

# Introductie

We leven in een wereld waar transport onmisbaar is. Mensen moeten zich vaak van A naar B verplaatsen: van huis naar de winkel, naar school, naar familie in een andere stad of op vakantie naar het buitenland. Afhankelijk van de afstand die je moet afleggen en de tijd die je hebt, kun je ervoor kiezen om lopend te gaan, met de fiets, met de auto, met de trein of met het vliegtuig. En natuurlijk zijn er nog veel meer bestemmingen en manieren om op die bestemming te komen.

Alle vormen van transport hebben één ding gemeen, ze kosten energie. Als je loopt of fietst, wordt de energie uit voedsel gebruikt. Als je op een scooter zit of in een auto rijdt, wordt energie uit de brandstoftank gebruikt. In een trein wordt elektrische energie van een energiecentrale gebruikt. En vliegtuigen gebruiken de energie uit kerosine.

Maar waar wordt al deze energie eigenlijk voor gebruikt? Waarom kost bewegen energie? En wat gebeurt er met deze energie als de beweging ophoudt? En waarom zijn elektrisch auto's zoveel efficiënter dan auto's op fossiele brandstoffen?

De belangrijkste begrippen om deze vragen te kunnen beantwoorden zijn: kinetische energie, luchtweerstand en rolweerstand. Deze begrippen zullen worden uitgelegd en na afloop kun je zelf een belangrijke vraag beantwoorden:

Wat is de goedkoopste en meest efficiënte manier van transport?

## Aandrijving

### Kinetische energie

---

Alle bewegende voorwerpen hebben een bepaalde hoeveelheid energie in zich: kinetische energie. Deze energie komt vrij wanneer de voorwerpen tot

stilstand komen. Zeker als een voorwerp heel snel tot stilstand komt, is het duidelijk dat de kinetische energie vrijkomt. Denk bijvoorbeeld aan een vaas die kapot valt.

De kinetische energie van een voorwerp is afhankelijk van de massa en de snelheid:

$$E_k = \frac{1}{2} mv^2$$

Hierin is  $E_k$  de kinetische energie van het voorwerp (in Joule),  $m$  is de massa (in kg) en  $v$  is de snelheid (in m/s).

```
[Wat heeft de grootste kinetische energie?  
- een kogel van 25 gram die met 180 km/h door de lucht vliegt;  
- een voetbal van 250 gram die met 36 km/h in de lucht wordt geschoten;  
- een bowlingbal van 1 kilo die met 18 km/h over een baan rolt;  
(31.25 Joule, 12.5, 12.5 Boodschap: door het kwadratische verband met de snelheid, heeft een verdubbeling van de snelheid veel meer effect dan een verdubbeling van de massa.)  
]]
```

Een voorwerp dat niet beweegt, heeft een snelheid van 0 m/s en heeft dus geen kinetische energie. Om dit voorwerp in beweging te krijgen, moet er energie in worden gestopt. Voor auto's kan deze *aandrijving* op twee manieren gebeuren:

1. Met een verbrandingsmotor; of
2. Met een elektrische motor.

## Verbrandingsmotor

---

In een benzine-auto komt de energie die nodig is voor de aandrijving uit benzine. De benzine wordt verbrand in de motor. Hier wordt de chemische energie van de benzine omgezet in warmte. Door deze warmte zet de lucht in de motor uit waardoor een drukverschil met de buitenlucht ontstaat. Dit drukverschil duwt zuigers heen en weer door cilinders. De zuigers zitten op

hun beurt vast aan een aandrijfas. Door de beweging van de zuigers gaat dus ook de aandrijfas draaien. De aandrijfas zit aan de wielen vast dus op deze manier gaan de wielen draaien en komt de auto in beweging.

[Zet in de goede volgorde

- Benzine verbranden;
  - Lucht opwarmen
  - Uitzettende lucht;
  - Drukverschil opbouwen;
  - Zuigers laten bewegen;
  - Aandrijfas laten draaien;
  - Wielen laten draaien;
  - Auto in beweging laten komen;
- ]

Bij alle energieomzettingen, komt warmte vrij. In sommige gevallen is deze warmte nuttig, maar meestal is dit verloren energie. Als een zuigers door een cilinder beweegt, zal de cilinder door wrijving een beetje opwarmen. Deze warmte wordt uiteindelijk aan de buitenlucht afgegeven en draagt dus niet bij aan de aandrijving van de auto.

Een gemiddelde verbrandingsmotor heeft een efficiëntie van zo'n 30%. Dat betekent dat voor elke 100 Joule aan brandstof die je tankt, slechts 30 Joule gebruikt worden om de auto aan te drijven. De overige 70 Joule gaat verloren als warmte.

## Elektrische motor

---

Elektrische auto's gebruiken geen verbrandingsmotoren. In plaats daarvan wordt een elektromotor gebruikt. Deze motoren zetten elektrische energie direct om in beweging, zonder dat er eerst warmte wordt geproduceerd.

Het opslaan van energie is in een elektrische auto relatief moeilijk. De meest bekende vorm van elektriciteitsopslag is de accu. Het nadeel van accu's is dat de energiedichtheid (energie per gewicht) 50 tot 100 keer lager is dan in brandstof. Om een grote afstand af te kunnen leggen, moet een elektrische auto dus een enorm gewicht aan accu's meenemen. Dit extra gewicht maakt het ook weer moeilijker om de auto in beweging te brengen.

De efficiëntie van een elektromotor is zo'n 90-95%. Voor 100 Joule aan elektrische energie gaat dus slechts 5-10 Joule verloren in de vorm van warmte.

## Energieverliezen

---

Als de energie die door de motor in de aandrijving wordt gestopt bij het remmen teruggewonnen zou kunnen worden en er verder geen energieverliezen zijn, dan zou er netto geen energie nodig zijn voor transport. Helaas niet alle kinetische energie tijdens het remmen worden terugwonnen en helaas zijn er wel degelijk andere energieverliezen. Er zijn dus drie vormen van energieverlies die ervoor zorgen dat het energie kost om van A naar B te rijden, namelijk energieverliezen door:

- Optrekken en Remmen,
- Rolwrijving, en
- Luchtwrijving.

In de komende hoofdstukken zul je ontdekken hoe groot deze energieverliezen zijn en – nog belangrijker – hoe we deze verliezen kunnen verkleinen.

## Optrekken en Remmen

In een dichtbevolkt land als Nederland kun je bijna nooit van A naar B komen zonder te stoppen. Of je nou loopt, fietst of met de auto rijdt, je zult af en toe moeten afremmen voor andere weggebruikers. Of je moet wachten voor een stoplicht. Elke keer dat je met een auto afremt, moet de kinetische energie uit de auto worden gehaald. Dit gebeurt meestal met behulp van remmen die de kinetische energie omzetten in warmte. Als je na een stop weg wilt rijden, moet de motor opnieuw energie omzetten naar kinetische energie van de auto.

Hoeveel energie ben je bij een auto-rit kwijt aan remverliezen? Om deze vraag te kunnen beantwoorden, moeten eerst een aantal andere vragen worden beantwoord:

- Hoe zwaar is de auto?
- Hoe hard rijdt de auto op alle momenten tijdens de rit?
- Welk parcours rijdt de auto?

## Gewicht

---

De formule voor kinetische energie,  $E_k = \frac{1}{2} mv^2$ , laat zien dat de kinetische energie recht evenredig is met de massa.

[Hoeveel keer meer kinetische energie heeft een Hummer (3000 kg) dan een Smart (800 kg) als ze 30 km/h rijden?

- Ongeveer 2
- Ongeveer 3
- Ongeveer 4
- Ongeveer 8]

Bovenstaand voorbeeld laat zien dat remverliezen eenvoudig verkleind kunnen worden door een auto lichter te maken. In de praktijk betekent dit vaak dat een auto óf kleiner óf minder comfortabel wordt. Maar met behulp van innovaties is het steeds vaker mogelijk om een auto lichter te maken zonder in te leveren op grootte of comfort.

Een voorbeeld van zo'n innovatie is het plaatsen van elektrische motoren in de wielen. Op deze manieren is de zware overbrenging van de motor naar de wielen niet meer nodig. Dit betekent dat het chassis minder massa hoeft te ondersteunen en dus lichter kan zijn. Doordat de auto nu lichter is geworden, kunnen de elektromotoren kleiner worden en is er minder accucapaciteit nodig, waardoor de auto lichter kan worden en het chassis weer minder sterk hoeft te zijn, enzovoorts.

## Snelheid

---

De formule voor kinetische energie,  $E_k = \frac{1}{2} mv^2$ , laat zien dat de kinetische energie kwadratisch evenredig is met de snelheid.

[Hoeveel keer meer energie kost het om tot stilstand af te remmen vanaf 30 km/h dan het afremmen vanaf 10 km/h?

- 3 keer
- 4 keer
- 6 keer
- 9 keer
- 9 keer]

Kinetische energie gaat niet alleen verloren bij het afremmen naar stilstand. Ook bij het afremmen van bijvoorbeeld 120 km/h naar 100 km/h gaat energie verloren. In het algemeen geldt:

$$\Delta E_k = E_{k,f} - E_{k,i} = \frac{1}{2} m v_f^2 - \frac{1}{2} m v_i^2 = \frac{1}{2} m (v_f^2 - v_i^2)$$

Hierin is  $\Delta E_k$  de hoeveelheid kinetische energie die **in** de auto wordt gestopt (in Joule),  $v_i$  is de beginsnelheid (in m/s) en  $v_f$  is de eindsnelheid (in m/s).

Als een auto van 500 kg vanuit stilstand optrekt naar 36 km/h, kun je de formule als volgt invullen:

- $m = 500$
- $v_i = 0$  m/s
- $v_f = 10$  m/s (want 36 km/h = 10 m/s)

Als je deze getallen invult, blijkt dat  $\Delta E_k$  in dit geval +50 kJ is. Als de auto vervolgens weer afremt tot stilstand, wisselen  $v_i$  en  $v_f$  van waarde en is  $\Delta E_k$  gelijk aan -50 kJ. Kortom, een positieve waarde van  $\Delta E_k$  betekent dat er energie **in** de auto wordt gestopt en een negatieve waarde van  $\Delta E_k$  betekent juist dat er energie **uit** de auto verloren gaat.

[Hoeveel energie gaat er verloren als een auto van 1500 kg afremt van 120 km/h naar 100 km/h?

- 23 kJ
- 64 kJ
- 172 kJ
- 255 kJ \*\*
- 391 kJ

En hoeveel energie gaat er verloren als een auto van 1500 kg afremt van 20 km/h naar stilstand?

- 23 kJ \*\*
- 64 kJ
- 172 kJ
- 255 kJ
- 391 kJ

]

In beide gevallen hierboven is het snelheids**verschil** 20 km/h, maar het energieverlies is veel groter bij afremmen op de snelweg dan bij afremmen in een woonwijk. Dat komt doordat  $\Delta E_k$  *niet* evenredig is met het *kwadraat van het verschil* in snelheid, maar met het *verschil van de kwadraten*.

## Parcour

---

Bij het berekenen van remverliezen moet je ook rekening houden met het parcours. Vooral hoogteverschillen zijn hierbij belangrijk. Als je een berg oprijdt zonder gas te geven, rem je af. De kinetische energie wordt in dit geval omgezet in potentiële energie. Als je bij het wegrijden naar beneden rijdt, wordt deze potentiële energie weer omgezet in kinetische energie.

Er zijn metro-netwerken die van dit principe gebruikmaken. Door de metrohaltes net iets hoger te bouwen dan de rest, wordt automatisch afgeremd op het moment dat de metro bij een halte aankomt. Op deze manier worden de remverliezen dus kleiner.

Voor vervoer over de weg, is deze vorm van energiebesparing slecht toepasbaar. En zeker in een plat land als Nederland zijn hoogteverschillen geen belangrijke factor. Daarom zal hier in deze module geen aandacht aan worden besteed.

## NEDC Testroute

---

Om een gevoel te krijgen bij de echte remverliezen die optreden, is het handig om een standaard restprofiel gebruiken. Voor bijna alle nieuwe auto's die op de markt komen, wordt het brandstofverbruik en de hoeveelheid uitlaatgassen getest met behulp van de *New European Driving Cycle* (NEDC).

De NEDC bestaat uit een stuk stedelijke route dat vier keer wordt gereden en een stuk voor buiten de stad. Hieronder is de totale NEDC weergegeven, met snelheid op de y-as (in km/h) en tijd op de x-as (in s).

[ NEDC ]

Het valt op dat het stedelijke deel relatief veel variatie heeft en een lage gemiddelde snelheid. Het stuk voor buiten de stad heeft minder variatie, maar een hogere snelheid

Met behulp van de formule voor  $\Delta E_k$  is het mogelijk bij alle momenten van optrekken en afremmen te berekenen hoeveel energie het kost en hoeveel energie er verloren gaat. Om dit netjes te doen, moet eerst het vermogen worden berekend dat nodig is voor het optrekken en afremmen:

$$P(t) = F(t)v(t) = m \cdot a(t) \cdot v(t) = m \cdot \frac{dv}{dt} \cdot v(t).$$

Met behulp van het NEDC  $vt$ -diagram en de massa van de auto kan dus worden berekend wat op elk moment het vermogen is dat in de auto wordt gestopt.

Hieronder is in de **NEDC**-tab opnieuw de NEDC te zien, maar onder het  $vt$ -diagram is nu het  $Pt$ -diagram weergegeven. (Als je niks ziet, moet je de gratis Mathematica CDF plugin downloaden: [downloadlink](#)) Dit diagram geeft weer hoeveel vermogen er per kg in de auto wordt gestopt. Het oppervlak onder grafiek geeft aan hoeveel energie er in de auto wordt gestopt (groen) en hoeveel remverliezen er zijn (rood).

In de **NEDC (gemiddeld)**-tab is een nieuwe route weergegeven. De totaal afgelegde afstand en de totale tijdsduur zijn hier hetzelfde als de oorspronkelijk NEDC, maar de remverliezen zijn (veel!) kleiner. Dit komt



doordat er maar één keer wordt opgetrokken, er vervolgens een constante snelheid wordt gereden en er tenslotte één keer wordt geremd.

In de laatste tab, **NEDC (variabel)**, kun je zelf de oorspronkelijk NEDC aanpassen. Probeer bijvoorbeeld om de totaal afgelegde afstand op de 10,8 km te houden en op een realistische manier de remverliezen te verkleinen tot 500 Joule/kg.

[NEDC module voor remverliezen]

## Remverliezen in verhouding

Bij de standaard NEDC zijn de remverliezen 1227 Joule/kg over een afstand van 10,8 kilometer. Wat betekent dit precies voor een gemiddelde gebruiker?

De *Seat Alhambra* is een relatief zuinige gezinsauto van zo'n 1600 kg. De totale remverliezen over de 10,8 km zijn dus 2,0 MJ. De Seat Alhambra rijdt zo'n 14 km op 1 liter benzine. Deze waarde is bepaald op basis van de NEDC. Voor 10,8 km is dus 0,77 liter benzine nodig. Dit komt overeen met 26 MJ. Van deze 26 MJ gaat ongeveer 70% in de motor verloren in de vorm van warmte. Er blijft dus 7,8 MJ over om de auto aan te drijven. Ongeveer 2,0 MJ hiervan gaat verloren als remverlies. Deze verliezen worden hieronder grafisch weergegeven.

[Grafische weergave van de remverliezen in verhouding]

Bij het rijden van de NEDC gaat dus zo'n 26% van de energie verloren als remverlies. Voor sportieve rijders kan dit percentage hoger liggen. Ben je zelf een sportieve rijder? Dan kun je met de **NEDC (variabel)**-tab uitrekenen hoeveel energie het kost als je de 10,8 km aflegt met extra veel optrekken en afremmen.

We hebben nu gezien dat zo'n 26% van de energie in vervoer verloren gaat in remverliezen. Waar wordt de overige 74% voor gebruikt? Dat ontdek je in de onderdelen over rolwrijving en luchtwrijving.

## Rolwrijving en Luchtwrijving

## Rolwrijving Theorie

---

Bij een stilstaande auto zijn de banden net niet helemaal rond. Onder het gewicht van de auto worden de banden een heel klein beetje platgedrukt. Zodra de auto gaat rijden, zullen de banden steeds op een andere plek worden platgedrukt. De kracht die nodig is voor deze continue vervorming wordt rolwrijving genoemd. De rolwrijving kan als volgt worden berekend:

$$F_{w,r} = m \cdot g \cdot c_{rr}$$

Hierin is  $F_{w,r}$  de rolwrijving (in Newton),  $m$  is de massa van de auto (in kg),  $g$  is de zwaartekrachtsversnelling ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ) en  $c_{rr}$  is de rolwrijvingscoëfficiënt (zonder eenheid). Deze  $c_{rr}$  is afhankelijk van het wegdek en het materiaal van de banden. Voor rubber autobanden op glad asfalt is deze waarde ongeveer 0,01.

De rolwrijvings**kracht** is niet afhankelijk van de snelheid. Het **vermogen** dat nodig is om bij een bepaalde snelheid de rolwrijving te overwinnen is echter wel degelijk afhankelijk van de snelheid. Voor het vermogen dat door een bepaalde kracht geleverd wordt geldt immers:  $P = F \cdot v$ . Om op een willekeurig moment te berekenen hoeveel vermogen er nodig is om de rolwrijving te overwinnen, moet het rolwrijvings**vermogen**,  $P_{w,r}$ , dus als volgt worden berekend:

$$P_{w,r}(t) = F_{w,r} \cdot v(t) = m \cdot g \cdot c_{rr} \cdot v(t).$$

Hierin is  $P_{w,r}$  het vermogen dat nodig is om de rolwrijving te overwinnen (in W) en  $v$  is de snelheid (in m/s).

In onderstaande figuur zijn zowel  $F_{w,r}$  als  $P_{w,r}$  weergegeven, als functie van snelheid. Voor beide grafieken geldt:

- $m = 1600 \text{ kg}$ ; en
- $c_{rr} = 0,01$

DAT DUS:

\[grafiek rolwrijving]

[Wat is het vermogen dat verloren gaat aan rolwrijving voor een auto van 1600 kg die rijdt met 50 km/h? Je kan óf figuur [zoveel] of vergelijk [zoveel] gebruiken.

- 0,22 kW
- 0,78 kW
- 2,2 kW \*\*
- 7,8 kW (niet omgerekend naar m/s)
- 780 kW

]

## Rolwrijving verkleinen

---

[treinen hebben bepaalde waarde, met rubber kan het niet veel beter. Gewicht laag houden is een andere optie: nieuwe materialen?]

## Luchtwrijving Theorie

---

Het kost moeite om een voorwerp door de lucht te bewegen. Om ruimte te maken voor het voorwerp, moet er namelijk lucht verplaatst worden. Hiervoor moet de lucht eerst in beweging worden gebracht: de lucht moet kinetische energie krijgen. Hoe sneller het voorwerp beweegt, hoe meer kinetische energie de lucht moet krijgen om plaats te maken voor het voorwerp.

De kracht die het kost om een voorwerp door de lucht te bewegen wordt luchtwrijving genoemd en kan als volgt worden berekend:

$$F_{w,l}(t) = \frac{1}{2} \rho A c_d v^2(t).$$

Hierin is  $F_{w,l}$  de luchtwrijving (in Newton),  $\rho$  is de dichtheid van de lucht ( $1,225 \text{ kg/m}^3$ ),  $A$  is het frontale oppervlak van het voorwerp (in  $\text{m}^2$ ),  $c_d$  is de luchtwrijvingscoëfficiënt (in  $\text{m}^{-1}$ ) en  $v$  is de snelheid van het voorwerp (in  $\text{m/s}$ ).

Net als bij rolwrijving, is het ook bij luchtwrijving interessant om te weten wat het vermogen is dat op een bepaald moment nodig is om de luchtwrijving te overwinnen. Dit vermogen (in W),  $P_{w,l}$ , kan als volgt worden berekend:

$$P_{w,l}(t) = F_{w,l} \cdot v(t) = \frac{1}{2} \rho A c_d v^3(t).$$

In onderstaande figuur zijn zowel  $F_{w,l}$  als  $P_{w,l}$  weergegeven als functie van snelheid. In beide gevallen geldt:

- $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ ;
- $A = 1,4 \text{ m}^2$ ; en
- $c_d = 0,4$ .

DAT DUS

[Grafiek Luchtwrijving]

[Wat is het vermogen dat verloren gaat aan luchtwrijving voor een auto die rijdt met 50 km/h, met een frontaal oppervlak van  $1,4 \text{ m}^2$  en een luchtwrijvingscoëfficiënt van 0,4? Je mag of figuur [zoveel] of vergelijking [zoveel] gebruiken.

- 0,22 kW
  - 0,43 kW
  - 0,92 kW \*\*
  - 43 kW (niet omgerekend naar m/s)
- ]

## Luchtwrijving verkleinen

[Vorm: vooral makkelijk bij elektrisch vervoer]

## Lucht- en Rolwrijving tijdens de NEDC

De vragen aan het eind van de laatste twee paragrafen hebben laten zien dat bij een gemiddelde gezinsauto die 50 km/h rijdt de rolwrijving 2,2 kW kost en de luchtwrijving 0,92 kW kost. Om te zien hoeveel energie er bij gemiddeld gebruik verloren gaat aan lucht- en rolwrijving, zijn hieronder de NEDC en de bijbehorende lucht- en rolwrijving weergegeven, in de “NEDC”-tab.

[LuchtRol NEDC tabview]

Tijdens de 10,8 kilometer van de NEDC kosten lucht- en rolwrijving samen 3,02 MJ, voor de gemiddelde auto die we hiervoor besproken hebben ( $m = 1600 \text{ kg}$ ,  $S_A = 1,4 \text{ m}^2$ ,  $c_d = 0,4 \text{ m}^{-1}$ ,  $c_{rr} = 0,01$ ). Van deze 3,02 MJ gaat 1,33 MJ naar luchtwrijving en 1,69 MJ naar rolwrijving.

In de **NEDC (gemiddeld)**-tab worden de verliezen uitgerekend voor het afleggen van de NEDC afstand met een constante snelheid. Hiervoor is 2,02 MJ nodig, en dat is dus 1 MJ minder dan de bij de oorspronkelijk NEDC.

In de laatste tab, **NEDC (variabel)**, kun je zelf de oorspronkelijk NEDC aanpassen.

[Probeer een realistisch parcours van 10,8 km te maken met een maximaal energieverbruik van 2,5 MJ. Waar kan je het makkelijkste energie besparen, bij luchtwrijving of bij rolwrijving? ]

Na de efficiëntie van de motor en de remverliezen, hebben we nu ook de lucht- en rolwrijving besproken. In het volgende hoofdstuk zullen we alles samenvoegen om zo de totale energieconsumptie van auto's in kaart te brengen. Hiermee kunnen twee belangrijke vragen worden beantwoord:

- Hoe kan vervoer zo zuinig en goedkoop mogelijk worden?
- Op welke manier kan efficiënter vervoer de energiehuishouding van Nederland verduurzamen?

# Totale energieverliezen in vervoer

## Verlies of Energieprijs?

---

In de voorgaande hoofdstukken hebben we de belangrijkste energieverliezen in transport besproken. Maar zijn het eigenlijk wel *verliezen*? Het woord *verlies* doet vermoeden dat deze vormen van energieverbruik niet per se nodig zijn. En dat is maar ten dele waar.

Om met een auto van A naar B te gaan, moeten de volgende dingen gebeuren:

1. Energie uit de tank moet in een motor worden omgezet in beweging;
2. De auto moet kunnen remmen;
3. Tijdens het rijden moeten de banden vervormd worden; en
4. Tijdens het rijden moet de lucht voor de auto verplaatst worden.

Onderstaand figuur vat stappen 1 t/m 4 grafisch samen.

[Grafische weergave stappen 1 t/m 4]

Stappen 1 en 2 vereisen energieomzettingen. Bij elke energieomzetting komt restwarmte vrij dus deze stappen kunnen niet 100% efficiënt zijn. Met behulp van een zuinige motor en regeneratieve remmen is het echter wel mogelijk om de energieverliezen bij deze stappen tot een minimum te beperken zonder het comfort van de auto te beperken.

De *energieverliezen* bij stappen 3 en 4 zijn voor een deel onvermijdelijk. Draaiende wielen waar een massa op rust zullen altijd vervormen en om van A naar B te gaan zal altijd lucht verplaatst moeten worden. De enige manier om geen energie te *verliezen* bij stappen 3 en 4 is door óf stil te blijven staan, óf een auto te gebruiken zonder frontaal oppervlak met een massa van 0 kg. Kortom, er zit een ondegrens aan de hoeveelheid energie die bij deze stappen verloren *moet* gaan om te rijden. Een betere beschrijving voor het energiegebruik bij deze stappen zou misschien dus zijn: *De energieprijs die je betaalt voor de mate van comfort en snelheid.*

## Totaalbeeld van transportenergie

---

De afzonderlijke modellen die in de afgelopen hoofdstukken zijn geïntroduceerd kunnen worden samengevoegd tot één model dat alle vormen van energieverbruik in transport bevat.

Hieronder is de bekende NEDC te zien, met bijbehorende grafieken die de verschillende vormen van energieverbruik laten zien. De grafieken zijn gebaseerd op onze standaardauto:

```
[specs-list auto]
```

```
[Totaalbeeld van alle energiegrafieken]
```

De 10,8 kilometer worden afgelegd met een totaal brandstofverbruik van 16,6 MJ. Omgerekend betekent dit dat er met 1 liter benzine zo'n 22 kilometer gereden kan worden. Dit is wellicht een beetje aan de hoge kant, maar het is in ieder geval de goede orde van grootte. Het ziet er dus naar uit dat het model de werkelijkheid redelijk goed beschrijft.

Het model is vanaf het begin zo ontworpen dat alle variabelen makkelijk aangepast kunnen worden. We kunnen nu dus makkelijk het energieverbruik onderzoeken van een willekeurige auto die een willekeurig parcours rijdt. En we kunnen dus ook onderzoeken hoe een auto zo zuinig mogelijk gebouwd kan worden.

## De zuinigste auto

---

In onderstaande module kan worden gekozen uit een aantal voorgeprogrammeerde routes. Alle parameters van de auto kunnen handmatig worden ingesteld, óf er kan worden gekozen uit een van de voorgeprogrammeerde auto's.

```
[Voorgeprogrammeerde routes en auto's, twee elektrische auto's: kleine en grote actieradius, zware vrachtwagen op fossiel en op elektriciteit]
```

Gebruik bovenstaand model om de volgende vragen te beantwoorden.

[Met hoeveel procent stijgt het brandstofverbruik van de gemiddelde gezinsauto die de standaard NEDC rijdt als hij 300 kg zwaarder wordt? Dit komt ongeveer overeen met instappen van 4 passagiers.

- Optie 1
- Optie 2
- Optie 3
- Optie 4]

[Welke auto is het zuinigst in het extra stedelijke parcours?

- {Opties}]

[Welke auto zou jij later graag zelf willen hebben? Zoek online de parameters van deze auto op. Als je geen waarden kunt vinden voor  $\rho$ ,  $d$  en  $\eta$ , gebruik hiervoor dan respectievelijk 0,01; 0,3; en 1. Hoeveel energie gebruikt jouw auto in de NEDC?

- {Opties}]

[Kies een willekeurig parcours en ontwerp voor dit parcours de meest zuinige auto. Hoeveel procent zuiniger is jouw auto ten opzicht van de gemiddelde gezinsauto op hetzelfde parcours?

{Opties}

]

[Winnaar shell eco-marathon: duf parcours (moet er dus wel in!). Lukt het om met dit model een auto te ontwerpen die vergelijkbare resultaten behaalt?]

Bij het maken van deze opdrachten heb je misschien gemerkt dat het model beperkingen heeft. Misschien wilde je jouw auto wel een nóg lagere massa geven, óf moest de motor een nóg hogere efficiëntie krijgen. De volgende paragraaf legt uit waarom deze beperkingen (voor alsnog) noodzakelijk zijn.

## **Beperkingen van het model**

---

Elk model beschrijft maar een deel van de werkelijkheid. En bij elk model wordt een afweging gemaakt tussen minimale complexiteit en maximale



effectiviteit. De complexiteit bepaalt welke keuzes een gebruiker moet kunnen maken.

In dit model is het bijvoorbeeld niet verantwoord om toe te staan dat de massa van een auto 50 kg wordt, want dan kan de veiligheid van de bestuurder niet meer gegarandeerd worden.

In de werkelijkheid hebben verschillende parameters niet alleen direct invloed op de efficiëntie van de auto, maar ook invloed op andere parameters en dus ook indirecte invloed op de efficiëntie. In onderstaande slideshow wordt hier een eenvoudig voorbeeld van gegeven.

[Slideshow met gifs waarin stap voor de stap de invloeden van dingen op elkaar wordt uitgelegd.]

Om voor een bepaalde auto te weten hoe zuinig hij kan worden, heb je veel informatie nodig:

- Hoeveel mensen moeten er in de auto passen?
- Welke apparatuur moet er in de auto aanwezig zijn?
- Hoe hard moet de auto kunnen rijden?
- Hoe snel moet de auto kunnen optrekken?
- Wat moet de actieradius van de auto minimaal zijn?
- Aan welke veiligheidseisen moet de auto voldoen?
- Hoeveel mag de auto uiteindelijk kosten?
- Wat wordt de rijsteil van de bestuurder?

Daarnaast is het heel moeilijk om aan te geven hoe laag de rolweerstand ( $c_{rr}$ ) kan worden of hoe aerodynamisch ( $c_d$ ) een auto kan worden. Zelfs het bepalen van een realistische massa is moeilijk. Misschien worden er wel nieuwe materialen ontwikkeld die auto's veel lichter kunnen maken zonder de veiligheid te verlagen.

Het bestaande model kan worden aangepast om al deze informatie op een goede manier te verwerken, maar dat gaat voorbij aan het doel van deze module. In plaats daarvan gaan we in het laatste hoofdstuk het bestaande model combineren met informatie over vervoer in Nederland. Op deze manier kunnen we onderzoeken hoeveel energie er bespaard kan worden in de Nederlandse vervoerssector.

# Vervoer in Nederland

## Introductie

---

Door ons model te combineren met data over de energiebalans in Nederland en data over transport in Nederland, kunnen we twee belangrijke vragen beantwoorden:

- Hoeveel energie kan er realistisch bespaard worden in de vervoerssector?
- Met hoeveel kan de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de vervoerssector worden teruggedrongen?

Om deze vragen te beantwoorden, zullen we kijken naar de huidige situatie in Nederland, de mogelijke veranderingen en de eindsituatie die uit die veranderingen volgt.

## Huidige verdeling

---

De totale vervoerssector in Nederland gebruikt per jaar [totaal vervoer per jaar PJ] PJ. Dit is [percentage vervoer] % van het totale Nederlandse energieverbruik. De transportsector is daarnaast verantwoordelijk voor een CO<sub>2</sub>-uitstoot van [CO<sub>2</sub>-uitstoot vervoerssector] Mton per jaar. Dit is [percentage CO<sub>2</sub>-uitstoot] % van de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot in Nederland.

De twee belangrijkste onderdelen van het transport in Nederland zijn personenauto's en vrachtwagens. Samen gebruiken ze [zoveel] procent van de energie die in de hele transportsector wordt gebruikt. Om het overzichtelijk te houden, beperkt dit model zich daarom tot personenauto's en vrachtwagens.

In onderstaand figuur is te zien hoeveel energie personenauto's en vrachtwagens gebruiken wat de bijbehorende CO<sub>2</sub>-uitstoot is. In de figuur is ook weergegeven wat het totale energieverbruik en de totale CO<sub>2</sub>-uitstoot voor Nederland zijn.

[Figuur van energie en CO<sub>2</sub>-uitstoot voor personenauto's en vrachtauto's]

Hoe kan het dat de transportsector verantwoordelijk is voor [CO<sub>2</sub>-percentage]% van de Nederlandse CO<sub>2</sub>-uitstoot terwijl het “slechts” [Energiepercentage]% van het Nederlandse energieverbruik gebruikt? Dit komt doordat de transportsector nu bijna volledig afhankelijk is van fossiele brandstoffen en dus nauwelijks duurzame energie gebruikt. Een van de maatregelen om de transportsector te verduurzamen is dus het verkleinen van het fossiele aandeel.

## Mogelijke maatregelen

---

Er zijn grofweg vier variabelen die bepalen hoeveel energie de transportsector in de toekomst gebruikt en hoeveel CO<sub>2</sub> hierbij wordt uitgestoten:

- De verdeling van aandrijving voor personenauto's (fossiel  $\leftrightarrow$  elektrisch)
- De verdeling van aandrijving voor vrachtwagens (fossiel  $\leftrightarrow$  elektrisch)
- De efficiëntieverbeteringen voor voertuigen op fossiele brandstof
- De efficiëntieverbeteringen voor elektrische voertuigen

In de afgelopen hoofdstukken heb je gezien dat elektrisch vervoer in sommige gevallen veel zuiniger is dan “fossiel” vervoer. Hier moet de afweging gemaakt worden tussen een efficiënte motor en een lichtgewicht energie-opslag.

Daarnaast wordt er hard gewerkt aan efficiëntieverbeteringen. De belangrijkste factoren hierin zijn: een lagere  $c_d$ , een lagere  $c_{rr}$  en regeneratief remmen. Over het algemeen geldt hier dat het makkelijker is om elektrische auto's efficiënter te maken.

## Eindsituatie

---

Met behulp van onderstaande sliders kun jij instellen hoe je denkt dat de transportsector er in [2030] uit zal zien.

[Gebruik schuifjes om energieverdeling en totale CO<sub>2</sub>-uitstoot live te updaten. Grafiek moet ook bevatten met hoeveel procent beide onderdelen afnemen ]

[Met hoeveel procent neemt de CO<sub>2</sub>-uitstoot volgens jou af?

{relateren aan Overheidsbeleid en afhankelijk van antwoord gepaste feedback geven}]

Je weet nu hoeveel energie er bespaard kan worden en met hoeveel de CO<sub>2</sub>-uitstoot kan worden teruggedrongen door de vervoerssector op een realistische manier te verduurzamen. Gefeliciteerd!