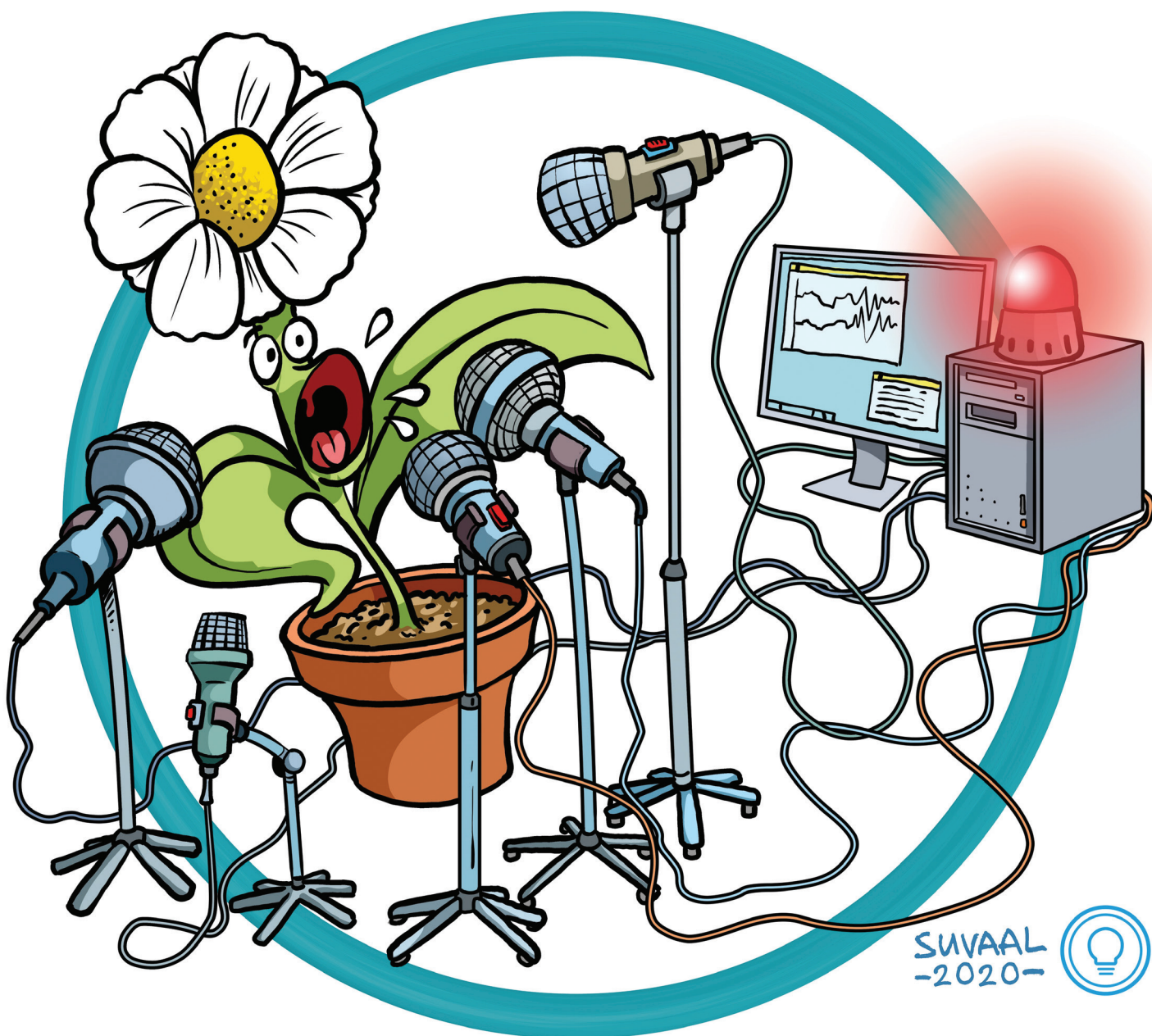


# Luisteren naar planten



SUVAAL  
-2020-



**Planten zijn essentieel voor het leven op aarde. Ze produceren zuurstof, zorgen voor voedsel en leveren essentiële materialen. Maar het is minder bekend dat planten ook geluidssignalen produceren. Om te begrijpen hoe en via welk mechanisme planten dit doen, is natuurkunde onmisbaar. In dit artikel beschrijven we ons recente onderzoek en de nieuwe inzichten die dit geeft op de vragen: waarom maken planten geluid? Wat bepaalt de toon van dat geluid? Wat leren we hieruit over de planten zelf?**

### Watertransport

Planten nemen water op via hun wortels. Vanuit de wortels wordt water, tegen de zwaartekracht in, getransporteerd naar de bladeren door het xyleemvatenstelsel (figuur 1). Deze vaten zijn vergelijkbaar met de bloedvaten in ons eigen lichaam. In tegenstelling tot het menselijk lichaam heeft een plant geen pomp (hart) om het water voort te stuwen. Om het water in de bladeren te krijgen, maken planten voornamelijk gebruik van de natuurlijke waterverdamping vanuit de bladeren. Die verdamping zorgt voor een trekkracht op het water in de xyleemvaten. Hierin vervullen waterstofbruggen een belangrijke rol. Zij zorgen enerzijds voor een opwaartse capillaire kracht in de xyleemvaten, maar anderzijds ook voor een grote oppervlaktespanning daar waar het water verdampt. Op de plek waar een watermolecuul verdampt wordt als het ware meteen een volgend watermolecuul meegezogen. Dit proces van watertransport staat in de plantenfysiologie bekend als de cohesie-tensie-theorie. Deze theorie is in 1895 bedacht door de Ierse plantenfysiologen H.H. Dixon en J. Joly [1].

### Druk

De bladeren van planten zijn zo opgebouwd dat er veel lucht zit tussen de cellen waarin het water kan verdampen. Dat resulteert in een onderdruk (trekkracht) op de xyleemvaten tot wel 2 MPa. Ter vergelijking, de luchtdruk op zeeniveau is slechts 0,1 MPa. De druk van 2 MPa is net genoeg om water naar de bladeren van de hoogste bomen op aarde (ongeveer 120 meter) te transporteren [2]. De druk die in de bladeren wordt opgebouwd, is sterk afhankelijk

van de relatieve luchtvochtigheid en de omgevingstemperatuur. In een droge, warme omgeving verdampt water tenslotte sneller dan wanneer het nat en koud is. Planten hebben echter nog een ander mechanisme waarmee ze de verdamping kunnen sturen.

### Huidmondjes

Zonder enige controle over de verdamping zouden planten ontzettend snel uitdrogen. Om dit te voorkomen hebben alle bladeren een soort was op het oppervlak waar bijna geen water doorheen kan. Het water kan alleen via speciale huidmondjes, de stomata, de bladeren in en uit. Ook voor lucht, met daarin koolstofdioxide en zuurstof, is dit de enige manier om de plant in en uit te gaan. Huidmondjes spelen daarmee een cruciale rol in de waterhuishouding van planten en in de fotosynthese.

### Droogte

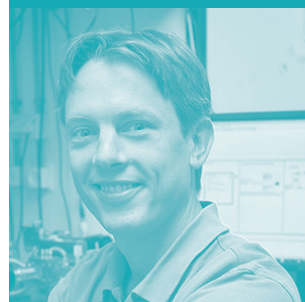
Maar wat gebeurt er als een plant toch onverhoopt voor langere tijd geen wateraanvoer heeft vanuit de grond? Terwijl de plant droog staat, zal er vanuit de bladeren nog steeds water verdampen. Dit zorgt voor een continue toenemende druk in de xyleemvaten. Zodra deze druk een kritische waarde overstijgt, gebeurt er iets bijzonders. Zoals figuur 1 laat zien, is de trekkracht dan zo groot dat er lucht de vaten in wordt gezogen. Die lucht komt uit de ruimte tussen naburige cellen van het xyleemvat. Het gevolg is de vorming van gasbelletjes in het xyleemvat, die snel samen smelten tot een grote gasbel, die dan het watertransport blokkeert. Dit proces is vergelijkbaar met de vorming van gasbelletjes in onze aderen wanneer we tijdens het duiken te snel naar



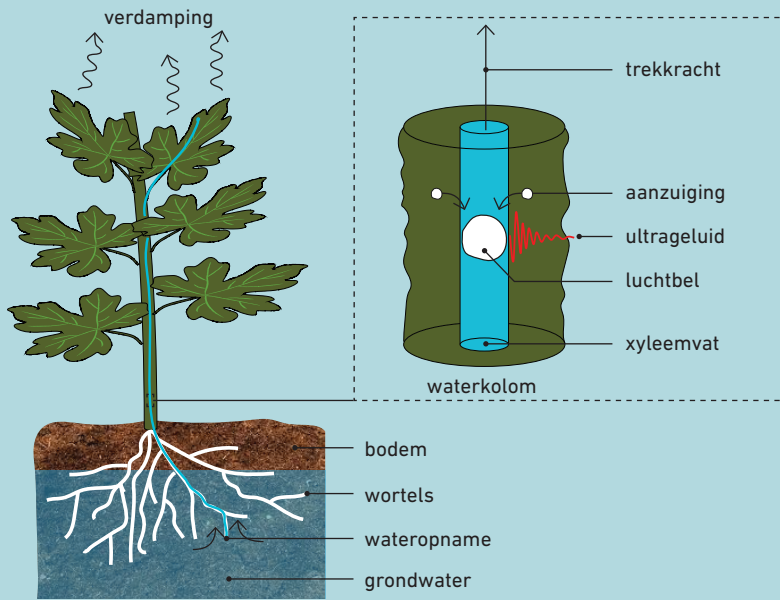
**Satadal Dutta** is postdoc in de groep Dynamics of Micro and Nanosystems, TUD. Hij werkt in het 4TU nationale onderzoeksprogramma Plantenna en focusteert op optische en ultrageluidsensoren voor planten.



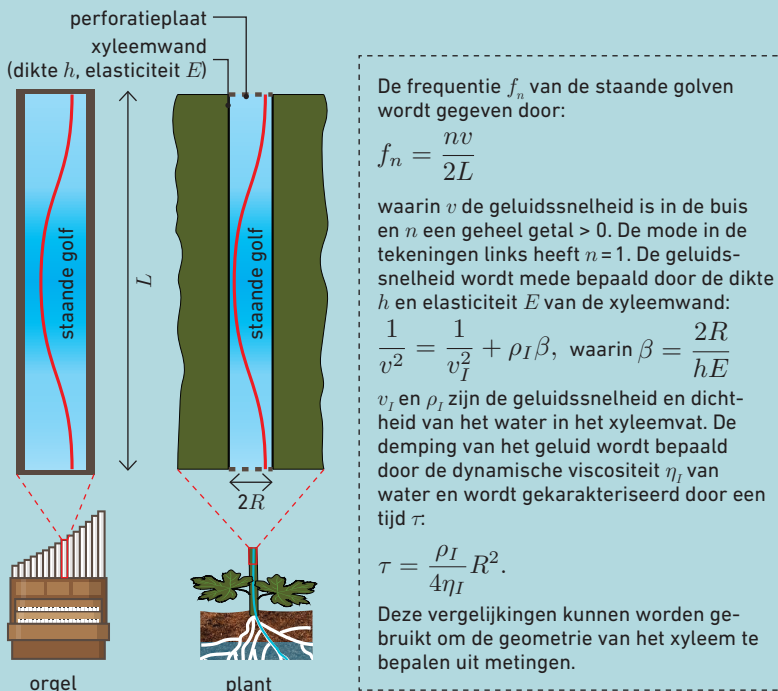
**Elias Kaiser** is universitair docent bij WUR (tenure track), met een focus op fotosynthese en ledbelichting van kasgewassen. Hij is vooral geïnteresseerd in hoe planten groeien onder natuurlijk fluctuerend licht.



**Peter Steeneken** is hoogleraar aan de TUD en leidt de groep Dynamics of Micro and Nanosystems en het 4TU nationale onderzoeksprogramma Plantenna dat zich richt op sensortechnologie voor planten.



Figuur 1. Planten nemen water op met hun wortels in de bodem. Het opgenomen water vormt een kolom tot aan de bladeren waar het verdampt. Deze verdamping resulteert in een trekkracht op de waterkolom. Als de resulterende tensie in de waterkolom te groot wordt, dan wordt er lucht het xyleemvat ingezogen vanuit omliggend plantmateriaal. Dit resulteert in een plotse vorming van een luchtbel in de waterkolom en het uitzenden van een ultrageluidpuls.



Figuur 2. De structuur van een orgelpijp is vergelijkbaar met die van een xyleemvat. In een plant zijn de uiteindes afgesloten door perforatieplaten. Door de eindige dikte en elasticiteit van de xyleemwand, is de geluidssnelheid in het xyleemvat anders dan in gewoon water. Daarnaast wordt het ultrageluid gedempt door de dynamische viscositeit van het water. Het kader legt uit hoe dit in elkaar steekt en hoe we dus door het meten van de demping en frequenties van de ultrageluidpuls de geometrie van het xyleemvat kunnen bepalen.

het wateroppervlak stijgen. Door het drukverlies, vormt opgelost stikstof dan gasbelletjes in het bloed, wat resulteert in het optreden van caissonziekte. Net zoals wanneer een luchtbel de bloedbaan verstopt bij mensen, spreken we bij planten van een embolie.

### Ultrageluid

Bij de vorming van de gasbellen komt een boel elastische energie vrij door het plots wegvallen van de druk [3]. Een gedeelte van die energie wordt omgezet in een geluidspuls die beschreven wordt door frequenties die doorgaans hoger zijn dan 20 kHz, te hoog om door het menselijk oor te worden gehoord. De gegenereerde ultrageluidpulsen verlaten daadwerkelijk de plant en kunnen met speciale microfoons gemeten worden. Tot nu toe werd vooral gekeken naar hoeveel geluidspuls een plant onder droogtestress per tijdseenheid uitzendt [4]. Dit is een maat voor de kwetsbaarheid van de plant voor droogte. Om te begrijpen waarom planten geluid uitzenden op specifieke frequenties, is een analyse van de individuele geluidspuls in het tijd- en frequentiedomein nodig.

### Orgelmuziek

Om te begrijpen wat planten ons vertellen, kijken we naar een orgelpijp. Zoals figuur 2 laat zien, is de bouw van een orgelpijp analoog aan die van een xyleemvat. Het grote verschil is dat een xyleemvat gevuld is met water. Van een orgelpijp weten we dat de grondtoon bepaald wordt door de fundamentele staande drukgolf in de pijp. De frequentie die daarbij hoort, wordt volledig bepaald door de geluidssnelheid in lucht en de lengte van de orgelpijp. Exact hetzelfde principe is toepasbaar op het xyleemvat. Het enige wat we moeten doen is de geluidssnelheid in lucht vervangen door die in de vloeistof in het xyleemvat en de lengte van het xyleemvat gebruiken.

### Geluidssnelheid

Aangezien een xyleemvat gevuld is met water, zou je verwachten dat de

geluidssnelheid erin dan ook 1500 m/s is. Maar niets is minder waar. Om dat te begrijpen moeten we weten dat de geluidssnelheid van een materiaal berekend kan worden door de wortel te nemen van de ratio van de elasticiteit en de dichtheid. Voor composietmaterialen is de elasticiteit een effectieve waarde die bepaald wordt door de materiaalsamenstelling (zie figuur 2) [5]. In een eikenbladhortensia heeft de buis van een xyleemvat typisch een elasticiteit van 0,2 GPa, een wanddikte van 1  $\mu\text{m}$  en een doorsnede van 24  $\mu\text{m}$  [6]. Dit reduceert de geluidssnelheid tot  $\sim 90$  m/s. Voor een 1 mm lang stuk van de xyleembuis is de verwachte grondtoon 45 kHz. De relatief sterke demping in het xyleemvat zal de frequentie van de gemeten ondergedempte trilling verlagen tot ongeveer 35 kHz.

### Frequentiespectrum

Als we naar het frequentiespectrum kijken van zo'n geluidspuls, dan zien we inderdaad de verwachte grondtoon terug, zie figuur 3. Ook zien we een aantal boventonen in het spectrum. Dat komt doordat het plots gevormde gasbelletje fungeert als een impacthamer en dus vele andere boventonen aanslaat.

### Demping

Als laatste kijken we naar de uitdoving van de ultrageluidspulsen. Zoals te zien is in figuur 3, doven de geluidspulsen uit met een karakteristieke tijdconstante van 20  $\mu\text{s}$ . Deze tijd wordt bepaald door de dynamische viscositeit en de dichtheid van water en de doorsnede van het vat (zie details in figuur 2). Het meten van deze tijdconstante onder aannames over de viscositeit en dichtheid geeft dus een directe manier om de doorsnede van het xyleemvat te bepalen zonder dat we de plant door hoeven te snijden.

### Toepassingen

De mogelijkheid om de doorsnede van een xyleemvat te bepalen zonder het vat kapot te hoeven maken opent een scala aan toepassingen. Zeker als deze techniek wordt gebruikt om de elasticiteit van de xyleemvaten of hun lengte te bepalen. Gezamenlijk geven de lengte, doorsnede en elasticiteit van het xyleemvat de mogelijkheid om planten

selectief op xyleemvateigenschappen te kweken, zodat ze beter bestand zijn tegen droogte of ziekte. Zo is het bekend dat de diameter van xyleemvaten een rol speelt in de gevoeligheid voor bepaalde ziektes [6], maar ook in de houdbaarheid van gesneden bloemen [7]. Daarnaast geeft het inzicht in de xyleemvaten ook de mogelijkheid om irrigatieprocedures te optimaliseren. Bovendien kunnen afwijkingen in xyleemvaten, zoals bijvoorbeeld veroorzaakt door schimmels, mogelijk snel en niet-destructief worden opgespoord. Voor de ontwikkeling van al deze toepassingen is het wel nodig om deze parameters ook te kunnen meten zonder droogte wanneer er dus van nature geen ultrageluidspulsen door de plant worden uitgezonden. De eerste stappen in deze richting zijn reeds gezet [8].

### Conclusie

In dit artikel hebben we een mechanisme beschreven dat geluidsgeneratie door planten kan verklaren. Met modellen kunnen we uit deze geluidssignalen de doorsnede, elasticiteit en lengte van de xyleemvaten bepalen. Dit begrip paveit de weg voor nieuwe snelle, niet-destructieve meettechnologie voor de karakterisatie van gewassen en het verbeteren van landbouwopbrengsten.

### Dankwoord

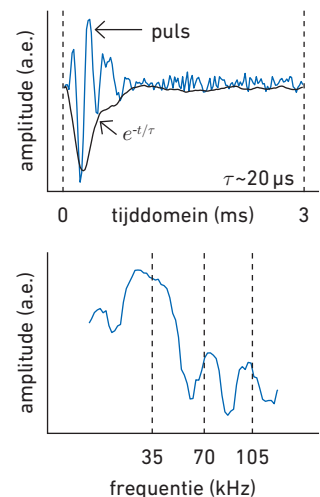
Het hier beschreven werk vond plaats binnen het 4TU Plantenna-programma van de vier technische universiteiten in Nederland.

#### REFERENTIES

- 1 H.H. Dixon en J. Joly., *On the ascent of sap*, Philos. Trans. R. Soc. B **186**, 563 - 576 (1895).
- 2 G.W. Koch et al., *The limits on tree heights*, Nature, **428**, 851 - 854, (2004).
- 3 Ponomarenko et al., *Ultrasonic emissions reveal individual cavitation bubbles in water-stressed wood*, J. R. Soc. Interface **11-99**, 20140480 (2014).
- 4 M. Nolf et al., *Xylem cavitation resistance can be estimated based on time-dependent rate of acoustic emissions*, New Phytologist **208-2**, 625 - 632 (2015).
- 5 M.S. Ghidaoui et al., *A Review of Water Hammer Theory and Practice*, Appl. Mech. Rev. **58-1**, 49 - 76 (2005).
- 6 J. Pouzoulet et al., *Xylem Vessel Diameter Affects the Compartmentalization of the Vascular Pathogen Phaeomoniliella chlamydospora in Grapevine*, Front Plant Sci. **8**, 1442 (2017).
- 7 U. Meeteren et al., *Processes and xylem anatomical properties involved in rehydration dynamics of cut flowers*, Acta Hort. **543**, 199 - 205 (2001).
- 8 S. Dutta et al., preprint, DOI: 10.21203/rs.3.rs-452046/v1 (2021).



**Gerard Verbiest** is universitair docent aan de TUD (tenure track) en richt zich op akoestische metingen op micro- en nanoschaal en is verbonden aan het 4TU nationale onderzoeksprogramma Plantenna. G.J.Verbiest@tudelft.nl



Figuur 3. Een gemeten geluidspuls van een plant in het tijddomein (boven) en frequentiedomein (onder). De dempingstijd  $\tau$ , bepaald uit een exponentiële fit, is typisch 20  $\mu\text{s}$  en de hoofdfrequentie, bepaald met behulp van een Fouriertransformatie uit het tijddomein, is 35 kHz.