

Inhoud

Deel 1 Vogels doen iets wat wij niet kunnen 9

- 1.1 Waarom willen we dit weten? 11
 - We zien ze vliegen* 11
 - Vliegbewegingen spotten in het veld* 13
- 1.2 De groei van kennis 19
 - Oude ideeën* 19
 - Voortschrijdende inzichten* 25
 - De opkomst van de aerodynamica* 33
 - De toepassing van principes* 40
 - Wat is er in 20ste eeuw ontdekt?* 47

Deel 2 Vogelvlucht 57

- 2.1 Het vliegapparaat 59
 - Vleugelanatomie* 60
 - Dynamische eigenschappen van vleugels* 73
 - Relatieve vleugelafmetingen* 78
 - Hoe komen we achter de werking van vogelvleugels?* 80
 - Bouw en functie van de staart* 82
 - Hoe is de rest van het lichaam aangepast aan het vliegen?* 86
- 2.2 Veren om te vliegen 89
 - De bouw van een pen* 90
 - Functionele interpretaties van microstructuren van vliegveren* 95
 - Mechanische eigenschappen van veren* 102
 - Versmalde vlaggen* 108

Hoe gevoelig zijn veren en kunnen ze zelfstandig bewegen? 109

2.3 *Aerodynamica* 113

Schattingen van krachten en vermogens 114

Het zichtbaar maken van luchtbewegingen 118

De stroming rond de vleugels van een zwevende vogel 124

De aerodynamica van de slagvlucht 136

Staartaerodynamica 140

2.4 *Evolutie* 143

Archaeopteryx 144

Kon Archaeopteryx nu wel of niet vliegen? 149

Ecologie en evolutie 158

Andere vondsten 162

2.5 *Vliegstrategieën* 169

Het vliegplan 170

Slagvlucht 175

Helikoptervlucht 183

Bidden 188

Energiebesparende vliegtechnieken bij slagvlucht 193

Zweefvliegen 199

Manoeuvreren 204

Vliegsnelheden 208

2.6 *De motor* 211

Onder de motorkap van een spreeuw 211

De werking van de spieren 214

Kracht en arbeid van de grote borstspier 222

De belangrijkste spier voor de opslag 227

Spieren in de staart 228

Vleugelslagen en ademhaling 230

- 2.7 Hoe duur is vliegen? 233
Schattingen gebaseerd op gewichtsverlies 237
Zuurstofverbruik en kooldioxideproductie 243
Gasuitwisseling in windtunnels 246
Metingen met stabiele isotopen 251
Vergelijken van vliegkosten 258
- 2.8 Wat weten we er nu van? 265
Functionele anatomie 265
Aerodynamica 266
Evolutie 268
Vliegtechnieken 268
Fysiologie en energieverbruik 271

Dankbetuiging 273

Eenheden en afkortingen 275

Bronnen 277

1.1 Waarom willen we dit weten?

We zien ze vliegen

II

Vogels zijn gevederde viervoeters die hun voorpoten als vleugels gebruiken. Er vliegen nu ongeveer 8500 soorten rond en elk daarvan doet dat op zijn eigen manier. Er zijn natuurlijk gemeenschappelijke kenmerken die het vliegen mogelijk maken, maar de verschillen zijn enorm. Zowel de overeenkomsten als de verschillen zijn boeiend. Het feit dat gewervelde dieren, dat wil zeggen de groep dieren waar wij ook toe behoren, zo aangepast kunnen zijn dat ze de zwaartekracht overwinnen, fascineert ons en we willen weten hoe ze dat doen.

De bestaande kennis is verspreid terug te vinden in gespecialiseerde wetenschappelijke publicaties en is daarom voor de leek niet gemakkelijk toegankelijk. Daar komt nog bij dat aerodynamische principes vaak worden beschreven in wiskundige termen waarbij geen plaats wordt ingeruimd voor uitleg aan degenen die voornamelijk in vogels geïnteresseerd zijn. Aan de andere kant is de biologische complexiteit en diversiteit vaak moeilijk te volgen voor lezers met een technische of wis- en natuurkundige achtergrond. Ik wil in dit boek proberen de verschillende aspecten van het vliegen bij vogels duidelijk te maken voor alle geïnteresseerde lezers.

Het principe van het vleugelontwerp van de meeste vliegtuigen is gebaseerd op de werking van slechts een deel van de vogelvleugel. Structuur en functie van vogelvleugels verschillen op veel punten fundamenteel van die van vliegtuigen. Vogelvleugels bestaan uit een arm- en een handgedeelte en ze kunnen worden gestrekt, gevouwen en gedraaid. De vleugelvorm kan door de vogel drastisch worden gewijzigd, zowel zwevend als tijdens de slagvlucht.

Slaande vleugels genereren niet alleen opwaartse kracht (lift) maar ook stuwkracht. Het zal duidelijk worden dat aerodynamische theorieën die verklaren hoe conventionele vliegtuigen vliegen niet toereikend zijn om de zweef- en slagvlucht van vogels te begrijpen. De meeste vogels kunnen op een tak landen, een vliegtuig kan dat niet. Een van de doelstellingen van dit boek is duidelijk maken hoe vogels dat precies doen.

12 Dit boek is een beknopt herschreven Nederlandstalige versie van mijn boek *Avian Flight* waarvan de tweede druk in 2006 als paperback verscheen bij Oxford University Press. De nieuwste gegevens zijn erin verwerkt. Het begint met een overzicht van de kennisontwikkeling in de loop van de geschiedenis. Het behandelt vervolgens in aparte hoofdstukken de bouw van de onderdelen van het vliegapparaat, de aerodynamica, de evolutie, de vliegbewegingen, de werking van vliegspijeren, het energieverbruik en buigt zich ten slotte over de metingen van vlieggkosten. Ik gebruik de Nederlandse vogelnamen die de database *Avibase* op het internet vermeldt; daar zijn ook de wetenschappelijke benamingen en namen in andere talen te vinden (<http://avibase.bsc-eoc.org>).

Het is de intentie dat iedereen die wil weten hoe vogels vliegen na het lezen van dit boek in ieder geval weet in hoeverre die vraag beantwoord kan worden.

Mijn interesse in dit onderwerp stamt uit het begin van de jaren zestig toen ik als student biologie in Amsterdam het boek *Vlieggkunst in het dierenrijk* las. Het is geschreven door professor E.J. Slijper, de hoogleraar die mij toen het meest inspireerde. De beroemde natuurkundige J.M. Burgers van de TH Delft was zijn coauteur. De interesse in de ecologie van torenvalken van collega Serge Daan aan de Rijksuniversiteit Groningen bracht mij er twintig jaar later toe om het vliegvermogen en het energieverbruik van die dieren te bestuderen. Aerodynamicus Daniel Weihs van het Technion te Haifa onderbouwde onze metingen met de nodige fysische principes. Torenvalken en ruigpootbuizerds werden als valkeniersvogels getraind voor wetenschappelijke experimenten. Het werken met die dieren leverde onder andere een sterke affiniteit met het onderwerp op die niet verdwijnt.

Er zijn tal van redenen waarom het vliegen van vogels de mens fascineert. Een belangrijke reden is dat we nog steeds niet precies weten hoe ze het doen; het starten, vliegen en landen zitten nog vol mysteries. De bewegingen zijn meestal zo snel dat ze met het blote oog niet te volgen zijn. Wat er binnen in de vogel gebeurt tijdens het vliegen is al helemaal moeilijk te bestuderen. Ons gebrek aan kennis is voor een belangrijk deel te wijten aan het feit dat we niet kunnen zien en ook moeilijk kunnen meten wat er gebeurt met de lucht waar de vogel doorheen vliegt. (Kleindochter Elise merkte op toen ze vijf was: ‘Opa, lucht zie je niet maar voel je wel.’) Wat we er wel van weten probeer ik in dit boek samen te vatten.

Vliegbewegingen spotten in het veld

Naar vliegende vogels kijken kan op elke willekeurige plaats en op elk moment. Het is zeer de moeite waard en erg nuttig voor het inzicht in de verscheidenheid van vliegtechnieken.

Onze tuin in Noordlaren is speciaal aangelegd met het doel zoveel mogelijk vogels aan te trekken. We hebben gezorgd voor afwisseling: veel bomen, lange bosranden, poelen en weitjes. Er zijn diverse nestkasten en zelfs een ooievaarsnest op een dertien meter hoge paal. Was het 25 jaar geleden nog een weiland, nu is het een reservaatje waar de reeën uit het aangrenzende Noordlaarderbos 's zondags schuilen wanneer het er druk is met wandelaars en hun honden. Ongeveer negentig vogelsoorten namen we er tot nu toe waar; in grootte variërend van het minuscule goudhaantje tot de majestueuze zeearend (twee stuks verbleven enkele nachten op het ooievaarsnest). Het is echter niet zozeer de variatie in soorten en afmetingen van de vogels die mij het meest treft, maar het feit dat, als je goed kijkt, elke soort op zijn eigen manier blijkt te vliegen. Hier volgen enkele waarnemingen uit onze tuin om dat te illustreren.

Vanaf de plek waar ik dit schrijf zie ik in de winter vaak goudhaantjes in een dichte taxusstruik vlak voor het raam. Europa's

kleinste vogeltjes zoeken daar naar insecten en springen rusteloos van tak tot tak met van die kleine fladderende bewegingen. Als ze grotere afstanden afleggen, vliegen ze met snorrende vleugelslagen en veel schijnbewegingen, waardoor het vlieggedrag niet erg efficiënt lijkt. Dit typische gedrag is echter, net als veel natuurlijk vlieggedrag, nog nooit wetenschappelijk onderzocht en dus weten we niets van snelheden, vleugelslagfrequenties of van de aard van de schijnbewegingen, laat staan dat er getallen zijn die de efficiëntie aantonen. Winterkoninkjes vliegen met hun ronde vleugeltjes ook in snorvlucht van heg naar heg en lijken dan op superdikke hommels. Door de hoge (maar nooit gemeten) vleugelslagfrequenties zie je de vleugels niet meer. Huismussen eten mee met de kippen, en vliegen de ren in en uit dwars door het gaas met een opening van 5 cm. Ze schieten erdoorheen zonder snelheid te minderen. Tijdens de slagvlucht moeten ze dus in staat zijn om op het juiste moment de vleugels tegen het lichaam te vouwen. De putter, die naast het kippenhok van de zaadjes van de kaardenbollen eet, vouwt tijdens de op en neer golvende vlucht de vleugels regelmatig even tegen het lichaam, telkens tijdens het opgaande stuk van de golfbeweging. Veel kleine zangvogels doen dat ook, maar als je ze soort voor soort bekijkt, doen ze het allemaal een beetje anders. Spechten die van boom tot boom vliegen zijn onmiddellijk te herkennen aan dit golvende vlieggedrag. Eksters golven ook maar slaan vaak met de vleugels terwijl ze omhooggaan en zweven met gespreide vleugels naar beneden.

Havik en sperwer schieten op volle snelheid met slaande vleugels in het dichte bos tussen de bomen en takken door zonder die te raken. Ze vliegen ook hoog boven het terrein, daarbij met veel lawaai lastiggevallen door klein grut dat gedurfde schijnaanvalen uitvoert. De buizerds zijn er ook dagelijks; ze vergrijpen zich aan onze kippen in de winter wanneer die los door de tuin mogen lopen. 's Zomers cirkelen ze zwevend in de opstijgende warmte. Ze roepen naar elkaar en in de baltstijd laten ze zien hoe goed ze ondersteboven kunnen vliegen. Het is even oefenen om vogels te volgen door de kijker, maar heb je eenmaal de slag te pakken, dan zie je pas goed hoe acrobatisch ze kunnen vliegen. Valken zijn te

onderscheiden aan hun spitse vleugels. De torenvalken broeden in een nestkast op een hoge paal, tenminste, wanneer de kauwtjes ze niet hebben verjaagd door de ingang van de kast te barricaderen met takken. De luchtgevechten om de kast zijn spectaculair. Torenvalken eten vooral veldmuizen die ze vangen door te bidden. Daarbij vliegen ze tegen de wind in met de snelheid van de wind zodat ze stilstaan boven de grond. Dit gedrag fascineert me en ik heb er jaren onderzoek naar gedaan zoals verderop in dit boek zal blijken. Stilstaan in de lucht zonder wind, zoals de kolibrie dat doet, kunnen torenvalken niet. Ik heb een nestkastje voor kolibries in de tuin gehangen hoewel ik weet dat ze alleen op het Amerikaanse continent voorkomen, maar je weet maar nooit want ze worden in Nederland gefokt. In onze streken kunnen kleine vogeltjes zoals de grauwe en de bonte vliegenvangers, mezen en mussen heel kort stilstaan in de lucht. De ijsvogel spot de rietvoortjes in de vijver het liefst vanaf een tak, maar hij kan het ook vanuit helikoptervlucht.

Vogels die insecten eten in de vlucht kunnen extreem snel manoeuvreren, remmen, wenden en keren. De boeren- en de huiszwaluw hebben het nogal eens op mijn bijen gemunt. De gierzwaluw, die overigens niet verwant is aan de andere zwaluwen maar er wel vrijwel net zo uitziet, is misschien wel de beste vlieger van allemaal. Gierzwaluwen zijn vrijwel hun hele leven los van de grond. Ze brengen de nacht in de lucht door waarbij ze op enkele kilometers hoogte langzaam tegen de wind in vliegen. Zelfs paren doen ze vliegend. Ze eten vliegende insecten en drinken regendruppels. Ik zag ze in Eritrea, in een gebied waar het vrijwel nooit regent, al vliegend met open snavel water scheppen uit een meertje. Aan de grond komen ze alleen maar om te broeden, in nesten op hoge plekken. De jongen verlaten het nest zonder verdere hulp van de ouders en vliegen meteen naar enkele kilometers hoogte om te oefenen. Ze blijven vervolgens wel drie jaar in de lucht tot ze zelf aan het voortplantingsproces gaan deelnemen. Elk jaar vliegen ze duizenden kilometers heen en weer tussen Afrika en Europa. Ze kunnen snelheden van meer dan 100 km/u halen als ze gierend door de stad jakkeren, maar meestal vliegen ze langzamer.

In de herfst, als de zwaluwen weg zijn, doen de spreeuwen ze

hoog in de lucht na. Ze zien er dan uit als miniatuur-gevechts-vliegtuigjes met slaande deltavleugels. Ze vangen ook insecten tijdens het vliegen, maar doen dat veel klungeliger dan de zwaluwen. Toch zijn het fascinerende luchtacrobaten, vooral wanneer ze in hele grote groepen bij elkaar komen en een wervelende vliegshow laten zien. Ze jakkeren synchroon manoeuvrerend op hoge snelheid dicht bij elkaar zonder elkaar te raken door de lucht. Het hoe en waarom van dit gedrag is nog steeds onduidelijk.

Achter in het bos bij een ondiepe poel jaagt de blauwe reiger vaak op kikkers en kleine watersalamanders. Als je er langs wandelt verjaag je hem en moet hij vrijwel verticaal opstijgen. Dat is een spectaculaire manoeuvre voor zo'n grote vogel. De aalscholver doet zich bij de vijver achter het woonhuis tegoed aan de volwassen rietvoorns. Die zijn uitgezet om de muggenlarven in toom te houden. Als ik hem verjaag kan hij met zijn natte verenpak niet opstijgen zonder eerst de buit uit te kotsen. Die natte veren zorgen ervoor dat hij onder water weinig last heeft van lucht tussen de veren. Lucht geeft onder water een opdrijvende kracht die hinderlijk is bij het najagen van de vissen. Als hij met rust gelaten wordt gaat de aalscholver eerst met gespreide vleugels zitten drogen op het muurtje naast de vijver voordat hij met een stuk of zes voorns in zijn krop en maag vertrekt.

De houtduiven hebben een mooie baltsvlucht, steil omhoog dan een luide klap met de vleugels, gevolgd door een zweefvlucht met gespreide staart en de vleugels in een V-positie.

Ik kan weinig speciaals ontdekken aan het vlieggedrag van merels en zanglijsters, maar misschien kijk ik niet goed genoeg. Ze zijn wel te herkennen aan het vliegbeeld, dus er moet iets zijn wat ze van andere vogels onderscheidt.

Eksters en staartmezen zijn vogels met naar verhouding zeer lange staarten. Waarnemingen van het vlieggedrag maken niet zonder meer duidelijk waar die lengte voor dient. Er zijn veel onbeantwoorde vragen die opkomen bij het kijken naar individueel vlieggedrag in de vrije natuur. Gaaien maken bijvoorbeeld enkele klappen en zweven; er zit iets vreemds in die beweging, maar ik kan niet precies uitleggen wat het is.

De boomklever verplaatst zich meestal te voet op de stam van de grote eik naast ons huis, waar hij een nestkast bewoont die hij zelf heeft aangepast door de ingang grotendeels dicht te metselen met leem. De korte afstand naar de voertafel legt hij af in een rechte lijn; over grotere afstanden is de vlucht golvend. Nijlganzen komen nog niet zo lang in Nederland voor, maar ze voelen zich hier thuis, zoals blijkt uit de grote aantallen. Dertig jaar geleden op expeditie in Kenia wachtten we urenlang geduldig om er een mooi op de foto te krijgen, nu kan dat in de eigen tuin. Op een open vlakke landen ze, net als de autochtone ganzen, heel mooi door tegen de wind te zweven en hoogte te verliezen tot ze vlak boven de grond met een enkele vleugelslag stilstaan. Deze nieuwkomer onder de ganzen is extra bijzonder omdat hij ook nog eens in bomen kan landen (en broeden).

Fazanten zien we niet veel meer sinds het uitzetten ervan niet meer is toegestaan. Patrijzen waren altijd al zeldzaam. Het zijn vogels die verticaal kunnen opstijgen vanuit stilstand. Het is een geweldige truc om aan jachthonden te ontkomen, maar eenmaal in de lucht zijn ze een gemakkelijke prooi voor jagers.

Er zijn zoveel kleine en grote verschillen in vliegkunst tussen de soorten onderling dat je daar wel uren naar kunt kijken zonder dat het verveelt. Je begint dan in te zien hoe groot de diversiteit aan vliegtechnieken is onder vogels. Elk van die technieken houdt de vogel in de lucht, maar hoe precies? Het is moeilijk voor te stellen dat er maar één basistechniek is.

Dit boek wil de kennis over de verschillende aspecten van de vogelvlucht samenvatten. Het is de bedoeling om belangstelling voor dit onderdeel van de ornithologie te wekken en te vergroten, maar ook om te laten zien hoe weinig we er nog maar van weten.

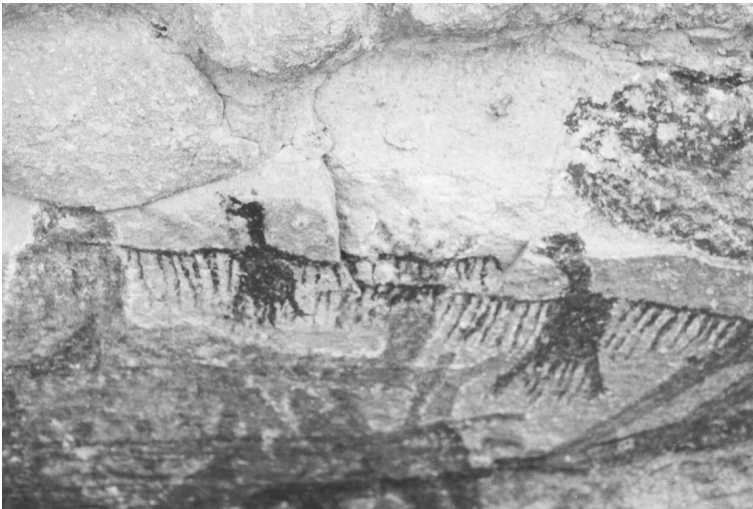
Achter in het boek vindt de lezer een lijst van gebruikte eenheden en afkortingen.

1.2 De groei van kennis

Oude ideeën

19

De vraag hoe vogels vliegen is zo oud als de mensheid, maar het definitieve antwoord is er nog steeds niet. Prehistorische kunst laat die interesse voor vliegende vogels soms zien. Schilderingen in halfopen grotten in de Sierra de San Francisco, een diep ravijn in de centrale woestijn van de Baja California (Mexico), zijn daar een prachtig voorbeeld van. De schilderingen zijn pre-indiaans en



Prehistorische schilderingen van vogels uit Baja California, Mexico.

tonen al of niet met pijlen doorboorde mensen en dieren in rode en zwarte pigmenten. De mooiste grotten mogen alleen bezocht worden onder leiding van een officiële gids en die neemt slechts

één klein groepje per keer mee op de driedaagse tocht per muil-
dier. Er is nooit meer dan één expeditie tegelijk in het gebied. Van-
af de hoogvlakte duurt de afdaling in het ravijn een hele dag. Ezels
gaan mee om de bagage te dragen. De volgende morgen moet er
dan nog (te voet) een uurtje pittig geklommen worden om de eer-
ste grot te bereiken. De terugweg omhoog uit het ravijn is zo steil
dat de muildieren regelmatig stilstaan om op adem te komen en
er anderhalve dag over doen om ons weer bij de auto te brengen.
Dus is het nodig om halverwege de klim opnieuw voor de nacht te
kamperen. Het is moeilijk om tegen de helling een vlak plekje voor
de tent te vinden. De tocht is beslist de moeite waard. Het is vol-
komen terecht dat de UNESCO die kunstwerken tot werelderfgoed
verklaarde. In verschillende grotten zijn impressies te zien van
grote vogels met gespreide staarten en gestrekte vleugels. Hoog
in de lucht zwevende roofvogels zijn hier mogelijk de bron van
inspiratie. In één grot, de Cueva de la Soledad, is een merkbaar-



Prehistorische afbeelding van een landende aalscholver.

dige vogel met zwart pigment hoog tegen het plafond getekend. De tekening is zo nauwkeurig dat ze ons iets kan vertellen over de ornithologische kennis van de maker, en de details suggereren dat deze de landing van de vogel heel precies waarneemt en interpreteert. Het is waarschijnlijk de Brandt-aalscholver, een soort die nog steeds in dat deel van de wereld voorkomt. De sterk naar achteren gerichte handvleugels zijn benadrukt door de armvleugels erg kort weer te geven. De tekenaar weet kennelijk dat vogels ter hoogte van het polsgewricht duimvleugels hebben. Ze zijn links en rechts in gespreide stand getekend. Zwemvliezen tussen de tenen zijn niet te zien maar de extreme spreiding van de tenen toont hoe aalscholvers de achterpoten als rem in de lucht gebruiken. Mogelijk vertelt deze tekening ons iets over gedetailleerde inzichten in het mechanisme van de landing. Wat wist deze kunstenaar nog meer over de vliegkunst van vogels?

Daar komen we niet achter want het duurt millennia voor kennis in geschreven vorm wordt doorgegeven. De oude Griekse beschaving kan als startpunt dienen. Belangstelling voor de vliegkunst blijkt uit de mythe van Daedalus en zijn zoon Icarus. Die plakten veren op hun lichaam om uit de gevangenis van koning Minos op Kreta te kunnen ontsnappen.

De filosoof en natuurkundige Aristoteles had uitgesproken meningen die in Europa en het Nabije Oosten meer dan twintig eeuwen de waarheid vormden. Zijn manier van denken is ons voor een deel vreemd en we moeten ons erin verdiepen om erachter te komen wat hij nu precies wist. Mijn bron is de Engelse vertaling door Barnes van zijn gehele oeuvre in twee delen (2487 pagina's), uitgegeven in 1991 door Princeton University Press.

Aristoteles deelt het leven op aarde in op basis van drie levensbeginselen of zielen: de mens beschikte over een rationele ziel (*psychè*) die hem in staat stelt te groeien, zich voort te planten, te bewegen en te denken. Bij de dierlijke ziel ontbreekt het denkvermogen, en de plantaardige ziel zorgt uitsluitend voor groei en voortplanting. De natuur is gerangschikt van hoog naar laag. Onderaan staat onbezielde stof en daarboven, van laag naar hoog, de planten, de dieren en de mens. De man staat op het hoogste niveau

want hij is van nature superieur aan de vrouw en, in tegenstelling tot haar, warm en actief. Vrouwen zijn koud; ze worden geboren bij noordenwind. De dieren bestaan van hoog naar laag uit andere zoogdieren dan de mens, dieren die eieren leggen en schaaldieren. Deze van hoog naar laag getrapte indeling wordt later door de grote religieuze stromingen overgenomen en bestaat daarom tot de dag van vandaag, ondanks het feit dat de moderne wetenschap er zich van distantieert. Gezien vanuit de mens die het leven op aarde beschrijft, is het een voor de hand liggende gedachte. Ik betrap me er zelf nog wel eens op dat ik het over hogere en lagere diergroepen heb, maar in feite is dit onjuist; de vraag is welke criteria je voor een dergelijke kwalificatie hanteert. Vierentwintig eeuwen geleden kijkt Aristoteles heel precies naar bewegingen en ontwikkelt hij theorieën over het bewegen door de lucht. Over het vliegen van vogels maakt hij wat losse opmerkingen maar geeft hij nergens een complete verklaring. Hij denkt heel fundamenteel en probeert fenomenen als vliegen door lucht en bewegen in water in algemene zin te verklaren door uit te gaan van waarnemingen en van theoretische beschouwingen. Jammer genoeg vertrouwt hij zijn filosofieën meer dan zijn waarnemingen. In zijn denkwereld is kracht gelijk aan massa maal snelheid. Wij leren op school dat het massa maal versnelling moet zijn. In ons systeem van internationaal erkende standaardeenheden (het SI-systeem) is de kilo (kg) de eenheid van massa, de meter (m) de eenheid van lengte en de seconde (s) die van tijd. Snelheid is daarin de verandering van plaats per tijdseenheid in meter per seconde (m/s) en versnelling de verandering van snelheid per tijdseenheid in meter per seconde per seconde of, anders gezegd, meter per seconde in het kwadraat (m/s^2). De eenheid van kracht is massa maal versnelling en heet nu Newton ($N = kg \ m/s^2$). We spreken in de volksmond over gewicht in kilogrammen maar dat is niet correct, het zouden Newtons moeten zijn, want gewicht is een kracht gelijk aan de massa maal de versnelling van de zwaartekracht.

Maar ik loop ver vooruit op wat Aristoteles dacht. Die is er zich wel van bewust dat snelheid kan veranderen en kent de begrippen versnelling en vertraging, maar geeft ze geen rol in zijn verklaring

van de oorzaak van beweging. Hij denkt dat een kracht die gedurende een bepaalde tijd in staat is om een voorwerp over een zekere afstand te verplaatsen, een half zo zwaar voorwerp over de dubbele afstand kan verplaatsen in dezelfde tijd. Met andere woorden, een kracht die een voorwerp een zekere snelheid kan geven, is in staat om een half zo zwaar voorwerp de dubbele snelheid te bezorgen. Beweging kan volgens Aristoteles uitsluitend bestaan zolang er een kracht op een voorwerp wordt uitgeoefend. Hij denkt dat de beweging ophoudt zodra de kracht wegvalt. Volgens hem zijn er drie dingen noodzakelijk om te kunnen bewegen: de beweger, het bewegende voorwerp, en tijd. Een voorwerp kan slechts bewegen zolang de beweger er een kracht op uitoefent. De beweger moet zelf onbeweeglijk zijn of steunen op iets wat niet beweegt. Deze filosofische principes maken het moeilijk beweging in lucht of water te verklaren. Eenmaal in de lucht zijn een geworpen steen en een afgeschoten pijl (bewegende voorwerpen) niet langer in contact met de beweger. Aristoteles lost dat als volgt op: de oorspronkelijke beweger (de stenengooier of de boogschutter) draagt het vermogen om als beweger te dienen over aan de lucht. Bij het gooien van een steen wordt tevens een volume lucht bewogen. Zodra de hand de steen loslaat zal dit volume lucht ook stoppen, maar het heeft dan de eigenschap van een beweger. Die eigenschap zorgt ervoor dat de steen met een nieuw volume lucht doorgaat met de beweging. Het nieuwe volume lucht is de volgende beweger enzovoorts.

Om erachter te komen hoe Aristoteles zijn theorie koppelt aan waarnemingen moeten we het tweede hoofdstuk lezen van zijn boek over beweging bij dieren:

Om te kunnen bewegen moet er niet alleen iets onbeweeglijks zijn binnen in een dier waartegen het bewegende deel zich kan afzetten, maar moet er ook buiten het dier iets onbeweeglijks zijn waarop het bewegende kan bewegen. Want mocht het substraat bewegen (wat het geval is bij schildpadden die door modder lopen of bij mensen die wandelen in rul zand), dan is voortgang niet mogelijk tenzij de bodem stilstaat. Vliegen en zwemmen zijn dan ook niet mogelijk tenzij de lucht of de zee weerstand biedt.

Het besef dat er weerstand geboden moet worden, nadert erg

dicht Newtons mechanica zoals wij die nu kennen. Maar in een volgende opmerking komt Aristoteles weer terug bij zijn filosofische concept over de beweging en het bewegende voorwerp:

Hetgeen weerstand biedt moet iets anders zijn dan hetgeen beweegt en het bewegende in zijn geheel moet verschillen van het geheel dat weerstand biedt, anders kan er geen beweging zijn.

Als bewijs hiervoor gebruikt hij het feit dat een schip alleen maar bewogen kan worden door er van de wal af tegen te duwen en niet door aan boord tegen de mast te duwen.

Tot zover de filosofie over bewegen. Laten we nu eens nagaan hoe Aristoteles over het vliegen van vogels dacht. Hij zegt in zijn boek over dierlijke anatomie:

Bij vogels zijn de armen of voorpoten vervangen door een paar vleugels en daarmee onderscheiden ze zich van andere dieren. Het kunnen vliegen is een wezenlijke eigenschap van vogels en de vleugels maken dat mogelijk. Sterker nog, vogels kunnen niet vliegen wanneer ze hun poten missen en niet lopen zonder vleugels.

Een ander (eeuwenlang als de waarheid geaccepteerd) gezichtspunt is Aristoteles' idee over de functie van de staart bij vogels die hij vergelijkt met het roer van een schip dat ook dient om koers te houden.

In het boek over de anatomie van dieren staat een vreemde beschrijving van de functie van de kam op het borstbeen van vogels:

De borst van alle vogels heeft een scherpe kam en is vlezig. Die scherpe kam dient om te kunnen vliegen want een breed oppervlak zou met moeite kunnen bewegen door de grote hoeveelheid lucht die erdoor verplaatst zou worden. Het vlees aan weerszijden van de kam dient als bescherming omdat de vorm ervan niet sterk genoeg is zonder de bedekking met vlees.

De gedachten achter dit soort tegenstrijdige opmerkingen zijn moeilijk te raden; daarvoor zou je de man moeten kunnen vragen wat hij nu precies bedoelt. In ieder geval was Aristoteles erg dicht bij het concept van de traagheid. Dat is de eigenschap van een voorwerp om in rust of eenparige beweging langs een rechte lijn te blijven tenzij er een kracht op werkt. Wat Aristoteles kracht noemt, is in feite de impuls of hoeveelheid beweging (massa maal

snelheid in kg m/s of Ns; de verandering per tijdseenheid van impuls is kracht). Jammer genoeg zoekt hij de oorzaak van beweging buiten het bewegende voorwerp omdat hij denkt dat daar de kracht vandaan moet komen om het voorwerp in beweging te houden.

Twee eeuwen later komt de Griek Hipparchus op het idee dat een geworpen steen de werpkracht zelf bezit. Johannes Philoponus uit Alexandrië ten slotte concludeert in de 6de eeuw van onze jaartelling dat het medium waarin een voorwerp vliegt geen rol speelt. Hij beschrijft hoe bewegingsvermogen wordt overgedragen van de werper op het geworpen voorwerp waardoor het blijft bewegen in de richting waarin het wordt losgelaten: het voorwerp heeft impuls gekregen. Een volledige verklaring van het fenomeen is echter niet mogelijk totdat Galileo Galilei een millennium later ontdekt wat versnelling is.

25

Voortschrijdende inzichten

Het duurt tot ongeveer het jaar 1500 voor er iets nieuws aan de kennis over vogelvlucht wordt toegevoegd. Leonardo da Vinci (1452 – 1519) houdt een notitieboekje bij over het vliegen van vogels: *Sul volo degli Ucelli*. Vrij snel na zijn dood verdwijnt het en is eeuwenlang zoek. Pas aan het begin van de 20ste eeuw wordt het gevonden en kan de in spiegelschrift geschreven oud-Italiaanse tekst worden ontcijferd. Achteraf moeten we constateren dat Da Vinci zijn tijd weliswaar ver vooruit was maar dat de wetenschap niet kon voortbouwen op zijn briljante ideeën omdat hij ze niet op een toegankelijke manier publiceerde. Andere notities die met het vliegen van vogels te maken hebben, zijn te vinden tussen teksten verzameld in *codexen*. We weten nu dat de interesse van Leonardo da Vinci zich concentreerde rond de interactie tussen lucht en vogel en dat hij ervan droomde als mens te kunnen vliegen.

Op de laatste pagina's van *Sul volo degli Ucelli* probeert hij die droom tot tweemaal toe te formuleren. Eerst schrijft hij:

Vanaf de berg die de naam van de grote vogel draagt, zal de beroemde vogel opvliegen en de wereld vullen met zijn grote faam.