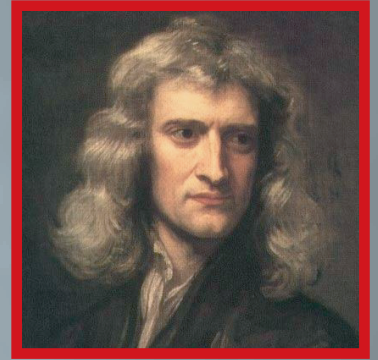


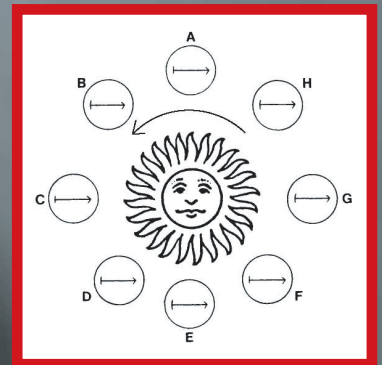


Freudenthal Instituut voor Didactiek van Wiskunde en Natuurwetenschappen
Universiteit Utrecht

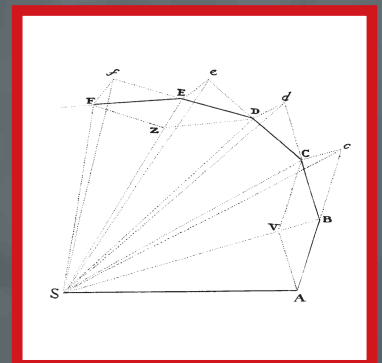


Mechanica

Een inleidende cursus



4 vwo





Freudenthal Instituut voor Didactiek van Wiskunde en Natuurwetenschappen
Universiteit Utrecht

Mechanica

Een inleidende cursus

4 vwo

Mechanica, een inleidende cursus voor 4 vwo

Geschreven door: Kees Klaassen

Met medewerking van: Peter Dekkers
Vincent van Dijk
Harrie Eijkelhof
Katrina Emmett
Rupert Genseberger
Kees Hooyman
Koos Kortland
Inge Lichtenegger
Piet Lijnse
Marjolein Vollebregt
Axel Westra
Jacqueline Wooning

Freudenthal Instituut voor Didactiek van Wiskunde en Natuurwetenschappen
Universiteit Utrecht
Postbus 80.000
3508 TA Utrecht

© 2008 Freudenthal Instituut voor Didactiek van Wiskunde en Natuurwetenschappen
Universiteit Utrecht

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm, of op welke wijze dan ook, zonder schriftelijke toestemming van de Universiteit Utrecht.

Inhoudsopgave

1	Wat is mechanica en wat valt erover te leren?	3
1.1	Waarom mechanica?	3
1.2	Wat kun je met mechanica en wat heb je eraan?	3
1.3	Terugblik en vooruitblik	10
2	Bewegingsverklaring nader bekeken	13
2.1	Inleiding	13
2.2	Mechanica en de beweging van kometen	13
2.3	Hoe heeft komeet Kirch bewogen, en waarom zo?	15
2.4	Weet je al hoe een bewegingsverklaring in zijn werk gaat?	20
3	Bewegingsverklaring systematisch maken	21
3.1	Inleiding	21
3.2	De systematische aanpak herkennen in enkele verklaringen	21
3.3	Je eigen verklaringen systematisch maken	23
3.4	Terugblik en vooruitblik	25
4	Nauwkeurige constructies maken met als aanname over de beweging uit zichzelf: stilstaan	29
4.1	Inleiding	29
4.2	Een beweging in tijdstapjes	29
4.3	Tijdstapjes verkleinen	34
4.4	Een andere weergave van de constructie	36
4.5	Terugblik en vooruitblik	38
5	Nauwkeurige constructies maken met als aanname over de beweging uit zichzelf: rechtdoor bewegen	39
5.1	Inleiding	39
5.2	Een beweging in tijdstapjes	39
5.3	Tijdstapjes verkleinen	46
5.4	Een andere weergave van de constructie	47
6	Vergelijking van de constructiemethodes	49
6.1	Inleiding	49
6.2	Verschillen en overeenkomsten	49
6.3	De beweging volgens een theorie	51
6.4	Terugblik en vooruitblik	52
7	Hoe de planeten in ons zonnestelsel bewegen	53
7.1	Inleiding	53
7.2	De banen en bewegingen van de planeten	54
7.3	Samenvatting	56
8	Keplers theorie voor de planeten	57
8.1	Inleiding	57
8.2	Keplers eerste poging tot een beïnvloedingstheorie	59
8.3	Keplers tweede poging tot een beïnvloedingstheorie	63
8.4	Samenvatting	66

9	Keplers theorie precies testen	67
9.1	Inleiding	67
9.2	Op weg naar een computermodel om Keplers theorie te testen . . .	67
9.3	Test van Keplers theorie op de planeet Mars	72
9.4	Conclusie	73
10	Newtons theorie voor de planeten precies testen	75
10.1	Inleiding	75
10.2	Op weg naar een computermodel om Newtons theorie te testen . .	77
10.3	Test van Newtons theorie op de planeet Mars	79
10.4	Conclusie	79
11	Kiezen tussen Kepler en Newton	81
11.1	Inleiding	81
11.2	De theorieën van Kepler en Newton testen op andere hemellichamen	82
11.3	Hoe zit het nou met komeet Kirch?	86
11.4	Terugblik en vooruitblik	87
12	Afronding van de inleidende cursus	89
12.1	Inleiding	89
12.2	Terugblik: wat heb je allemaal geleerd?	89
12.3	Toepassing van Newtons aanpak op andere bewegingen	91
12.4	Vooruitblik: overgang naar je gewone natuurkunde-boek	93

1 Wat is mechanica en wat valt erover te leren?

1.1 Waarom mechanica?

Mechanica gaat over de *bewegingen* van voorwerpen—van de kleinste atomen tot de grootste sterren—en over de *oorzaken* van die bewegingen. Mechanica vormt daarmee een belangrijk theoretisch fundament van de natuurkunde. Wel zijn er tegenwoordig natuurkundige theorieën die als nog fundamenteler worden gezien, zoals de relativiteitstheorie en de kwantummechanica. Maar die theorieën zijn niet te begrijpen zonder kennis van de mechanica.

De ontdekking van de grondbeginselen van de mechanica is één van de belangrijkste wetenschappelijke prestaties. Het heeft een enorme bijdrage geleverd aan ons wereldbeeld. Wat dat betreft zou je mechanica kunnen vergelijken met de evolutietheorie van Darwin. Beide theorieën zijn van groot wetenschappelijk en maatschappelijk belang.

Om al deze redenen is mechanica een onderwerp waaraan in het VWO aandacht besteed moet worden.

1.2 Wat kun je met mechanica en wat heb je eraan?

Mechanica gaat over bewegingen en de oorzaken van die bewegingen. Dat klinkt vrij abstract. Toch zijn er een heleboel concrete praktijksituaties die op een of andere manier met mechanica te maken hebben. In opdracht 1 staan daar enkele voorbeelden van. De bedoeling van de opdracht is dat je een beeld krijgt van wat je bij mechanica gaat leren, en wat je daaraan hebt. Dus:

- wat kun je meer dan je nu al kunt, wanneer je over mechanica geleerd hebt?
- wat is er nuttig, belangrijk of interessant aan om die extra dingen te leren?

Opdracht 1 *Een beeld krijgen van mechanica en van wat je eraan hebt*

Hieronder staan kort enkele praktijksituaties beschreven. Kies er één uit die je interessant lijkt. Lees voor dat geval de uitgebreidere informatie verderop, en beantwoord de bijbehorende vragen.

1. Hoe Fignon, achteraf gezien, de *Tour de France* van 1989 had kunnen winnen (zie verder blz. 4–5).
2. Hoe je een ruimtesonde in een speciale baan om de Zon kunt krijgen, zodat de polen van de Zon bestudeerd kunnen worden (zie verder blz. 6–7).
3. Waarom het altijd verstandig is om een autogordel te dragen, ook al gaat het maar om een traag ritje (zie verder blz. 8–9).

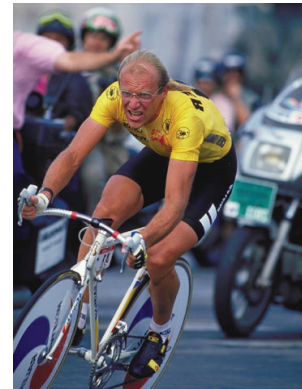
De *Tour de France* op 8 seconden verloren ... en onnodig



Een ontroostbare Fignon, na zijn verlies in de Ronde van Frankrijk in 1989.

Bijna had Laurent Fignon de Ronde van Frankrijk van 1989 gewonnen ... maar net niet helemaal. Voorafgaand aan de tijdrit op de slotdag had Fignon een voorsprong van 50 seconden op zijn naaste concurrent Greg LeMond. Bijna iedereen dacht dat dat genoeg was voor de eindoverwinning. LeMond reed de tijdrit echter 58 seconden sneller dan Fignon, en won daarmee de *Tour* met een voorsprong van 8 seconden. Dat is het kleinste verschil ooit!

LeMond reed de tijdrit met een triatlonstuur. Dat gaf hem extra steun voor een eerder opgelopen rugblessure, maar het gaf hem vooral een meer aërodynamisch profiel. Fignon reed met een gewoon stuur. Een ander verschil tussen de twee wielrenners was het gebruik van een helm: LeMond reed de tijdrit met helm, Fignon zonder.



Greg LeMond (links) en Laurent Fignon (rechts) tijdens de afsluitende tijdrit in de *Tour de France* van 1989. Let ook op de paardenstaart van Fignon.

Een paar jaar later hebben enkele natuurkundigen de tijdrit met behulp van mechanica eens wat preciezer geanalyseerd. Daar kwam uit dat Fignon alleen al door het wapperen van zijn paardenstaart een paar seconden heeft verloren op LeMond. Met een triatlonstuur en een helm zou hij zeker 15 seconden sneller hebben gereden ... genoeg voor winst in de *Tour de France* van 1989.



Een betere stroomlijn van auto's vermindert het verbruik van brandstof bij dezelfde snelheid.

Het gebruik van mechanica om Laurent Fignon aan een virtuele gele trui te helpen is natuurlijk 'achteraf gepraat'. Maar ook vooraf leveren natuurkundigen tegenwoordig met behulp van mechanica een bijdrage aan het verbeteren van sportprestaties. Niet alleen bij het wielrennen, maar bijvoorbeeld ook bij het schaatsen en zwemmen. Of, meer algemeen: bij alle sporten waarbij het gaat om een zo groot mogelijke snelheid. En daar blijft het niet bij. Mechanica is op een vergelijkbare manier in te zetten in het onderzoek naar vermindering van het brandstofverbruik in het verkeer.

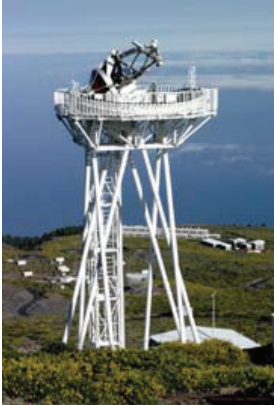
Opdrachten bij ‘De *Ronde van Frankrijk* onnodig verloren’

Mechanica gaat over bewegingen en de oorzaken van die bewegingen. Laten we eens twee bewegingen met elkaar vergelijken. De eerste heeft echt plaatsgevonden; de tweede jammer genoeg voor Fignon niet.

1. De tijddrit van Fignon op de slotdag van de Ronde van Frankrijk van 1989.
2. Stel je voor dat Fignon hetzelfde parcours rijdt, onder dezelfde omstandigheden, maar nu *met* triatlonstuur en *met* helm.

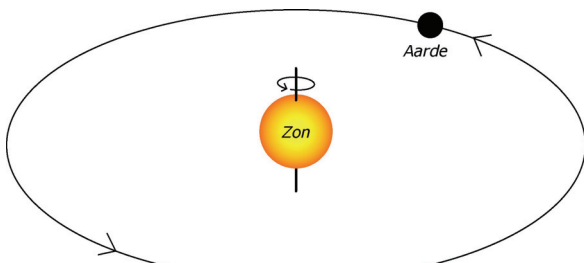
- a. Ook zonder eerst te hoeven leren over mechanica, zie je vast al wel voor je dat de tweede beweging sneller zou zijn geweest. Leg uit waarom het gebruik van triatlonstuur en helm een hogere snelheid tot gevolg heeft.
- b. Met meer kennis over mechanica valt blijkbaar nog meer te zeggen over het verschil in snelheid. Wat kan een natuurkundige ook nog concluderen?
- c. Bij onderdeel b heb je voorbeelden genoemd van wat natuurkundigen allemaal ook nog kunnen concluderen met hun kennis over mechanica. Wat is er nuttig, belangrijk of interessant aan om ook *die* conclusies te kunnen trekken?

Op expeditie naar de polen van de Zon

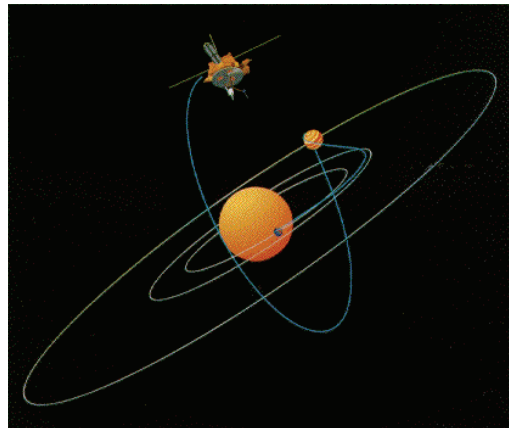


De Dutch Open Telescope.

Sterrenkundigen doen veel onderzoek naar de Zon, onder andere omdat verschijnselen op de Zon van invloed kunnen zijn op het klimaat op Aarde. Eén van de instrumenten waarmee dat onderzoek wordt gedaan is de *Dutch Open Telescope* op het Spaanse eiland La Palma. Er is echter een nadeel aan deze telescoop, en aan alle andere telescopen op Aarde. Alleen de ‘zijkant’ van de Zon kan ermee bekeken worden. Verschijnselen op de polen van de Zon zijn niet zichtbaar, omdat de draai-as van de Zon vrijwel loodrecht staat op het baanvlak van de Aarde. Voor het onderzoek naar verschijnselen op de polen van de Zon was dus een ruimtesonde in een heel speciale baan nodig. Namelijk een baan rond de Zon, loodrecht op het vlak waarin de Aarde en de andere planeten bewegen. De ruimtesonde *Ulysses* is in zo’n baan gebracht.

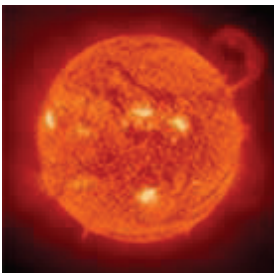


De draai-as van de Zon staat vrijwel loodrecht op het vlak waarin de Aarde beweegt. Daarom kunnen we vanaf de Aarde alleen de zijkant van de Zon zien.



De sonde *Ulysses* komt uiteindelijk in een baan van waaruit de polen van de Zon te zien zijn.

Ook in de figuur op de volgende pagina kun je zien hoe *Ulysses* bewogen heeft. Na zijn lancering in oktober 1990, kwam hij via een kromme baan in februari 1992 heel dicht in de buurt van de planeet Jupiter. Daar is de baan van *Ulysses* zo ongeveer 90° gekanteld, waardoor hij in een baan kwam van waaruit de polen van de Zon bekeken kunnen worden.

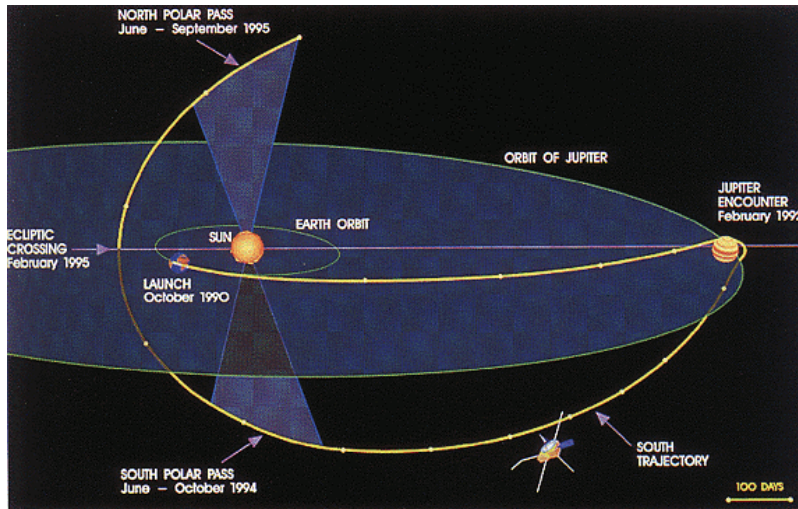


Een opname van de noordpool van de Zon, gemaakt door de sonde *Ulysses*.

Het ‘opslingeren’ van een ruimtesonde door een planeet wordt vaker gebruikt. De baan van zo’n ruimtesonde moet van tevoren door de vluchtleiding natuurlijk wel heel precies worden berekend. Veel mogelijkheden voor baancorrecties onderweg zijn er niet, omdat een ruimtesonde maar heel weinig brandstof mee kan nemen. De ruimtesonde moet dus heel precies in de juiste richting en met de juiste snelheid naar zo’n planeet toe bewegen. En de mechanica levert het gereedschap voor die baanberekeningen.

Opdrachten bij ‘Op expeditie naar de polen van de Zon’

Met mechanica kun je voorspellen hoe voorwerpen gaan bewegen ten gevolge van de krachten die er door andere voorwerpen op uitgeoefend worden. Kijk nog eens naar de beweging van de ruimtesonde *Ulysses*.

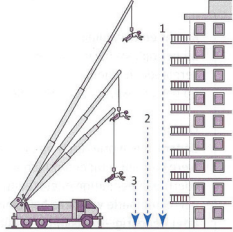


De baan van de ruimtesonde *Ulysses* door het zonnestelsel (vanuit een andere hoek bekeken).

- a. Ook zonder eerst te hoeven leren over mechanica, kun je vast al wel bedenken waar de baan van *Ulysses* zoal door beïnvloed is. Welke hemellichamen hebben er invloed op gehad, en hoe is de baan daardoor veranderd?
- b. Met meer kennis over mechanica valt blijkbaar nog meer te zeggen over de baan van *Ulysses*. Wat kon de vluchtleiding van tevoren ook nog voorspellen over de beweging en de baan van *Ulysses*?
- c. Bij onderdeel b heb je voorbeelden genoemd van wat de vluchtleiders allemaal ook nog konden voorspellen met hun kennis over mechanica. Wat is er nuttig, belangrijk of interessant aan om ook *die* voorspellingen te kunnen doen?

Gordel niet om: erg onverstandig ... ook bij lage snelheid

1. 80 km/h = 25 m
2. 60 km/h = 14 m
3. 40 km/h = 6 m



Een vergelijking tussen vallen en botsen.

Autorijden zonder het dragen van een autogordel is niet erg verstandig. Bij een botsing knal je dan met je hoofd tegen de voorruit. Daarbij zijn de krachten zo groot, dat letsel onvermijdelijk is. Zonder gordel om is een botsing met een snelheid van 50 km/h te vergelijken met een val van ongeveer 10 m hoogte.

Als je een botsing ziet aankomen, kun je je natuurlijk schrap zetten met je armen en benen om te voorkomen dat je tegen de voorruit knalt. Uit de mechanica volgt echter dat je daarvoor al heel sterk zou moeten zijn, zelfs als de auto maar 30 km/h rijdt. Je moet in dat geval evenveel kracht kunnen zetten als bij het tillen van zo'n 350 kilogram. Er zijn niet veel mensen zo sterk. Alleen een powerlifter kan dat misschien nog opvangen, als hij tenminste snel genoeg reageert.



Toch maar een gordel om doen, ook bij lage snelheid.



Magnus Ver Magnusson, viervoudig wereldkampioen powerliften.

Opdrachten bij ‘Altijd een gordel om’

Met mechanica kun je het effect bepalen dat een kracht op de beweging van een voorwerp heeft. Laten we eens kijken naar de volgende situatie, die zich hopelijk nooit voor zal doen.

Je zit zonder gordel om in een auto, die vrij langzaam rijdt (zo’n 30 km/h). De auto botst tegen een muur. Je ziet de botsing nog net op tijd aankomen, en zet je schrap met je armen en je benen.

- a. Ook zonder eerst te hoeven leren over mechanica, kun je vast al wel wat zeggen over het effect van jezelf schrap zetten. Wat voor verschil maakt het als je sterker bent in je armen en benen?

- b. Met meer kennis over mechanica valt blijkbaar nog meer te zeggen over het effect van jezelf schrap zetten. Wat kan een natuurkundige ook nog concluderen over hoe sterk je moet zijn in je armen en benen?

- c. Bij onderdeel b heb je voorbeelden genoemd van wat natuurkundigen allemaal ook nog kunnen concluderen met hun kennis over mechanica. Wat is er nuttig, belangrijk of interessant aan om ook *die* conclusies te kunnen trekken?

1.3 Terugblik en vooruitblik

Je hebt een praktijksituatie bestudeerd om een beeld te krijgen van wat je bij mechanica gaat leren en wat je daaraan hebt. Luister ook eens naar wat andere leerlingen te zeggen hebben over de praktijksituaties die zij bestudeerd hebben.

Opdracht 2 *Waar we ons mee bezig gaan houden*

- a. Schrijf in je eigen woorden op waar mechanica over gaat.

- b. Mechanica geeft een uitbreiding aan wat je nu zelf al kunt. Kijk nog maar eens terug naar je antwoord op de eerdere vragen. Denk ook aan de antwoorden die andere leerlingen gegeven hebben.
Schrijf hieronder op wat mechanica zoal toevoegt aan wat je nu zelf al kunt.

- c. Noem twee redenen waarom het nuttig of belangrijk is om meer te leren over mechanica.

(1)

(2)

- d. Noem nog minstens één andere situatie waarbij het volgens jou nuttig of belangrijk is om meer te weten over mechanica. Of beschrijf een situatie waarin je zelf wat zou hebben aan meer kennis over mechanica.

Hoofddoel

Uit het voorgaande is af te leiden wat het hoofddoel gaat worden van deze Inleidende Cursus. Schrijf dat doel hieronder op, na overleg met je docent en medeleerlingen.

2 Bewegingsverklaring nader bekeken

2.1 Inleiding

Dit hoofdstuk gaat nader in op wat bewegingsverklaring nou eigenlijk inhoudt. Hoe dat in zijn werk gaat. Daarbij kijken we niet zozeer naar praktische aardse bewegingen, maar naar de bewegingen van hemellichamen: planeten, manen, kometen, etc. De bestudering van die bewegingen heeft historisch ook een belangrijke rol gespeeld bij de ontwikkeling van mechanica. Wetenschappers brachten de bewegingen van allerlei hemellichamen in kaart en probeerden te begrijpen waarom ze op die manier bewegen. Later in deze cursus gaan we uitgebreid in op de verklaringen van enkele van die wetenschappers, met name Kepler en Newton. Maar in dit hoofdstuk ga je eerst helder op een rijtje zetten van welke ideeën je zelf al gebruik maakt wanneer je uitlegt waarom iets beweegt zoals het beweegt. Daarna kun je Kepler en Newton gemakkelijker begrijpen.

2.2 Mechanica en de beweging van kometen

Kometen merk je meestal niet op. Maar als er eentje dicht genoeg bij de Aarde in de buurt komt, is dat een heel indrukwekkend gezicht. Je ziet dan aan de hemel een heldere kop (de eigenlijke komeet), met daarachter een staart. Bij sommige kometen kan die staart heel lang zijn. Vandaag de dag kunnen we gewoon van het schouwspel genieten, maar dat was een paar eeuwen geleden nog heel anders. De verschijning van een komeet was altijd een totaal onverwachte gebeurtenis. En als een komeet op een dag verschenen was, was het volkomen onvoorspelbaar of hij de volgende dag weer te zien zou zijn en waar aan de hemel.

Kometen werden vroeger vooral gezien als een instrument van de duivel of als een aankondiger van naderend onheil. En natuurlijk gebeurde er altijd wel ergens een grote ramp vlak na de verschijning van een komeet: een uitbraak van de pest, een overstroming of een oorlog. Zo kreeg een komeet de schuld van de val van koning Harold in 1066. Een afbeelding daarvan is bewaard gebleven in de vorm van het *Tapijt van Bayeux*.



De komeet Hale-Bopp in 1997, gefotografeerd vanuit de Rocky Mountains.



De komeet Halley in 1066, afgebeeld op het *Tapijt van Bayeux*.



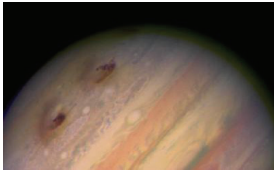
De komeet als instrument van de duivel.

De mechanica heeft ertoe bijgedragen dat we tegenwoordig niet onnodig bang meer zijn voor kometen. We sturen zelfs ruimtesondes naar kometen toe om ze van dichtbij te bestuderen. Zo weten we tegenwoordig dat een komeet eigenlijk een grote vieze sneeuwbal is: een met stof vervuild brok ijs, met een afmeting tussen 1 en 50 km. Wanneer een komeet in de buurt van de Zon komt, begint het ijs te sublimeren en komen er ook stofdeeltjes vrij. Op die manier ontstaat uiteindelijk de staart van de komeet.



Komeet Halley in 1986, gezien vanaf de sonde Giotto.

Met mechanica is het mogelijk om de baan van kometen te berekenen. Op die manier is te voorspellen dat op een bepaald tijdstip op een bepaalde plaats aan de hemel een komeet zal verschijnen. Een komeet is blijkbaar geen instrument dat door de duivel naar believen kan worden ingezet om de mensheid te straffen. Een komeet ‘gehoorzaamt’ gewoon aan natuurwetten.



Enkele sporen van de inslag van komeet Shoemaker-Levy 9 op Jupiter.

Zo heeft mechanica ertoe bijgedragen dat geleidelijk een cultuur is ontstaan, waarin bijgeloof en onnodige angst voor natuurverschijnselen verdwenen zijn. Tenzij natuurlijk uit de baanberekeningen zou blijken dat een komeet op ramkoers met de Aarde ligt, maar dan is er geen sprake meer van onnodige angst. Dat zoiets niet denkbeeldig is, blijkt uit de inslag van de komeet Shoemaker-Levy 9 op de planeet Jupiter in 1994. Die liet kraters na ter grootte van de Aarde!

Opdracht 1 *De beweging van kometen en het hoofddoel van de cursus*

Lees voorgaande informatie over kometen. Kijk vervolgens nog eens terug naar het hoofddoel van deze cursus (zie pagina 11).

Als het doel van de cursus bereikt is, weet je ook een heleboel over de beweging van kometen. Schrijf hieronder op wat je dan zoal kunt voorspellen en verklaren.

De Grote Komeet van 1680

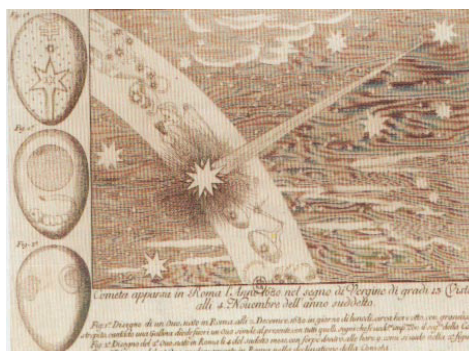
Eind 1680 – begin 1681 was er een aantal nachten een komeet aan de hemel te zien. Te oordelen naar de tekening uit een ‘krant’ uit die tijd, moet het een indrukwekkend verschijnsel zijn geweest. Het feit dat er van de komeet een munt geslagen is, mag ook illustreren hoezeer men onder de indruk was. Ook aan deze komeet werden weer wonderlijke zaken toegeschreven. In Rome zouden de kippen eieren hebben gelegd met daarop tekens die te maken hadden met de komeet.



Afbeelding van de komeet op munt.



Een Duits vlugschrift uit 1680, waarin de komeet afgebeeld en beschreven wordt.



Afbeelding van eieren die na het verschijnen van de komeet in Rome gelegd zouden zijn.



Gottfried Kirch (1639–1710)

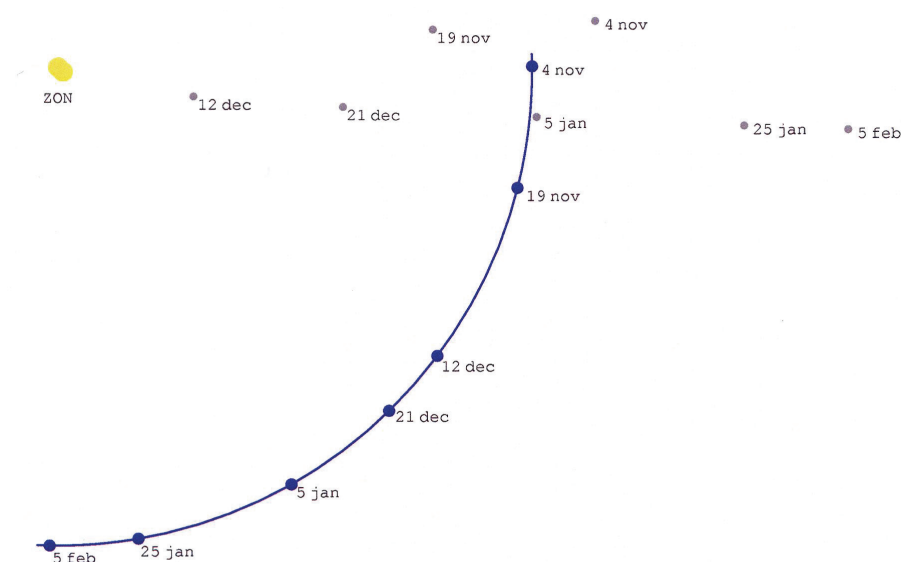
De komeet wordt de *Grote Komeet van 1680* genoemd of ook wel *komeet Kirch*, naar de Duitse sterrenkundige Gottfried Kirch die de komeet heeft ontdekt. Toen de komeet nog niet met het blote oog te zien was, had Kirch de komeet al met een telescoop gezien.

2.3 Hoe heeft komeet Kirch bewogen, en waarom zo?

Van welke ideeën maak je zelf gebruik, wanneer je uitlegt waarom iets beweegt zoals het beweegt? Om daarachter te komen, gaan we uitgebreid kijken naar de beweging van één bepaalde komeet. Deze komeet, genoemd naar de Duitse sterrenkundige Kirch, was eind 1680 – begin 1681 een aantal nachten aan de hemel te zien. De komeet wordt ook wel de Grote Komeet van 1680 genoemd. In het kader op bladzijde 14 staat wat meer informatie over de komeet, en de enorme indruk die deze maakte op de mensen uit die tijd. De komeet trok uiteraard ook de aandacht van wetenschappers. Over de hele wereld zijn toen vele waarnemingen gedaan. Voor de dagen dat de komeet zichtbaar was, kon daaruit precies bepaald worden wat zijn positie was ten opzichte van de Zon en de Aarde. In onderstaande figuur stellen de grijze stippen die posities voor. Het gaat daarbij om de positie van de kop van de komeet, wat in feite de eigenlijke komeet is. Bij de grijze stippen staat de datum waarop de komeet zich in die positie bevond.



Schilderij met een weergave van komeet Kirch.



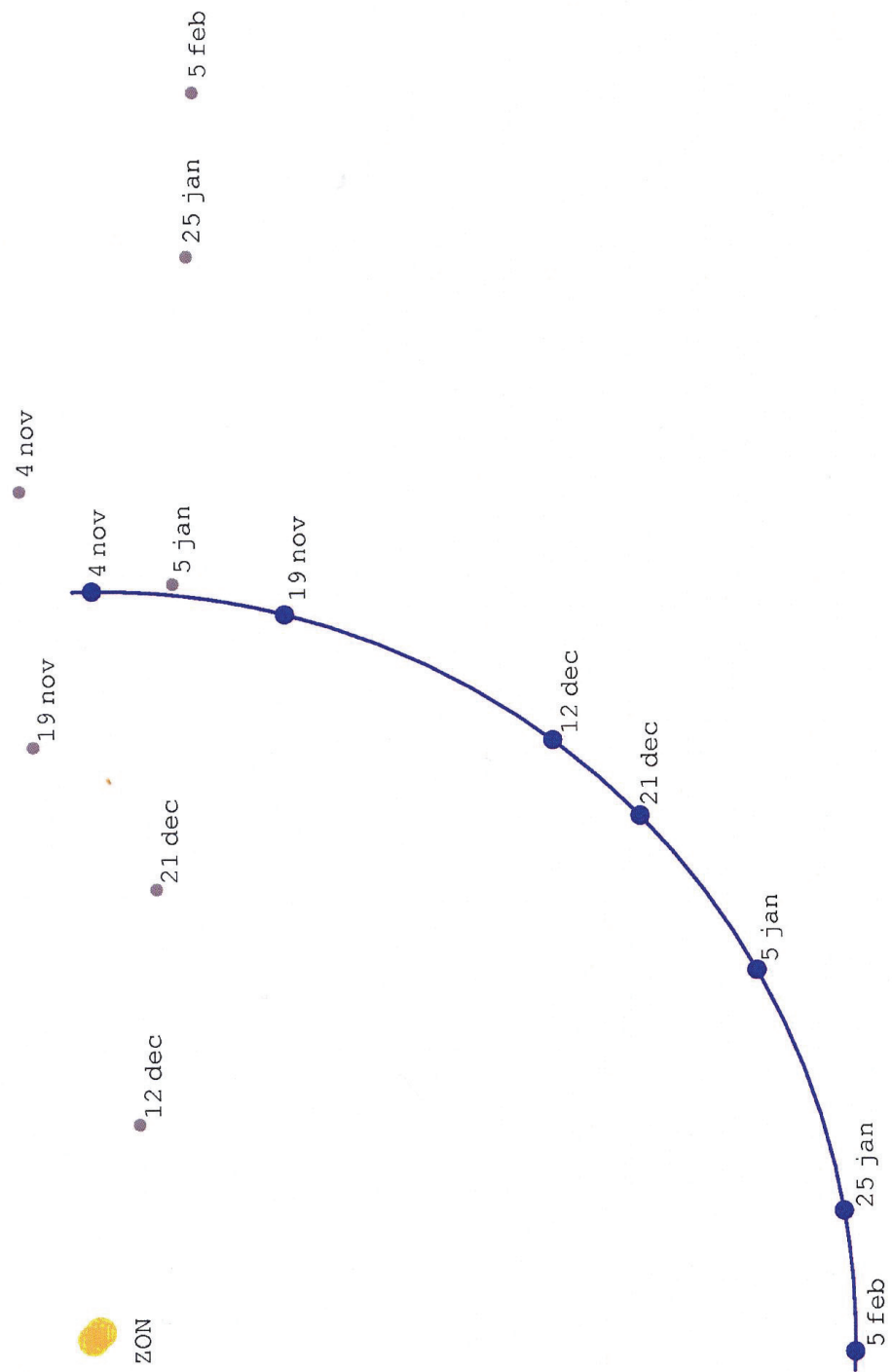
De plekken waar komeet Kirch (grijze stippen) en de Aarde (blauwe stippen) zich op enkele data bevonden ten opzichte van de Zon (gele vlek).

Om een idee van de schaal te geven is ook een deel van de baan van de Aarde om de Zon weergegeven als een blauwe lijn. De blauwe stippen geven aan waar de Aarde zich bevond op de dagen dat de waarnemingen gedaan zijn. Bedenk nog, om een idee van de schaal te krijgen, dat de afstand tussen de Zon en de Aarde ongeveer 150 miljoen kilometer is.

Wat ga je doen?

Bovenstaande figuur roept meteen allerlei vragen op. Waar bevond de komeet zich op de dagen dat hij niet waargenomen was? Kun je ook de baan van de komeet intekenen, net zoals die van de Aarde? En vooral, wat is er eind november – begin december 1680 precies gebeurd?

Wetenschappers hebben geprobeerd antwoorden te vinden op zulke vragen. Jij gaat dat nu ook doen. Als je niet zeker bent van je antwoorden, is dat niet erg. Waar het vooral om gaat is de aanpak. Wanneer je de beweging van de komeet probeert te begrijpen, hoe ga je dan te werk? Welke ideeën zitten daarachter?



Opdracht 2 *Hoe zal komeet Kirch bewogen hebben?*

De komeet is op zeven dagen waargenomen. Voor die dagen konden wetenschappers de positie van de komeet bepalen, maar meer informatie hadden ze niet. Daardoor is de baan van de komeet nog niet helemaal duidelijk.

- a. Teken in nevenstaande figuur de baan waarlangs volgens jou de komeet bewogen heeft. Als je niet kunt kiezen tussen verschillende mogelijkheden, teken die dan allemaal in.
- b. Geef in de figuur aan waar volgens jou de komeet het snelst bewogen heeft, en waar het langzaamst. Doe dat voor elk van de getekende banen.

In opdracht 2 heb je een beeld gevormd van de beweging van de komeet. In de volgende opdrachten ga je preciezer kijken naar mogelijke oorzaken van die beweging. Om dit overzichtelijk te houden, kijk je achtereenvolgens naar verschillende stukken van de beweging.

- Het stuk waarin de komeet ‘omkeert’, ergens in de buurt van de Zon (opdracht 3).
- Een eerder stuk, waarin de komeet beweegt in de richting van de Zon (opdracht 4).
- Een stuk waarin de komeet van de Zon af beweegt (opdracht 5).
- De beweging heel ver af (opdracht 6).

Steeds bedenk je of er op dat stuk een invloed op de komeet gewerkt heeft. En zo ja, waar die invloed door uitgeoefend is.

Opdracht 3 *Waarom is komeet Kirch ‘omgekeerd’?*

Ergens in november of december 1680 moet de komeet ‘omgekeerd’ zijn.

- a. Omcirkel welk van de twee mogelijkheden jou het meest waarschijnlijk lijkt.
 - (1) Voor die omkering hoeft geen oorzaak gevonden te worden. Zo beweegt een komeet nou eenmaal uit zichzelf.
 - (2) De komeet is niet zomaar uit zichzelf omgekeerd. Daar moet een oorzaak voor zijn geweest.

Beantwoord vraag b als je mogelijkheid 2 gekozen hebt.

- b. Schrijf hieronder op wat volgens jou de oorzaak voor de omkering is.

Opdracht 4 *Werkte voor de omkering een invloed op de komeet?*

Tussen 4 en 19 november 1680 bewoog de komeet in de richting van de Zon.

- a. Op dit stuk—tussen 4 en 19 november 1680—is de komeet **wel** / **niet** beïnvloed door de Zon of door iets anders.

Beantwoord vraag b als je antwoord ‘wel’ is en vraag c als je antwoord ‘niet’ is.

- b. Volgens jou werkte tussen 4 en 19 november een invloed op de komeet. Teken die invloed in onderstaande figuur met een pijl. (Teken meerdere pijlen als je denkt dat er meerdere invloeden waren.) Schrijf bij elke pijl waar die invloed door uitgeoefend is.



- c. Jij denkt dat er tussen 4 en 19 november geen enkele invloed op de komeet werkte. Leg hieronder uit hoe het volgens jou komt dat de komeet toen wel bewogen heeft.

Opdracht 5 *Werkte na de omkering een invloed op de komeet?*

Tussen 21 december 1680 en 5 januari 1681 bewoog de komeet van de Zon af.

- a. Op dit stuk—tussen 21 december en 5 januari—is de komeet **wel** / **niet** beïnvloed door de Zon of door iets anders.

Beantwoord vraag b als je antwoord ‘wel’ is en vraag c als je antwoord ‘niet’ is.

- b. Jij denkt dat de komeet is beïnvloed tussen 21 december en 5 januari. Teken elke invloed die toen volgens jou werkte met een pijl, en schrijf er weer bij waar die invloed door uitgeoefend is.

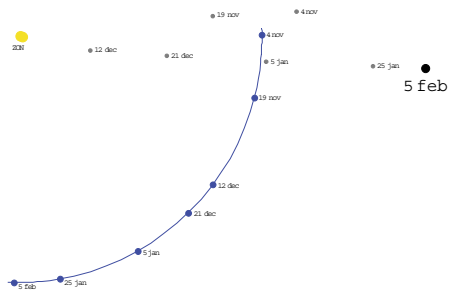


- c. Jij denkt dat er tussen 21 december en 5 januari geen enkele invloed op de komeet werkte. Leg hieronder uit hoe het volgens jou komt dat de komeet toen wel bewogen heeft.

Opdracht 6 *Hoe zal komeet Kirch verder bewogen hebben?*

Na 5 februari 1681 was de komeet zover verwijderd van de Aarde dat hij niet meer waargenomen kon worden.

- a. Hieronder staat de figuur nog eens verkleind weergegeven. Teken daarin hoe je denkt dat de komeet **ná 5 februari 1681** bewogen zal hebben.



- b. Licht hieronder je tekening toe.

Opdracht 7 *Onderlinge verschillen en overeenkomsten*

Luister en kijk eens naar de antwoorden die je klasgenoten gegeven hebben op de vragen over het hoe en waarom van de beweging van komeet Kirch.

Schrijf de meest in het oog springende overeenkomsten en verschillen op.

Onderlinge verschillen:

Onderlinge overeenkomsten:

2.4 Weet je al hoe een bewegingsverklaring in zijn werk gaat?

Het is nog niet zo eenvoudig om te bepalen hoe de komeet bewogen heeft, en om daar een heldere verklaring voor te geven. Of om het daar onderling over eens te worden. Maar er begint al wel wat duidelijkheid te ontstaan over hoe je zo'n verklaring aanpakt, en wat voor ideeën daarachter zitten.



Tegeltjeswijsheid.

Om uit te leggen waarom iets op een bepaalde manier beweegt, hoef je niet altijd een *oorzaak* aan te wijzen. Je gaat pas naar een oorzaak zoeken, als het voorwerp *anders* beweegt *dan* hoe je denkt dat het *uit zichzelf* al zou bewegen. Je gaat dan op zoek naar een ander voorwerp dat er een *invloed* op uitoefent, en zo de *afwijking* veroorzaakt.

Dit klinkt aan de ene kant misschien wat vaag en abstract, en aan de andere kant heel vanzelfsprekend. Er zit echter een idee achter, dat aan de basis ligt van elke verklaring van een beweging. Je zult daar nog vaak gebruik van maken.

Basisidee van bewegingsverklaring :

Een *invloed* veroorzaakt een *afwijking* van hoe iets *uit zichzelf* al zou bewegen.

Opdracht 8 *Herken je het basisidee in wat jullie zelf gedaan hebben?*

Het basisidee van bewegingsverklaring is vast ook te herkennen in hoe jij en je klasgenoten geredeneerd hebben over de beweging van komeet Kirch.

Schrijf er hieronder twee duidelijke voorbeelden van op.

1.

2.

3 Bewegingsverklaring systematisch maken

3.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk is een basisidee van bewegingsverklaring naar voren gekomen (zie hiernaast). Dit idee benadrukt iets dat je anders gemakkelijk over het hoofd zou zien. Als je uit wilt leggen waarom een komeet op een bepaalde manier beweegt, moet je niet alleen iets zeggen over de invloeden die erop werken. Je moet ook iets zeggen over de manier waarop de komeet uit zichzelf al verder zou hebben bewogen. Dat je ook over die beweging uit zichzelf iets moet zeggen, volgt uit het basisidee. Een invloed veroorzaakt immers een afwijking van hoe iets uit zichzelf al verder zou bewegen.

Het basisidee is dus belangrijk omdat het in feite zegt hoe je een bewegingsverklaring *systematisch* aan moet pakken. Als je systematisch uit wilt leggen waarom iets op een bepaalde manier beweegt, moet je over *twee* dingen iets zeggen:

1. welke invloeden je denkt dat er op het voorwerp werken;
2. hoe je denkt dat het voorwerp uit zichzelf al verder zou bewegen.

In dit hoofdstuk ga je oefenen met deze systematische aanpak. Daarbij gebruiken we als voorbeeld weer komeet Kirch.

3.2 De systematische aanpak herkennen in enkele verklaringen

In de volgende opdrachten komen drie verklaringen aan bod. Ze gaan allemaal over de beweging van komeet Kirch tussen 4 en 19 november 1680. Het gaat er nu niet om welke verklaring de beste is. Het gaat er alleen maar om of je de twee elementen van de systematische aanpak herkent.

Opdracht 1 *Verklaring 1 van de beweging tussen 4 en 19 november*

Bestudeer de volgende verklaring en beantwoord dan de vragen op de volgende bladzijde.

Verklaring 1

Op 4 november was de komeet zo ver van de Zon verwijderd dat de Zon er nauwelijks invloed op had. Wel had de komeet toen al een snelheid, en die heeft hij behouden. Misschien is de Aarde *wel* van invloed geweest. Die stond toen immers vrij dichtbij. Uit zichzelf zou de komeet langs de streepjespijl bewogen hebben. Door de aantrekkende invloed van de Aarde is hij een beetje uit die baan getrokken. De rode pijl stelt de invloed van de Aarde voor.



Volgens de systematische aanpak moet je in een verklaring gebruik maken van:

- ideeën over de invloeden die toen op de komeet werkten;
 - een idee over de manier waarop de komeet toen uit zichzelf al bewogen zou hebben.
- a. Volgens verklaring 1 werkte er tussen 4 en 19 november een invloed op de komeet. Schrijf hieronder op waar die invloed door uitgeoefend werd en in welke richting de invloed werkte.
- b. Volgens verklaring 1 zou de komeet ook uit zichzelf al bewogen hebben tussen 4 en 19 november, ook al had er geen invloed gewerkt. Schrijf op hoe dat komt volgens verklaring 1.

Opdracht 2 *Verklaring 2 van de beweging tussen 4 en 19 november*

Er zijn ook andere verklaringen te bedenken van hetzelfde stukje beweging. Bestudeer de volgende maar eens.

Verklaring 2

Tussen 4 en 19 november moet de Zon wel een aantrekkende invloed gehad hebben op de komeet. Want uit zichzelf zou de komeet gebleven zijn waar hij op 4 november was. De Zon heeft de komeet helemaal van het ene punt naar het andere punt getrokken. De rode pijl stelt het effect van die invloed voor.



- a. Ook verklaring 2 maakt een aanname over invloeden die toen op de komeet werkten. Schrijf hieronder op welke aanname dat is.
- b. Ook verklaring 2 maakt een aanname over wat de komeet uit zichzelf gedaan zou hebben tussen 4 en 19 november. Schrijf op welke aanname dat is.

Opdracht 3 *Verklaring 3 van de beweging tussen 4 en 19 november*

Verklaring 3

Uit zichzelf zou de komeet de snelheid behouden hebben die hij al had, en aan het eind van de streepjespijl gekomen zijn. De Zon oefende echter een afstotende invloed uit op de komeet (de rode pijl). Daardoor is de komeet wat afgeremd en een stukje minder ver gekomen.



- Schrijf op welke aanname over invloeden gemaakt is in verklaring 3.
- Schrijf op welke aanname verklaring 3 maakt over de beweging uit zichzelf.

3.3 Je eigen verklaringen systematisch maken

Je gaat nu zelf verklaringen geven, van de beweging tussen 4 en 19 november en van enkele andere stukken. Als je niet zeker bent van je verklaringen, is dat niet erg. Het gaat er nu niet om of ze goed zijn, als ze maar wel systematisch zijn.

Opdracht 4 *Jouw verklaring van de beweging tussen 4 en 19 november*

Je hebt nu drie verklaringen gezien van de beweging tussen 4 en 19 november. Eén daarvan is misschien wel die van jou. Of je bent op nieuwe ideeën gebracht.

Is één van de eerdere verklaringen precies die van jou? **Ja / Nee**

Zo **ja**, omcirkel welke: 1 2 3

Zo **nee**, geef hieronder je eigen verklaring van de beweging tussen 4 en 19 november. Zorg dat deze systematisch is en maak er ook een tekening bij.

Verklaring met jouw ideeën



Opdracht 5 Verklaring van de beweging op twee andere stukken

Geef op dezelfde manier een systematische verklaring van de beweging van de komeet op enkele andere stukken. Eerst het stuk tussen 19 november en 12 december 1680, dan het stuk tussen 21 december 1680 en 5 januari 1681.

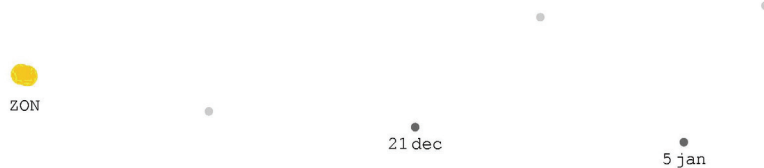
1. Als je denkt dat er op zo'n stuk invloeden op de komeet gewerkt hebben, teken die dan met rode pijlen. Dat geeft dus jouw idee over de invloeden.
2. Misschien denk je dat de komeet uit zichzelf ook al verder had bewogen op dat stuk, dus zelfs als er toen geen invloeden op gewerkt hadden. Teken dat als een streepjespijl. Dat geeft dus jouw idee over de beweging uit zichzelf.

Leg met die ideeën uit hoe de komeet volgens jou bewogen heeft op dat stuk.

Jouw verklaring van de beweging tussen 19 november en 12 december



Jouw verklaring van de beweging tussen 21 december en 5 januari



3.4 Terugblik en vooruitblik

Systematische bewegingsverklaring, nu en toen

Je hebt nu geoefend met het geven van een systematische bewegingsverklaring. Daarbij heb je steeds nagedacht over twee vragen:

1. Welke invloeden werken op de komeet?
2. Hoe zou de komeet uit zichzelf al verder bewegen?

Ook wetenschappers hebben over zulke vragen nagedacht. Vooral in de zeventiende eeuw hebben ze daarbij veel vooruitgang geboekt. Hiernaast staan de geleerden afgebeeld die de belangrijkste bijdragen hebben geleverd.

Overigens waren die wetenschappers toen lang niet altijd zeker van hun antwoorden, maar ze hadden wel hun vermoedens. Voor jou geldt dat nu misschien ook wel. Bovendien waren de geleerden het toen onderling lang niet allemaal eens, zonder dat nou meteen duidelijk was wie er gelijk had. Ook dat geldt nu misschien wel voor jou en enkele van je medeleerlingen.

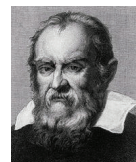
Verschillende aannames over invloeden Over de eerste vraag verschilden de geleerden onderling van mening, dus over de invloeden die werken op hemellichamen zoals planeten en kometen. De meesten waren het er wel over eens dat de Zon een belangrijke invloed heeft. Maar over de grootte en richting van die invloed hadden ze heel verschillende ideeën. Sommigen dachten dat de invloed in de richting van de Zon is, anderen dat de invloed daar juist dwars op staat. In de hoofdstukken 8 en 10 leer je hier meer over.

Verschillende aannames over de beweging uit zichzelf Ook over de tweede vraag waren de meningen verdeeld, dus over de manier waarop een planeet of komeet uit zichzelf al verder zou bewegen. Sommigen dachten dat een hemellichaam stil blijft staan als er geen invloeden op werken, anderen dat het dan rechtdoor blijft bewegen. Zie de volgende bladzijde voor de ideeën van Kepler en Newton hierover.

Wat zijn de goede aannames?

In deze cursus ga je in zekere zin de gedachten volgen van de genieën die hiernaast staan afgebeeld, in het bijzonder Kepler en Newton. Zij hadden heel verschillende aannames over zowel de invloeden als de beweging uit zichzelf. Door Kepler en Newton allebei te behandelen, komt vanzelf de vraag naar voren wie van de twee gelijk heeft. Welke aannames zijn beter, en hoe kom je daarachter?

Je begint met Keplers en Newtons ideeën over de beweging uit zichzelf met elkaar te vergelijken, en met jouw eigen idee hierover.



Galileo Galilei
(1564–1642)



Johannes Kepler
(1571–1630)



René Descartes
(1596–1650)



Christiaan Huygens
(1629–1695)



Isaac Newton
(1643–1727)

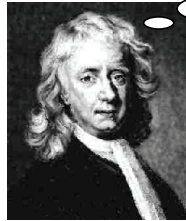


Gottfried Leibniz
(1646–1716)

Kepler en Newton over de beweging uit zichzelf



Kepler



Newton

Ieder voorwerp heeft een natuurlijke neiging tot rust, en te blijven waar het is.

Ieder voorwerp heeft een natuurlijke neiging om rechtdoor te blijven bewegen met de snelheid die het al heeft.

Volgens Newton blijft een voorwerp uit zichzelf *rechtdoor bewegen met de snelheid die het al heeft*. Dus als een komeet toevallig al een snelheid heeft, dan houdt hij volgens Newton die snelheid, ook al werkt er geen invloed meer op.

Volgens Kepler is het onmogelijk dat een komeet zomaar ‘toevallig’ een snelheid heeft. Volgens hem is daar altijd een invloed voor nodig. Uit zichzelf zou een komeet *stilstaan*. En hetzelfde geldt voor ieder ander voorwerp.

Je gaat pas naar een oorzaak zoeken, als een voorwerp anders beweegt dan hoe je denkt dat het uit zichzelf al zou bewegen. Dit is het basisidee van bewegingsverklaring. Het geldt natuurlijk ook voor Kepler en Newton. Omdat ze een verschillende aanname hadden over de beweging uit zichzelf, gingen ze ook op een verschillende manier op zoek naar invloeden.

Zolang een komeet van *positie* verandert, is er een afwijking van rust. Dat gaat volgens Kepler niet vanzelf, en dus moet hij dan op zoek naar een invloed op de komeet. Newton hoeft echter alleen maar op zoek naar een invloed, wanneer de komeet van *snelheid* of van *richting* verandert. Om de komeet met dezelfde snelheid rechtdoor te laten bewegen, is volgens Newton immers geen invloed nodig. Dat gaat volgens hem vanzelf.

Opdracht 6 *Verskillende aannames over de beweging uit zichzelf*

Bestudeer de ideeën van Kepler en Newton over de beweging uit zichzelf (zie bovenstaand kader). Beantwoord dan de vragen.

- a. Kijk nog eens terug naar de verklaringen 1 t/m 3 (zie blz. 21 t/m 23). Omcirkel welke verklaringen gebruik maken van Keplers idee en welke van Newtons idee.

Van **Keplers** idee wordt gebruik gemaakt in verklaring(en): 1 2 3

Van **Newtons** idee wordt gebruik gemaakt in verklaring(en): 1 2 3

- b. Kijk nog eens terug naar je eigen verklaringen. Omcirkel van welk idee over de beweging uit zichzelf jij gebruik maakt.

Keplers idee / **Newtons idee** / **een ander idee**

Als je gebruik maakt van een ander idee, schrijf dan op welk idee dat is.

- c. Neem iemand in gedachten die een ander idee heeft dan jij over de beweging uit zichzelf. Bijvoorbeeld Kepler, Newton of een klasgenoot. Schrijf op hoe jij die persoon zou proberen te overtuigen van jouw idee.

Opdracht 7 *Ben je al dichter bij het hoofddoel van de cursus gekomen?*

Kijk nog eens terug naar het hoofddoel van deze cursus (zie bladzijde 11).

- a. Schrijf hieronder op welke vorderingen je al gemaakt hebt met het bereiken van het hoofddoel.
- b. Schrijf hieronder op waarom het hoofddoel nog niet bereikt is, ondanks die vorderingen.

4 Nauwkeurige constructies maken met als aanname over de beweging uit zichzelf: stilstaan

4.1 Inleiding

Bij een systematische bewegingsverklaring leg je stukje bij beetje uit waarom een voorwerp beweegt zoals het beweegt. Je gebruikt steeds twee soorten aannames:

1. een aanname over de invloeden die op het voorwerp werken;
2. een aanname over de manier waarop het voorwerp uit zichzelf al verder zou bewegen.

Door combinatie hiervan kun je uitleggen hoe het voorwerp op een bepaald stukje zo ongeveer gaat bewegen.

Newton en Leibniz hebben deze aanpak verder geperfectioneerd tot een *constructiemethode*. Ze hebben er trouwens niet samen aan gewerkt, maar hebben de methode onafhankelijk van elkaar bedacht. Met de constructiemethode kun je *heel nauwkeurig* de baan tekenen waarlangs een voorwerp gaat bewegen. Het sterke van de methode is dat je hem altijd kunt toepassen, welke aannames je ook maakt over de invloeden en over de beweging uit zichzelf. Wat je aannames ook zijn, de constructiemethode stelt je in staat *heel precies* te bepalen hoe een voorwerp volgens die aannames gaat bewegen.

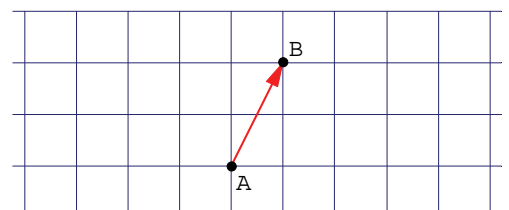
In dit hoofdstuk leer je hoe de constructiemethode werkt bij Keplers aanname over de beweging uit zichzelf; in hoofdstuk 5 hoe het gaat bij Newtons aanname.

4.2 Een beweging in tijdstapjes

De constructiemethode met *stilstaan* als aanname over de beweging uit zichzelf

Een invloed veroorzaakt een afwijking van hoe iets uit zichzelf al verder zou bewegen. Dat is het basisidee van bewegingsverklaring. Ook de constructiemethode is erop gebaseerd. Volgens Kepler beweegt een voorwerp uit zichzelf niet, maar blijft het *stilstaan*. Het voorwerp verplaatst volgens hem alleen maar doordat er een invloed op werkt.

Als je weet hoe groot de invloed is, en in welke richting die werkt, kun je stapje voor stapje gaan bepalen hoe het voorwerp zich verplaatst. Het simpelst gaat dit door te kijken naar het effect van de invloed in opeenvolgende tijdjes. Veronderstel dat het voorwerp op een gegeven moment in A zit. Waar zal het zich een tijdje later bevinden? Als er geen invloed op werkt, zal het volgens Kepler nog steeds in A zitten. Als er wel een invloed werkt, zal deze een verplaatsing veroorzaken (de rode pijl). Het voorwerp zal door de invloed dan dus verplaatsen van A naar B.



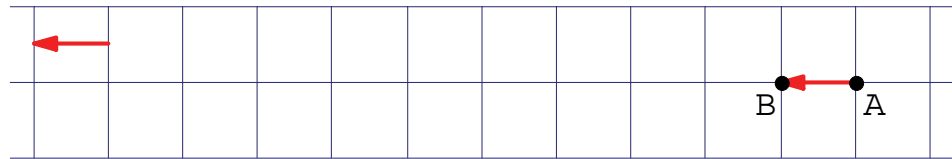
Als een voorwerp verplaatst, komt dat volgens Kepler door een invloed. De rode pijl stelt het effect voor dat de invloed in een tijdstapje heeft.

Om te bepalen waar het voorwerp naartoe gaat in het daarop volgende tijdje, moet je weten wat het effect is van de invloed in dat tijdje. Je kunt zo achtereenvolgens de hele beweging construeren, als je voor ieder tijdstapje steeds de afwijking kent die de invloed dan veroorzaakt.

Opdracht 1 *Hoe beweegt een voorwerp als er een constante invloed op werkt en als het uit zichzelf zou blijven waar het is?*

Op een gegeven moment bevindt een voorwerp zich in A. Vanaf dan werkt er een constante invloed op het voorwerp. In ieder tijdstapje veroorzaakt deze een afwijking waarvan de grootte en richting gegeven worden door de rode pijl. In het eerste tijdstapje vanaf A komt het voorwerp dus in B terecht.

- a. Teken waar het voorwerp in de volgende **acht** tijdstapjes vanaf B terecht komt. Neem als aanname over de beweging uit zichzelf: stilstaan. Het voorwerp verplaatst dan dus alleen door de invloed die erop werkt.



- b. Omcirkel wat volgens jou het geval is.
- (1) Het voorwerp gaat in de loop van de tijd *langzamer* bewegen.
 - (2) Het voorwerp blijft steeds *even snel* bewegen.
 - (3) Het voorwerp gaat in de loop van de tijd *sneller* bewegen.

Opdracht 2 *De omkering van de komeet proberen te verklaren*

Met de constructiemethode kun je bepalen hoe een voorwerp gaat bewegen. Neem bijvoorbeeld de omkering van komeet Kirch. Is die omkering te verklaren door de constructiemethode toe te passen? Natuurlijk kun je de constructiemethode pas toepassen, nadat je twee aannames gemaakt hebt:

1. een aanname over de invloed die op de komeet werkt;
2. een aanname over de manier waarop de komeet uit zichzelf al verder zou bewegen.

In deze opdracht nemen we als aanname over de beweging uit zichzelf: stilstaan. Deze aanname moeten we nog combineren met een aanname over de invloed op de komeet. Door de constructiemethode toe te passen met de twee aannames samen, moet dan volgen dat de komeet omkeert.

- a. Het zal niet lukken om de omkering te verklaren met de aanname dat er op de komeet een constante invloed werkt zoals bij opdracht 1.
Leg uit waarom niet.

Bestudeer eerst de aanname over een invloed op de komeet in nevenstaand kader. Ga daarna verder met de vragen op bladzijde 32. Daarin ga je na of met deze invloed de omkering verklaard kan worden.

Een aanname over de invloed op de komeet

Laten we eens de volgende aanname maken over de invloed op de komeet.

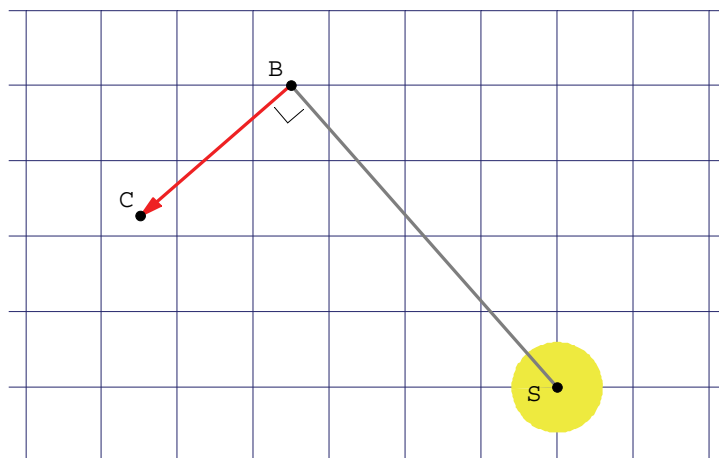
- De invloed wordt uitgeoefend door *de Zon*.
- De invloed staat steeds *dwars* op de verbindinglijn tussen de komeet en de Zon.
- De invloed is *kleiner*, naarmate de komeet *verder van* de Zon af is.

Ideeën achter deze aanname Je zou je kunnen voorstellen dat de Zon een invloed uitoefent doordat ze om haar eigen as draait. Stel je maar eens voor, om een concreet beeld te krijgen, dat de Zon armen en handen heeft. Door al draaiend de komeet vast te pakken, sleept de Zon de komeet vanzelf in haar hand mee, in een richting die dwars staat op haar arm.

De beweging construeren die je volgens de aannames krijgt Stel dat een komeet op een gegeven moment in positie B is. Waar bevindt de komeet zich dan een dag later? Met *stilstaan* als aanname over de beweging uit zichzelf, zou de komeet zonder invloed nog steeds in B zitten. Maar er is wel een invloed. Deze staat dwars op de verbindinglijn tussen het hemellichaam en de Zon (dus loodrecht op de lijn SB). Door de invloed gaat de komeet in die richting bewegen (de rode pijl). Maar hoe groot is de verplaatsing in één dag? Daar heb je nog extra informatie voor nodig. De volgende formule geeft die informatie.

$$\text{verplaatsing door invloed in 1 dag} = \frac{14}{\text{afstand tot midden van de Zon}}$$

In deze formule moet je niet de echte afstand tussen de komeet en de Zon invullen, maar de afstand op schaal. De formule geeft dan, op schaal, de grootte van de verplaatsing door de invloed.



In positie B is de afstand tot het midden van de Zon: $SB = 5,3 \text{ cm}$. Volgens de formule is de grootte van de verplaatsing dan dus: $\frac{14}{5,3} = 2,6 \text{ cm}$. Dit is de lengte van de rode pijl. Eén dag later bevindt de komeet zich dus in positie C, aan het uiteinde van de rode pijl.

Er is nu een aanname gemaakt over de beweging uit zichzelf: stilstaan. En er is een aanname gemaakt over de invloed op de komeet:

- De invloed staat loodrecht op de verbindinglijn tussen de Zon en de komeet. Door de invloed gaat de komeet in die richting bewegen.
- De grootte van de verplaatsing in één dag wordt gegeven door:

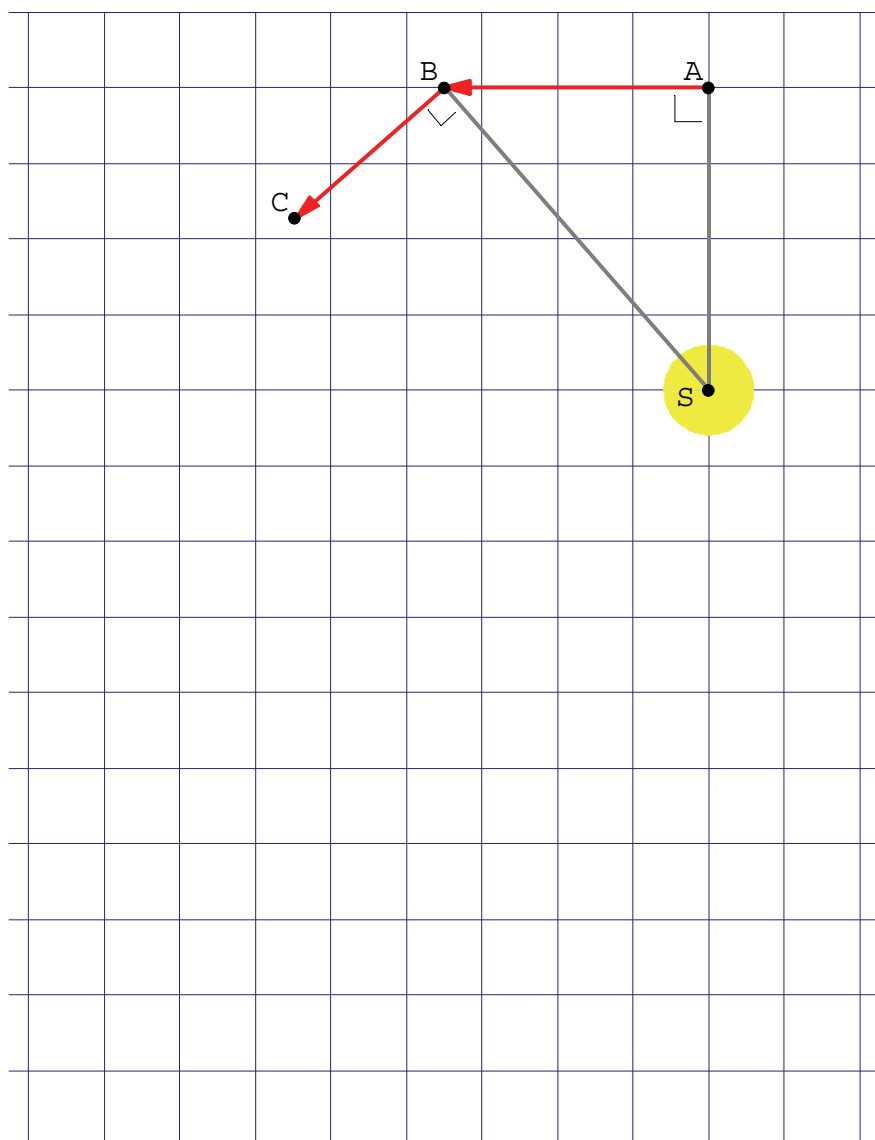
$$\frac{14}{\text{afstand tot midden van de Zon}}$$

Met deze aannames kunnen we construeren waar de komeet in achtereenvolgende dagen terechtkomt (zie de figuur hiernaast).

- In positie A staat de invloed loodrecht op de lijn SA. Dat is de richting waarin de komeet gaat bewegen. De grootte van de verplaatsing in de eerste dag is: $\frac{14}{SA} = \frac{14}{4} = 3,5 \text{ cm}$. Na één dag bevindt de komeet zich in positie B.
- Vanaf positie B gaat de komeet loodrecht op SB bewegen. De grootte van de verplaatsing in de tweede dag is: $\frac{14}{SB} = \frac{14}{5,3} = 2,6 \text{ cm}$. Na twee dagen bevindt de komeet zich in C.

- b. Bepaal zelf waar de komeet in de volgende **vijf** dagen terecht komt. Gebruik je rekenmachine en je geodriehoek om een nette tekening te maken. Vul al doende ook onderstaande tabel verder in.

afstand	verplaatsing
SA = 4 cm	$\frac{14}{4} = 3,5 \text{ cm}$
SB = 5,3 cm	$\frac{14}{5,3} = 2,6 \text{ cm}$
SC = cm	$\frac{14}{\quad} = \quad \text{ cm}$



Als je constructie goed gegaan is, zie je dat de omkering van de komeet inderdaad verklaard wordt door de aannames die we gemaakt hebben. Maar je ziet ook dat er nog meer voorspellingen te doen zijn over de omkering.

- c. Uit de aannames volgt ook een voorspelling over de beweging van de komeet in de buurt van de Zon: de komeet beweegt **voor** / **achter** de Zon langs.
- d. Uit de aannames volgt ook hoeveel dagen het ongeveer duurt voordat de komeet helemaal is omgekeerd:

..... dagen.

- e. Schrijf hieronder op hoe je zou kunnen testen of de aannames goed zijn.

4.3 Tijdstapjes verkleinen

Laatste stap van de methode: de *tijdstapjes verkleinen*

Met de methode kun je stapje voor stapje construeren hoe een voorwerp gaat bewegen. Toch ontbreekt er duidelijk nog iets aan de methode. Kijk nog maar eens naar de baan ABC... die je zojuist geconstrueerd hebt. Die baan verloopt nogal schokkerig. Zo zal een komeet natuurlijk niet bewegen. De constructie moet duidelijk nog verbeterd worden, voordat je daarmee de beweging van de komeet *nauwkeurig* kunt voorspellen.

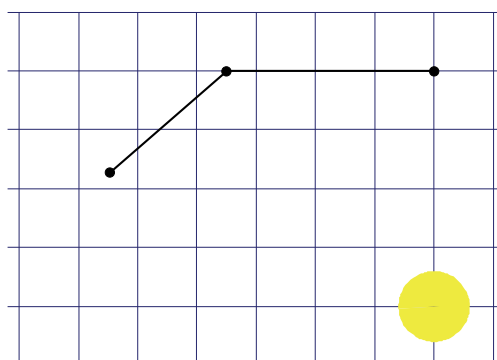
De reden voor de onnauwkeurigheid is duidelijk. We hebben in feite gedaan alsof de invloed een dag lang steeds in dezelfde richting werkt. Dan plotseling van richting verandert. Dan een dag lang in die nieuwe richting werkt. Dan weer plotseling van richting verandert. Enzovoorts. Het effect daarvan is dat de komeet een dag lang in een bepaalde richting zou bewegen. Dan plotseling van richting zou veranderen. Dan een dag lang in die nieuwe richting zou bewegen. Dan weer plotseling van richting zou veranderen. Enzovoorts.

Maar het is niet zo dat gedurende een dag de invloed steeds in dezelfde richting werkt. Zo gauw de komeet gaat bewegen, verandert de richting van de verbindinglijn met de Zon. En dus ook de richting waarin de komeet verplaatst wordt door de invloed. De richting van de invloed verandert dus *geleidelijk aan*, en niet schoksgewijs. Hetzelfde geldt voor de richting waarin de komeet beweegt.

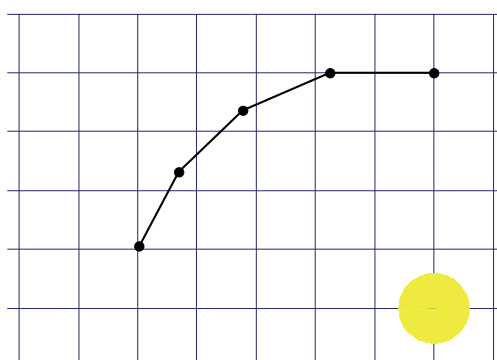
De manier om de constructie te verbeteren, is door met een *kleiner tijdstapje* te werken. Dan zitten er weliswaar nog steeds knikjes in de baan, maar tegelijkertijd is de baan wel vloeiender geworden. Door steeds kleinere en kleinere tijdstapjes te nemen, krijg je een steeds nauwkeuriger resultaat. Newton en Leibniz hebben een wiskundige theorie opgesteld, waarmee bepaald kan worden welke vloeiende baan je krijgt als je de tijdstapjes steeds kleiner maakt. Die theorie heet *differentiaalrekening*.

Tegenwoordig kun je ook zonder differentiaalrekening toch al nauwkeurig voorspellen hoe de komeet gaat bewegen volgens de aannames die je maakt. Namelijk door de computer te gebruiken om de beweging voor hele kleine tijdstapjes te construeren.

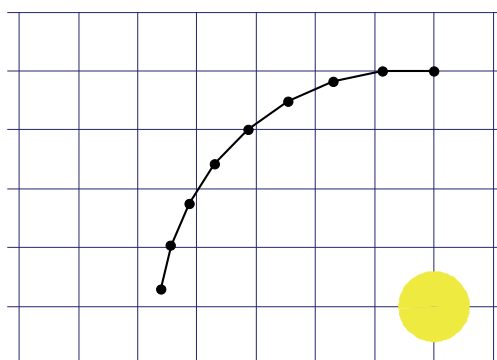
Door steeds kleinere tijdstapjes te nemen, wordt de geconstrueerde beweging steeds nauwkeuriger.



Tijdstap: 1 dag.



Tijdstap: $\frac{1}{2}$ dag.



Tijdstap: $\frac{1}{4}$ dag.

Opdracht 3 *Tijdstapjes verkleinen met behulp van de computer*

Om een nauwkeurige constructie te maken, moet je een vrij kleine tijdstap nemen (zie het kader hiernaast). Maar het nadeel daarvan is dat het erg veel reken- en tekenwerk wordt. Dat werk kun je echter ook aan een computer overlaten.

Open het bestand **ConstructieKomeet1** met het computerprogramma *Model-lus*. Druk in het controle-venster op de knop ► die voor *afspelen* staat. De computer maakt dan een constructie zoals je die zelf ook gemaakt hebt in opdracht 2. (Als je de constructie rustig stapje voor stapje wilt zien, schuif dan het blokje in de horizontale balk in het controle-venster helemaal naar links. Druk vervolgens steeds kort op het pijltje rechts van de balk.)

In feite maakt de computer de constructie twee keer, naast elkaar neergezet. De computer stopt met de constructie aan het eind van de omkering.

- a. Ga na of de constructie door de computer klopt met die van jou. **Ja / Nee**

In het venster *Initial Conditions* zie je met welke waarde van de tijdstap de computer de constructie maakt. Voor de linker constructie geldt de waarde van *tijdstap_links*; voor de rechterconstructie die van *tijdstap_rechts*. In het weergegeven geval zijn beide tijdstappen 1.0 dag. Daarom zijn beide constructies ook hetzelfde.

Door één van de twee waarden te veranderen, kun je de constructies bij twee verschillende tijdstappen met elkaar vergelijken. Verander de waarde van *tijdstap_rechts* bijvoorbeeld eens naar 0.8. (Let op! Het programma werkt met een Engelse notatie, dus nul-punt-acht in plaats van nul-komma-acht. Verder moet je het programma eerst stil zetten voordat je de waarde kunt veranderen. Dat doe je door in het controle-venster op de stop-knop ■ te drukken.) Laat de computer opnieuw de bewegingen construeren, nadat je de waarde van *tijdstap_rechts* hebt veranderd naar 0.8. Dan krijg je links de constructie met een tijdstap van 1.0 dag, en rechts de constructie met een tijdstap van 0.8 dag.

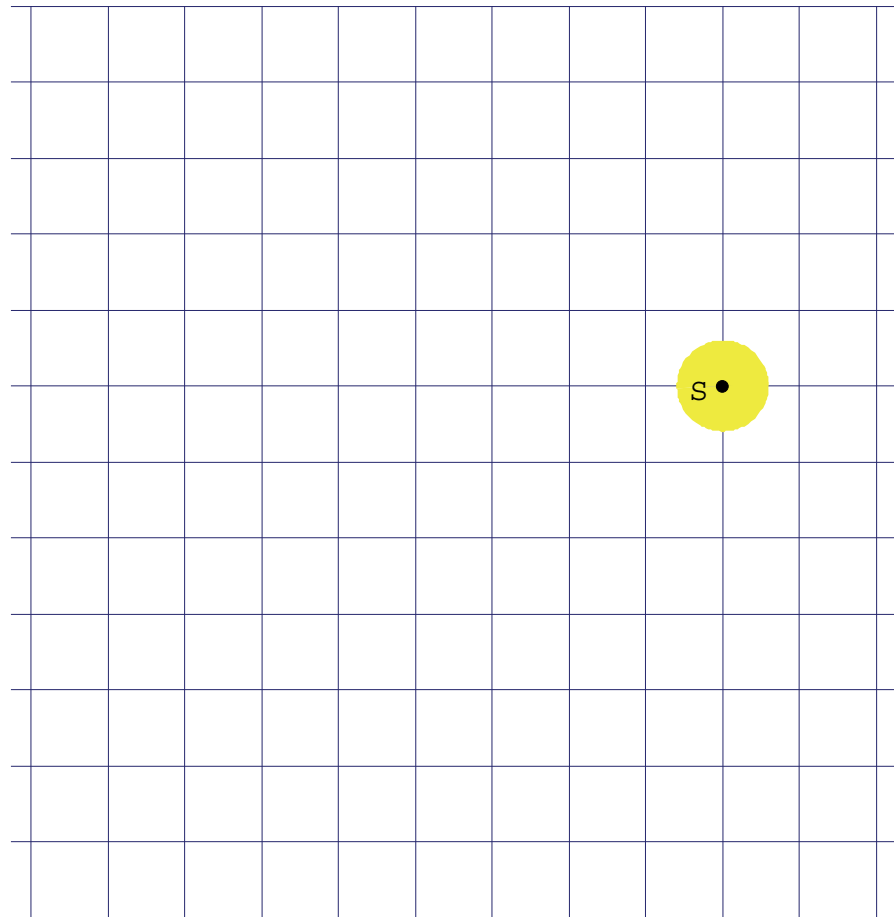
Door daarna de waarde van *tijdstap_links* te veranderen in bij voorbeeld 0.4, kun je de constructies vergelijken met tijdstappen van 0.4 dag en 0.8 dag. Enzovoorts.

- b. Welke verschillen zie je ontstaan bij verkleining van de tijdstap?

- c. Leg uit waarom die verschillen ontstaan, wanneer je de tijdstap verkleint.

Door de tijdstap kleiner en kleiner te maken, benader je steeds beter de baan waarlangs de komeet beweegt volgens de aannames die je maakt. Maar hoe klein moet je de tijdstap maken om er zeker van te zijn dat je die baan ook echt te pakken hebt? Je kunt daar vrij zeker van zijn, wanneer de geconstrueerde baan nauwelijks meer verandert als je de tijdstap nog kleiner maakt.

- d. Maak de constructie preciezer door de tijdstap kleiner en kleiner te nemen. Ga daarmee door totdat de geconstrueerde baan nauwelijks nog verandert. Teken hieronder die baan. Dat is dus de baan waarlangs de komeet beweegt volgens de aannames die we gemaakt hebben.



- e. Schrijf hieronder op wat de vorm is van de baan waarlangs de komeet beweegt volgens de aannames die we gemaakt hebben.

4.4 Een andere weergave van de constructie

Alleen het eindresultaat weergeven en niet meer de hele constructie

Wanneer je de computer een constructie met een hele kleine tijdstap laat maken, ziet het er al gauw wat rommelig uit met al die kleine pijltjes. Om een overzichtelijker beeld te krijgen, is het handiger om alleen de invloed zelf weer te geven. En dus niet meer al die kleine verplaatsinkjes die de invloed in opeenvolgende tijdstapjes veroorzaakt.

Opdracht 4 *Het eindresultaat van de constructie bekijken*

Het bestand **ResultaatKomeet1** laat alleen het eindresultaat zien van de constructie. Natuurlijk berekent de computer alle verplaatsinkjes nog wel, en zelfs heel nauwkeurig. Het bestand **ResultaatKomeet1** werkt namelijk met een tijdstap van 0.05 dag (dit is $\frac{1}{20}$ dag, dus ongeveer 1 uur). Voor elk van die tijdstapjes wordt de verplaatsing berekend die de invloed veroorzaakt. Maar al die verplaatsinkjes worden niet meer apart weergegeven. Wel wordt de invloed weergegeven, door de paarse pijl.

Speel het bestand **ResultaatKomeet1** af, en let op de paarse pijl die de invloed voorstelt.

- a. Verandert de paarse pijl van richting? **Ja / Nee**
Leg hieronder uit waarom wel of niet.

- b. Verandert de paarse pijl van grootte? **Ja / Nee**
Leg hieronder uit waarom wel of niet.

Voordelen en nadelen van de andere weergave

Een voordeel van de weergave uit opdracht 4 is dat een overzichtelijk beeld ontstaat. Je ziet als het ware een film van hoe de komeet gaat bewegen volgens de aannames die je gemaakt hebt. Een nadeel van deze weergave is dat je niet meer kunt zien hoe de constructie tot stand komt. Natuurlijk berekent de computer alle verplaatsinkjes nog wel, maar ze worden niet meer apart weergegeven. In onderstaand kader staat wat achtergrondinformatie over het verband tussen de invloed en de verplaatsing die de invloed in een tijdstap veroorzaakt.

Verband tussen de invloed en de verplaatsing in een tijdstap (extra)

In een constructie stellen de rode pijlen het effect voor dat de invloed heeft in een tijdstap. Over die afstand verplaatst de komeet in die tijdstap ten gevolge van de invloed. Bij een kleinere tijdstap worden die verplaatsingen kleiner. Niet omdat de invloed kleiner wordt, maar simpelweg omdat in een kleinere tijdstap het effect van de invloed kleiner is. Er geldt voor het verband tussen de invloed en de verplaatsing die de invloed in een tijdstap veroorzaakt:

$$(\text{verplaatsing door invloed in tijdstap}) = (\text{invloed}) \times (\text{tijdstap})$$

De computer gebruikt deze formule om bij een kleinere tijdstap te berekenen hoe groot de verplaatsing in de tijdstap is.

4.5 Terugblik en vooruitblik

In dit hoofdstuk heb je een methode geleerd om een beweging te construeren. Die methode werkt bij een aanname over de invloed in combinatie met Keplers aanname over de beweging uit zichzelf: stilstaan. In het volgende hoofdstuk ga je precies hetzelfde doen, maar dan met Newtons aanname over de beweging uit zichzelf: rechtdoor bewegen. Je gaat na of ook bij die aanname een invloed te bedenken is waarmee de omkering van komeet Kirch verklaard kan worden.

Opdracht 5 *De constructiemethode als perfectionering van de systematische aanpak*

In feite is de constructiemethode een verbeterde versie van de systematische aanpak die je geleerd hebt in hoofdstuk 3. Door de verbeteringen kun je nu veel nauwkeuriger de baan tekenen waarlangs een voorwerp gaat bewegen volgens de aannames die je maakt.

Schrijf hieronder op wat de verbeteringen zijn, waardoor je nu tot veel nauwkeuriger resultaten kunt komen dan in hoofdstuk 3.

5 Nauwkeurige constructies maken met als aanname over de beweging uit zichzelf: rechtdoor bewegen

5.1 Inleiding

We gaan nu na hoe de constructiemethode werkt met een andere aanname over de beweging uit zichzelf: rechtdoor blijven bewegen. Dit is Newtons aanname. Wat hetzelfde blijft is:

1. de beweging in tijdstapjes verdelen;
2. de tijdstapjes verkleinen om nauwkeurige resultaten te krijgen.

5.2 Een beweging in tijdstapjes

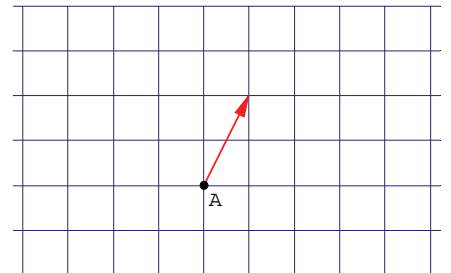
De constructiemethode met *rechtdoor bewegen* als aanname over de beweging uit zichzelf

Veronderstel dat een voorwerp op een gegeven moment in A zit. Waar zal het een tijdje later zijn?

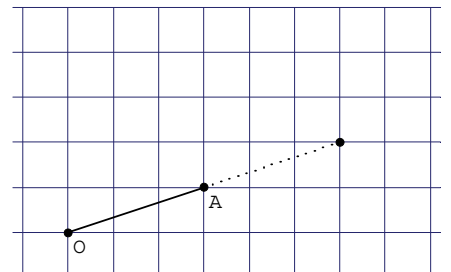
1. Om deze vraag te beantwoorden, moet je ook volgens Newton rekening houden met het effect dat de invloed heeft in het tijdstapje (zie de rode pijl).
2. Maar volgens Newton moet je tevens bedenken dat het voorwerp uit zichzelf ook al verder zou bewegen: rechtdoor met de snelheid die het al heeft. Dat is zijn aanname over de beweging uit zichzelf. Maar om de verplaatsing uit zichzelf te kunnen bepalen, heb je meer informatie nodig. Je moet weten uit welke richting het voorwerp komt en wat zijn snelheid is. Volgens Newton is het voldoende om te weten waar het voorwerp een (even groot) tijdstapje *eerder* was. Stel dat het toen in O zat. Dan zou het voorwerp in het tijdstapje vanaf A uit zichzelf naar het eind van de stippellijn verplaatsen. Want dat is een voortzetting van de richting waarin het al bewoog (de lijn OA). En het is een voortzetting van de snelheid die het al had, want de stippellijn is even lang als OA.
3. Volgens Newton komt het voorwerp na het volgende tijdstapje terecht in positie B. Dit is de 'optelsom' van:
 - (a) waar het voorwerp uit zichzelf terecht zou zijn gekomen;
 - (b) de door de invloed veroorzaakte afwijking hiervan.

De optelsom bepaal je door de stippellijn evenwijdig aan de rode pijl te verschuiven. De figuur wordt een parallellogram met als zijden de verplaatsing uit zichzelf en de afwijking door de invloed.

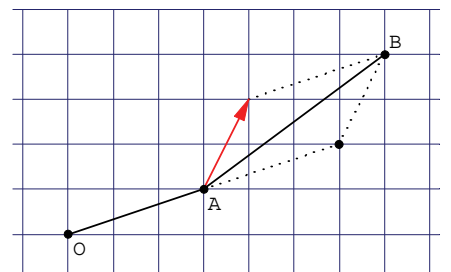
Deze stap kun je nu herhalen. Je weet wat de verplaatsing uit zichzelf is in het volgende tijdstapje: een voortzetting van de lijn AB. Als je ook weet wat het effect is van de invloed in dat tijdstapje, kun je de verplaatsing uit zichzelf en de verplaatsing door de invloed weer optellen. Enzovoorts.



De invloed heeft een effect op de verplaatsing in de volgende tijdstap (rode pijl).



Volgens Newton zou het voorwerp uit zichzelf ook al verplaatsen (stippellijn).



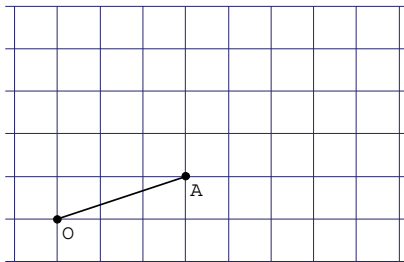
Optelsom van de verplaatsing uit zichzelf en de afwijking door de invloed.

In de opdrachten 1 t/m 4 ga je oefenen met de nieuwe constructiemethode. Daarna ga je deze methode toepassen op de beweging van komeet Kirch.

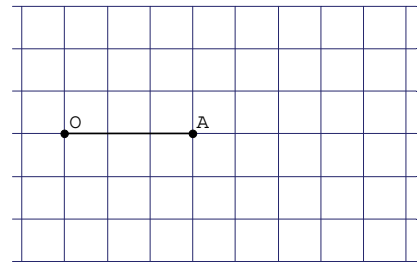
Opdracht 1 *Waar zou het voorwerp zonder invloed terechtkomen, als het uit zichzelf rechtdoor beweegt met de snelheid die het al heeft?*

Hieronder staan vier voorbeelden van een voorwerp dat in een klein tijdstapje van O naar A is gegaan. Teken met een stippellijn waar het voorwerp zonder invloed in het volgende, even grote, tijdstapje terecht zou komen. Neem als aanname over de beweging uit zichzelf: rechtdoor blijven bewegen.

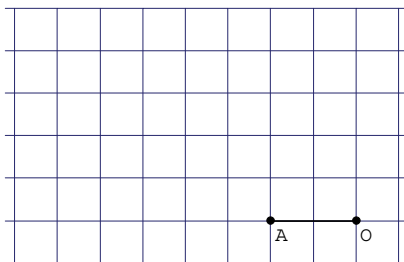
1.



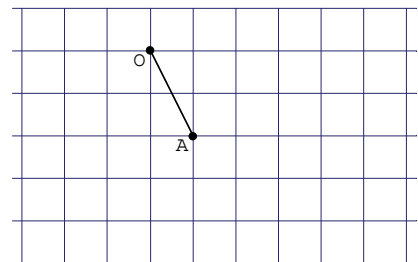
2.



3.



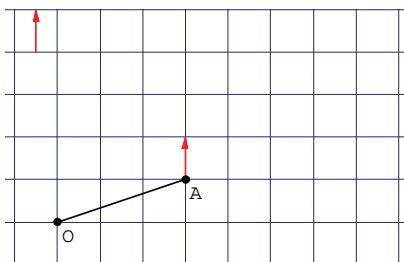
4.



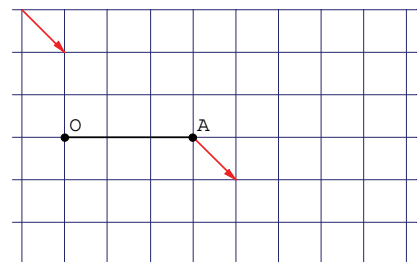
Opdracht 2 *Waar zou het voorwerp met invloed terechtkomen, onder dezelfde aanname over de beweging uit zichzelf?*

Teken hieronder ook steeds waar het voorwerp in het volgende tijdstapje terechtkomt. Nu werkt er echter ook een invloed. Die veroorzaakt in elk van de voorbeelden een afwijking zoals weergegeven door de rode pijl. Neem weer dezelfde aanname over de beweging uit zichzelf.

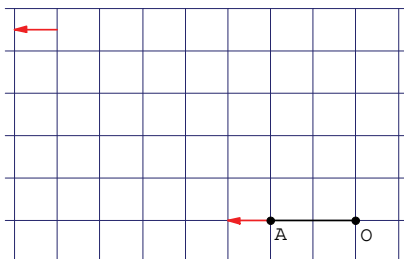
1.



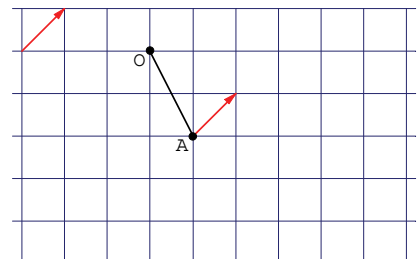
2.



3.

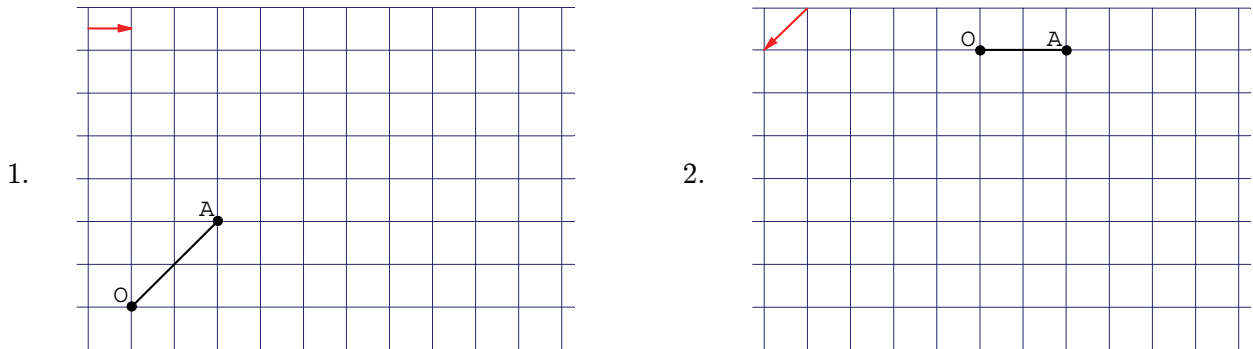


4.



Opdracht 3 *Twee stappen van de methode achter elkaar*

Teken hieronder waar het voorwerp in de volgende **twee** tijdstapjes terecht komt. Neem aan dat de invloed in beide tijdstapjes een afwijking veroorzaakt waarvan de grootte en richting gegeven worden door de rode pijl. Neem weer als aanname over de beweging uit zichzelf: rechtdoor blijven bewegen.



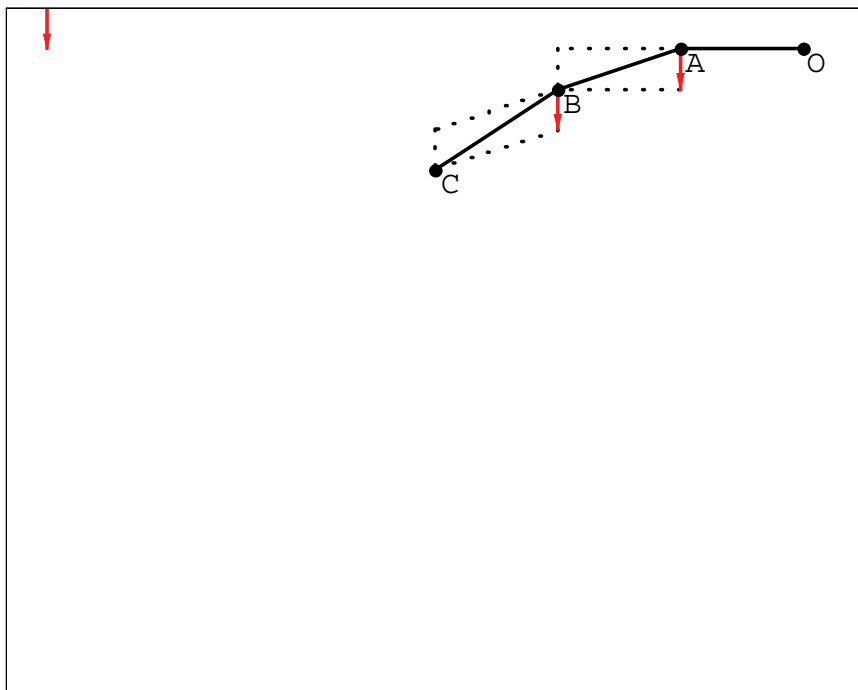
Opdracht 4 *Een constante invloed en ‘rechtdoor blijven bewegen’ als aanname over de beweging uit zichzelf*

Maak hieronder een constructie van hoe een voorwerp gaat bewegen, als je de volgende aannames maakt:

- Er werkt een constante invloed. In ieder tijdstapje veroorzaakt deze een afwijking zoals weergegeven door de rode pijl.
- Uit zichzelf zou het voorwerp rechtdoor bewegen met de snelheid die het al heeft.

Voor de eerste twee tijdstapjes vanaf A is de constructie al gegeven.

Construeer zelf waar het voorwerp in de volgende **drie** tijdstapjes terecht komt. Gebruik je geodriehoek om een nette constructie te maken.



Opdracht 5 *Conclusies trekken uit een constructie*

Kijk eens naar de constructie die je gemaakt hebt bij de vorige opdracht. Op grond daarvan kun je al conclusies trekken over de beweging volgens de twee aannames die daar gemaakt zijn. Dus volgens de combinatie van de aanname dat er een constante invloed werkt en de aanname dat het voorwerp uit zichzelf rechtdoor zou bewegen met de snelheid die het al heeft.

- a. Omcirkel wat volgens jou het geval is.
 - (1) Het voorwerp gaat in de loop van de tijd langzamer bewegen.
 - (2) Het voorwerp blijft steeds even snel bewegen.
 - (3) Het voorwerp gaat in de loop van de tijd sneller bewegen.
- b. Leg hieronder uit hoe je dit aan de constructie kunt zien.

Opdracht 6 *De omkering van de komeet proberen te verklaren*

De nieuwe constructiemethode gebruikt als aanname over de beweging uit zichzelf: rechtdoor blijven bewegen. In deze opdracht ga je na of ook met deze aanname de omkering van komeet Kirch te verklaren valt. Voordat je dat kunt nagaan, moet natuurlijk ook nog een aanname gemaakt worden over de invloed die op de komeet werkt. Uit de twee aannames samen moet dan met de constructiemethode volgen dat de komeet omkeert.

- a. Het zal niet lukken om de omkering te verklaren met de aanname dat er op de komeet een constante invloed werkt zoals bij opdracht 4.
Leg uit waarom niet.

Bestudeer eerst de aanname over een invloed op de komeet in nevenstaand kader. Ga daarna verder met de vragen op bladzijde 44. Daarin ga je na of met deze invloed de omkering verklaard kan worden.

Een aanname over de invloed op de komeet

Laten we eens de volgende aanname maken over de invloed op de komeet.

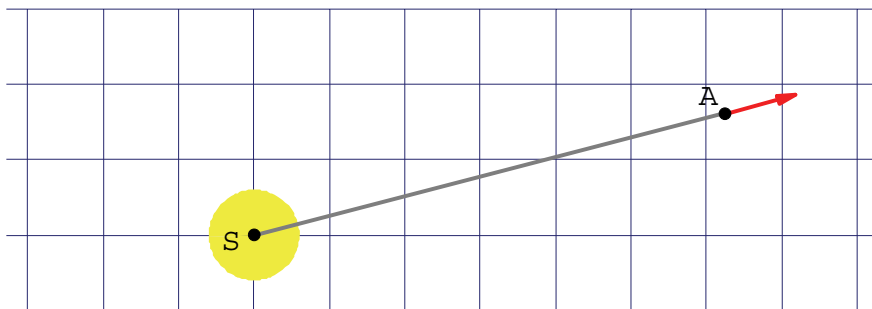
- De invloed wordt uitgeoefend door *de Zon*.
- De invloed is *afstotend*.
- De invloed is *kleiner*, naarmate de komeet *verder van* de Zon af is.

Ideeën achter deze aanname Je zou je kunnen voorstellen dat de Zon en de komeet allebei magneten zijn, en dat hun noordpolen naar elkaar toe gericht zijn. Dan krijg je een afstotende invloed.

De beweging construeren die je volgens de aannames krijgt Stel dat een komeet op een gegeven moment in positie A is. Waar bevindt de komeet zich dan een dag later? Wat je daarvoor in ieder geval moet weten, is de afwijking die door de invloed veroorzaakt wordt. De invloed is afstotend, dus is de afwijking van de Zon af gericht. Maar hoe groot is de afwijking die de invloed veroorzaakt in één dag? Daar heb je nog extra informatie voor nodig. De volgende formule geeft die informatie.

$$\text{grootte afwijking in 1 dag} = \frac{40}{(\text{afstand tot midden van de Zon})^2}$$

In deze formule moet je niet de echte afstand tussen de komeet en de Zon invullen, maar de afstand op schaal. De formule geeft dan, op schaal, de grootte van de afwijking door de invloed.



In positie A is de afstand tot het midden van de Zon: $SA = 6,45$ cm. Volgens de formule is de grootte van de afwijking dan dus: $\frac{40}{(6,45)^2} = 0,96$ cm. Dit is de lengte van de rode pijl.

Er is nu een aanname gemaakt over de beweging uit zichzelf: rechtdoor blijven bewegen. En er is een aanname gemaakt over de invloed op de komeet:

- De invloed is afstotend. De afwijking door de invloed is dus van de Zon af gericht.
- De grootte van de afwijking in één dag wordt gegeven door:

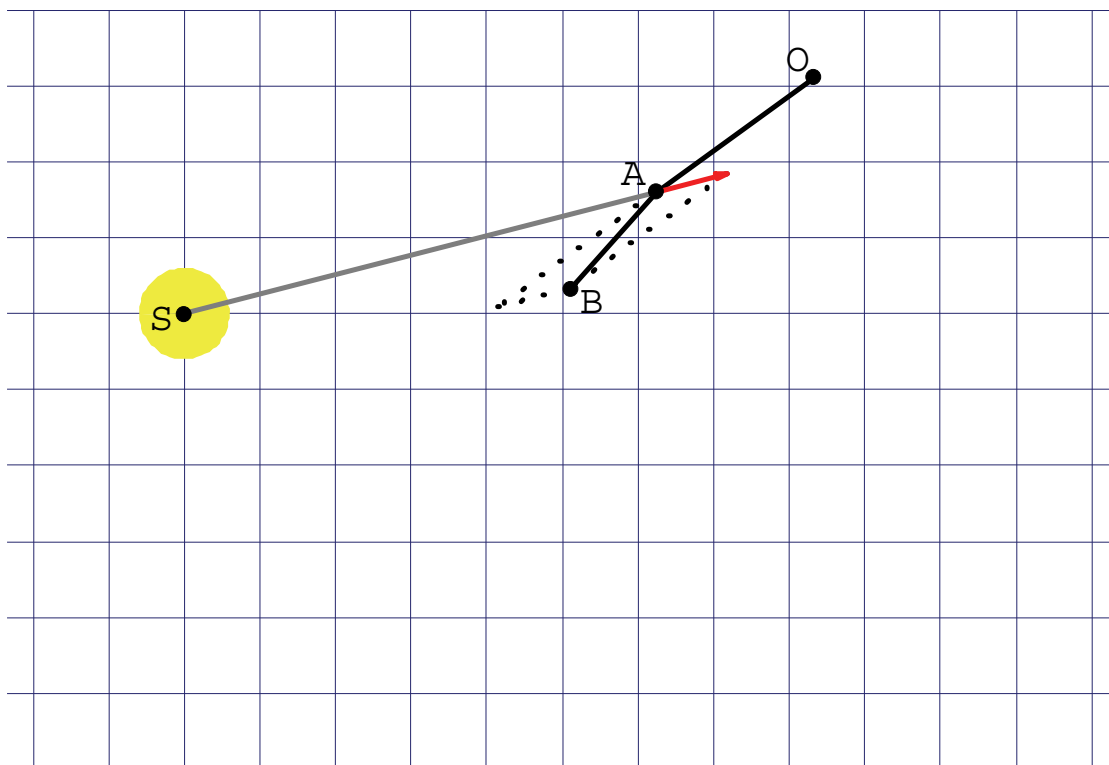
$$\frac{40}{(\text{afstand tot midden van de Zon})^2}$$

Met deze aannames kunnen we construeren waar de komeet in achtereenvolgende dagen terechtkomt (zie de figuur hiernaast). We moeten eerst nog wel weten waar de komeet één dag eerder was. Dat is positie O.

- Uit zichzelf zou de komeet de volgende dag in het verlengde van OA bewogen hebben, tot aan het eind van de stippellijn.
- De invloed heeft daar een afwijking van veroorzaakt. Die afwijking is van de Zon afgericht. In positie A staat de invloed dus in het verlengde van de lijn SA. De grootte van de afwijking in de eerste dag is: $\frac{40}{(\text{SA})^2} = \frac{40}{(6,45)^2} = 0,96 \text{ cm}$.
- Door optellen van de verplaatsing uit zichzelf en de afwijking door de invloed, vind je dat na de eerste dag de komeet zich bevindt in positie B.

- b. Bepaal zelf waar de komeet in de volgende **drie** dagen terecht komt. Gebruik je rekenmachine en je geodriehoek om een nette tekening te maken. Vul al doende ook onderstaande tabel verder in.

afstand	afwijking door invloed
SA = 6,45 cm	$\frac{40}{(6,45)^2} = 0,96 \text{ cm}$
SB = cm	



Als je constructie goed gegaan is, zie je dat de omkering van de komeet inderdaad verklaard wordt door de aannames die we gemaakt hebben. Maar je ziet ook dat er nog meer voorspellingen te doen zijn over de omkering.

- c. Uit de aannames volgen voorspellingen over de beweging van de komeet in de buurt van de Zon.

- De komeet beweegt **voor** / **achter** de Zon langs.
- In de buurt van de Zon beweegt de komeet **langzamer** / **sneller**.

- d. Uit de aannames volgt ook hoeveel dagen het ongeveer duurt voordat de komeet helemaal is omgekeerd:

..... dagen.

- e. Schrijf hieronder op hoe je zou kunnen testen of de aannames goed zijn.

5.3 Tijdstapjes verkleinen

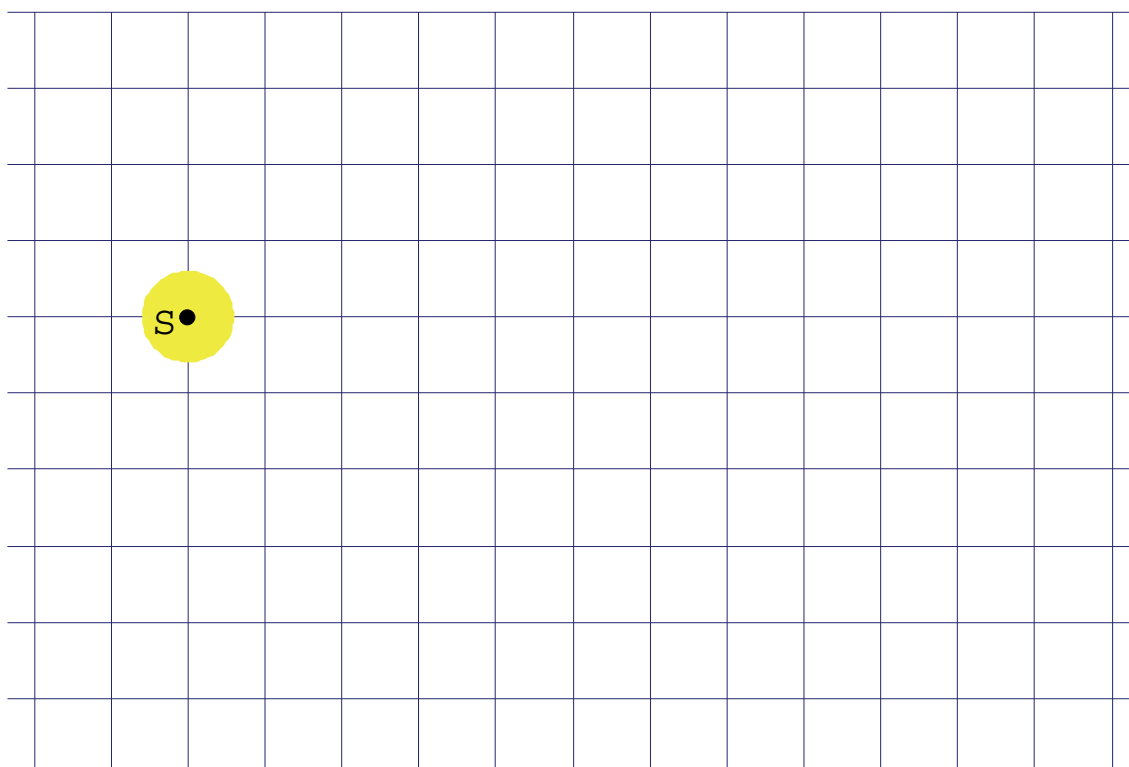
Ook nu ontbreekt er duidelijk weer iets aan de methode. Kijk nog maar eens naar de baan OABC... die je zojuist geconstrueerd hebt. Die baan verloopt nogal schokkerig. Zo zal een komeet natuurlijk niet bewegen. De constructie moet duidelijk nog verbeterd worden, voordat je daarmee de beweging van de komeet *nauwkeurig* kunt voorspellen. De tijdstap moet weer verkleind worden.

Opdracht 7 *Tijdstapjes verkleinen met behulp van de computer*

Om een nauwkeuriger constructie te maken, moet je een kleinere tijdstap nemen. Daarbij gebruiken we weer handig de computer om het vele reken- en tekenwerk te vermijden.

Open het bestand **ConstructieKomeet2** met het computerprogramma *Model-lus*. De computer maakt dan een constructie met een tijdstap van 1.0 dag. De computer stopt aan het eind van de omkering.

- Ga na of de constructie door de computer klopt met die van jou. **Ja / Nee**
- Door de tijdstap kleiner en kleiner te maken, benader je steeds beter de baan waarlangs de komeet beweegt volgens de aannames die je maakt. Schrijf op hoe je je ervan kunt verzekeren dat je die baan ook echt te pakken hebt.
- Bepaal de baan waarlangs de komeet beweegt volgens de aannames die we gemaakt hebben. Teken die baan hieronder.



5.4 Een andere weergave van de constructie

Alleen het eindresultaat weergeven en niet meer de hele constructie

Wanneer je de computer een constructie met een hele kleine tijdstap laat maken, ziet het er al gauw wat rommelig uit met al die kleine pijltjes. Bovendien heb je nu te maken met twee soorten pijlen: de verplaatsing uit zichzelf en de afwijking door de invloed. De verplaatsing uit zichzelf is de afstand waarover de komeet in een tijdstapje beweegt omdat hij al een snelheid heeft. De afwijking door de invloed is het effect van de invloed in een tijdstap. Om een overzichtelijker beeld te krijgen, is het handiger om niet meer al die kleine verplaatsinkjes in opeenvolgende tijdstapjes weer te geven.

Opdracht 8 *Het eindresultaat van de constructie bekijken*

Het bestand **ResultaatKomeet2** laat alleen het eindresultaat zien van de constructie. De computer berekent alle verplaatsinkjes nog wel, en zelfs heel nauwkeurig. Het bestand **ResultaatKomeet2** werkt met een tijdstap van 0.05 dag (dit is $\frac{1}{20}$ dag, dus ongeveer 1 uur). Voor elk tijdstapje worden de verplaatsing uit zichzelf en de afwijking door de invloed berekend en bij elkaar opgeteld. Maar dit alles wordt niet meer weergegeven. Wel wordt de invloed weergegeven, door een paarse pijl.

Speel het bestand **ResultaatKomeet2** af. Let op de paarse pijl die de invloed voorstelt.

- a. Verandert de paarse pijl van richting? **Ja / Nee**
Leg hieronder uit waarom wel of niet.

- b. Verandert de paarse pijl van grootte? **Ja / Nee**
Leg hieronder uit waarom wel of niet

Voordelen en nadelen van de andere weergave

Een voordeel van de weergave uit opdracht 8 is weer dat er een overzichtelijk beeld ontstaat. Je ziet als het ware een film van hoe de komeet gaat bewegen volgens de aannames die je gemaakt hebt. Een nadeel van deze weergave is dat je niet meer kunt zien hoe de constructie tot stand komt. De computer berekent alle verplaatsinkjes nog wel, zowel die uit zichzelf als die door de invloed, en telt ze ook nog op. Maar dit wordt niet langer allemaal nog apart weergegeven. In het kader op de volgende bladzijde staat wat achtergrondinformatie over de formules die de computer gebruikt. Je hoeft deze formules niet te kennen.

De verplaatsing uit zichzelf en de afwijking in een tijdstap (extra)

In een constructie stellen de stippellijnen de verplaatsing uit zichzelf voor. Over die afstand verplaatst de komeet omdat hij al een snelheid heeft. Bij een kleinere tijdstap worden die verplaatsingen kleiner. Dat komt doordat in een kleinere tijdstap de komeet een kleinere afstand aflegt met de snelheid die hij al heeft. Er geldt voor het verband tussen de snelheid en de verplaatsing uit zichzelf in een tijdstap:

$$(\text{verplaatsing uit zichzelf in tijdstap}) = (\text{snelheid}) \times (\text{tijdstap})$$

In een constructie stellen de rode pijlen het effect voor dat de invloed heeft in een tijdstap. Over die afstand verplaatst de komeet in die tijdstap ten gevolge van de invloed. Bij een kleinere tijdstap worden die verplaatsingen kleiner. Dat komt doordat in een kleinere tijdstap het effect van de invloed kleiner is. Er geldt voor het verband tussen de invloed en de afwijking die de invloed in een tijdstap veroorzaakt:

$$(\text{afwijking door invloed in tijdstap}) = (\text{invloed}) \times (\text{tijdstap})^2$$

Het voert nu te ver om uit te leggen waarom in dit geval de verplaatsing door de invloed evenredig is met het *kwadraat* van de tijdstap. Later zal je daar meer over leren. De computer gebruikt deze formules om te berekenen hoe groot de verplaatsing uit zichzelf en de verplaatsing door de invloed zijn in een tijdstap.

6 Vergelijking van de constructiemethodes

6.1 Inleiding

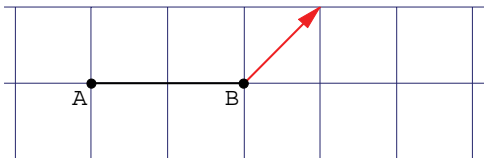
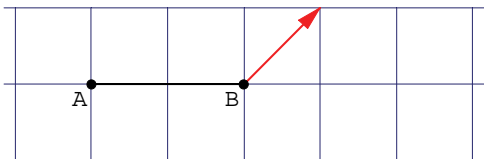
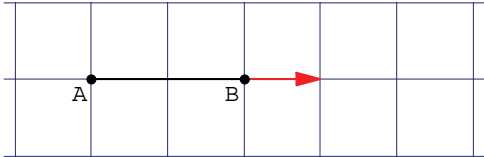
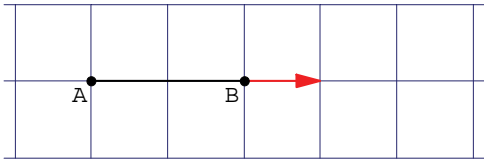
Dit hoofdstuk is een terugblik op de voorgaande twee hoofdstukken. Je hebt twee methodes geleerd om nauwkeurige constructies te maken. De ene werkt met *stilstaan* als aanname over de beweging uit zichzelf; de andere met *rechtdoor blijven bewegen*. Wat zijn nu precies de verschillen en overeenkomsten?

Dit hoofdstuk is ook een vooruitblik op wat later gaat komen. Je hebt namelijk op twee manieren verklaard dat een komeet omkeert in de buurt van de Zon. Maar die verklaringen zijn heel verschillend. Welke van die verklaringen is nu goed, of zijn ze geen van beide goed? En hoe zou je dat kunnen testen?

6.2 Verschillen en overeenkomsten

Opdracht 1 *De constructiemethodes met elkaar vergeleken*

- a. Een voorwerp beweegt in een tijdstapje van A naar B. In het volgende tijdstapje veroorzaakt de invloed een afwijking die gegeven is door de rode pijl. Waar het voorwerp in het tijdstapje vanaf B naartoe beweegt, hangt nog af van de aanname die gemaakt wordt over de beweging uit zichzelf. Teken in de volgende vier voorbeelden waar het voorwerp in het tijdstapje vanaf B terechtkomt.

aanname voor de beweging uit zichzelf	waar komt het voorwerp in het tijdstapje vanaf B terecht?
Keplers aanname	
Newtons aanname	
Keplers aanname	
Newtons aanname	

- b. Schrijf hieronder op wat je bij beide constructiemethodes moet doen om hele nauwkeurige resultaten te krijgen.
- c. Kies bij de volgende twee beweringen het juiste antwoord.
- (1) Om te bepalen waar een voorwerp in een volgend tijdstapje terecht komt, moet je weten waar het voorwerp een tijdstapje eerder was.
- i. Dat is *alleen* het geval *bij Keplers aanname* over de beweging uit zichzelf.
 - ii. Dat is *alleen* het geval *bij Newtons aanname* over de beweging uit zichzelf.
 - iii. Dat is het geval *bij beide* aannames.
 - iv. Dat is *bij geen van beide* aannames het geval.
- (2) De beweging gaat altijd in de richting van de invloed.
- i. Dat is *alleen* het geval *bij Keplers aanname* over de beweging uit zichzelf.
 - ii. Dat is *alleen* het geval *bij Newtons aanname* over de beweging uit zichzelf.
 - iii. Dat is het geval *bij beide* aannames.
 - iv. Dat is *bij geen van beide* aannames het geval.

Opdracht 2 *De constructiemethodes en het basisidee van bewegingsverklaring*

Beide methodes komen neer op stapje voor stapje gebruik maken van het basisidee van bewegingsverklaring:

Een *invloed* veroorzaakt een *afwijking* van hoe iets *uit zichzelf* al zou bewegen.

Leg hieronder uit waarom de methodes net wat anders werken, ook al ligt aan beide hetzelfde basisidee ten grondslag.

6.3 De beweging volgens een theorie

Een aanname over de invloed gecombineerd met een aanname over de beweging uit zichzelf noemen we een *bewegingstheorie*. Als je een bewegingstheorie bedacht hebt, kun je vervolgens nauwkeurig gaan bepalen hoe een voorwerp gaat bewegen *volgens die theorie*. Namelijk door de constructiemethode te gebruiken die past bij de aanname die je in de theorie maakt over de beweging uit zichzelf. Wanneer *stilstaan* de aanname is, moet je de methode uit hoofdstuk 4 gebruiken. En wanneer *rechtdoor blijven bewegen* de aanname is over de beweging uit zichzelf, moet je de methode uit hoofdstuk 5 gebruiken.

Opdracht 3 *Verschillende bewegingstheorieën voor komeet Kirch*

In feite heb je in de hoofdstukken 4 en 5 voor de beweging van komeet Kirch al twee theorieën leren kennen.

1. *Een theorie die aanneemt dat de komeet uit zichzelf stil zou staan. En die verder aanneemt dat de Zon een invloed uitoefent die steeds dwars staat op de verbindinglijn tussen Zon en komeet. Dit noemen we nu even **theorie 1**.*
2. *Een theorie die aanneemt dat de komeet uit zichzelf met dezelfde snelheid rechtdoor zou blijven bewegen. En die bovendien aanneemt dat de Zon een afstotende invloed uitoefent. Deze theorie noemen we nu even **theorie 2**.*

Kijk nog eens terug naar de hoofdstukken 4 en 5. Let daarbij vooral op de overeenkomsten en verschillen in de voorspellingen die theorie 1 en theorie 2 doen.

- a. Schrijf hieronder een overeenkomst op in de beweging van komeet Kirch volgens theorie 1 en de beweging van komeet Kirch volgens theorie 2.
- b. Schrijf hieronder enkele verschillen op in de beweging van komeet Kirch volgens theorie 1 en de beweging van komeet Kirch volgens theorie 2.

*Er zijn nog veel meer bewegingstheorieën voor komeet Kirch te bedenken. Neem bijvoorbeeld de volgende theorie, die we **theorie 3** noemen. Theorie 3 heeft als aanname over de beweging uit zichzelf: rechtdoor blijven bewegen. Verder oefent de Zon volgens theorie 3 juist een aantrekkende invloed uit.*

- c. Schrijf hieronder op welke stappen je allemaal moet zetten om nauwkeurig te bepalen hoe komeet Kirch beweegt volgens theorie 3.

Er zijn verschillende theorieën te bedenken voor de beweging van komeet Kirch: theorie 1, theorie 2, theorie 3, ... Al die theorieën doen een voorspelling over de manier waarop komeet Kirch bewogen zal hebben.

- d. Schrijf op wat je eigenlijk zou moeten weten om te kunnen testen welke van de theorieën het beste is.

6.4 Terugblik en vooruitblik

Opdracht 4 *Ben je al dichterbij het hoofddoel van de cursus gekomen?*

Kijk nog eens terug naar het hoofddoel van deze cursus (zie bladzijde 11).

- a. Schrijf hieronder op welke vorderingen je gemaakt hebt met het bereiken van het hoofddoel, door te leren over de constructiemethodes.

- b. Schrijf hieronder op waarom het hoofddoel nog niet bereikt is, ondanks dat je die constructiemethodes nu kent.

- c. Schrijf hieronder een plan op waarmee je het hoofddoel misschien wel kunt bereiken.

7 Hoe de planeten in ons zonnestelsel bewegen

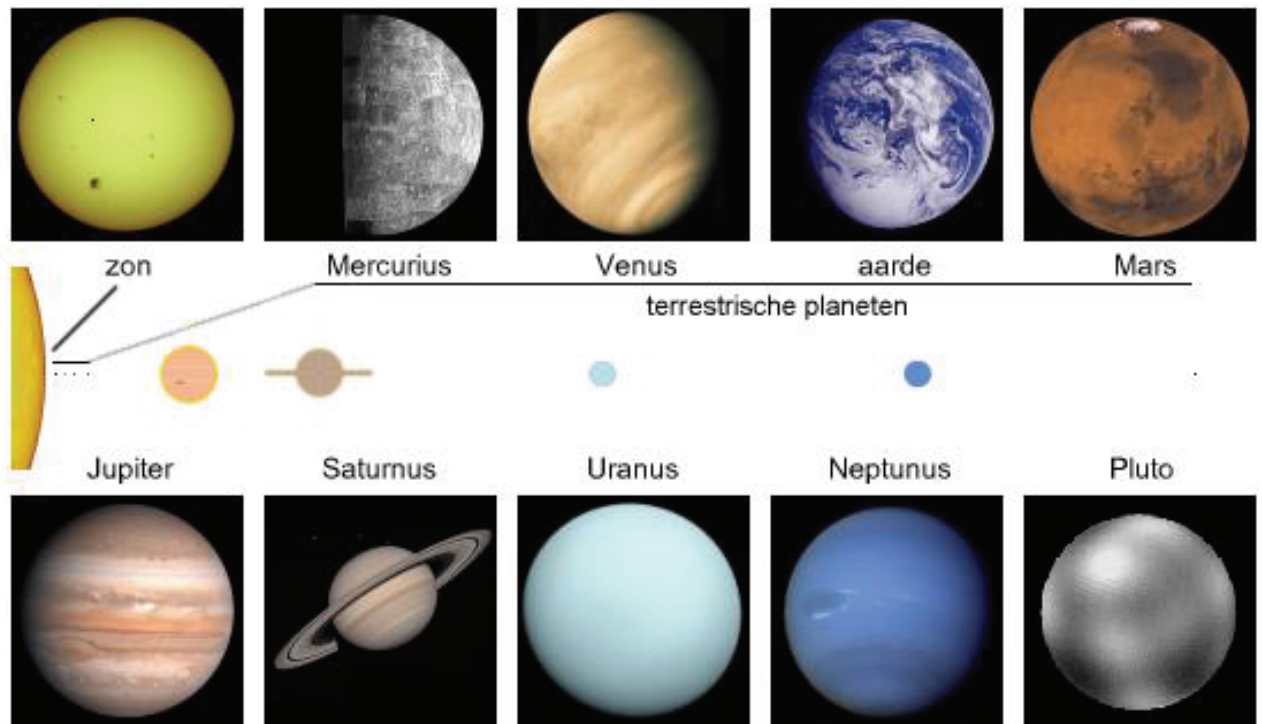
7.1 Inleiding

De constructiemethodes kunnen gebruikt worden om te testen of een bepaalde theorie klopt:

- *Construeer* hoe het voorwerp gaat bewegen volgens de theorie (dus volgens de aanname over de invloeden en de aanname over de beweging uit zichzelf).
- *Vergelijk* die theoretisch geconstrueerde beweging met hoe het voorwerp in het echt beweegt.

Om deze testmethode goed te kunnen gebruiken, kunnen we het beste voorwerpen nemen waarvan heel precies bekend is hoe ze bewegen. De planeten in ons zonnestelsel zijn zulke voorwerpen. Ook in de tijd van Kepler en Newton was daarover al een heleboel bekend. Om hun ideeën goed te kunnen testen aan de werkelijkheid, hebben zij daarom vooral theorieën opgesteld om de bewegingen van de planeten te verklaren. In dit hoofdstuk ga je eerst wat achtergrondkennis opdoen over de manier waarop planeten bewegen.

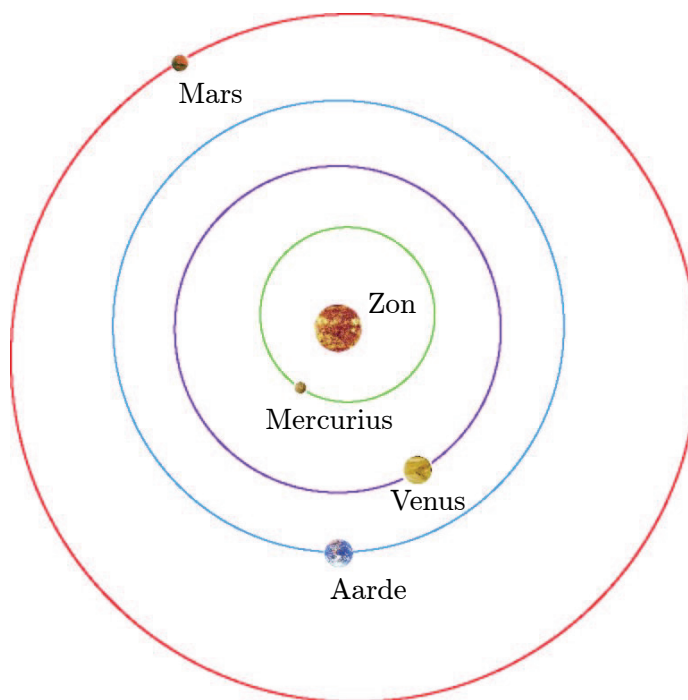
Boven en onder staan de Zon en de planeten afgebeeld. Ze zijn overigens niet allemaal even groot. In het midden kun je zien wat hun onderlinge verhoudingen zo ongeveer zijn. Ook kun je zien waar ze zich in ons Zonnestelsel bevinden. De vier stipjes meteen rechts van de Zon stellen Mercurius, Venus, de Aarde en Mars voor (van links naar rechts). In de tijd van Kepler en Newton waren Uranus, Neptunus en Pluto nog niet waargenomen. Tegenwoordig rekenen sterrenkundigen Pluto trouwens niet meer tot de planeten.



7.2 De banen en bewegingen van de planeten

Opdracht 1 *De banen en bewegingen in beeld gebracht*

Je bent er waarschijnlijk al vertrouwd mee dat de planeten in banen om de Zon bewegen. In deze opdracht leer je hoe die banen er precies uitzien en hoe ze doorlopen worden.



In de figuur zie je van enkele planeten welke baan ze doorlopen. Elk van de banen is een (bijna perfecte) *cirkel*. Maar de Zon staat niet precies in het middelpunt van die banen. Bij Mercurius en Mars kun je dit het beste zien. In de weergegeven posities bevinden de planeten zich het dichtst bij de Zon.

In de figuur kloppen de onderlinge verhoudingen van de groottes van de planeten. Alleen zouden ze op deze schaal eigenlijk allemaal 1500 keer kleiner weergegeven moeten worden. De Zon staat ongeveer 20 keer te groot weergegeven.

- a. In werkelijkheid bedraagt de kortste afstand tussen Mars en (het midden van) de Zon ongeveer 200 miljoen km. Bepaal uit de figuur de grootste afstand die Mars tot (het midden van) de Zon heeft:

..... miljoen km

Het bestand **Zonnestelsel** bevat een simpele animatie van de beweging van enkele planeten. Het is in feite een bewegende versie van bovenstaande figuur.

- b. Speel het bestand **Zonnestelsel** af, en kijk eens goed naar de beweging van 'Mercurius'. Dan zie je dat de snelheid van die planeet *niet* steeds even groot is. Dichter bij de Zon beweegt Mercurius **sneller** / **langzamer**.

De variatie van de snelheid en van de afstand tot de Zon zijn ook nog op een andere manier weer te geven met het bestand **Mars**. Behalve een animatie van de beweging van Mars om de Zon, zie je twee grafieken ontstaan.

- De bovenste grafiek laat zien hoe de *afstand* van Mars tot de Zon in de loop van de tijd verandert.
 - De onderste grafiek geeft aan hoe de *snelheid* van Mars in de loop van de tijd verandert.
- c. Leg uit hoe je aan de grafieken kunt zien dat de snelheid van Mars groter is naarmate deze zich dichterbij de Zon bevindt. Maak een tekening om je uitleg te verduidelijken.

Opdracht 2 Afwijkingen van de eenparige cirkelbeweging met de Zon in het centrum

In de loop der eeuwen hebben wetenschappers geprobeerd de bewegingen van de planeten zo precies mogelijk te beschrijven. Wat sterrenkundigen in eerste instantie verwachtten, was dat een planeet met constante snelheid een cirkel zou doorlopen. Dat heet een eenparige cirkelbeweging. En ze verwachtten ook dat de Zon in het middelpunt van die cirkel zou staan. Die verwachtingen bleken echter niet helemaal te kloppen.

Schrijf op in welke twee opzichten de echte bewegingen van de planeten afwijken van de eenparige cirkelbeweging met de Zon in het middelpunt.

1.

2.

7.3 Samenvatting

Vat hieronder de belangrijkste resultaten over de bewegingen van de planeten nog eens samen.

Opdracht 3 *De bewegingen van de planeten*

*De planeten voeren geen eenparige cirkelbeweging uit met de Zon in het centrum.
Wat klopt wel voor de bewegingen van de planeten?*

- a. De banen van de planeten zijn **wel** / **niet** (bijna perfecte) cirkels.
- b. De Zon staat **wel** / **niet** precies in het middelpunt van die banen.
- c. De afstand van een planeet tot de Zon is **wel** / **niet** steeds even groot.
- d. De snelheid van de planeten is **wel** / **niet** steeds even groot.
Zo **niet**, ze bewegen dichterbij de Zon **langzamer** / **sneller**.

8 Keplers theorie voor de planeten

8.1 Inleiding

Keplers theorie bestuderen

In dit hoofdstuk ga je de theorie bestuderen waarmee Kepler probeerde de bewegingen van hemellichamen te verklaren. Zo'n theorie moet twee soorten aannames bevatten:

- een aanname over de invloeden die op hemellichamen werken;
- een aanname over de manier waarop hemellichamen uit zichzelf al verder zouden bewegen.

Keplers theorie gaat uit van *stilstaan* als aanname over de beweging uit zichzelf.

De aannames over de invloeden worden ook wel *beïnvloedingstheorie* genoemd. Een beïnvloedingstheorie moet informatie geven over de volgende zaken:

- Welke *invloedsbronnen* in een gegeven situatie op een hemellichaam werken.
- Welke eigenschappen van een invloedsbron bepalen *hoe sterk* de uitgeoefende invloed is.
- In welke *richting* een invloed werkt.

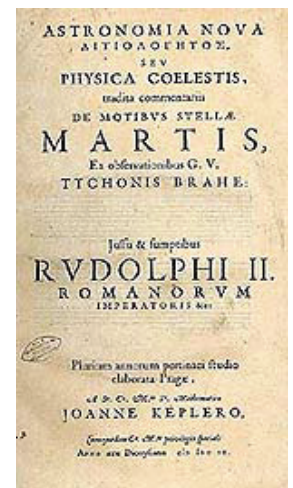
Op de volgende bladzijde staan Keplers ideeën hierover weergegeven. Deze heeft hij voor het eerst gepubliceerd in 1609, in zijn beroemdste werk: *Astronomia Nova* (*Nieuwe Sterrenkunde*).

Keplers theorie testen

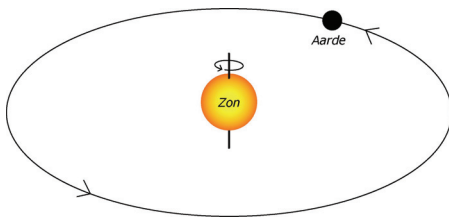
In het volgende hoofdstuk ga je testen of met Keplers theorie een precieze verklaring gegeven kan worden van de bewegingen van de planeten.

Newtons theorie bestuderen en testen

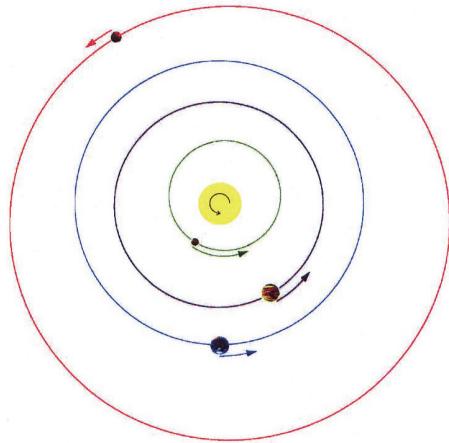
In hoofdstuk 10 leer je meer over Newtons theorie voor de bewegingen van de planeten. Newtons theorie verschilt behoorlijk van die van Kepler. Newton gebruikt een andere aanname over de beweging uit zichzelf en een andere beïnvloedingstheorie. Ook Newtons theorie ga je testen.



Voorblad van Keplers *Astronomia Nova*.



Kepler veronderstelde dat de Zon om haar eigen as roteert, en daardoor alle planeten in dezelfde richting meesleept.



Volgens Kepler *roteert* de Zon om haar eigen as, en is dat de oorzaak van de beweging van de planeten

Kepler vermoedde dat *de Zon* de invloedsbron is van de bewegingen van de planeten. Die invloed heeft er volgens hem mee te maken dat de Zon om haar eigen as roteert. In Keplers tijd was het echter onmogelijk om waar te nemen of de Zon al dan niet roteert. Hoe is Kepler dan toch op dit idee gekomen?

Bij zijn bestudering van de planeten viel het Kepler op dat ze *allemaal* in dezelfde richting om de Zon bewegen. Dat kon volgens hem geen toeval zijn. Stel nu eens, zo redeneerde Kepler, dat de Zon om haar eigen as roteert. Zou het dan niet zo kunnen zijn, dat alle planeten op een of andere manier *meegesleept* worden door de roterende Zon? Allemaal in dezelfde richting als de Zon om haar eigen as roteert.

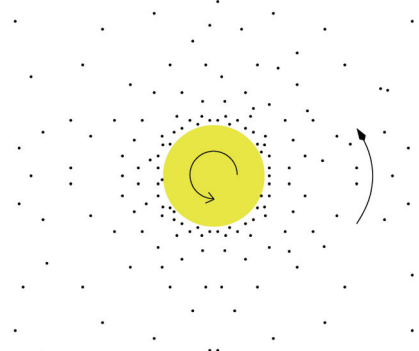
Dit idee werd voor Kepler nog versterkt door de beweging van de Maan om de Aarde. De Maan beweegt namelijk in dezelfde richting om de Aarde, als de Aarde om haar eigen as roteert. Dus ook hier lijkt het zo te zijn dat de Maan voortgesleept wordt door de roterende Aarde.

De planeten worden volgens Kepler meegesleurd in een *draaikolk van species*

Als de Zon handen had, zou het zou heel gemakkelijk zijn om te begrijpen dat de roterende Zon de planeten mee kan slepen. Door al roterend een planeet vast te pakken zou de Zon de planeet immers vanzelf in haar hand meeslepen. Hoewel het volgens Kepler zo simpel niet werkt, en de Zon volgens hem geen handen heeft, lijkt zijn voorstel hier toch wel een beetje op.

Kepler stelt namelijk voor dat de Zon niet door middel van handen grip krijgt op een planeet, maar door 'iets' uit te zenden dat grip krijgt op een planeet. Dat 'iets' noemde hij *species*.

- Dichtbij de Zon bevindt zich het meeste species. Hoe verder van de Zon, hoe minder species er is.
- Doordat het species van de Zon afkomstig is, draait het met de Zon mee.
Een planeet wordt door het species in de buurt van de planeet 'vastgepakt', en wordt als het ware in een *draaikolk van species* meegesleurd.
- Doordat er op grotere afstand van de Zon minder species is, krijgt de Zon via dat species op grotere afstand minder grip op een planeet.



Het species (weergegeven door de stippen) draait met de Zon mee.

Kepler was verder vrij vaag over wat dat species nou precies is. Hij heeft het soms vergeleken met licht en warmte. Net zoals er 'iets' van de Zon komt dat de planeten verlicht en opwarmt, zo komt er ook 'iets' van de Zon dat de planeten in beweging zet. Daarmee houdt de vergelijking echter op. Species is volgens Kepler iets anders dan warmte of licht

8.2 Keplers eerste poging tot een beïnvloedingstheorie

Kepler heeft zijn beïnvloedingstheorie met vallen en opstaan bedacht. In het kader hiernaast staan de ideeën weergegeven die Kepler hebben geleid tot zijn eerste versie van een beïnvloedingstheorie.

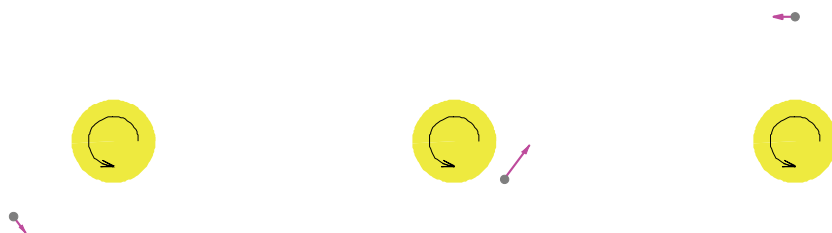
Opdracht 1 *Een nadere uitwerking van Keplers ideeën*

Volgens Kepler oefent de Zon via species een invloed uit op de planeten. Een planeet wordt als het ware meegesleurd in een draaikolk van species. In deze opdracht ga je conclusies trekken over de grootte en de richting van deze draaikolk-invloed. Daarbij maak je gebruik van Keplers ideeën over species.

Keplers ideeën over species

- Species draait met de Zon mee.
- Op grotere afstand van de Zon is er minder species.
- Een planeet wordt meegesleurd door het species in de buurt van de planeet. En harder meegesleurd, naarmate er meer species in de buurt is.

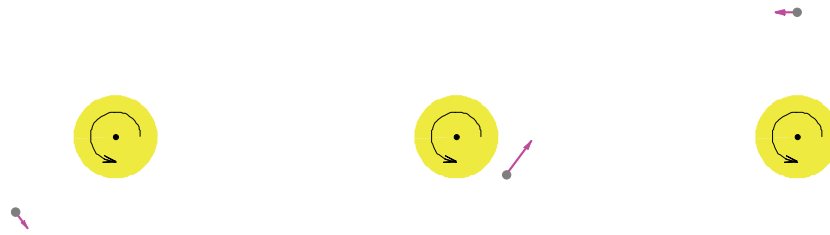
In de figuren stelt de paarse pijl steeds de *invloed* voor die een planeet (de grijze stip) op die plek zou voelen. Je gaat nu eerst deze figuren uitleggen met Keplers ideeën over het *species*.



- a. Je ziet dat dichtbij de Zon de pijl groter is. De invloed op een planeet is daar dus groter. Leg uit hoe dit komt, met behulp van Keplers ideeën over het species.
- b. De invloedspijlen staan steeds dwars op de lijn tussen de planeet en (het midden van) de Zon. Maak met een tekening duidelijk hoe dit komt. Teken in de figuur wat species en geef de richting aan waarin het species beweegt in de buurt van de planeet. Gebruik weer Keplers ideeën over het species.

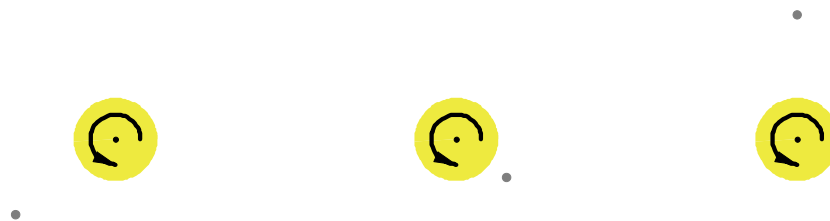


Hieronder staan nogmaals de invloedspijlen weergegeven voor drie posities.



Stel je nu de situatie voor dat de *Zon twee keer zo snel* zou roteren.

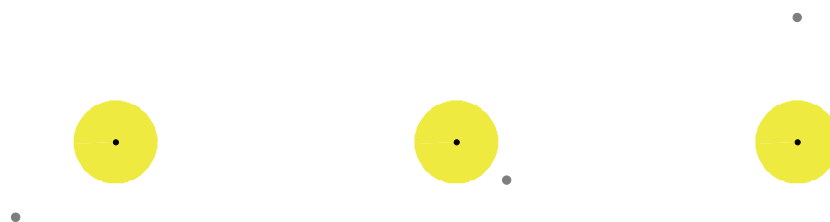
- c. Teken hoe de invloedspijlen veranderen als de Zon twee keer zo snel zou roteren.



- d. Wat verandert er volgens Kepler aan de beweging van een planeet als de Zon twee keer zo snel zou roteren?

Stel je nu de situatie voor dat de *Zon niet* zou roteren.

- e. Hoe zit het met de invloedspijlen als de Zon niet zou roteren?



- f. Wat verandert er volgens Kepler aan de beweging van een planeet als de Zon niet zou roteren?

Keplers eerste theorie om de beweging van planeten te verklaren

Aanname over de beweging uit zichzelf: stil blijven staan.

Beïnvloedingstheorie:

1. De Zon oefent (via het species) een invloed uit op een planeet.
2. De *richting* van deze invloed staat steeds dwars op de verbindinglijn tussen de planeet en (het midden van) de Zon.
3. Voor de *grootte* van de invloed geldt:

$$\text{grootte invloed} = \frac{\text{rotatiesnelheid Zon}}{\text{afstand tot Zon}}$$

Opdracht 2 *Keplers formule voor de grootte van de invloed*

In bovenstaand kader staat Keplers eerste theorie nog eens kort weergegeven.

In deze opdracht ga je na of Keplers formule voor de grootte van de invloed klopt met wat je er in de vorige opdracht over gezegd hebt.

- a. Op *grotere afstand* is de invloed volgens de formule **kleiner** / **groter**.
Klopt dit met wat je eerder gezegd hebt? **Ja** / **Nee**.
- b. Als de Zon *twee keer zo snel* zou roteren, is de invloed volgens de formule twee keer **kleiner** / **groter**.
Klopt dit met wat je eerder gezegd hebt? **Ja** / **Nee**.
- c. Als de Zon *niet* zou roteren, is de grootte van de invloed volgens de formule:

.....

Klopt dit met wat je eerder gezegd hebt? **Ja** / **Nee**.

Opdracht 3 *De baan van een planeet volgens Keplers eerste theorie*

In deze opdracht ga je met de constructiemethode na wat voor baan een planeet doorloopt volgens Keplers eerste theorie. En of dat klopt met de manier waarop echte planeten bewegen. De constructie zelf laten we aan de computer over.

- a. Speel het bestand **KeplerConstructie** af. De computer maakt dan een constructie met Keplers aanname over de invloeden en over de beweging uit zichzelf. Leg met een tekening uit hoe je aan de constructie kunt zien dat deze gemaakt is:

- met Keplers aanname over de beweging uit zichzelf;
- met Keplers aanname over de invloed.

- b. De constructie is nog erg onnauwkeurig. Maak de constructie nauwkeuriger door de tijdstap te verkleinen. Neem ook eens een hele kleine tijdstap, bijvoorbeeld 0.005. Schrijf hieronder op wat voor soort baan een planeet doorloopt volgens Keplers theorie.

Wil Keplers theorie goed zijn, dan moet de theoretisch geconstrueerde beweging natuurlijk kloppen met de echte beweging van een planeet, bijvoorbeeld Mars:

1. Mars beweegt in een (bijna perfecte) cirkel.
2. De Zon staat *niet* in het middelpunt van die cirkel.

Ga nu na of dit ook geldt voor de beweging volgens Keplers theorie.

- d. Beweegt een planeet volgens Keplers theorie in een cirkel? **Ja / Nee**
Zo **ja**, staat de Zon volgens Keplers theorie in het middelpunt van die cirkel?
Ja / Nee
- e. Leg hieronder uit waarom Kepler zich genoodzaakt zag zijn theorie aan te passen.

8.3 Keplers tweede poging tot een beïnvloedingstheorie

Kepler gaf de moed niet op toen zijn aannames niet helemaal goed bleken te zijn. Om een cirkelbeweging te krijgen waarbij de Zon *niet* in het middelpunt staat, heeft hij zijn aannames aangepast. Zijn aanname over de beweging uit zichzelf heeft hij hetzelfde gelaten: stilstaan. Zijn beïnvloedingstheorie heeft hij wel veranderd. In onderstaand kader kun je daar meer over lezen.

Behalve de *draaikolk-invloed* werkt volgens Kepler ook nog een *magnetische invloed*

Kepler is tot het idee gekomen dat de Zon behalve de *draaikolk-invloed* nog een *andere invloed* op een planeet uitoefent. Die tweede invloed is volgens hem een soort *magneetwerking*, en zorgt ervoor dat de afstand van de planeet tot de Zon varieert.

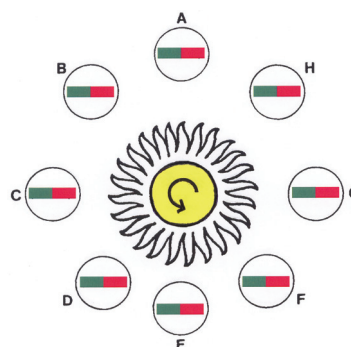
In een planeet bevinden zich volgens Kepler *magnetische draden*

Keplers idee is dat zich in een planeet ‘*magnetische draden*’ bevinden. In de figuur is steeds één zo’n draad vergevoerd. De noordpool van de draden (rood) wordt aangetrokken door de Zon; de zuidpool (groen) wordt afgestoten. Hoe meer draden zich in een planeet bevinden, hoe sterker de magnetische invloed is.

De invloeden samen verklaren volgens Kepler de beweging van een planeet

Wanneer een planeet zich in positie A bevindt, zijn beide polen van de draden even ver van de Zon verwijderd. De aantrekking en de afstoting heffen elkaar dan op. In positie A ondergaat de planeet dus geen afwijking door de *magnetische invloed*.

Natuurlijk is er nog wel de *draaikolk-invloed*, ten gevolge van het roteren van de Zon. Daardoor krijgt de planeet een afwijking in de richting van B. Wanneer de planeet in B is aangekomen, bevindt de noordpool van de draden zich dicht bij de Zon dan de zuidpool. De aantrekking is daarom in B wat sterker dan de afstoting. Dit maakt dat de planeet in B netto iets naar de Zon toe getrokken wordt ten gevolge van de magnetische invloed op de draden.



De Zon werkt volgens Kepler ook op magnetische draden in een planeet.

Door op deze manier door te redeneren, kun je volgens Kepler de volgende twee dingen begrijpen:

1. De Zon staat niet in het middelpunt van de baan van een planeet. Dit is goed te zien in de figuur. In E bevindt de planeet zich dicht bij de Zon dan in A.
2. Een planeet beweegt sneller naarmate deze zich dicht bij de Zon bevindt.

In opdracht 5 ga je zelf Keplers redenering uitwerken.

Opdracht 4 *Wat heeft Kepler veranderd en wat verwachtte hij ervan?*

In deze opdracht vat je kort samen welke aanpassingen Kepler heeft gemaakt aan zijn beïnvloedingstheorie en waarom.

- a. Welke twee invloeden spelen in Keplers aangepaste theorie een rol?

(1)

(2)

- b. Welke tekortkoming(en) van zijn eerste theorie hoopte Kepler daarmee te verhelpen?

Opdracht 5 *Kan met Keplers nieuwe idee de beweging wel kloppend gemaakt worden?*

In het volgende hoofdstuk ga je met een computermodel heel precies na of Keplers aangepaste theorie werkt.

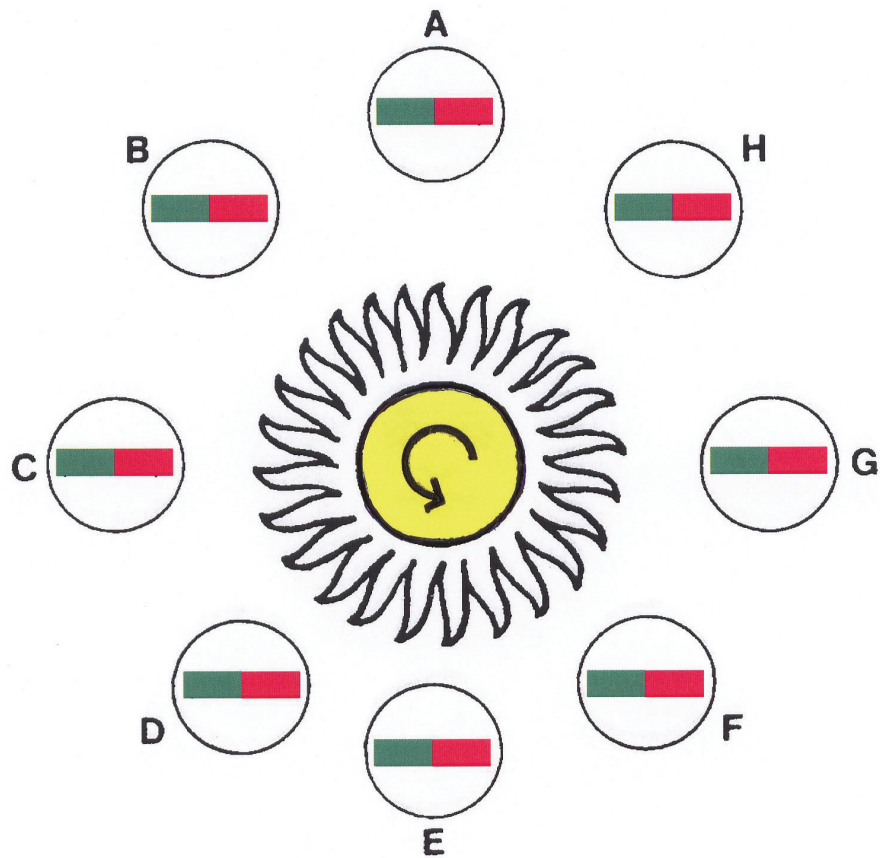
In deze opdracht ga je op een minder precieze manier na of Keplers nieuwe idee zou kunnen werken. Als behalve de draaikolk-invloed ook een magnetische invloed werkt, lijken dan de tekortkomingen van Keplers eerste theorie te verhelpen?

Eigenschappen van de magnetische invloed

Volgens Kepler hangt de magnetische invloed af van hoeveel dicht(er) de ene pool zich bij de Zon bevindt dan de andere:

- Als de noordpool (rood) zich dicht(er) bij de Zon bevindt, is de magnetische invloed op de draden netto aantrekkend.
- Als de zuidpool (groen) zich dicht(er) bij de Zon bevindt, is de magnetische invloed op de draden netto afstotend.
- Als ze zich even dicht bij de Zon bevinden, is er geen netto magnetische invloed op de draden.

- a. Kijk met de informatie uit het kader eens naar de figuur op de volgende bladzijde. Teken bij elk van de posities A t/m H de magnetische invloed met een pijl.



Behalve de magnetische invloed werkt volgens Kepler ook nog steeds de *draaikolk-invloed* ten gevolge van het roteren van de Zon.

- b. Teken ook de draaikolk-invloed bij elk van de posities A t/m H. Let bij het tekenen van de pijlen zowel op de *richting* als op de *grootte*. Gebruik voor de duidelijkheid een andere kleur dan voor de magnetische invloed.
- c. Licht aan de hand van de figuur toe hoe op deze manier de twee afwijkingen ontstaan van de eenparige cirkelbeweging met de Zon in het centrum.

(1) De Zon staat niet in het middelpunt van de baan van Mars, omdat ...

(2) De snelheid van Mars is groter naarmate deze zich dichterbij de Zon bevindt, omdat ...

8.4 Samenvatting

In dit hoofdstuk heb je kennis gemaakt met de theorie die Kepler heeft opgesteld om de bewegingen van de planeten te verklaren. Hieronder zet je de belangrijke stappen op een rijtje. Dat is dan meteen een goede samenvatting.

Opdracht 6 *Keplers eerste beïnvloedingstheorie*

In zijn eerste beïnvloedingstheorie stelt Kepler een *draaikolk-invloed* voor.

- a. De *bron* van de draaikolk-invloed is:
- b. Voor de *grootte* van de draaikolk-invloed geldt de volgende formule:
- c. Voor de *richting* van de draaikolk-invloed geldt: ...

Opdracht 7 *Keplers eerste theorie werkt niet goed*

Leg duidelijk uit wat hier wordt bedoeld met dat de theorie ‘niet goed werkt’. Hoe heb je dat vastgesteld? Wat waren de problemen?

Opdracht 8 *Keplers tweede beïnvloedingstheorie*

Kepler heeft toen aangenomen dat de Zon behalve de draaikolk-invloed ook nog een *magnetische invloed* uitoefent op een planeet.

- a. Voor de *richting* van die magnetische invloed geldt:
naar de Zon toe gericht, als ...

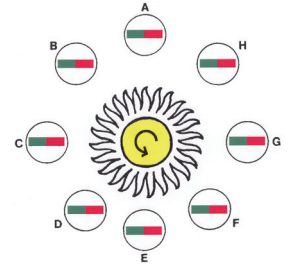
van de Zon af gericht, als ...
- b. De *sterkte* van de magnetische invloed hangt af van de hoeveelheid magnetische draden in een planeet. Als er meer magnetische draden in een planeet zitten, is de magnetische invloed **zwakker** / **sterker**.

9 Keplers theorie precies testen

9.1 Inleiding

Keplers theorie is veelbelovend

In het vorige hoofdstuk heb je gezien dat Kepler met vallen en opstaan is gekomen tot een veelbelovende beïnvloedingstheorie. Volgens zijn uiteindelijke theorie werkt op de planeten zowel een draaikolk-invloed als een magnetische invloed. De theorie is veelbelovend, omdat je ermee lijkt te kunnen verklaren dat Mars een baan doorloopt waarbij de Zon niet in het centrum staat. En ook dat de snelheid van Mars groter is naarmate deze zich dichterbij de Zon bevindt.



Volgens Keplers theorie is er een draaikolk-invloed en een magnetische invloed.

Keplers theorie moet nog wel precies getest worden

Erg precies is Keplers theorie echter nog niet getest in het vorige hoofdstuk. Om precies te testen of zijn theorie klopt, moet je twee dingen doen:

- *Precies construeren* hoe een planeet gaat bewegen volgens de theorie.
- Die beweging volgens de theorie *precies vergelijken* met de echte beweging van de planeet.

Dat gaan we in dit hoofdstuk doen met behulp van een computer. Daarbij wijken we wel af van wat Kepler *zelf* gedaan heeft. Hij had natuurlijk geen computer ter beschikking. Gaat Keplers theorie een precieze test doorstaan?

9.2 Op weg naar een computermodel om Keplers theorie te testen

Opdracht 1 Informatie die een computer nodig heeft om Keplers theorie te kunnen testen

We gaan een computer gebruiken om Keplers theorie te testen, omdat computers heel snel kunnen rekenen. Veel sneller dan wij dat kunnen. Maar uit zichzelf kunnen computers helemaal niks. Ze moeten door ons ‘verteld’ worden wat ze moeten uitrekenen en hoe. In feite moet de computer dus ook ‘weten’ wat je in het vorige hoofdstuk geleerd hebt. In deze opdracht zet je dat nog eens op een rijtje.

Bedenk eens wat de computer bijvoorbeeld ‘verteld’ moet worden om precies de draaikolk-invloed te kunnen bepalen die een planeet op een bepaalde positie voelt. Gebruik daarbij wat je in het vorige hoofdstuk over de grootte en richting van de draaikolk-invloed geleerd hebt (zie ook de samenvatting op de vorige bladzijde).

- a. Schrijf hieronder op wat de computer moet ‘weten’ over de *richting* van de draaikolk-invloed.



Wat moet een computer ‘weten’ om de invloed op de planeet te bepalen?

- b. Schrijf hieronder op wat de computer moet ‘weten’ over de *grootte* van de draaikolk-invloed.

Om een beweging precies te kunnen construeren, moet de computer een constructiemethode toepassen met een hele kleine tijdstap.

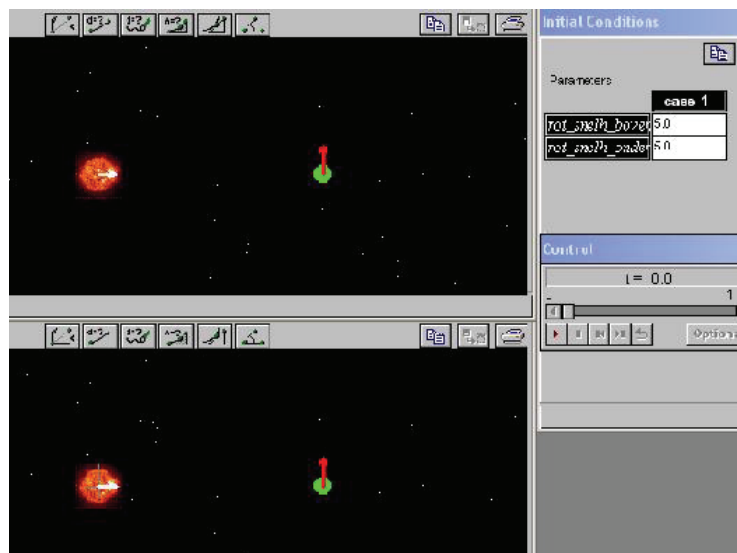
- c. Als je Keplers theorie wilt testen, moet je de computer ‘vertellen’ om de constructiemethode uit **hoofdstuk 4 / hoofdstuk 5** toe te passen.

Leg hieronder je keuze uit.

Een computermodel dat de grootte en richting van de draaikolk-invloed kan bepalen

Wanneer je het bestand **DraaikolkInvloed** opent en afspeelt met het programma *Modellus*, zie je twee animatievensters. Elk animatievenster bevat een afbeelding van de Zon en een groene bol. Bij zo’n groene bol staat een rode pijl. Deze pijl stelt de draaikolk-invloed voor die een planeet op die plek zou voelen.

In het venster *Initial Conditions* staat met welke rotatiesnelheid de computer de draaikolk-invloed berekent. De waarde van *rot_snelh_boven* is de rotatiesnelheid in de bovenste animatie; de waarde van *rot_snelh_onder* is de rotatiesnelheid in de onderste animatie. In het weergegeven geval zijn ze beide 5 omwentelingen per jaar.



De rode pijl stelt de draaikolk-invloed voor. De ronddraaiende witte pijl stelt de rotatie van de Zon voor.

Het programma *Modellus* kan de afbeelding van de Zon niet rond laten draaien. In plaats daarvan draait in de Zon een wit pijltje rond. Deze stelt de rotatie van de Zon voor.

Opdracht 2 *De grootte en richting van de draaikolk-invloed door de computer bepaald*

In deze opdracht maak je kennis met een computermodel dat de grootte en richting van de draaikolk-invloed kan bepalen. Dit moet het uiteindelijke testmodel van Keplers theorie ook kunnen, naast nog veel meer. Deze opdracht is dus een eerste opstapje op weg naar dat uiteindelijke testmodel.

Speel het model **DraaikolkInvloed** af. Je ziet dan twee animatievensters met daarin een afbeelding van de Zon en een groene bol (zie ook het kader op de vorige bladzijde). Bij elke bol geeft het model de draaikolk-invloed weer met een rode pijl. Je gaat nu na dat wat je al weet over de draaikolk-invloed klopt met wat er op het beeldscherm te zien is.

- a. Maak gebruik van wat je al weet over de draaikolk-invloed, om te voorspellen wat er met de invloedspijl zal gebeuren in de volgende situaties.

- (1) Naarmate de groene bol dichterbij de Zon komt, zal de invloedspijl **kleiner / groter** worden.
- (2) In het weergegeven geval staat de groene bol rechts van de Zon en is de invloedspijl naar boven gericht. Maar in welke richting zal de invloedspijl wijzen, als de groene bol boven de Zon staat?

naar rechts / naar links / naar boven / naar beneden

Je kunt deze verwachtingen ook controleren. Wanneer je de cursor over een groene bol beweegt, verschijnt een handje. Je kunt de groene bol dan ‘vastpakken’ en over het scherm slepen, bijvoorbeeld dichterbij de Zon toe.

- b. Controleer of je verwachtingen van onderdeel a kloppen. **Ja / Nee.**

Het ronddraaien van de witte pijl stelt de rotatie van de Zon voor. De waarde van *rot_snelh_boven* is de rotatiesnelheid in de bovenste animatie; de waarde van *rot_snelh_onder* is de rotatiesnelheid in de onderste animatie.

- c. Maak gebruik van wat je al weet over de draaikolk-invloed, om te voorspellen wat er in het onderste animatievenster zal veranderen, wanneer je de waarde van *rot_snelh_onder* verandert naar 10 omwentelingen per jaar.

- (1) Het witte pijltje in de Zon zal dan **× langzamer / sneller** gaan ronddraaien.
- (2) De invloedspijl zal dan **wel / niet** van richting veranderen.
- (3) De invloedspijl zal dan **× korter / langer** worden.

Je kunt ook deze verwachtingen controleren, door de waarde van *rot_snelh_onder* te veranderen naar 10 omwentelingen per jaar. Zet het programma eerst stil door in het controlevenster op de stop-knop  te drukken. Verander dan de waarde van *rot_snelh_onder*, en druk weer op de afspeelknop . (Zet het programma weer stil, wanneer je klaar bent met het controleren van je verwachtingen. Anders kun je geen nieuw bestand openen.)

- d. Controleer of je verwachtingen van onderdeel c kloppen. **Ja / Nee.**

Opdracht 3 *De beweging ten gevolge van de draaikolk-invloed door de computer bepaald*

In deze opdracht maak je kennis met een computermodel dat weer een stapje dichterbij het uiteindelijke testmodel. Namelijk een model dat niet alleen de grootte en richting van de draaikolk-invloed kan bepalen, maar ook de beweging die je krijgt ten gevolge van de draaikolk-invloed.

Speel het bestand **DraaikolkConstructie** af met het programma *Modellus*. De computer bepaalt dan in beide animatieschermen hoe de groene bol vanaf een bepaalde positie verder gaat bewegen ten gevolge van de draaikolk-invloed. De computer past voor een hele kleine tijdstap de constructiemethode toe met Keplers aanname over de beweging uit zichzelf. Het model geeft de constructie zelf echter niet meer weer, alleen het resultaat. Wel wordt de draaikolk-invloed weergegeven, met een rode pijl.

- a. De computer geeft de constructie zelf niet meer weer. Leg hieronder uit hoe je toch kunt zien dat de computer de constructie uitvoert met Keplers aanname over de beweging uit zichzelf.

- b. In opdracht 3 van hoofdstuk 8 heb je al bepaald wat voor soort baan je krijgt ten gevolge van de draaikolk-invloed (zie bladzijde 62): een cirkel. Controleer of je net als toen nu ook weer een cirkel krijgt met de Zon in het middelpunt. **Ja / Nee**

In het venster *Initial Conditions* staat met welke rotatiesnelheid de computer de draaikolk-invloed berekent. In het weergegeven geval is de rotatiesnelheid in beide animatieschermen dus 5 omwentelingen per jaar. Je gaat nu na hoe de beweging zal veranderen als de rotatiesnelheid aangepast wordt.

- c. Bedenk wat er in het onderste animatievenster zal gebeuren, wanneer je de waarde van *rot_snelh_onder* verandert naar 10 omwentelingen per jaar.
 - (1) De groene bol zal **langzamer / sneller** gaan bewegen.
 - (2) De baan van de groene bol zal **wel / niet** veranderen.

- d. Verander de waarde van *rot_snelh_onder* naar 10 omwentelingen per jaar, en controleer of je verwachtingen van onderdeel c kloppen. **Ja / Nee**.

- e. Het model **DraaikolkConstructie** kan al meer dan het model **Draaikolk-Invloed** uit opdracht 2 kan. Maar het kan nog niet genoeg om Keplers theorie te testen. Schrijf hieronder één ding op dat het testmodel nog meer moet kunnen.

Opdracht 4 *De beweging ten gevolge van de draaikolk-invloed vergeleken met de echte beweging*

Deze opdracht is het laatste opstapje op weg naar een computermodel waarmee Keplers uiteindelijke theorie precies getest kan worden. Je leert hoe een theorie precies getest kan worden met een computermodel. We gaan bij wijze van voorbeeld Keplers eerste theorie testen, dus met alleen een draaikolk-invloed. Je weet al dat deze theorie niet goed is, maar daar gaat het nu niet om. Het gaat om het aanleren van de manier van testen.

Speel het bestand **DraaikolkVergelijking** af met het programma *Modellus*. Je ziet dan een groene bol en een afbeelding van Mars bewegen.

- De afbeelding van Mars beweegt net zoals de echte planeet Mars in werkelijkheid beweegt. Maar dan wel op schaal natuurlijk. Bovendien wordt de beweging versneld weergegeven. In werkelijkheid is de omlooptijd van Mars een kleine twee jaar.
- De groene bol begint op dezelfde plek als Mars. Wanneer je het bestand afspeelt, bepaalt de computer hoe de groene bol vanaf die plek verder gaat bewegen ten gevolge van de draaikolk-invloed.

In het venster *Initial Conditions* staat weer met welke rotatiesnelheid de computer de draaikolk-invloed berekent. Met die rotatiesnelheid vallen de twee bewegingen duidelijk niet samen.

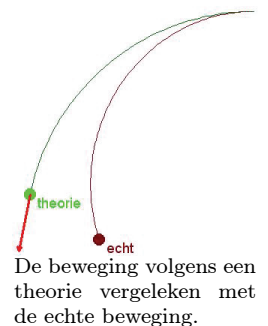
- a. De beweging van de groene bol zal nooit samenvallen met de echte beweging van Mars, welke waarde je ook neemt voor de rotatiesnelheid. De echte baan van Mars heeft namelijk een eigenschap die de baan van de groene bol nooit zal hebben. Schrijf hieronder op welke eigenschap dat ook alweer is.
- b. Probeer de volgende waarden eens voor de rotatiesnelheid. Omcirkel voor welke waarde je nog het beste resultaat krijgt:

12 / 17 / 22 omwentelingen per jaar

- c. In deze opgave gaat het om het aanleren van de manier van testen van een theorie. Leg met behulp van de tekening hiernaast uit hoe de manier van testen in zijn werk gaat.



Van Mars is precies bekend hoe hij beweegt.



De beweging volgens een theorie vergeleken met de echte beweging.

9.3 Test van Keplers theorie op de planeet Mars

Opdracht 5 Een computermodel om Keplers theorie te testen op Mars

In deze opdracht maak je kennis met het uiteindelijke testmodel van Keplers theorie. Dit model kan alles dat de vorige modellen ook al konden. Maar het kan ook de grootte en richting bepalen van de magnetische invloed. Verder bepaalt het model de beweging die je krijgt als de draaikolk-invloed en de magnetische invloed allebei werken. Het model geeft ook de echte beweging van Mars weer.

Speel het model **KeplerMars** af. Ga na of je de beweging van de groene bol kunt laten samenvallen met de echte beweging. Namelijk door de waarden van de rotatiesnelheid van de Zon en van de hoeveelheid draden in Mars geschikt te kiezen. De draaikolk-invloed wordt weergegeven door een rode pijl; de magnetische invloed door een paarse pijl.

- a. Ga met beleid te werk om de beweging van de groene bol kloppend te krijgen. Vul dus niet zomaar wat in voor de rotatiesnelheid of het aantal draden. Maak het volgende systematische ‘verhaal’ compleet.

- In het begin was de rotatiesnelheid 6 en het aantal draden 1000. Voor die waarden klopt de beweging van de groene bol nog niet.
- Om de beweging van de groene bol beter kloppend te krijgen, moeten we de draaikolk-invloed **zwakker** / **sterker** maken, en de magnetische invloed **zwakker** / **sterker**.
- Daarom hebben we de waarden veranderd naar:

rotatiesnelheid:	aantal draden:
------------------------	----------------------

- Door die verandering was het probleem **wel** / **niet** verholpen.
Zo **niet**, de draaikolk-invloed is nu **te zwak** / **te sterk**, en de magnetische invloed is nu **te zwak** / **te sterk**.
- Daarom hebben we de waarden veranderd naar:

rotatiesnelheid:	aantal draden:
------------------------	----------------------

- b. Ga na dat het lukt om de beweging van de groene bol uiteindelijk kloppend te krijgen! Vul hieronder in voor welke waarden:

rotatiesnelheid:	aantal draden:
------------------------	----------------------

Een indirecte bepaling van de rotatiesnelheid van de Zon en de hoeveelheid magnetische draden in Mars

In opdracht 5 is het je gelukt om de beweging van de groene bol te laten samenvallen met de echte beweging van Mars. Dat heb je gedaan door de waarden van de rotatiesnelheid van de Zon en van de hoeveelheid draden in Mars geschikt te kiezen. Maar mag je die waarden zomaar vrij kiezen? Hadden we niet de echte waarden moeten invullen?

Bedenk echter dat het heel moeilijk waarneembaar is of de Zon roteert, en zo ja, hoe snel. En je kunt ook niet zomaar even naar Mars gaan om te kijken of zich daar magnetische draden bevinden, en zo ja, hoeveel. In Keplers tijd was dit alles al helemaal onmogelijk.

Wat zegt het nu dat het gelukt is om de beweging kloppend te krijgen? Volgens Kepler is dat aan de ene kant een aanwijzing dat zijn theorie goed zou kunnen zijn. Maar tegelijkertijd is het volgens hem dan ook een *indirecte* bepaling van de rotatiesnelheid van de Zon en de hoeveelheid draden in Mars. Anders gezegd, de test van Keplers theorie levert tegelijkertijd een *voorspelling* van hoe snel de Zon roteert en hoeveel draden zich in Mars bevinden.

9.4 Conclusie

In dit hoofdstuk heb je Keplers theorie precies getest op de planeet Mars. Daarbij heb je gebruik gemaakt van een computermodel. Geef hieronder het belangrijkste resultaat weer. Bedenk ook wat je daaruit kunt concluderen.

Opdracht 6 *Keplers theorie werkt goed voor Mars*

Leg duidelijk uit wat hier bedoeld wordt met dat de theorie ‘voor Mars goed werkt’. Hoe heb je dat getest?

Opdracht 7 *Kun je nu concluderen dat Keplers theorie goed is?*

Keplers theorie werkt goed voor Mars. Dat is een prachtige prestatie! Kun je nu concluderen dat Keplers theorie een goede theorie is om te verklaren hoe de planeten bewegen? **Ja / Nee**. Leg hieronder uit waarom wel of niet.

10 Newtons theorie voor de planeten precies testen

10.1 Inleiding

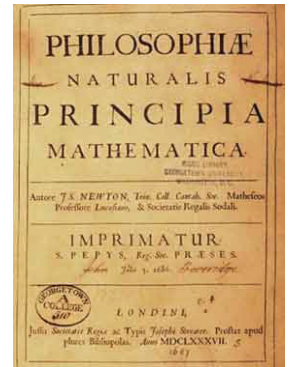
Het is Kepler gelukt om een theorie op te stellen die goed werkt voor de planeet Mars. In dit hoofdstuk ga je na of het Newton lukt om hetzelfde te presteren. Daarom ga je ook Newtons theorie bestuderen en testen op de planeet Mars.

Newtons theorie bestuderen

Newtons theorie gaat uit van *recht door blijven bewegen* als aanname over de beweging uit zichzelf. Volgens Newtons beïnvloedingstheorie heeft de invloed op een hemellichaam de volgende eigenschappen.

- De invloed wordt uitgeoefend door *de Zon*.
- De invloed is *aantrekkend*.
- De invloed is *kleiner*, naarmate het hemellichaam *verder van de Zon* af is.

Op de volgende bladzijde staat Newtons beïnvloedingstheorie uitgebreider weergegeven. Newton heeft zijn theorie gepubliceerd in 1687, in zijn hoofdwerk: *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (*Wiskundige Beginselen van de Natuurfilosofie*).



Voorblad van Newtons Principia.

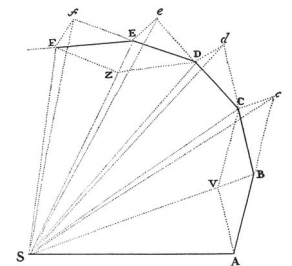
Newtons theorie testen

Ook Newtons theorie ga je precies testen:

- *Precies construeren* hoe een planeet gaat bewegen volgens zijn theorie.
- Die beweging volgens de theorie *precies vergelijken* met de echte beweging van de planeet.

Een computermodel gebruiken om Newtons theorie precies te testen

Net als voor Keplers theorie, ga je ook voor het testen van Newtons theorie een computermodel gebruiken. Via enkele tussenmodellen, die steeds iets meer kunnen, werk je weer naar dat testmodel toe.



Een constructie uit Newtons Principia.

Newton's beïnvloedingstheorie

Behalve een andere aanname over de beweging uit zichzelf, had Newton ook een heel andere beïnvloedingstheorie dan Kepler. In de figuren is de essentie van *Newton's beïnvloedingstheorie* weergegeven.

- Er is een *aantrekkende* invloed.
De paarse pijlen stellen steeds de invloed voor die een planeet op die plaats zou voelen. Ze wijzen in de richting van (het midden van) de Zon.
- De belangrijke eigenschap van de Zon, die de grootte van de invloed bepaalt, is de *massa* van de Zon.

Dat de Zon roteert, is volgens Newton *niet* van belang

Newton heeft *niet* nader uitgelegd hoe het kan dat de Zon een aantrekkende invloed op de planeten uit kan oefenen. Behalve dan dat de massa ermee te maken heeft. Newton was zich hiervan bewust, en geeft toe dat hij de uiteindelijke oorzaak van de invloed niet heeft kunnen ontdekken.

Overigens vond Newton dat ook Kepler die uiteindelijke oorzaak nog niet gevonden had. Volgens Newton heeft de invloed van de Zon op de planeten hoogst waarschijnlijk niks te maken met de rotatie van de Zon. Voor hem was het gewoon *puur toeval* dat de planeten allemaal in dezelfde richting bewegen, en allemaal in dezelfde richting als de Zon om haar as roteert.

Verder vond Newton dat Kepler iets te gemakkelijk had aangenomen dat species echt bestaat. In ieder geval is het volgens Newton *niet* zo dat de planeten bewegen doordat ze meegesleept worden in een draaikolk van species. Volgens hem worden de planeten juist aangetrokken.

Newton's formule voor de *grootte* van de invloed

Volgens Newton hangt de *grootte* van de invloed van twee dingen af:

- de *massa* van de Zon: hoe zwaarder de Zon hoe harder deze aan een planeet trekt.
- de *onderlinge afstand* tussen (het midden van) de Zon en de planeet: hoe dichterbij de Zon is, hoe harder de Zon aan de planeet trekt.

In een formule uitgedrukt, stelt Newton:

$$\text{grootte invloed} = \frac{\text{massa Zon}}{(\text{afstand tot Zon})^2}$$

Het is niet bekend hoe Newton ertoe gekomen is dat de grootte van de invloed afneemt met het *kwadraat* van de onderlinge afstand. Wel is bekend dat Newtons tijd- en landgenoot Robert Hooke zo'n soort wet had voorgesteld. Misschien is Newton daardoor op een idee gebracht.



Robert Hooke
(1635–1703)

10.2 Op weg naar een computermodel om Newtons theorie te testen

Opdracht 1 *Informatie die een computer nodig heeft om Newtons theorie te kunnen testen*

Net als bij Keplers theorie, gaan we ook een computer gebruiken om Newtons theorie te testen. Daarvoor moet de computer weer wel door ons ‘verteld’ worden wat hij moet uitrekenen en hoe.

We willen een computer precies laten construeren hoe een planeet gaat bewegen volgens Newtons theorie. Dan moeten we de computer in ieder geval ‘vertellen’ hoe hij precies de invloed moet bepalen die volgens Newton op de planeet werkt.

Gebruik bij de volgende twee onderdelen de informatie uit het kader op de vorige bladzijde.

- a. Schrijf hieronder op wat de computer moet ‘weten’ over de *richting* van de invloed.

- b. Schrijf hieronder op wat de computer moet ‘weten’ over de *grootte* van de invloed.

Om een beweging precies te kunnen construeren, moet de computer een constructiemethode toepassen met een hele kleine tijdstap.

- c. Als je Newtons theorie wilt testen, moet je de computer ‘vertellen’ om de constructiemethode uit **hoofdstuk 4 / hoofdstuk 5** toe te passen.

Leg hieronder je keuze uit.

Opdracht 2 Modellen op weg naar een testmodel

Deze opdracht is een opstapje naar het uiteindelijke testmodel van Newtons theorie. Van enkele tussenmodellen ga je na wat zo'n model kan:

1. *Bepalen van de grootte en de richting van de invloed.*
2. *Uitvoeren van de goede constructiemethode.*
3. *Precies bepalen van de beweging volgens Newtons theorie.*
4. *Vergelijken met de echte beweging.*

Bekijk de modellen **Newton1**, **Newton2** en **Newton3** met het programma *Modellus*, en beantwoord de volgende vragen.

- a. Schrijf op wat je in het model **Newton1** kunt veranderen.

Omcirkel welke van de bovengenoemde vier dingen **Newton1** kan.

1 2 3 4

- b. Schrijf op wat je in het model **Newton2** kunt veranderen.

Omcirkel welke van de bovengenoemde vier dingen **Newton2** kan.

1 2 3 4

- c. Schrijf op wat je in het model **Newton3** kunt veranderen.

Omcirkel welke van de bovengenoemde vier dingen **Newton3** kan.

1 2 3 4

- d. Omcirkel wat geen van de tussenmodellen kan.

1 2 3 4

10.3 Test van Newtons theorie op de planeet Mars

Opdracht 3 *Een computermodel om Newtons theorie te testen op Mars*

In deze opdracht maak je kennis met het uiteindelijke testmodel van Newtons theorie. Dit model kan alles dat de tussenmodellen ook al konden. Bovendien geeft het ook de echte beweging van Mars weer.

Speel het model **NewtonMars** af. Ga na of je de beweging van de groene bol kunt laten samenvallen met de echte beweging. Namelijk door de waarde van de massa van de Zon geschikt te kiezen. De waarde die in het venster *Initial Conditions* staat is overigens niet in kg, maar in 10^{27} kg.

- a. Ga na dat het lukt om de beweging van de groene bol kloppend te krijgen! Vul hieronder in voor welke waarde van de massa van de Zon.

massa van de Zon: $\cdot 10^{27}$ kg
--

Dat het gelukt is om de beweging kloppend te krijgen, is een aanwijzing dat Newtons theorie goed zou kunnen zijn. Maar tegelijkertijd is het ook een *indirecte* bepaling van de massa van de Zon.

- b. Is er ook een *directe* manier om de massa van de Zon te meten? **Ja / Nee.**
Zo **ja**, leg dan hieronder die methode uit.

10.4 Conclusie

In dit hoofdstuk heb je kennis gemaakt met de theorie die Newton heeft opgesteld om de bewegingen van de planeten te verklaren. Hieronder zet je de belangrijke stappen op een rijtje. Dat is dan meteen een goede samenvatting.

Opdracht 4 *Newton's beïnvloedingstheorie*

Newton stelt een heel andere invloed voor dan Kepler.

- a. De bron van die invloed is:
- b. Voor de grootte van die invloed geldt de volgende formule:
- c. Voor de richting van die invloed geldt: ...

Opdracht 5 *Ook Newtons theorie werkt goed voor Mars*

Leg duidelijk uit wat het inhoudt dat Newtons theorie ‘voor Mars goed werkt’.
Hoe heb je dat getest?

11 Kiezen tussen Kepler en Newton

11.1 Inleiding

Je hebt nu kennis gemaakt met de theorieën die Kepler en Newton hebben opgesteld om de bewegingen van de planeten te verklaren. Je hebt die theorieën ook getest op de planeet Mars. Ben je er ondertussen al achter wie het beter heeft gedaan, Kepler of Newton?

- Zo ja, wie heeft het dan beter gedaan en hoe ben je daar achter gekomen?
- Zo nee, hoe kunnen we daar alsnog achter komen?

In dit hoofdstuk gaan we op deze vragen in.

Opdracht 1 *Kun je al kiezen tussen Kepler en Newton?*

Je hebt de theorieën van Kepler en Newton getest op de planeet Mars. Wie heeft het daarbij beter gedaan?

a. Kies één van de volgende drie opties en licht die toe.

- (1) Op grond van de testresultaten *kies* ik voor *Kepler*. Uit de tests blijkt namelijk ...
- (2) Op grond van de testresultaten *kies* ik voor *Newton*. Uit de tests blijkt namelijk ...
- (3) Op grond van de testresultaten *kan* ik *nog niet kiezen* tussen Kepler en Newton. Uit de tests blijkt namelijk ...

Beantwoord de onderdelen b en c als je optie 3 gekozen hebben.

- b. Ook al kan ik *op grond van de testresultaten* nog niet kiezen, toch heb ik een voorkeur voor de theorie van **Kepler / Newton**, omdat ...
- c. Welke tests zijn er om misschien wel tot een keuze te kunnen komen?

11.2 De theorieën van Kepler en Newton testen op andere hemellichamen



Aarde: de blauwe planeet.

Tot nu toe heb je de theorieën van Kepler en Newton alleen nog maar getest op de planeet Mars. Kepler en Newton dachten echter beide dat de eigen theorie op *alle* planeten van toepassing is, en niet alleen op Mars. En misschien ook wel niet alleen op andere planeten, maar ook op andere hemellichamen, zoals *kometen*. Daarom gaan we hun theorieën nu ook testen op een andere planeet, namelijk de Aarde. En ook op een komeet, namelijk komeet Halley (zie onderstaand kader). Over deze komeet weten we veel meer dan over komeet Kirch. Komeet Halley laat zich namelijk ongeveer iedere 76 jaar opnieuw zien. Het laatst in 1986. De echte beweging van deze komeet is daarom precies bekend.

Komeet Halley

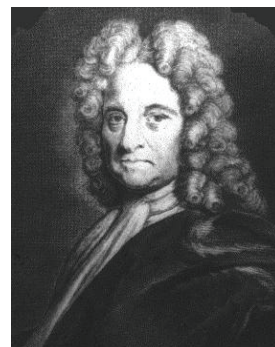
De beroemdste komeet is ongetwijfeld komeet Halley. Deze is genoemd naar de sterrenkundige Edmond Halley, een land- en tijdgenoot van Newton.

Halley had het idee dat kometen, net als planeten, een zich steeds herhalende beweging uitvoeren. Hij is daarom gaan uitzoeken of er tussen verschijningen van kometen regelmatige tussenpozen te vinden zijn. Hij vond hier een voorbeeld van. In 1531 was er een komeet geweest, in 1607, en ook in 1682 (die hij zelf dus heeft gezien). Tussen deze verschijningen zit steeds ruwweg 76 jaar.

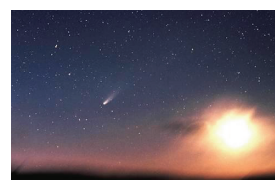
Halley trok de conclusie dat het bij al deze verschijningen om één en dezelfde komeet is gegaan. Terugrekenend heeft Halley geconcludeerd dat het ook bij de verschijning in 1066 weer om dezelfde komeet moet zijn gegaan. Dit is de verschijning die is afgebeeld op het *Tapijt van Bayeux* (zie bladzijde 13).

Halley voorspelde dat weer zo'n 76 jaar na 1682 (in 1758) de komeet opnieuw te zien zou zijn. Halley was inmiddels overleden, maar de sensatie was groot toen zijn voorspelling juist bleek te zijn. Als eerbetoon kreeg de komeet zijn naam: de 'komeet van Halley'.

Komeet Halley is het laatst verschenen in 1986. De komeet is toen op vele plaatsen op Aarde nauwelijks met het blote oog te zien geweest. Dat kwam onder andere door al het strooilicht ten gevolge van de verstedelijking. De volgende afspraak met komeet Halley staat gepland voor 28 juli 2061.



Edmond Halley
(1656–1742)



In het midden van deze foto uit 1986 is komeet Halley vaag te zien.



Komeet Halley in 1986, gezien vanaf de sonde Giotto.

Opdracht 2 Een testmodel voor Mars omzetten naar een testmodel voor de Aarde of komeet Halley.

In feite hoeft maar weinig te veranderen om een testmodel voor Mars om te zetten naar een testmodel voor de Aarde of komeet Halley. In deze opdracht ga je na hoe een model om Keplers theorie te testen op Mars omgezet kan worden naar een model om Keplers theorie te testen op de Aarde. Als je dit geval begrijpt, begrijp je de andere gevallen ook. Die gaan net zo.

Je hebt in opdracht 5 van hoofdstuk 9 het model **KeplerMars** gebruikt om Keplers theorie te testen op Mars (zie blz. 72). Dit model doet het volgende:

1. De draaikolk-invloed bepalen, nadat wij eerst ‘verteld’ hebben met welke rotatiesnelheid van de Zon de computer moet werken.
2. De magnetische invloed bepalen, nadat wij eerst ‘verteld’ hebben met welke hoeveelheid magnetische draden in Mars de computer moet werken.
3. De echte beweging van Mars weergeven.
4. Voor een kleine tijdstap de constructiemethode uitvoeren met Keplers aanname over de beweging uit zichzelf, en daarbij de groene bol laten beginnen vanaf dezelfde positie als Mars.

Ga na of een testmodel van Keplers theorie voor de Aarde hetzelfde moet doen. En zo nee, wat er anders moet.

- a. Punt 1 blijft **wel** / **niet** hetzelfde voor een testmodel van Keplers theorie voor de Aarde. Zo **nee**, schrijf hieronder op wat er anders moet.

- b. Punt 2 blijft **wel** / **niet** hetzelfde voor een testmodel van Keplers theorie voor de Aarde. Zo **nee**, schrijf hieronder op wat er anders moet.

- c. Punt 3 blijft **wel** / **niet** hetzelfde voor een testmodel van Keplers theorie voor de Aarde. Zo **nee**, schrijf hieronder op wat er anders moet.

- d. Punt 4 blijft **wel** / **niet** hetzelfde voor een testmodel van Keplers theorie voor de Aarde. Zo **nee**, schrijf hieronder op wat er anders moet.

Opdracht 3 *Testmodellen voor de Aarde en voor komeet Halley.*

In deze opdracht ga je met behulp van enkele testmodellen de theorieën van Kepler en Newton verder testen. Gaan die theorieën die tests ook doorstaan? Lukt het om ook voor andere hemellichamen bewegingen te construeren die samenvallen met de echte bewegingen?

De testmodellen heten **KeplerAarde**, **KeplerHalley**, **NewtonAarde** en **NewtonHalley**. Hierbij is **NewtonHalley** bijvoorbeeld een model om Newtons theorie te testen op komeet Halley.

De tabel hieronder kun je voor Mars al invullen. Zie je resultaten bij opdracht 5 van hoofdstuk 9 (blz. 72), en bij opdracht 3 van hoofdstuk 10 (blz. 79).

Vul met behulp van de testmodellen de rest van de tabel in.

	Keplers theorie		Newton's theorie
	rotatiesnelheid	draden	massa
Mars			
Aarde			
Halley			

Opdracht 4 *Wie heeft het nu beter gedaan, Kepler of Newton?*

In de vorige opdracht heb je nieuwe testresultaten gekregen. Je hebt de theorieën van Kepler en Newton nu getest op drie hemellichamen: Mars, de Aarde en komeet Halley. Probeer op grond daarvan tot een keuze te komen.

a. Kies optie 1 of 2, en beantwoord daarvoor de verdere vragen.

(1) Op grond van alle testresultaten tezamen *kies ik voor Kepler.*

(2) Op grond van alle testresultaten tezamen *kies ik voor Newton.*

Als je optie 1 gekozen hebt, beantwoord dan onderdeel b.

Als je optie 2 gekozen hebt, beantwoord dan onderdeel c.

b. Leg met behulp van de tabel op de vorige bladzijde uit waarom je Keplers theorie beter vindt dan Newtons theorie.

Wat zou Newton moeten veranderen om je keuze te herzien?

c. Leg met behulp van de tabel op de vorige bladzijde uit waarom je Newtons theorie beter vindt dan Keplers theorie.

Wat zou Kepler moeten veranderen om je keuze te herzien?

11.3 Hoe zit het nou met komeet Kirch?

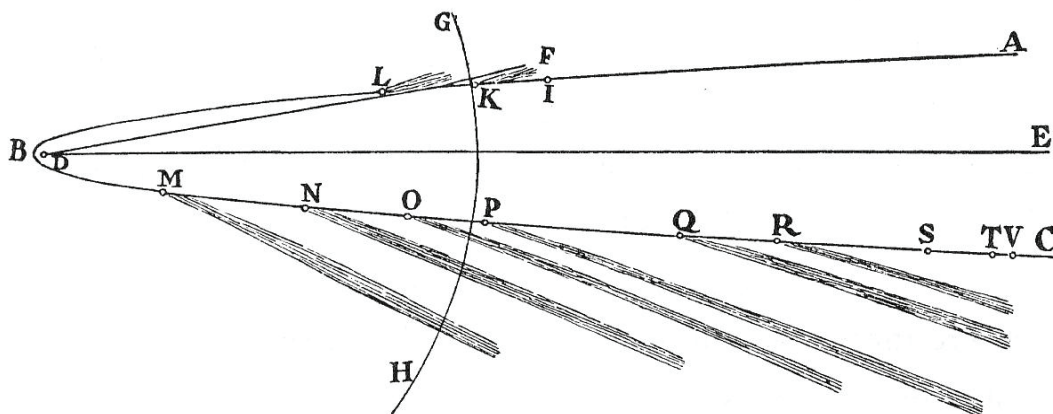
We kunnen de theorieën van Kepler en Newton niet direct testen op komeet Kirch. Want over de baan van deze komeet zijn onvoldoende gegevens beschikbaar. Maar kunnen we dan op zijn minst ‘voorspellen’ hoe komeet Kirch bewogen zal hebben? Dat kan inderdaad, als we er tenminste van uitgaan dat Newtons theorie klopt. Zo is Newton zelf ook te werk gegaan. Zie onderstaand kader voor meer informatie hierover.

Omdat komeet Kirch zo dicht in de buurt van de Zon kwam, was de invloed op de komeet daar heel groot. Daarom moet je met een heel erg kleine tijdstap werken om nauwkeurige resultaten te krijgen. Vraag je docent om een model te laten zien van de beweging van komeet Kirch volgens Newtons theorie. Vanwege de kleine tijdstap waarmee dit model rekt, duurt het erg lang en zie je de komeet maar erg langzaam bewegen.

Komeet Kirch

Newton behandelt komeet Kirch in zijn *Wiskundige Beginselen van de Natuurfilosofie*. Onderstaande figuur, waarvan de figuur op bladzijde 16 is afgeleid, is uit dat boek afkomstig.

Punt D stelt de Zon voor. Newton heeft de baan ingetekend zoals die uit zijn theorie volgt. Deze loopt perfect door posities waar de komeet is waargenomen (I, K, L, M, N, O, ...). Bij die posities heeft Newton ook steeds de staart van de komeet ingetekend.



Volgens Newtons theorie doorloopt een komeet, net als een planeet, een gesloten baan. Komeet Kirch zal dus, net als komeet Halley, weer een keer opnieuw verschijnen. Tenminste, als hij onderweg niet op iets anders botst, zoals komeet Shoemaker-Levy 9 op de planeet Jupiter (zie blz. 14). De geschatte omlooptijd van komeet Kirch is zo'n 10.000 jaar! Die zien we voorlopig dus niet meer terug.

Uit Newtons theorie volgt dat de hemellichamen in ons Zonnestelsel ten gevolge van de invloed van de Zon in ellipsbanen bewegen. Sommige van die ellipsbanen zijn heel ‘plat’, zoals die van komeet Kirch. Andere zijn meer cirkelvormig, zoals die van komeet Halley. De banen van planeten zijn bijna perfect cirkelvormig. Hoe plat of cirkelvormig de baan is, heeft onder andere te maken met de snelheid die het hemellichaam had bij het ontstaan van het Zonnestelsel.

11.4 Terugblik en vooruitblik

In dit hoofdstuk heb je de theorieën van Kepler en Newton ook op andere hemellichamen toegepast. Hieronder geef je de belangrijkste conclusie nog eens weer. Verder ga je na of het hoofddoel van de cursus ondertussen bereikt is.

Opdracht 5 *Newtons theorie werkt beter dan die van Kepler*

Leg duidelijk uit wat ‘beter werken’ hier inhoudt. Hoe heb je dat getest?

Opdracht 6 *Is Newtons theorie waar?*

Nadat Newton zijn theorie heeft toegepast op de planeten, op enkele manen van planeten en op komeet Kirch, schrijft hij:

“En de theorie die precies overeenstemt met een beweging die zich over zo’n groot gebied uitstrekt met zulke verschillen in snelheid [Newton doelt hier op de beweging van komeet Kirch], en die dezelfde wetten in acht neemt als de theorie voor de planeten, en die precies klopt met precieze sterrenkundige waarnemingen, kán niet anders dan waar zijn.”

Ben je het eens met Newtons conclusie dat zijn theorie wel waar móet zijn? **Ja / Nee.** Leg hieronder uit waarom wel of niet.

Opdracht 7 *Is het hoofddoel van de cursus nu bereikt?*

Kijk nog eens terug naar het hoofddoel van deze cursus (zie bladzijde 11).

Leg hieronder uit wat er van het hoofddoel ondertussen bereikt is. En ook wat er misschien nog aan ontbreekt.

12 Afronding van de inleidende cursus

12.1 Inleiding

Ondertussen heb je behoorlijk wat geleerd over mechanica. In dit hoofdstuk kijk je daar nog eens op terug. Maar je kijkt ook vooruit naar wat er nog meer te leren valt over het verklaren van bewegingen.

12.2 Terugblik: wat heb je allemaal geleerd?

Methodes die gebruikt zijn om te kiezen tussen Kepler en Newton

In deze cursus zijn drie belangrijke methodes aan de orde geweest.

1. Een methode om een beweging te construeren op basis van aannames over invloeden en over de beweging uit zichzelf.
2. Een methode om concrete aannames te testen.
3. Een methode om te kiezen tussen concrete aannames.

Deze methodes zijn toegepast op de aannames die Kepler en Newton hebben gemaakt om de bewegingen te verklaren van hemellichamen in ons Zonnestelsel. In het bijzonder van planeten en kometen.

Opdracht 1 *De drie methodes samengevat*

In het kader staan drie methodes die gebruikt zijn om te kiezen tussen Keplers theorie en Newtons theorie.

Geef hieronder de drie methodes eens kort in je eigen woorden weer.

- a. De methode om een beweging te construeren op basis van aannames over invloeden en over de beweging uit zichzelf:
- b. De methode om concrete aannames te testen:
- c. De methode om te kiezen tussen concrete aannames:

Newton's theorie voor de hemellichamen is beter dan die van Kepler

Uiteindelijk bleek Newton's theorie voor de hemellichamen het beter te doen dan Keplers theorie.

- Newton's aannames leveren de correcte beweging op voor Mars.
- Newton's beïnvloedingstheorie blijkt ook van toepassing te zijn op andere hemellichamen, steeds met dezelfde waarde voor de massa van de Zon.

Met Keplers aannames kan voor elk hemellichaam apart de theoretisch geconstrueerde beweging nog wel kloppend gemaakt worden. Maar het lukt niet om één theorie op te stellen die op alle hemellichamen tegelijk van toepassing is. Dit heb je in hoofdstuk 11 gezien.

Newton's aanname over de beweging uit zichzelf blijkt keer op keer beter te werken dan die van Kepler

Welke aannames moet je maken als het om andere bewegingen gaat dan die van hemellichamen? Bijvoorbeeld van een voetbal tijdens een voetbalwedstrijd of van een remmende auto. Het is duidelijk dat dan andere aannames over de *invloeden* gemaakt moeten worden. Welke precies, hangt van de situatie af.

Anders is het met de aanname over de *beweging uit zichzelf*. Kepler en Newton vonden allebei dat hun eigen aanname op *alle* voorwerpen van toepassing moet zijn, en niet alleen op hemellichamen. Maar net zoals bij hemellichamen, blijkt het ook in andere gevallen steeds zo te zijn dat Newton's aanname het beter doet.

- Ook voor bijvoorbeeld de beweging van een remmende auto blijkt het zo te zijn dat deze tijdstapje voor tijdstapje verklaard kan worden als de combinatie van:
 - uit zichzelf rechtdoor blijven bewegen;
 - een afwijking hiervan ten gevolge van de invloed door een ander voorwerp (bijvoorbeeld wrijvingskracht met het wegdek).
- Bovendien blijkt het steeds mogelijk voor de invloed door zo'n ander voorwerp een geloofwaardige beïnvloedingstheorie op te stellen. Bijvoorbeeld een beïnvloedingstheorie die zegt waar het van afhangt hoe groot de wrijvingskracht is die een wegdek op een auto uitoefent.
- Die beïnvloedingstheorie blijkt dan ook van toepassing te zijn op soortgelijke voorwerpen onder soortgelijke omstandigheden. Bijvoorbeeld op remmende fietsers of uitglijdende schaatser.



Ook bij een remmende auto werkt Newton's aanpak beter.

Met Keplers aanname over de beweging uit zichzelf blijkt zoiets, net als bij hemellichamen, eigenlijk keer op keer *niet* te lukken. Daarom werkt niemand tegenwoordig nog met Keplers aanname.

In het vervolg werken we met Newtons aanname over de beweging uit zichzelf

Tegenwoordig gelooft niemand nog in Keplers aanname over de beweging uit zichzelf. Toch hebben we in deze inleidende cursus Kepler wel uitgebreid behandeld. Niet alleen om iets te leren over de ontstaansgeschiedenis van een belangrijke wetenschappelijke theorie. Maar vooral ook om meer inzicht te krijgen in het hoe en waarom van mechanica. Juist door Kepler te hebben bestudeerd, kun je Newton beter begrijpen.

Opdracht 2 *Mogelijke bezwaren tegen Newtons aanname over de beweging uit zichzelf*

Volgens Newton is het zo dat een komeet ook zonder invloed door blijft bewegen. Voor een komeet kan dat kloppen, maar op Aarde is het toch echt anders. Om een kinderwagen met dezelfde snelheid te laten bewegen, moet je blijven duwen. Anders komt de kinderwagen tot stilstand. Ook een bal die je wegrolt komt uiteindelijk tot stilstand. Hetzelfde geldt als je stopt met trappen op je fiets. Voor kinderwagens, ballen en fietsen is het dus niet zo dat ze door blijven bewegen. Dus misschien klopt Newtons aanname wel voor hemellichamen, maar geldt de aanname ook op Aarde? Is 'langzaam tot stilstand komen' dan bijvoorbeeld niet een betere aanname over de beweging uit zichzelf?



Als je niet duwt, komt de kinderwagen tot stilstand.

Leg hieronder uit waarom Newtons aanname over de beweging uit zichzelf toch ook van toepassing is op kinderwagens, ballen en fietsen.

12.3 Toepassing van Newtons aanpak op andere bewegingen

In hoofdstuk 1 heb je enkele voorbeelden gezien die met mechanica veel preciezer te begrijpen zouden zijn

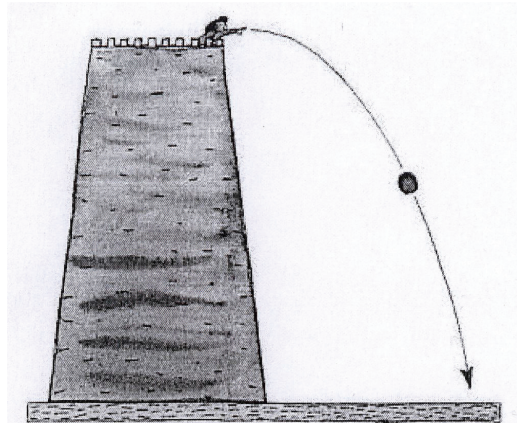
- Hoe Fignon de *Tour de France* van 1989 had kunnen winnen.
- Hoe je een ruimtesonde in een speciale baan om de Zon kunt krijgen.
- Waarom het altijd verstandig is om een autogordel te dragen.

Vraag je docent om een werkblad, als je wilt weten hoe je Newtons methode kunt gebruiken om zo'n voorbeeld precies aan te pakken.

Newtons aanpak is trouwens niet alleen nuttig als je heel *precies* wilt werken. Vaak kun je Newtons methode ook handig gebruiken om een *ruwe* verklaring te geven van een beweging. In de volgende opdracht zie je daar een voorbeeld van.

Opdracht 3 *Een voorbeeld van een alledaagse beweging: een bal die horizontaal weggegooid is*

Newton's aanpak kan ook gebruikt worden om alledaagse bewegingen te verklaren. In deze opdracht ga je een ruwe verklaring geven van de baan van een bal die horizontaal is weggegooid. Namelijk door de constructiemethode toe te passen met Newton's aanname over de beweging uit zichzelf. De verklaring is 'ruw', omdat je met een vrij grote tijdstap werkt.

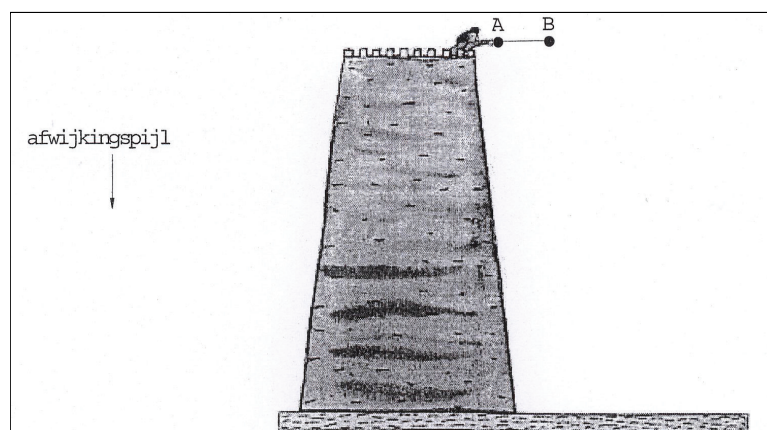


Om de constructiemethode toe te kunnen passen, moeten we aannames maken over de beweging uit zichzelf en over de invloeden die op de bal werken. We nemen de volgende.

- Newton's aanname over de beweging uit zichzelf. (Deze aanname maken we vanaf nu dus altijd.)
- Op de bal werkt de zwaartekracht. Deze is steeds even groot, en steeds naar de grond gericht. In elk tijdstapje veroorzaakt de zwaartekracht de aangegeven afwijking (zie de afwijkingspijl).

Door de worp is de bal in het eerste tijdstapje van A naar B gegaan.

Construeer de beweging van de bal vanaf B. Gebruik je geodriehoek om een nette constructie te maken.



12.4 Vooruitblik: overgang naar je gewone natuurkunde-boek

Down to earth

In deze inleidende cursus ging het vooral over hemelmechanica. Dus over de verklaring van bewegingen van hemellichamen: planeten, kometen, etc. In je gewone natuurkunde-boek gaat het vooral over de verklaring van alledaagse bewegingen op aarde, zoals bewegingen in de sport of in het verkeer.

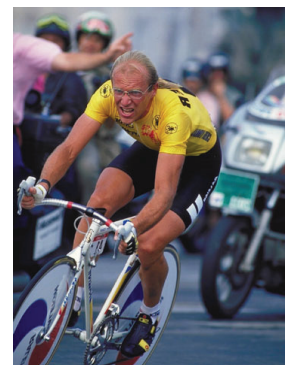
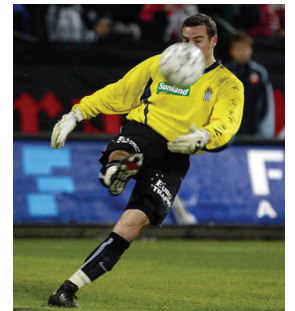
Van vertrouwde bewegingen een wetenschappelijke verklaring geven

Met de bewegingen van alledaagse voorwerpen zoals auto's, fietsen en voetballen ben je je hele leven al *vertrouwd*. Meer vertrouwd, in ieder geval, dan je tot voor kort was met de bewegingen van planeten en kometen. Dat maakt de aardse mechanica wat meer *voorstelbaar* dan de hemelmechanica. Anderzijds maakt die vertrouwdheid het ook weer moeilijker. Want met de verklaring van de bewegingen van auto's, fietsen en voetballen ben je op een *alledaagse* manier vertrouwd, en niet op een *wetenschappelijke*.

Met meerdere krachten tegelijk werken

Er is ook nog een ander belangrijk verschil tussen hemelmechanica en aardse mechanica. Bij de hemelmechanica was er, in ieder geval bij Newton, eigenlijk steeds sprake van slechts één invloed. Bij de aardse mechanica werken er bijna altijd meerdere soorten krachten of invloeden tegelijk. Zo heb je bij fietsen te maken met spierkracht, luchtwrijving, wrijving met de grond, zwaartekracht en normaalkracht.

Dit maakt de toepassing van Newtons methode op alledaagse situaties vrij ingewikkeld. Je moet van veel voorkomende krachten weten in welke richting ze werken, hoe groot ze zijn, waar de grootte van afhangt, etc. Kortom, je moet van alledaagse krachten weten welke beïnvloedingstheorie daarvoor geldt. Verder moet je weten hoe al die krachten samenwerken, om te kunnen bepalen hoe voorwerpen ten gevolge daarvan gaan bewegen. In je gewone natuurkunde-boek ga je daar dieper op in.



Bewegingen in verkeer en sport.

