

Trends in temperatuurextremen in Nederland (1907 – 2022)

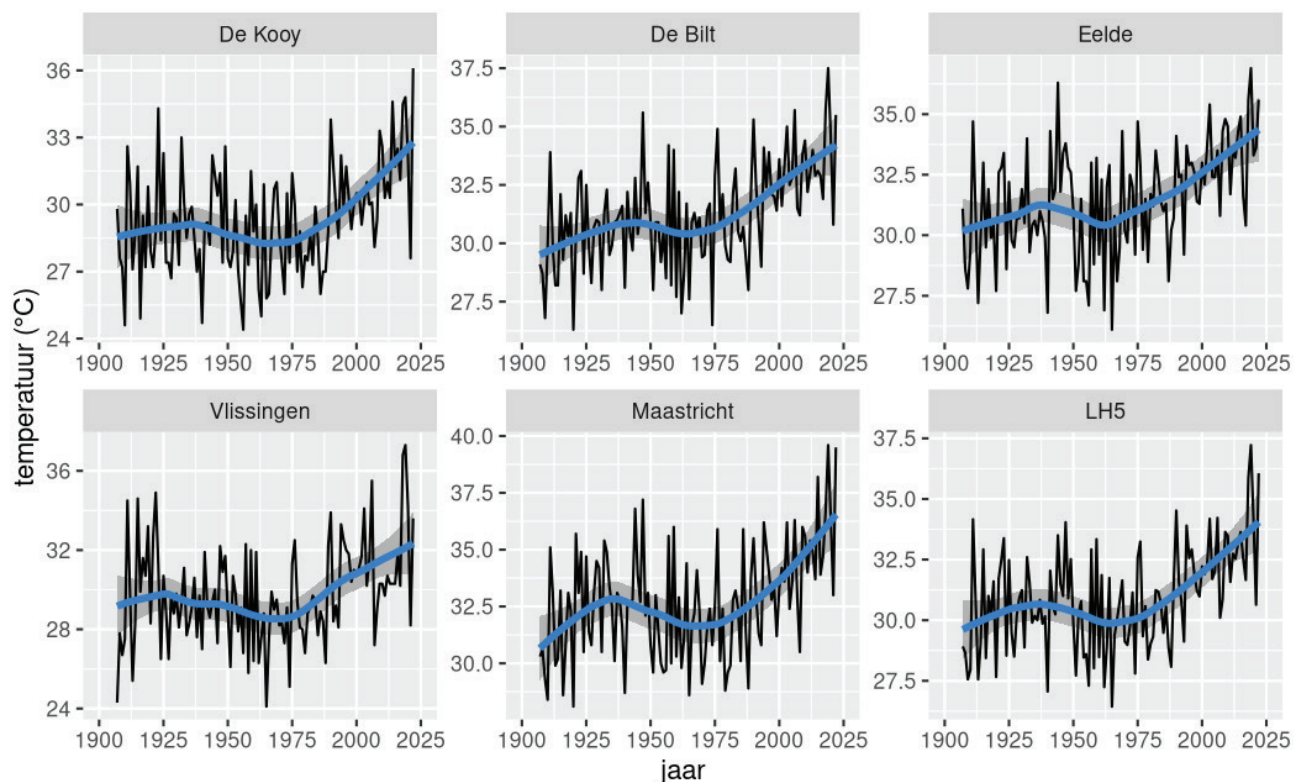
Theo Brandsma (KNMI)

Afgelopen zomer meldde het KNMI middels een klimaatbericht: 'Warmste dag van het jaar nu 4 °C warmer dan rond 1900'. Dit bericht was gebaseerd op het werk van Van Oldenborgh et al. (2022). Daaruit bleek dat het jaarmaximum van de dagelijkse maximumtemperaturen (TXx) in De Bilt in de periode 1901 – 2021 met 4 °C gestegen was. In dit artikel vergelijken we deze trend in De Bilt voor de periode 1907 – 2022 met de vier andere hoofdstations (De Kooy, Eelde, Vlissingen en Maastricht) en het gemiddelde van de vijf hoofdstations (LH5). Daarnaast kijken we naar trends in vier andere indices voor extreme koude en hitte, en plaatsen dit in de context van de aanzienlijke onzekerheden bij dit soort schattingen.

Modellen en waarnemingen

Van Oldenborgh et al. (2022) laten zien dat klimaatmodellen niet goed in staat zijn extreme hitte goed weer te geven. Zo is er in ons deel van Europa sprake van een forse onderschatting van de waargenomen hoogste maximumtemperatuur van het jaar (TXx). De conclusie was dat het modelleren van extreme hitte en het duiden van de relatie met klimaatverandering nog een belangrijke wetenschappelijke uitdaging vormt. Om klimaatmodellen te verbeteren werken klimaatonderzoekers aan een betere beschrijving van de verdamping van vocht via vegetatie, de opname van water in de bodem, de menging van vochtige lucht dicht bij het oppervlak met lucht uit hogere luchtlagen, de vorming van wolken en neerslag en de invloed van zwevende deeltjes in de lucht (aerosolen) op wolken en zonlicht.

Naast de uitdagingen die er zijn met klimaatmodellen, kunnen er zich problemen voordoen met de waarnemingen die nodig zijn om die modellen te valideren. Lange waarnemereeksen zijn vaak inhomogeen door veranderingen in waarnemlocatie en/of meetmethoden. Deze inhomogeniteiten kunnen leiden tot een onder- of overschatting van gemiddelden en extremen. Het KNMI heeft daarom in 2016 de dagelijkse temperatuurreeksen van de vijf hoofdstations gehomogeniseerd (Brandsma, 2016). Na homogenisatie gaven de reeksen een consistent beeld van temperatuurverandering in Nederland. In dit artikel gebruiken we deze reeksen om de 4 °C temperatuurstijging in TXx in De Bilt in een bredere context te plaatsen. We kwantificeren de veranderingen in verschillende temperatuurextremen in Nederland inclusief een analyse van de betrouwbaarheid van de schattingen.



Figuur 1. Niet-lineaire trends in TXx voor de vijf hoofdstations en het gemiddelde (LH5) in de periode 1907 – 2022. De grijze band geeft het 95% betrouwbaarheidsinterval.

Gebruikte data en methode

We gebruiken de gehomogeniseerde dagelijkse reeksen voor gemiddelde temperatuur (TG), maximumtemperatuur (TX) en minimumtemperatuur (TN). Daarbij beperken we ons tot de periode 1907 – 2022. De volgende zes indices komen aan bod:

1. Jaargemiddelde temperatuur (TG).
2. Jaarmaximum van de dagelijkse maximum temperatuur (TXx).
3. Jaarmaximum van het driedaags lopend gemiddelde van de dagelijkse maximumtemperatuur (TX3x).
4. Jaarminimum van de dagelijkse minimumtemperatuur (TNn).
5. Jaarminimum van het driedaags lopend gemiddelde van de dagelijkse minimumtemperatuur (TN3n).
6. Jaarminimum van het 15-daags lopend gemiddelde van de dagelijkse gemiddelde temperatuur (TG15n).

TX3x en TN3n zijn indicatoren voor de kans op respectievelijk hitte- en koudegolven. Vanwege de definitie is het aantal hitte- of koudegolven zelf niet de beste indicator voor veranderingen in extreme hitte of koude. Een kleine daling van temperatuur tijdens een lange hittegolf, bijvoorbeeld, kan diezelfde golf in twee of drie kortere hittegolven uiteen laten vallen. In Nederland is sprake van een hittegolf bij een opeenvolging in De Bilt van minimaal vijf zomerse dagen ($TX \geq 25.0 \text{ }^\circ\text{C}$), waarvan minimaal drie tropische dagen ($TX \geq 30.0 \text{ }^\circ\text{C}$) zijn. Van een koudegolf is sprake bij een aaneengesloten periode in De Bilt van minimaal vijf ijsdagen ($TX < 0.0 \text{ }^\circ\text{C}$) waarvan minimaal drie dagen met strenge vorst ($TN < -10.0 \text{ }^\circ\text{C}$).

TG15n is een goede indicator voor de kans op een Elfstedentocht. Wanneer $TG15 < -4.2 \text{ }^\circ\text{C}$ is in de praktijk gebleken dat een Elfstedentocht mogelijk is (Visser en Petersen, 2009; Oldenborgh et al., 2019). De indices TNn, TN3n en TG15n hebben betrekking op het winterhalfjaar (oktober – maart), waarbij het jaartal gelijk is aan het jaar waarin de maanden januari – maart vallen. Zo heeft de winter van 1907 betrekking op de periode oktober 1906 – maart 1907.

Voor het uitrekenen van de trends en de betrouw-

Station	$\Delta T(^\circ\text{C})$					
	TG	TXx	TX3x	TNn	TN3n	TG15n
De Kooy	2.3 [1.7, 3.0]	4.2 [2.2, 6.3]	3.8 [1.7, 5.8]	3.6 [0.2, 7.0]	3.8 [0.6, 6.9]	2.5 [-0.1, 5.1]
De Bilt	2.2 [1.7, 2.8]	4.7 [2.9, 6.5]	4.0 [2.0, 6.0]	4.4 [0.8, 8.1]	4.3 [1.0, 7.6]	2.8 [0.2, 5.5]
Eelde	2.3 [1.7, 2.9]	4.2 [2.3, 6.1]	3.3 [1.2, 5.4]	3.4 [-0.5, 7.2]	3.1 [-0.4, 6.7]	2.5 [-0.2, 5.2]
Vlissingen	2.1 [1.5, 2.7]	3.2 [1.0, 5.4]	3.3 [1.2, 5.5]	4.9 [1.6, 8.2]	4.6 [1.6, 7.5]	2.9 [0.4, 5.3]
Maastricht	2.5 [1.9, 3.1]	5.9 [3.9, 7.9]	5.2 [3.1, 7.2]	4.8 [1.2, 8.3]	4.5 [1.2, 7.9]	3.2 [0.6, 5.9]
LH5	2.3 [1.7, 2.9]	4.4 [2.7, 6.1]	3.9 [2.0, 5.8]	4.2 [0.9, 7.5]	4.1 [1.0, 7.1]	2.8 [0.3, 5.3]

Tabel 1. Verandering van temperatuur in de periode 1907 – 2022 voor zes indices op basis van een niet-lineaire trendschatting voor de vijf hoofdstations en het gemiddelde van deze vijf stations (LH5). De waarden tussen vierkante haken geven de onder- en bovengrens van het 95% betrouwbaarheidsinterval.

baarheidsintervallen gebruiken we de KNMI standaardmethode voor het berekenen van een trend (De Valk, 2020; verder aangeduid als de KNMI smoother). Daarbij wordt de trendlijn bepaald met een lokale lineaire regressie. Voor een gegeven jaar wordt daarbij de trendwaarde geschat uit een rechte lijn gefit aan de meetwaarden van 21 jaar ervoor tot 21 jaar erna, waarbij het gewicht van een meetwaarde afneemt met de afstand tot het gegeven jaar. Het interval van 42 jaar is zo gekozen dat de jaar op jaar verschillen van de trendlijn overeenkomen die van een lopend 30-jaar gemiddelde (met andere woorden, de trendlijn is even glad als het lopend 30-jaar gemiddelde).

Voordeel van deze relatief eenvoudige methode is dat we geen aannames hoeven te doen betreffende de vorm van de trendlijn, zoals een lineaire trend of een trend die schaal met de wereldgemiddelde temperatuur (Van Oldenborgh et al., 2022). Het temperatuurverschil tussen bijvoorbeeld 2022 en 1907 voor een bepaalde index en station is het verschil in de waarden op de trendlijn in die twee jaren. De standaardafwijking van dat verschil is dan gelijk aan de wortel uit de som van de gekwadrateerde standaardafwijkingen voor 2022 en 1907 (de laatsten bepaald uit de regressieanalyse).

Resultaten

Figuur 1 geeft als voorbeeld voor TXx de jaarwaarde, trendlijn en betrouwbaarheidsinterval – met toenemende onzekerheid bij de uiteinden van de curves – voor de vijf stations en LH5. Op het oog is er weinig verschil tussen de verschillende stations. De grootste toename in temperatuur vindt plaats vanaf het laatste kwart van de 20ste eeuw. Merk op dat de jaar op jaar verschillen groot zijn. Dit is kenmerkend voor extremen.

Voor elke index afzonderlijk geeft Figuur 2 de trendlijnen van alle stations en LH5. Voor elke index laat de figuur verschillen zien in absolute positie van de trendlijnen. Dit komt door verschillen in geografische ligging. Onderlinge verschillen tussen de stations in de vorm van de trendlijnen zijn klein. Wel is er een verschil tussen de vorm van de trendlijnen van de verschillende indices. Zo is de vorm van de indices voor minimumtemperatuur anders dan die voor maximumtemperatuur. De trendlijnen voor TNn en

TN3n lopen bijvoorbeeld bijna horizontaal tot circa 1960, terwijl dit voor TXx en TX3x niet het geval is. Merk op dat Maastricht voor de TX variabelen de sterkste stijging laat zien. Voor Eelde laat de trendlijn voor TNn en TN3n een kleine 'dip' zien rond 1970. Nadere analyse van de gegevens suggereert dat deze dip het resultaat is van een aantal zeer lage minima boven een sneeuwdek in Eelde terwijl de andere vier stations fors hogere waarden laten zien (bijvoorbeeld op 9 januari 1968 was $TN = -21.1 \text{ }^\circ\text{C}$ in Eelde terwijl de andere vier hoofdstations $12 \text{ }^\circ\text{C}$ of meer hogere minima

Station	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$					
	TG	TXx	TX3x	TNn	TN3n	TG15n
De Kooy	1.9 [1.5, 2.4]	3.1 [1.7, 4.4]	2.9 [1.6, 4.3]	2.7 [0.4, 4.0]	3.0 [0.9, 5.1]	2.1 [0.4, 3.8]
De Bilt	1.9 [1.5, 2.3]	3.7 [2.5, 4.9]	3.3 [2.0, 4.6]	3.4 [1.0, 5.8]	3.3 [1.1, 5.5]	2.1 [0.4, 3.9]
Eelde	1.9 [1.5, 2.3]	3.3 [2.0, 4.5]	2.7 [1.3, 4.0]	2.5 [0.0, 5.0]	2.3 [0.0, 4.7]	2.1 [0.3, 3.9]
Vlissingen	1.7 [1.4, 2.1]	2.3 [0.8, 3.7]	2.5 [1.1, 3.9]	3.8 [1.6, 6.0]	3.5 [1.6, 5.5]	2.1 [0.5, 3.8]
Maastricht	2.1 [1.7, 2.4]	4.0 [2.6, 5.3]	3.6 [2.2, 4.9]	3.7 [1.4, 6.0]	3.5 [1.3, 5.7]	2.4 [0.6, 4.1]
LH5	1.9 [1.5, 2.3]	3.3 [2.1, 4.4]	3.0 [1.7, 4.2]	3.2 [1.0, 5.4]	3.1 [1.1, 5.1]	2.2 [0.5, 3.8]

Tabel 2. Zelfde als Tabel 1 maar nu voor de periode 1915 – 2014.

rapporteerden, of op 1 januari 1971 met TN = -21.0 °C in Eelde met 10 °C of meer hogere minima op de andere stations). De TG trendlijn van De Bilt valt deels samen met die van LH5 en De Kooy en is daarom niet goed zichtbaar. Merk verder op dat Elfstedentochtindicator TG15n een 'dip' heeft tussen 1925 en 1965 en dat deze pas vanaf circa 1990 echt begint te stijgen.

Tabel 1 geeft voor elke index en elk station de verschillen in de temperatuur op de trendlijn tussen 2022 en 1907. Voor TXx van De Bilt is het verschil 4.7 °C. Dit is iets meer dan de 4 °C toename genoemd in het KNMI-klimaatbericht. Dat heeft deels te maken met een iets andere periode en deels met het gebruik van de KNMI smoother. Niettemin is de 4 °C toename in TXx consistent met de gegevens van zowel De Bilt als de andere vier stati-

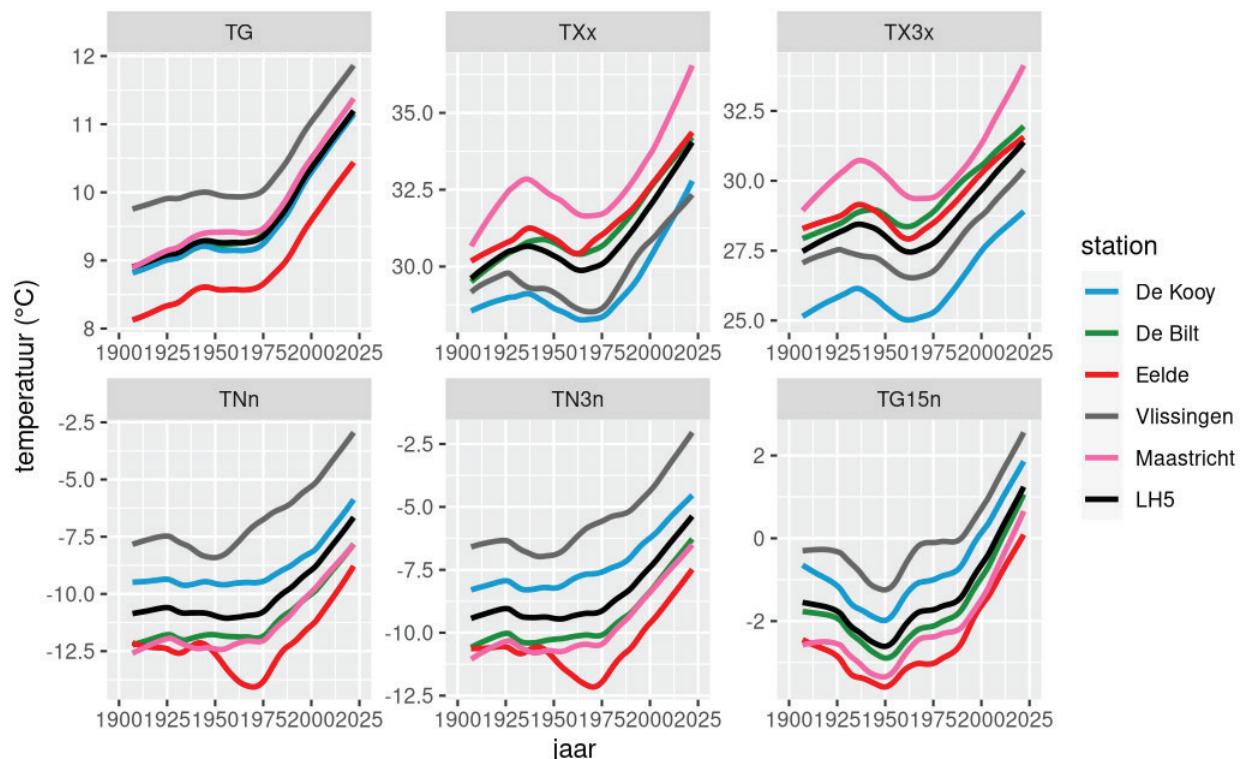
ons. Door de grote jaar op jaar variabiliteit van dit soort extremen hebben we te maken met een forse onzekerheid in deze schatting ($\pm 2^{\circ}\text{C}$).

De trends van de stations zijn onderling vergelijkbaar en verschillen statistisch niet van elkaar. Vooral voor de extremen zijn de betrouwbaarheidsintervallen breed. Voor de maximumtemperatuur-indices laat Maastricht de grootste trend zien, en Vlissingen de kleinste. Voor de minimumtemperatuur-indices heeft Vlissingen de grootste

trend en Eelde de kleinste. De Bilt heeft in geen van de gevallen de grootste of kleinste trend.

Tabel 2 geeft dezelfde resultaten als die in Tabel 1, maar dan voor de temperatuurverschillen op de trendlijn tussen 2014 en 1915 (100-jarige periode). Dit geeft een betrouwbaardere schatting van de trends dan voor het interval 1907 – 2022, omdat verder van het begin en het eind van de trendlijn het betrouwbaarheidsinterval smaller wordt. Vanwege de iets kortere periode – die de relatief hoge temperaturen in het recente tijdvak 2014 – 2022 buiten beschouwing laat – zijn de temperatuurstijgingen kleiner dan voor de periode 1907 – 2022.

Over het algemeen zijn de geschatte stijgingen voor de extremen-indices voor alle stations van de dezelfde orde van grootte, waarbij de betrouwbaarheidsintervallen in hoge mate overlappen. De onzekerheid in deze schattingen is groot, waardoor mogelijke fouten door de achterlig-



Figuur 2. Niet-lineaire trends voor alle zes indices voor de vijf hoofdstations en het gemiddelde (LH5).

gende homogenisatie relatief klein zijn ten opzichte van de intrinsieke statistische onzekerheid.

Discussie en conclusie

In dit artikel hebben we de trends in temperatuurextremen in Nederland gekwantificeerd. De hier gebruikte KNMI smoother blijkt een eenvoudige methode waarmee we niet-lineaire trends onderling kunnen vergelijken zonder specifieke aannames te doen. De enige keuze is dat de trendlijn verenigbaar is met de in de klimatologie gebruikelijke 30-jarige normaal perioden. In toenemende mate wordt deze smoother gebruikt in KNMI publicaties.

De resultaten laten zien dat de in de zomer van 2022 gerapporteerde 4 °C toename in TXx voor De Bilt realistisch is. In de periode 1907 – 2022 laten alle vijf hoofdstations een vergelijkbare toename in TXx zien, variërend van 3.2 °C in Vlissingen tot 5.9 °C in Maas-tricht. De onzekerheid in de trendschatting is groot en bedraagt ±2 °C. Deze relatief sterke toenames in extreme hitte gelden niet alleen voor Nederland maar voor grote delen van West-Europa (Vautard et al., 2022).

Naast de vergelijking voor TXx laat ook de vergelijking voor de andere indices een consistent beeld zien van de temperatuurtrends in Nederland. Dit was al duidelijk in Brandsma (2016) maar is hier verder kwantitatief onderbouwd, inclusief schattingen van de onzekerheden.

In een recente publicatie laten Dijkstra et al. (2021) zien dat de resultaten van de homogenisatie van De Bilt gevoelig zijn voor een aantal aannames in Brandsma (2016). De gegevens van de andere vier hoofdstations – die onafhankelijk van De Bilt gehomogeniseerd zijn – laten echter voor de hier gepresenteerde indices hetzelfde beeld zien als voor de gegevens van De Bilt. Dat geldt ook voor de andere temperatuurtrends in Nederland. De

aannames die bij de homogenisatie van De Bilt zijn toegepast hebben dus niet tot afwijkende resultaten geleid wat betreft de verschillende temperatuurtrends.

Vanwege de consistentie in temperatuurtrends van de onafhankelijk van elkaar gehomogeniseerde reeksen, verwachten we dat de door het KNMI aangekondigde versie 2.0 homogenisatie van deze reeksen geen grote veranderingen zal laten zien in temperatuurtrends. In deze nieuwe versie zal wel meer aandacht worden besteed aan de variabiliteit en onzekerheden en ook aan de gevoeligheid voor de keuzes van parameters bij de homogenisatie.

Dankwoord

De auteur bedankt Cees de Valk en Peter Siegmund voor constructief commentaar op dit manuscript.

Contact

theo.brandsm@knmi.nl

Literatuur

- Brandsma, T., 2016. Homogenization of daily temperature data of the five principal stations in the Netherlands (version 1.0). KNMI Technical Report:TR-356, pp43.
- De Valk, C.F., 2020. Standard method for determining a climatological trend. KNMI Technical Report:TR-389, pp32.
- Dijkstra, F., de Vos, R., Ruis, J. and M. Crok, 2022. Reassessment of the homogenization of daily maximum temperatures in the Netherlands since 1901. *Theor Appl Climatol* 147, 1185–1194. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03887-4>.
- Van Oldenborgh, G.J., Wehner, M. F., Vautard, R., Otto, F. E. L., Seneviratne, S. I., Stott, P.A., et al., 2022. Attributing and projecting heatwaves is hard: We can do better. *Earth's Future*, 10, e2021EF002271. <https://doi.org/10.1029/2021EF002271>.
- Oldenborgh, G.J., Visser, H., Brandsma, T. en H. De Vries, 2019. Hoeveel Elfstedentochten kunnen we nog verwachten? *Meteorologica*, Vol. 28, nr. 1.
- Visser, H. and A.C. Petersen, 2009. The likelihood of holding outdoor skating marathons in the Netherlands as a policy-relevant indicator of climate change. *Climatic Change* 93, 39–54. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9498-6>.
- Vautard, R., et al. 2023. Heat extremes in Western Europe are increasing faster than simulated due to missed atmospheric circulation changes. Preprint: DOI: 10.21203/rs.3.rs-2464829/v1.

Weerbeelden



Kelvin-Helmholtz wolken (Fluctus) in Chaltén (Argentinië) op 26 februari 2023, 10 uur 's ochtends. Kelvin-Helmholtz golven geven aan dat er onstabieleit aanwezig is in twee luchtlagen met verschillende snelheden (wind-schering). Door de verticale windgradiënt wordt de top van de onderste luchtlaag als het ware 'meegetrokken' door de wind erboven. Hierdoor ontstaat een verticale, opwaartse beweging. De opstijgende lucht koelt af en condenseert, waardoor er een wolk ontstaat.

Foto: Manuel Valle Torre en Lieke van der Most.