

4.2 Domeinspecifieke leerstofopbouw

4.2.1 Mechanica

Achtergrondinformatie

Zwaartekracht, gravitatiekracht en gewicht

Inleiding

In het Nederlandse natuurkundeonderwijs zijn we gezegend met een definitie van gewicht “die compatibel is met de algemene relativiteitstheorie” (Arntzen & Spandaw, 2010; Galili, 2001). Die definitie is operationeel eenvoudig: ‘gewicht is wat een weegschaal weegt’. Deze operationele definitie is theoretisch te formuleren als: ‘het gewicht van een voorwerp is de reactiekracht van de normaalkracht op het steunvlak’. Volgens deze definitie ben je gewichtloos als je geen normaalkracht ondervindt, zoals bij een vrije val. Zo heeft ‘gewicht’ geen directe relatie met de zwaartekracht. Want: de normaalkracht wordt ook door andere krachten op het voorwerp bepaald.

In de schoolnatuurkunde gebruiken we het woord ‘zwaartekracht’ lang voordat het begrip ‘gravitatiekracht’ geïntroduceerd wordt. In dit artikel wordt gereflecteerd op het begrip ‘zwaartekracht’, wat resulteert in de gedachte om, naast het verschil tussen gewicht en zwaartekracht, ook onderscheid te maken tussen zwaartekracht en gravitatiekracht. Dat leidt tot vraag: kun je, behalve ‘gewichtloos’, ook ‘zwaartekrachtloos’ zijn?

Zwaartekracht en gewicht

In veel landen hecht men, anders dan in Nederland, sterk aan het leggen van een directe relatie tussen gewicht en zwaartekracht/gravitatiekracht. Het bekende leerboek van Giancoli, bijvoorbeeld, definieert gewicht als “the force of gravity acting on a body” (Giancoli, 2005). Volgens die definitie kan een ruimtevaarder niet gewichtloos zijn, hoewel hij zich wel gewichtloos voelt. Giancoli lost dit op door verschil te maken tussen een (onmogelijk) ‘real weightlessness’ en een (gevoelsmatig) ‘apparent weightlessness’. Het gewichtloosheid-probleem zorgt ervoor dat het debat hoe ‘gewicht’ het beste gedefinieerd kan worden af en toe weer opvlamt (Morrison, 1999; Iona, Bishop, Sokolowski & Brown, 1999). ‘Gewichtloosheid’ wordt wel gezien als de bron van misconcepties zoals “astronauten drijven vrij rond in hun cabine omdat ze in hun baan om de Aarde geen zwaartekracht meer ondervinden”. Voor sommigen een argument om het begrip ‘gewicht’ helemaal uit de (school)natuurkunde te bannen. Maar is dat denkbeeld een misconceptie, of hangt dat af van hoe je zwaartekracht definieert?

Zwaartekracht en gravitatiekracht

Er is brede overeenstemming dat gewicht, net als zwaartekracht en gravitatiekracht, een kracht is: het heeft een grootte, een richting en een aangrijpingspunt. De zwaartekracht en gravitatiekracht grijpen aan in het zwaartepunt van het voorwerp. Het (in onze schoolnatuurkunde gebruikte begrip) gewicht is een kracht die aangrijpt op het oppervlak waarop het voorwerp rust. Daarmee is er een duidelijk onderscheid tussen gewicht enerzijds en zwaartekracht/gravitatiekracht anderzijds.

In de Nederlandse schoolboeken is het van de context afhankelijk of men de term ‘zwaartekracht’ of ‘gravitatiekracht’ gebruikt. De term ‘gravitatiekracht’ (F_{grav}) wordt in de bovenbouw havo/vwo gebruikt in situaties in de ruimte, waar de massa- en afstandsafhankelijkheid van de kracht ter sprake komt volgens de gravitatiewet van Newton:

$$F_{\text{grav}} = \frac{G \cdot M \cdot m}{r^2}$$

In deze formule is G de gravitatieconstante, zijn m en M de massa’s van de elkaar aantrekkende lichamen en is r de afstand tussen de zwaartepunten van die

lichamen. De gravitatiekracht is gericht naar het zwaartepunt van het aantrekkende lichaam.

Verder wordt meestal de term ‘zwaartekracht’ (F_z) gebruikt, omdat die aansluit bij de leefwereld. Het gaat dan om situaties op of vlak bij het aardoppervlak, waar de afstandsafhankelijkheid van de gravitatie er niet veel toe doet. De zwaartekracht is operationeel gedefinieerd, gekoppeld aan de valversnelling g :
 $F_z = m \cdot g$

De valversnelling is niet overal op Aarde hetzelfde. Dat komt enerzijds door een gravitatie-effect: de verdeling van massa over de Aarde. Zo is de valversnelling ten gevolge van de gravitatie op de polen groter dan op de evenaar doordat de Aarde geen perfect ronde bol is, maar afgeplat is bij de polen. De r uit de gravitatiewet is op de polen kleiner dan op de evenaar. Anderzijds is er een rotatie-effect, dat dubbel zo groot is als het gravitatie-effect. Een voorwerp heeft een middelpuntzoekende versnelling a_{mpz} nodig om met de Aarde mee te draaien. Daarvoor wordt een deel van de gravitatieversnelling gebruikt. Je kunt ook zeggen: de rotatie snoept een deel van de valversnelling op. Op de polen is het rotatie-effect nul, op de evenaar is dat maximaal.

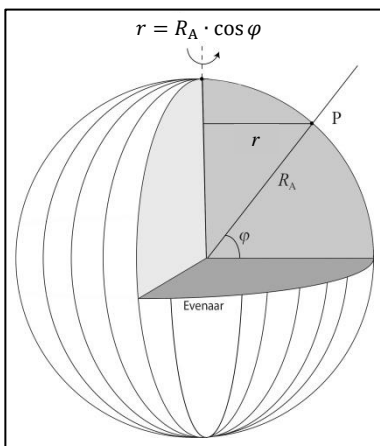
In de Nederlandse schoolboeken wordt geen onderscheid gemaakt tussen de zwaartekracht en de gravitatiekracht. Echter, door het rotatie-effect wijken de zwaartekracht en de gravitatiekracht van elkaar af. In de bovenbouw van het vwo komt het rotatie-effect aan de orde. Dat effect is hier aanleiding tot het maken van een onderscheid tussen de gravitatiekracht F_{grav} en de zwaartekracht F_z^* :

$$\vec{F}_z^* = \vec{F}_{grav} - \vec{F}_{mpz}$$

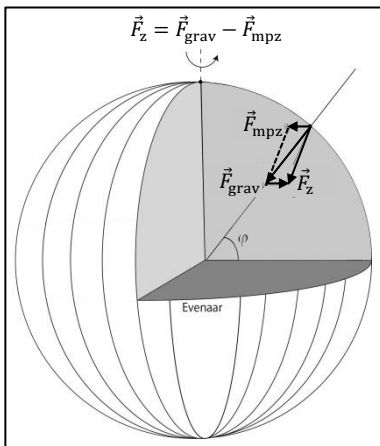
We noteren in het vervolg F_z^* als deze definitie van de zwaartekracht gebruikt wordt¹. Zo noteren we ook de valversnelling op een plaats P op Aarde met g^* :

$$\vec{g}^* = \frac{G \cdot M_A}{R_A^2} \cdot [\vec{R}_A] - \omega^2 \cdot \vec{r}$$

In deze formule is M_A de massa van de Aarde, R_A de straal van de Aarde, $[\vec{R}_A]$ de eenheidsvector in de richting van het zwaartepunt van de Aarde, en \vec{r} de loodrechte afstand van plaats P tot de aardas. Deze \vec{r} is de straal van de dagelijkse cirkelbeweging en hangt af van de breedtegraad φ : $r = R_A \cdot \cos \varphi$ (zie figuur 1).



Figuur 1



Figuur 2

De grootte van de middelpuntzoekende kracht F_{mpz} neemt af van maximaal (plaats P op de evenaar) naar nul (plaats P op de polen). De middelpuntzoekende versnelling staat loodrecht op de aardas. Dat betekent dat de richting van de zwaartekracht F_z^* op een breedtegraad een beetje afwijkt van de richting van de gravitatiekracht F_{grav} (zie figuur 2). Het gravitatie-effect en het rotatie-effect op de valversnelling versterken elkaar. Samen hebben ze tot gevolg dat de valversnelling op Aarde varieert van 9,780 m/s² op de evenaar tot 9,832 m/s² op de polen.

Zwaartekrachtloos?

Het onderscheid tussen zwaartekracht* en gravitatiekracht kunnen we ook toepassen op situaties in de ruimte om de Aarde heen, zoals ruimtevaartuigen die rond de Aarde draaien. Dat zijn situaties waarin een astronaut gewichtloos is omdat hij vrij valt. Op elk punt van zijn baan rond de Aarde ondervindt een ruimtevaartuig een gravitatiekracht van de Aarde. Een belangrijk verschil met de situatie van een voorwerp op Aarde is dat de middelpuntzoekende kracht nu niet loodrecht op de aardas staat, maar naar het middelpunt van de Aarde is gericht. Hoe zit het dan met de zwaartekracht*? Als het ruimtevaartuig in een perfecte cirkel rond de Aarde draait, zal gelden: $\vec{F}_{grav} = \vec{F}_{mpz}$.

Dan is dus de zwaartekracht* nul, onafhankelijk van de straal van de satellietbaan. Een bekende cirkelbaan is de geostationaire baan, waarin de satelliet een cirkelbaan boven de evenaar beschrijft met de omlooptijd van de

¹ Hier moet worden opgemerkt dat in het Engels geen equivalente term voor zwaartekracht voorhanden is die zich van de gravitatiekracht onderscheidt: men spreekt alleen over ‘the force of gravity’ of ‘the gravitational force’.

Aarde. Zo blijft de satelliet in één punt boven de evenaar staan. Ook een geostationaire satelliet is dus ‘zwaartekracht*loos’.

Als de baan van een satelliet ellipsvormig is, wat veel voorkomt, staat hij in het perihelium wat dichterbij de Aarde dan in het aphelium. In het perihelium is de gravitatiekracht op de satelliet dus wat groter dan in het aphelium. De vereiste middelpuntzoekende kracht wijkt voortdurend iets af van de gravitatiekracht. Er is daardoor een kleine zwaartekracht* die in het ene deel van de ellips voor een versnelling zorgt en in het andere deel voor een vertraging. In een ellipsbaan is een satelliet dus niet helemaal zwaartekracht*loos, maar wel gewichtloos omdat de satelliet steeds in een vrije val is.

Dus ja, je kunt behalve gewichtloos ook zwaartekracht*loos zijn. Gewichtloos ben je in alle situaties waarin je in een vrije val bent. Zwaartekracht*loos ben je als je een cirkelbaan om de Aarde maakt.

Leerlingdenkbeeld over zwaartekracht

Het bovenstaande werpt een ander licht op het hierboven geciteerde leerlingdenkbeeld: “astronauten drijven vrij rond in hun cabine omdat ze in hun baan om de Aarde geen zwaartekracht meer ondervinden”. Dit denkbeeld is fysisch incorrect als de zwaartekracht geïdentificeerd wordt met de gravitatiekracht. Maar als we onderscheid maken tussen gravitatiekracht en zwaartekracht* is dit denkbeeld in het geval van een cirkelbaan geheel correct en in het geval van een ellipsbaan bijna correct. Dus of dit denkbeeld een ‘misconceptie’ is, hangt af van de definities die men voor zwaartekracht en gewicht kiest.

Het gebruikelijke tegenargument bij het denkbeeld blijft niettemin geldig, maar nu als aanvulling: “Er werkt wel degelijk een kracht op een gewichtloze astronaut: de gravitatiekracht.” Dit kan verder worden aangevuld met: “De astronaut is zwaartekrachtloos omdat de gravitatiekracht als middelpuntzoekende kracht werkt: hij ‘valt om de Aarde heen’.” En bovendien: “De astronaut is gewichtloos omdat hij een vrije val maakt.”

Lespraktijk

Deze didactische reflectie is bedoeld om inzicht te geven in de begrippen zwaartekracht* en gravitatiekracht: zij vallen niet samen. Moet dit inzicht ook gevolgen hebben voor de wijze waarop je als leraar in de klas deze begrippen gebruikt?

Eén consequentie is al besproken: het denkbeeld “astronauten drijven vrij rond in hun cabine omdat ze in hun baan om de Aarde geen zwaartekracht meer ondervinden” hoeft niet als incorrect gezien te worden. Als een leerling dit denkbeeld naar voren brengt, past de vraag: wat bedoel je precies met ‘zwaartekracht’? Daarbij kan aan de orde komen of er volgens de leerling een aantrekkingskracht van de Aarde is, of er een versnelling is en wat ‘vrij rondrijven’ en gewichtloosheid precies zijn.

Is het noodzakelijk leerlingen het onderscheid tussen gravitatiekracht en zwaartekracht* te leren? Uiteraard is dat alleen mogelijk als de middelpuntzoekende kracht aan de orde komt, die nodig is om met de Aarde mee te draaien. Maar als je dan vermijdt om de invloed daarvan op \vec{g} en \vec{F}_z te bespreken door het alleen over gravitatiekracht te hebben, is het niet nodig om het bedoelde onderscheid te maken.

Toch is er een groep leerlingen waarvoor het onderscheid tussen gravitatiekracht en zwaartekracht* interessant kan zijn: de getalenteerde leerlingen die plezier hebben in de theoretische kant van de natuurkunde, in precieze definities en de consequenties daarvan. Zij hebben minder oefening in standaardopgaven nodig dan hun klasgenoten en kunnen uitgedaagd worden met een verdiepingso opdracht. Een voorbeeld van zo’n opdracht staat in figuur 3.

Gewichtloos en/of zwaartekrachtloos?

- 1 De begrippen ‘zwaartekracht’ (F_z) en ‘gravitatiekracht’ (F_{grav}) worden vaak als synoniemen gebruikt. Toch kun je een verschil maken tussen beide begrippen. Want: de zwaartekracht die we hier in Nederland meten, valt door de draaiing van de Aarde en de middelpuntzoekende kracht (F_{mpz}) die daarbij nodig is, in grootte en richting

niet helemaal precies samen met de gravitatiekracht. Daardoor kun je zwaartekracht definiëren als: $\vec{F}_z = \vec{F}_{\text{grav}} - \vec{F}_{\text{mpz}}$.

Voor de zwaartekracht geldt ook: $F_z = m \cdot g$, waarin g de valversnelling is. Als een voorwerp op Aarde in rust is, is zijn gewicht in grootte gelijk aan de zwaartekracht. Maar als het voorwerp versneld wordt, is dat niet meer het geval.

- a Werk de definitie van zwaartekracht uit tot een formule voor de valversnelling.
- b Bereken de grootte van de afwijking tussen de gravitatiekracht en de zwaartekracht op jou, hier in Nederland.
- c Laat met behulp van een vectordiagram zien of de richting van de zwaartekracht in Nederland naar het noorden of naar het zuiden afwijkt van die van de gravitatiekracht.
- d Een astronaut draait in een ruimtevaartuig om de Aarde in een perfecte cirkelbaan. Laat zien dat die astronaut 'zwaartekrachtloos' is.
- e Wat is er aan de hand met de zwaartekracht op de astronaut als zijn ruimtevaartuig een elliptische baan beschrijft? Licht je antwoord toe met een tekening.
- f Wat wordt er verstaan onder 'gewichtloos'? In welke situaties op en om de Aarde is sprake van 'gewichtloosheid'?
- g Bedenk situaties waarin een astronaut wel 'gewichtloos', maar niet 'zwaartekrachtloos' is.

2 Verzamel informatie over 'microzwaartekracht' of 'micro-gravity'. Wat wordt daarmee bedoeld? Heeft dat begrip te maken met 'zwaartekracht' volgens de hier gebruikte definitie?

Het dossier [De Microzwaartekracht in België](#) is een goede start voor je zoektocht naar antwoorden op deze vragen.

Figuur 3 – Een verdiepingsopdracht voor theoretisch geïnteresseerde leerlingen in 5/6-vwo.

Literatuur

- Arntzen, L. & Spandaw, J. (2010). [De schijnbaar eenvoudige begrippen gewicht en gewichtloosheid](#). *NVOX* 35(8), 382-383.
- Galili, I. (2001). [Weight versus gravitational force: Historical and educational perspectives](#). *International Journal of Science Education* 23(10), 1073-1093.
- Giancoli, D.C. (2005). *Physics* (6th ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice-Hall.
- Morrison, R.C. (1999). [Weight and gravity – The need for consistent definitions](#). *The Physics Teacher* 37(1), 51-52.
- Iona, M., Bishop, R., Sokolowski, A. & Brown, R. (1999). [Symposium: Comments on a weighty matter](#). *The Physics Teacher* 37(4), 238-241.