

3 Kracht

havo

3.0 Inhoud

3.1	Wat is een kracht?	3
	– Elastische en plastische vervorming	3
	– De grootte van een kracht	4
	– Kracht heeft een richting	4
	– Kracht weergeven door een pijl	4
	– De grootte van de kracht en de lengte van de krachtpijl	5
	– Een verhoudingstabel	5
3.2	Optellen en splitsen van krachten	7
	– Krachten optellen	7
	– Krachten splitsen	8
3.3	Krachten in evenwicht	10
	– Krachten in evenwicht	10
	– Onafhankelijke richtingen x en y	10
	– Twee krachten in evenwicht	10
	– Drie krachten in evenwicht	10
	– Drie krachten in evenwicht waarvan twee met een hoek van 90 graden	11
3.4	Zwaartekracht, gewicht en normaalkracht	13
	– De zwaartekracht	13
	– Het zwaartepunt	13
	– Een voorwerp in evenwicht	14
	– Stabiel en labiel evenwicht	14
	– Gewicht	14
	– Gewichtloos	15
	– De normaalkracht	15
3.5	Kracht en vervorming	16
	– Veerconstante	16
	– Vervorming en lengte	17
	– Vervorming waarbij $F = C \cdot u$ niet geldt	17
	– Spankracht	18

3.6	De momentenwet (hefboomwet)	19
	– Het draaien van een voorwerp	19
	– De arm van een kracht	19
	– De momentenwet (hefboomwet)	20
3.7	Kracht en versnelling	23
	– De drie wetten van Isaac Newton	23
	– Wet 1 – traagheid	24
	– Wet 2 – versnellen en vertragen	25
	– Wet 3 – krachtparen	26
	– Actie = – reactie	26
3.8	Weerstand	27
	– Schuifwrijving (schuifweerstand)	27
	– Rolweerstand	28
	– Luchtweerstand	28
	– Invloed van weerstand op de snelheid	29
3.9	Krachten op een helling	30
	– Een voorwerp op een helling zonder wrijving	30
	– Een voorwerp op een helling met wrijving	31
3.10	Samenvatting	33
	– Grootheden en eenheden	33
	– Weten	33
	– Formules	34
	– Figuren	34

3.1 Wat is een kracht?

Een kracht kun je niet rechtstreeks waarnemen, maar je merkt het wel als er een kracht werkt. Want door een kracht gaat het voorwerp vervormen en/of versnellen of vertragen.

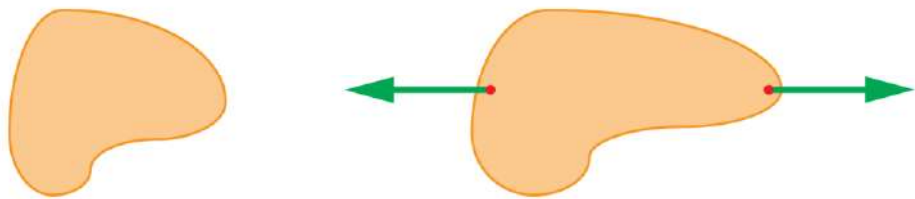
Kracht veroorzaakt een vervorming en/of een versnelling of vertraging.

Vaak komt het voor dat niet één, maar twee of meer krachten op een voorwerp werken. In dat geval zien we het resultaat van alle krachten samen. Werken de krachten elkaar precies tegen, dan gaat het voorwerp alleen vervormen. Als ze elkaar niet precies tegenwerken gaat het voorwerp zowel vervormen als versnellen of vertragen.

Elastische en plastische vervorming

Eerst bekijken we de situatie waarin twee krachten in tegengestelde richtingen worden uitgeoefend, waardoor het voorwerp vervormt.

Figuur 1 Vervorming door twee krachten in tegengestelde richting.



De vervorming kan **elastisch** of **plastisch** zijn. Bij een elastische vervorming krijgt het voorwerp zijn oorspronkelijke vorm terug als de krachten zijn verdwenen. Bij een plastische vervorming gebeurt dit niet en blijft de vervorming bestaan.

Elastische vervorming:

Als de krachten verdwijnen krijgt het voorwerp zijn oorspronkelijke vorm terug.

Plastische vervorming:

Als de krachten verdwijnen blijft het voorwerp zijn nieuwe vorm houden.

VOORBEELD elastische vervorming

pijl en boog

- je oefent kracht uit om een boog te spannen
- zodra je loslaat krijgt de boog zijn oude vorm terug

een spiraalveer indrukken

- je drukt een spiraalveer een eindje in
- zodra je loslaat krijgt de veer zijn oude vorm terug

VOORBEELD plastische vervorming

een deuk in de auto

- je rijdt met een auto tegen een paaltje
- als de auto weggrijdt blijft de deuk in de auto zitten

een blok klei vervormen

- je knijpt met je hand een kuil in een blok klei
- als je stopt met knijpen blijft de kuil in de klei zitten

De grootte van een kracht

Een **krachtmeter** geeft aan hoeveel kracht er wordt uitgeoefend.

Dit is de **grootte** van de kracht. Kracht heeft als symbool hoofdletter

F en als eenheid de newton (N)

Figuur 2 Met een krachtmeter (veerunster) meet je de grootte van een kracht.



**De grootte van kracht heeft als symbool de hoofdletter F (van "force").
De eenheid van kracht is de newton (N).**

Kracht heeft een richting

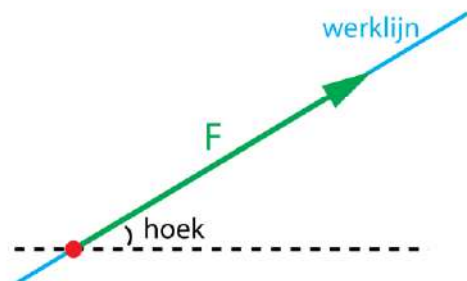
Weet je de grootte van de kracht dan weet je nog niet alles, want kracht heeft ook een **richting**. Als je opschrijft dat er een kracht werkt van bijvoorbeeld 10 newton dan is het nog niet duidelijk welke richting deze kracht heeft. Het kan naar rechts zijn maar ook naar boven. Grootheden waarbij behalve de hoeveelheid ook de richting er toe doet zijn **vector-grootheden**. Kracht is dus een vectorgrootheid en je spreekt van een **krachtvector**.

Kracht heeft een grootte en een richting → kracht is een vector.

Kracht weergegeven door een pijl

Omdat kracht een vector is wordt het in een figuur weergegeven door een pijl.

Figuur 3 Kracht is een vector en wordt door een pijl weergegeven. De pijl heeft een lengte, een werklijn en een aangrijpingspunt (rode stip).



- 1) De lengte van de pijl geeft de grootte van de kracht aan.
- 2) De werklijn geeft de richting van de kracht aan.
- 3) Het aangrijpingspunt geeft de plaats aan waar de kracht wordt uitgeoefend.

De grootte van de kracht en de lengte van de krachtpijl

Uit de lengte van de krachtpijl kun je de grootte van de kracht berekenen. Je moet dan eerst weten hoeveel newton hoort bij één centimeter van de getekende pijl. Dit noemen we de **krachtschaal**.

De krachtschaal is de grootte van de kracht gedeeld door de lengte van de getekende krachtpijl.

$$\text{krachtschaal} = \frac{\text{grootte van de kracht}}{\text{lengte van de pijl}}$$

VOORBEELD krachtschaal

Een kracht van 20 newton is getekend als een pijl met een lengte van 4 cm.

Bereken de krachtschaal.

- $F = 20 \text{ N} \mid \text{lengte pijl} = 4 \text{ cm}$
- $\text{krachtschaal} = \frac{\text{grootte van de kracht}}{\text{lengte van de pijl}}$
- $\text{krachtschaal} = \frac{20}{4} = 5 \text{ newton per centimeter}$

De krachtschaal is gekozen door de tekenaar en zegt niets over de kracht zelf. De tekenaar kan ervoor kiezen om bijvoorbeeld alle krachtpijlen twee keer zo lang te tekenen, maar daarmee verandert de hoeveelheid kracht die hij uitbeeldt niet.

De gekozen krachtschaal zegt niets over de grootte van een kracht.

Een verhoudingstabel

Stel je geeft een kracht van 20 newton aan met een 4 centimeter lange pijl. Wil je daarna een kracht van 50 newton aangeven dan moet je een pijl tekenen met een lengte van 10 cm, want de kracht is $50 / 20 = 2,5$ keer zo groot en dus moet de krachtpijl 2,5 keer zo lang zijn: $2,5 \cdot 4 = 10 \text{ cm}$.

Dit kun je uitrekenen door een verhoudingstabel te maken.

newton	20	50
centimeter	4	x

Je kunt het onbekende getal x berekenen door **kruislings** te **vermenigvuldigen**:

$$\frac{50}{20} = \frac{x}{4} \rightarrow 50 \cdot 4 = 20 \cdot x \rightarrow x = \frac{200}{20} = 10 \text{ cm}$$

VOORBEELD bereken de kracht

Een krachtpijl is 4 cm lang. De krachtschaal is: 30 N $\leftrightarrow$ 5 cm.

Bereken de grootte van de kracht.

- verhoudingstabel:

newton	30	x
centimeter	5	4
- kruislings vermenigvuldigen: $30 \cdot 4 = 5 \cdot x$
- $x = \frac{30 \cdot 4}{5} \rightarrow x = \frac{120}{5} = 24 \rightarrow F = 24 \text{ N}$

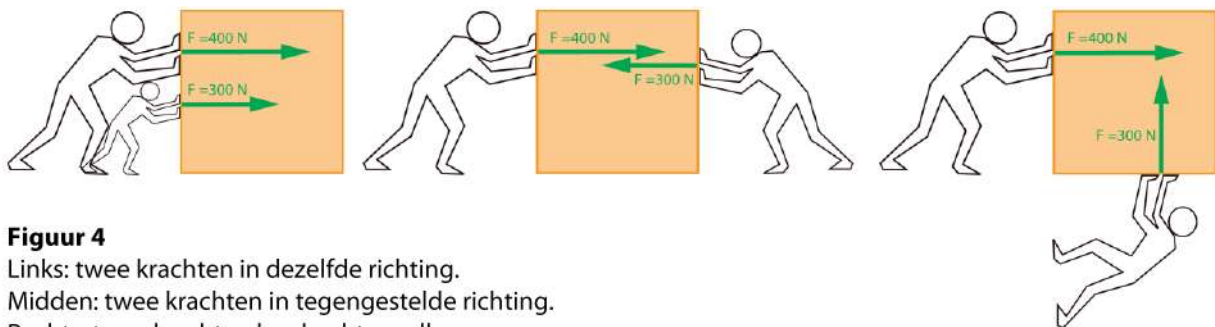
3.2 Optellen en splitsen van krachten

Krachten optellen

Vaak komt het voor dat er twee of meer krachten zijn. In dat geval moet je de krachten bij elkaar **optellen**. Daarbij moet je rekening houden met de richtingen van de krachten. Staan twee krachten in dezelfde richting, dan geeft de optelling een ander resultaat dan als ze in tegengestelde richting staan. Tel je alle krachten bij elkaar op dan is het resultaat de **resulterende kracht** F_{res} , ook wel de **somkracht** of **nettokracht** genoemd.

De resulterende kracht is de vectorsom van alle krachten.

In figuur 4 werken op een kist twee krachten. Links staan de twee krachten in dezelfde richting, de somkracht is dan $400 + 300 = 700$ N. Midden staan de twee krachten in tegengestelde richting, de somkracht is nu $400 - 300 = 100$ N. Rechts staan de krachten loodrecht op elkaar. De krachten hebben niet dezelfde richting en ook niet de tegengestelde richting. Je mag dus niet zeggen dat de somkracht $300 + 400 = 700$ N is en ook niet dat de somkracht $400 - 300 = 100$ N is. De somkracht zit tussen 100 N en 700 N in en is in dit geval 500 N.



Figuur 4

Links: twee krachten in dezelfde richting.
Midden: twee krachten in tegengestelde richting.
Rechts: twee krachten loodrecht op elkaar.

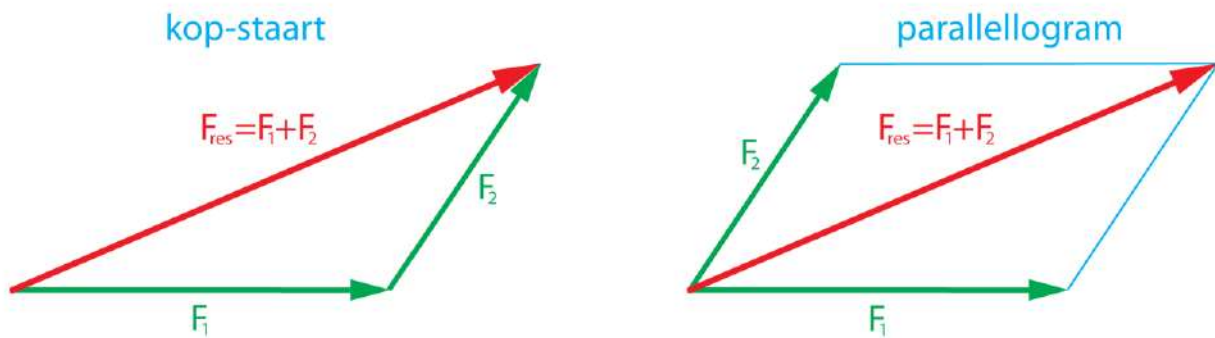
Om de totale kracht te bepalen moet je een tekening maken. Zo'n tekening van krachten heet een **constructie**. Stel er zijn twee krachten F_1 en F_2 en je wil de totale kracht weten, dan moet je de krachtpijlen F_1 en F_2 tekenen en daarna een constructie maken. Er zijn twee methoden waaruit je kunt kiezen.

– kop-staartmethode –

- begin met de krachtpijl van F_1
- F_2 begint waar F_1 ophoudt → de krachten staan kop-staart achter elkaar
- $F_1 + F_2$ is de pijl die begint bij het begin van F_1 en eindigt bij het einde van F_2

– parallellogrammethode –

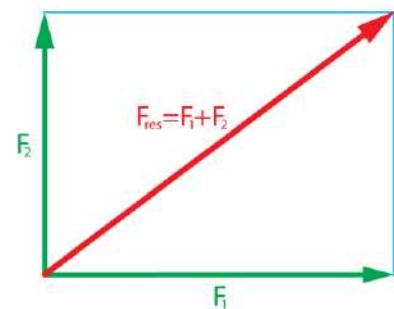
- construeer een parallellogram met F_1 en F_2 als schuine zijden
- $F_1 + F_2$ is de pijl die begint bij het begin en eindigt in de hoek schuin tegenover



Figuur 5 Krachten kun je bij elkaar optellen door ze kop-staart te tekenen (links) of door een parallellogram te tekenen (rechts).

Pas je de parallellogrammethode toe voor de situatie in figuur 4 rechts, dan krijg je de figuur 6. Door de lengte van de krachtpijlen te meten en de verhouding te gebruiken vind je een resulterende kracht van 500 N.

Figuur 6 Constructie van de twee krachten in figuur 4 rechts. De resulterende kracht is 500 N.

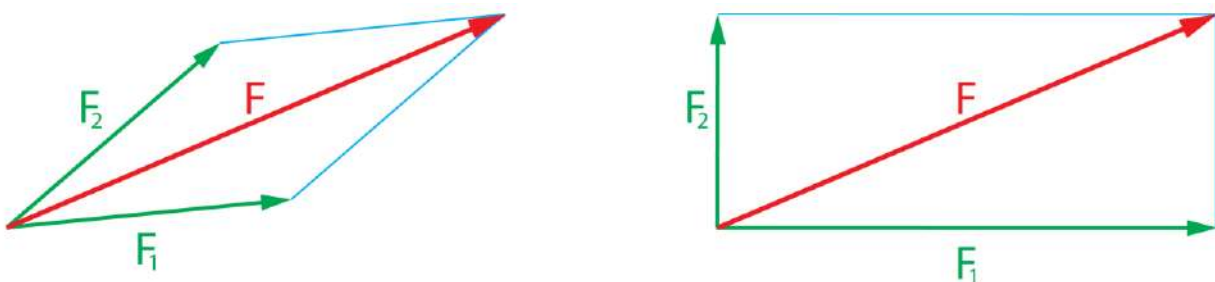


Krachten splitsen

Een kracht splitsen in twee krachten is het omgekeerde van twee krachten optellen. Bij het splitsen van een kracht F bepaal je de krachten F_1 en F_2 zodat geldt: $F = F_1 + F_2$. De krachten F_1 en F_2 noem je **componenten** van kracht F .

Bij het splitsen van een kracht F bepaal je F_1 en F_2 die opgeteld kracht F geven.

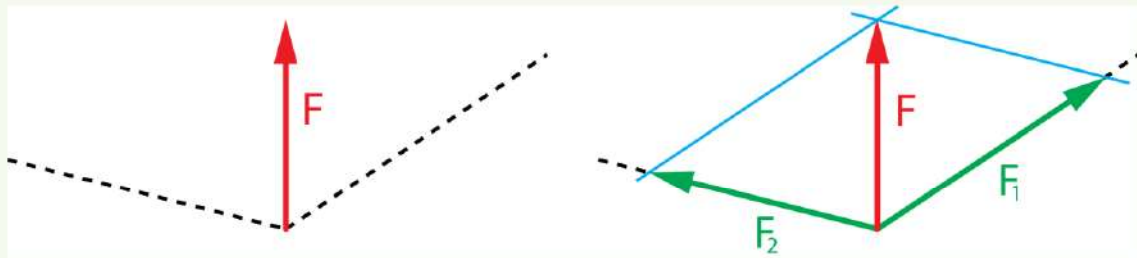
Het splitsen van een kracht kan op verschillende manieren gebeuren. Net zoals je kunt schrijven $10 = 2 + 8$, $10 = 6 + 4$, $10 = 5 + 5$, etc. kun je ook kracht F op oneindig veel manieren splitsen. In figuur 7 zie je hoe kracht F op verschillende manieren kan worden gesplitst. In beide gevallen geldt $F = F_1 + F_2$. Links zijn de componenten F_1 en F_2 niet loodrecht op elkaar gekozen, rechts is dat wel het geval. Om een kracht F te kunnen splitsen in F_1 en F_2 moet je de **richtingen** van F_1 en F_2 weten. Als je deze richtingen weet kan kracht F nog maar op één manier worden gesplitst.



Figuur 7 Links is kracht F gesplitst in componenten F_1 en F_2 die niet loodrecht op elkaar staan. Recht is dezelfde kracht gesplitst in F_1 en F_2 die wel loodrecht op elkaar staan.

VOORBEELD het splitsen van een kracht

Een kracht F (rode pijl) moet worden gesplitst in twee krachten in F_1 en F_2 . De richtingen van F_1 en F_2 zijn met gestreepte lijnen aangegeven. Zie figuur 8.



Figuur 8

Splits kracht F in F_1 en F_2 .

- teken een lijn evenwijdig aan de richting van F_1 door de punt van F (blauw)
- teken een lijn evenwijdig aan de richting van F_2 door de punt van F (blauw)
- bepaal de snijpunten van de getekende blauwe lijnen met de gestreepte lijnen
- teken de pijlen F_1 en F_2

3.3 Krachten in evenwicht

Krachten in evenwicht

Werken twee of meer krachten op een voorwerp, dan moet je deze krachten bij elkaar optellen om de resulterende kracht te krijgen. Is de resulterende kracht nul, dan werken de krachten elkaar tegen en zijn ze met elkaar in **evenwicht**. Het voorwerp gaat dan niet versnellen of vertragen. Staat het voorwerp stil, dan blijft het stilstaan.

Krachten zijn in evenwicht als de resulterende kracht nul is.

$$\text{Evenwicht: } F_{\text{res}} = 0$$

Onafhankelijke richtingen x en y

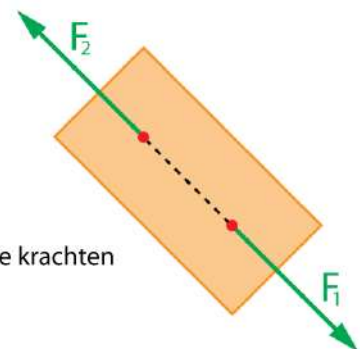
Stel er werken twee krachten op een voorwerp, F_x in de x-richting en F_y in de y-richting. Een verticale kracht (y-richting) kan nooit een horizontale kracht (x-richting) tegenwerken. Vandaar dat de resulterende kracht alleen nul kan zijn als som van de componenten in de x-richting én de som van de componenten in de y-richting nul zijn. Bij het oplossen van vraagstukken zullen we vaak gebruik maken van deze regel.

$$\text{Als } F_{\text{res}} = 0 \text{ dan } F_{1x} + F_{2x} = 0 \text{ en } F_{1y} + F_{2y} = 0$$

Twee krachten in evenwicht

In het eenvoudigste geval werken er twee krachten die elkaar opheffen.

- $F_1 + F_2 = 0$
- $F_{1x} + F_{2x} = 0 \rightarrow F_{2x} = -F_{1x}$
- $F_{1y} + F_{2y} = 0 \rightarrow F_{2y} = -F_{1y}$

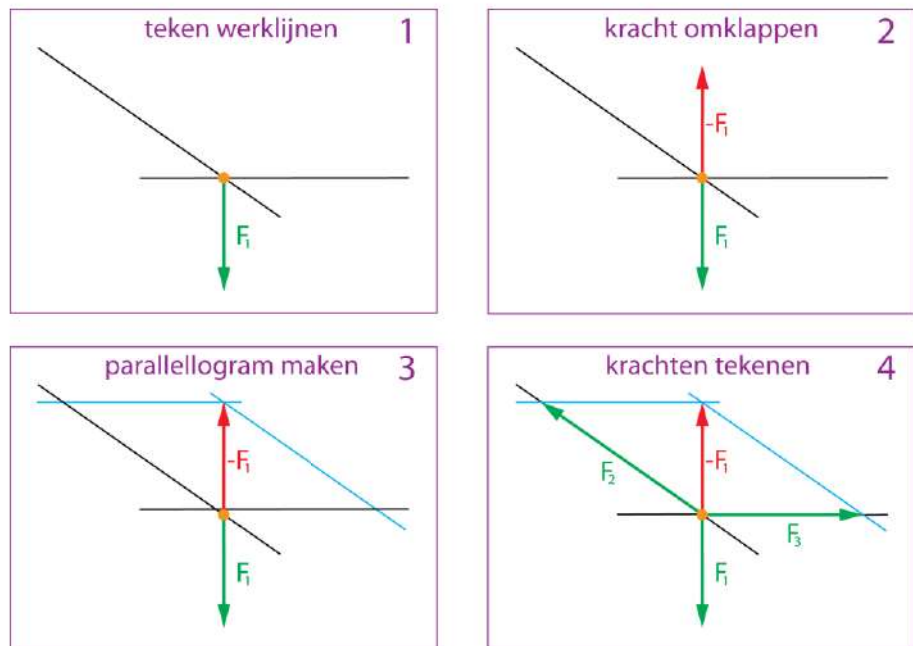


Figuur 9 Twee krachten in evenwicht.

Drie krachten in evenwicht

Als drie krachten met elkaar in evenwicht zijn geldt: $F_{\text{res}} = F_1 + F_2 + F_3 = 0$. Hieruit volgt dat $F_2 + F_3 = -F_1$. Stel dat kracht F_1 is gegeven dan zoeken we de krachten F_2 en F_3 die bij elkaar opgeteld $-F_1$ opleveren. De werklijnen (richtingen) van F_2 en F_3 moeten bekend zijn om dit te kunnen oplossen. In figuur 10 zie je hoe het in zijn werk gaat.

- 1) teken de werklijnen (soms zijn deze gegeven)
- 2) klap F_1 om
- 3) maak het parallellogram
- 4) teken de krachten F_2 en F_3



Figuur 10 Bepaal de krachten F_2 en F_3 zodat $F_1 + F_2 + F_3 = 0$.

Nadat je de krachten F_2 en F_3 hebt getekend kun je uitrekenen hoe groot ze zijn. Je hebt daarvoor de grootte van F_1 nodig én de lengtes van de drie krachtpijlen.

Drie krachten in evenwicht waarvan twee met een hoek van 90 graden

In het eenvoudigste geval staan twee van de drie krachten loodrecht op elkaar. De derde kracht staat schuin. Je gaat dan als volgt te werk.

- 1) Teken alle krachten op het voorwerp.
- 2) De twee loodrechte krachten noem je F_x en F_y .
- 3) Splits de schuine kracht F_s in de x-richting en de y-richting: $F_s = F_{sx} + F_{sy}$.
- 4) Evenwicht: $F_{sx} + F_x = 0 \rightarrow F_{sx} = -F_x$ ($F_{\text{links}} = F_{\text{rechts}}$)
 $F_{sy} + F_y = 0 \rightarrow F_{sy} = -F_y$ ($F_{\text{omlaag}} = F_{\text{omhoog}}$)

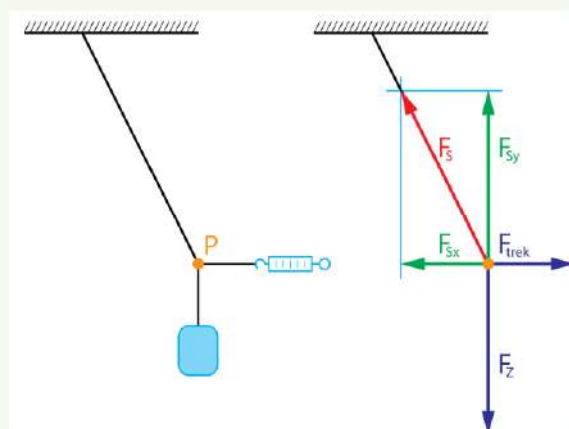
VOORBEELD opzij getrokken touw

Een gewicht is met een touw aan het plafond bevestigd. Op punt P wordt een horizontale kracht naar rechts uitgeoefend. Het gewicht is in rust. De zwaartekracht op het gewicht is 100 N. Zie Figuur 11.

BEPAAL de trekkracht F_{trek} .

- opmeten: lengte pijl
 $F_z = 3,8$ cm lengte pijl $F_{\text{trek}} = 1,9$ cm
- verhoudingstabel:

newton	100	x
centimeter	3,8	1,9
- $x = \frac{100 \cdot 1,9}{3,8} = 50 \rightarrow F_{\text{trek}} = 50$ N



Figuur 11

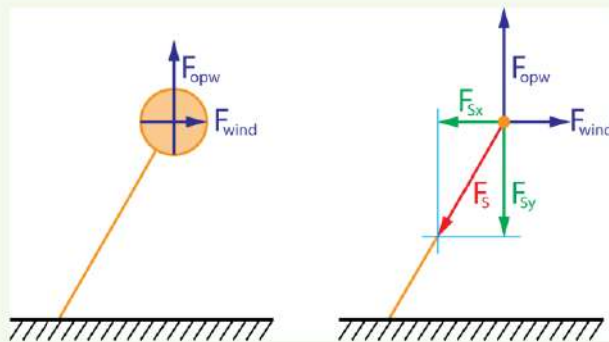
BEPAAL de kracht in het touw F_s .

- opmeten: lengte pijl $F_z = 3,8 \text{ cm}$ | lengte pijl $F_s = 4,3 \text{ cm}$
- verhoudingstabel:

newton	100	x
centimeter	3,8	4,3
- $x = \frac{100 \cdot 4,3}{3,8} = 113 \rightarrow F_s = 113 \text{ N}$

VOORBEELD ballon in de wind

Een ballon gevuld met helium hangt stil aan een touw in de wind. De opwaartse kracht F_{opw} werkt omhoog en de windkracht van $4,0 \text{ N}$ werkt naar rechts. Zie figuur 12. Rechts zie je de krachten op de ballon. We vatten de ballon op als een punt, zodat alle krachten hetzelfde aangrijpingspunt hebben.

**Figuur 12****BEPAAL de kracht F_s die het touw op de ballon uitoefent.**

- de ballon hangt stil dus $F_{\text{res}} = 0$
- $F_{\text{links}} = F_{\text{rechts}} \rightarrow F_{sx} = F_{\text{wind}} = 4,0 \text{ N}$
- opmeten: lengte pijl $F_{\text{wind}} = 1,4 \text{ cm}$ | lengte pijl $F_s = 2,8 \text{ cm}$
- verhoudingstabel:

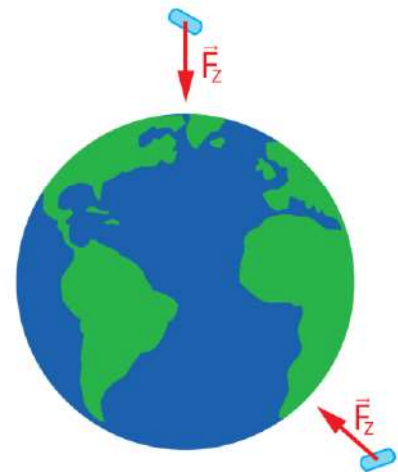
newton	4	x
centimeter	1,4	2,8
- $x = \frac{4 \cdot 28}{14} = 8 \rightarrow F_s = 8,0 \text{ N}$

3.4 Zwaartekracht, gewicht en normaalkracht

De zwaartekracht

Een kracht waar we veel mee te maken hebben is de **zwaartekracht** F_Z . Dit is de kracht waarmee de aarde aan ieder voorwerp trekt. De zwaartekracht is altijd verticaal naar beneden gericht, naar het middelpunt van de aarde. Aan voorwerpen met veel massa trekt de aarde harder dan aan voorwerpen met weinig massa.

Om de grootte van de zwaartekracht op aarde te berekenen moet je de massa in kilogram vermenigvuldigen met het getal 9,81. Het getal 9,81 is de versnelling die ieder voorwerp krijgt als het naar de aarde valt en wordt daarom de **valversnelling** genoemd met het symbool g .



Figuur 13 De aarde oefent op ieder voorwerp zwaartekracht uit.

$$F_Z = m \cdot g$$

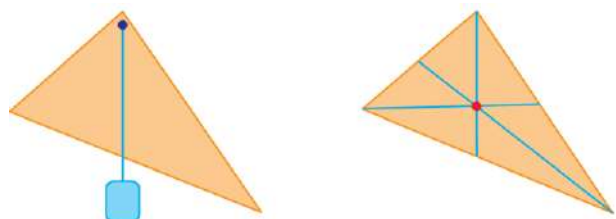
- F_Z is de zwaartekracht in newton (N)
- m is de massa van het voorwerp in kilogram (kg)
- g is de valversnelling in meter per seconde kwadraat (m/s^2)

De grootte van de valversnelling wordt bepaald door de massa en de straal van de aarde. Ieder hemellichaam heeft een andere waarde van g . De formule $F_Z = m \cdot g$ is een benadering van de algemene gravitatiewet van Newton, waarover je in een ander hoofdstuk meer te weten komt. De oorzaak van zwaartekracht is nog steeds niet goed bekend. Volgens Newton is er altijd een aantrekkende kracht tussen twee voorwerpen. Deze aantrekkende kracht is recht evenredig met de massa's van de voorwerpen en is omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand tussen de voorwerpen.

Het zwaartepunt

Ieder voorwerp heeft een denkbeeldig punt waar de zwaartekracht aangrijpt. Dit is het **zwaartepunt** dat je op de volgende manier kunt bepalen. Zie figuur 14.

- hang het voorwerp draaibaar op
- teken een lijn uit het ophangpunt loodrecht naar beneden
- hang het voorwerp nu op aan een ander ophangpunt
- teken opnieuw een lijn loodrecht naar beneden
- het snijpunt van de twee lijnen is het zwaartepunt



Figuur 14 Methode om het zwaartepunt te bepalen.

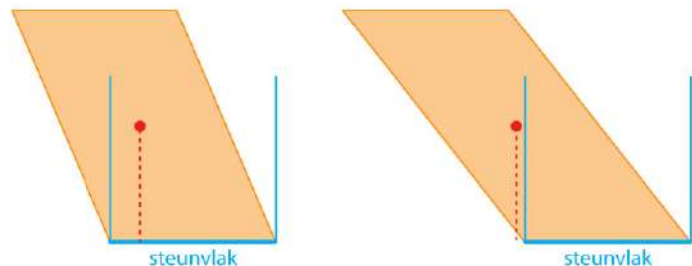
Een voorwerp in evenwicht

Een voorwerp is in evenwicht als het niet spontaan omvalt. Om in evenwicht te zijn, moet het zwaartepunt zich boven het **steunvlak** bevinden. Het steunvlak is de oppervlakte tussen de buitenste steunpunten.

Voorwerp in evenwicht → zwaartepunt ligt boven het steunvlak.

In figuur 15 zie je twee situaties. Links bevindt het zwaartepunt zich boven het steunvlak. Het voorwerp is daarom in evenwicht en valt niet om. Rechts bevindt het zwaartepunt zich naast het steunvlak. Dit voorwerp is niet in evenwicht en valt om.

Figuur 15 Links ligt het zwaartepunt boven het steunvlak en is het blok in evenwicht. Rechts ligt het zwaartepunt niet boven het steunvlak en valt het blok om.

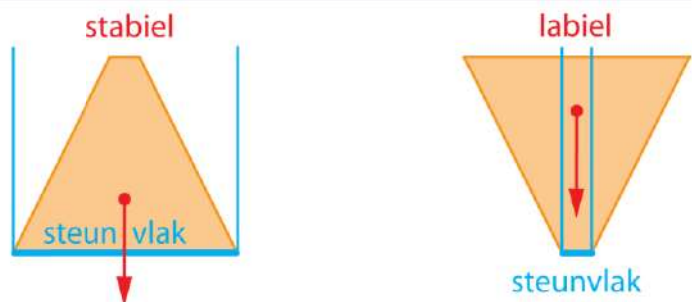


Stabiel en labiel evenwicht

Het evenwicht kan **stabiel** of **labiel** zijn. Bij een stabiel evenwicht kun je flinke duw geven zonder dat het voorwerp omvalt. Bij een labiel evenwicht is een klein duwtje al genoeg om het voorwerp om te laten vallen. Een **stabiel evenwicht** krijg je als het steunvlak groot is en het zwaartepunt dicht bij het steunvlak ligt. Een **labiel evenwicht** krijg je als het steunvlak klein is en het zwaartepunt ver boven het steunvlak ligt.

Stabiel evenwicht → groot steunvlak + laag zwaartepunt.
Labiel evenwicht → klein steunvlak + hoog zwaartepunt.

Figuur 16 Stabiel en labiel evenwicht.



Gewicht

Staat een voorwerp op een vloer, of hangt het aan een koord, dan oefent het een kracht uit op de vloer of op het koord. Deze kracht is het **gewicht** van het voorwerp. Het gewicht is dus een kracht die **door het voorwerp** wordt uitgeoefend **op het steunvlak**. Net als iedere kracht heeft gewicht als eenheid newton. Een veel gemaakte fout is om gewicht in kilogram uit te drukken. In de natuurkunde mag dit niet, want kilogram is de eenheid van massa en niet van kracht.

Het gewicht is de kracht die het voorwerp op het steunvlak uitoefent.
Het gewicht is een kracht en wordt uitgedrukt in newton (N).

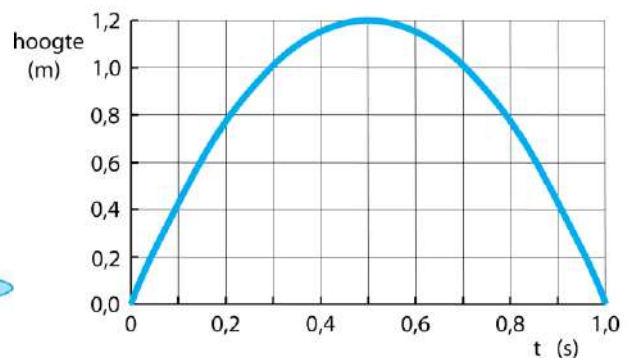
Gewichtloos

Een weegschaal meet de kracht die een voorwerp uitoefent. Dit is het gewicht van het voorwerp en moet in newton worden uitgedrukt. Maar dat gebeurt niet. Een weegschaal geeft de gemeten waarde in kilogram. De weegschaal rekent namelijk het gewicht om naar massa. Op het oppervlak van de aarde geldt dat een massa van 1,00 kg een gewicht heeft van 9,81 N. De weegschaal meet dus de kracht in newton en deelt dit door 9,81 om de massa te berekenen. Zolang de weegschaal op aarde wordt gebruikt gaat dit goed, maar op de maan of tijdens een verticale versnelling of vertraging geeft de weegschaal een verkeerde waarde aan.

Als je omhoog springt en in de lucht zweeft krijg je eerst een vertraging omhoog van $9,81 \text{ m/s}^2$ en daarna een versnelling omlaag van $9,81 \text{ m/s}^2$. Tijdens de sprong en de val oefen je geen kracht uit op een vloer en is je gewicht nul. Je ben heel even **gewichtloos**. Een weegschaal geeft nul kg aan, maar je massa is natuurlijk niet veranderd. Zie figuur 17.

Tijdens een sprong omhoog of een val omlaag ben je gewichtloos.

Figuur 17 Als je in de lucht zweeft oefen je geen kracht uit op een vloer of op een koord en ben je gewichtloos.



De normaalkracht

Krachten zijn in evenwicht als $F_{\text{res}} = 0$. Dit is het geval als een kist op een vloer staat. Op de kist werkt de zwaartekracht en omdat $F_{\text{res}} = 0$ moet er behalve de zwaartekracht nog een kracht op de kist zijn. Dit is de kracht waarmee de vloer terugduwt tegen de kist. Deze kracht noem je de **normaalkracht** F_n . Op de kist werken dus twee krachten F_z en F_n die even groot zijn en een tegengestelde richting hebben. Ze heffen elkaar dus op.

De normaalkracht is de kracht die op een voorwerp wordt uitgeoefend door de vloer waarop het staat of door het koord waaraan het hangt.

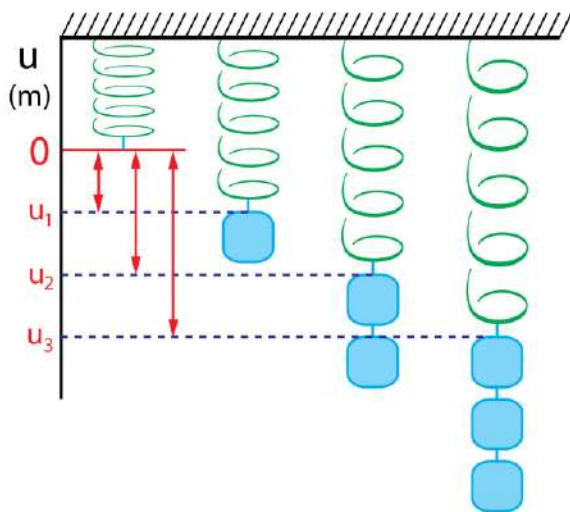
Later in dit hoofdstuk leer je dat krachten altijd in paren voorkomen. De kracht die A op B uitoefent is altijd even groot als de kracht die B op A uitoefent. Deze krachten hebben een tegengestelde richting. Het gewicht en de normaalkracht zijn daarom altijd even groot en tegengesteld gericht.

$$F_n = -F_{\text{gewicht}}$$

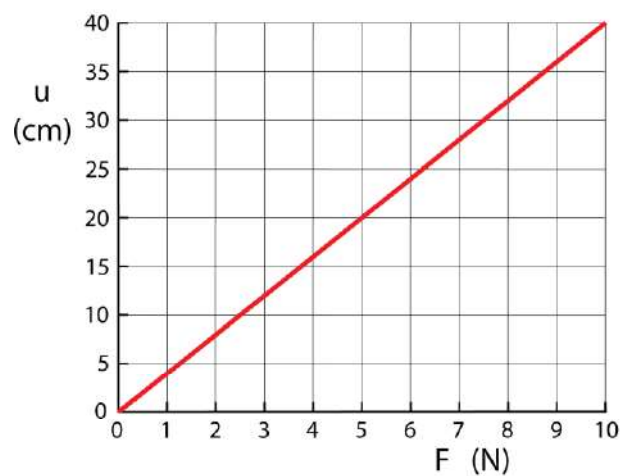
3.5 Kracht en vervorming

Een voorwerp waarop een kracht werkt vervormt. Bij stugge voorwerpen is deze vervorming niet te zien, maar bij flexibele voorwerpen wel. We kunnen de relatie tussen de vervorming en de kracht onderzoeken door massa's aan een spiraalveer te hangen. Zie figuur 18. De vervorming u_2 bij twee gelijke massa's is twee keer zo groot als de vervorming u_1 bij één massa. Bij drie massa's wordt de vervorming drie keer zo groot.

Het symbool voor vervorming is u . De eenheid van vervorming is meter (m).



Figuur 18 Vervorming van een spiraalveer.
 u_2 is twee keer zo groot als u_1 ,
 u_3 is drie keer zo groot als u_1 .



Figuur 19 (u , F)-diagram van een spiraalveer.

In het ideale geval is de vervorming **recht evenredig** met de kracht. In een (u , F)-diagram staat de kracht op de horizontale as en de vervorming op de verticale as. De grafiek is een **rechte lijn door het nulpunt**. In figuur 19 zie je een voorbeeld van een (u , F)-diagram. Voor de vervorming geldt de volgende formule:

$$F = C \cdot u$$

- F is de kracht op de spiraalveer in newton (N)
- C is de veerconstante in newton per meter (N/m)
- u is de vervorming van de spiraalveer in meter (m)

Veerconstante

De veerconstante C is het aantal newton dat nodig is om een voorwerp één meter uit te rekken of één meter in te drukken. Is C groot dan kost het veel kracht om het voorwerp te vervormen. Er geldt: $C = F / u$.

Uit de grafiek in figuur 19 kun je de veerconstante bepalen. Omdat de lijn recht is en door het nulpunt gaat kun je een willekeurig punt op de lijn kiezen.

- kies $F = 10 \text{ N}$ $C = \frac{F}{u} \rightarrow C = \frac{10}{0,40} = 25 \text{ N/m}$
- kies $F = 6 \text{ N}$ $C = \frac{F}{u} \rightarrow C = \frac{6}{0,24} = 25 \text{ N/m}$

Vervorming en lengte

Het is belangrijk om te onthouden dat de vervorming niet hetzelfde is als de lengte van de spiraalveer. Stel je hebt een spiraalveer van 10 cm lang. Als je er een gewichtje aan hangt wordt hij 14 cm lang. De vervorming is in dat geval $14 - 10 = 4 \text{ cm}$. We gebruiken ℓ voor de lengte en u voor de vervorming die door een kracht wordt veroorzaakt.

Vervorming is de lengte met kracht min de lengte zonder kracht.

$$u = \ell_{\text{met kracht}} - \ell_{\text{zonder kracht}}$$

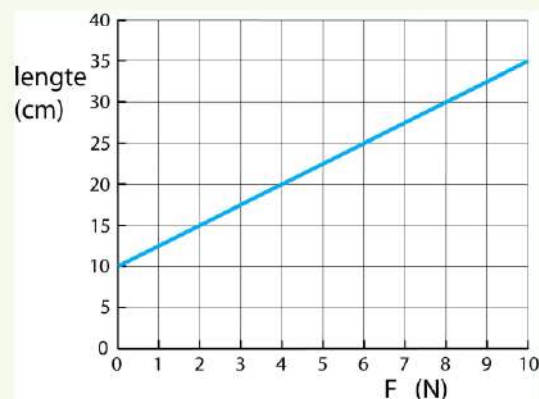
VOORBEELD de veerconstante bepalen

In figuur 20 zie je een diagram waarin de lengte van een spiraalveer is uitgezet tegen de kracht.

Bepaal de veerconstante.

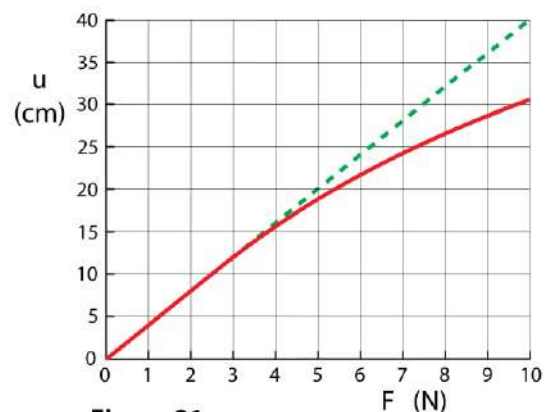
- $F = 0,0 \text{ N} \rightarrow \ell = 0,10 \text{ m}$
- $F = 10 \text{ N} \rightarrow \ell = 0,35 \text{ m}$
- $u = \ell_{\text{met kracht}} - \ell_{\text{zonder kracht}}$
- $u = 0,35 - 0,10 = 0,25 \text{ m}$
- $C = \frac{F}{u} \rightarrow C = \frac{10}{0,25} = 40 \text{ N/m}$

Figuur 20



Vervorming waarbij $F = C \cdot u$ niet geldt

Bij een ideale spiraalveer is de vervorming recht evenredig met de kracht, maar dat is niet altijd het geval. Vaak is het zo dat bij een kleine kracht de vervorming recht evenredig is, maar dat bij een grote kracht de formule $F = C \cdot u$ niet helemaal meer klopt. In figuur 21 zie je een situatie waarbij $F = C \cdot u$ alleen geldt voor een kracht kleiner dan 3 N. Bij een grote kracht wordt de veer stugger, waardoor C niet meer constant is maar steeds groter wordt. De grafiek is nu geen rechte lijn maar buigt af.

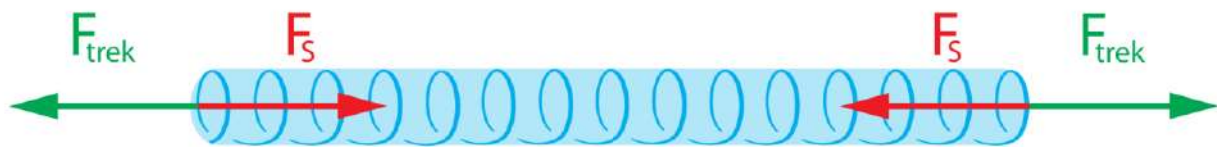


Figuur 21

Spankracht

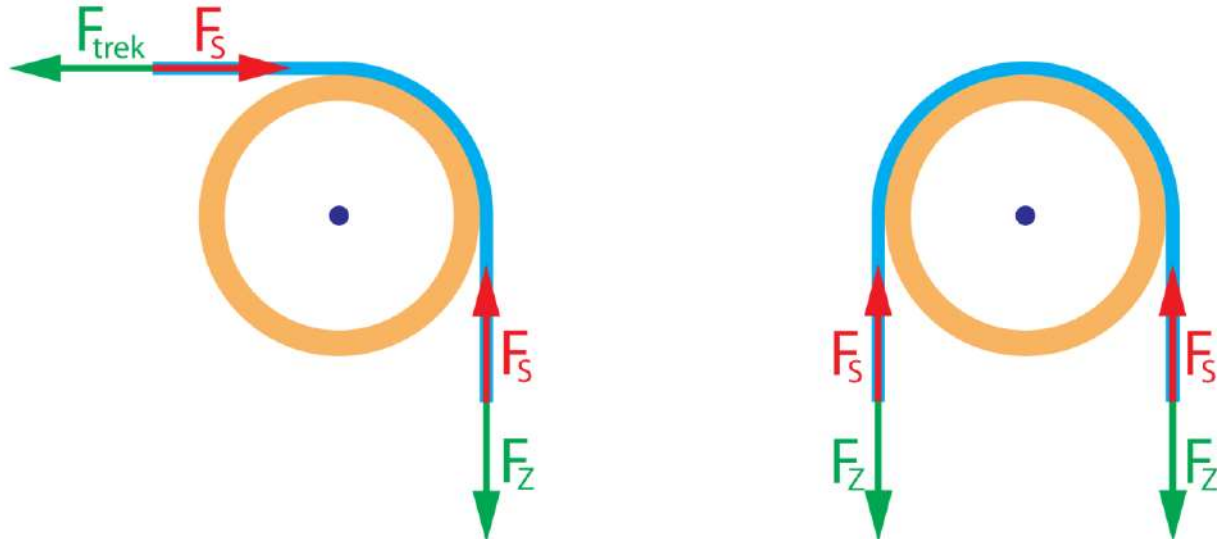
Een spankracht ontstaat als een koord wordt uitgerekt. Door een kracht op het koord komen de atomen op iets grotere afstand van elkaar waardoor het koord langer wordt. Zolang het koord niet breekt is de kracht op het koord altijd gelijk aan de kracht die door het koord wordt uitgeoefend.

In figuur 22 wordt een trekkracht F_{trek} uitgeoefend op een koord. Hierdoor wordt het koord uitgerekt waardoor een spankracht F_S ontstaat. De spankracht heeft aan beide uiteinden dezelfde waarde. Ook als het koord, bijvoorbeeld via een wiel, de bocht om gaat heeft de spankracht aan beide uiteinden dezelfde waarde.



Figuur 22 Een kracht wordt uitgeoefend op een koord waardoor het koord wordt gespannen. Hierdoor ontstaat er een spankracht F_S die aan beide uiteinden even groot is.

De spankracht in een koord is aan beide uiteinden gelijk.



Figuur 23 Als het uitgerekte koord een bocht maakt, bijvoorbeeld doordat het om een wiel is gelegd, zal de spankracht de bocht omgaan.

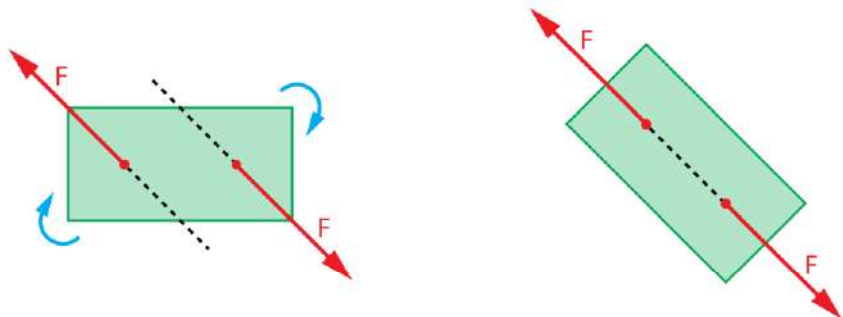
3.6 De momentenwet (hefboomwet)

Het draaien van een voorwerp

We hebben gezien dat als de resulterende kracht nul is, een voorwerp niet in beweging komt en niet gaat versnellen of vertragen. Maar dit geldt alleen als alle krachten aangrijpen in één punt, bijvoorbeeld het zwaartepunt. Om het niet te ingewikkeld te maken hebben we een voorwerp tot nu toe opgevat als een punt. In deze paragraaf bekijken we wat er gebeurt als de krachten op een voorwerp niet hetzelfde aangrijpingspunt hebben.

Stel er zijn twee even grote en tegengestelde krachten, dan kunnen deze krachten verschillende werklijnen hebben. Als deze werklijnen elkaar niet snijden (geen gemeenschappelijk punt hebben) gaat het voorwerp draaien. Het draaien stopt zodra de werklijnen elkaar snijden, of als ze samenvallen. Zie figuur 24.

Figuur 24 Links: op een blok werken twee krachten waarbij de werklijnen elkaar niet snijden. Het blok zal hierdoor gaan draaien. Rechts: het draaien stopt als de werklijnen elkaar snijden of samenvallen.

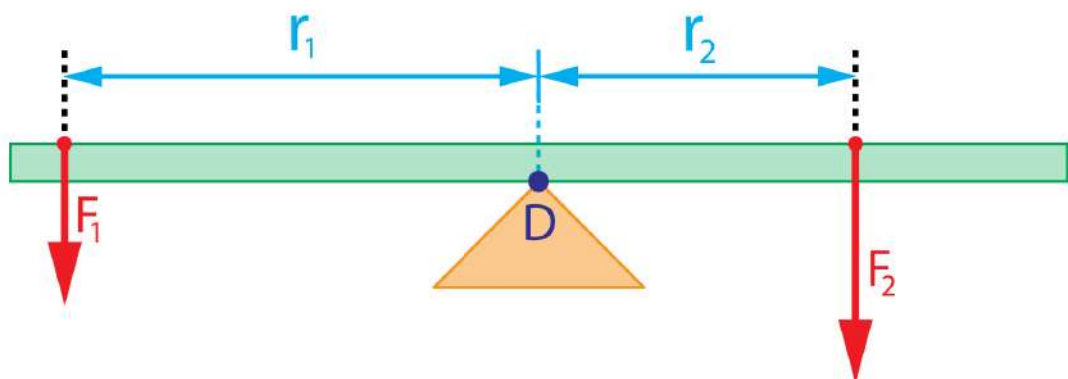


De arm van een kracht

Met de momentenwet (hefboomwet) kun je berekenen of een voorwerp wel of niet gaat draaien. Bij deze berekening moet je niet alleen de krachten op het voorwerp weten maar ook de **arm** van deze krachten.

De arm van een kracht is de afstand tussen de werklijn van de kracht en het draaipunt.

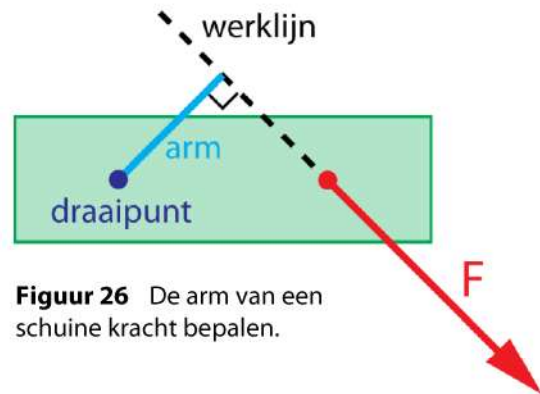
Stel er zijn twee krachten F_1 en F_2 . Zie figuur 25. De stippellijnen zijn de werklijnen van F_1 en F_2 . De arm is de afstand tussen de werklijn van de kracht en het draaipunt D. r_1 is de arm van F_1 en r_2 is de arm van F_2 . D is het draaipunt.



Figuur 25

Ook bij een kracht die schuin staat kun je de arm bepalen.

- teken de werklijn van de kracht
- teken een lijn loodrecht op de werklijn door het draaipunt
- meet de afstand van de werklijn tot het draaipunt



Figuur 26 De arm van een schuine kracht bepalen.

De momentenwet (hefboomwet)

Stel op een voorwerp werken twee krachten F_1 en F_2 . Zie figuur 25. Met alleen F_1 zal het voorwerp gaan draaien. Werkt alleen F_2 dan zal het voorwerp de ander kant uit draaien. Als beide krachten werken zal het voorwerp niet gaan draaien als de **kracht keer arm** van kracht 1 gelijk is aan kracht keer arm van kracht 2.

Een voorwerp gaat niet draaien als:

$$F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2$$

$$F_1 \cdot r_1 > F_2 \cdot r_2$$

het voorwerp gaat draaien in de richting van kracht 1

$$F_1 \cdot r_1 < F_2 \cdot r_2$$

het voorwerp gaat draaien in de richting van kracht 2

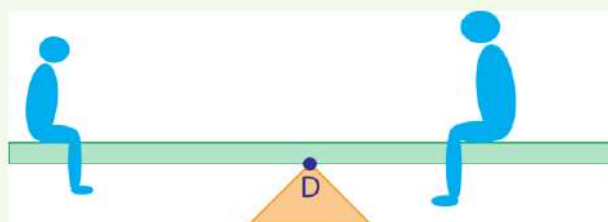
De kracht vermenigvuldigd met de arm noem je het **moment M** van de kracht.

Het moment van een kracht is de kracht vermenigvuldigd met de arm.

$$M = F \cdot r$$

VOORBEELD wipwap

Aan de linkerkant van een wipwap zit Anna (A). Anna heeft een massa van 40 kg en zit 1,8 m van het midden. Rechts gaat Bea (B) zitten. Bea heeft een massa van 60 kg. Als er niemand op de wip zit is de wip in evenwicht. Zie figuur 27.



Figuur 27

Waar moet Bea gaan zitten zodat de wip in evenwicht is (niet gaat draaien)?

- $F_z = m \cdot g \rightarrow F_{zA} = 40 \cdot 9,81 = 392,4 \text{ N}$ en $F_{zB} = 60 \cdot 9,81 = 588,6 \text{ N}$
- momentenwet: $F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2$
- $r_1 = 1,8 \text{ m} \mid r_2 = \dots \text{ m}$
- $392,4 \cdot 1,8 = 588,6 \cdot r_2 \rightarrow r_2 = 1,2 \text{ m}$

VOORBEELD Krachtenevenwicht op een draaischijf

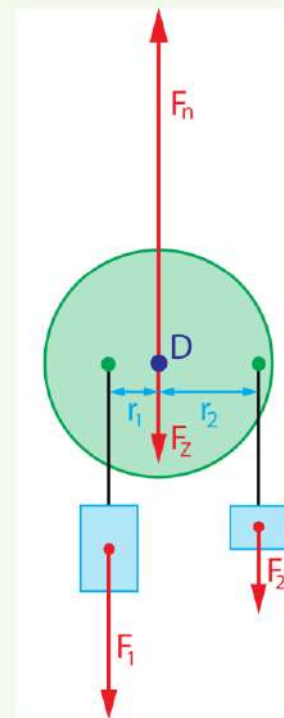
Aan een draaischijf hangen twee gewichtjes. Zie figuur 28.
 $F_1 = 12 \text{ N}$ en $F_2 = 6,0 \text{ N}$. De zwaartekracht op de schijf is $7,0 \text{ N}$.
 $r_1 = 8,0 \text{ cm}$. De schijf is in rust.

Bereken de arm van kracht 2 .

- op de schijf werken vier krachten: F_Z , F_n , F_1 en F_2
- de werklijnen van F_Z en van F_n gaan door het draaipunt waardoor de armen van F_Z en F_n nul zijn
- momentenwet: $F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2$
- $F_1 = 12 \text{ N} \mid r_1 = 8,0 \text{ cm} \mid F_2 = 6 \text{ N} \mid r_2 = \dots \text{ cm}$
- $12 \cdot 8 = 6 \cdot r_2 \rightarrow r_2 = 16 \text{ cm}$

Bereken de normaalkracht F_n

- in rust $\rightarrow F_{\text{res}} = 0$
- $F_1 + F_2 + F_Z - F_n = 0$
- $12 + 6 + 7 - F_n = 0$
- $F_n = 25 \text{ N}$



Figuur 28

VOORBEELD steekwagen

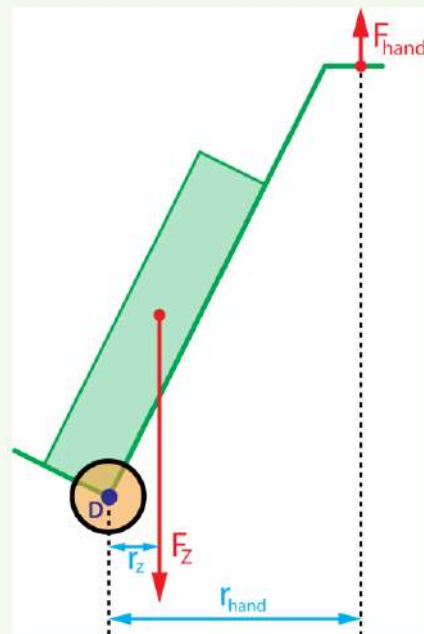
Een last van $61,2 \text{ kg}$ wordt met een steekwagen in evenwicht gehouden. Zie figuur 29.

Bereken de kracht op het handvat.

- $F_Z = m \cdot g \rightarrow F_Z = 61,2 \cdot 9,81 = 600 \text{ N}$
- momentenwet: $F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2$
- opmeten r_Z en $r_{\text{hand}} \rightarrow r_{\text{hand}} = 5 \cdot r_Z$
- $600 \cdot r_Z = F_{\text{hand}} \cdot 5 \cdot r_Z$ r_Z wegstrepen
- $600 = F_{\text{hand}} \cdot 5 \rightarrow F_{\text{hand}} = \frac{600}{5} = 120 \text{ N}$

Bereken de normaalkracht op het wiel.

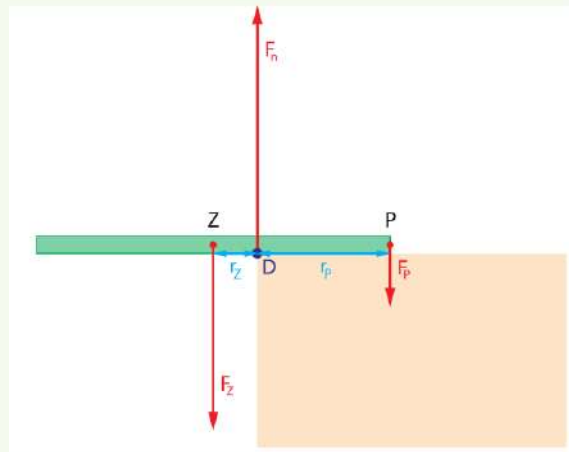
- in rust $\rightarrow F_{\text{res}} = 0$
- $F_Z - F_{\text{hand}} - F_n = 0$
- $600 - 120 - F_n = 0 \rightarrow F_n = 480 \text{ N}$



Figuur 29

VOORBEELD Een gedeeltelijk ondersteunde balk

Een balk wordt aan de rechterkant ondersteund. Het zwaartepunt Z ligt links van het draaipunt D. Om te voorkomen dat de balk gaat kantelen oefen je in punt P een kracht F_p uit. Zie figuur 30. De balk heeft een lengte van 2,0 m en een massa van 10 kg. Afstand DP is 75 cm.



Figuur 30

Bereken de kracht die je in P moet uitoefenen.

- $F_z = m \cdot g \rightarrow F_z = 10 \cdot 9,81 = 98,1 \text{ N}$
- $r_z = ZP - DP = 1,0 - 0,75 = 0,25 \text{ m} \mid r_p = 0,75 \text{ m}$
- momentenwet: $F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2$
- $98,1 \cdot 0,25 = F_z \cdot 0,75 \rightarrow F_p = 32,7 \text{ N}$

Omdat je niet de hele tijd tegen de balk wil duwen zet je een gewicht op plaats P.

Bereken hoeveel kilogram je op de balk moet zetten.

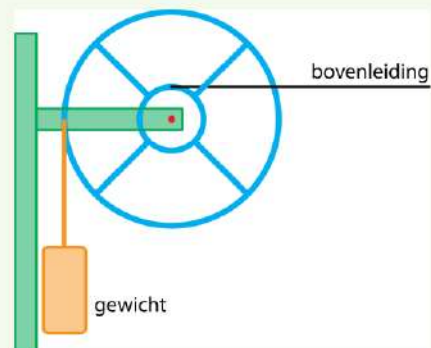
- $F_z = m \cdot g$ met $F_z = 32,7 \text{ N}$
- $32,7 = m \cdot 9,81 \rightarrow m = 3,33333 = 3,3 \text{ kg}$

Bereken de normaalkracht op de balk.

- in rust $\rightarrow F_{\text{res}} = 0$
- $F_z + F_{\text{hand}} - F_n = 0$
- $98,1 + 32,7 - F_n = 0 \rightarrow F_n = 130,8 = 1,3 \cdot 10^2 \text{ N}$

VOORBEELD bovenleiding

Om bij een spoorlijn de bovenleiding te spannen wordt een gewicht van 500 kg opgehangen aan een constructie met twee aan elkaar vastgemaakte wielen. Door de zwaartekracht op het gewicht ontstaat er een spankracht in de bovenleiding. Zie figuur 31.



Figuur 31

Bereken de spankracht in de bovenleiding.

- $F_z = m \cdot g \rightarrow F_z = 500 \cdot 9,81 = 4905 \text{ N}$
- opmeten: $r_z = 5,0 \text{ cm} \mid r_{\text{span}} = 1,5 \text{ cm}$
- momentenwet: $F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2$
- $F_z \cdot r_z = F_{\text{span}} \cdot r_{\text{span}} \rightarrow 4905 \cdot 5,0 = F_{\text{span}} \cdot 1,5 \rightarrow F_{\text{span}} = 1635 = 1,6 \cdot 10^4 \text{ N}$

3.7 Kracht en versnelling

De drie wetten van Isaac Newton

Het versnellen of vertragen van een voorwerp wordt veroorzaakt door een kracht. Is de resulterende kracht nul, dan verandert de snelheid niet. Een stilstaand voorwerp blijft dan stilstaan en een voorwerp met snelheid behoudt deze snelheid en blijft in een rechte lijn bewegen. Is er wel een resulterende kracht, dan versnelt of vertraagt het voorwerp, waarbij de grootte van de versnelling wordt bepaald door de massa. Bij een grote massa kost het veranderen van de snelheid meer kracht dan bij een kleine massa. Verder komt een kracht nooit alleen voor. Twee voorwerpen kunnen elkaar aantrekken of afstoten en de krachten die hierbij een rol spelen zijn altijd aan elkaar gelijk en tegengesteld gericht. Deze ideeën zijn het uitgangspunt van Newtons bewegingsleer. In zijn beroemde boek "Philosophiae Naturalis Principia Mathematica" uit 1687 gaat hij uit van drie postulaten die we nu kennen als de drie wetten van Newton. Een postulaat is een onbewezen stelling die je aanvaardt als grondslag van je theorie. In je theorie werk je de logische gevolgen van de postulaten uit, maar de postulaten zelf bewijst je niet. Hieronder staan de drie postulaten (wetten) van Newton in zijn woorden en als wiskundige formule in moderne notatie.

- 1 Ieder voorwerp behoudt een toestand van rust of van constante snelheid in een rechte lijn, tenzij het deze toestand moet veranderen door de werking van een kracht.**

$$F_{\text{res}} = 0 \Leftrightarrow a = 0$$

- 2 De verandering van de snelheid is recht evenredig met de kracht die wordt uitgeoefend en heeft de richting van de rechte lijn waarin deze kracht werkt.**

$$F_{\text{res}} = m \cdot a$$

- 3 Op iedere actie volgt altijd een tegenovergestelde reactie. De wederzijdse acties van twee voorwerpen op elkaar zijn altijd gelijk en tegengesteld gericht.**

$$F_{A \rightarrow B} = -F_{B \rightarrow A}$$

Met deze drie wetten kun je de beweging van ieder voorwerp uitrekenen. Weet je de plaats en de snelheid op één moment en weet je hoe de kracht afhangt van de plaats en de snelheid, dan ligt de beweging die het voorwerp gaat uitvoeren volledig vast. Met de wetten van Newton is de toekomst van ieder voorwerp, dus ook van ieder mens, in theorie

voorspelbaar. In de praktijk is dat niet zo, want om de beweging van ieder atoom uit te rekenen heb je een onmogelijk snelle computer nodig. Bovendien, de wetten van Newton gelden niet voor individuele atomen. In de wereld van de atomen gelden de wetten van de kwantummechanica en daarin wordt heel anders gekeken naar plaats, snelheid en kracht.

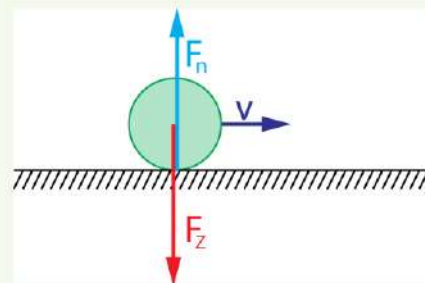
Hoewel de wetten van Newton niet gelden voor atomen gelden ze wel in extreem goede benadering voor alle voorwerpen. Ze zijn van cruciaal belang als je de wereld om je heen wil begrijpen. Laten we daarom eens dieper kijken naar de betekenis van deze drie wetten.

Wet 1 – traagheid

De eerste wet wordt ook wel de **traagheidswet** genoemd. Met traagheid bedoel je dat de beweging van een voorwerp niet zomaar verandert. Laat je een voorwerp met rust dan verandert zijn snelheid niet. Deze wet is het directe gevolg van het inzicht dat snelheid **relatief** is. Galileo Galilei heeft dit als eerste ingezien. In zijn boek *Dialogo* uit 1632 legt hij uit dat of iets stilstaat of met constante snelheid in een rechte lijn beweegt afhankelijk is van de waarnemer. Wat de ene waarnemer ziet als beweging ziet de ander als stilstaan. Maar de natuurkundige werkelijkheid is objectief en niet afhankelijk van de waarnemer. Stilstaan of met constante snelheid in een rechte lijn bewegen zijn dus gelijk aan elkaar. Voor stilstaan heb je geen kracht nodig en dus ook niet voor beweging met constante snelheid in een rechte lijn.

VOORBEELD Wet 1 – bowlingbal

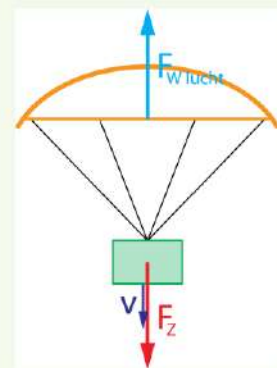
Een bowlingbal rolt vrijwel zonder weerstand. Er werken twee krachten op de bowlingbal F_Z en F_n . Deze krachten zijn even groot en tegengesteld gericht. F_{res} is dus nul. Volgens de eerste wet van Newton is de versnelling dan ook nul. De snelheid van de bowlingbal verandert niet en de bal beweegt daarom met een constante snelheid in een rechte lijn.



Figuur 32

VOORBEELD Wet 1 – parachute

Een kist wordt aan een parachute uit een vliegtuig gegooid. Op de kist en de parachute werken twee krachten de zwaartekracht F_Z en de luchtweerstand $F_{W\text{lucht}}$. Deze krachten zijn even groot en tegengesteld gericht. F_{res} is dus nul. Volgens de eerste wet van Newton is de versnelling dan ook nul. De snelheid van de parachute met kist verandert niet en de parachute beweegt daarom met een constante snelheid in een rechte lijn omlaag.



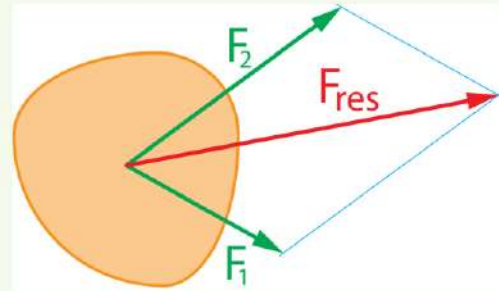
Figuur 33

Wet 2 – versnellen en vertragen

Met de tweede wet kun je uitrekenen hoe groot de versnelling van een voorwerp is als er een kracht op werkt en als de massa constant is. Voor de versnelling geldt $a = F_{\text{res}} / m$. Weet je de versnelling dan kun je op ieder tijdstip de snelheid uitrekenen. De toekomst van het voorwerp ligt hiermee vast.

VOORBEELD Wet 2 – versnellen en vertragen

Op een voorwerp werken twee krachten. De resulterende kracht is niet nul en het voorwerp gaat versnellen. De grootte van de versnelling vind je door de resulterende kracht te delen door de massa van het voorwerp. De richting van de versnelling is gelijk aan de richting van de resulterende kracht.



Figuur 34

VOORBEELD Wet 2 – versnellen en vertragen

- Om een bowlingbal van 2,7 kg evenveel te versnellen als een pingpongbal van 2,7 gram is 1000 keer meer kracht nodig.
- Om een auto in 5 seconden van 0 naar 100 km/h te brengen is 4 keer meer kracht nodig dan om deze auto in 20 seconden van 0 naar 100 km/h te brengen.

VOORBEELD Wet 2 – afremmen en optrekken van een auto

Een auto remt voor een rood stoplicht in 20 seconden af van 30 m/s tot stilstand. De auto heeft een massa van 1200 kg.

Bereken de remkracht op de auto.

- $a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \rightarrow a = \frac{30}{20} = 1,5 \text{ m/s}^2$
- $F_{\text{res}} = m \cdot a \rightarrow F_{\text{res}} = 1200 \cdot 1,5 = 1,8 \cdot 10^3 \text{ N}$

Als het stoplicht op groen springt oefent de motor een kracht uit van 3000 N.

Bereken de versnelling.

- de resulterende kracht is de motorkracht $F_{\text{res}} = 3000 \text{ N}$
- $a = \frac{F_{\text{res}}}{m} \rightarrow a = \frac{3000}{1200} = 2,5 \text{ m/s}^2$

Wet 3 – krachtparen

De derde wet zegt iets over de oorsprong van kracht. Voorwerpen oefenen krachten uit op elkaar. Ze kunnen elkaar aantrekken of afstoten. In het dagelijks leven zijn er maar twee krachten die ertoe doen, de zwaartekracht en de elektromagnetische kracht. De zwaartekracht zijn we al tegengekomen en veroorzaakt niet alleen het vallen van voorwerpen op aarde maar ook het bewegen van alle sterren, planeten, kometen en satellieten. De elektromagnetische kracht is de oorzaak van elektrische en magnetische verschijnselen. Alle chemische reacties worden erdoor veroorzaakt, en daarmee ook alle biologische processen. Naast deze twee krachten zijn er nog de zwakke en de sterke kernkrachten die alleen invloed hebben binnen een atoomkern. En dat is het. Meer krachten zijn er niet.

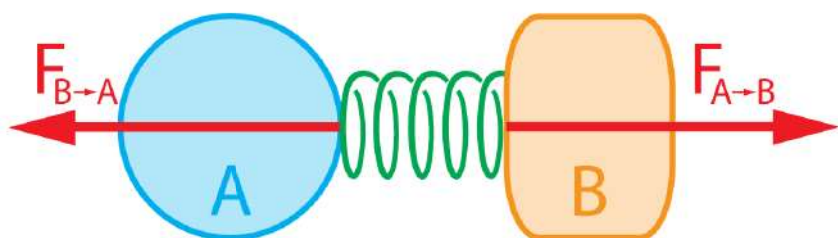
VOORBEELD Wet 3 – krachtenparen

- Een boek dat op een tafel ligt oefent een kracht uit op de tafel. De tafel oefent een even grote tegengestelde kracht uit op het boek.
- Als je een veer indrukt oefent je hand een kracht uit op de veer. Door de veer wordt een even grote tegengestelde kracht uitgeoefend op je hand.
- Als een auto optrekt oefenen de autobanden een kracht uit op het wegdek. Het wegdek oefent een even grote tegengestelde kracht uit op de auto.
- Als een ballon leegloopt oefent de ballon een kracht uit op de uitstromende lucht. De uitstromende lucht oefent een even grote tegengestelde kracht uit op de ballon.
- Als een appel valt oefent de aarde een kracht uit op de appel. De appel oefent een even grote tegengestelde kracht uit op de aarde.

Actie = – reactie

De derde wet van Newton $F_{A \rightarrow B} = -F_{B \rightarrow A}$ wordt soms geformuleerd als "actiekracht is min reactiekracht" of "actie is min reactie". Deze formulering suggereert dat er eerst een actiekracht is en pas daarna een reactiekracht, maar dat is niet het geval. Beide krachten zijn altijd tegelijkertijd aanwezig. De "actiekracht" en "reactiekracht" zijn samen het gevolg van een **interactie** van twee voorwerpen. A en B oefenen krachten uit **op elkaar**. Zie figuur 35.

Een bekende denkfout is dat de actiekracht en de reactiekracht elkaar opheffen omdat ze altijd even groot en tegengesteld gericht zijn. Volgens deze redenering is de resulterende kracht dan altijd nul. Maar dat is niet zo, want de actiekracht en de reactiekracht werken op **verschillende voorwerpen**. $F_{A \rightarrow B}$ is de kracht die voorwerp A op voorwerp B uitoefent en $F_{B \rightarrow A}$ is de kracht die B op A uitoefent. Op voorwerp A werkt dus alleen $F_{B \rightarrow A}$ en op B werkt alleen $F_{A \rightarrow B}$. Als er geen andere krachten zijn zullen beide voorwerpen in tegengestelde richting versnellen. Het voorwerp met de kleinste massa versnelt het meest.



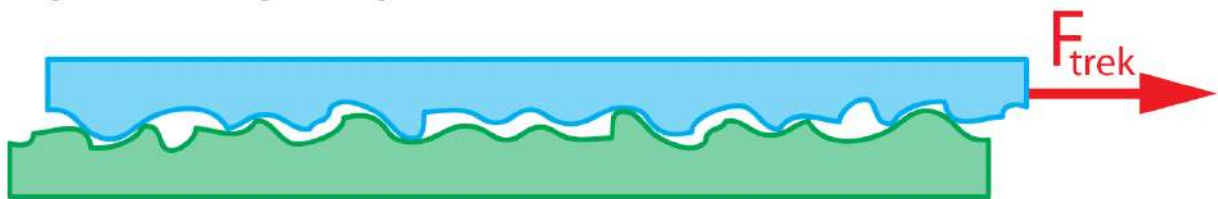
Figuur 35 Twee voorwerpen oefenen krachten op elkaar uit. Ze hebben interactie met elkaar.

3.8 Weerstand

Een voorwerp waarop geen kracht werkt blijft met een constante snelheid in een rechte lijn bewegen. Maar in de dagelijkse praktijk komen bewegende voorwerpen na een poosje tot stilstand. Dit gebeurt omdat er een weerstandskracht werkt die het voorwerp afremt. Er zijn verschillende soorten weerstandskrachten en met de drie belangrijkste ga je in deze paragraaf kennismaken.

Schuifwrijving (schuifweerstand)

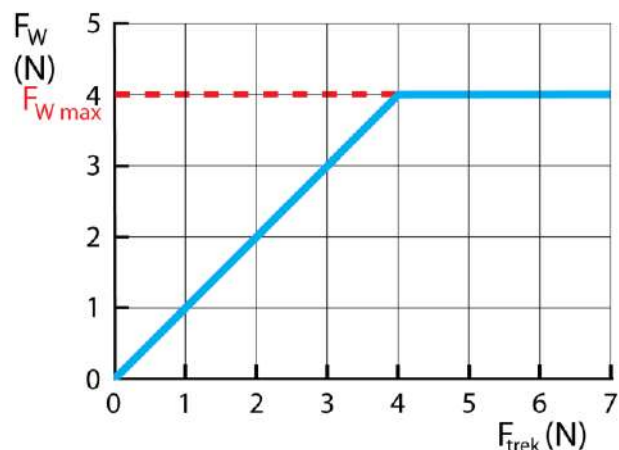
Schuifwrijving treedt op als twee ruwe oppervlakken over elkaar schuiven. Oneffenheden op beide contactoppervlakken zorgen ervoor dat de voorwerpen alleen kunnen bewegen als ze een stukje van elkaar verwijderd worden. Zie figuur 36. In een extreem geval, van bijvoorbeeld klittenband, blijven de voorwerpen aan elkaar vasthaken en is de schuifwrijvingskracht buitengewoon groot.



Figuur 36 Om twee ruwe oppervlakken over elkaar heen te schuiven is een kracht nodig. Als F_{trek} de kleiner is dan $F_{W \text{ max}}$ komt het voorwerp niet in beweging.

De schuifwrijving heeft een maximale waarde en om die te bepalen kun je met een krachtmeter trekken aan een blok dat op een tafel ligt. Het blok gaat pas bewegen als de trekkracht groter is dan de **maximale wrijvingskracht** $F_{W \text{ max}}$. Zie figuur 37.

Figuur 37 Bij een bepaalde trekkracht bereikt F_W zijn maximale waarde en begint het blok te schuiven.



Als de trekkracht vanaf nul toeneemt neemt de wrijvingskracht evenveel toe, zodat het blok niet in beweging komt. Bij een bepaalde trekkracht bereikt de wrijvingskracht zijn maximale waarde $F_{W \text{ max}}$. Als $F_{\text{trek}} = F_{W \text{ max}}$ staat het blok stil of beweegt het met een constante snelheid en als F_{trek} groter is dan $F_{W \text{ max}}$ versnelt het blok.

- Het blok **staat stil** als $F_{\text{res}} = F_{\text{trek}} - F_W = 0 \rightarrow F_{\text{trek}} = F_W$
- Het blok heeft een **constante snelheid** als $F_{\text{res}} = F_{\text{trek}} - F_{W \text{ max}} = 0 \rightarrow F_{\text{trek}} = F_{W \text{ max}}$
- Het blok **versnelt** als $F_{\text{res}} = F_{\text{trek}} - F_{W \text{ max}} > 0 \rightarrow F_{\text{trek}} > F_{W \text{ max}} \rightarrow a = \frac{F_{\text{trek}} - F_{W \text{ max}}}{m}$

Om slijtage te voorkomen worden oppervlakken die vaak langs elkaar schuiven zo glad mogelijk gemaakt (gepolijst) en wordt er tussen de oppervlakken een laagje olie aangebracht (smering). De maximale wrijvingskracht wordt bepaald door de ruwheid van de twee contactoppervlakken en door de normaalkracht. Er is een recht evenredig verband tussen de maximale wrijvingskracht en de normaalkracht.

Er is een recht evenredig verband tussen de maximale schuifwrijvingskracht en de normaalkracht.

Rolweerstand

Bij rollen is de weerstandskracht veel kleiner dan bij schuiven. Dit komt omdat bij het rollen oneffenheden van de contactoppervlakken geen grote invloed hebben. Al heel lang geleden heeft de mens dit begrepen en sindsdien worden er wielen gebruikt om zware voorwerpen te verplaatsen.

Het contactoppervlak tussen een wiel en de ondergrond is klein. Omdat het gewicht over een relatief klein contactoppervlak wordt verdeeld is de kracht per cm^2 groot. Hierdoor vervormen het wiel en de ondergrond een beetje en deze vervorming veroorzaakt de rolweerstand. Een grote rolweerstand ontstaat als een zwaar voorwerp op zachte banden over een zachte ondergrond rijdt. Voor een kleine rolweerstand moeten zowel de wielen als de ondergrond moeilijk zijn te vervormen. Een trein heeft stalen wielen en rijdt op ijzeren rails. De rolweerstand van een trein is daarom erg klein. Ook voor de rolweerstand is er een recht evenredig verband tussen de rolweerstandskracht en de normaalkracht.

Rolweerstand wordt veroorzaakt door de vervorming van het wiel en de ondergrond. De rolweerstandskracht is recht evenredig met de normaalkracht.

Luchtweerstand

Een voorwerp dat door de lucht beweegt botst voortdurend tegen moleculen en bij iedere botsing raakt het een beetje snelheid kwijt. De ontelbare botsingen veroorzaken samen een tegenwerkende kracht. Dit is de luchtweerstand. Ieder voorwerp dat door gas of vloeistof beweegt ondervindt dit type weerstand. In figuur 38 zie je hoe een bal zich door de lucht verplaatst. De bal bots tijdens de beweging met alle moleculen in het blauwe gebied. Als de bal een grotere snelheid heeft bots het per seconde met meer moleculen, waardoor de luchtweerstand groter wordt.



Figuur 38 Een bal met frontaal oppervlakte A beweegt door de lucht.

Behalve de **snelheid** zijn ook de vorm en de grootte van het oppervlak loodrecht op de bewegingsrichting belangrijk. Dit oppervlak is het **frontale oppervlak**. Een voorwerp met een groot frontaal oppervlak ondervindt een grotere luchtweerstand dan een voorwerp met een klein frontaal oppervlak. De vorm van de frontale oppervlakte en de hoek van dit vlak ten opzichte van de bewegingsrichting bepaalt de **stroomlijn** van het voorwerp. Een voorwerp met een betere stroomlijn heeft minder luchtweerstand. Tenslotte is ook de **dichtheid** van de lucht belangrijk. De dichtheid bepaalt hoeveel massa er per volume aanwezig is. Is de dichtheid groot, dan kost het meer moeite om een voorwerp te verplaatsen. De dichtheid van water is ongeveer duizend keer groter dan die van lucht. Verplaatsing door water kost daarom veel meer kracht.

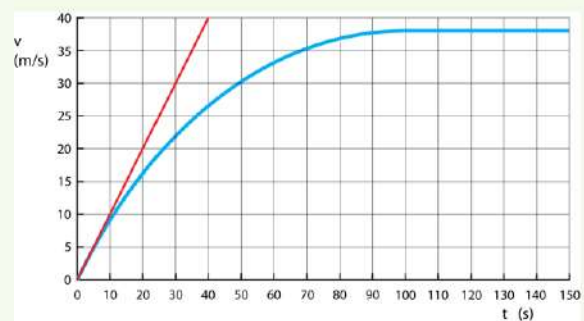
De luchtweerstandskracht is recht evenredig met het frontale oppervlak en met de snelheid in het kwadraat.

Invloed van weerstand op de snelheid

Een (v, t)-diagram geeft veel informatie over de aanwezigheid van weerstand. Stel dat een auto optrekt uit stilstand. In het begin is de snelheid nul en is er nog geen luchtweerstand. Er is alleen rolweerstand. Als de snelheid groter wordt neemt de luchtweerstand toe. De rolweerstand is niet afhankelijk van de snelheid en blijft gelijk.

VOORBEELD het optrekken van een auto

Een auto met een massa van 1200 kg trekt op uit stilstand. De motor levert een constante kracht van 1500 N. Figuur 39 is het (v, t)-diagram van de auto.



Figuur 39

Bepaal de rolweerstand.

- bepaal de versnelling op $t = 0$
teken een lange raaklijn
- $a = \left(\frac{\Delta v}{\Delta t} \right)_{\text{raaklijn}} \rightarrow a = \frac{40}{40} = 1,0 \text{ m/s}^2$
- $F_{\text{res}} = m \cdot a \rightarrow F_{\text{res}} = 1200 \cdot 1,0 = 1200 \text{ N}$
- $F_{\text{res}} = F_{\text{motor}} - F_{W \text{ tot}}$
- $1200 = 1500 - F_{W \text{ tot}} \rightarrow F_{W \text{ tot}} = 300 \text{ N}$
- op $t = 0$ is er geen luchtweerstand $\rightarrow F_{W \text{ tot}} = F_{W \text{ rol}} = 300 \text{ N}$

Bepaal de luchtweerstand bij maximale snelheid.

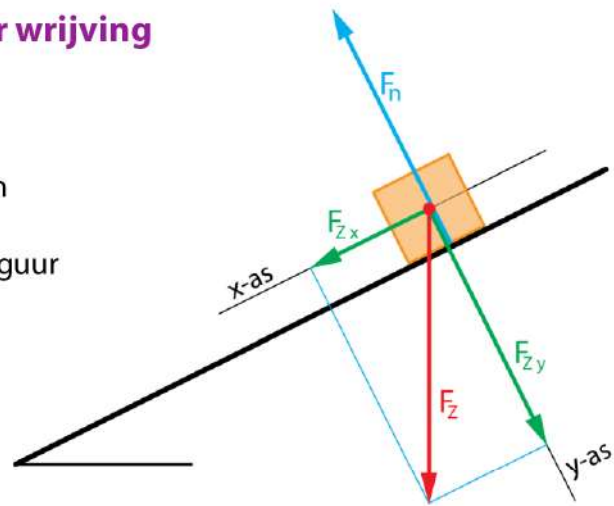
- maximale snelheid $\rightarrow v$ is constant $\rightarrow F_{\text{res}} = 0$
- $F_{\text{res}} = F_{\text{motor}} - F_{W \text{ tot}} = 0 \rightarrow F_{W \text{ tot}} = F_{\text{motor}} = 1500 \text{ N}$
- $F_{W \text{ tot}} = F_{W \text{ rol}} + F_{W \text{ lucht}}$
- $1500 = 300 + F_{W \text{ lucht}} \rightarrow F_{W \text{ lucht}} = 1200 \text{ N}$

3.9 Krachten op een helling

In paragraaf 3.2 heb je geleerd hoe je krachten kunt optellen en kunt splitsen. Je maakt daarbij gebruik van een constructie (tekening) van krachtpijlen. Als je van één krachtpijl weet hoe groot de kracht is kun je de grootte van alle andere krachtpijlen bepalen door de lengte van de krachtpijl te meten een verhoudingstabel te gebruiken. Dat gaan we nu doen voor voorwerpen op een helling.

Een voorwerp op een helling zonder wrijving

Als een voorwerp op een helling staat is het handig om de zwaartekracht te splitsen in twee loodrechte componenten. Eén component langs de helling naar beneden F_{zx} en één component loodrecht op de helling naar beneden F_{zy} . Zie figuur 40. Zoals je in deze figuur kunt zien geldt $F_z = F_{zx} + F_{zy}$.



Figuur 40 Krachten op een helling.

$$F_z = F_{zx} + F_{zy}$$

- F_{zx} is de x-component van F_z langs de helling naar beneden
- F_{zy} is de y-component van F_z loodrecht op de helling naar beneden

– de normaalkracht –

F_{zy} is de kracht waarmee het blok tegen de helling duwt. Dit is het gewicht van het blok. De kracht waarmee de helling terugduwt is de normaalkracht F_n en die is even groot en tegengesteld aan F_{zy} .

$$F_n = -F_{zy}$$

– F_{res} zonder wrijving –

Voor de resulterende kracht op het blok geldt: $F_{res} = F_z + F_n \rightarrow F_{res} = F_{zx} + F_{zy} + F_n$

Omdat $F_n = -F_{zy}$ vinden we $F_{res} = F_{zx}$.

Zonder wrijving

$$F_{res} = F_{zx}$$

VOORBEELD kist op een helling zonder wrijving

Een kist met een massa van 5,0 kg staat op een helling. Zie figuur 40.

Bepaal F_{zx} .

- $F_z = m \cdot g \rightarrow F_z = 5 \cdot 9,81 = 49,05 \text{ N}$
- opmeten lengte krachtpijl $F_z = 49 \text{ mm}$ | lengte krachtpijl $F_{zx} = 22 \text{ mm}$
- verhoudingstabel:

newton	49,05	x
millimeter	49	22
- kruislings vermenigvuldigen: $4,905 \cdot 22 = 49 \cdot x$
- $x = \frac{49,05 \cdot 22}{49} = 22 \rightarrow F_{zx} = 22 \text{ N}$

Bereken de versnelling van de kist.

- $F_{\text{res}} = F_{zx} \rightarrow F_{\text{res}} = 22 \text{ N}$
- $F_{\text{res}} = m \cdot a \rightarrow 22 = 5 \cdot a \rightarrow a = 4,4 \text{ m/s}^2$

Een zware kist met een massa van 25 kg staat op dezelfde helling. Zie figuur 40.

Beredeneer hoe groot F_{zx} voor deze zware kist zal zijn.

- F_z is 5 keer zo groot
- de verhouding tussen F_z en F_{zx} blijft gelijk (want de helling is gelijk)
- F_{zx} is ook 5 keer zo groot $\rightarrow F_{zx} = 5 \cdot 22 = 110 \text{ N}$

Beredeneer hoe groot de versnelling voor deze zware kist zal zijn.

- F_{zx} is 5 keer zo groot $\rightarrow F_{\text{res}}$ is ook 5 keer zo groot
- $F_{\text{res}} = m \cdot a \rightarrow F_{\text{res}}$ is 5 keer zo groot én m is 5 keer zo groot
- a blijft gelijk $\rightarrow a = 4,4 \text{ m/s}^2$

Een voorwerp op een helling met wrijving

Zonder wrijving krijgt een voorwerp op een helling altijd een versnelling. Als er wél wrijving is hoeft dit niet het geval te zijn. Dit hangt af van hoe groot F_{zx} en F_w zijn. Voor de krachten op het blok geldt: $F_{\text{res}} = F_z + F_n + F_w \rightarrow F_{\text{res}} = F_{zx} + F_{zy} + F_n + F_w$. Omdat $F_n = -F_{zy}$ vinden we $F_{\text{res}} = F_{zx} + F_w$.

Met wrijving

$$F_{\text{res}} = F_{zx} + F_w$$

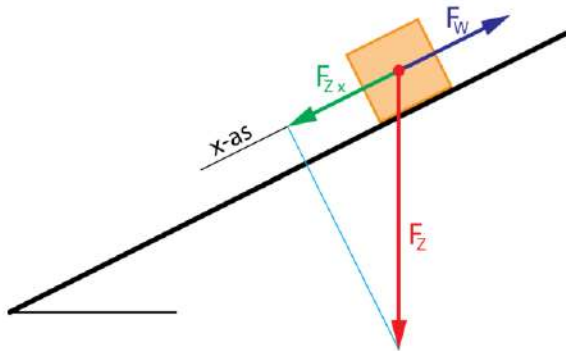
Zoals we hebben gezien is de schuifwrijvingskracht gelijk aan de trekkracht tot de maximale waarde is bereikt. Een nog grotere trekkracht zal het voorwerp in beweging brengen en laten versnellen. Als er verder geen andere krachten zijn is de trekkracht gelijk aan F_{zx} .

– stilstaan of constante snelheid –

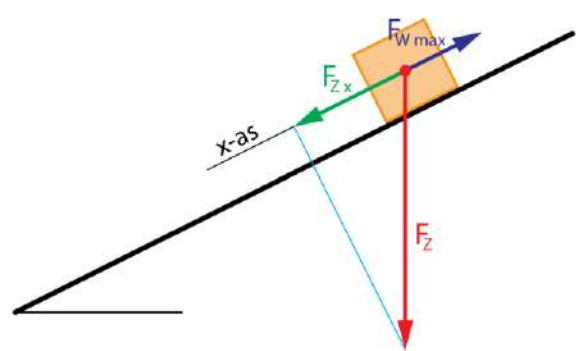
Als het blok stilstaat is de resulterende kracht nul: $F_{\text{res}} = F_{Zx} + F_W = 0 \rightarrow F_W = -F_{Zx}$.

– versnellen naar beneden –

Maken we de hellingshoek groter dan wordt F_{Zx} ook groter. Het blok blijft stilstaan zolang $F_W = -F_{Zx}$. Bij een bepaalde hoek krijgt F_W zijn maximale waarde. Maak je de hoek groter dan gaat het blok naar beneden versnellen. De versnelling die het blok krijgt bereken je met: $F_{\text{res}} = F_{Zx} - F_{W \text{ max}} = m \cdot a$.



Figuur 41 Blok staat stil op een helling.
Stilstaan $\rightarrow F_{Zx} = F_W$.



Figuur 42 Blok versnelt naar beneden.
Versnellen $\rightarrow F_{Zx} - F_{W \text{ max}} = m \cdot a$.

$$\text{Versnelling met wrijving} \quad F_{Zx} - F_{W \text{ max}} = m \cdot a$$

VOORBEELD kist op een helling met wrijving

Een kist met een massa van 5,0 kg staat op een helling. Zie figuur 40. De maximale wrijvingskracht is 7,0 N.

Bereken de versnelling van de kist.

- in het vorige voorbeeld heb je bepaald dat $F_{Zx} = 22 \text{ N}$
- $F_{\text{res}} = F_{Zx} - F_W \rightarrow F_{\text{res}} = 22 - 7 = 15 \text{ N}$
- $F_{\text{res}} = m \cdot a \rightarrow 15 = 5 \cdot a \rightarrow a = 3,0 \text{ m/s}^2$

3.9 Samenvatting

Grootheden en eenheden

- F is de kracht in newton (N)
- m is de massa in kilogram (kg)
- a is de versnelling in meter per seconde kwadraat (m/s^2)
- g is de valversnelling in meter per seconde kwadraat (m/s^2)
- u is de vervorming in meter (m) de verandering van de lengte
- C is de veerconstante in newton per meter (N/m)

Weten

- Kracht veroorzaakt een vervorming $\rightarrow$ elastisch of plastisch.
- Kracht heeft een grootte en een richting $\rightarrow$ kracht is een vector.
- Kracht wordt weergegeven door een krachtpijl.
- De krachtschaal geeft het verband tussen de lengte van de krachtpijl en de grootte van de kracht. Gebruik een verhoudingstabel.
- De resulterende kracht F_{res} is de som van alle krachten.
- De resulterende kracht F_{res} veroorzaakt een versnelling of een vertraging.
- Krachten optellen moet met een parallelogram of met de kop-staart methode.
- Krachten zijn in evenwicht als $F_{\text{res}} = 0$
- Op aarde is de valversnelling: $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.
- Voorwerp in evenwicht $\rightarrow$ zwaartepunt ligt boven het steunvlak.
- Stabiel evenwicht $\rightarrow$ groot steunvlak + zwaartepunt ligt laag.
Labiel evenwicht $\rightarrow$ klein steunvlak + zwaartepunt ligt hoog.
- Het gewicht is de kracht die het voorwerp op het steunvlak uitoefent. Het gewicht wordt uitgedrukt in newton (N).
- Tijdens een sprong omhoog en een val omlaag ben je gewichtloos.
- De normaalkracht is de kracht die de vloer of het koord op een voorwerp uitoefent.
- De spankracht in een koord is aan beide uiteinden gelijk.
- De schuifwrijvingskracht is niet afhankelijk van de snelheid.

- De schuifwrijvingskracht is recht evenredig met de normaalkracht.
- De rolweerstandskracht is niet afhankelijk van de snelheid.
- De rolweerstandskracht is recht evenredig met de normaalkracht.
- De rolweerstandskracht wordt bepaald door de vervorming van het wiel en van de ondergrond.
- De luchtweerstandskracht is afhankelijk van:
 - de stroomlijn van het voorwerp
 - de dichtheid van lucht
 - het frontale oppervlak
 - de snelheid in het kwadraat

Formules

$$F_z = m \cdot g \quad \text{zwaartekracht}$$

$$F = C \cdot u \quad \text{veerkracht}$$

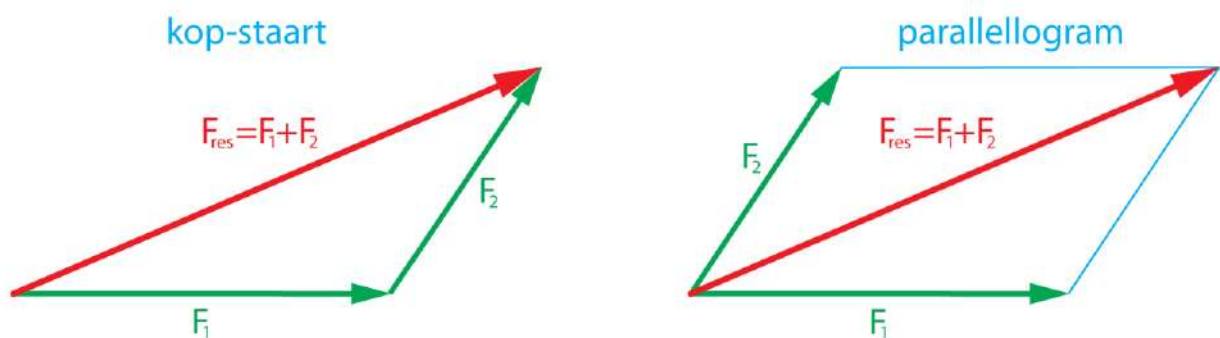
$$F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2 \quad \text{hefboomwet (momentenwet)}$$

$$F_{\text{res}} = 0 \Leftrightarrow a = 0 \quad 1^{\text{e}} \text{ wet van Newton}$$

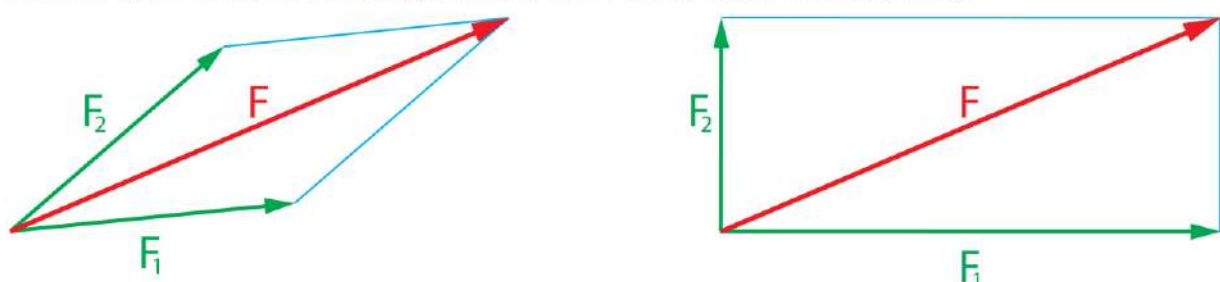
$$F_{\text{res}} = m \cdot a \quad 2^{\text{e}} \text{ wet van Newton}$$

$$F_{A \rightarrow B} = -F_{B \rightarrow A} \quad 3^{\text{e}} \text{ wet van Newton}$$

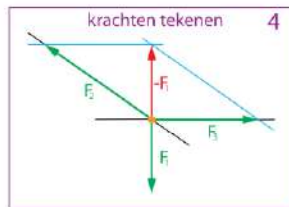
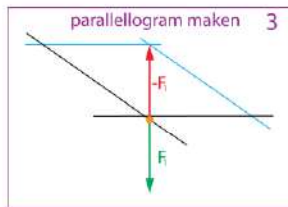
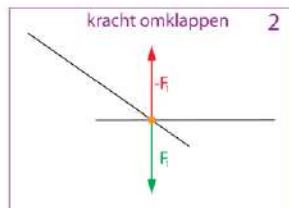
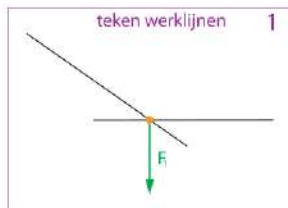
Figuren



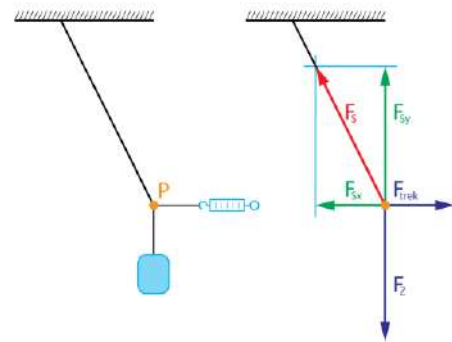
Krachten optellen met een parallellogram (links) of met de kop-staart methode (rechts).



Krachten splitsen algemeen (links) of in twee loodrechte componenten (rechts).



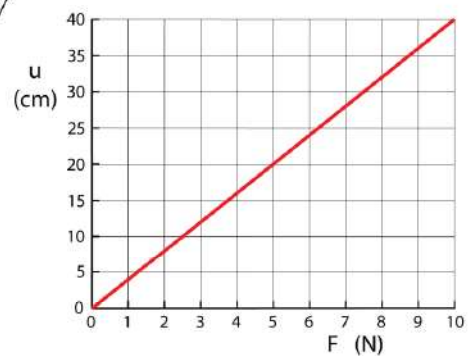
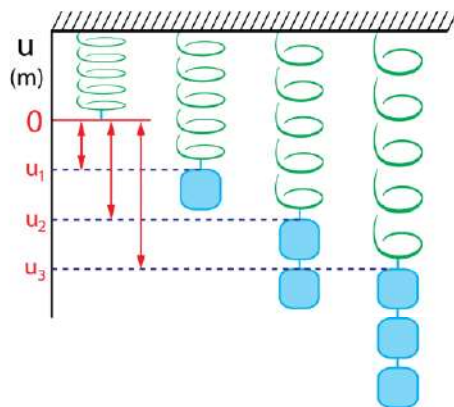
Krachten splitsen in twee schuine krachten als je de richtingen weet.



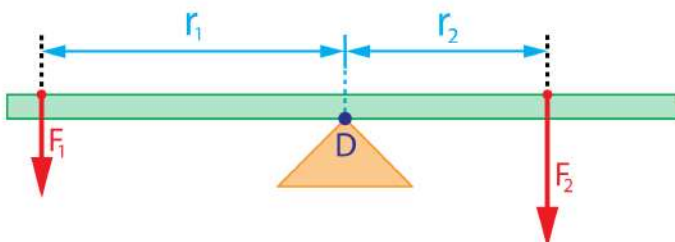
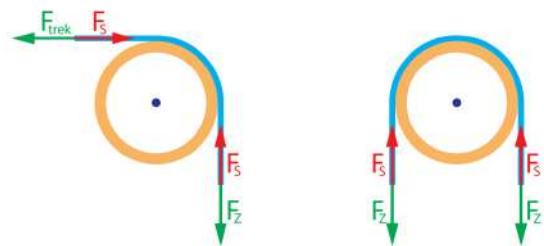
Horizontaal: $F_{\text{res } x} = 0 \rightarrow F_{sx} = F_{\text{trek}}$

Verticaal: $F_{\text{res } y} = 0 \rightarrow F_{sy} = F_z$

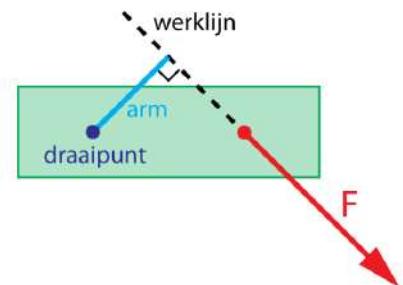
Vervorming van een veer. Recht evenredig verband tussen F en u .



De spankracht in een koord is aan beide uiteinden gelijk.



Op een hefboom werken twee krachten waardoor de hefboom kan gaan draaien.

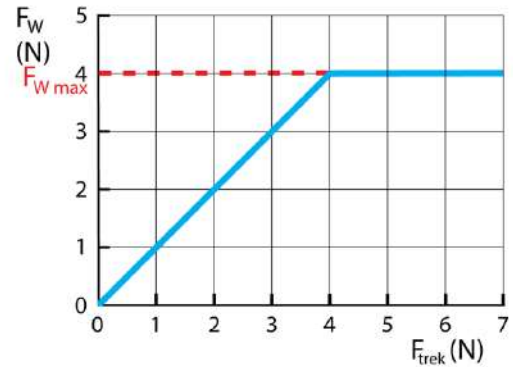


De arm van een kracht is de afstand tussen de werklijn van de kracht en= het draaipunt.



Schuifwrijving als twee ruwe oppervlakken over elkaar schuiven. De schuifwrijving is onafhankelijk van de snelheid.

Als het blok stilstaat is F_w gelijk aan F . Als F_w zijn maximale waarde heeft bereikt begint het blok te schuiven. Beweegt het blok met een constante snelheid dan is F gelijk aan $F_{w \max}$.

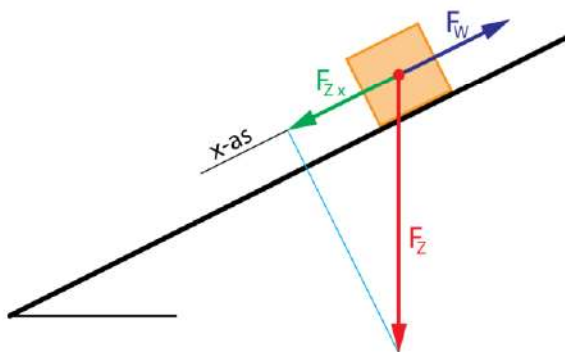
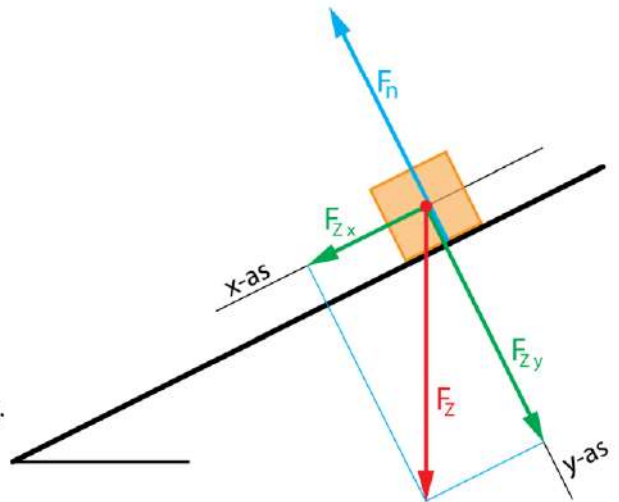


De luchtweerstand is afhankelijk van:

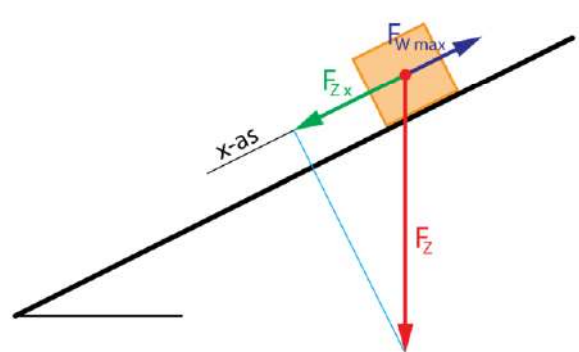
- de stroomlijn
- de dichtheid van lucht
- het frontale oppervlak
- de snelheid (in het kwadraat)



Splits de zwaartekracht in een component langs de helling en een component loodrecht op de helling.



F_{zx} en F_w zijn even groot $\rightarrow$ het blok staat stil of heeft een constante snelheid.



F_{zx} is groter dan $F_w \rightarrow$ het blok versnelt langs de helling naar beneden.