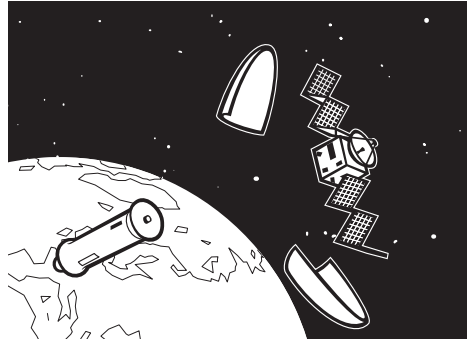


Origami met zonnepanelen

Ruimtevaartuigen hebben zonnepanelen nodig voor hun energievoorziening. Die zonnepanelen zijn groot en plat, maar een raket is rond en heeft maar weinig laadruimte. De ontwerpers en technici moeten daarom niet alleen rekening houden met de omstandigheden in de ruimte en de opdracht van het ruimtevaartuig, maar ook met de reis ernaartoe. In deze les maken leerlingen kennis met de uitdagingen van een ontwerper voor ruimtemissies en lossen ze ook zo'n praktisch probleem op.



Tijdsduur
55 minuten

Kerdoelen
24, 26, 29, 31,
32, 33.

Vakken
Wiskunde,
natuurkunde,
techniek

Materiaalkosten
€€€

Lesdoelen

De leerlingen:

- kunnen uitleggen met welke factoren een ontwerper van ruimtemissies rekening moet houden en waarom;
- ontwerpen en maken een satelliet met zonnepanelen en vouwen deze in de laadruimte van een raket, waarbij ze rekening houden met de ontwerpeisen;
- leren ruimtelijke oplossingen en bewegende constructies te ontwerpen, toe te passen en te verbeteren.

Benodigheden

per persoon of tweetal

- Cd(-rom) die kapot mag*
- Wc-rol
- Kurk (of iets anders in die vorm, bijvoorbeeld een lippenbalsem)
- Scherpe schaar
- Plakband of schilderstape

* De cd is net als het zonnepaneel in de echte situatie lastig materiaal. Een cd-rom valt in meerdere lagen uiteen als je hem knipt. De uitdaging is om het spiegelende deel toch te behouden. Een gedrukte muziek-cd heeft dit probleem niet. Als alternatief voor een cd kunnen de leerlingen ook dik karton gebruiken.

Lesopbouw

De les begint met de eisen waarmee een ontwerper van een ruimtemissie rekening moet houden. Daarna doen de leerlingen een praktische opdracht: ze bedenken een ontwerp voor een plat zonnepaneel in een ronde raketneus en voeren deze uit. De les eindigt met het nabespreken van de verschillende oplossingen en van de problemen die de leerlingen zijn tegengekomen. Ook bekijken zij hoe ruimtevaartorganisaties werken aan oplossingen voor problemen.

Vorbereiding

Lees de les en achtergrondinformatie en bepaal op welk niveau de leerlingen de opdracht gaan uitwerken. Probeer de opdracht ook zelf uit en zet eventueel beeldmateriaal en video's klaar. Verzamel de materialen of vraag de leerlingen dit zelf te doen.

Lesbeschrijving *Origami met zonnepanelen*

Inleiding (10 minuten)

Introduceer de les bij de leerlingen. Elke ruimtemissie heeft een bepaald doel, zoals metingen doen aan de aardatmosfeer, de straling van de zon bestuderen of het oppervlak van Mars. Aan ieder ruimtevaartuig worden daarom andere ontwerpeisen gesteld. Daarom zien ze er allemaal anders uit.

Ruimtemissie

Er zijn veel verschillende soorten ruimtevaartuigen: bijvoorbeeld satellieten die om de aarde draaien, of ruimteverkenner (sondes) op weg naar andere hemellichamen in ons zonnestelsel. Elke satelliet of sonde heeft een andere grootte en vorm. Deze zijn afhankelijk van een aantal factoren:

- het meetinstrument in de satelliet of sonde; dit heeft een grootte, vorm en energiebehoefte, afhankelijk van de missie van het ruimtevaartuig;
- de communicatieapparatuur voor contact met de aarde;
- de zonnepanelen; vorm en grootte hangen af van de energiebehoefte, de baan om de aarde en/of de route naar het doel. Hoe groter het zonnepaneel, hoe meer energie het kan leveren;
- de constructie die alles stevig bijeenhoudt en ervoor zorgt dat alles werkt: de bus en servicemodule;
- de afmetingen van de laadruimte van de raket waarmee de missie wordt gelanceerd.

Verschillende vormen aardobservatiesatellieten

In figuur 1 staan voorbeelden van drie aardobservatiesatellieten met totaal verschillende vormen en afmetingen. De missie van *Sentinel-5P* is het doen van metingen aan verschillende stoffen in de aardatmosfeer. Het meetinstrument op deze satelliet, Tropomi, voert deze missie uit door het meten van gereflecteerd licht van de aarde met een geavanceerd prisma. *Aeolus* meet windrichtingen en heeft daarvoor een speciaal soort laser aan boord (LIDAR). Ook heeft hij een andere baan om de aarde dan *TROPOMI*. De Sentinel-6 heeft als missie het meten van de zeespiegel en gebruikt daarvoor radartechnologie. Deze ziet er daarom heel anders uit. Alle afbeeldingen zijn ook te vinden bij de les op www.esero.nl.



Figuur 1 Van links naar rechts: Sentinel-5P TROPOMI, AEOLUS en Sentinel-6. Bron: ESA



Raketreis

Satellieten worden naar de ruimte gebracht door raketten. Iedere raket heeft zijn eigen specifieke kenmerken. De laadruimte is altijd in de neus, maar de afmetingen van die ruimte verschillen per raket. Het soort raket is ook van invloed op het maximale gewicht dat de lading mag hebben. Bij het ontwerpen van de satelliet is het belangrijk daar rekening mee te houden.

Omdat de laadruimte beperkt is, zijn de zonnepanelen ingeklapt bij het lanceren. Pas in de ruimte vouwen ze uit. Bij de lancering staan ze bloot aan grote krachten en trillingen, dus ze moeten tegen een stootje kunnen. Al die zaken moeten voor die lancering goed getest worden; is de satelliet eenmaal gelanceerd, dan kunnen de technici er niet meer bij voor onderhoud of reparaties. Daarom is het ook belangrijk om van tevoren te testen of het zonnepaneel wel tegen grote temperatuurverschillen kan en of het ook goed functioneert in het vacuüm van de ruimte.

Figuur 2 Vegaraket, met bovenin de laadruimte van de raket. Bron: ESA

Tip

In de video [Hoe bescherm je een satelliet in de ruimte?](#) (duur 7.39 minuten), laat testengineer Charlotte zien hoe zonnepanelen getest worden voordat ze naar de ruimte gaan. Ook legt ze het belang uit van testen in vacuüm.

Opdracht (30 minuten)

De leerlingen gaan nu aan de slag met de ontwerpopdracht: origami met zonnepanelen. De opdracht is een ontwerp te maken waarbij een cd (het zonnepaneel) en een kurk (de satelliet) samen in een wc-rol (de neus van de raket) passen. Er zijn een aantal ontwerpisen opgesteld, die tegelijk ook de evaluatiecriteria van de oplossing zijn.

De leerlingen kunnen deze opdracht op een aantal manieren uitvoeren:

- *In de klas:* de leerlingen voeren de ontwerpopdracht in de les uit. Ze kunnen dan ook bij elkaar kijken en geïnspireerd raken door oplossingen van anderen.
- *Thuis:* de leerlingen ontwerpen en maken de ontwerpopdracht thuis. Ze nemen hun ontwerp daarna mee naar de les en presenteren dat. Of ze kunnen een paar foto's

- of korte video van het in- en uitvouwen inleveren (bijvoorbeeld van maximaal 10 seconden), waarin ze laten zien dat het ontwerp aan de eisen voldoet.
- *Digitaal thuis:* deze opdracht leent zich goed om online uit te voeren. Zorg ervoor dat leerlingen de materialen dan van tevoren hebben verzameld, anders kost dat veel lestijd.
- *In tweetallen of individueel:*
 - In de klas is er de mogelijkheid om de opdracht in tweetallen te doen. Dat stimuleert het van tevoren nadenken over het ontwerp, omdat de leerlingen dan samen een plan moeten maken en hun ideeën aan elkaar moeten uitleggen.
 - Een individuele opdracht resulteert in meer uitproberen en testen. Ze leren ook zelfstandig direct oplossingen voor technische problemen te verzinnen en uit te voeren. Het is dan handig om tussendoor een terugkoppelmoment in te plannen om vastgelopen leerlingen te stimuleren verder te gaan. Leerlingen kunnen op zo'n moment tips en oplossingen uitwisselen.

Tip

Met een whiteboardmarker kun je goed op gladde oppervlakten tekenen. De leerlingen kunnen beginnen met het tekenen van een knipplan op de cd voordat ze gaan knippen.

Ontwerpeisen

De ontwerpeisen voor het ontwerp, zijn tegelijk ook de evaluatiecriteria. Deze kunnen uitgebreid worden om de opdracht uitdagender te maken. Op het werkblad staan alleen de basiseisen. Dat zijn:

- *Zonnepaneel:* gebruik het hele spiegelende oppervlak van de cd. De spiegelende zijde moet daarbij zo veel mogelijk onbedekt blijven. Plakband houdt het zonlicht tegen.
- *Constructie:* het zonnepaneel moet vastzitten aan de satelliet.
- *Inpakken:* de satelliet en het hele zonnepaneel moeten in de neus van de raket passen.
- *Uitklappen na lancering:* het spiegelende deel van het zonnepaneel moet na het uitklappen in zijn geheel in dezelfde richting wijzen (de zon). De spiegelende zijde is de werkende zijde van het paneel.

Er zijn een aantal uitbreidingsmogelijkheden:

- *Materialen*

Het beperken van materialen stimuleert het creatieve proces om betere oplossingen te verzinnen. Ook maakt het de vergelijking van verschillende oplossingen op basis van precies dezelfde materialen interessanter. Maar soms is het niet mogelijk om iedereen dezelfde materialen aan te bieden. De optie om meer en andere materialen te gebruiken, geeft de leerlingen meer invloed en biedt ook kansen op meer diversiteit in de soorten oplossingen. De satelliet kan bijvoorbeeld een stuk klei zijn, leerlingen

kunnen ijzerdraad gebruiken in de constructie, papier als steunmateriaal voor het zonnepaneel enzovoort.

Gebruiken leerlingen in plaats van een cd een alternatief materiaal (bijvoorbeeld karton), zorg er dan voor dat essentiële eigenschappen hetzelfde zijn. Zonnepanelen zijn stijf en kwetsbaar en dat is een belangrijk aspect van de opdracht. Omdat een cd niet kan buigen, mag het alternatieve materiaal dat dus ook niet.

Een mogelijke toevoeging is om een maximumgewicht te stellen voor het geheel.

Maak duidelijke afspraken over de ontwerpeisen. De satelliet moet een aaneengesloten constructie blijven.

- *Toegepaste wiskunde*

In de opdracht oefenen leerlingen met hun ruimtelijk inzicht en meetkunde. Er kan nog meer wiskunde worden toegevoegd door leerlingen te vragen wiskundig te onderbouwen dat de cd of het materiaal dat ze hebben gebruikt nog dezelfde oppervlakte heeft als het basismateriaal. Hetzelfde kan met het volume van de kurk.

- *Uitklapmechanisme*

Het toevoegen van een uitklapmechanisme maakt de opdracht technisch en conceptueel moeilijker. Bij het opvouwen van materiaal met je handen benut je alle mogelijke vouwrichtingen. In de ruimtevaart gebeurt het uitklappen vaak maar in één richting. Meer richtingen maakt het uitklapmechanisme ingewikkelder: hoe groter en zwaarder dat is, hoe minder gewicht en ruimte er over blijft voor de satelliet zelf. Daarom hebben zonnepanelen van satellieten vaak een z-profiel dat onder spanning is ingeklapt. Als het op de bestemming is, wordt de spanning losgelaten en klapt het zonnepaneel uit. Er zijn ook andere oplossingen mogelijk. Zorg bij deze uitbreiding voor meer materialen, zoals satéstokjes, papier en elastiekjes.

Evaluatie (10 minuten)

Besprek de verschillende oplossingen die de leerlingen hebben gemaakt. Laat een paar leerlingen hun ontwerpen presenteren. Voldoen die aan de ontwerpeisen? Besprek overeenkomsten en verschillen tussen de oplossingen. Wat zijn veelgebruikte opvouwprofielen? Waar zitten de panelen meestal vast? Wat was het grootste ontwerpprobleem dat ze zijn tegengekomen? Hoe ging het ontwerpproces?

Ontwerpproblemen en -oplossingen

- Scharnieren hebben ruimte nodig: als je de stukjes te strak tegen elkaar tapet, kunnen ze niet meer ten opzichte van elkaar bewegen. Blijkbaar heeft een scharnier ruimte nodig om te bewegen.
- Uit elkaar vallende cd-roms: bij het aan elkaar tapen van de verschillende lagen van de cd-rom moet je er rekening mee houden dat je niet over het spiegelende deel mag tapen, dus doe je alleen de randjes. En niet te kleine stukjes cd.
- Zonnepaneel en satelliet samen: de uitdaging lijkt vooral het opvouwen van het paneel. Maar uiteindelijk moet het allemaal aan elkaar vastzitten en samen in de

wc-rol passen. Het breedste deel van de wc-rol, het midden, kun je maar één keer gebruiken.

- Wat zijn de voor en- nadelen van verschillende oplossingen? Overleef je jouw oplossing de ruimte?

Proces

- De volgorde van het ontwerpproces: hoe ben je begonnen? Eerst ontwerpen of direct proberen? Wat zijn voordelen en nadelen van beide aanpakken?
- Ontwerp: heb je met een whiteboardstift een knipplan gemaakt? Heb je je eraan gehouden? Klopte je idee bij de uitvoering?
- Bij een tweetal: hoe ging de samenwerking? Deden jullie alles evenveel, of was er een verdeling van het denkwerk en het uitvoerende werk?

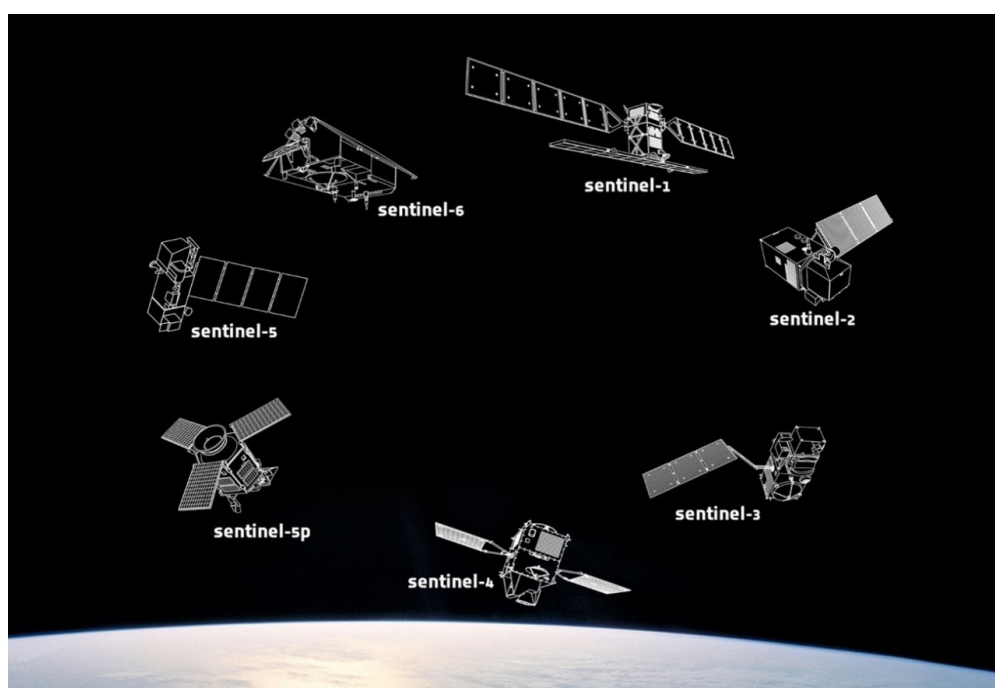
Afsluiting (5 minuten)

Rond de opdracht af en bespreek met de leerlingen dat ze als een engineer hebben nagedacht over de problemen die een satellietbouwer en -ontwerper tegenkomen. Ze hebben reële problemen opgelost en in een dummy laten zien dat hun oplossing werkt. Ook de ruimtevaartindustrie werkt met dummy's en schaalmodellen voor tests. Bij de praktische opdracht hebben ze wiskundevaardigheden als ruimtelijk inzicht en meetkunde toegepast, technische oplossingen bedacht en uitgeprobeerd en hebben ze eindeloos getest. Zo werkt dat ook in de ruimtevaartindustrie: engineers zijn voortdurend op zoek naar slimme oplossingen. Ze laten zich daarbij vaak inspireren door oplossingen uit andere ambachten en door de natuur. NASA heeft bijvoorbeeld met dit doel een origami-afdeling (duur 3.20 minuten): <https://bit.ly/2YgAdrN>.

Achtergrondinformatie voor de docent

Soorten satellieten

Iedere ruimtemissie is anders en elke missie heeft zijn eigen eisen. In de les wordt het voorbeeld van de aardobservatiesatellieten gebruikt. Het Copernicusprogramma van ESA heeft met de Sentinel-satellieten aardobservatiesatellieten die meten hoe het gesteld is met onze aarde. Ze houden de luchtvervuiling, de zeespiegel en andere indicatoren in de gaten. Elke Sentinel-satelliet heeft een eigen missie, en is speciaal daarvoor ontworpen. In figuur 3 staan de satellieten afgebeeld. Kijk voor meer informatie over het Copernicusprogramma op: http://bit.ly/copernicus_satellieten.



Figuur 3 Copernicus-aardobservatieprogramma van ESA met alle verschillende satellieten. Bron: ESA

Raketten, lading en lancering

Er is veel energie nodig om los te komen van de zwaartekracht van de aarde. Raketten nemen daarom veel brandstof mee. Hoe groter en zwaarder hun lading is, hoe meer brandstof ze mee moeten nemen en hoe groter ze zelf weer moeten worden. Daarom doen ontwerpers van satellieten hun best de lading zo klein en licht mogelijk te houden.

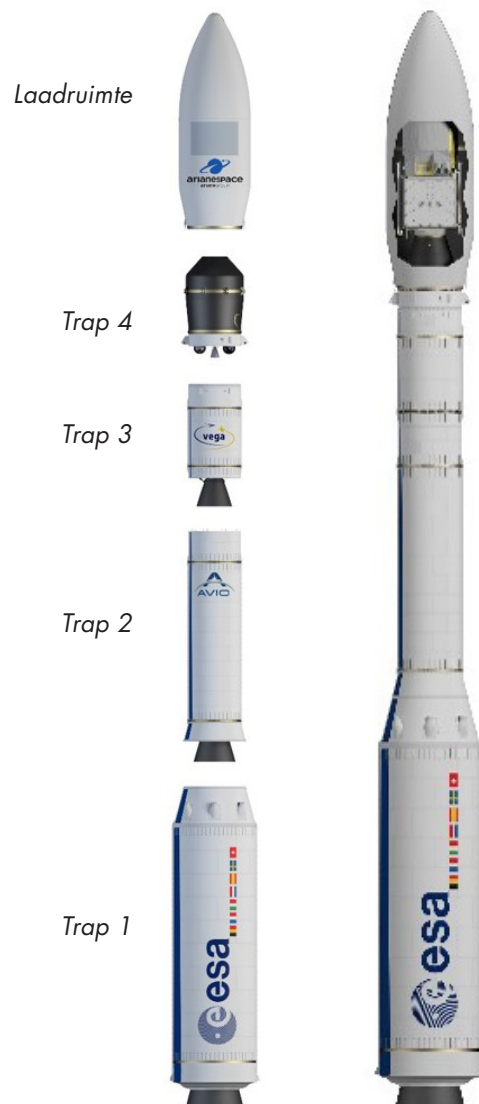
De raket VEGA

De kleinste raket van de European Space Agency (ESA) is de VEGA. Deze is 30 meter hoog, heeft een diameter van 3 meter en weegt inclusief lading en brandstof 137.000 kilo.

De VEGA kan in totaal 1500 kilo naar de ruimte vervoeren naar een baan van 700 kilometer boven de aarde. Deze raket brengt aardobservatiesatellieten in een baan om de aarde.

De lading (of payload) moet passen in de de laadruimte in de neus. Er kunnen ook meer satellieten meegenomen worden, zolang het maximale gewicht maar niet overschreden wordt. Het maximaal volume van de lading is 20 m³, de buitenafmeting van de neus is 7,13 meter hoog en de diameter 2,3 meter.

De VEGA heeft vier trappen, of raketmotoren, die in opeenvolgende lanceringsfasen gebruikt worden. De onderste motor is het grootst en gaat als eerste aan. Als de brandstof van deze trap op is, wordt hij losgelaten en gaat de volgende trap aan enzovoort. De vierde trap zit bij de VEGA meestal vast aan de lading. Zo kan hij de lading naar precies de goede baan brengen of zorgen dat kleine satellieten op verschillende momenten losgelaten worden.



Figuur 5 VEGA-viertrapsraket, met in de neus de laadruimte. Bron: ESA

Inpakken en uitklappen

De satellieten worden voor lancering ingeklapt om in de neus van de raket te passen. Eenmaal in de ruimte moeten ze automatisch uitklappen. In figuur 6 en 7 is het inpakken en uitklappen van de aardobservatiesatelliet AEOLUS te zien, die op 22 augustus 2018 met een VEGA-raket naar een baan om de aarde is gelanceerd. Het beeldmateriaal staat ook op de website.



Figuur 6 Het inpakken van de aardobservatiesatelliet AEOLUS in de neus van de VEGA. Bron: ESA



Figuur 7 Animatie van de lancering, het loskomen uit de laadruimte en het uitklappen van de AEOLUS. Bron: ESA

- Timelapsevideo van het inpakken van de AEOLUS in de neus van de VEGA-raket tot en met de lancering (duur 3.28 minuten): <https://bit.ly/3cggG35>
- Animaties van het uitklappen van AEOLUS in de ruimte:
 - Aeolus in Vega, trap 4, uitklappen neus (duur 0.20 minuten): <http://bit.ly/2KRG18a>
 - Trap 4 separatie (0.20): <http://bit.ly/39m7kRk>
 - Uitklappen zonnepanelen (0.20): <http://bit.ly/3qVgvhF>

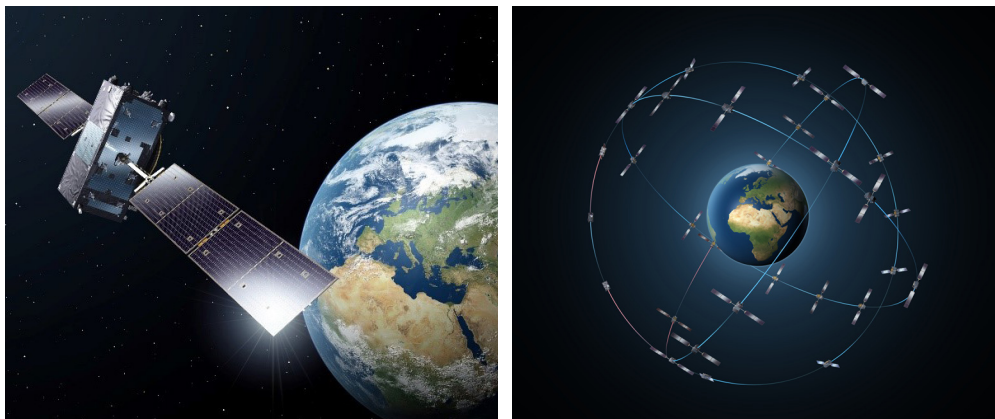
Verder weg

Er zijn ook ruimtemissies die de omgeving van de aarde verlaten. Zij gaan bijvoorbeeld de zon observeren (Solar Orbiter), naar Mars (ExoMars) of naar Mercurius (BepiColombo). Een sonde in een baan om de zon vergt vanwege de hoeveelheid straling en hitte een ander soort zonnepaneel dan een sonde die naar Mars of Mercurius afreist. Ook deze verkenner moeten op de juiste plaats uitklappen. Voor zo'n verre reis is dat vaak nog wat ingewikkelder en zijn er meer stappen nodig.

- Video over ExoMars (duur 2.34 minuten): <https://bit.ly/3sXZvt1>
- Video over Solar Orbiter (2.40): <https://bit.ly/39jU7Zp>
- Video over BepiColombo (3.27): <https://bit.ly/3pkSmkj>

Extra informatie bij de ruimte-expertvideo

In de ruimte-expertvideo [Hoe bescherm je een satelliet](#) in de ruimte? wordt een groot zonnepaneel uitgeklapt. Dat is een van de zonnepanelen van een Galileo-navigatiesatelliet. De Galileo-constellatie bestaat uit 24 satellieten die samen zorgen voor een Europees GPS-netwerk.

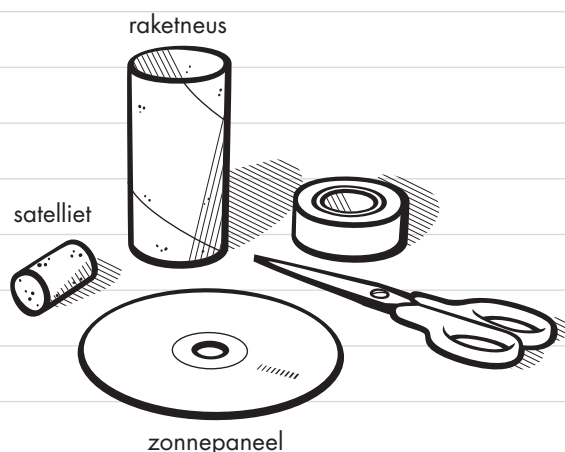


Figuur 8 Galileo-navigatiesatelliet en constellatie van 24 satellieten. Bron: ESA-P. Carril

Satellieten hebben zonnepanelen nodig voor hun energievoorziening. Die zonnepanelen zijn groot en plat, maar een raket is rond en heeft maar weinig laadruimte. De panelen worden daarom zo ontworpen dat ze goed kunnen worden opgevouwen

Wat heb je nodig?

- Zonnepaneel: cd(-rom) die kapot mag
- Satelliet: kurk, of iets anders van die grootte en vorm, zoals een lippenbalsem
- Raketneus: wc-rol
- Scherpe schaar
- Plakband of schilderstape



Wat ga je doen?

Je gaat een satelliet met zonnepanelen ontwerpen en maken. Daarbij hou je rekening met de volgende ontwerpeisen:

- *Zonnepaneel*
Je moet het hele spiegelende oppervlak van de cd gebruiken. De spiegelende kant moet je onbedekt laten, want plakband houdt het zonlicht tegen.
- *Constructie*
Het zonnepaneel moet vastzitten aan de satelliet.
- *Inpakken*
De satelliet en het hele zonnepaneel moeten in de neus (de laadruimte) van de raket passen.
- *Uitklappen na lancering*
Het spiegelende deel van het zonnepaneel moet na het uitklappen in zijn geheel in dezelfde richting wijzen (naar de zon). De spiegelende zijde is de werkende zijde van het paneel.

Rond deze opdracht af in overleg met je docent.