

## LPD 33 De leerlingen beschrijven hoe wrijvings- en weerstandskrachten een invloed hebben op sportprestaties.

Samenhang tweede graad: II-Nat-da LPD 25

Samenhang eerste graad: in Natuurwetenschappen werden de begrippen zwaartekracht, wrijvingskracht, trek-en duwkracht aan de hand van concrete voorbeelden aangebracht.

- ✓ Onder weerstandskrachten worden krachten verstaan die vaste stoffen ondervinden van vloeistoffen of gassen wanneer ze bewegen ten opzichte van elkaar. Wrijvingskrachten treden op tussen twee vaste stoffen.  
Voorbeelden die de weerstandskrachten beïnvloeden: vorm van fietshelm, houding op de fiets, gebruik van open of gesloten wielen. Ook materiaalkeuze, middenstof, relatie met snelheid kan je hier aan bod laten komen.
- ✓ Dat weerstand snelheidsafhankelijk is en wrijving niet, is een belangrijk inzicht dat je kan bijbrengen.
- ✓ Bij wrijvingskracht kan je het onderscheid tussen dynamische en statische wrijvingskracht duiden.  
De dynamische wrijvingskracht is kleiner dan de statische wrijvingskracht. Een voorwerp in beweging krijgen is lastiger dan het in beweging houden.
- ✓ Je kan de formule  $F_w = \mu \cdot F_n$  introduceren.  
De wrijvingsfactor  $\mu$  is interessant om de invloed van soorten vaste stoffen te vergelijken: asfaltweg, betonweg, klinkertjes, nat of droog wegdek ...  
Voorbeelden die de wrijvingsfactor verkleinen of vergroten: waxen van ski's, ondergrond van atletiekpistes ...
- ✓ Je kan de formule bij weerstandskracht poneren om de invloed van de verschillende factoren kwalitatief te bespreken en niet om te rekenen. De leerlingen moeten de formule niet uit het hoofd kennen maar wel kunnen toelichten in concrete situaties.
- ✓ Naast de snelheid is de wrijvingskracht ook niet afhankelijk van het contactoppervlak. Enkel de massa en de beide contactoppervlakken spelen een rol.
- ✓ Naast de "schuifwrijving" kan je ook spreken over de "rolwrijving", zoals bij fietsbanden. Dit heeft dan wel te maken met energieverlies bij het voortdurend samendrukken van de banden bij contact met de grond. Daarom best rijden met hard opgepompte banden.

## Positief en negatief

Wrijvings- en weerstandskrachten worden hebben vanuit ons standpunt gezien zowel een negatieve als een positieve kant.

- Om te fietsen moet je de luchtweerstand overwinnen en hoe harder je wil fietsen, hoe groter de luchtweerstand is en hoe harder je moet trappen.

Als je een zware doos wil verschuiven dan moet je hard duwen om de wrijvingskracht te overwinnen.

- Is het bv. geïjzeld dan kan je moeilijk stappen en fietsen. Bij het stappen oefen je een kracht naar achter uit met je voetzool en de reactiekracht van de grond op je zool is naar voor en doet je vooruit gaan. Dit gebeurt ook bij het fietsen. De grond oefent een rolweerstandskracht naar achter uit en de reactiekracht op je banden doet je naar voor bewegen.

Wrijvings- en weerstandskrachten hinderen je dus bij het bewegen, maar zonder kom je niet vooruit.

## Verschillende soorten

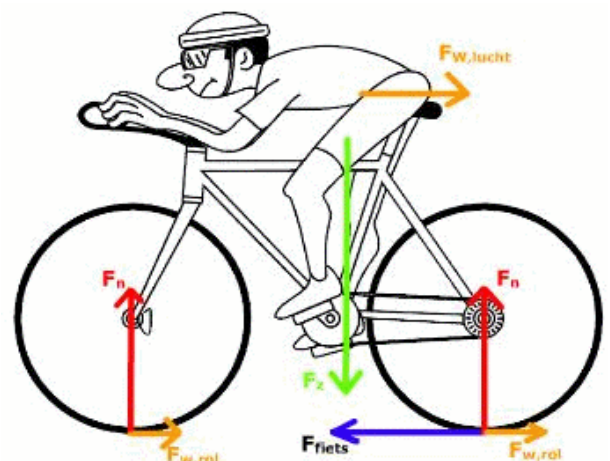
- We spreken van **weerstandskrachten** als een voorwerp beweegt door een fluïdum. Een fluïdum is een verzamelwoord voor vloeistoffen en gassen. Weerstandskrachten worden veroorzaakt door de botsingen van het bewegend voorwerp tegen de fluïdumdeeltjes. Als je fietst is het vnl. de weerstandskracht van de lucht die je moet overwinnen.
- Daarnaast ondervindt een fietser ook wat **rolweerstand**. De rolweerstand van de banden is een gevolg van de energie die nodig is om steeds weer de band lichtjes samen te drukken, waar hij contact maakt met de grond.

Bij wegwielrennen gaat men de band hard oppompen (tot 7 à 8 bar) om die rolweerstand zo klein mogelijk te krijgen. We zeggen dan dat de fiets goed bolt. Bij wedstrijden met kasseien gaat men echter de bandendruk iets kleiner houden, omdat men anders op de kasseien te veel op en neer wipt.

De voorwaartse kracht die een fietser moet ontwikkelen, dient dus om de luchtweerstandskracht en de rolweerstand te overwinnen. Daar de luchtweerstandskracht groter is bij een grotere snelheid, zal je harder moeten trappen om bij een grotere snelheid.

Bij het beklimmen van een natte kasseiheuvel moeten de renners op het zadel blijven om voldoende rolweerstand te hebben zo niet gaat het achterwiel doorslippen.

In het veldrijden en het mountainbike gaat men omwille van de grip de banden minder hard oppompen. We hebben daar een grotere rolweerstand nodig om vooruit te komen.



Correctie bij de figuur:

- de groene  $F_z$  zou eigenlijk even lang moeten zijn als de som van de 2 rode  $F_n$
- de blauwe  $F_{fiets}$  zou eigenlijk even lang moeten zijn als de som van de oranje krachten

- **Dynamische of glijdende wrijving** treedt op als twee systemen over elkaar schuiven,

Vb1: als bij het remmen de wielen blokkeren, dan schuiven de wielen over het wegdek

Vb2: bij normaal remmen schuiven de remblokjes over de velgen van je fiets



Vb3: bij schaatswedstrijden in Nederland spreekt men over de kwaliteit van het ijs. Dit betekent dat probeert de dynamische wrijving zo klein mogelijk te houden, door het ijs op een bepaalde temperatuur te houden met zelfs een heel dun laagje water er bovenop. Men gaat zelfs na een reeks wedstrijden dat ijs gaan “dweilen”.

- **Statische wrijving** treedt op als de twee systemen niet bewegen tegenover elkaar.

Vb1: je kan makkelijk blijven staan op een licht hellende asfaltweg zonder te glijden

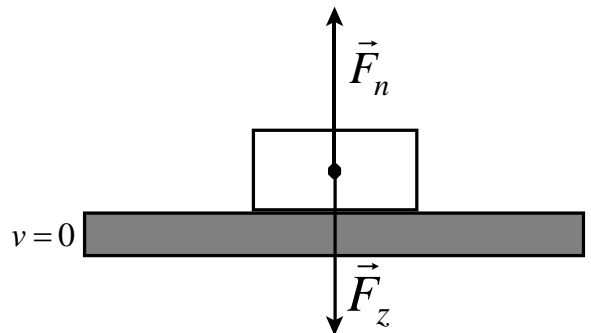
Vb2: een kast met inboedel kan je alleen niet vooruitduwen

## Statische en dynamische wrijvingskracht

We stellen ons de vraag welke krachten aangrijpen op een houten blok in onderstaande situaties:

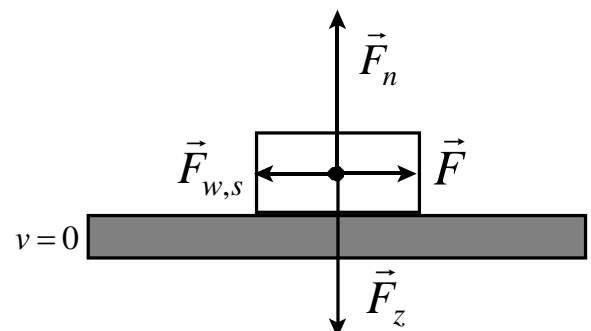
- \* Bij een blok in rust (**a**):

De zwaartekracht  $\vec{F}_z$  en de normaalkracht  $\vec{F}_n$  van de bodem op het blok neutraliseren elkaar. Om praktische redenen plaatsen we het aangrijpingspunt van de normaalkracht  $\vec{F}_n$  ook in het midden.

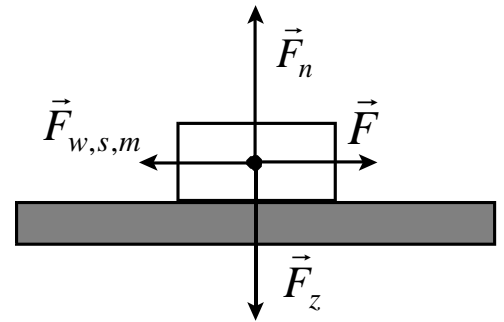


- \* We oefenen een kleine trekkraft  $\vec{F}$  naar rechts uit op het blok (**b**).

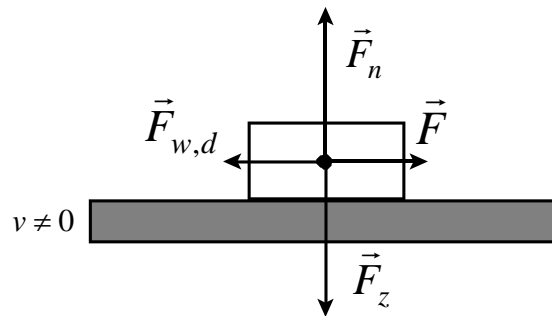
Het blok blijft in rust. Er moet dus een even grote maar tegengestelde wrijvingskracht zijn om die trekkraft te neutraliseren. We spreken van de statische wrijvingskracht  $\vec{F}_{w,s}$



- \* We vergroten heel voorzichtig de trekkraft  $\vec{F}$ . Op een bepaald moment komt het blok in beweging (c). Er is dus blijkbaar een maximale statische wrijvingskracht  $\vec{F}_{w,s,m}$



- \* Wanneer het blok met constante snelheid beweegt, merken we dat de wrijvingskracht iets kleiner is (d). We spreken van de dynamische wrijvingskracht  $\vec{F}_{w,d}$

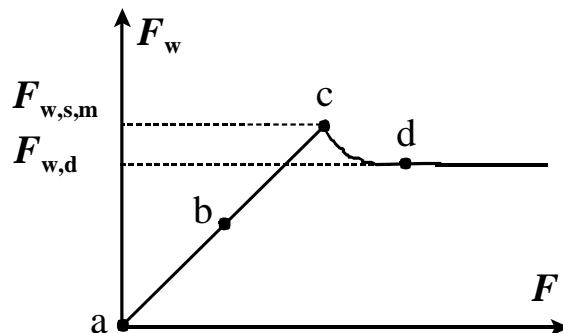


**Besluit:**

- Is de trekkraft  $F < F_{w,s,m}$  dan neutraliseert de statische wrijvingskracht de trekkraft en blijft het lichaam in rust:  $v = 0 \Rightarrow F = F_{w,s}$
- Bij een voorwerp in beweging hebben we een dynamische wrijvingskracht die kleiner is dan de maximale statische wrijvingskracht:  $v \neq 0 \Rightarrow F_{w,d} < F_{w,s,m}$

Dit verschijnsel merk je bv. op als je een wagen met platte batterij helpt op gang te duwen. Om de wagen in beweging te krijgen moet je heel hard duwen, maar eens de wagen in beweging, gaat het veel gemakkelijker.

Als we de wrijvingskracht grafisch uitzetten tegenover de trekkraft dan bekommen we nevenstaande grafiek. De letters a, b, c en d hierin komen overeen met de 4 figuren hierboven.



## Onderzoek van de dynamische wrijvingskracht

We onderzoeken de verschillende factoren waarvan we vermoeden dat ze een invloed hebben op de dynamische wrijvingskracht, door via een krachtsensor of een dynamometer een houten blok met een haakje vooruit te trekken bij constante snelheid. In dat geval is de uitgeoefende trekkracht gelijk aan de dynamische wrijvingskracht.

We onderzoeken de invloed van de snelheid, het contactoppervlak met de bodem, de massa van het lichaam en de aard van beide contactoppervlakken.



We constateren de volgende 4 zaken:

- $F_{w,d}$  is onafhankelijk van de snelheid.
- $F_{w,d}$  is onafhankelijk van de grootte van het contactoppervlak.
- $F_{w,d} \sim m \Rightarrow F_{w,d} \sim F_z \Rightarrow F_{w,d} \sim F_n$
- Als je ten minste één van beide contactoppervlakken wijzigt, dan bekom je een andere dynamische wrijvingskracht  $F_{w,d}$  (bij zelfde massa).

Uit  $F_{w,d} \sim F_n$  volgt dan dat  $\frac{F_{w,d}}{F_n} = \text{cte}$

Die constante is echter afhankelijk van beide contactoppervlakken en noemen we de **wrijvingsfactor**. Symbool:  $\mu$  (spreek uit “mu”)

Er geldt dus dat  $F_w = \mu \cdot F_n$

We onderscheiden de statische wrijvingsfactor ( $\mu_s$ ) en de dynamische wrijvingsfactor ( $\mu_d$ ). Er geldt steeds dat  $\mu_s > \mu_d$ .

	$\mu_s$	$\mu_d$
staal op staal	0,74	0,57
aluminium op staal	0,61	0,47
koper op staal	0,53	0,36
rubber op beton	1,00	0,80
hout op hout	0,25 - 0,50	0,2
glas op glas	0,94	0,4
metaal op metaal (geölied)	0,15	0,06

## Wrijvingskracht en remafstand

De remafstand kunnen we berekenen via deze formule:  $\Delta x = \frac{v_0^2}{2 \cdot \mu \cdot g}$

Deze uitdrukking leert ons een drietal zaken:

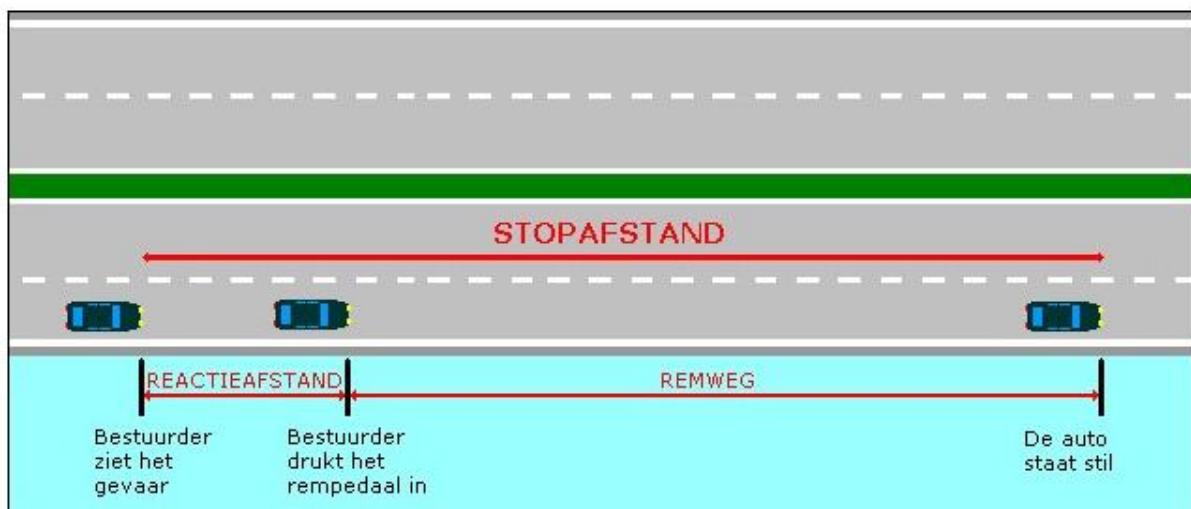
Ten eerste geldt dat de remafstand  $\Delta x \sim v_0^2$

Dit betekent dat een verdubbeling van de snelheid  $v_0$  waarmee je aankomt, er voor zorgt dat de remweg 4 keer zo groot wordt.

Bij een droog wegdek heb je bij 30 km/h een remweg van 4,5 m. Dit betekent dat bij 60 km/h de remweg 4 keer groter en dus 18 m zal zijn.

Merk ook op dat in de realiteit je ook nog rekening moet houden met de afstand die je aflegt tijdens de reactietijd. Dit is de tijd tussen het zien van het obstakel en het effectief starten van het remmen zelf. Tijdens de reactietijd blijf je eenparig verder rijden.

We zeggen daarom dat de **stopafstand = reactieafstand + remweg**



Bij 30 km/h is de stopafstand daarom 8,3 m + 4,5 m = ong. 13 m

Bij 60 km/h is de stopafstand daarom 16,7 m + 18 = ong. 35 m

Meer info hierover vind je via [deze link](#).

Ten tweede blijkt hier ook uit dat de remafstand bij slippen groter is dan in het geval men niet slipt.

Als we slippen schuiven de wielen over het wegdek en mogen we dus gebruik maken van de dynamische wrijvingsfactor :  $\mu = \mu_d$

In de formule voor de remweg delen we door een kleiner getal en is de remweg dus groter.

Als we niet slippen blijven de wielen rollen over het wegdek en mogen we gebruik maken van de statische wrijvingsfactor :  $\mu = \mu_s$

In de formule voor de remweg delen we door een groter getal en is de remweg dus kleiner.

Daar  $\mu_s > \mu_d$  zal de remafstand als we niet slippen dus kleiner zijn.

Om te vermijden dat we slippen bij bruusk remmen hebben moderne auto's tegenwoordig ABS. ABS staat voor antiblokkersysteem. Hierbij wordt via sensoren gedetecteerd wanneer de wielen blokkeren. Als dat zo is, dan wordt de remdruk eventjes gereduceerd, waardoor de wielen weer rollen.

Daarenboven krijgen we dan terug controle over het traject van de wagen waardoor we met het stuurwiel een ontwijkmanoeuvre kunnen uitvoeren.

Ten derde is de remweg ook nog afhankelijk van het soort wegdek en de toestand van het wegdek (nat of droog).

Bij bv. natte klinkers is de wrijvingsfactor maar half zo groot. De remweg is bijgevolg dubbel zo groot.

Bij een kletsnat wegdek gaat het banden-profiel zich bovendien vullen met water, waardoor de wrijvingsfactor nog sterker afneemt. In dat geval is er sprake van "aquaplaning". De auto valt dan helemaal niet meer af te remmen en is zelfs niet meer te sturen

wegdek	weersomstandigheden	$\mu_s$
beton	droog	1,0
	nat	0,7
asfalt	droog	0,9
	nat	0,6
klinkers	droog	0,8
	nat	0,4
	vastgereden sneeuw	0,2
	ijs	0,1

## Luchtweerstandskracht

De luchtweerstandskracht die een voorwerp ondervindt is afhankelijk van de snelheid, het frontaal oppervlak, de massadichtheid van de lucht en de vorm van dat lichaam

$$F_w \sim v^2$$

$$F_w \sim A$$

$$F_w \sim \rho$$

$F_w$  is afhankelijk van de vorm van het lichaam.

Er geldt dan dat  $F_w = C_L \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$

In deze formule

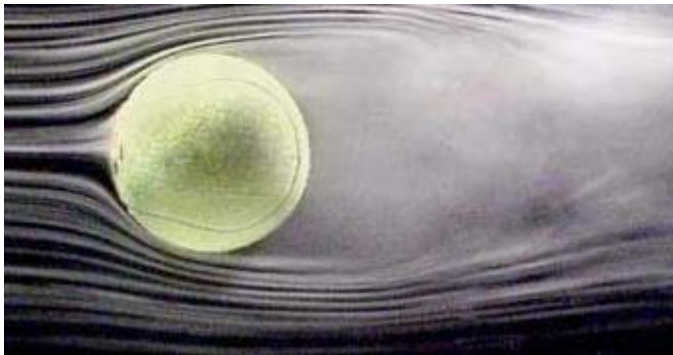
- is de evenredigheidsconstante  $C_L$  afhankelijk van de vorm van het voorwerp en is  $C_L$  kleiner naarmate het voorwerp meer gestroomlijnd is; we spreken dan van een meer aerodynamische vorm
- stelt  $\rho$  de massadichtheid voor van het fluidum voor waardoor het voorwerp beweegt;
- stelt  $A$  de oppervlakte voor van het vooraanzicht van het voorwerp;
- stelt  $v^2$  de snelheid in het kwadraat voor.

## De luchtweerstandsfactor $C_L$

De luchtweerstandsfactor is afhankelijk van de vorm van het voorwerp en de gladheid van het oppervlak en is des te kleiner naarmate het voorwerp meer gestroomlijnd is en bestaat uit een glad oppervlak.

De ideale vorm is de druppelvorm. De stroming van de lucht rond voorwerpen kan in een windtunnel zichtbaar gemaakt worden door middel van rook. Links van de tennisbal stroomt de lucht in evenwijdige banen, allen met dezelfde snelheid. Hier heerst een constante luchtdruk en de luchtstroom is laminair. Dit wel zeggen in laagjes. Het tegengestelde van laminair is turbulent. In dat geval ontstaan turbulenties of wervelingen. Dit dient men te vermijden. De lucht die centraal op de bal komt, wijkt uit en vloeit langs het oppervlak van de bal. Hier ontstaat een dunne grenslaag die wrijvingsverliezen veroorzaakt. De grootte van de verliezen is o.a. afhankelijk van de gladheid van het oppervlak.

Achter de bal ontstaat een chaotische turbulentie waar de lucht aan hoge snelheid wervelt. Hierdoor ontstaat een zone van lage druk, waardoor de bal een kracht ondervindt een tegenwerkende kracht ondervindt.



Heel lage  $C_L$  waarden (minder dan 0,1) heb je bv. bij ligfietsen zoals in de figuur hieronder. Wielrenners gebruiken zo bij een tijdrit puntvormige helmen, om turbulenties te vermijden.



Bij zijn werelduurrecord in april 2019 was de houding van Victor Campenaerts zodanig dat zijn helm nauw aansloot bij zijn rug, zodat daar geen turbulenties konden ontstaan. Dit alles was vooraf minutieus voorbereid in een windtunnel.





## De massadichtheid

De massadichtheid van de lucht is  $1,293 \text{ kg/m}^3$  bij atmosferische druk (1 bar of 1013 hPa) en  $0^\circ\text{C}$ . Bij lagere druk en hogere temperatuur is de luchtdruk minder.

Dit is de reden waarom Victor Campenaerts in 2019 maar ook Eddy Merckx in 1972 naar de wielerpiste van Mexico City zijn getrokken. Die ligt immers op een hoogte van meer dan 2336 m, waar de lucht ijler is. Het nadeel dat je daar minder zuurstof hebt, weegt bij die snelheden niet op tegen het voordeel van de kleinere massadichtheid van de lucht voor de luchtweerstandskracht.

De vorige werelduurrecordhouder, de Brit Bradley Wiggins, die een veel sterkere atleet was, heeft zijn werelduurrecord gevestigd in London. Hij had de pech dat de luchtdruk op de dag van zijn recordpoging nogal hoog was, nl. 1030 hPa. Men heeft berekend dat indien de luchtdruk die dag 963 hPa zou zijn geweest, hij die dag 1200 m verder had kunnen rijden in een uur.

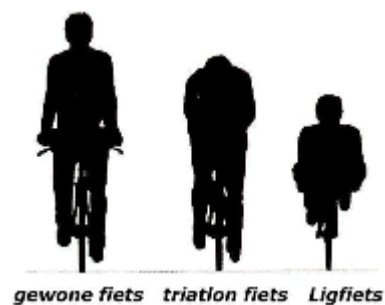
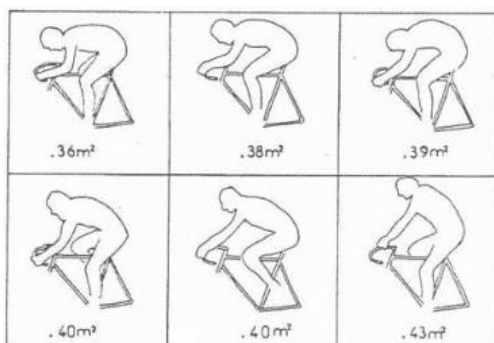
Op dezelfde manier heeft men kunnen uitrekenen dat hij 2370 m verder had gereden in één uur, als hij naar Mexico was gereisd.

Hetzelfde geldt voor het langebaanschaatsen. De meeste wereldrecords worden gevestigd in het Canadese Calgary dat op een hoogte van 1105 m. Zie [link](#).

## Het frontale oppervlak A

De luchtweerstand is recht evenredig met de frontale oppervlakte. Om sneller te rijden zullen we onze frontale oppervlakte zo klein mogelijk maken. Zoals op onderstaande figuren te zien biedt een rechtop zittende fietser een grotere frontale oppervlakte dan een diep in de stuurbeugel liggende fietser.

Ongeveer  $\frac{2}{3}$  van de luchtweerstand wordt veroorzaakt door het lichaam van de fietser en  $\frac{1}{3}$  is te wijten aan de fiets zelf. Subtiele aanpassingen van de positie kunnen vooral voor tijdrijders een belangrijk verschil in frontaal oppervlak en snelheid veroorzaken.



Tijdritspecialisten en kandidaat winnaars voor Tour, Giro of Vuelta gaan hun tijdrithouding optimaliseren in windtunnels met behulp van specialisten in de aerodynamica.

<https://www.fiets.nl/2015/09/06/aerodynamischere-zit-in-zes-stappen/>

<https://www.ad.nl/wielrennen/verboden-positie-snel-of-niet-a00b34e3/?referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F>

Zo spelen de wielen ook een kleine rol. De luchtweerstand van de wielen bedraagt ongeveer 5% van de totale luchtweerstand. De aerodynamische eigenschappen van de wielen spelen dus een belangrijke rol. De luchtweerstand van een wiel wordt in grote mate bepaald door de vorm van de velg en het aantal en de vorm van de spaken. In een windtunnel werden verschillende wielen uitgetest waarvan onderstaand een overzicht van afremmende vermogens bij twee verschillende snelheden worden weergegeven.



Wiel	P <sub>w</sub> (W) (36 km/h)	P <sub>w</sub> (W) (45 km/h)
Corima	3,21	6,27
Spinergy	3,94	8,80
Mavic CXP30	6,85	11,6
Strada G25	6,94	13,6

### De snelheid in het kwadraat

Vermits in de formule voor de luchtweerstandskracht de snelheid waarmee je rijdt in het kwadraat staat, neemt de luchtweerstandskracht sneller toe bij stijgende snelheid.

Zo is bij 40 km/h de luchtweerstandskracht 4 keer zo groot als bij 20 km/h.

En is bij 60 km/h de luchtweerstandskracht 9 keer zo groot als bij 20 km/h.

We hebben dit samengevat voor een reeks snelheden in nevenstaande tabel:

Dit is natuurlijk bij windstil weer.

Je kan afhankelijk van de wind de formule nog aanpassen.

Bij tegenwind gebruik de formule met de “+” en

bij wind in de rug met de “-”.

$$F_w = C_L \cdot \rho \cdot A \cdot (v \pm v_w)^2$$

v (km/h)	F <sub>w</sub>
20	F <sub>w,20</sub>
25	1,6 · F <sub>w,20</sub>
30	2,3 · F <sub>w,20</sub>
35	3,1 · F <sub>w,20</sub>
40	4,0 · F <sub>w,20</sub>
45	5,1 · F <sub>w,20</sub>
50	6,3 · F <sub>w,20</sub>
55	7,6 · F <sub>w,20</sub>
60	9,0 · F <sub>w,20</sub>