

# Klimaphänomen: Nordatlantische Oszillation

## Beeinflusst sie den Auftauzeitpunkt von Seen auf der Nordhalbkugel?

Die Nordatlantische Oszillation, ein grossräumiges Klimaphänomen, bestimmt das Klima in weiten Teilen der nördlichen Hemisphäre. Da sie vor allem im Winterhalbjahr auf das Klima wirkt, ging die EAWAG der Frage nach, ob die Nordatlantische Oszillation den Auftauzeitpunkt von Seen auf der Nordhalbkugel beeinflusst. Dabei zeigte sich, dass sich der Wirkungsbereich der Nordatlantischen Oszillation in den letzten 130 Jahren verschoben hat. Heute ist ihr Einfluss bis nach Sibirien spürbar, hat dafür aber in Nordamerika abgenommen.

Islandtief, ein Tiefdruckgebiet mit Zentrum über Island, und Azorenhoch, ein Hochdruckgebiet, das sich von den Azoren bis zur Iberischen Halbinsel erstreckt, sind die zwei wichtigsten klimabestimmenden Gegenspieler über dem Nordatlantik (Abb. 1). Der zwischen diesen beiden Druckzentren

entstehende grossräumige Nord-Süd-Gradient des oberflächennahen Luftdruckes ist natürlich nicht konstant, sondern verändert sich je nach Stärke des Tiefs und des Hochs. Diese zeitlichen Schwankungen über dem Nordatlantik werden als Nordatlantische Oszillation (NAO) bezeichnet. Sie

ist insbesondere in den Gebieten wirksam, die direkt an den Nordatlantik grenzen, beeinflusst aber auch das Klima in weiten Teilen der restlichen Nordhalbkugel, dort vornehmlich in höheren Breiten [1]. So ist beispielsweise die mittlere Lufttemperatur der nördlichen Hemisphäre mit der NAO verknüpft und fast ein Drittel der Temperaturvariabilität kann durch die NAO erklärt werden. Der Einfluss der NAO auf das Klima der Nordhalbkugel ist vor allem im Winterhalbjahr stark ausgeprägt.

### Meteorologische Bedeutung der NAO

Die NAO wird gewöhnlich mit Hilfe des NAO-Index beschrieben (Abb. 2). Dieser Index gibt den Luftdruckunterschied auf Meereshöhe an, der zwischen zwei meteorologischen Stationen in der Nähe der Zentren des Islandtiefs und des Azorenhochs besteht [1]. Sind die Druckgegensätze hoch, das heisst bei sehr tiefem Druck über Island und sehr hohem Druck über den Azoren, ist der NAO-Index positiv. Ein negativer NAO-Index ergibt sich bei flacheren Druckunterschieden, wenn Islandtief und Azorenhoch weniger stark ausgeprägt sind.

Hohe NAO-Indizes im Winter weisen also auf einen steilen meridionalen Druckgradienten (entlang der Längengrade) über dem Nordatlantik hin. Dieser löst starke westliche Winde aus, die warme, feuchte Meeresluft ostwärts über Europa transportieren (Abb. 1). Die Folge sind milde, nasse Winter in Europa und weiten Teilen Zentralasiens. Niedrige NAO-Indizes dagegen spiegeln einen relativ schwach ausgeprägten

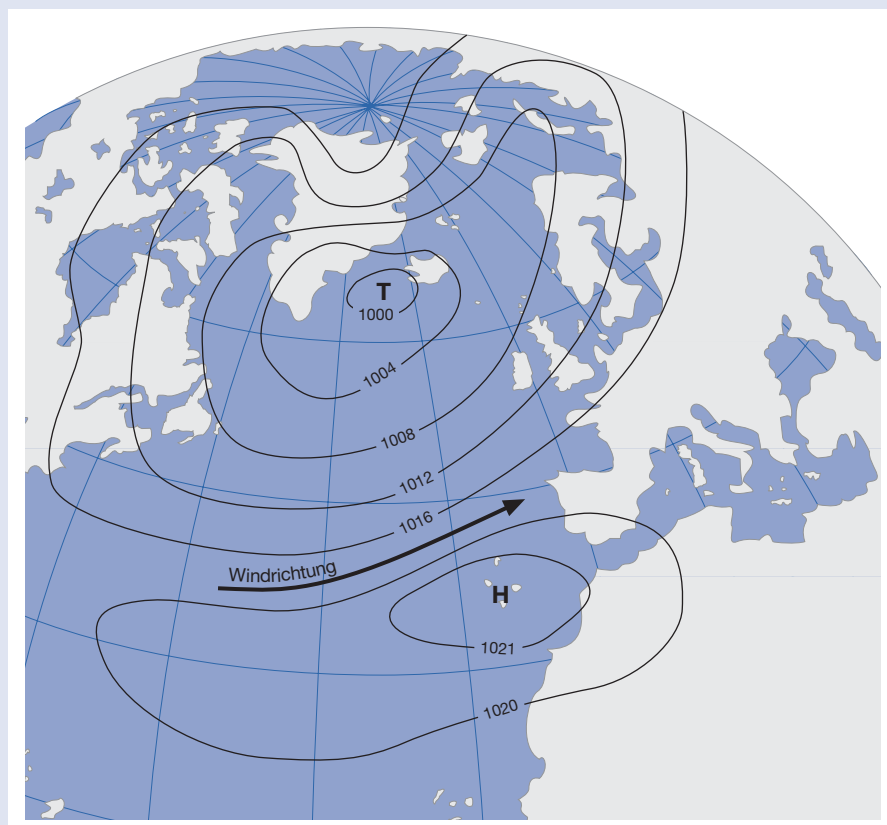


Abb. 1: Die Verteilung des mittleren Luftdruckes im Januar auf Meereshöhe über dem Nordatlantik für die Periode 1941–1970. Eingezeichnet sind das Islandtief, das Azorenhoch und die vorherrschenden Richtungen der Winde, die vom Nordatlantik kommend über Europa wehen. Angepasst aus [2].



Beate Müller, EAWAG

Der sibirische Baikalsee ist während 4–5 Monaten im Jahr zugefroren.

meridionalen Druckgradienten wider, der entsprechend schwache Westwinde über dem Nordatlantik hervorruft und kältere, trockenere Winter in Europa bewirkt. Im Osten Kanadas ist die Situation entgegengesetzt, dort gehen hohe NAO-Indizes mit starken nördlichen Winden und kalten Wintern und niedrige NAO-Indizes mit schwächeren Nordwinden und milderem Wintern einher. Selten auftretende Umkehrungen der normalen Druckverteilung über dem Nordatlantik (Hochdruck über Island und Tiefdruck über den Azoren) haben eine süd-wärtige Verlagerung polarer Luftmassen nach Europa zur Folge, die dort extrem kalte Winter hervorrufen [2]. Dies war das letzte Mal im Januar 1963 der Fall. Damals fror sogar der Zürichsee zu.

### Analyse historischer Datenreihen

Der Auftauzeitpunkt von Eis auf Seen hängt stark von den vorherrschenden Lufttemperaturen im Winter und im Frühling ab (siehe auch Artikel auf S. 19). Da die NAO in dieser Zeit ihren stärksten Einfluss auf das Klima hat, ist anzunehmen, dass sie sich auch auf den Auftauzeitpunkt der Seen auswirkt, die in ihrem Einflussbereich liegen. Diese Hypothese wurde für verschiedene Seen der nördlichen Hemisphäre untersucht, für die lange Beobachtungsreihen zum Auftauzeit-

punkt vorliegen [3–6]. Hier wollen wir vier repräsentative Seen betrachten: den finnischen Kallavesi, den St. Moritzer See in den Schweizer Alpen, den Baikalsee in Sibirien und den Mendota See in Wisconsin, USA. Ob es zwischen der NAO und dem Auftauzeitpunkt dieser vier Seen tatsächlich einen Zusammenhang gibt, ermittelten wir, indem wir die Datenreihen der Auftauzeitpunkte mit saisonalen NAO-Indizes korrelierten. Allge-

mein erwarteten wir negative Korrelationen, da hohe NAO-Indizes mit milden Wintern einhergehen und vermutlich auch mit frühem Auftauen, und umgekehrt. Um zusätzlich herauszufinden, inwieweit der Einfluss der NAO im Laufe der Zeit schwankte, wurden Korrelationen für eine Serie von überlappenden historischen Datenfenstern berechnet, die jeweils 50 Jahre umfassen – beginnend mit dem Zeitraum 1865–1914 und endend mit dem Zeitraum 1947–1996.

Die berechneten Korrelationskoeffizienten sind in Abb. 3 als zweidimensionale Konturplots dargestellt. Dabei sind die Korrelationskoeffizienten sowohl als Funktion der Jahreszeit, für die der NAO-Index errechnet wurde, als auch als Funktion des historischen Datenfensters dargestellt. Signifikante negative Korrelationen sind in den Plots als dunkelblaue Bereiche dargestellt. Sie zeigen an, wann die NAO wahrscheinlich einen Einfluss auf den Auftauzeitpunkt gehabt hat.

### Hat sich das Einflussgebiet der NAO verschoben?

Da der Einfluss der NAO auf die Lufttemperatur in Finnland extrem stark ist [1], erwarteten wir, eine deutliche Korrelation zwischen dem Auftauzeitpunkt des Kallavesi und der NAO zu finden. Dies trifft auch tatsächlich zu: im gesamten Verlauf der Aufzeichnungen gibt es eine signifikante negative Korrelation zwischen dem Auftauzeitpunkt und den NAO-Indizes des vorangegangenen Winters und Frühlings (Abb. 3). Die maximale für den Kallavesi erreichte Korrelation entspricht einer gemeinsamen Varianz von 43%: d.h., dass sich 43% der Variabilität in den Auftauzeitpunkten durch

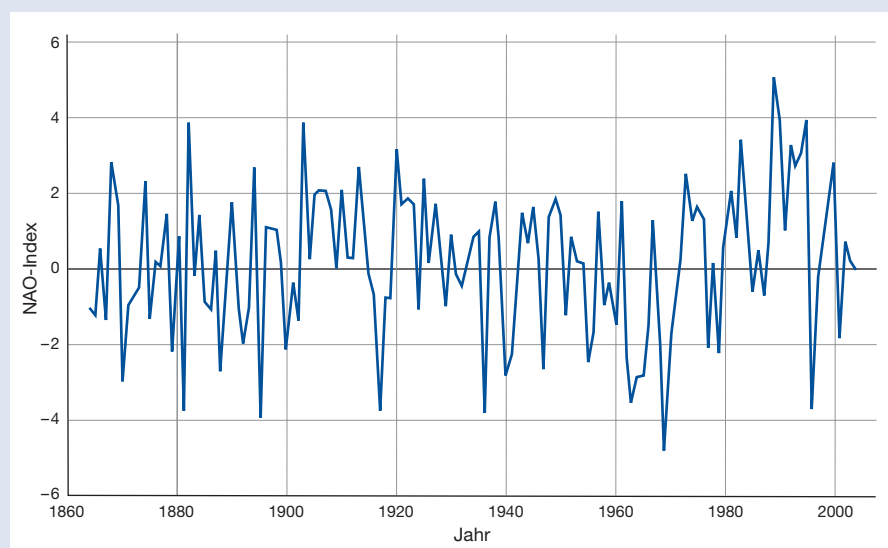


Abb. 2: Die Schwankungen der Nordatlantischen Oszillation (NAO) im Winter (Januar bis März) seit 1864 ausgedrückt durch die NAO-Indizes. Angepasst aus [1].

die Variabilität der NAO-Indizes statistisch erklären lassen. Dies ist ein erstaunlich hoher Wert, wenn man bedenkt, dass ein so einfacher Index herangezogen wird, um eine Aussage über jene komplexen klimatischen Vorgänge zu machen, die auf den Kallavesi einwirken.

Der St. Moritzer See liegt in einer Region, wo die Lufttemperatur weit weniger durch die NAO beeinflusst wird als in Finnland. Folglich gibt es nur Andeutungen einer schwachen Beziehung zwischen dem Auftauen und der winterlichen NAO im letzten Abschnitt der Datenreihe (Abb. 3). Immerhin liegt die gemeinsame Varianz noch bei 11%.

Am Baikalsee hat der Einfluss der Winter-NAO auf den Auftauzeitpunkt in den letzten Jahren erheblich zugenommen [5]. Vor dem Datenfenster von 1918–1967 hatte die NAO keine erkennbare Wirkung auf das Auftauen (Abb. 3); danach aber können bis zu 16% der Varianz des Auftauzeitpunktes durch die Winter-NAO-Indizes erklärt werden.

Die erstaunlichsten Ergebnisse lieferte jedoch der Mendota See (Abb. 3). In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurden die Lufttemperaturen im zentralen Nordamerika relativ wenig von der NAO beeinflusst. Die

errechnete geringe Korrelation zwischen dem Auftauzeitpunkt des Mendota Sees und der winterlichen NAO im letzten Teil der Datenserie steht damit in Einklang. Wenn man allerdings weiter in die Vergangenheit zurückgeht, nimmt der Wert des (negativen) Korrelationskoeffizienten soweit zu, dass sich gemeinsame Varianzen in beinahe derselben Größenordnung ergeben wie die im Fall des Kallavesi heute. Zusammen mit der offensichtlichen Verschiebung in die entgegengesetzte Richtung im Fall des Baikalsees und möglicherweise auch des St. Moritzer Sees legt dies den Schluss nahe, dass sich der Einflussbereich der NAO während der vergangenen 130 Jahre räumlich ver-

schohen haben könnte. Offenbar hatte die NAO früher einen grösseren Einfluss auf das Klima in Nordamerika, jedoch einen geringeren auf das Klima in Sibirien.

Um die hier vorgestellten Ergebnisse zu untermauern, untersuchen wir derzeit eine Reihe weiterer Seen in verschiedenen Regionen der nördlichen Hemisphäre. Vorläufige Resultate deuten an, dass auch diese Seen unter dem Einfluss der NAO stehen. Darüber hinaus scheint die mit der NAO eng zusammenhängende Arktische Oszillation eine Rolle für die Auftauzeitpunkte dieser Seen zu spielen.

Die hier beschriebene Forschungsarbeit wurde im Rahmen der EU-Projekte REFLECT, CLIME und Euro-limpac durchgeführt.

David M. Livingstone, Portrait siehe S. 22.

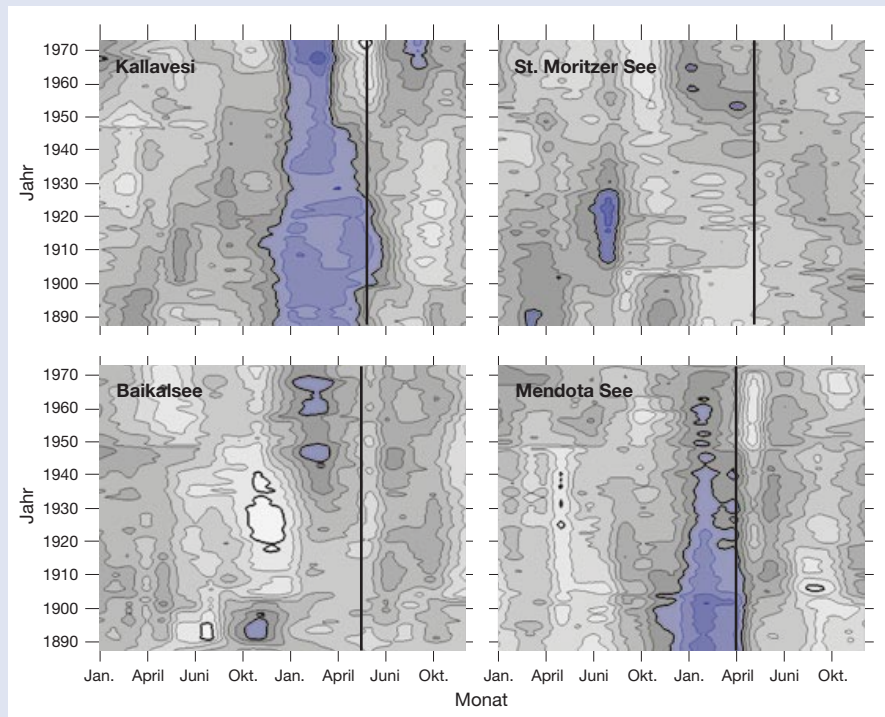


Abb. 3: Konturplot der Korrelationskoeffizienten ( $r$ ) zwischen dem Auftaudatum und saisonalen Indizes der Nordatlantischen Oszillation (NAO) für 4 Seen in unterschiedlichen Teilen der nördlichen Hemisphäre (Kallavesi, Finnland; St. Moritzer See, Schweiz; Baikalsee, Sibirien; Lake Mendota, Wisconsin, USA). Die saisonalen NAO-Indizes (horizontale Achse) beziehen sich jeweils auf 3 Monate (z.B. Januar bis März). Alle Korrelationen wurden über 50-jährige Zeitfenster (vertikale Achse) berechnet (z.B. 1871 bis 1920). Zur Vereinfachung der Darstellung wird nur der mittlere Monat der jeweiligen Saison bzw. das mittlere Jahr des jeweiligen Zeitfensters angegeben. Signifikante negative Korrelationskoeffizienten sind als blauer Bereich dargestellt. Das Konturintervall ist 0,1. Die dickere Linie, die den dunkelblauen Bereich bzw. den hellgrauen Bereich umrandet, stellen  $r = -0,3$  bzw.  $r = +0,3$  dar. Werte von  $r = \pm 0,28$  sind auf dem  $p = 0,05$  Niveau signifikant, Werte von  $r = \pm 0,36$  auf dem  $p = 0,01$  Niveau. Die vertikale Linie gibt das mittlere Auftaudatum des jeweiligen Sees an. Angepasst aus [3].

- [1] Hurrell J.W. (1995): Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science*, 269, 676–679.
- [2] Moses T., Kiladis G.N., Diaz H.F., Barry R.G. (1987): Characteristics and frequency of reversals in mean sea level pressure in the North Atlantic sector and their relationship to long-term temperature trends. *Journal of Climatology* 7, 13–30.
- [3] Livingstone D.M. (2000): Large-scale climatic forcing detected in historical observations of lake ice break-up. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung der Limnologie* 27, 2775–2783.
- [4] Livingstone D.M. (2000): Der grossskalige Einfluss der nordatlantischen Oszillation auf das Auftauen von Seen in der nördlichen Hemisphäre. *EAWAG Jahresbericht 1999*, Dübendorf, S. 39–40.
- [5] Livingstone D.M. (1999): Ice break-up on southern Lake Baikal and its relationship to local and regional air temperatures in Siberia and to the North Atlantic Oscillation. *Limnology and Oceanography* 44, 1486–1497.
- [6] Stralle D., Livingstone D.M., Weyhenmeyer G.A., George D.G. (2003): The response of freshwater ecosystems to climate variability associated with the North Atlantic Oscillation. In: *The North Atlantic Oscillation: Climate significance and environmental impact* (eds. J.W. Hurrell, Y. Kushnir, G. Ottersen and M. Visbeck). American Geophysical Union, Geophysical Monographs Series Volume 134, 263–279.