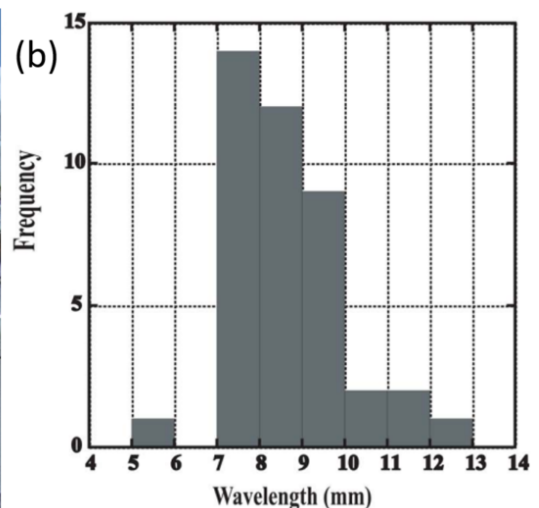


Waarom ijspegels ribbels hebben

Ijspegels kennen we allemaal van koude winterdagen. Een stroompje smeltwater vriest bijvoorbeeld vast aan de rand van een dak en vormt zo een ijspegel. Onder ideale omstandigheden kan dit leiden tot meterslange stalactieten van ijs. Afgezien van de schoonheid van deze structuren, is het ook vanuit een natuurkundig oogpunt prachtig om de vorming van ijspegels te bestuderen. Zo heb je te maken met een faseovergang, van vloeibaar naar vast water, maar ook met een stromende vloeistof aan het oppervlak. Die combinatie maakt de ijspegel tot een interessant dynamisch systeem.

Universele ribbels

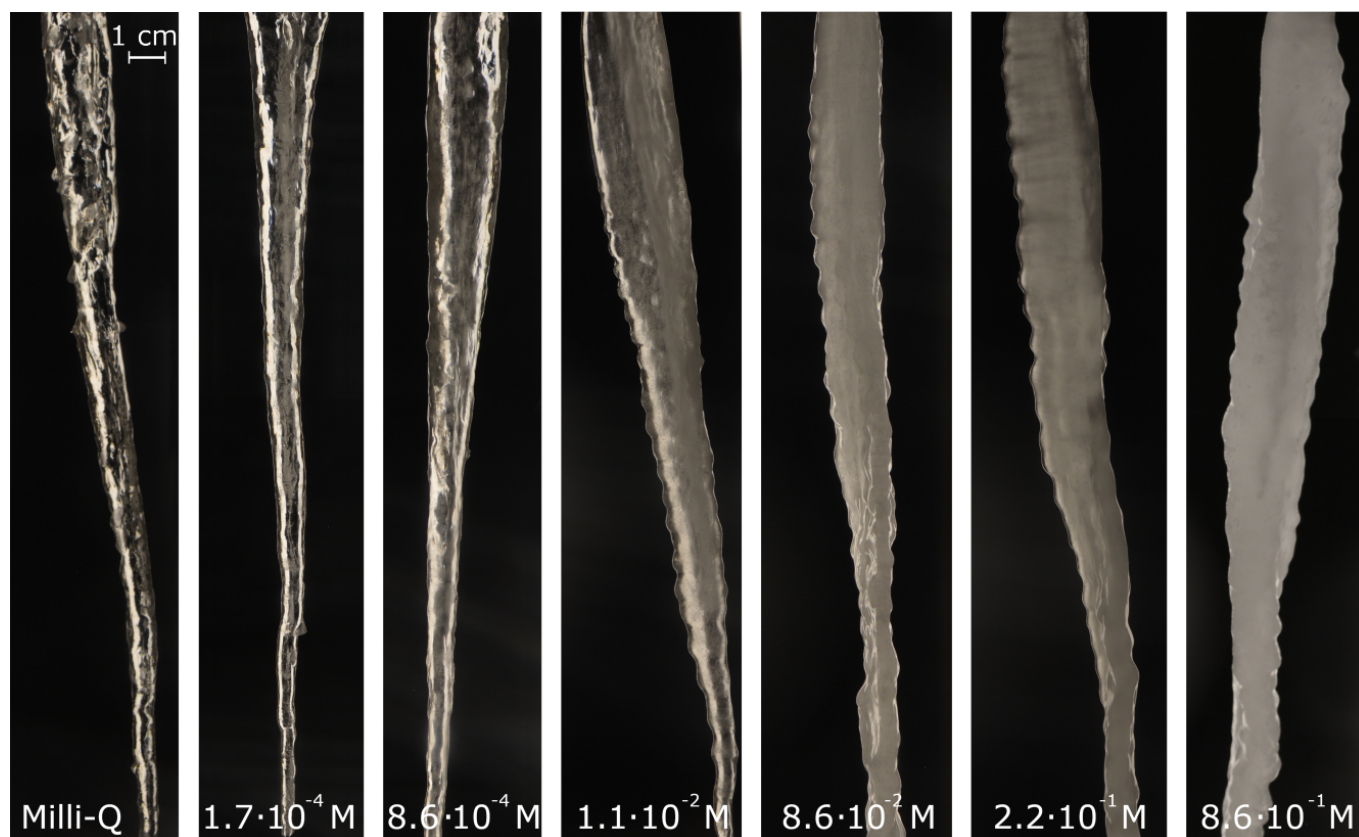
Behalve dat ijspegels in een iconische puntvorm groeien, vertonen ze dikwijls een merkwaardige eigenschap die je wellicht eerder is opgevallen. Aan het oppervlak bevinden zich vaak ribbels met een universele breedte van ongeveer een centimeter. Het maakt niet uit waar op de wereld en onder welke omstandigheden een ijspegel groeit: de pieken en dalen van de ribbels liggen altijd ongeveer een centimeter uit elkaar. In afbeelding 1 zie je een voorbeeld van deze ribbels, met daarnaast de statistische verdeling van de lengte van die ribbels, afkomstig uit een Japanse studie.



Afbeelding 1. Ijspegels. (a) Ijspegels groeien aan een dakrand en vertonen een merkwaardig ribbelpatroon. Afbeelding links: Kathy Purdy. (b) Statistische verdeling van de ribbellengte van ijspegels die zijn gevonden in de Japanse natuur. Gemiddeld hebben de ribbels een golflengte van ongeveer 0,85 cm. Afbeelding: Ueno et al., Phys. Fluids. 19 (2007) 093602.

Om uit te zoeken hoe deze ribbels ontstaan, hebben natuurkundige Menno Demmenie en zijn collega's van het Institute of Physics en het Van 't Hoff Institute for Molecular Sciences van de Universiteit van Amsterdam een ijspegelmachine gemaakt. 'In een grote ijskast met raam zijn we een paar weken bezig geweest om onszelf tot ware ijspegelgroei-experts om te dopen', vertelt Lars Reus, die als bachelorstudent meegewerkt heeft aan de studie. 'Zo heb je natuurlijk een instroom van water nodig. Als dat water te snel stroomt, verlies je relatief veel water en creëer je een ijsvloer onderin de vrieskast. Wanneer je daarentegen de instroom te langzaam afstelt, krijgt de ijspegel een voorkeur om als een stalagmiet omhoog te groeien. De optimale groeisnelheid, zo hebben we uiteindelijk empirisch vastgesteld, ontstaat bij een instroom van 60 ml/uur bij een omgevingstemperatuur van $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Je kunt dat vergelijken met een kraan die ongeveer iedere 3 seconden druppelt. Dan doet zich al snel het volgende probleem voor, de buis met aanvoerend water bevriest zelf ook bij deze temperatuur! Gelukkig bleek de oplossing vrij simpel: een snel circulerende stroom warm water in een naastgelegen buis hield het druppelende water op een temperatuur van ongeveer $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.'

De resultaten van een aantal experimenten kun je zien in afbeelding 2. Van links naar rechts worden hier ijspegels weergegeven met een toenemende zoutconcentratie. Zout-ionen zijn altijd aanwezig in natuurlijk water. De concentratie, uitgedrukt in mol per liter, staat onderin het paneel weergegeven. Milli-Q is het systeem dat wordt gebruikt om het water de te zuiveren; het zuivere water heeft nog een zoutconcentratie van die ongeveer dertig keer lager is dan in de afbeelding ernaast.



Afbeelding 2. Ijspegels met verschillende zoutconcentratie. Paneel met ijspegels, met van links naar rechts een toenemende zoutconcentratie (onderin in mol per liter oplossing weergegeven). Opvallend is dat de ijspegels minder doorzichtig worden en beter gedefinieerde ribbels vertonen naarmate het zoutgehalte toeneemt. Afbeelding: Demmenie et al.

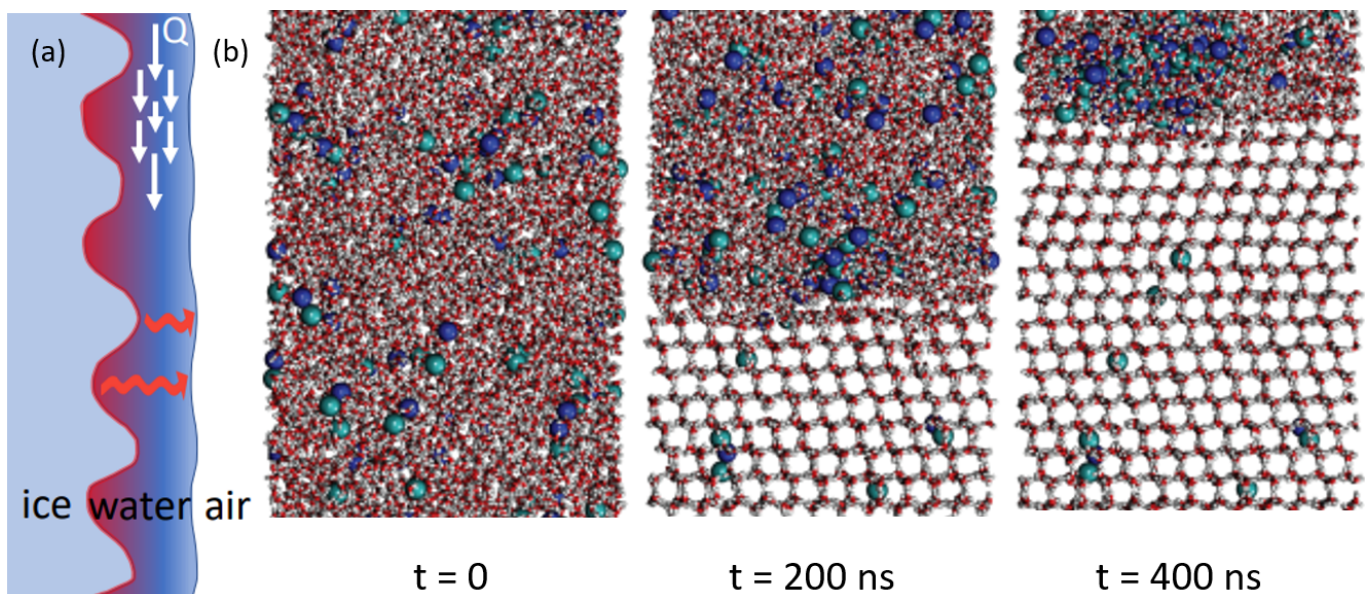
In eerder gepubliceerd theoretisch werk werd gesuggereerd dat ribbels onder alle omstandigheden en voor alle soorten water zouden moeten ontstaan. De experimenten van de Amsterdamse onderzoekers laten echter zien dat er vrijwel geen ribbels zijn als er helemaal geen zout toegevoegd is aan het water. Dan is natuurlijk de vraag: wat is hiervan de oorzaak? Laten we dan eerst iets dieper ingaan op de theorie. Waarom ontstaan de ijsribbels überhaupt?

De rol van stromend water

In afbeelding 3a zie je een schematische weergave van de theorie. De Q geeft een dunne stroom vloeibaar water aan, aan het oppervlak van de ijspegel. Bij het bevriezen van water komt, hoewel dat enigszins tegenintuïtief klinkt, veel warmte vrij – weergegeven met de rode gekromde pijlen. Deze warmte gaat het groeiproces van ijs tegen, en zal dus afgevoerd

moeten worden naar de lucht om het ijskristal te laten groeien. Als je dan aanneemt dat er altijd oneffenheden op het ijsoppervlak zijn, zal de warmte niet altijd dezelfde afstand hoeven afleggen voordat die wordt vrijgegeven aan de omgeving. Hierdoor ontstaat een heel ingewikkeld samenspel tussen een stromende vloeistof met koudere en warmere gebieden. Dit blijkt in het geval van stromend water aan een ijsoppervlak de groei van ribbels van ongeveer 1 centimeter het meest te versterken.

Er is dus een raadsel: de theorie lijkt te kloppen, maar dan alleen als er zout in het water zit! Om te begrijpen wat er gebeurt als zout water bevroert, kunnen we het best een kijkje nemen naar een simulatie van een andere groep onderzoekers, weergegeven in afbeelding 3b. Op tijdstip $t=0$ wordt het water (de rood-witte moleculen) bevroren vanaf de onderkant, met een temperatuur van $-53\text{ }^{\circ}\text{C}$. De zoutionen in het water zijn weergegeven als blauwe bolletjes. Na 200 nanoseconden zie je dat er een laag van ongeveer 10 moleculen dik is bevroren: er vormt zich een mooi hexagonaal rooster onderin de afbeelding. Hierin is geen ruimte voor de zout-ionen, die dus naar boven geduwd worden. Na 400 nanoseconden is bijna al het water gekristalliseerd en is de concentratie zout in de toplaag vele malen hoger dan de originele concentratie. Dit zorgt ervoor dat de buitenste laag heel langzaam aanvriest, en als er continu water blijft toestromen zal die laag helemaal niet bevroren. Met andere woorden, alleen als er zout in het water zit, is er sprake van een vloeibare buitenlaag, en gaat de theorie over het groeien van ribbels op.



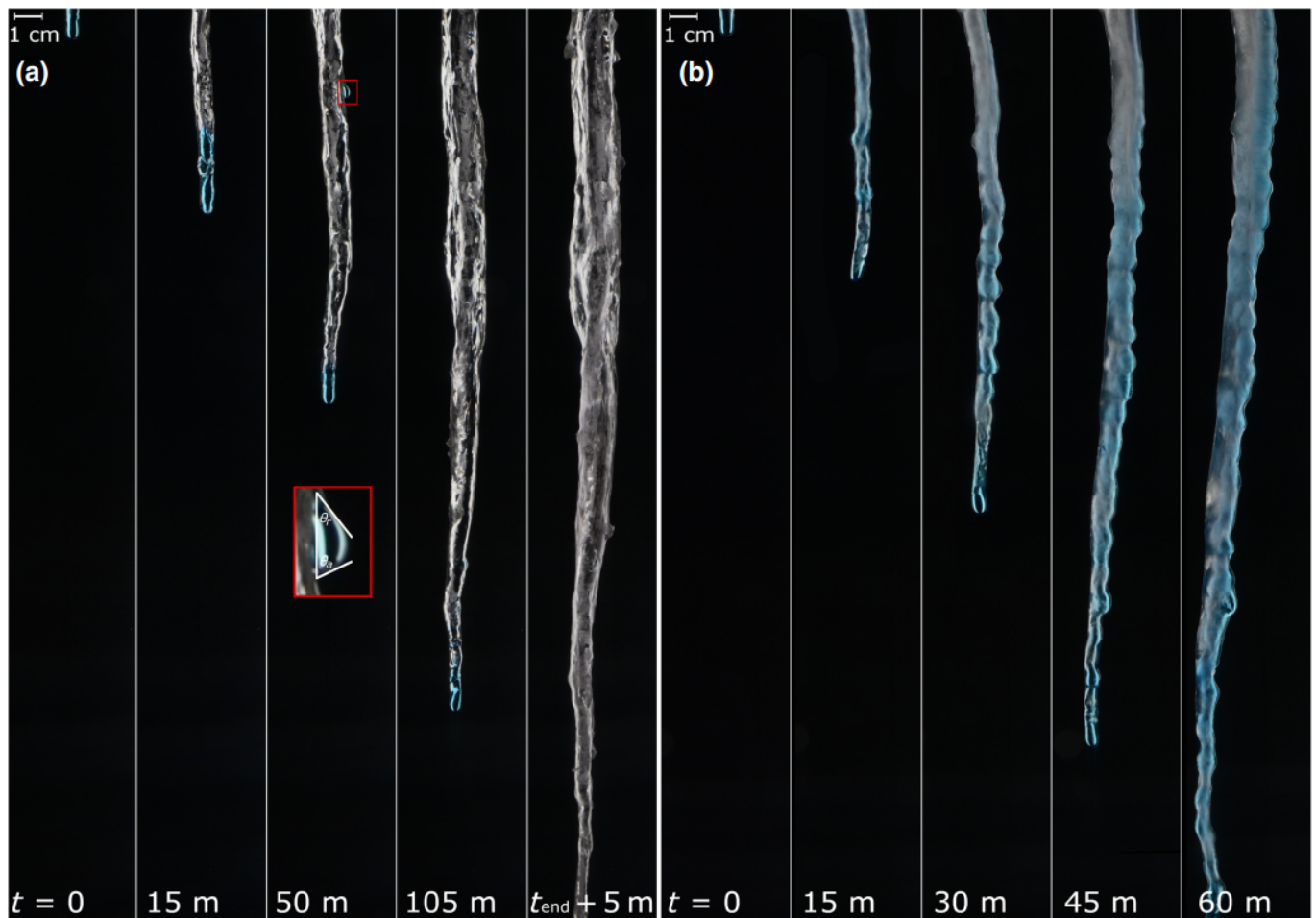
Afbeelding 3. De vorming van ribbels. (a) Schematische weergave van de theorie over het ontstaan van de ribbels. (b) Simulatie aan het bevroren van zout water (de zout-ionen

zijn de blauwe bolletjes). Wanneer water overgaat in de vaste fase vormt het een hexagonaal kristalrooster. Hierin is geen ruimte voor de Na^+ en Cl^- ionen, die daardoor naar boven worden gedrukt. De concentratie zout aan het oppervlak is dus vele male hoger dan die van de originele oplossing. Afbeelding: Tsironi et al., Phys. Chem. Chem. Phys. 22 (2020) 7625.

Menno Demmenie, die het onderzoek leidde, legt uit: 'Om deze hypothese te bevestigen hebben we extra experimenten gedaan waarbij we een kleine hoeveelheid kleurstof (methyleenblauw) hebben toegevoegd aan de oplossing. Deze kleurstof kleurt alleen het vloeibare gedeelte van de ijspegel omdat ook de kleurstof uit het kristalrooster geduwd zal worden. Wat je heel mooi kunt zien, is dat in het linker paneel, waarbij geen zout is toegevoegd, de ijspegel alleen een klein blauw puntje heeft – daar is dus nauwelijks vloeibaar water. Daarentegen geeft het rechter paneel een tegenovergesteld beeld. In die ijspegel is het meeste zout bijgevoegd, en kleurt de hele ijspegel blauw, wat aangeeft dat de gehele ijspegel wordt omgeven met een dunne vloeistoflaag.'

Geen zout, geen ribbels

De conclusie is dus: ribbels op het oppervlak van ijspegels ontstaan door een complex samenspel van aangroeiend ijs op een oneffen oppervlak, waarbij warmte door een dunne laag stromend water getransporteerd moet worden. Die dunne laag water ontstaat alleen als er een klein beetje zout in het water opgelost is. Als dit niet het geval is, wanneer een ijspegel van heel zuiver water groeit, zal die zich meer als een druppelende kaars gedragen – zie de rode box in figuur 4a – en gaat de theorie niet op.



Afbeelding 4. Ijspegelgroei zonder en met zout. Twee verschillende ijspegels die groeien bij een temperatuur van -15°C , waarbij de kleurstof methyleen blauw is toegevoegd. Deze kleurstof kleurt alleen blauw in een vloeibare omgeving en geeft dus de regio's aan waarbij er nog geen ijs gevormd is. In het linker paneel (a) is geen zout toegevoegd en zien we dat alleen de punt blauw en dus vloeibaar is. Deze ijspegel vertoont geen ribbels. Het rechter paneel (b) bevat keukenzout, wat ervoor zorgt dat er een dunne waterlaag op de buitenkant blijft staan. Hierdoor gaat de in het artikel beschreven theorie op, en ontstaan er ribbels aan het oppervlak. Afbeelding: Demmenie et al.

In het wetenschappelijke artikel (Demmenie *et al.*, gepubliceerd in het tijdschrift Physical Review Applied) kun je meer lezen over hoe de grootte en lengte van de ribbels gekwantificeerd worden. Daarnaast gaan de auteurs dieper in op het ontstaan van een dunne waterlaag op een ijskristal dat gevormd wordt bij verschillende zoutgehaltes.

Publicatie

[The Growth and Form of Rippled Icicles](#). Menno Demmenie, Sander Woutersen, Lars Reus,

Paul Kolpakov, Daniel Bonn en Noushine Shahidzadeh. Phys. Rev. Applied **19** (2023) 024005.