

vlieger en omringende lucht

(kort verhaal met happy end).

In dit verhaal speelt niet de vlieger, maar de lucht een hoofdrol. De kortst mogelijke samenvatting is deze: De vlieger drukt de aanstromende lucht omlaag en daardoor duwt omgekeerd die lucht de vlieger omhoog.

Zodra we de wisselwerking tussen vlieger en lucht wat meer in detail proberen te beschrijven, schieten de problemen als paddestoelen uit de grond. Alleen al de vraag hoeveel lucht er door de vlieger wordt afgebogen, brengt ons in verlegenheid. Dat één vlieger de hele dampkring beïnvloedt lijkt overdreven, maar als we denken aan de bekende vlinder van Lorenz dan wordt het moeilijk om uitgebreide invloed geheel uit te sluiten. Het motorgeronk van een vliegtuig op vele kilometers hoogte is van veraf waarneembaar. De luchttrillingen uit die machine brengen zelfs op zo'n grote afstand ons trommelvlies in beweging.

Om elke vlieger heen is er zonder twijfel een flinke "kluit" lucht, waarvan de beweging door die vlieger wordt beïnvloed. Hoe groot de massa van die betrokken lucht is, hangt af van de vraag, hoe klein de kleinste afwijking is die we nog in rekening wensen te brengen.

Voor elk luchtdeeltje dat van beweging verandert geldt: kracht = massa x versnelling (Newton) maar omdat niet alle luchtdeeltjes gelijkelijk bewegen, is met zo'n formule weinig te doen. Men heeft het begrip "druk" ontwikkeld voor de gezamenlijke kracht die gasdeeltjes op een wand uitoefenen, uitgedrukt in bijvoorbeeld kg/cm². Bij een niet-stromend gas heeft de druk inwendig op alle plaatsen en in elke richting dezelfde waarde. Bij een stromende stof kan de druk plaatselijk variëren.

Het was de 18e eeuwse wiskundige Daniël Bernouilli die in zulke verschijnselen regelmaat wist te vinden.

Volgens hem hangen snelheid en druk in een "ideale stromende stof" nauw samen. Men noemt de wet van Bernouilli een behoudwet, omdat het een bijzonder geval is van de algemene wet van behoud van energie. Bij een hoeveelheid stromende ideale vloeistof*) is de som van de bewegings- en drukenergie onveranderlijk: Als de snelheid toeneemt, vermindert de druk en omgekeerd. Zo'n ideale vloeistof heeft geen andere energie dan druk en snelheid, is wrijvingsloos, onsamendrukbaar en heeft geen energie-uitwisseling met de omgeving. Het is dus een wiskundige abstractie. (Opmerking: druk is wat anders dan samendrukbaarheid; het laatste wil zeggen dat het volume zich aanpast bij de druk. Water is bijvoorbeeld praktisch onsamendrukbaar).

Lucht is weliswaar geen ideale vloeistof, maar blijkt zich voor subsonische luchtvaart-toepassing bij benadering volgens de wet van Bernouilli te gedragen. Noch de samendrukbaarheid, noch de wrijving spelen daarbij een rechtstreekse rol. Indirect is de wrijving overigens onmisbaar voor alle wijzen van vliegen.

Zoals bekend is bij een vlieger in vlucht de luchtdruk aan de buikzijde wat hoger dan die aan de rugkant. Het drukverschil aan weerskanten van het zeil veroorzaakt langs alle randen van het vliegervlak een omkrullende luchtbeweging (wervels). Die wervels vormen een "lek" in het systeem, ze leven op kosten van het draagvermogen. (Zie de tekeningen). Als de invalshoek klein is, worden de wervels langs de neus- en staartkant onderdrukt; alleen langs de flanken blijven ze bestaan. Hieruit volgt dat bij kleine invalshoeken flankwervels de voornaamste verliezen opleveren. Dan heeft het zin een draagvlak sterk in de breedte uit te breiden ("slanke" vleugel). Zo worden de "tipverliezen" beperkt tot een klein deel van de omtrek. De meeste vliegers vliegen onder een grotere

invalshoek en dan is de nadruk op slankheid van minder belang, vooral ook omdat een meer dan vierkante vleugel constructief altijd zwaarder wordt.

De toepasbaarheid van de wet van Bernouilli mag dan voor lucht meestal bevredigend werken, er wordt wél bij verondersteld, dat de stroming ordelijk verloopt. Dat wil zeggen dat stroomsnelheid en -richting op elke plaats in het stromingsveld wel kunnen verschillen, maar die waarden mogen niet veranderen in de tijd. Alle luchtdeeltjes verplaatsen zich dan volgens onveranderlijke lijnen. Zulke stroomlijnen kunnen elkaar natuurlijk niet snijden, want in één punt is telkens maar één stroomrichting. Wel kunnen stroomlijnen buigen en elkaar meer of minder benaderen. Waar de stroomlijnen dicht bijeen liggen is de snelheid hoog en waar ze ver uiteen lopen is de druk hoog.

Anders dan men soms denkt, kan de wet van Bernouilli niet verklaren hoe het draagvermogen van vleugels - en vliegers - ontstaat. In een ideale vloeistof is geen weerstand en geen draagvermogen. De drukverdeling verloopt bij een stroming om een voorwerp zo spiegelbeeldig, dat er geen lift kan ontstaan.

De vaak gevolgde redenering, volgens welke de lucht boven een vleugel sneller stroomt dan eronder is op zichzelf juist. Maar dan verzwijgt men de eigenaardigheid dat twee naburige luchtdeeltjes, waarvan het ene boven langs de vleugel passeert en het andere onderlangs, ook precies tegelijkertijd de achterrand moeten bereiken. Dat volgt niet uit de wet van Bernouilli, sterker nog, het zou voor een ideale vloeistof meestal niet opgaan. Die moeilijkheid is in de stromingsleer wel opgelost, maar alleen door gebruik te maken van het verschijnsel wrijving, dat Bernouilli juist uitsloot. De