

Duizenden wintersporttoeristen in de Alpen kunnen het - tot veler vreugde - ieder jaar weer meemaken: regionaal kan de temperatuur overdag van rond het vriespunt tot boven 20 °C stijgen, wat het mogelijk maakt om midden in de winter de hele dag in een T-shirt rond te lopen. Veelal onbewust zijn ze getuige van een karakteristiek en hoogst interessant windverschijnsel, waarnaar al veel wetenschappelijk onderzoek verricht is, maar dat nog altijd vragen oproept. Ik heb het over de Föhn, een warme en droge luchtstroom die soms binnen 8 uur temperatuurstijgingen van 25 °C kan bewerkstelligen.

Hoe kan dit fenomeen ontstaan? Dat is niet makkelijk te verklaren omdat een luchtmassa in de atmosfeer een open systeem betreft en er veel (variërende) factoren een rol spelen. Met wat algemene kennis van thermodynamica kunnen we echter toch een redelijk beeld schetsen van de situatie.

Laten we uitgaan van een bewegende luchtmassa (wind) boven laagland met een zekere temperatuur, druk en vochtigheid. Als de lucht op zijn weg een hoog obstakel, zoals een bergrug, tegenkomt, wordt de lucht gedwongen te stijgen. Hier beginnen de "problemen", want de lucht ondervindt bij deze stijging natuurlijk een verlaging van druk als gevolg van de atmosferische drukgradiënt. In dit geval betreft het een adiabatisch proces, d.w.z. dat een hoeveelheid gas (vrijwel) geen warmte met de omgeving uitwisselt maar zelf wel van druk en temperatuur verandert. Dit is te beschrijven met behulp van de algemene gaswet, $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$: de druk (p) neemt af en het gasvolume (V) neemt toe (in verhouding echter minder snel dan de drukafname), terwijl de te beschouwen hoeveelheid gas (n) en de gasconstante (R) gelijk blijven. Hieruit volgt dat de temperatuur van de luchtmassa zal dalen.

Aangezien lucht bij lagere temperatuur minder waterdamp kan bevatten, zal er condensatie optreden als het dauwpunt wordt bereikt. Bij deze faseovergang komt bovendien condensatiewarmte (latente warmte) vrij, waardoor de lucht waarin de waterdamp zich bevond minder snel afkoelt en deze relatief warme lucht nog verder stijgt. Het gevolg van de condensatie is in elk geval wolkenvorming en bij voldoende hoge vochtigheid ook neerslag (stijgingsregen), zodat de luchtmassa aan de loefzijde een groot deel van zijn vocht verliest.

Op een bepaald moment bereikt de luchtmassa een hoogte waarop deze over de bergrug kan stromen. Afkomstig van een gebied met hogere druk beweegt de lucht zich naar het gebied met lagere druk (anders had de lucht zich in het begin al niet in deze richting verplaatst) en begint door de relatief hogere dichtheid aan de lijzijde weer te dalen. Met deze daling herhaalt zich het gehele adiabatische proces van druk-, temperatuur- en volumeverandering, maar nu omgekeerd (dus de druk en temperatuur stijgen, terwijl het volume afneemt). Daarbij moet nu echter rekening gehouden worden met een lagere luchtvochtigheid dan voorheen, waardoor de opwarming *droog-adiabatisch* verloopt, d.w.z. dat de lucht sneller warmte kan opnemen. Het verschil tussen de *nat-adiabatische* temperatuurgradiënt of "lapse rate" (gemiddeld 5 °C/km) aan de loefzijde en de droog-adiabatische temperatuurgradiënt (gemiddeld 9,8 °C/km) aan de lijzijde kan oplopen tot ongeveer 5 °C/km. Dit verschil ontstaat doordat water(damp) een hogere soortelijke warmte heeft dan de meeste andere vloeistoffen of gassen, zoals lucht, en tevens bij condensatie de reeds genoemde latente warmte vrijkomt. Wanneer de droge lucht uiteindelijk weer "gematigde" hoogtes heeft bereikt, kan de temperatuur daarom ongewoon hoog zijn oplopen.

Een beknopte voorbeeldberekening, met de aanname dat de aangevoerde lucht vanaf de Povlakte in Italië een temperatuur (T) heeft van 15 °C op 200 m hoogte (landoppervlak) en een relatieve luchtvochtigheid (RH) van 80%. Het dauwpunt (T_d) van deze lucht is te benaderen met $T_d \approx T - (100 - RH)/5 = 15 - (100 - 80)/5 \approx 11$ °C. $(T - T_d) = 4$ °C, wat overeenkomt met een hoogteverschil van 800 m bij een nat-adiabatische temperatuurgradiënt van 5 °C/km. Als de luchtmassa stijgt wanneer deze op de zuidelijke Alpenrand botst, zal de lucht dus vanaf 1000 m hoogte gaan condenseren. Hierboven geldt een droog-adiabatische temperatuurgradiënt van ca. 10 °C/km: de lucht heeft nog minstens 2000 m extra hoogteverschil te overbruggen voordat deze over de Alpen kan stromen, wat overeenkomt met 20 °C: de luchttemperatuur is nu $(11 - 20) = -9$ °C op 3000 m hoogte. Vervolgens warmt de lucht tijdens de afdaling tot een hoogte van 500 m aan de noordelijke Alpenrand weer droog-adiabatisch op: een temperatuurstijging van 25 °C ten opzichte van -9 °C = 16 °C.

Uitgaande van lichte vorst gedurende de nacht, betekent dit dus een temperatuurstijging van 16 °C, alleen al op grond van de aangevoerde lucht. De straling van de zon draagt overdag nog een extra steentje bij zodat de temperatuur uiteindelijk makkelijk tot boven 20 °C kan stijgen – en dat midden in de winter!

Hoewel de bovenstaande gegevens correct zijn en een goede verklaring vormen voor vele temperatuur-, neerslag- en windverschijnselen, waaronder Föhn, in gebergten over de hele wereld, is deze theorie niet van toepassing op *alle* Föhnsituaties in de Alpen. Men heeft namelijk herhaaldelijk Föhnwind waargenomen waarbij er geen sprake was van voorafgaande condensatie en/of stijgingsregens aan de loefzijde van het gebergte.

Uit onderzoek (Welzenbach, 2009) blijkt dan ook, dat het ontstaan van Föhn niet altijd met deze thermodynamische theorie verklaard kan worden en een alternatieve verklaring in de stromingsleer gezocht moet worden. Volgens de zogenaamde “hydraulische Föhntheorie” kan Föhn namelijk ook ontstaan als een stabiele, koude luchtlaag aan de loefzijde van het gebergte opgesloten raakt onder een warmere luchtstroom daarboven (zoals bij een inversie). Deze warme lucht kan vervolgens over het gebergte heen stromen. Het exacte verloop van de vele verschillende fysische processen die hieraan ten grondslag liggen is echter erg ingewikkeld en bovendien zelfs in de wetenschap nog niet volledig doorgrond. Het schiet zijn doel dan ook voorbij om daar in dit artikel over uit te wijden. Wie erg geïnteresseerd is in deze materie, verwijs ik graag naar de internetpagina van Mag. F. Welzenbach.

C.B. Houkes
www.foehnwind.eu

Geraadpleegde bronnen:

Mag. F. Welzenbach: “Grundlagen der Föhnentstehung”, 2009, www.inntranetz.at/foehn.html.
Wikipedia, the free encyclopedia: “Adiabatic Process”, “Lapse Rate”, “Dew point”.
Wikipedia, die freie Enzyklopädie: “Föhn”.