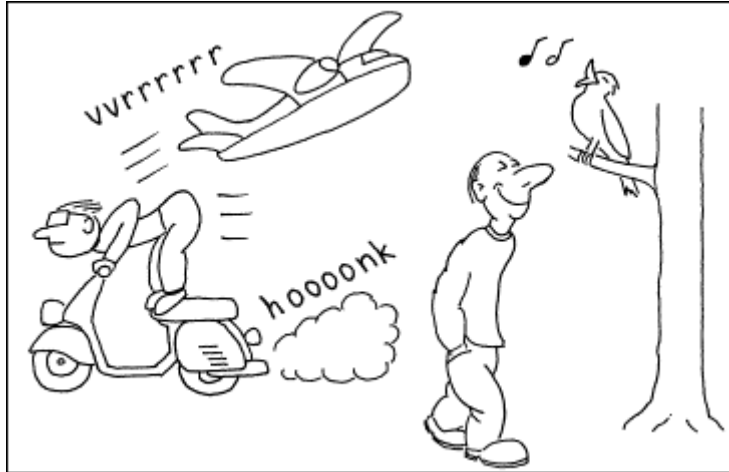


Geluid en wind

Erik Salomons
TNO TPD Delft

Door de wind klinkt geluid soms harder dan anders.
Deze website legt uit hoe dit komt.



1. Modellen

Als je geluid wilt begrijpen en berekenen, dan kun je niet zonder een model. Dit hoofdstuk legt uit waarom.

1.1 Geluid is overal

Als je buiten loopt, dan hoor je bijna altijd geluid. Een prettig geluid is het fluiten van vogels. Geluid van auto's en vliegtuigen wordt meestal lawaai genoemd.

Hoe hard het geluid is hangt natuurlijk af van de geluidbron en van je afstand tot de bron. Het hangt ook af van de wind, zoals je misschien gemerkt hebt.

Je kunt je afvragen:

"kan ik uitrekenen hoe hard het geluid is als ik weet hoe hard de bron is?"

Dat is niet zo eenvoudig! Voor een nauwkeurige berekening heb je een hoop wiskunde en natuurkunde nodig. Veel wetenschappers hebben aan dit probleem gewerkt. Een van de eerste was Lord Rayleigh, in de negentiende eeuw. Tegen het einde van de twintigste eeuw hebben wetenschappers ingewikkelde computerprogramma's gemaakt voor geluid. Je kunt hierover lezen in mijn boek [*computational atmospheric acoustics*](#).

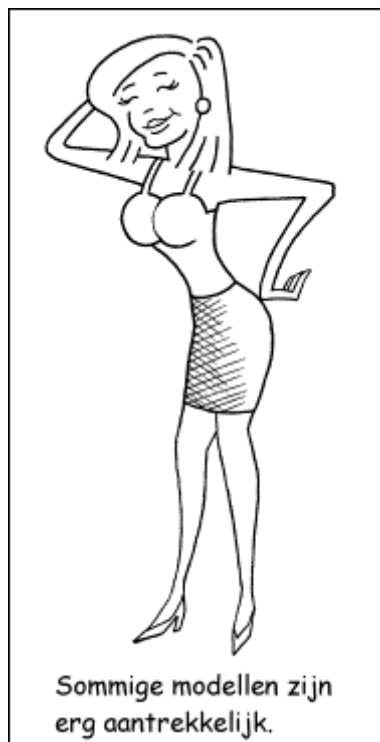


1.2 Waarom modelleren?

Computers worden steeds sneller, maar je kunt niet elk detail meenemen bij een berekening van geluid. Daarom gebruik je een *model*: een eenvoudige afspiegeling van de werkelijkheid. In een model neem je alleen de dingen mee die belangrijk zijn. Als je model niet te ingewikkeld is, dan kun je met een computer het geluid berekenen. Als het meezit kun je zo voorspellen wat je in werkelijkheid hoort.

Berekeningen met een model kunnen je helpen om te begrijpen hoe geluid wordt beïnvloed door de omgeving, bijvoorbeeld door de wind.

Wetgevers gebruiken resultaten van modelberekeningen voor *lawaaibestrijding*, om mensen te beschermen tegen teveel lawaai.

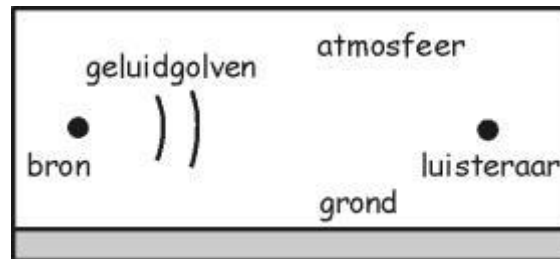


1.3 Een eenvoudig model

Figuur 1 toont een eenvoudig model, met een geluidbron en een luisteraar boven een vlakke grond. De bron veroorzaakt geluidgolven die in alle richtingen weglopen van de bron. Meestal heeft de bron een *breed spectrum*. Dit betekent dat elke geluidsgolf bestaat uit een groot aantal hoge en lage tonen.

De frequenties van de tonen liggen bijvoorbeeld tussen 10 Hz en 5 kHz (Hz is het symbool voor hertz, de eenheid van frequentie; kHz is het symbool voor kilohertz.)

Het spectrum van het geluid bij de luisteraar hangt natuurlijk af van het spectrum van het geluid bij de bron. Maar het spectrum wordt ook beïnvloed door de atmosfeer en de grond. Sommige frequenties uit het spectrum worden meer verzwakt dan andere frequenties.



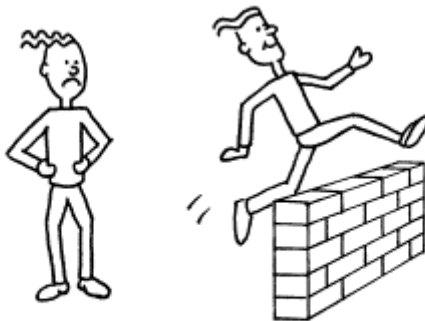
Figuur 1. Een eenvoudig model.

1.4 Te eenvoudig?

Het model in figuur 1 is een vereenvoudiging van situaties in werkelijkheid:

- de grond is nooit helemaal vlak
- er zijn vaak obstakels, zoals gebouwen of geluidschermen
- de bron en de luisteraar zijn geen punten, maar objecten zoals een auto en een mens.

Of de vereenvoudiging acceptabel is, hangt af van de situatie, maar ook van de frequentie van het geluid. Een geluidsgolf heeft namelijk geen 'last' van obstakels die kleiner zijn dan de golflengte. De golflengte hangt af van de frequentie. De golflengte is 3.4 m bij een frequentie van 100 Hz, en 0.34 m bij een frequentie van 1000 Hz (dit wordt uitgelegd in het volgende hoofdstuk). Dus, een 1 m hoge muur heeft een kleine invloed op geluid van 100 Hz maar een grote invloed op geluid van 1000 Hz.



Een geluidsgolf heeft geen 'last' van obstakels kleiner dan de golflengte.

2. Decibellen en spectra

Wat is geluid? Hoe kun je het meten?

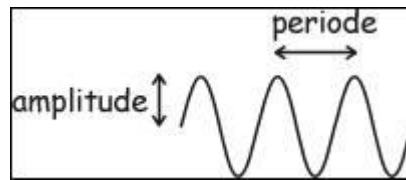
2.1 Wat is geluid?

Geluid is een snelle kleine variatie van de luchtdruk. De drukvariatie ligt gewoonlijk tussen +100 Pa en -100 Pa, en is daarmee minstens 1000 keer kleiner dan de gemiddelde luchtdruk (Pa is het symbool voor pascal, een eenheid van druk). De drukvariatie noemen we de *geluidsdruk*, die dus positief of negatief kan zijn.

Een geluidbron veroorzaakt drukvariaties die in alle richtingen weglopen van de bron. Zo'n lopende drukvariatie noemen we een *geluidsgolf*. Een geluidsgolf loopt met een snelheid van ongeveer 340 m/s.

De lucht blijft hierbij op zijn plaats. In een geluidsgolf wordt alleen een drukvariatie *doorgegeven*. Geluid is dus niet een soort wind.

De geluidsdruk bij een luisteraar varieert wanneer er een geluidsgolf passeert. De geluidsdruk bij de luisteraar is dus een functie van de tijd. We noemen deze functie het *geluidsignaal*.



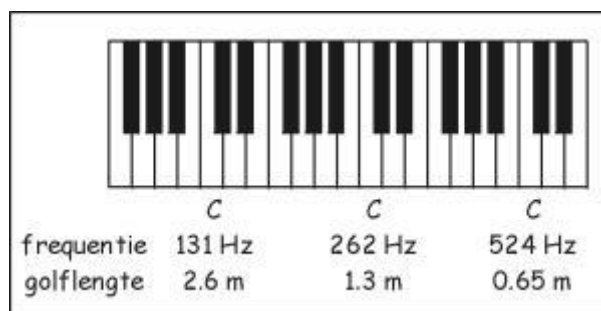
Harmonisch geluidsignaal.

Een speciaal voorbeeld van een geluidsignaal is een sinusfunctie. Dit signaal noemen we een *toon*. Een toon maak je door op de toets van een piano te drukken. De geluidsgolf noemen we in dit geval een *harmonische* geluidsgolf, en het signaal een harmonisch signaal. De formule voor een harmonisch signaal is

$$p(t) = A \cdot \sin(2\pi t/T). \quad (1)$$

In deze formule is p de geluidsdruk, t de tijd, A de amplitude, en T de periode. De geluidsdruk oscilleert (slingert) tussen een maximale waarde A en een minimale waarde $-A$. Als de periode bijvoorbeeld 0.01 s is, dan oscilleert de geluidsdruk 100 keer per seconde, wat betekent dat de frequentie 100 Hz is. Dus de periode is gelijk aan één gedeeld door de frequentie: $T = 1/f$.

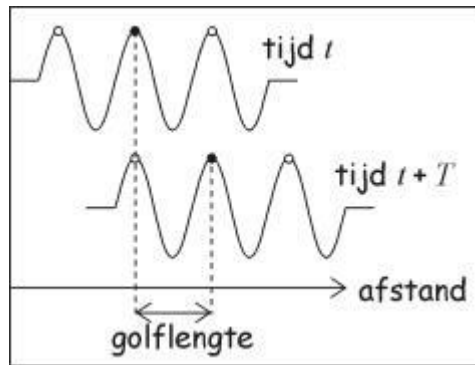
De amplitude bepaalt hoe *hard* de toon is en de frequentie bepaalt hoe *hoog* de toon is. De toon is harder als de amplitude groter is en hoger als de frequentie hoger is.



De centrale C van een piano heeft een frequentie van 262 Hz.

2.2 Wat is een golflengte?

Je weet inmiddels dat drukvariaties met de geluidssnelheid wegllopen van de bron. Als de geluidsdruk bij de bron dus volgens formule (1) oscilleert in de tijd, dan zal de geluidsdruk ook oscilleren *als functie van de afstand tot de bron*. De afstand waarover een geluidsgolf gedurende de periode T loopt noemen we de *golflengte* (zie figuur 2). De golflengte is dus net zoiets als de periode, maar dan voor de afstand in plaats van de tijd. Een geluidsgolf loopt met de geluidssnelheid, waarvoor we het symbool c gebruiken. De golflengte is dus gelijk aan cT (snelheid maal tijd). Uit de vorige paragraaf weten we dat dit ook gelijk is aan c/f . De golflengte is dus $340/100 = 3.4$ m bij 100 Hz en $340/1000 = 0.34$ m bij 1000 Hz.

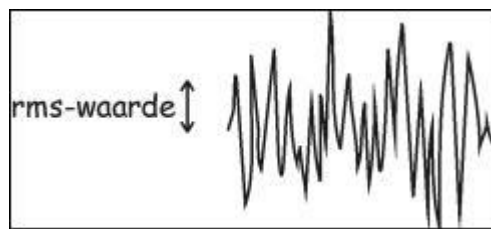


Figuur 2. In de tijd tussen t en $t + T$ verplaatst een geluidsgolf zich over de golflengte.

2.3 Wat is een decibel?

Je weet waarschijnlijk dat de *decibel* (dB) wordt gebruikt om de sterkte, of luidheid, van een geluidssignaal aan te geven. Deze paragraaf legt uit hoe dit werkt.

In paragraaf 2.1 zagen we dat de sterkte van een toon wordt bepaald door de amplitude. In het algemeen is het geluidssignaal echter geen regelmatige sinus maar een grillige functie. Het signaal heeft dan dus niet een constante amplitude. Daarom gebruiken we de 'rms-waarde', een soort gemiddelde amplitude. De 'rms-waarde' van een signaal bereken je door eerst alle geluidsdrukken van het signaal te kwadrateren, vervolgens te middelen, en tenslotte de wortel te nemen. De afkorting 'rms' staat voor 'root-mean-square', wat Engels is voor 'wortel-gemiddelde-kwadraat'.



Een geluidssignaal is vaak grillig.

In plaats van de 'rms-waarde' gebruiken we meestal het *geluidsniveau* om aan te geven hoe hard een geluid is. Bij een 'rms-waarde' van 1 Pa hoort bijvoorbeeld een geluidsniveau van 94 decibel, afgekort als 94 dB. Het geluidsniveau bereken je met de volgende formule

$$L = 20 \log \frac{p_{\text{rms}}}{p_{\text{ref}}} \quad (2)$$

In deze formule is L het geluidsniveau, p_{rms} de 'rms-waarde', en p_{ref} een referentiedruk van 0.00002 Pa. Verder staat log voor logaritme (met grondtal 10).

Een niveau van 0 dB is ongeveer het niveau van het zachtste geluid dat mensen kunnen horen. Geluiden van 130 dB of meer zijn zo hard dat ze pijn doen.

Geluid wordt gemeten met een microfoon. Een microfoon is een gevoelige instrument waarmee kleine drukvariaties worden geregistreerd. Uit het geluidssignaal dat je met een microfoon meet kan je een niveau in decibellen berekenen met formule (2).

2.4 Wat is een spectrum?

Een geluidssignaal kun je altijd opgebouwd denken uit een aantal harmonische signalen. Er bestaan computerprogramma's om de harmonische signalen te berekenen. De harmonische signalen hebben bijvoorbeeld frequenties van 10, 11, ..., 5000 Hz. Voor elk harmonisch signaal kunnen we een niveau berekenen met formule (2). Zo krijgen we een rijtje niveaus en een rijtje frequenties. De twee rijtjes samen noemen we het spectrum van het signaal.

2.5 Je oren

De gevoeligheid van je oren voor geluid hangt af van de frequentie van het geluid. De gevoeligheid is het grootst rond 1 kHz. Een toon van 100 Hz hoor je ongeveer even hard als een 20 dB stillere toon van 1 kHz. Je oren kennen dus verschillende 'gewichten' toe aan verschillende frequenties. Deze 'weging' noemen we de A-weging. De A-weging is nul bij 1 kHz en ongeveer -20 dB bij 100 Hz.

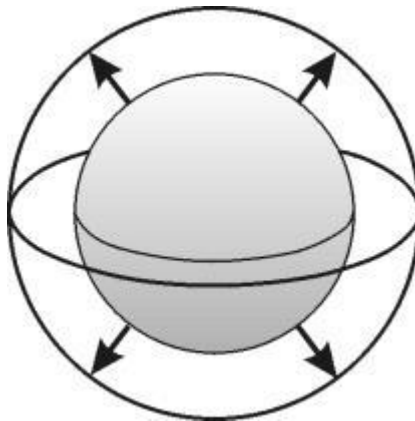
Bij lawaaibestrijding houden we natuurlijk rekening met de A-weging. Daarom gebruiken we geen geluidsniveaus in gewone decibellen maar geluidsniveaus in A-gewogen decibellen, afgekort als dB(A). Lawaai van een snelweg kan bijvoorbeeld een niveau van 50 dB(A) bij je huis hebben.

3. Geluidgolven in de atmosfeer

Wind en temperatuur spelen een belangrijke rol in dit hoofdstuk. Maar de grond is ook belangrijk.

3.1 De 'één gedeeld door r wet'

Geluidgolven worden veroorzaakt door een geluidbron. Laten we aannemen dat de bron in alle richtingen even sterk is. De geluidgolven zijn dan bolvormig. Dit is vergelijkbaar met cirkelvormige golven die ontstaan als je een steen in het water gooit.



De straal r van een bolvormige geluidsgolf neemt in de tijd toe met de geluidssnelheid. Tegelijk neemt de amplitude van de geluidsgolf af met $1/r$. Dit is de $1/r$ wet ('één gedeeld door r wet'). De $1/r$ wet bepaalt grotendeels hoe hard het geluid is dat je van een bron hoort.

Bij een geluidberekening moet je natuurlijk rekening houden met de $1/r$ wet. Voor een nauwkeurige berekening moet je ook rekening houden met de volgende effecten:

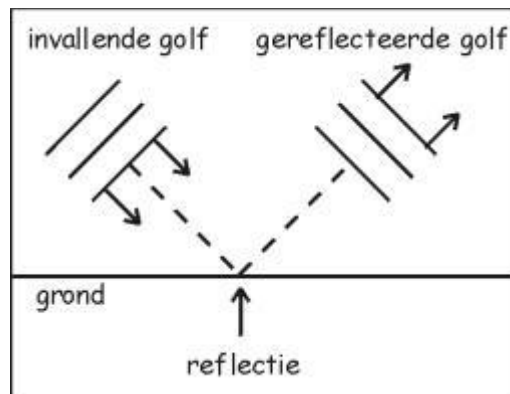
- reflecties door de grond
- atmosferische refractie
- atmosferische absorptie

De eerste twee effecten worden in de volgende paragrafen beschreven. Atmosferische absorptie is een klein effect van de lucht waardoor een geluidsgolf continu een beetje energie verliest. Deze energie wordt omgezet in warmte.

3.2 Reflectie van geluid door de grond

De onderkant van een bolgolf komt op een gegeven moment bij de grond. De grond absorbeert een deel van het geluid en reflecteert het andere deel. Dit is net als bij licht dat op glas valt. Als je geluid bij een luisteraar wilt berekenen, dan moet je rekening houden met het gereflecteerde geluid (naast het directe geluid van de bron naar de luisteraar).

Laten we de reflectie van een stukje van de bolgolf eens nader bekijken (zie figuur 3). We kunnen de inkomende golf en de gereflecteerde golf als één golf beschouwen die loopt langs een pad met een knik bij de grond. Meestal wordt de golf zwakker bij de knik, doordat een deel van het geluid verdwijnt door de absorptie. Hoe groot de verzwakking is hangt af van de frequentie van de golf en van de structuur van de grond. Bij grasland is de verzwakking kleiner dan bij bosgrond. Bij een wateroppervlak is de verzwakking vrijwel nul: water is als een spiegel voor geluid. Daarom klinkt geluid over water vaak zo hard.



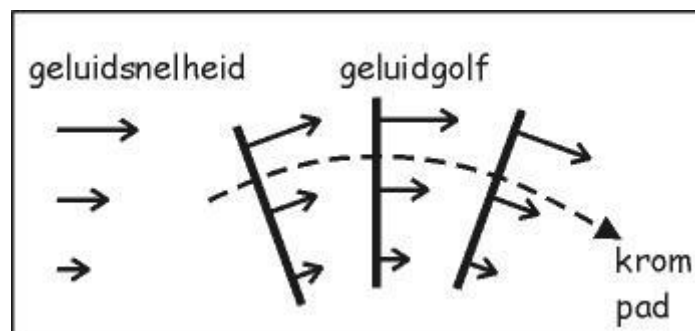
Figuur 3. Reflectie van een geluidsgolf door de grond. De invallende golf is een stukje van een bolgolf, en is voor het gemak plat getekend.

3.3 Atmosferische refractie

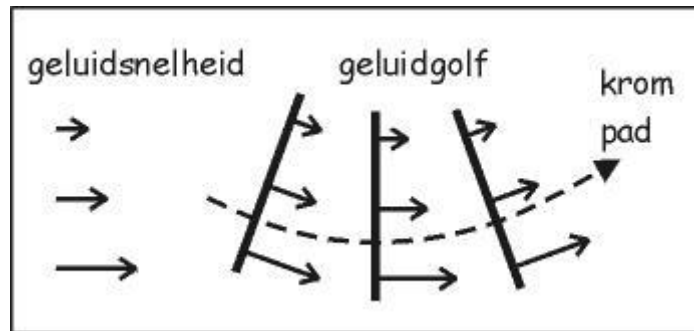
Als de geluidsnelheid overal in de atmosfeer gelijk is, dan zijn de paden van geluidgolven recht (afgezien van knikken bij reflecties). In de praktijk verandert de geluidsnelheid meestal met de hoogte, door veranderingen van wind en temperatuur met de hoogte (zie volgende paragrafen). Als gevolg hiervan zijn de paden van geluidgolven krom.

Als de geluidsnelheid *toeneemt* met de hoogte, dan is het pad van een geluidsgolf krom zoals in figuur 4. Het pad is krom doordat het bovenste deel van de golf harder loopt dan het onderste deel, waardoor de golf voortdurend 'draait'. Dit draaien noemen we *atmosferische refractie*. Het geval van figuur 4 noemen we refractie *omlaag*.

Figuur 5 illustreert het andere geval van refractie *omhoog*. In dit geval neemt de geluidsnelheid af met de hoogte.



Figuur 4. Refractie omlaag van een geluidsgolf.



Figuur 5. Refractie omhoog van een geluidsgolf.

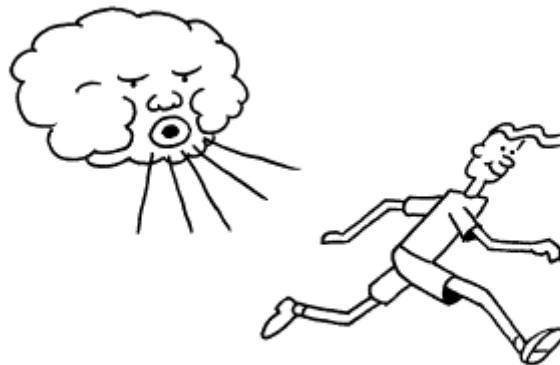
3.4 Geluidsgeluid in de atmosfeer

Geluidsgolven lopen met een snelheid die we de geluidsgeluid noemen. De geluidsgeluid ligt meestal tussen 330 m/s en 350 m/s. De geluidsgeluid neemt toe als de temperatuur toeneemt, met ongeveer 0.6 m/s per graad Celsius. De geluidsgeluid hangt ook van de wind af. De geluidsgeluid wordt groter door meewind en kleiner door tegenwind.

Met de volgende formule kun je de geluidsgeluid berekenen uit de temperatuur en de windsnelheid

$$c = u + 331\sqrt{1 + t/273} \quad (3)$$

In deze formule is c de geluidsgeluid in m/s, t de temperatuur in graden Celsius, en u de windsnelheid in m/s. Bij meewind is u positief en bij tegenwind is u negatief. Als de wind onder een hoek met het geluidspad staat, dan moet je voor u de component langs het geluidspad nemen.



Wind verandert de snelheid van een geluidsgolf.

3.5 Wind en temperatuur

Overdag neemt de temperatuur in de atmosfeer gewoonlijk af met de hoogte. De grond wordt verwarmd door de zon, dus lucht vlakbij de grond is warmer dan lucht op 10 m hoogte bijvoorbeeld. 's Avonds en 's nachts is de situatie omgekeerd. De grond is kouder dan de lucht, dus de temperatuur neemt toe met de hoogte.

De windsnelheid boven een vlakke grond neemt altijd toe met de hoogte. Wrijving bij de grond vertraagt stromende lucht, dus de windsnelheid vlakbij de grond is klein. Met toenemende hoogte neemt het effect van de wrijving af, zodat de windsnelheid toeneemt.

3.6 Geluidsgeluid

In paragraaf 3.5 hebben we gezien dat de temperatuur en de wind veranderen met de hoogte. In paragraaf 3.4 hebben we gezien dat de geluidsgeluid afhangt van de temperatuur en de wind. De geluidsgeluid verandert daarom ook met de hoogte.

Je kunt nu de invloed van wind op geluid begrijpen. Laten we even aannemen dat de temperatuur niet verandert met de hoogte. De verandering van de geluidsnelheid met de hoogte wordt dan alleen bepaald door de wind. Als je kijkt naar figuur 6 dan begrijp je dat

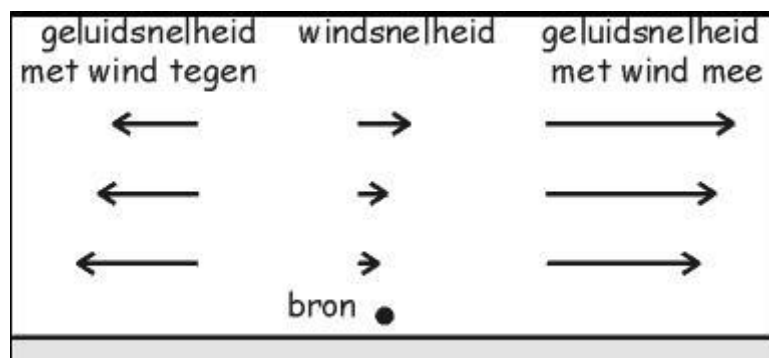
- de geluidsnelheid *toeneemt* met de hoogte voor een geluidsgolf met wind *mee*,
- de geluidsnelheid *afneemt* met de hoogte voor een geluidsgolf met wind *tegen*.

Uit paragraaf 3.3 weet je nu dat het geluidpad *omlaag* gekromd is in het eerste geval, en *omhoog* gekromd in het tweede geval.

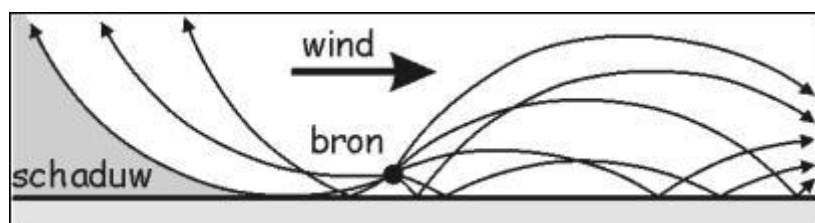
Figuur 7 toont paden van geluidgolven van een bron bij de grond. Wind waait van links naar rechts. Rechts van de bron zie je paden die door meewind omlaag zijn gekromd. Links van de bron zie je paden die door tegenwind omhoog zijn gekromd. Rechts van de bron zijn veel geluidgolven, terwijl er links van de bron een gebied is waar helemaal geen geluidgolven komen. Dit gebied noemen we een *geluidschaduw*. De geluidschaduw ligt op enige afstand van de bron, bijvoorbeeld 100 m, in de richting tegen de wind in.

Je denkt misschien dat het in de geluidschaduw helemaal stil is. Dit is niet zo. Er lekt altijd een beetje geluid de schaduw in. Maar het is wel veel stiller in de schaduw dan aan de andere kant van de bron.

Op dezelfde manier kun je de invloed van temperatuur op geluid begrijpen. 's Avonds neemt de temperatuur, en daarmee de geluidsnelheid, toe met de hoogte. Overdag nemen temperatuur en geluidsnelheid juist af met de hoogte. Hierdoor heb je overdag meer kans dat je in een geluidschaduw zit dan 's avonds. Geluid van een nabijgelegen snelweg klinkt daarom 's avonds vaak harder dan overdag.



Figuur 6. Doordat de windsnelheid toeneemt met de hoogte (zie paragraaf 3.5), neemt de geluidsnelheid met wind mee ook toe met de hoogte, en neemt de geluidsnelheid met wind tegen juist af met de hoogte.



Figuur 7. Paden van geluidgolven van een bron bij de grond.

3.7 Focuseren van geluid

Terug naar de vraag uit paragraaf 1.1: "kun je uitrekenen hoe hard het geluid is?" Misschien zeg je nu: "ja, ik bereken eerst de geluidspaden zoals in figuur 7 en dan tel ik de geluidgolven langs de paden bij elkaar op". Helaas gaat dit vaak niet goed.

Een van de oorzaken is het *focuseren* van geluid. Op sommige punten in de atmosfeer kruisen de paden van veel geluidgolven elkaar. Dit is net als focuseren van licht met een brandglas. Het brandpunt noemen we een *kaustiek*. In de buurt van een kaustiek mag je geluidgolven niet gewoon bij elkaar optellen, maar heb je ingewikkelde wiskunde nodig.

