren 23 en 24. Wat is "duurzaam evenwicht met andere maatschappelijke

Haar onderwijs zal de Landbouwuniversiteit Wageningen afstemmen op de vraag van de samenleving naar deskundigen die in staat zijn *de behoefte aan een gezond milieu in duurzaam evenwicht te brengen met andere maatschappelijke behoeften.* In haar wetenschapsbeoefening zal de Landbouwuniversiteit voorrang geven aan de ontwikkeling van schone technologieën ten behoeve van landbouw en milieubeheer.

Figuur 23. Bestuurskroniek 25, november 1992

LU wil duurzaam bouwen

Wageningen - De Landbouwuniversiteit Wageningen heeft een lijst van milieuvriendelijke bouwmaterialen opgesteld. De lijst zal toegepast worden bij nieuwbouw en renovatie van universiteitsgebouwen. Bouwmaterialen zijn gewaardeerd op ondermeer duurzaamheid, emissies, produktieproces, invloed op gezondheid en bewerkingen. Door deze waarderingen zijn de verschillende gangbare bouwmaterialen (zoals hardhout, schelpen, beton, natuursteen) in een groene, grijze of zwarte categorie ingedeeld.

Figuur 24. Uit het Gelders Dagblad, 6 juli 1995.

behoeften"? Als je die behoeften niet omschrijft kun je ook niet bewijzen dat zo'n evenwicht in principe mogelijk is en blijft de beleidsbeslissing een vrijblijvende kreet. Maar het klinkt uitstekend. En "duurzaam bouwen" is een betrekkelijk loze gelegenheidsopmerking; als je de kleine lettertjes leest zie je dan ook dat het ook zo'n vaart niet loopt: we gaan alleen wat meer letten op de milieuvriendelijkheid van de bouwmaterialen, vergelijkbaar met het

bouwen van groenere koelkasten, met etiket en al. Ik zie natuurlijk het probleem van het College van Bestuur wel: zulke kreten zijn nodig omdat de LUW zijn imago moet ophouden. Maar het is wel een slecht voorbeeld voor de studenten die we opleiden, en die we proberen consequent en objectief te leren denken, ook als het tegen hun eigen gevoelens en belangen in gaat. Ook hier betekent echter duurzaamheid: *niet* bouwen, of heel sporadisch. (Dit werkt dus ook tegen de wensen van mijn eigen vakgroep, want we zijn hard aan renovatie toe.) Gelukkig werkt de overheid mee door onze budgetten drastisch te besnoeien.

De uitspraak in fig. 25 begrijp ik helemaal niet. Als iemand hem kan uitleggen houd ik mij aanbevolen.

"Nationale energieheffingen wekken valse hoop", was de lijn van zijn betoog, "ze ondermijnen de concurrentiepositie van de industrie, en belasten zo op de lange termijn het milieu. Eigenlijk zijn ze primair bedoeld om de begrotingsproblematiek van de overheid te verlichten".

Selman benadrukte dat het milieu juist gebaat is bij een gezonde economie, en dat de energie-intensieve industrie daarin een belangrijke speelt.

Figuur 25. Uit het Chemisch Weekblad, 12 maart 1992.

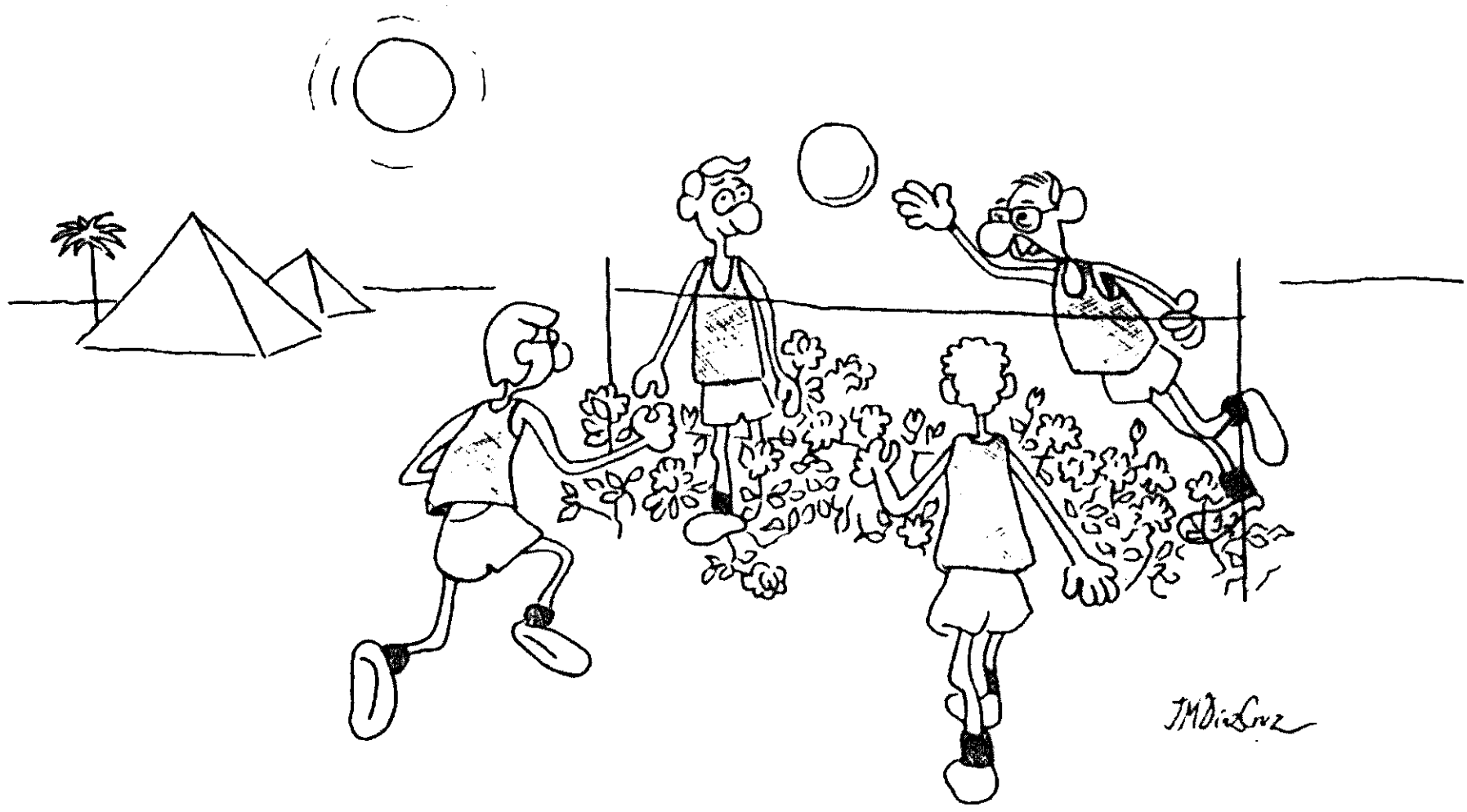
Nog drie voorbeelden om het (relatief) kortstondig en nogal egoïstisch genot van beperkte ecologisch voorraden te illustreren. Figuur 26 laat zien dat het probleem al in de Middeleeuwen telde, zij het op een andere schaal en dat Eco eco-logisch kon denken. Dichter bij huis: misschien hebt U de bouw van de Batavia gevolgd? Het gaat om een replica van een Oost-Indië vaarder. Een interessant stukje archeologische reconstructie. Zo'n schip ging gemiddeld 20 jaar mee. Niet zo lang dus. Stormen, paalwormen en zeewater

> Maar de uitwerpselen van dieren en mensen waren vermengd met ander, vast afval, heel de stroom van dode materie die de abdij uitscheidde, om de zuiverheid en ongereptheid in haar betrekking met de top van de berg en de hemel te behouden.

Figuur 26. Uit "De naam van de roos" van Umberto Eco, blz. 94.

eisten nu eenmaal hun tol. Maar één goede Oost-Indië vaart haalde de kosten er uit, dus economisch was de bouw verantwoord. Ecologisch niet, want er waren grote hoeveelheden hout voor nodig: dat leidde tot ontbossing van delen van Denemarken, Spanje en Engeland. Een zware tol, opgelegd aan latere generaties ten gunste van de happy few uit die jaren.

Het derde en laatste voorbeeld betreft een gebeurtenis waarbij ik zelf betrokken - en waarvoor ik dus medeverantwoordelijk was. Buurlui en collega's, die de alternatieve titel "de entropie van het gazon" zagen verwachtten een discussie over tuinieren. Nu is het waar dat er rond ons huis een veldje ligt met paardebloemen, bosaardbeien, witte klaver, mos, kruipende ereprijs, spurrie, muur, kruipende boterbloem, madeliefjes en een enkel sprietje gras. Het ziet er groen uit maar zelf zie ik er geen gazon in. Er zitten mollen in, die trachten de entropie van dit geheel te vergroten. Daar gaat het echter niet over maar over een volleybal wedstrijd, gespeeld in Alexandrië, vele jaren geleden. Ik was daar voor een UNESCO-missie. We hadden een dagje vrij en togen naar een goed onderhouden villa in een buitenwijk, met een fraai onderhouden tuin, zie fig. 27. U moet zich voorstellen hoe kostbaar dat was: vlak tegen de barre woestijn aan een prachtig gaaf gazon, met daaromheen rozen en andere bloemen. Het moet jaren van zorg en veel geld gekost hebben dat op te bouwen en onderhouden.



Figuur 27.

Mijn Egyptische gastheren aarzelden echter geen moment: er werd een net gespannen en gevolleyd. Na een uur was iedereen moe, warm en voldaan - het gazon bleef achter in geruïneerde toestand. Dit vond ik zo'n markant voorbeeld van het creëren van kortstondige genoegens voor een select groepje ten koste van een schaars produkt, dat ik de eruit voortvloeiende *entropieverhoging van het gazon* als subtitel van deze rede koos. De entropie ging omhoog omdat een gaaf, egaal gazon veel minder realiseringsmogelijkheden heeft dan een omgewoeld grasveld.

Conclusies en perspectieven

Aan het einde van mijn voordracht toegekomen volgt gewoontegetrouw een samenvatting. Ik doe dat door middel van vijf conclusies en zes aanbevelingen.

Eerst die *conclusies*

1. Aan het functioneren van onze samenleving, nu en in de toekomst, ligt een aantal keiharde natuurwetten ten grondslag, zoals de biologische Hoofdwet van de sterfelijkheid, de beide Hoofdwetten der Thermodynamica en de alledaagse boerenwijsheid "op is op".

2. Veel grondstoffen, energie, ruimte en schoon water zijn essentieel voor duurzaamheid, maar slechts in beperkte mate voorradig en/of te herwinnen. De verbruikssnelheid, en dus de uitputting ervan, is gelijk aan het aantal mensen maal de consumptie per persoon. Er zijn dus te veel mensen en/of ze leven op te grote voet. Willen we op de huidige, te grote, voet doorgaan, dan moet voor elk procent groei in de consumptie - lees salaris - de bevolking met een procent afnemen. Willen we naar een duurzamere samenleving toe dan moet die afname groter zijn.

3. Het bewustzijn dat er natuurwetten zijn die grenzen stellen aan ons dagelijks functioneren is onderontwikkeld, zeker in de collectieve sector.

4. Regeren is vooruitzien: het korte termijn beleid moet gericht worden door het middellange en het middellange door het lange. Laten we, voor het gemak van spreken, lange termijn beleid definiëren als van de orde van zesduizendtweehonderdvijftien jaar. Middellang is dan van de orde van, zeg, een of enkele generaties, korte termijn planning, pak weg, enkele regeringsperioden. De rest is improvisatie of, zo je wilt "schipperen naast God". Politieke partijen en vele andere maatschappelijke organisaties komen niet veel verder dan dat laatste, deels omdat ze te zeer gepreoccupeerd zijn door de presserende problemen van het moment en deels omdat ze een bevolking vertegenwoordigen die in het algemeen ook niet verder kijkt. Als je geen lange termijn maatregelen neemt maar je tevreden stelt met schijnoplossingen, escaleren de problemen van het moment van jaar tot jaar.

5. Onze samenleving is ondemocratisch. Er wordt wel op straat en op bestuurlijk niveau over de afwegingen van het moment gedebatteerd, maar

dat is een discussie van de huidige generatie onderling. De toekomstige generaties, de have-nots, worden niet vertegenwoordigd maar veel besluiten gaan wel ten koste van hen.

En dan nu de *aanbevelingen*
Dat is wat lastiger dan de conclusies, omdat conclusies op harde feiten berusten, en dus niet gevoelig zijn voor opinies of opvattingen. Aanbevelingen hebben een meer persoonlijk karakter, maar ik wil ze niet uit de weg gaan.

1. Betere bewustwording is een eerste vereiste. Ik hoop dat er mensen gevonden kunnen worden die deze problematiek onderkennen en dat op een indringender wijze aan den volke kunnen overbrengen dan ik bij machte ben het te doen. Er moet op de ernst van de situatie gewezen worden zonder zoveel weerstand op te roepen dat men de discussie afdoet als "daar heb je alweer een doemdenker" of "dat is de zoveelste academicus met een beroepsdeformatie die van achter zijn buro wel even vertellen zal hoe de wereld in elkaar zit". Men moet zich bewust worden van de ecologische onvriendelijkheid van veel alledaagse handelingen, van het doorspoelen van een toilet met drinkwater, via Israëlische kersen eten in een Nederlandse kersenbongerd, vliegvakanties of airmiles sparen, naar het opschrijven van onbenullige dingen en dat dan in ruime mate verspreiden. En nagaan welke handelingen relatief eco-vriendelijk zijn. Muziek maken en goed nadenken horen daartoe.

2. Alle pogingen die worden aangewend om de druk op de ecosystemen zoveel mogelijk te verzachten verdienen steun ook al gaat het slechts om het beperken van de schade. In en rondom de LUW wordt metterdaad op veel deelgebieden zeer zinvol bijgedragen en dat moet zo blijven. Men leze er redes en artikelen over na. Anderen dragen bij tot nadenken. Eén eigen voorbeeld: door mijn contacten met Schiere zijn mijn ogen open gegaan

voor de toepasbaarheid van de Tweede Hoofdwet op de dagelijkse praktijk van de tropische Veehouderij.

3. Op regeringsniveau moet met de meeste spoed begonnen worden aan een stringente bevolkingspolitiek. Het is opvallend en teleurstellend dat politieke partijen daar niet aan toe zijn, uiteraard omdat de maatschappij die ze representeren dat ook niet is. Want hoe zul je verkleining van het aantal mensen aanpakken in een maatschappij die nog niet eens in staat is het aantal varkens terug te dringen? (Of is het omgekeerd: "als je het aantal mensen verkleint loopt de varkensstapel ook vanzelf terug"?) Toch is het versoberen van de totale consumptie veel gemakkelijker te verkopen via weinig mensen die relatief aangenaam kunnen leven dan via velen op elkaar met iedereen maar weinig voor zichzelf.

4. Het recht op voortplanting wordt algemeen als een grondrecht aanvaard. Ik wil de discussie of dat terecht is hier niet aansnijden, maar constateer wel dat de overheid middelen heeft om de groei terug te dringen. Een klassieke is via belasting- en kinderbijslagmaatregelen. Een alternatief van principiëler karakter zou kunnen zijn om schaarse middelen, zeg energie, per gezin te distribueren. Een gezin (of equivalent daarvan) van, zeg, vier personen, krijgt per jaar een vast energiebudget. Ze moeten daarvan hun huis verwarmen, koken, autorijden, op vakantie gaan, de was doen, alles. Als je dus graag auto wilt rijden dan moet je 's winters minder stoken. Gaat één het huis uit dan krijgt hij of zij een kwart van het energiebudget mee. Op deze wijze worden rijke mensen niet bevoordeeld ten opzichte van arme, zoals het geval is met actuele regelingen die energiekosten in geld vertalen. Bovendien wordt aldus de vorming van kleine gezinnen aangemoedigd. Ik leg deze suggestie ter discussie aan U voor als een gedachte om lange termijn oplossingen te ontwikkelen die tegelijk doeltreffend en maatschappelijk aanvaardbaar zijn.

5. De "après nous le dèluge" attitude van sommigen dat "er wel weer oplossingen gevonden zullen worden" moet als maatschappelijk en ecologisch onverantwoordelijk van de hand gewezen worden. Dat geldt ook voor de berustende houding dat bepaalde zaken nu eenmaal "politiek onverkoopbaar" zijn. Met een variant op een Fries spreekwoord: het gaat er niet om hoe het kan maar hoe het moet.

Slot

In mijn intreerede, bijna 34 jaar geleden, heb ik gesproken over de manier van denken en werken van een fysico-chemicus. Ik hoop U daar nu meer voorbeelden van gegeven te hebben en U van de relavantie overtuigd te hebben. Het vinden van achterliggende en verbindende principes achter ogenschijnlijk uiteenlopende verschijnselen is een der belonend ste activiteiten van de akademicus die samen met studenten en medewerkers kunnen worden uitgevoerd. Ze geven richting aan je denken en werken objectiverend. Soms kom je tot eenvoudige antwoorden, soms tot conclusies die schijnbaar indruisen tegen hetgeen we altijd dachten. Dat is inherent aan het vak en het blijft boeien. Onderzoek en onderwijs zijn mede daarom van vitaal belang voor de maatschappij. Ondanks de serieuze lange termijn problemen die ik zie, prijs ik mezelf toch gelukkig aan het LUW onderwijs en onderzoek te hebben mogen bijdragen.