

## 2 EEN SLUITSTEEN IN DE TIJD

Het oude Rome is gebouwd uit beton, baksteen en uitgehakte stenen. Tegenwoordig kun je in het Forum Romanum overal fraai uitgehouwen stukken steen vinden, vooral natuurlijk in de grootse ruïnes van de vele tempels en triomfbogen op het terrein. Maar het hele gebied is ook bezaaid met schitterend brokstukken van gecanneleerde zuilen en overblijfselen van beeldhouwde basementen, kapitelen, hoofdgestellen en lateien, vaak half in de grond verscholen of in woeste hopen opeengestapeld.

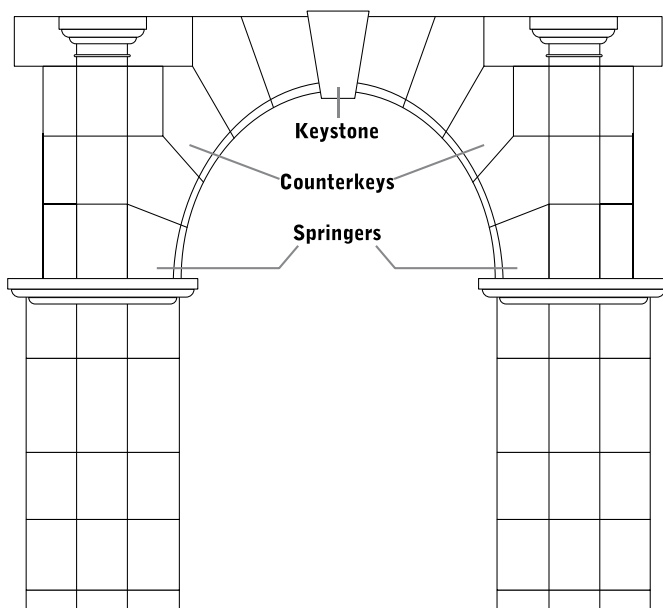
Weinig bezoekers staan erbij stil wat een enorm werk het geweest moet zijn om deze brokken steen uit de grond te houwen, ze te bewerken en ze uit verafgelegen steengroeven naar Rome te vervoeren, laat staan de vindingrijkheid die nodig is om iets dergelijks voor elkaar te krijgen. Toch hebben deze garbsten, lukraak rondslingerende stenen vaak een interessant verhaal te vertellen.

Dat gold ook voor een stuk steen dat in het bijzonder mijn aandacht trok. Het lag niet in het Forum zelf, maar een wandeling van vijf minuten in zuidoostelijke richting verderop in het Colosseum – het grootste van alle Romeinse amfitheaters, dat gebouwd was om de Romeinse honger naar gladiatorenengevechten en spektakelstukken met wilde dieren te stillen. Mijn oog viel op het rotsblok toen ik onder een boog doorliep om de trappen van de benedeningang naar de centrale doorgang binnen in het Colosseum te beklimmen. Even keek ik omhoog en toen viel mijn oog op de sluitsteen van de boog. Om onduidelijke redenen – ik weet nog steeds niet goed waarom, misschien had het iets met de volstrekte onopvallendheid van de steen te maken – hield ik stil om de steen beter te bekijken. Ik zag dat de boog zelf van enorme afmetingen was, ruim zeven meter hoog en vier meter breed, maar in het licht van de enorme proporties van het gebouw viel er niets opvallends aan te bespeuren. Het was maar een van de tachtig identieke bogen die de onderste rij van de immense buitenmuur van het complex vormden. Maar toen ik beter keek, drong het tot me door dat de boog en zijn sluitsteen, hoe onbeduidend op het eerste gezicht ook, in werkelijkheid een briljant staaltje bouwkundig meesterschap was.



De sluitsteen in het Colosseum.

De Romeinse boog is het soort constructie dat ingenieurs ook wel een voussoirboog noemen, omdat de taps toelopende stenen voussoirs of boogstenen worden genoemd. Dit type boog was een doorbraak in de bouwkunde. Voordat deze werd uitgevonden, moest iemand, die bijvoorbeeld een brug over een rivier wilde bouwen, de horizontale afstand met een onbuigzaam materiaal als steen of hout zien te overbruggen. Maar dergelijk bouwsels lopen het risico in het midden van de overspanning te breken. Erger nog: aan deze bouwwijze ligt een fundamentele contradictie te grondslag. Als het materiaal van de overspanning dikker wordt gemaakt om de brug te versterken, wordt de overspanning zelf zwaarder. Uiteindelijk wordt de constructie zo zwaar dat de brug er alleen maar zwakker op wordt, niet sterker. De Romeinse boog omzeilt deze tegenstrijdigheid. Hij ontleent zijn kracht niet enkel aan het materiaal waarvan het gemaakt is, maar ook aan zijn ontwerp: omdat het een boog is, wordt het gewicht van de constructie aan beide zijden door de pilaren omlaag geleid, en omdat zijn boogstenen taps toelopen, maakt hun gewicht en het gewicht van het materiaal dat ze dragen de constructie – tot dat een zeker maximum bereikt is – er alleen maar sterker op door de boogstenen strakker tegen elkaar aan te persen.



Het ontwerp van de Romeinse boog geeft hem zijn kracht.

De Romeinen zijn niet de uitvinders van dit idee; ze hebben het waarschijnlijk van de Grieken en de Etrusken overgenomen.<sup>1</sup> Maar ze maakten zich de technologie eigen en werkten de verrassend complexe technische principes uit waarop de juiste constructie van de boog is gebaseerd. Vervolgens verspreidden ze de technologie door hun hele rijk en pasten ze haar toe om er overal bruggen, aquaducten, tempels, koepels en amfiteaters mee te bouwen. Romeinse bogen maken vandaag de dag een flink deel van de restanten van het oude Rome uit – eigenlijk gewoon omdat ze de minst aan slijtage onderhevige brokstukken zijn, zoals de her en der in het Franse, Italiaanse en Spaanse landschap voorkomende lappen aquaduct.

De sluitsteen die de boog boven mijn hoofd bijeen hield, was gigantisch: bijna twee meter diep, één meter hoog, aan de bovenkant van zijn taps toelopende vorm anderhalve meter breed en aan de onderkant zo'n vijftien centimeter. Hij was van travertijn gemaakt, een soort kalksteen dat al duizenden jaren wordt gewonnen in de buurt van het tegenwoordige Tivoli (in de tijd van de Romeinen bekend als Tibur), zo'n dertig kilometer ten oosten van Rome. Travertijn uit Tivoli is crèmekleurig, met donkerdere, streepachtige inkepingen en kleine gaatjes waardoor het iets wegheeft van witte kurk. Maar hier ging het witte oppervlak van het steen

verscholen onder een door eeuwen van verwerking en verwaarlozing opgehoopt dikke laag vuil, waardoor het wit tot vaalbruin was verkleurd.

Hoe smerig de sluitsteen ook was, ik werd getroffen door hoe precies hij was uitgehouwen: je zou nog geen scheermesje tussen de sluitsteen en de naastgelegen boogstenen kunnen wurmen. De Romeinen beschikten niet over steencirkelzagen met met diamant belegde bladen – zij hakten hun stenen hamerslag voor hamerslag met de hand, met beitels en ijzeren houwelen uit. De hoeveelheid inspanning en de pure vastberadenheid en het geduld die daarvoor nodig waren, gaan mijn verstand te boven. Het meest werd ik echter getroffen door iets nog basalers: steen is een zwaar materiaal en ik schatte dat deze sluitsteen zo'n 5,7 ton woog.<sup>2</sup> Ik probeerde me er een voorstelling van te maken hoe de Romeinse werktuigkundigen en arbeiders het gevaarte daar hadden gekregen en stelde me de enorme kraan voor – het geraamte gebouwd als een A-frame, uitgerust met houten katrollen – die ze daarvoor gebruikt moeten hebben, en de tientallen mannen die aan de voet van de kraan druk met touwen in de weer zijn geweest.

De machtige keizers Augustus, Caligula en Nero hadden alle drie overwogen een gigantisch amfitheater in het centrum van Rome neer te zetten. Maar Nero's dood in 68 n.Chr. – en de bloedige burgeroorlog die daarop volgde – spoorde zijn opvolger, Vespasianus, uiteindelijk aan het Colosseum als geschenk voor de stedelingen te bouwen om ze zo te laten zien dat zijn bewind een heel andere invulling zou krijgen dan de pronkzuchtige en wrede heerschappij van Nero. Vespasianus begon de bouw tussen 72 en 73 n.Chr. en financierde het plan naar alle waarschijnlijkheid met de oorlogsbuit die hij een paar jaar eerder aan zijn verpletterende zege op de joden en het leegplunderen van Jeruzalem had overgehouden. Zijn zoon Titus wijdde het gebouw in 80 in met een honderd dagen durende reeks spelen, waarbij zo'n tienduizend wilde dieren het leven lieten.

In niet meer dan vijf jaar waren de architecten, werktuigbouwkundigen en arbeiders, die aan het Colosseum gewerkt hadden, erin geslaagd een gebouw neer te zetten dat dezelfde omvang en hetzelfde aantal zitplaatsen heeft als het Yankee Stadium in New York. In de woorden van de architectuurhistoricus Rabun Taylor was het 'het meest complexe gebouw dat ooit met succes tijdens de oudheid is opgetrokken.' Niet alleen kon het Colosseum het totale gewicht en het gelijktijdig deinen en stampen van vijftigduizend toeschouwers weerstaan, ook had het gebouw een uitgebreid netwerk van pijpen die door het hele gebouw geparfumeerd water naar de fonteinen stuwde en uitwerpselen van de wc's afvoerde. 'Er zijn andere gebouwen geweest die nog gewaagder, oorspronkelijker

en mooier waren,' gaat Taylor verder, 'maar als een monument van het architectonisch proces is het uniek in zijn soort.'<sup>3</sup>

Openbare gebouwen als het Colosseum waren door de volstreekte vermetelheid van hun bouw ontworpen om de Romeinse burger te verbijs-teren, ontzag in te boezemen en zelfs te kleineren. Ze vormden de materiële uitdrukkingen van een machtsideologie. 'Ze getuigden van kracht, beheersing en stabiliteit,' schreef Taylor. 'Hun bedoeling was de burger tot gevoelens van trots te bewegen van zoiets groots deel uit te maken en ze tot bereidwillige onderwerping en trouw aan de keizer aan te zetten.' Het meest spectaculaire uitzicht in het Colosseum, alleen te zien vanaf de hoogstgelegen zitplaatsen die het verst van de arena verwijderd waren, was dan ook aan het plebs voorbehouden, wier loyaliteit het minst vanzelfsprekend was en die de meeste bekrachtiging behoeften.<sup>4</sup>

De Romeinen begonnen met dit monument van hun macht door een meer droog te leggen en uit te graven dat ooit op het terrein van het Nero's paleis had gelegen. Vervolgens stortten ze een elliptische lus van cement en vermalen steen – dertien meter diep, vijftig meter breed en met een omtrek van vijfhonderd meter – die als fundering moest dienen, waarbij beide zijden met een stenen muur van drie meter dik werd versterkt. Bovenop deze fundering werd een één meter dikke vloer van travertijn gelegd, waarna de bodemstenen voor de belangrijkste zuilen van het gebouw met gesmolten metaal aan de vloer verankerd werden.<sup>5</sup>



Het Colosseum en zijn fundering bevatte oorspronkelijk een miljoen ton aan steen, beton en baksteen.

Op deze bodemstenen bouwden de Romeinen de zuilen en bogen voor de tachtig stervormige muren van het amfitheater die vanuit het centrum van de arena als de spaken van een wiel uitwaaierden en die elk met de drie reusachtige buitenmuren kruisten die het gebouw omgorden.

De uiteindelijke totale massa van het gebouw was gewoonweg verbijsterend. De bouwers wonnen, vervoerden, mengden (in het geval van beton) en verwerkten ongeveer een miljoen ton basismateriaal, waaronder 295.000 ton travertijn, 653.000 ton beton, 54.000 ton tufsteen (een vulkanisch gesteente dat in grote hoeveelheden aan de Italiaanse westkust voorkomt), 58.000 ton baksteen, 6.000 ton marmer en 300 ton metaal om de belangrijkste stenen aaneen te voegen.<sup>6</sup>

Die verweerde, vieze sluitsteen in het Colosseum had ons, zo meende ik, iets heel fundamenteels over de enorme energiebehoefte van de Romeinen te vertellen, en over hoe die behoefte de evolutie van het imperium had vormgegeven. Imperia draaien op energie. Het is een kerntaak van elk imperium om genoeg energie te winnen, te vervoeren en te focussen om zijn economie en politieke macht te consolideren en te vergroten. In de veiligheid en de rol van de krijgsmacht van elk imperium spelen het verwerven en beveiligen van zijn energiebronnen, van de routes waarlangs deze energie vervoerd wordt en van de mensen en organisaties die voor het winnen en vervoeren verantwoordelijk zijn een cruciale rol.

Net zoals elke samenleving uit de oudheid liep Rome in essentie op zonne-energie – op de energie die door de planten in de Romeinse velden geabsorbeerd en in voedsel omgezet werd.<sup>7</sup> Terwijl ik de sluitsteen beter bekeek, vroeg ik me af hoeveel landbouwgrond er nodig was geweest om alle calorieën te verbouwen om alleen al de spieren van de benodigde energie te voorzien die deze steen op zijn plek hadden gekregen? En hoeveel land er nodig was geweest om de bouw van het hele Colosseum van deze brandstof te voorzien? Dit waren geen loze vragen, zo meende ik, maar kwesties die alles met de opkomst en de ondergang van Rome te maken hadden.

En ook vermoedde ik dat de steen ons tevens iets te vertellen heeft over de overeenkomsten tussen het Romeinse Rijk en onze eigen, meer recente imperia – waaronder het huidige Amerikaanse imperium.

### *De thermodynamica van een imperium*

Energie vormt het levensbloed van elke samenleving. Net zoals wij de basiswerking van het menselijk lichaam kunnen begrijpen door de stro-

ming van het bloed te volgen, kunnen wij een goed deel van de activiteiten van een samenleving begrijpen door haar energiestromen te volgen.

Eeuwenlang werd er nauwelijks vooruitgang geboekt bij de manier waarop wij mensen energie wonnen en gebruikten, en elke vooruitgang bakende een nieuw stadium af in de technologie en in de beschaving die door die energie gaande werd gehouden.<sup>8</sup> De oude Romeinen beschikten bijvoorbeeld niet alleen niet over machines om stenen mee te zagen, ze hadden ook geen elektrische of met benzine of diesel aangedreven kiepauto's of hijstoestellen tot hun beschikking. Zo goed als al het werk dat nodig was om steen en andere materialen uit te hakken, te vervoeren en te tillen, werd met menselijke en dierlijke spierkracht gedaan: de energie die nodig was om die spierkracht van brandstof te voorzien, was uiteraard uit voedsel afkomstig, en dat voedsel bestond voornamelijk uit granen en hooi, zoals tarwe, gerst, gierst, rogge, spelt en luzerne dat door de Romeinse boeren werd verbouwd (de meeste Romeinen aten nauwelijks vlees).<sup>9</sup>

Dat energie essentieel is, daar zijn we het snel over eens. Moeilijker is het rol die zij in ons dagelijks leven speelt geheel te doorgronden.<sup>10</sup> Wanneer wij aan energie denken, hebben wij meestal benzine op het oog die we als brandstof in onze auto's gebruiken, of elektriciteit waarmee wij onze woningen verlichten en misschien het aardgas en de steenkool die wij in onze elektriciteitscentrales verbranden. Met andere woorden: wij vatten energie gewoonlijk als brandstof op, en vanwege de primaire diensten die deze brandstof levert – zoals transport, licht en warmte – zien we er het nut wel van in.

Natuurlijk zijn dit cruciale diensten, maar de rol die energie in ons leven speelt, is eigenlijk veel fundamenteeler, essentiëler en subtieler. Wij onttrekken energie aan onze omgeving om orde uit chaos en complexiteit uit eenvoud te scheppen.<sup>11</sup> Vaak gebruiken we deze orde en complexiteit om ons te helpen bij het oplossen van de problemen waar we tegenaan lopen – bijvoorbeeld om ons tegen onze onverbiddelijke omgeving te beschermen en ons voor aanvallen te behoeden. Simpel uitgedrukt: samenlevingen met toegang tot veel energie zijn veerkrachtiger, beter in staat zich aan te passen en beter in het oplossen van problemen.

Om het verband tussen energie en complexiteit te begrijpen, moeten we enkele wetenschappelijke principes verkennen die bepalend zijn voor hoe energie zich gedraagt. Hoewel de meeste mensen denken dat energie iets tastbaars is, zoals benzine, is deze in werkelijkheid helemaal geen fysieke stof. Zij is in feite een eigenschap van een stof. Een handvol tarwekorrels, een loodaccu, een stroom lichtfotonen of een snelstromende rivier bezitten allemaal de eigenschap energie. Deze eigenschap

kan zich van de ene plek naar de andere verplaatsen, en wanneer zij zich verplaatst, kunnen wij soms van deze energiestroom gebruikmaken om, in de woorden van de natuurkundigen, 'werk te doen', dat wil zeggen: om dingen in onze fysieke wereld te veranderen. De energie in een snelstromende rivier kan bijvoorbeeld werk voor ons doen wanneer deze zich naar een ander systeem zoals een watermolen of -turbine verplaatst. De energie in een loodaccu doet haar werk pas wanneer zij naar een gloeilamp of een elektromotor stroomt.

Sommige energiebronnen zijn geschikter voor het verrichten van werk dan andere, op voorwaarde echter dat wij weten hoe we de energie die hierin aanwezig is kunnen benutten. De *hoogkwalitatieve* energie die door benzine wordt geleverd, is bijvoorbeeld meer geschikt voor het verrichten van werk dan de *laagkwalitatieve* energie van de diffuse warmte die in de grond onder onze voeten zit en waar we goedbeschouwd weinig aan hebben, behalve dan voor het verwarmen van andere zaken als gebouwen en woningen.<sup>12</sup> En dus zijn bronnen van hoogkwalitatieve energie zoals olie, aardgas en snelstromende rivieren buitengewoon waardevol, omdat wij deze kunnen inzetten om vele verschillende diensten te leveren.<sup>13</sup>

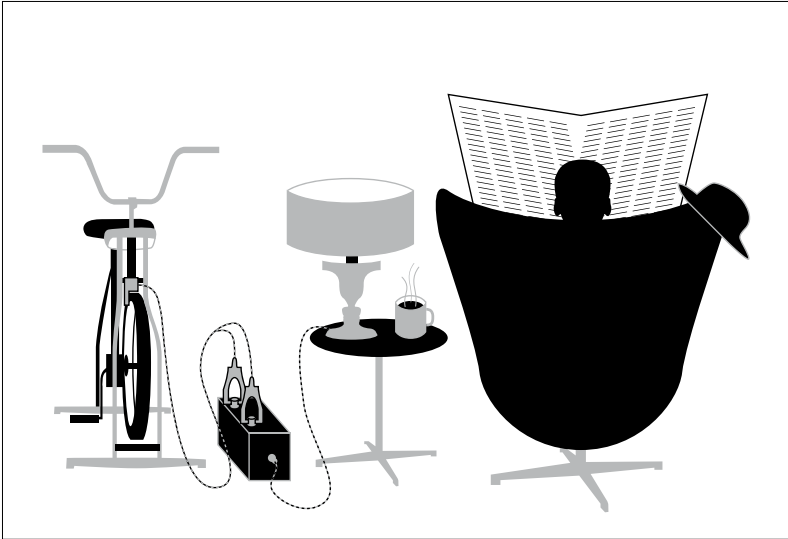
In essentie zijn er maar twee vormen van energie: kinetische energie – energie die afkomstig is van materie die in beweging is – en potentiële energie – energie die ergens in gevangen zit. Wij kunnen potentiële energie in kinetische energie omzetten en vice versa. Wanneer we benzine verbranden om een automotor aan te drijven, zetten wij de potentiële energie in de chemische verbindingen van benzine om in de kinetische energie van de beweging van de motor. Wanneer we echter het snelstromende water van een rivier gebruiken om een elektrische turbine aan te drijven en vervolgens de elektriciteit van de turbine gebruiken om een accu op te laden, converteren wij de kinetische energie van de rivier naar de turbine om werk te verrichten, en vervolgens gebruiken wij dit werk om potentiële energie in de accu te creëren.

Warmte is een bijzondere vorm van kinetische energie. Zij zit in de vorm van trillingen en andere bewegingen van de atomen en moleculen in materialen als de muren van onze huizen of de lucht om ons heen opgeslagen. Vaak gebruiken wij warmte als tussenliggende vorm van energie om onze machines mee aan te drijven. Bijvoorbeeld wanneer er benzine in de cilinders van een automotor ontstoken wordt en er daarbij gassen met een hoge temperatuur worden gecreëerd, en de warmte van deze gassen vervolgens de kinetische energie genereert die de zuigers van de motor voortstuwt. Warmte drijft ook onze straal- en raketmotoren aan. Een beter begrip van de aard van warmte kan ons veel leren

over energiestromen in zowel natuurlijke als kunstmatige systemen, en bijvoorbeeld de vraag beantwoorden hoeveel werk een bepaald systeem kan verrichten.

Dit is het terrein van het subgebied van de natuurkunde dat thermodynamica heet. De tijdens de negentiende eeuw ontdekte wetten van de thermodynamica – een van de belangrijkste ontdekkingen ooit in de wetenschap – vormden een verbluffende doorbraak. Deze wetten vertellen ons twee essentiële zaken over onze natuurlijke wereld. De eerste wet vertelt ons dat energie nooit gecreëerd of vernietigd wordt: de totale energie in een systeem en zijn omgeving (breed gedefinieerd) blijft constant, ongeacht of het systeem een mechanisch apparaat als een automotor is, of een biologisch systeem als een menselijk lichaam, of een sociaal systeem als dat van het oude Rome.<sup>14</sup> De tweede wet vertelt ons dat energie in de meeste systemen bij een normaal niveau van activiteit in kwaliteit vermindert: hoogkwalitatieve energie ontgaat in energie van een steeds lagere kwaliteit, met gewone laagkwalitatieve warmte als eindresultaat.<sup>15</sup> Het is alsof energie altijd bergafwaarts stroomt, van vormen die we kunnen gebruiken om veel werk mee te verrichten – zoals het hijsen van stenen in het Colosseum – naar vormen die hun nut min of meer verloren hebben. En elke keer als wij energie gebruiken om er werk mee te doen, wordt de kwaliteit van deze energie nog minder. Naarmate de energie van een systeem verder ontgaat, stellen natuurwetenschappers dat haar ‘entropie’ – vaak beschreven in termen van wanorde of willekeur – toeneemt.

Stel je, om een beter begrip te krijgen, voor dat je in een grote doos zit opgesloten met een krant, een stoel en een accu die op een gloeilamp is aangesloten. We gaan ervan uit dat de doos van de rest van de wereld geïsoleerd is en er van buitenaf geen energie de doos binnen kan komen of kan verlaten. In de doos is zowel in de accu als in jezelf hoogkwalitatieve energie geconcentreerd – bij jou in de vorm van de suikers en proteïnen die je uit je voedsel hebt verkregen en die je lichaam kracht geven. Natuurwetenschappers stellen dat zulke energie ‘coherent’ en ‘geordend’ is. Zittend in de doos kun je de krant lezen, omdat de accu zijn chemische energie in elektrische energie omzet die door de gloeilamp vervolgens tot lichtenergie wordt omgevormd. Dat licht snelt van de lamp weg en raakt de krant, de muren en andere voorwerpen in de doos waar het geabsorbeerd wordt en in laagkwalitatieve warmte ontgaat. In essentie wordt de energie van het licht als warmte door de doos verspreid, waardoor de incoherente en chaotische trillingen van de moleculen waaruit de dingen in de doos bestaan lichtjes toenemen. Maar de chemische energie in de accu is eindig, dus raakt de accu uiteindelijk uitgeput en dooft het licht.



In een gesloten systeem blijft het licht niet eeuwig branden.

Jij (de persoon in de doos) hebt veel met die accu gemeen: wanneer je dingen verplaatst en tilt zet je je chemische energie in ander vormen van energie om, zoals kinetische energie. Als er een hometrainer met dynamo in de doos staat, kun je op de pedalen trappen en het apparaat gebruiken om de verlichting van stroom te voorzien, zodat je de rest van je krant kunt lezen, en wordt de doos nog warmer naarmate de warmte die door je inspanning gegenereerd wordt in de vorm van zweet uit je lichaam wegvloeit. Maar zoals dat ook met de accu gebeurt, zullen je krachten verminderen en zal je uiteindelijk sterven. Alle hoogwaardige energie die in de accu en in je lichaam zit, zal dan worden ontaard, en de doos zelf zal uiteindelijk aflopen – net zoals een mechanische klok afloopt – en als een zwarte driedimensionale ruimte met een gelijkmatige temperatuur eindigen.

Later zullen we zien dat samenlevingen die onvoldoende toegang tot hoogwaardige energie hebben waarschijnlijk ineen zullen storten. De wetten van de thermodynamica maken ons duidelijk dat ondanks het feit dat energie niet gecreëerd of vernietigd kan worden, zij wel onvermijdelijk zal ontaarden, en zodoende steeds minder nut zal hebben voor het verrichten van werk. En als zij minder nut heeft voor werk, is zij minder bruikbaar om de complexiteit en veerkracht van een samenleving in stand te houden.

Ons licht-in-een-doos voorbeeld is volstrekt denkbeeldig en kunstmatig. Het geeft een 'gesloten' systeem weer, wat wil zeggen dat het volstrekt afgesloten is van de wereld erbuiten. Wetenschappers gebruiken zulke denkbeeldige systemen om de implicaties van hun theorieën te doordenken. Maar in werkelijkheid zijn vrijwel alle fysische, biologische, technologische en sociale systemen 'open'. Zij staan in wisselwerking met hun omgeving. Heel belangrijk is dat deze systemen vaak hoogkwalitatieve energie aan hun omgeving onttrekken om werk te doen of om de wanorde in hun kern te verminderen, en dat zij hun overbodige warmte en restmaterialen weer in de omgeving afstoten. Een stad als het oude Rome, bijvoorbeeld, importeerde zaken als hout, drinkwater en energie in de vorm van voedsel uit haar achterland, en loosde haar warmte, rioolwater en afval weer in haar omgeving (in de tijd van haar hoogste bevolkingsniveau had Rome waarschijnlijk een jaarproductie van zo'n miljoen kubieke meter menselijke uitwerpselen).<sup>16</sup> Een moderne auto gebruikt benzine om werk te doen en de auto in beweging te zetten, en hij stoot warmte en uitlaatgassen in de dampkring uit. Een staalfabriek gebruikt ijzererts en hoogkwalitatieve energie (in de vorm van bijvoorbeeld steenkool) om coherente en geordende materialen als stalen staven te creëren; tijdens dit proces stoot de fabriek warmte, koolstofdioxide en vervuiling in nabijgelegen water en lucht uit.

Op het eerst gezicht lijkt het alsof open systemen zich niet aan het klassieke thermodynamische principe houden dat wanorde, willekeur en entropie altijd zullen toenemen. De staalfabriek produceert immers laag-entropische stalen staven. En in de loop van de tijd werd de interne structuur van Rome ordelijker en complexer, en werden haar diverse sociale en technologische strata diverser, meer gespecialiseerd en onderling afhankelijker.

Uiteindelijk beseften wetenschappers dat het principe, dat de entropie van een systeem altijd moet toenemen, alleen geldt wanneer zijn grenzen zodanig worden gedefinieerd dat vrijwel alle wisselwerkingen met zijn omgeving erin omsloten worden. Het systeem van een staalfabriek omvat dan de hele technologische infrastructuur die de ijzererts en steenkool produceert waar de fabriek gebruik van maakt, alsmede de dampkring en de waterwegen waar zijn verontreinigende stoffen in worden geloosd. En het systeem van het oude Rome omvatte de zonne-energie die door de zon geleverd werd en het hele natuurlijke achterland van de stad met al zijn land, bossen, water en lucht. Binnen deze brede grenzen neemt de gemiddelde kwaliteit van de energie van het systeem altijd af, en neemt entropie altijd toe.

Niettemin kunnen er binnen het bredere systeem delen zijn die een zeer hoge graad van orde bezitten: Binnen het grotere systeem van het rijk was Rome een zone van lage entropie. Feitelijk kunnen zaken als steden, ecosystemen en zelfs onze menselijke lichamen spontaan orde en complexiteit creëren en hun entropie al doende nog verder verlagen.<sup>17</sup> Steden bouwen ingewikkelde infrastructures voor transport, drinkwater en energie; ecosystemen worden biologisch gezien diverser zodra er nieuwe soorten ontstaan; en menselijke embryo's ontwikkelen zich in mensen met alle complexe organen en structuren van dien. Hoe kunnen zulke verbazingwekkende dingen gebeuren?

Wetenschappers kunnen het nog niet met zekerheid zeggen. Maar zij weten nu al dat systemen als steden, ecosystemen of menselijke lichamen, zoals zij het uitdrukken, 'ver van hun thermodynamisch evenwicht' verwijderd zijn.<sup>18</sup> Zij kunnen spontaan orde binnen zichzelf creëren. Maar het handhaven van deze orde heeft veel weg van een poging een knikker met je vinger tegen de wand van een kom gedrukt te houden: de knikker rolt liever omlaag de kom in – dat is zijn punt van evenwicht; dus het vergt een constante toevoer van energie om de knikker tegen de zijkant gedrukt te houden. Analoog hieraan hebben steden, ecosystemen en menselijke lichamen een constante toevoer van hoogkwalitatieve energie nodig om hun complexiteit en orde – hun positie die ver van het thermodynamisch evenwicht verwijderd is – te handhaven tegenover de meedogenloze tendens van de natuur om in de richting van ontarding en wanorde te neigen. En naarmate het systeem groter en complexer wordt, is er steeds meer energie nodig om het systeem op gang te houden.

Al deze ideeën helpen ons niet alleen te begrijpen waarom het Romeinse Rijk ten onder ging, maar ook om het uiteindelijke lot van onze eigen samenlevingen beter te voorzien. Bij de bouw van complexen als het Colosseum legden de Romeinen een onvoorstelbaar technisch kunnen aan de dag. Minder voor de hand liggend, maar niet minder cruciaal, legden ze ook een enorme maatschappelijke vaardigheid aan de dag door zichzelf in arbeidseenheden te ordenen, de inspanningen van deze eenheden te coördineren, specialistische vaardigheden te bevorderen en zichzelf overheidsdiensten als bestuur, het innen van belastingen en veiligheid te verschaffen. Wetboeken regelden alles van geld en schulden tot eigendomsrechten, corporatieve organisaties, gilden en het in dienst nemen van arbeiders en slaven.<sup>19</sup>

Complexe maatschappelijke structuren komen niet zomaar uit de lucht vallen. Rechtbanken moeten worden bemand, functionarissen moeten betaald en legers moeten gevoed en met wapens uitgerust wor-

den. Willen deze structuren, regels en wetten kunnen ontstaan en in stand worden gehouden, dan vereist dat op een nog veel fundamenteeler niveau dat mensen rond kunnen reizen en met elkaar kunnen communiceren, discussiëren, ruziën en onderhandelen, dat ze elkaar op moeten kunnen leiden en moeten scholen, en dat ze de basisregels, de contracten en de overeenkomsten op een of andere manier – op een permanente informatiedrager als steen, perkament of een cd-rom – vast moeten kunnen leggen. Opnieuw, deze activiteiten vereisen hoogkwalitatieve energie.

De Romeinen gebruikten dus boerderijen om het zonlicht te vangen dat op grote lappen landbouwgrond in het mediterrane bekken neerdaalt. Sommige boerderijen bestonden al voordat de Romeinen zich er vestigden. Vooral in het oostelijke Middellandse Zeegebied – het huidige Libië en Syrië bijvoorbeeld – nam het immer uitdijende rijk bestaande steden en hun voedselproductie en belastingstelsels vaak simpelweg over, terwijl in het noordwesten van Europa – de Rhônevallei bijvoorbeeld – nieuw land soms in landbouwgrond werd veranderd. Maar waar die boerderijen ook precies lagen, in het Romeinse energiebeheer speelden ze een rol die vergelijkbaar is met de laders van zonnepanelen: ze zetten zonlicht in een vorm van hoogkwalitatieve potentiële energie om, in het bijzonder in veevoer en graan, die opgeslagen en vervoerd kon worden.

De Romeinen convergeerden vervolgens deze energie – ze gebruikten bij wijze van spreken hun voedselbatterijen – om een productief, veerkrachtig en fenomenaal complex systeem van openbare gebouwen, productiefaciliteiten, huizen, wegen, aquaducten en maatschappelijke structuren tot stand te brengen. En hier is de clou: recent onderzoek (waar we later nog over te spreken komen) wijst uit dat het Romeinse Rijk uiteindelijk niet in staat was voldoende hoogkwalitatieve energie te genereren om haar technische en sociale complexiteit in stand te houden. Het was dit tekort – veel meer dan directe aanleidingen als onbekwame keizers en invasies door de Visigoten – dat de fundamentele oorzaak van de ondergang van Rome vormde. In andere woorden: het verlies aan interne orde, cohesie en complexiteit binnen het Romeinse Rijk was voor een belangrijk deel een thermodynamische crisis. Het imperium kieverde een afgrond van onomkeerbaar verval in, omdat zij haar honger naar energie niet langer kon stillen.<sup>20</sup>

Dit was het ware lot van Rome. Zal dit ook ons lot zijn? Een nader onderzoek van de rol van energie in de Romeinse samenleving kan ons daar mee over vertellen.

### *De reis van een steen*

Toen ik een paar weken na mijn bezoek aan Rome in Canada terugkwam, stelde ik me ten doel de reis van mijn bewuste sluitsteen van begin tot eind, van de steengroeve tot het moment dat hij in de indrukwekkende boog werd geplaatst, te volgen. Ik had het gevoel dat door me op deze enkele steen te concentreren, ik meer greep zou krijgen op de rol van energie bij niet enkel de totale bouw van het Colosseum – en bij het leven in Rome in het algemeen –, maar ook bij de uiteindelijke ontakeling van het imperium.

Om te beginnen wendde ik mij tot mijn onderzoeksassistente aan de University of Toronto, Karen Frecker. Als schilder, pianiste en analiste van elektriciteitsbedrijven met een opmerkelijk stel hersens is Karen zeer bedreven in het toepassen van technische analyses op sociale vraagstukken. Ze ging vol enthousiasme aan de slag met de vraag hoeveel landbouwgrond de Romeinen nodig moeten hebben gehad om het Colosseum te bouwen. Ze splitste het project in twee delen: de vraag- en de aanbodzijde.

Om te beginnen verdiepte ze zich in de details van de bouw van het Colosseum. Vervolgens berekende ze de totale massa van de verschillende soorten materiaal die bij de bouw gebruikt waren. Daarna maakte ze een inschatting van de totale hoeveelheid werk – of energie – die nodig is geweest om al deze materialen te produceren, te vervoeren en op hun juiste plek in het gebouw te krijgen, en van het aantal mensen en ossen dat nodig was om dat werk te doen. Dit noemden we de ‘vraagzijde’ van het probleem. Daarna berekende ze hoeveel land er nodig is geweest om het voedsel te verbouwen om deze mensen en ossen te voeden. Dit was de ‘aanbodzijde’ van het probleem.

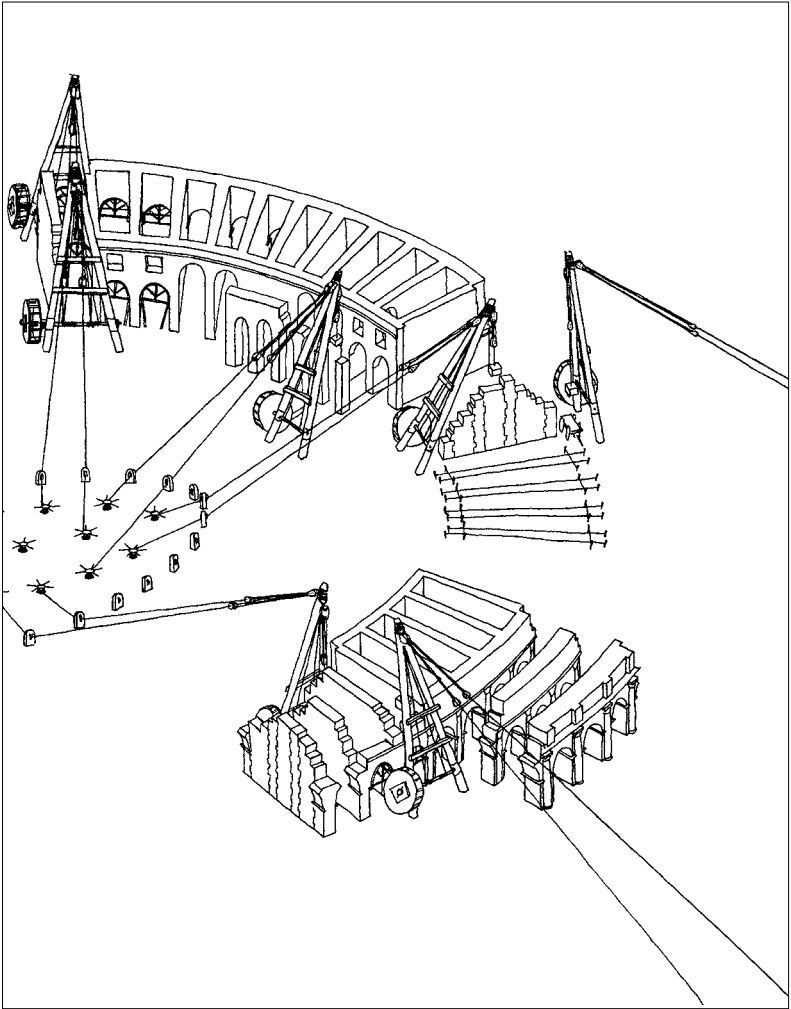
Dit klonk aanvankelijk niet al te ingewikkeld, maar bij al deze berekeningen kwam veel meer kijken – en de uitkomsten bleken ook veel interessanter te zijn – dan we ooit konden hebben vermoed.<sup>21</sup> We hanteerden een aantal basisaannames over de technologie, de aantallen arbeidskrachten en de agrarische gebruiken van de oude Romeinen en over de fysica van de Romeinse transport- en bouwmethoden. Om er zeker van te zijn dat onze aannames gefundeerd waren, raadpleegden we teksten uit die tijd, literatuur over Rome, verhandelingen over mechanica en deskundigen op het gebied van de architectuur en bouw van het Colosseum.

Aan het begin van het onderzoek ontdekten we dat er cruciale verschillen zijn tussen Romeinse en moderne gebouwen. Hedendaagse gebouwen worden voornamelijk uit materialen opgetrokken waarvan de fabricage enorme hoeveelheden energie vergt – staal, aluminium, glas,

plastic, baksteen en composietmateriaal. Maar Romeinse gebouwen bestonden voornamelijk uit steen dat door de natuur geleverd wordt. In die tijd waren het de metalen – het lood dat op grote schaal in waterleidingen werd gebruikt, het zilver in munten en het ijzer en koper in de wapenrusting, zwaarden en andere wapens zowel als het ijzer dat in vele gebouwen werd toegepast om de stenen bij elkaar te houden – die de meeste energie vergden om gewonnen en voor menselijk gebruik omgevormd te worden. Ook het maken van tegels en bakstenen was zeer energie-intensief: nadat ze uit klei, stro en kleine hoeveelheden hoogkwalitatief puzzolaanaarde gemodelleerd waren, werden ze in de zon te drogen gelegd en daarna gebakken in houtovens bij temperaturen die honderden graden konden bereiken.<sup>22</sup>

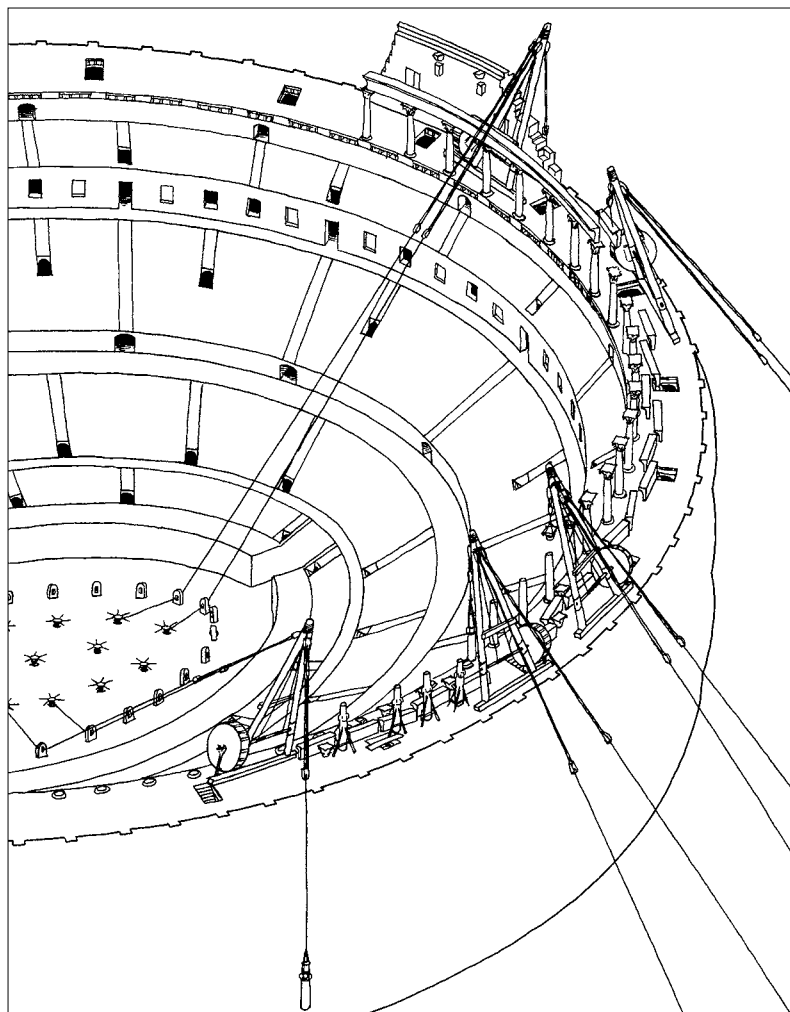
Wat betreft de energie die nodig was om het steen voor het Colosseum uit te houwen, te vervoeren en op zijn plek te krijgen, vormde mijn sluitsteen een uitstekend voorbeeld. Zo'n 1927 jaar voordat ik hem in zijn boog opmerkte, hadden arbeiders in de groeve van Tibur met beitels barsten in de natuurlijke travertijnen bodemlaag gehouwen. Daarna hadden ze wiggan in de barsten gedreven om zo een onbewerkt stuk steen van zo'n zes ton af te splijten.<sup>23</sup> Het steenblok werd op balken gemanoeuvreerd en met katrollen op een ossenkar gehesen die door twee ossen getrokken werd. Vervolgens begon de steen aan zijn reis van twee dagen en dertig kilometer naar Rome over een speciaal voor dat doel aangelegde weg. Volgens oude archieven kwamen er tijdens de bouw van het Colosseum elke dag tweehonderd van dergelijke ossenkarren speciaal voor de bouw van het Colosseum in de stad aan.<sup>24</sup> Anders dan mijn sluitsteen van travertijnmarmer kwam het tufsteen dat in het gebouw gebruikt werd van vlak buiten Rome vandaan, terwijl ook het beton en de bakstenen waarschijnlijk uit materialen gemaakt zijn die direct voorhanden waren. Sterker nog: een flink deel van het aggregaat dat als bindmiddel voor het beton in het Colosseum gebruikt werd, kwam waarschijnlijk uit het puin van de sloop van Nero's vlak bij gelegen paleis.<sup>25</sup>

Zodra het onbewerkte, zes ton wegende steenblok op de bouwplaats was aangekomen, bewerkten de steenhouwers het blok net zolang totdat het de juiste taps toelopende vorm had om precies tussen zijn burenen, de boog- of gewelfstenen, te passen. De arbeiders gebruikten een gigantische houten kraan met touw en blok om de boogstenen op de houten steiger te hijsen die speciaal gebouwd was om de boog tijdens de bouw overeind te houden; daarna werd de sluitsteen zelf omhoog getakeld en op zijn plek tussen de boogstenen gemanoeuvreerd en werd het geheel met ijzeren krammen vastgezet. Nu was de boog solide genoeg om de steiger weg te halen.<sup>26</sup>



Kranen in de vorm van A-draagstellen tilden het steen naar het eerste niveau van het Colosseum.

De kranen in de vorm van A-frames die voor het hijsen van de bouwstenen gebruikt werden, waren gigantisch stellingen van soms twintig meter hoog. Sommige van deze kranen stonden binnenin het Colosseum en reikten naar buiten, terwijl ze met honderden meters van hennep gemaakte tuitouwen in het centrum van de arena verankerd waren. Andere stonden buiten het Colosseum en reikten naar binnen, terwijl hun tuitouwen honderden meters van het gebouw af verankerd waren. Deze



Kranen werden naar de hoogste rij zitplaatsen versleept  
om de vierde laag te bouwen.

kranen konden enkel verticaal tillen, niet horizontaal, en dus moesten de bouwers de tuitouwen herhaaldelijk losmaken en de kranen keer op keer ontmantelen en opnieuw in elkaar zetten.<sup>27</sup> De meeste kranen werden met katrollen en met de hand aangezwengelde lieren bediend, maar voor de grootste werden tredmolens gebruikt: een aantal arbeiders, waarschijnlijk slaven, klom in het ronddraaiende geval dat nog het meest weg had van een gigantisch muizenrad – met een diameter tot acht meter en

in het Latijn *majus tympanum* genoemd. Door aan de binnenkant tegen de ronde muur van de tredmolen te klauteren, werd automatisch een as in beweging gebracht die als de lier van de kraan dienstdeed. Met dergelijke machines konden stenen van tientallen tonnen gehesen worden. Volgens een geleerde was het voor de Romeinen ‘een kwestie van eer... om met dergelijke enorme steenblokken te werken en zo hun zucht naar technisch vernuft te etaleren.’<sup>28</sup>

Zodra de eerste laag klaar was, sleepten de Romeinen hun kranen de hellende rijen hoger gelegen zit- en staplaatsen op, zodat ze de stenen bouwelementen voor de hogere verdiepingen konden ophijsen. De hoger gelegen muren bestonden overwegend uit met baksteen bekleed beton. Dit materiaal was lichter dan het travertijn en tufsteen dat voor de onderste laag gebruikt was en hoefde ook minder gewicht te dragen. Het natte beton werd waarschijnlijk in de arena gemengd en in emmers aan stukken touw omhoog getild, of door de arbeiders samen met ladingen baksteen op hun rug langs een meanderende route van trappen en steigers naar de werkzaamheden op de hogere niveaus omhoog gesleept. Toen de bouw uiteindelijk op een hoogte van een kleine vijftig meter bij de vierde en hoogste laag was aanbeland, plaatsten de bouwers een rij zuilen – tachtig in totaal – langs de binnenrand van de tribune. Elke kolomschacht woog op zich al meer dan negen ton en gezamenlijk hielden ze een fors hoofdstel en travertijnen dak in de lucht dat ontworpen was om de toeschouwers op de bovenste tribunes van het amfitheater tegen de zon te beschutten.<sup>29</sup>

### *Kolossale calorieën*

Karen ontwierp allerlei slimme manieren om de totale massa in te schatten van de verschillende materialen die in het Colosseum gebruikt waren en de afstanden die ze naar de bouwplaats af hadden moeten leggen.<sup>30</sup> Daarna stopte ze deze getallen in standaardvergelijkingen die gebruikt worden om de hoeveelheid energie te berekenen die nodig is om een bepaalde hoeveelheid massa te dragen, te duwen, te trekken en te hijsen. Dit gaf haar een – wetenschappelijk gefundeerde – schatting van de minimale hoeveelheid menselijke energie die nodig is om de bouwmaterialen te verplaatsen. Maar dit was nog maar het begin, omdat het grootste deel van het werk aan de bouw van het Colosseum niet in deze berekeningen verdisconteerd was. Voor het leeuwendeel van het vervoer van materiaal van de groeven naar de bouwplaats werden bijvoorbeeld ossen ingezet.<sup>31</sup> En dan waren er nog de Romeinen die de funderingen hadden

aangelegd, die de ossenkarren van en naar de steengroeve menden, de stenen op de bouwplaats zelf op maat hakten, de steigers opbouwden en afbraken en het beton mengden en stortten. Al deze activiteiten werden bijgehouden en iedereen die bij de bouw betrokken was, moest een onderkomen, kleding en voedsel hebben. Feitelijk waren er minstens twaalf gildes bij dit verbijsterende project betrokken, waaronder bouwvakkers, bronsgieters, smeden, timmermannen, kruiers, baksteenmakers, marmerbewerkers, stratenmakers en steenhouwers.<sup>32</sup>

En dus berekende Karen de hoeveelheid werk die voor elk van deze bijkomende taken vereist was.<sup>33</sup> Terwijl ons project tot steeds grotere proporties opzwol (en wij meer en meer aan ons verstand begonnen te twijfelen), produceerde ze talloze berekeningen en voegde ze honderden getallen aan haar steeds verder uitdijende spreadsheets toe.

Ondanks dat we veel aandacht aan details hadden geschonken, moesten we toch heel wat zaken uit onze berekeningen weglaten. Bij ons was het Colosseum bijvoorbeeld enkel een lege huls: de uitgebreide versieringen aan de binnen- en buitenkant van het gebouw, de beeldhouwwerken en de fonteinen – er waren in het gebouw waarschijnlijk meer dan honderdvijftig fonteinen aangelegd – of zelfs de interne riolering voor de wc's werden niet meegerekend.<sup>34</sup> Omdat we geen accurate data konden vinden voor de hoeveelheid werk die het in en uit elkaar halen en verplaatsen van de kranen met zich meebracht, moesten we ook deze belangrijke factor buiten beschouwing laten. Tot slot was het Colosseumproject in termen van thermodynamica een klassiek open systeem. De Romeinen moesten bijvoorbeeld hout kappen en vervoeren om hun steigers en kranen te kunnen bouwen, en ze hadden enorme hoeveelheden brandhout nodig om kalk te blussen, metaal te smeden en baksteen te produceren. De benodigde houtkap moet zich tot ver in het achterland van de stad hebben uitgestrekt. Daar waren niet alleen houthakkers bij betrokken, maar ook talloze ossenspannen en menners, wegebouwers en een hele verzameling mensen die deze arbeiders en ossen van gereedschap en voedsel voorzagen. Om onze taak nog een beetje hanteerbaar te maken, besloten we echter dat al dit werk buiten de begrenzing van het systeem van het Colosseum viel: in plaats daarvan richtten we ons enkel op de caloriebehoefte van de mensen en de dieren die direct bij de bouw betrokken waren.

Zelfs dan nog was de uiteindelijke optelsom onthutsend: de bouw van het Colosseum had meer dan vierenvestig miljard kilocalorieën energie gekost.<sup>35</sup> Daarvan ging ruim vierendertig miljard kilocalorieën naar het veevoer dat voor de 1806 ossen bestemd was, die voornamelijk voor transportdoeleinden ingezet werden. Meer dan tien miljard kilo-

calorieën gingen op aan het voeden van de geschoolde en ongeschoolde arbeidskrachten, wat neerkomt op een totaal van 2135 arbeiders die vijf jaar lang 220 dagen per jaar werkten.<sup>36</sup>

Sommige resultaten van onze analyse van de vraagzijde verbaasden ons. Wij kwamen erachter dat de standaardschatting in de wetenschappelijke literatuur van de hoeveelheid beton die door de Romeinen gebruikt was – ongeveer zesduizend ton – er een flink eind naast zat: alleen al in het gebouw was de werkelijk gebruikte hoeveelheid bijna dertig keer groter. Het Colosseum lijkt wat dat betreft een beetje op een ijsberg: het grootste deel van het volume bevindt zich onder de grond, en bijna negentig procent van deze ondergrondse funderingen bestaat uit beton.<sup>37</sup> Het zichtbare travertijnmarmmer en de tufsteen en baksteen maken in feite nauwelijks dertig procent van het gehele volume uit. Ook vonden we het een opmerkelijk resultaat dat driekwart van het totale energieverbruik aan de ossen opging. Ook het onderhouden van de arbeiders als ze niet aan het werk waren, bleek behoorlijk energie-intensief – ze moesten per slot van rekening tijdens feest- en rustdagen in leven gehouden worden, en waar het feestdagen betrof was het oude Rome behoorlijk scheutig.

Ten slotte was er nog het meest verbazingwekkende feit van allemaal. Toen ik mijn sluitsteen voor het eerst in het oog kreeg, kon ik alleen maar aan de gigantische inspanningen denken die nodig waren geweest om met blokken steen en de andere zware materialen op de bouwplaats zelf rond te slepen, en stenen van duizenden kilo's en complete zuilen tot op een hoogte van vijftig meter op hun plek te takelen. Maar toen we onze analyse van de vraagzijde hadden afgerond, ontdekten we dat al deze activiteiten slechts een fractie – ongeveer vier procent – van alle energie had opgeslorpt die nodig was om het Colosseum te bouwen.

Dit was een openbaring. Het herinnerde me eraan dat menselijke samenlevingen een groot deel van hun energie juist op minder voor de hand liggende plekken en manieren verbruiken – bijvoorbeeld bij het uitgraven en de aanleg van de fundering van het Colosseum. Maar meestal hebben we nauwelijks oog voor deze onzichtbare doch essentiële activiteiten. En dit zou een cruciale ontdekking in mijn bredere onderzoek worden: om de rol te kunnen begrijpen die energie bij het aanpassingsvermogen en voortbestaan van onze samenlevingen speelt, moet het voor ons de normaalste zaak van de wereld worden om deze cruciale rol van energie in al haar toepassingen en consequenties te herkennen.

### *De EROI-factor*

Toen we eenmaal het totaal aantal calorieën berekend hadden dat voor de bouw van het Colosseum nodig was, konden we ons op de aanbodzijde richten. Hoeveel akkerland hadden de Romeinen nodig gehad om het voedsel te verbouwen dat de calorieën voor de dieren en de mannen moest leveren die al dit werk hadden gedaan?

Het Romeinse dieet bestond uit een mengsel van graan (vooral tarwe), fruit (waaronder olijven en vijgen), peulvruchten, kleine porties vlees, groenten en wijn.<sup>38</sup> Ossen kregen hooi, peulen, gierst, klaver, boombladeren, kaf en peulschillen te eten.<sup>39</sup> Maar om onze berekeningen hanteerbaar te maken, besloot Karen als uitgangspunt te nemen dat de Romeinen slechts twee gewassen verbouwden: tarwe voor de mensen en hooi voor de ossen, met luzerne als de voornaamste hooisoort.<sup>40</sup> Hoewel de Romeinen hun ossen ook op hun weilanden lieten grazen, lijkt het erop dat werkossen voornamelijk veevoergewassen gevoerd werden. Cato de Oude maakte in zijn verhandeling uit de tweede eeuw voor Christus, *De Agri Culturā*, de prachtige opmerking 'dat ossen niet vrijelijk zouden moeten mogen grazen, behalve wanneer ze geen werkossen zijn, want hebben ze eenmaal van dat groene spul geproefd, willen ze niets anders meer en verwachten ze het de hele tijd, en dan wordt het noodzakelijk ze te muilkorven wanneer ze de ploeg trekken.'<sup>41</sup>

Veel van het Romeinse graan was afkomstig uit Noord-Afrika, Egypte, Spanje, Sardinië en Sicilië.<sup>42</sup> De regio's Etrurië en Campanië – net ten noorden en ten zuiden van Rome, aan de Italiaanse westkust – waren ook zeer vruchtbaar en leverden waarschijnlijk ook kleine hoeveelheden voedsel aan de omringende gebieden, waaronder Rome. Dus werd het graan per schip over de Middellandse Zee en over land langs de kust van het Italiaanse schiereiland aangevoerd.<sup>43</sup> Zodra het in de haven van Ostia, aan de mond van de Tiber, aankwam, werd het graan gelost, gewogen, gesorteerd en op binnenschepen overgeladen die door mannen en ossen over een afstand van twintig kilometer door de rivier naar Rome werden getrokken.<sup>44</sup> Archiefmateriaal wijst uit dat tijdens het bewind van Augustus de stad jaarlijks alleen al een half miljoen kubieke meter graan uit Egypte en Noord-Afrika opsloeg, genoeg om een kubus met als zijde de lengte van een voetbalveld tot de nok te vullen.<sup>45</sup>

In de tijd van het oude Rome bracht een gemiddelde hectare vruchtbaar akkerland in Etrurië 1.158 kilo tarwe en 2.600 kilo gedroogde luzerne op.<sup>46</sup> Maar boeren reserveerden altijd een deel van de geoogste zaden voor de nieuwe aanplant van het volgend jaar, en een flink deel van elke oogst ging als gevolg van ongedierte en bederf tijdens de opslag en



Het oude Rome en de haar omringende gebieden.

het transport verloren.<sup>47</sup> Rekening houdend met deze factoren, schatten we dat een hectare Romeins landbouwgrond in het geval van tarwe ongeveer 2,4 miljoen kilocalorieën, en in het geval van gedroogde luzerne ongeveer 4 miljoen kilocalorieën aan bruikbare energie kon opleveren.<sup>48</sup> Daarbij hadden we echter nog steeds een cruciale complicatie buiten beschouwing gelaten: er waren heel wat mensen bij het verbouwen van de tarwe en de luzerne betrokken, en ook die moesten op hun beurt allemaal weer worden gevoed. In andere woorden: Romeinse boeren moesten calorieën verbranden om calorieën te kunnen produceren. Dus voordat we tot een definitief getal konden komen voor de totale hoeveelheid land die nodig was geweest om het Colosseum te bouwen, moesten we eerst zien te achterhalen hoeveel arbeid er nodig was om een hectare akkerland te bebouwen.

Het blijkt dat we elk project dat energie zou moeten genereren, waaronder de landbouw, op precies dezelfde wijze kunnen doorberekenen als dat we dat bij een financiële investering doen: we zetten de grootte van die investering af tegen wat het ons oplevert. In het geval van energieprojecten noemen energiedeskundigen deze verhouding het energierendement op investering of het *EROI*.<sup>49</sup> We berekenen de *EROI*-factor door de hoeveelheid energie die een project oplevert te delen door de hoeveelheid energie die het verbruikt. In het geval van bijvoorbeeld een moderne steenkolenmijn delen we de bruikbare energie in de steenkool die door de mijn geproduceerd wordt door de som van alle energie die nodig is om de steenkool te delven en geschikt te maken om verbrand te worden, inclusief de energie in de dieselbrandstof die door de drilboren, graafmachines en kiepauto's gebruikt wordt en de energie in de elektriciteit die door de machines die de steenkool vermalen en sorteren wordt opgeslokt.

Als je geïnteresseerd bent in de rol van energie in de menselijke samenleving – ook in onze eigen samenleving, zoals we verderop zullen zien – houdt dan de *EROI*-factor van de verschillende energiebronnen in de gaten, want dit is een van de nuttigste factoren voor het vergelijken van de relatieve waarde van deze bronnen. 'Er is een veel hogere *EROI* dan 1 op 1 nodig om een samenleving op gang te houden,' aldus systeemecoloog Charles Hall en zijn collega's, 'want energie is ook noodzakelijk om de machines te bouwen die de energie gebruiken, [en ook] om de benodigde arbeidskrachten te voeden, te huisvesten, op te leiden en van gezondheidszorg te voorzien, enzovoort.'<sup>50</sup> In agrarische samenlevingen zoals die van de oude Romeinen, waar mensen het grootste deel van het agrarische werk deden, moest de voedselproductie ook een *EROI* van ver boven de 1 op 1 hebben, opdat de samenleving zich een zeker niveau van sociale en technologische complexiteit kon veroorloven. In elke

complexe samenleving parasiteren degenen die geen boer zijn welbeschouwd op degenen die de energiebronnen verbouwen – de granen, de groenten, het fruit en het vlees – die onze lichamen in beweging houden.

Om de waarheid van deze beweringen beter te begrijpen: stel je een agrarische samenleving voor waarin mensen al het werk doen waaronder al het agrarische – waar met andere woorden geen ossen of andere trekdieren worden gebruikt – en die een EROI van slechts 1 op 1 heeft. In zo'n samenleving zouden de boeren zelf alle energie verbruiken die de landbouw oplevert: iedereen zou uitsluitend moeten werken om zichzelf te voeden, dus zou er geen energie overblijven om andere mensen te onderhouden die andere dingen doen – niet eens om huizen voor de boeren te bouwen, boerengereedschappen te maken of het eten klaar te maken. Als het EROI van deze samenleving onder de 1 op 1 zou vallen, dan zouden de boeren niet eens genoeg energie genereren om zichzelf in stand te houden, en zouden ze langzaamaan verhongeren.

Tweeduizend jaar geleden waren Romeinse boerderijen vaak als grote plantages – of *latifundia* – georganiseerd die door slaven bewerkt werden.<sup>51</sup> Hun agrarische technologieën hadden opmerkelijk veel weg van die, die vandaag de dag op het platteland in Afrika en Azië nog steeds worden toegepast. Ossen trokken de ijzeren scharen van de ploegen door de grond en de boeren zaaiden de nieuwe aanplant met de hand in, maakten de grond met mest vruchtbaar en gebruikten grote manden om het kaf van het koren te scheiden. De landbouwhistoricus M.S. Spurr kwam tot de conclusie dat de Romeinen elk jaar ongeveer achtenvijftig dagen moesten werken om één hectare tarwe te verbouwen en ongeveer veertig dagen om één hectare hooi te kweken.<sup>52</sup> Omdat één arbeidsdag ongeveer drieduizend calorieën verbrandt, verbruikten de landarbeiders ongeveer 174.000 kilocalorieën om een hectare tarwe te verbouwen en te oogsten en zo'n 120.000 kilocalorieën voor een hectare luzerne. Maar hiermee was het hele verhaal uiteraard nog niet verteld, want ook op de dagen dat ze niet op de velden werkten, moesten de landarbeiders worden gevoed. Als we al deze factoren meewegen, komen we tot een geschat Romeins EROI van rond de twaalf voor tarwe en rond de zeventwintig voor luzerne.<sup>53</sup> Met andere woorden: elke kilo tarwe die de Romeinen in de landbouw investeerden, leverde ze een rendement van ongeveer twaalf kilo op.

Karen was eindelijk bij de laatste stappen in het proces aanbeland om een inschatting van de totale hoeveelheid land te maken die nodig was geweest om de energie te produceren om het Colosseum te bouwen. Nu kon ze eindelijk de cruciale energieoverschotten per hectare bewerkt land berekenen: 2,2 miljoen kilocalorieën voor tarwe en 3,8 miljoen kilo-

calorieën voor luzerne. Vervolgens deelde ze deze uitkomsten door de aantallen calorieën die voor de arbeiders en ossen in het Colosseum nodig waren geweest.

Het resultaat was indrukwekkend: om het Colosseum te bouwen hadden de Romeinen vijf jaar achtereenvolgende ongeveer 19,8 vierkante kilometer ten dienste moeten stellen aan het verbouwen van tarwe en 35,3 vierkante kilometer aan het kweken van luzerne. Dat is een totaal van vijfenvijftig vierkante kilometer landbouwgrond – of bijna het oppervlak van het eiland Manhattan.<sup>54</sup> En om de zonne-energie te vangen die nodig was om die enkele sluitsteen, die ik bij mijn bezoek aan het Colosseum gespot had, uit te houwen, te vervoeren, bewerken en op zijn plek te hijsen, moest bijna 0,13 hectare landbouwgrond worden opgeofferd.<sup>55</sup>

### *Dwingende energiebehoeften*

Een weinig nauwkeurige maar toch nuttige maatstaf voor de complexiteit van een samenleving is haar graad van verstedelijking. Langs deze meetlat bezien, was het Romeinse Rijk voor een agrarische samenleving buitengewoon complex. De afmetingen van Rome en de graad van verstedelijking in cruciale regio's als het Italiaanse schiereiland en Egypte kenden tot aan het tijdperk van de industrialisatie naar alle waarschijnlijkheid hun gelijke niet.<sup>56</sup> Om deze verstedelijking, complexiteit en orde in stand te houden, moesten de Romeinen zich enorme inspanningen getroosten om energie op te wekken en te vervoeren.<sup>57</sup> En dit kan wel eens het zwakke punt zijn geweest dat het imperium noodlottig is geworden.

Toen het imperium zich in de eerste en tweede eeuw van onze jaartelling op zijn hoogtepunt bevond, groeide de bevolking van Rome zelf waarschijnlijk naar zo'n één miljoen inwoners uit.<sup>58</sup> Het is veel lastiger om de totale bevolking van het rijk in te schatten, omdat er op dat gebied nauwelijks betrouwbare data bestaan.<sup>59</sup> Alles in aanmerking genomen, rijst uit het bestaande materiaal echter het vermoeden op dat ze op het einde van de tweede eeuw een piek van rond de zestig miljoen bereikt had. Van dit totale inwonertal woonde tussen de vijftien en twintig procent in een netwerk van een paar duizend steden.<sup>60</sup> De meeste van deze steden waren klein, plaatsen met tussen de tien- en vijftienduizend inwoners, terwijl maar een handvol metropolen als Alexandrië, Antiochië en Carthago een paar honderdduizend inwoners telden. Meer dan dertig procent van de Egyptische bevolking woonde waarschijnlijk in verstedelijkte gebieden, terwijl dit percentage – gezien de enorme omvang van

de stad Rome zelf – voor het Italiaanse schiereiland wellicht boven de twintig moet hebben gelegen.<sup>61</sup>

Tot Londen aan het begin van de negentiende eeuw zou na de val van Rome geen enkele stad in Europa een inwonertal van een miljoen scoren en nog tot ver in de achttiende eeuw was de gemiddelde urbanisatiegraad van de meeste westerse samenlevingen nog steeds niet boven de tien procent gestegen.<sup>62</sup> De historisch-demograaf E.A. Wrigley schreef daarover:

De uiteindelijke oorzaak voor de betrekkelijk lage urbanisatiegraad in de pre-industriële samenlevingen laat zich niet moeilijk raden. Om te leven moet je eten. Pas als het productieniveau van de landbouw per hoofd van de bevolking naar het punt stijgt waar één boer tien, twintig of zelfs vijftig mensen van zijn land kan laten leven, kan een hoge urbanisatiegraad bereikt worden. [In] veel pre-industriële samenlevingen was het productieniveau per hoofd van de bevolking zo laag en door de grilligheid van de oogsten van jaar op jaar zo wisselvallig dat er onvoldoende overschotten waren om een aanzienlijke niet-agrarische bevolking te kunnen onderhouden.<sup>63</sup>

De stad Rome, waar op zeker moment honderdduizenden mensen van gratis door de keizer gedistribueerd graan moesten leven, legde beslag op minstens 8.800 vierkante kilometer landbouwgrond om genoeg tarwe voor de stedelingen te verbouwen, een lap grond die niet veel kleiner is dan het huidige Libanon. De totale bevolking van het Romeinse Rijk had voor haar voedselvoorziening 530.000 vierkante kilometer nodig, oftewel een gebied dat met het huidige Frankrijk overeenkomt.

Rond de Middellandse Zee en verder de binnenlanden in, zoals langs de vruchtbare rivierdalen van de Rhône en de Nijl, bouwden Romeinse ingenieurs irrigatiesystemen, stelsels van waterwegen voor het transport en opslagfaciliteiten voor graan, olie en wijn.<sup>64</sup> Botenbouwers produceerden een armada van graanschepen,<sup>65</sup> terwijl functionarissen overal het land inspecteerden en de grond op basis van hun kwaliteit en bruikbaarheid indeelden en eigendomsrechten vaststelden en op de naleving ervan toezagen – allemaal manieren om belastbare landbouwgronden en personen in kaart en onder het gezag van Rome te brengen.<sup>66</sup> De belangrijkste belasting die in het voormalige imperium geheven werd – en naar alle waarschijnlijkheid goed was voor zo'n negentig procent van de belastingopbrengsten – was die op landbouw.<sup>67</sup>

Wat vertelt dit ons over het dilemma waar de mensheid zich aan het begin van de eenentwintigste eeuw voor geplaatst ziet? Naar mijn mening brengt dit twee cruciale lessen over het voetlicht.

Ten eerste staan onze rijke, hoogtechnologische westerse samenlevingen er wat betreft hun dwingende energiebehoeften niet anders voor dan arme, zich ontwikkelende samenlevingen of, om maar iets te noemen, de oude Romeinen. Al onze samenlevingen hebben alleen al enorme stromen hoogkwalitatieve energie nodig om hun complexiteit en orde in stand te houden – om van een toename daarvan nog maar te zwijgen – om, in de onhandige terminologie van de natuurkunde, ver van hun thermodynamisch evenwicht verwijderd te blijven. Zonder een constante toevoer van hoogkwalitatieve energie hebben complexe samenlevingen geen veerkracht tegen schokken van buitenaf. En ze zouden vrijwel zeker niet overleven. Deze steeds aanwezige gevaren dwingen samenlevingen onophoudelijk te zoeken naar energiebronnen met het hoogst mogelijke rendement op investering (EROI). Hierdoor worden ze ook gedwongen om de gebieden waar hun energie vandaan komt in hun greep te krijgen en te organiseren en zo hun belangen, betrekkingen en hun veelal politieke en economische overheersing naar ver buiten hun huidige grenzen te verleggen – zoals we dat vandaag de dag bij de Amerikaanse betrokkenheid in Irak en de Perzische Golf zien.

De tweede les ligt minder voor de hand, maar is belangrijker: op zeker moment en zonder spectaculaire nieuwe technologieën om energie te vinden en te gebruiken, begint het resultaat van de investeringen van een samenleving om energie te produceren – het EROI – af te nemen. Het Romeinse imperium zat vast in een energiesysteem dat op voedsel gebaseerd was. Naarmate het imperium groter werd en tot zijn volle wasdom kwam; naarmate het de beste landbouwgronden rond de Middellandse Zee in gebruik had en in sommige gevallen uitputte om vervolgens verder te trekken om armere landbouwgronden te bewerken; en naarmate de bevoorradingsroutes van het graan naar de belangrijkste steden steeds langer en complexer werden, moest er steeds meer werk worden verzet om elke additionele duizend kilo graan te produceren.

Wat betreft veel van haar essentiële energiebronnen als conventionele olie, aardgas en waterkracht wordt de mensheid vandaag de dag met eenzelfde trend geconfronteerd. Wij hebben de grootste en makkelijkst toegankelijke olie- en gasvelden al ontdekt en aangeboord en de beste waterkrachtlocaties al in gebruik genomen. Naarmate we steeds dieper moeten boren en steeds verder buiten de eigen grenzen moeten gaan om olie en gas te winnen, en we ons meer en meer tot alternatieven als teerzanden, zonnekracht, windenergie en kernenergie moeten wenden,

komen we erachter dat we steeds grotere hoeveelheden energie moeten investeren om energie te verkrijgen.

Hoewel de hedendaagse samenlevingen met dezelfde dringende energiebehoeften te kampen hebben als de oude Romeinen, wijken ze in één cruciaal opzicht van hen af: moderne samenlevingen zijn veel complexer en ordelijker en bevinden zich veel verder van hun thermodynamisch evenwicht. Met andere woorden: onze samenlevingen zijn als die knikker die naar de bodem van de kom wil rollen, en in vergelijking met het oude Rome houden wij de knikker veel hoger tegen de zijkant van de kom gedrukt. Reusachtige stromen hoogkwalitatieve energie maken dit mogelijk. Wanneer wij deze stromen niet langer in stand kunnen houden, zullen onze samenlevingen weer naar hun evenwicht terugvallen – wat er in essentie op neerkomt dat hun complexiteit uiteen zal vallen. En dat uiteenvallen, mocht het zover komen, zou de ondergang van Rome verre in de schaduw stellen.