



Akoestische eigenschappen onder druk

Klimaatverandering en de invloed op
onderzeebootbestrijding

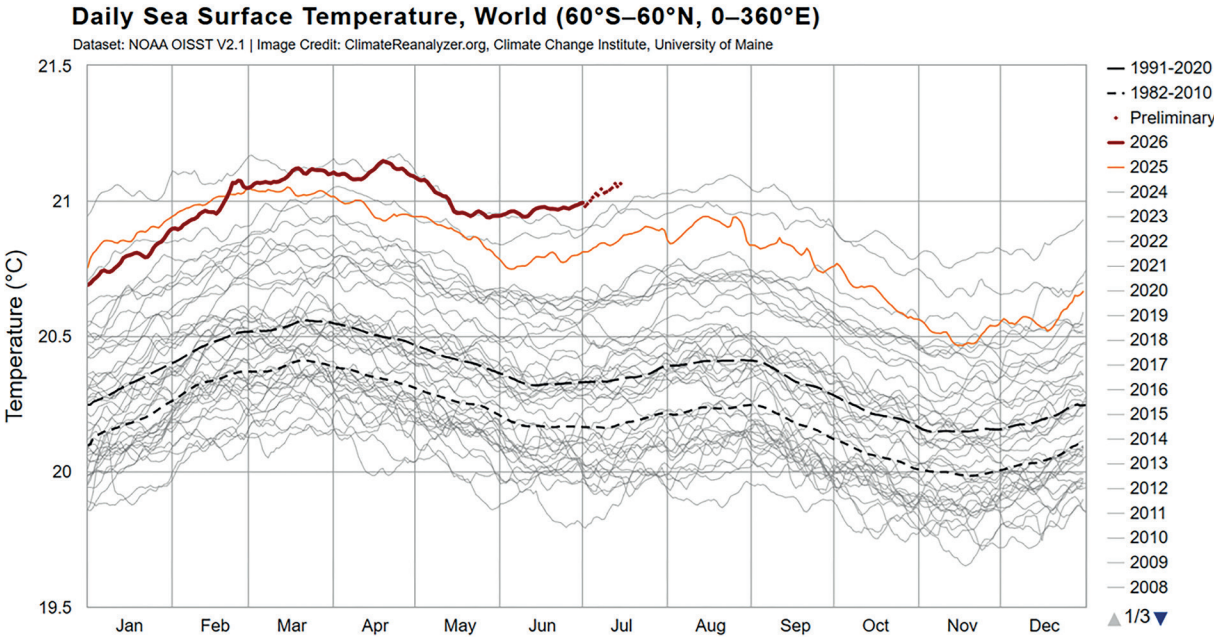
→ Bron: Mediacentrum Defensie

Klimaatverandering is niet alleen een ecologisch probleem, het verandert ook het maritiem-militaire optreden. Metingen tonen aan dat de gemiddelde zeevatertemperatuur stijgt (zie figuur 1) en daarmee de temperatuurverdeling in de oceaan.¹ Door smeltend ijs verandert het zoutgehalte in delen van de oceaan en door opname van CO₂ wordt het water zuurder.^{2,3} Door deze fysische gevolgen veranderen de leef- en migratiepatronen van het zeeleven – alsook de mens – in én op het water. Het gevolg is een graduele geografische verandering van de akoestische eigenschappen van de oceaan, die van invloed zijn op de mogelijkheid tot het detecteren van onderwaterdreigingen zoals onderzeeboten en onbemenste onderwatervoertuigen. De gevolgen zijn niet alleen van invloed op tactische inzet van eenheden, sensoren en effectoren, maar ook op technische specificaties van onderzeebootbestrijdingssystemen.

Dit artikel gaat in op de invloed van klimaatverandering op de waterkolomsamenstelling in de Noord-Atlantische Oceaan. Deze is gekozen omdat daar voor Nederland de primaire focus ligt voor het bondgenootschappelijke optreden tegen de Russische onderwaterdreiging. Dit artikel beschrijft de invloed van klimaatverandering op onderzeebootbestrijding. De uitkomsten van het onderzoek zijn echter ook relevant voor het detecteren van andere onderwaterdreigingen. In dit artikel wordt eerst kort ingegaan op de werking van sonar om onderzeeboten te detecteren, gevolgd door een korte uitleg van onderwaterakoestiek. In het tweede helft van het artikel wordt het uitgevoerde onderzoek beschreven en ook de voor onderzeebootbestrijding relevante uitkomsten.⁴ Afsluitend worden de gevolgen van de beschreven veranderingen voor onderzeebootbestrijding benoemd.

Sonar voor het detecteren van onderzeeboten

Sonar (sound navigation and ranging) is de primaire sensor voor detectie van onderzeeboten, onbemenste onderwatervoertuigen, zeemijnen of wrakken.⁵ Zoals de naam al suggereert maakt sonar gebruik van geluid voor detectie van deze onderwater objecten. De effectiviteit – hoe goed een object is te detecteren – van een sonar hangt onder andere af van de wijze waarop het geluid zich onderwater voortbeweegt. Variaties in zeevatertemperatuur, de distributie van het zoutgehalte en de zuurtegraad zijn medebepalend voor de wijze hoe geluid in water beweegt (propagatie) en hoe ver het reikt. Daarnaast is de signaalfrequentie van invloed – hoe lager de frequentie hoe verder het signaal reikt. De sterkte van omgevingsruis (*ambient noise*) zorgt dat een signaal al dan niet wordt overstemd.



→ Figuur 1: gemiddelde globale zeeoppervlaktetemperatuur, gemeten tussen ±60 breedtegraden over 2026 (rood), 2025 (oranje), gemiddelde 1991-2020 (gestreept), gemiddelde van 1982-2010 (kort gestreept). Data via climaterianalyzer.org.

■ Klimaatverandering beïnvloedt de watersamenstelling van de oceanen.

Geluid in water draagt vele malen verder dan elektromagnetische straling (waaronder licht).⁶ Laagfrequent geluid draagt honderden nautische mijlen ver, in tegenstelling tot licht waarbij de afstand in het gunstigste geval tientallen meters is. Sonars zijn er in vele soorten en kennen veel civiele en militaire toepassingen. Militaire sonars, die gebruikt worden voor onderzeebootbestrijding, zijn onderverdeeld in passieve sonar en actieve sonar. Passieve sonar luistert naar het geluid in de omgeving, in de hoop dat een vijandelijke onderzeeboot geluid afgeeft dat luider is dan de omgevingsruis. Actieve sonar zendt een geluidspuls uit en luistert vervolgens naar de weerkaatste echo's van objecten die zich in de waterkolom bevinden. Door gebruik te maken van verschillende signaalverwerkingstechnieken wordt berekend of er zich een onderwaterplatform bevindt tussen alle echo's van de omgeving.

Detectieafstanden met sonar zijn afhankelijk van een aantal factoren. Wat is de werkfrequentie, wat is het aantal hydrofoons (onderwatermicrofoons) en hoe gevoelig zijn deze hydrofoons? Ook het ontwerp en kwaliteit van de signaalverwerking bepaalt in sterke mate de kans belangrijke signalen uit de omgevingsruis te filteren. De tegenstander heeft ook invloed op de detectiekans. De sterkte van het geluid dat zij produceert, is van invloed op passieve detectie. Terwijl voor actieve detectie de omvang en vorm van de onderzeeboot van invloed is in combinatie met al dan niet aanwezige geluidsabsorberende materialen op de huid. De sonar van de jager en de onderzeeboot van de bejaagde zijn in de operationeel-tactische context een vaststaand gegeven. Tussen deze twee entiteiten zit zeewater, en de samenstelling daarvan heeft grote invloed op de detectiekans.

Gedrag van geluid in water

Geluid in water heeft geen constante snelheid, maar varieert rond 1500 m/s. Net als lichtstralen in de lucht buigt geluid in water af naar de hoogste brekingsindex. In water betekent dit dat geluid afbuigt richting lagere geluidssnelheden. Verandering van geluidssnelheid wordt veroorzaakt

door variaties in zeewatertemperatuur (een hogere temperatuur betekent een hogere geluidssnelheid), saliniteit (hoe hoger het zoutgehalte hoe hoger de geluidssnelheid), statische druk (hoe dieper hoe hoger de geluidssnelheid) en zuurtegraad (hoe zuurder het water hoe minder absorptie van geluid). Het samenstel van deze factoren zorgt voor een aantal fenomenen, die zowel de onderzeebootbestrijder als de onderzeeboot voordeel of nadeel kan opleveren.

Aan het wateroppervlak wordt de samenstelling beïnvloed door zon, wind, regen, en stroming. De laag die hierdoor ontstaat is goed gemengd met als resultaat dat de temperatuur en het zoutgehalte constant zijn. Dit wordt ook wel de *mixing layer* genoemd.⁷ Vanwege deze constante neemt geluidssnelheid toe naarmate het dieper gaat. De overgang met de daaronder liggende waterlaag (die niet goed gemengd is) kan abrupt zijn. In dat geval ontstaat er een akoestische barrière. Geluid blijft daarvoor in deze bovenste laag ingesloten. Dit fenomeen heet de *sonic layer* en de diepte van de grens tussen de twee lagen noemt men de Sonic Layer Depth (figuur 2).

De *surface duct* heeft als voordeel dat het geluid dat hierin 'gevangen' zit en zich over een grote afstand kan voortbeweget. Detectieafstanden kunnen als gevolg daarvan groot zijn. Het sonarsignaal zal zich daarbij amper buiten de laag begeven. Het detecteren van een tegenstander die zich buiten de *duct* bevindt is dan ook lastig. De Sonic Layer Depth is de diepte waarop de *surface duct* eindigt.⁸

Het kan voorkomen dat de temperatuur van het water zó hoog is, dat de geluidssnelheid aan het oppervlak hoger is dan aan het einde van de *mixing layer*. Dit gebeurt tijdens de zomer, of wanneer er veel water is verdampt en het een periode niet heeft geregend. In zulke gevallen bestaat er geen *surface duct* en is dus ook geen Sonic Layer Depth.

Een tweede geluidpropagatiefenomeen is het Sound Channel Axis, de minimum geluidssnelheid in de waterkolom. In de bovenste laag is voor het gedrag van geluid de temperatuur de dominante factor. Op grotere diepte heeft druk de grootste invloed (saliniteit op deze dieptes is maar beperkt van invloed). Voor lage frequenties ontstaat door deze factoren een kanaal waarin het geluid gevangen is en grote afstanden aflegt. Het Sound Channel Axis is gerelateerd aan het SOFAR-kanaal (Sound Fixing And Ranging), waarin het geluid grote afstanden kan afleggen zonder dat het enige interactie heeft met de oppervlakte of de bodem (zie figuur 3).

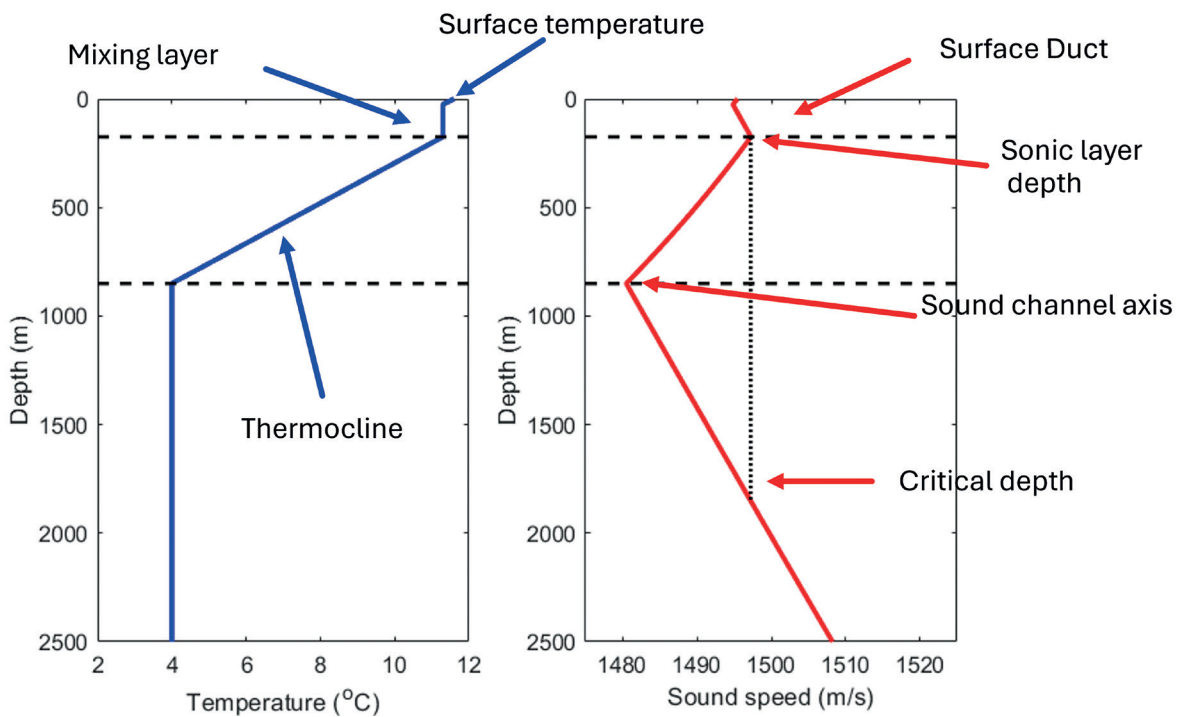
De convergentiezone is een gebied op een relatief grote afstand waar onderwatergeluid, dat initieel is afgebogen

Boven in het kanaal

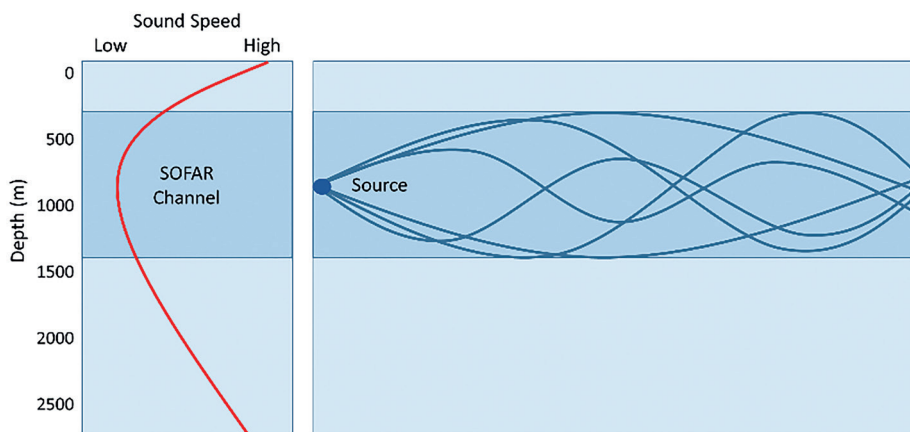
Temperatuur daalt met de diepte → geluidssnelheid daalt en golven buigen naar beneden af.

Beneden in het kanaal

Temperatuur is constant, druk neemt toe → geluidssnelheid neemt toe en golven buigen naar boven af.



→ **Figuur 2:** het temperatuurprofiel in de oceaan (links) bepaalt voor een groot deel het geluidssnelheidsprofiel (rechts). Het einde van de *mixing layer* bepaalt de diepte van het *surface duct*. De thermocline is de afname van temperatuur met diepte. Aan het einde van deze thermocline bevindt zich het geluidssnelheid minimum, ook wel de *Sound Channel Axis* genoemd. De kritieke diepte is die waarop de geluidssnelheid even hoog is als de geluidssnelheid op de *Sonic Layer Depth*; als er geen kritieke diepte is kunnen convergentiezones niet ontstaan.



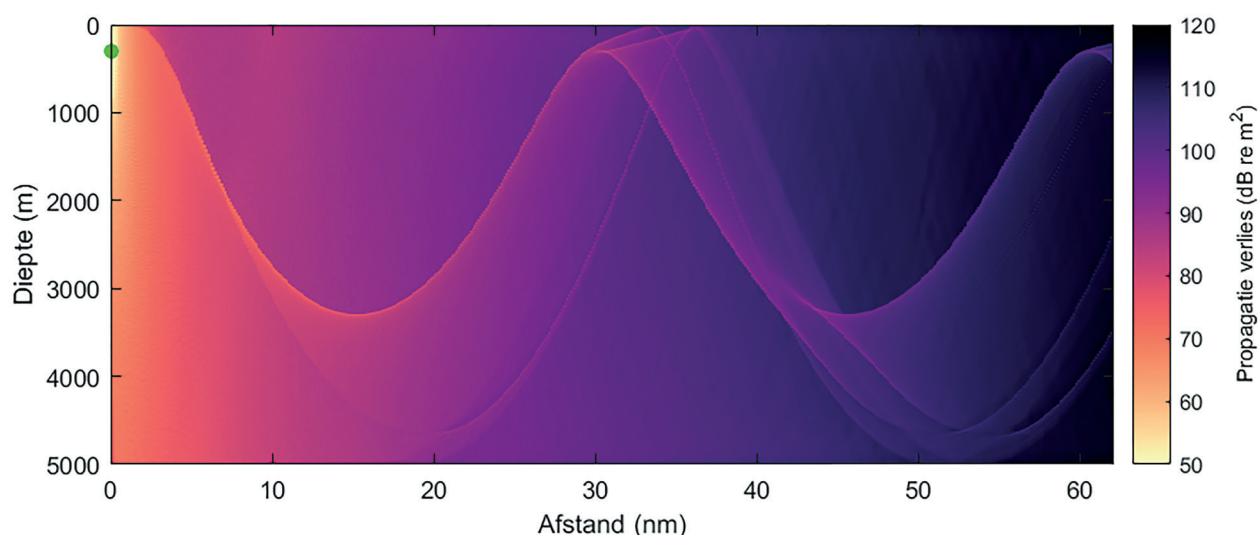
→ **Figuur 3:** links een voorbeeld van het geluidssnelheidsprofiel, met het *SOFAR*-kanaal. Rechts: voorbeeld van hoe de stralen naar rechts bewegen vanaf het *Sound Channel Axis* door het *SOFAR*-kanaal.^{8,9}

naar dieper water, weer samenkomt aan de oppervlakte waardoor detectiekansen ontstaan.¹⁰ Hoe werkt dat? Het water aan de oppervlakte is warmer waardoor het geluid naar beneden afbuigt. Naar mate het dieper wordt daalt de temperatuur waardoor de geluidssnelheid afneemt. Echter met de diepte neemt ook de druk toe waardoor de geluidssnelheid weer toeneemt en het geluid naar de oppervlakte afbuigt.

Oppervlak: warm → hoge snelheid
Middenlaag: kouder → lagere snelheid
Dieper: hoge druk → weer hogere snelheid

De afstand tussen de toppen van de sinusvormige stralen paden noemen we de convergentiezone-lengte. Deze lengte is afhankelijk van vorm van het geluidssnelheid profiel en is dus niet constant in tijd, richting en locatie. Een voorbeeld van de akoestische propagatie door de diepe oceaan is weergegeven in figuur 4, waar de 1^e en 2^e convergentiezone duidelijk zichtbaar zijn.

Deze drie fenomenen hebben invloed op de inzet van sonar en detectie van de tegenstander. Omgekeerd geeft het de eigen onderzeeboot kans zich zodanig te positioneren dat de eigen missie uitgevoerd kan worden met zo min mogelijk kans op detectie door vijandelijke jagers. Klimaatverandering beïnvloedt de watersamenstelling



→ Figuur 4: voorbeeld van akoestische propagatie in een diepe oceaan (5000 m). Er is een akoestische bron op 300 m diepte. Op ongeveer 30 nm komt geluid, wat initieel naar beneden boog, opnieuw in de buurt van de oppervlakte, waar het signaal tot wel 15 dB hoger kan zijn zonder dit fenomeen. Dit is de eerste convergentie zone. Op 60 nm gebeurt dit opnieuw in de tweede convergentie zone. Figuur via sonarprestatie model ARCANE.¹¹

van de oceanen en daarmee ook deze drie fenomenen. En daarmee heeft klimaatverandering effect op ons opereren en op de prestaties van gebruikte sonarsystemen. In het vervolg van dit artikel wordt beschreven hoe deze drie fenomenen in de komende decennia veranderen en wat daar de eventuele consequenties van zijn voor onderzeebootbestrijding.

Het onderzoek

Door wereldwijd klimaatonderzoek zijn er tegenwoordig veel historische data en toekomstvoorspellingen beschikbaar. Deze data bevatten onder andere temperatuur- en saliniteitsverdelingen in de zeeën en oceanen. Deze temperatuur- en saliniteitsverdeling leveren gecombineerd geluidssnelheidsprofielen op, die zoals hiervoor beschreven belangrijk zijn voor sonarprestatieberekeningen. De klimaatvoorspellingen van het geluidssnelheidsprofiel kunnen gekoppeld worden aan akoestische propagatiemodellen, wat ons in staat stelt onderzoek te doen naar veranderende omgevingscondities. De klimaatvoorspellingen zijn gebaseerd op verwachtingen van de totale mondiale broeikasgasontwikkelingen, die de oorzaak zijn van klimaatverandering.

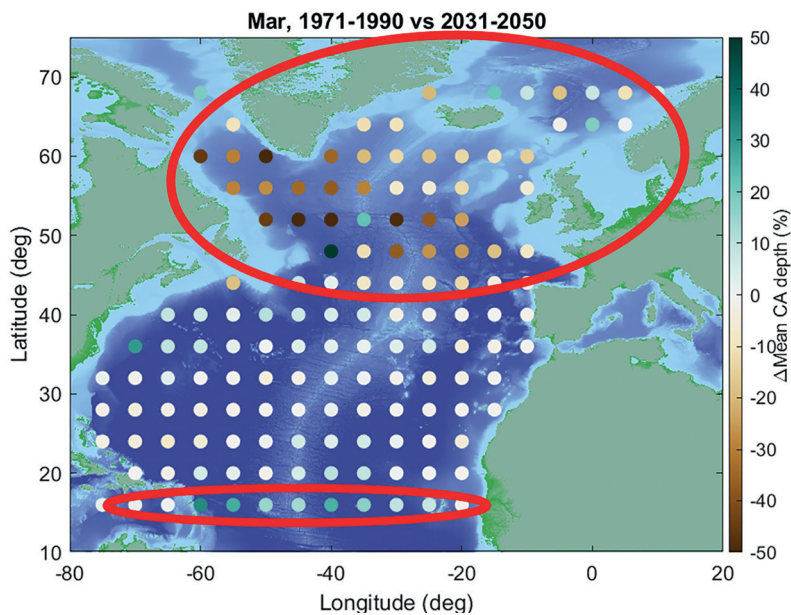
■ **Klimaatverandering heeft effect op ons opereren en op de prestaties van sonarsystemen.**

In het onderzoek is gekeken naar de veranderingen van de Sonic Layer Depth, de afstanden van de convergentiezones, en de diepte van het Sound Channel Axis over de jaren 1970 tot 2050. Omdat de Koninklijke Marine de primaire focus heeft op Noordelijke helft van de Atlantische Oceaan, zijn de verandering voor dit operatiegebied onderzocht. Hierbij is uitgegaan van een 'worst-case' klimaatsituatie, waarbij de broeikasgasontwikkeling hetzelfde blijft zoals deze was in 2016. Alhoewel dit scenario tegenwoordig als een extreme bovengrens wordt gezien, zijn veranderingen in de zeeën en oceanen zo langzaam dat een ander klimaatscenario niet significant andere resultaten zal opleveren in de bovengenoemde periode.

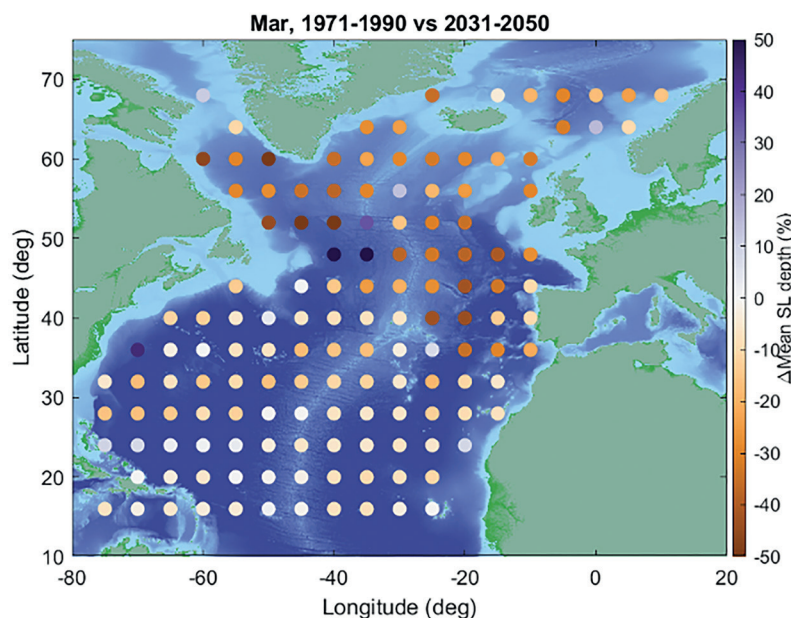
Om iets te zeggen over het klimaat onderzoeken we een trend over meerdere jaren. Om uitschieters te dempen zijn de uitkomsten uit meerdere klimaatmodellen samengenomen. Dit is gedaan door de Sonic Layer Depth, de convergentiezone-lengte en Sound Channel Axis uit te rekenen voor de maanden maart en september. Voor de analyse zijn de resultaten over vier perioden van 20 jaar: 1970-1990, 1990-2010, 2010-2030 en 2030-2050 genomen. De getoonde veranderingen laten zien hoe het gemiddelde tussen deze perioden verandert. Om de veranderingen over tijd goed te laten zien zijn de resultaten voor de periodes van 1971 tot 1990 en van 2031 tot 2050 in dit artikel gevisualiseerd.

Verandering in Sound Channel Axis-diepte

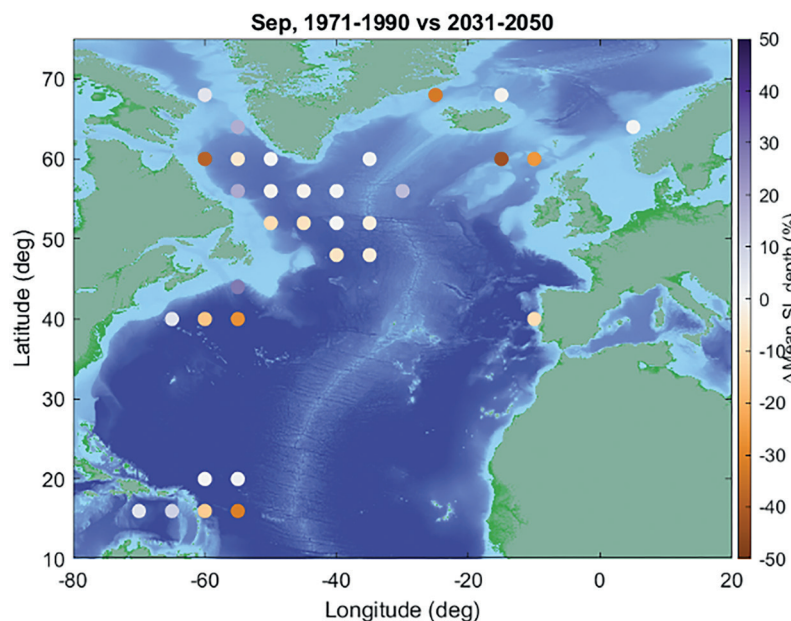
Figuur 5 toont de percentuele verandering in de diepte van de Sound Channel Axis van de periode 1971-1990 naar 2031-2050. Een positieve percentuele verandering betekent dat de Sound Channel Axis op een grotere diepte komt dan in 1971-1990. Aantoonbaar is dat voor gebieden zuidelijk van 45 graden Noorderbreedte de verschillen erg klein zijn, maar voor gebieden noordelijk van 45 graden Noorderbreedte zijn de veranderingen aanzienlijk, tot wel 50%. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door smeltend zee- en landijs. Dat 'extra' zoet water zorgt dat



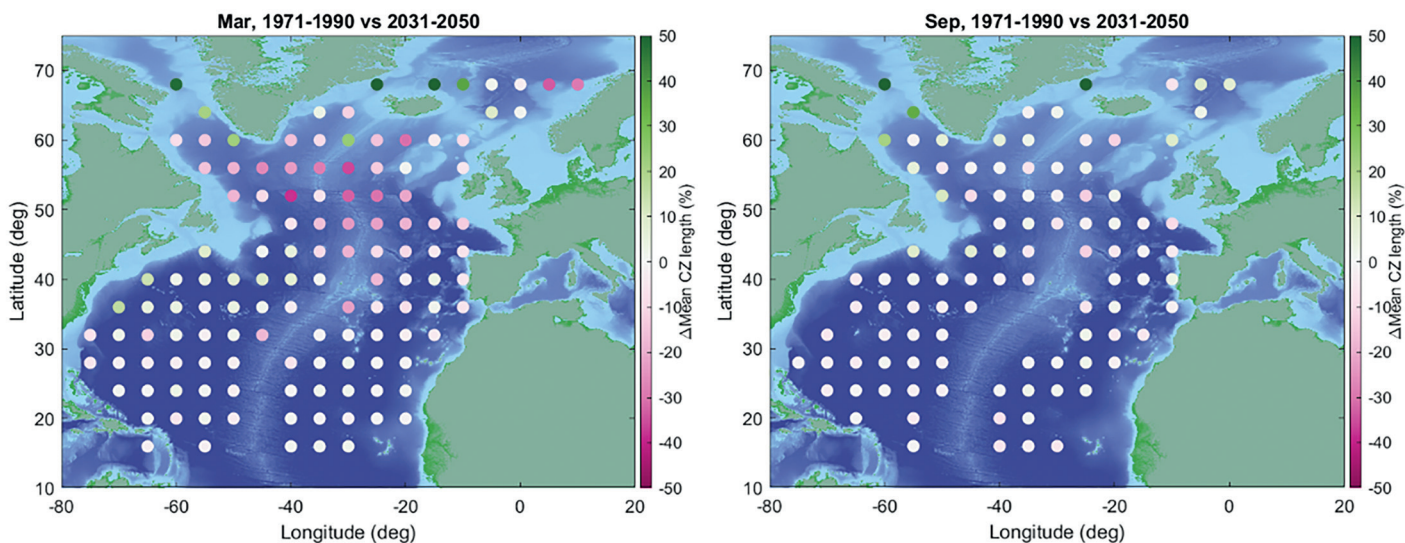
→ Figuur 5: verandering in de gemiddelde Sound Channel Axis-diepte. De rode cirkels geven aan waar de grootste veranderingen zijn. Een positieve delta betekent dat de diepte toeneemt.



→ Figuur 6: verandering in de Sonic Layer Depth in maart (links) en september (onder). In september is op veel plekken in de oceaan de oppervlaktetemperatuur te hoog om een Sonic Layer Depth te hebben, aldaar is in de figuur geen cirkel weergegeven.



Akoestische eigenschappen onder druk



→ **Figuur 7:** verandering in de convergentiezone-lengte in maart (links) en september (rechts).

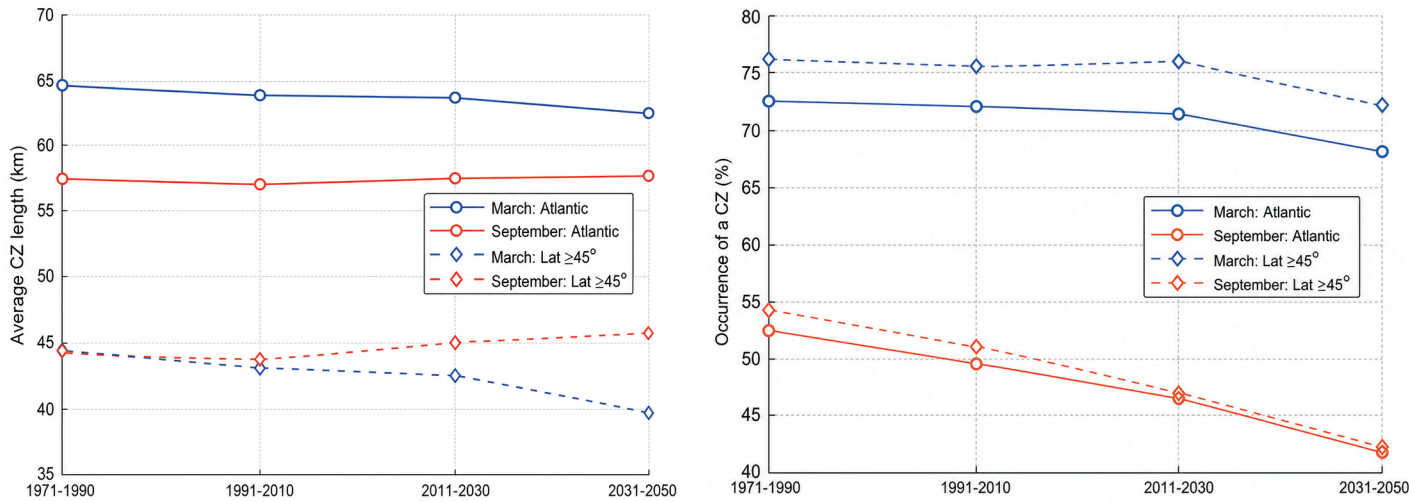
het zoutgehalte in deze gebieden afneemt waardoor de geluidsnelheidsprofielen veranderen. Verder is er op lage breedtegraden ook een toename waarneembaar; de verwachting hier is dat de hogere temperaturen penetreren tot grotere dieptes. Hierdoor komt een temperatuur constante dieper te liggen. De verandering in de diepte van de Sound Channel Axis in september wordt niet getoond in dit artikel, maar de berekende effecten zijn vergelijkbaar als in maart.

Verandering in Sonic Layer Depth

In figuur 6 zijn de veranderingen van de Sonic Layer Depth te zien in maart en september. Hier ziet men dat deze voor het grootste deel van de Atlantische Oceaan afneemt over tijd. Er is een uitzondering ten zuiden van

Groenland, waar een regio is met een sterke toename van de Sonic Layer Depth, tussen de 10% en 50%. De precieze reden is niet helemaal duidelijk, maar heeft waarschijnlijk te maken met de veranderde saliniteit van het water (door smeltend ijs) en de veranderende temperaturen, in combinatie met menging van water wat uit de Noordpool zich een weg baant richting het Caraïbisch gebied.

In maart verdwijnt de Sonic Layer Depth volledig bij slechts twee locaties voor de kust van West-Afrika. Daarentegen zijn er in september grote delen van de Atlantische oceaan waar deze niet meer bestaat, omdat de oppervlaktetemperatuur te hoog ligt. Er zijn een paar gebieden waar de Sonic Layer Depth in beide perioden te vinden is. Aldaar zien we een mix van afnames en toenames.



→ **Figuur 8:** links: trend in de gemiddelde convergentiezone lengte in de Atlantische Oceaan over tijd. Rechts: trend in hoe vaak een convergentiezone optreedt.

Verandering in de convergentiezone-lengtes

Figuur 7 toont een kaart met veranderingen van de convergentiezones voor zowel maart als september. In maart is te zien dat de veranderingen op meer plekken voorkomen en dat deze groter zijn dan in september. Daarnaast is in september te zien dat langs de Atlantische rug en rond Groenland en IJsland convergentiezones vaker niet kunnen bestaan (weergegeven door de afwezigheid van een cirkel). Dit komt doordat op die locaties de oceaan relatief minder diep is, waardoor al het geluid dat omlaag buigt de bodem raakt. Dit effect zal sterker zijn in de periode 2031-2050, gelet op het feit dat de oppervlaktetemperatuur te hoog wordt. Hierdoor verdwijnt de kritieke diepte waardoor al het geluid dat naar beneden afbuigt met de bodem in contact komt en het geluid geen convergentiezone kan vormen. Voor locaties die in de toekomst wel een convergentiezone hebben, is geen duidelijk patroon te zien in een toename of afname van de lengte in maart. Voor september is er over het algemeen een lichte toename van de convergentiezone-lengtes, maar dit effect is gering. Dit betekent dat convergentie-lengtes in de Atlantische Oceaan meer gaan lijken op de typische lengtes in de Mediterrane Zee.

Figuur 8 toont de gemiddelde convergentiezone-lengte (links) voor alle beschouwde datapunten, alsook het totale voorkomen van een convergentiezone (rechts). Daarnaast worden deze variabelen getoond voor alleen de datapunten met een breedtegraad van 45 graden of hoger. Voor de Atlantische Oceaan als geheel, is slechts een kleine trend zichtbaar waarbij de gemiddelde lengtes langzaam lijken te convergeren, ongeacht de maand. Het tegenovergestelde gebeurt in het gebied met hogere breedtegraden, waar de lengtes juist uit elkaar lijken te lopen tussen de maanden; in maart worden de lengtes korter en in september juist langer (figuur 8, links).

Verder zien we dat er een afname is van hoe vaak een convergentiezone kan bestaan (figuur 8, rechts). Dit gebeurt over de hele Atlantische Oceaan, en lijkt zeker in september harder af te nemen dan in maart. Dit heeft directe gevolgen voor de detecteerbaarheid van doelen op lange afstanden in de oceaan.

Concluderend: de gevolgen

Zoals beschreven is klimaatverandering niet alleen een ecologisch probleem, maar heeft het ook invloed op het maritiem-militaire optreden. Voor onderzeebootbestrijding vindt dat optreden voor de Koninklijke Marine primair plaats op de Noord-Atlantische Oceaan. Uit het beschreven onderzoek komt naar voren dat in dit operatiegebied veranderingen optreden, die invloed hebben op het gedrag van geluid in water en daarmee sonarprestaties. De veranderingen mogen dan niet disruptief lijken, maar hebben naast tactische implicaties ook invloed op de keuze en/of op eisen van toekomstige akoestisch sensoren en effectoren.

Het verdwijnen van de Sonic Layer Depth voor een significant deel van het jaar verandert bijvoorbeeld het gebruik van een Hull Mounted Sonar. De verandering van de diepte van het SOFAR-kanaal heeft invloed op de diepte waarop gesleepte en/of *dipping sonar* wordt ingezet en

bepaalt daarmee de lengte van de (sleep)kabel. Langere kabels vragen grotere trommels en die hebben invloed op scheeps- en helikopterontwerp. Het verdwijnen van convergentiezones zorgt dat in die periodes van het jaar geen langeafstand-detectie mogelijk is in het gebied nabij Groenland en IJsland. En dat gebied is al decennia van strategische belang voor onderzeebootbestrijding.

Ten slotte

Het onderliggende wetenschappelijk onderzoek is vernieuwend maar nog beperkt in omvang. De resultaten vragen om verdieping en verduidelijking. Daarvoor is verder onderzoek nodig, mede om te voorkomen dat er overhaaste beslissingen worden genomen op basis van enkele onderzoeken. Door te blijven onderzoeken zorgen we ervoor dat in een veranderende wereld de mensen van de Koninklijke Marine met het juiste materiaal en de laatste wetenschappelijk inzichten naar zee sturen. En dat verdienen ze. In onderliggende onderzoeken hebben wetenschappers van TNO Acoustics & Underwater Warfare samengewerkt met de wetenschappers van het NATO Centre for Maritime Research & Experimentation (CMRE). CMRE is onderdeel van de NATO Science & Technology Organisation. De resultaten van het gemeenschappelijke onderzoek is gepubliceerd en gepresenteerd op UACE 2025.¹² Ander studies uit deze samenwerking tussen TNO en CMRE zijn ook beschikbaar.¹³

Ir. Victor Oppeneer is een sonarprestatiewetenschapper in de divisie Acoustics & Underwater Warfare van TNO. KLTZ b.d. drs. ing. Paul Dröge is senior consultant binnen die divisie.

Noten

- 1 H. Pörtner, D. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama and N. Weyer, *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate - Technical Summary*, IPCC, 2019.
- 2 S.C. Doney, V.J. Fabry, R.A. Feely, J.A. Kleypas, *Ocean Acidification: The Other CO₂ Problem*, Annual Review of marine Science, 1, pp 169-192, 2009.
- 3 A.J., Watson, U. Schuster, J.D. Shutler, T. Holding, I.G.C. Ashton, P. Landschützer, D.K. Woolf, L. Goddijn-Murphy, *Revised estimates of ocean-atmosphere CO₂ flux are consistent with ocean carbon inventory*, Nature Communications, 11 (4422), pp1-6, 2020.
- 4 V.O. Oppeneer, N. Risser, A. Russo, G. Giorili, R. van Vossen, *Mapping the Impact of Climate Change on Indicators of Acoustic Propagation in the Atlantic Ocean*, UACE, Halkidiki, Greece, 2025.
- 5 M.A. Ainslie, *Principles of Sonar Performance Modeling*, Springer, 2011.
- 6 Ibidem.
- 7 R.P. Hodges, *Underwater Acoustics – Analysis, Design and Performance of Sonar*, John Wiley & Sons Ltd, 2010.
- 8 R. Helber, C. Barron, M. Carnes, R. Zingarelli, *Evaluating the sonic layer depth relative to the mixed layer depth*, Journal of Geophysical Research: Oceans, 113 (C7), pp 1-14, 2008.
- 9 P. Webb, *Introduction to oceanography*, Roger Williams University 985, 2021.
- 10 R. Urlick, *Principles of underwater sound*, 3rd ed, New York: McGraw-Hill, 1983.
- 11 ARCANE is het TNO-sonarprestatiemodel. Het is de opvolger van ALMOST/APPROXA.
- 12 Oppeneer, *Mapping the Impact of Climate Change*.
- 13 V.O. Oppeneer, N. Risser, R. van Vossen, K. Pelekanakis, G. Giorli, A. Russo, *The Impact of Climate Change on Sonar Performance: A case study in the High North*, Proceedings of the Institute of Acoustics, Vol 46, Pt. 1, 2024.