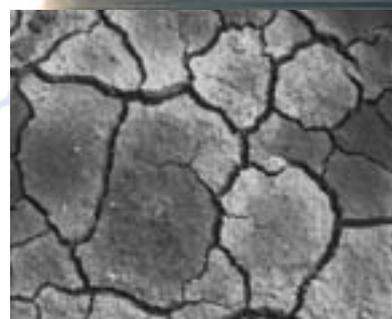
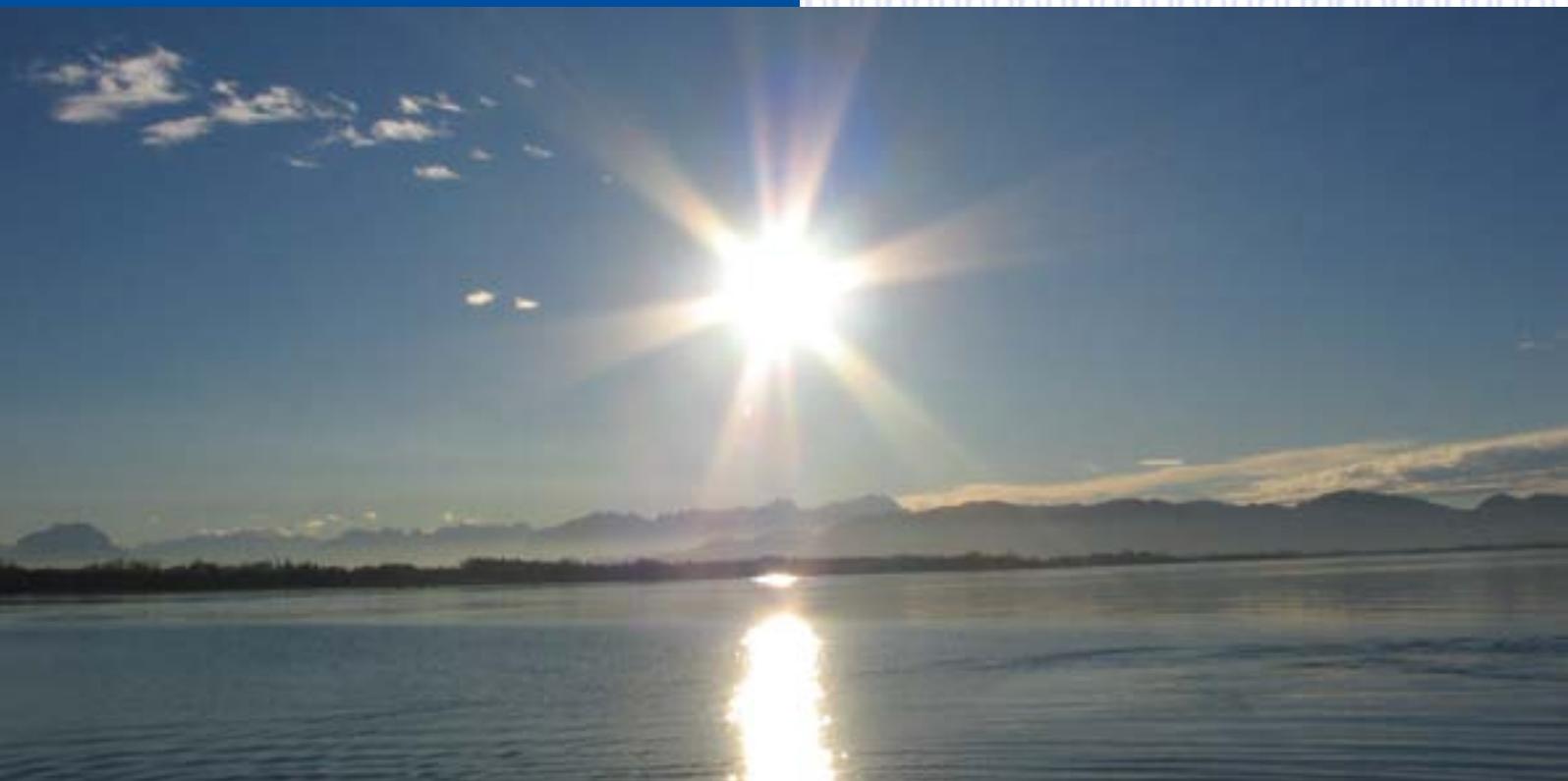




Internationale
Great Lakes Science and Policy
Commission für den Bodensee

Wie fit ist der Bodensee für den Klimawandel?

Das Interreg-IV-Forschungsprojekt
"Klimawandel am Bodensee"
(KlimBo) gibt Antworten





Das Klima ändert sich

Auf der ganzen Welt wandelt sich das Klima – auch am Bodensee. Am deutlichsten wird das, wenn man den Anstieg der globalen Temperaturen in den vergangenen Jahrzehnten verfolgt.

Das Jahr 2014 war weltweit das wärmste Jahr seit Beginn der meteorologischen Aufzeichnungen. Auch in den Bodenseeanrainerstaaten Deutschland, Österreich und der Schweiz wurde ein neuer Temperaturrekord verzeichnet. Am Bodensee sind die Folgen des Klimawandels ebenfalls unübersehbar. Gegenüber dem Zeitraum 1962 bis 1989 war das Oberflächenwasser in den Jahren von 1990 bis 2014 im Mittel um 0,9 °C wärmer (Abb.1). Folgen für den See sind bereits zu erkennen. So zeichnet sich zum Beispiel seit einigen Jahren ab, dass klimabedingte Änderungen im Schichtungs-

und Mischungsverhalten des Sees zu einer schlechteren Durchmischung der tieferen Wasserschichten führen und somit zu einem verminderten Nachschub an Sauerstoff. Vor dem Hintergrund dieses raschen Klimawandels stellt sich die Frage, welche Folgen die sich verändernden meteorologischen Gegebenheiten in Zukunft auf den Bodensee haben können. Erwartet wird, dass sich das hydrodynamische Verhalten des Sees und seiner Zuflüsse verändert und sich neue Lebensraumbedingungen für Tiere und Pflanzen ergeben, wovon vor allem neu eingewanderte Arten profitieren könnten.

"Klimawandel am Bodensee", kurz KlimBo: So heißt das Interreg-IV-Forschungsprojekt, das sich von 2011 bis 2015 den möglichen Folgen der klimatischen Veränderungen auf den See gewidmet hat.

In diesem Projekt haben Naturwissenschaftler, Ingenieure und Wasserversorger aus Deutschland und der Schweiz unter Federführung des Instituts für Seenforschung der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) zusammengearbeitet. Sie machten sich Gedanken darüber, wie sich die künftigen klimatischen und hydrologischen Entwicklungen im vorwiegend alpin geprägten Einzugsgebiet auf den See auswirken werden. Außerdem bewerteten Sie das Risiko klimatischer Einflüsse – beispielsweise extremer Niederschläge – auf die Trinkwasserversorgung. Mit Hilfe von Messkampagnen und Modellberechnungen wurden hydrodynamische Prozesse des Sees untersucht und der Einfluss des

Klimawandels auf die Wasseraustauschprozesse und die Wasserqualität abgeschätzt. Außerdem wurden die möglichen Folgen untersucht, die eine künftig verstärkte thermische Nutzung des Sees auf dieses sensible Ökosystem haben könnte. Dies ist wichtig, weil erneuerbare Energien, wozu auch Umweltwärme zählt, bei der Heizung und Klimatisierung von Gebäuden mit Hilfe von Wärmepumpen und Wärmetauschern eine immer größere Rolle spielen werden.

Unterstützt wurde das Projekt KlimBo vom interregionalen EU-Förderprogramm „Alpenrhein-Bodensee-Hochrhein“ sowie der Internationalen Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB).

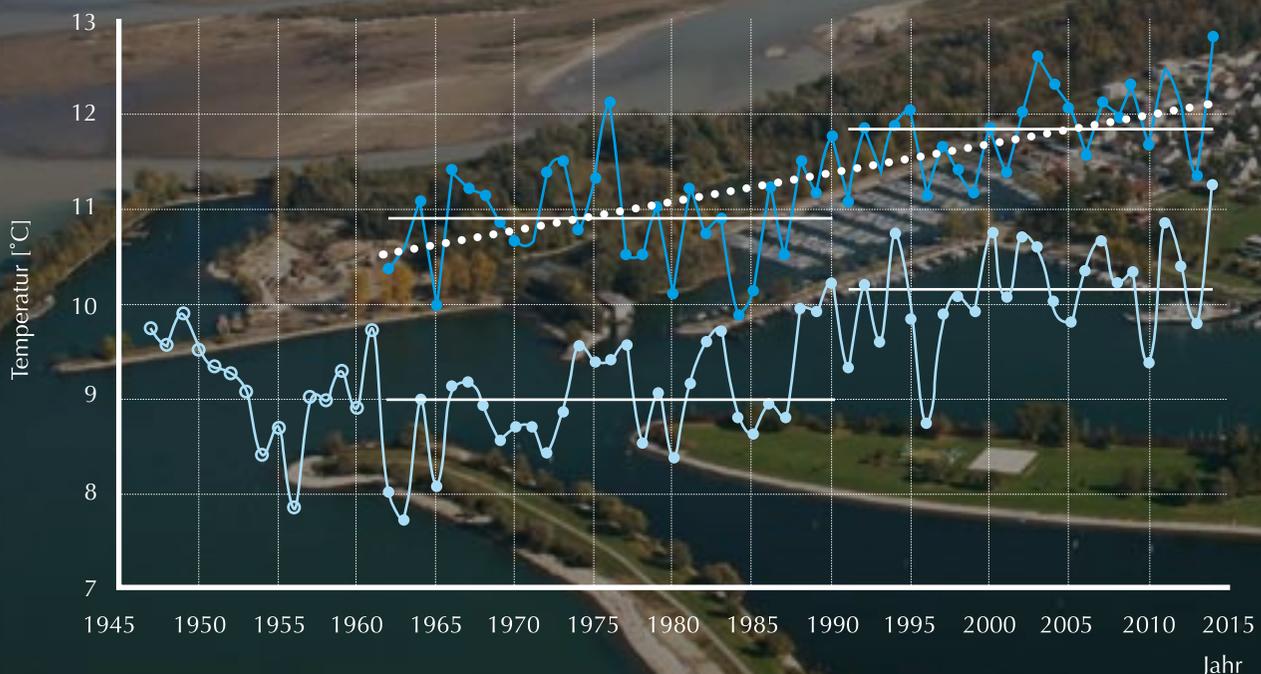


Abb. 1: Am Bodensee sind die Luft- wie auch die Wassertemperaturen an der Seeoberfläche in den vergangenen fünf Jahrzehnten deutlich gestiegen.

- Wassertemperatur bei Seemitte ~0,5 m Tiefe (i.d.R. 1-2 Messtermine pro Monat, Daten: ISF/LUBW)
- Lufttemperatur bei Konstanz (Daten DWD)
- Mittelwerte für Zeitperioden
- Linearer Trend der Wassertemperatur

An aerial photograph of a town situated on a lake, with mountains in the background. The town is densely packed with buildings, and the lake is filled with boats. The mountains are covered in green vegetation and snow. A blue rectangular box is overlaid on the right side of the image, containing the title text.

Das Forschungsprojekt "Klimawandel am Bodensee"



Das Klima und die Wasseraustauschvorgänge im See

Schweres Wasser sinkt in die Tiefe

Der wichtigste Prozess für die Erneuerung des Tiefenwassers ist die Abkühlung im Winterhalbjahr: Dann wird das sauerstoffreiche Wasser an der Oberfläche schwerer und sinkt nach unten.

Wasser ist bei vier Grad am schwersten. Deshalb sinkt während langer, kalter Perioden im Winter Wasser dieser Temperatur in Richtung Seeboden – wobei es von ganz alleine zu einer tief reichenden vertikalen Durchmischung kommt. Dieser Vorgang ist sehr wichtig für die Sauerstoffversorgung am Seegrund, wo das lebensnotwendige Gas beim mikrobiellen Abbau von pflanzlichen und tierischen Resten verbraucht wird (Abb. 3).

Die hierbei freigesetzten Nährstoffe werden wiederum durch die winterliche Durchmischung nach oben getragen, wo sie vom Phytoplankton genutzt werden. Ein wichtiges Ziel des Forschungsprojekts KlimBo war es, die Auswirkungen des Klimawandels auf die Durchmischung des Sees und den Austausch des Tiefenwassers zu klären. Zudem sollte abgeschätzt werden, welche Folgen dies auf das Ökosystem hat.

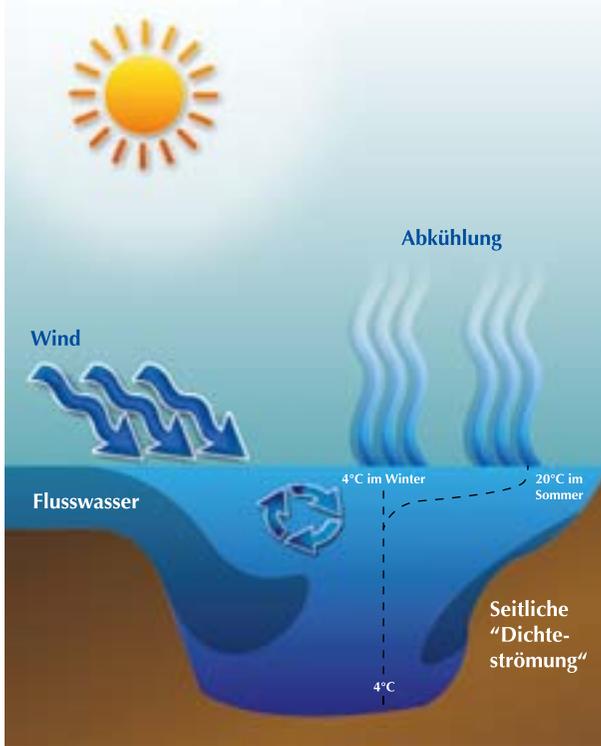


Abb. 2:

Durchmischungsprozesse im See. Im Bodensee bestimmen unterschiedliche Vorgänge, wie sich das Wasser zur Tiefe hin durchmischt und somit auch wann und wieviel Sauerstoff von der Oberfläche nach unten transportiert wird. Die Erwärmung des oberflächennahen Wassers im Frühjahr und Sommer führt zu einer Schichtung, die einen Austausch von Oberflächen- und Tiefenwasser weitgehend verhindert. Erst in den Wintermonaten, wenn sich die Temperaturen vertikal allmählich angleichen, verschwinden die Dichteunterschiede und es kommt zu einer mehr oder weniger starken Durchmischung bis in unterschiedliche Tiefen. Im besten Fall – vor allem bei guter winterlicher Auskühlung – erreicht sie die größte Tiefe in 254 Meter und tauscht das dort vorhandene Wasser durch sauerstoffreicheres Wasser von der Oberfläche aus. Auch der Wind trägt zur Durchmischung bei. Daneben können auch Flüsse frisches Wasser bis in größere Tiefen verfrachten. Außerdem spielen Flachwasserzonen und Buchten eine Rolle, wenn sie im Winter rascher auskühlen als das Freiwasser und hierbei schwereres Wasser bilden, das entlang des Seegrunds als Dichteströme in die tieferen Regionen des Sees fließt.

Abb. 3:

Gemessene Sauerstoffkonzentrationen in Seemitte.
(Quelle Messdaten: IGKB)

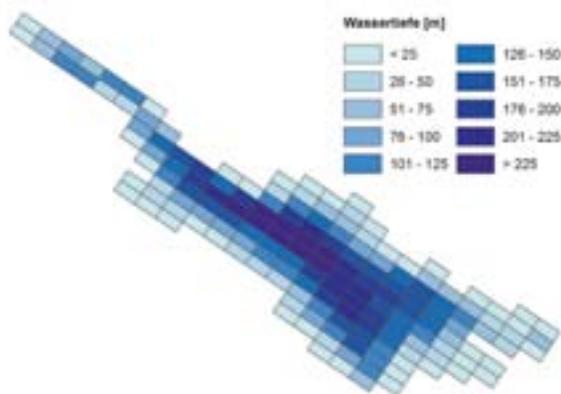
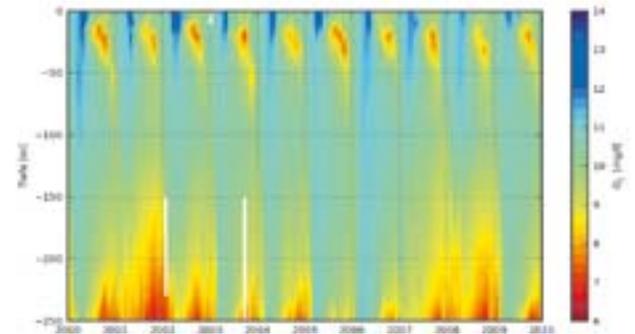


Abb. 4:

Dieses Modellnetz des Bodensees wurde für die Langzeitsimulationen verwendet. Die einzelnen Zellgrößen entsprechen einer Fläche von 1200 auf 2500 Meter. Vertikal wurde der See bei einer maximalen Tiefe von 254 Meter in 53 Tiefenschichten aufgeteilt. Das Modellgitter ist zwar relativ grob, aber ausreichend für die Beschreibung der thermischen Schichtung und der winterlichen vertikalen Durchmischung.

Szenarien: Wie wandelt sich der See bis 2085?

Um abschätzen zu können, wie sich die Temperaturen und die Durchmischung des Sees im Zuge des Klimawandels entwickeln, wurden in Modellen die Wassertemperaturen von 2010 bis 2085 simuliert.

Den Berechnungen wurden unterschiedliche Klimaszenarien sowie ein Modellgitternetz des Sees (Abb. 4) zugrunde gelegt. Dabei zeigt sich, dass der See bis zur größten Tiefe in 254 Meter immer wärmer wird (Abb. 5), wobei sich die oberen Schichten stärker erwärmen als das Tiefenwasser. Zudem lassen die Simulationen aufgrund der künftig milderen Winterhalbjahre und der damit verbundenen geringeren Auskühlung des Sees erwarten, dass eine gute Durchmischung des Sees bis in das Tiefenwasser seltener wird. Berechnungen zur Wasserqualität

des Sees zeigen, dass hierbei die Sauerstoffkonzentrationen im Tiefenwasser deutlich abnehmen und kritische Werte erreichen können. Sauerstoffmangel kann die Organismen am Seegrund schädigen, wie etwa die Eier der Blaufelchen (Abb. 6). In den Jahren mit mangelnder vertikaler Durchmischung reichert sich verstärkt Phosphat im Tiefenwasser an. Kommt es dann zu einer guten Durchmischung, ist mit höheren Phosphat-Konzentrationen in der Deckschicht und damit kurzzeitig mit einem verstärkten Phytoplankton-Wachstum zu rechnen.

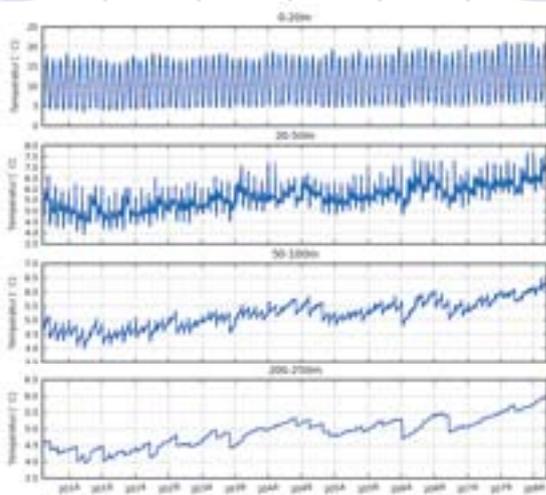


Abb. 5:

Berechnete Wassertemperaturen in Seemitte in verschiedenen Tiefenstufen. Zugrunde gelegt wurde ein als wahrscheinlich geltendes, mittleres Klimaszenario.



Abb. 6:

Die Eier der Blaufelchen im Bodensee entwickeln sich auf dem Seegrund in der Tiefe. Sie sind auf eine gute Sauerstoffversorgung angewiesen. Eine unzureichende Durchmischung des Tiefenwassers in Folge der klimatischen Erwärmung oder eine erhöhte Sauerstoffzehrung, welche die Folge erhöhter Nährstoffeinträge wäre, können zu Sauerstoffmangel führen und die Organismen am Seegrund schädigen.

Die Rolle des Windes

Auch der Wind trägt dazu bei, dass der See durchmischt wird und Sauerstoff in tiefere Regionen des Bodensees gelangt.

Warmes Wasser ist deutlich leichter als kaltes, weshalb im Sommer das leichte Oberflächenwasser sehr stabil über dem kälteren Wasser darunter liegt. Da können selbst kräftige Gewitterstürme nur oberflächlich das Wasser durchmischen. Wenn sich aber im Herbst und Winter die Temperaturen der oberen Wasserschichten an das kalte Tiefenwasser angleichen, reicht die Kraft des Windes bis in größere Tiefen (Abb. 2).

Allerdings spielt der Wind bei der Erneuerung des Tiefenwassers in der Regel nur eine unterstützende und keine dominierende Rolle. Ausnahmen sind aber möglich, nämlich dann, wenn in den Wintermonaten, in denen die Temperaturschichtung weitgehend abgebaut ist, viele oder heftige Stürme den See umwälzen.



Abb. 7:

Im Jahr 1999 fegte der Orkan "Lothar" über den Bodensee hinweg. Sturmleuchte in Friedrichshafen.

Der Klimawandel und die Bodenseezuflüsse

Die Zuflüsse spielen bei der Erneuerung des Tiefenwassers ebenfalls eine Rolle, weil sie sauerstoffreiches Wasser in den See transportieren – und dies teilweise bis in große Tiefen.

Modellrechnungen für das Beispiel der Mündung der Schussen veranschaulichen, wie sich kaltes Flusswasser im See zu einem absinkenden Strom aus dichtem und damit schwerem Wasser entwickelt, der sich am Seegrund ausbreitet (Abb. 9). Eine besondere Bedeutung kommt dem größten Zufluss zu, dem Alpenrhein. Hier haben Messungen und Modellsimulationen zu Hochwasserereignissen gezeigt, wie sich schwebstoffbeladenes Wasser des Rheins am Seegrund bis in große Tiefen ausbreitet (Abb. 10). Generell hängt die maximale Eindringtiefe von der Dichte des Fluss- und des Bodenseewassers ab. Diese wird vor allem durch die Schwebstoffe

und die Wassertemperaturen bestimmt. Wie bedeutsam ist nun dieser Beitrag des Rheins für den Tiefenwasseraustausch des Sees? Eine Analyse von Messdaten und Modellberechnungen ergab, dass das Rheinwasser nur selten, wie zum Beispiel im August 2005, bis zu den tiefsten Seeregionen in 254 Meter Tiefe vordringt. Der Beitrag zur Tiefenwassererneuerung ist insgesamt vergleichsweise gering. Wie der Klimawandel die Hochwässer des Alpenrheins in Zukunft verändern wird, ist noch sehr unsicher. Daher lässt sich der Einfluss des Klimawandels auf die Einschichtung des Rheins und dessen Beitrag zum Tiefenwasseraustausch nur schwer abschätzen.

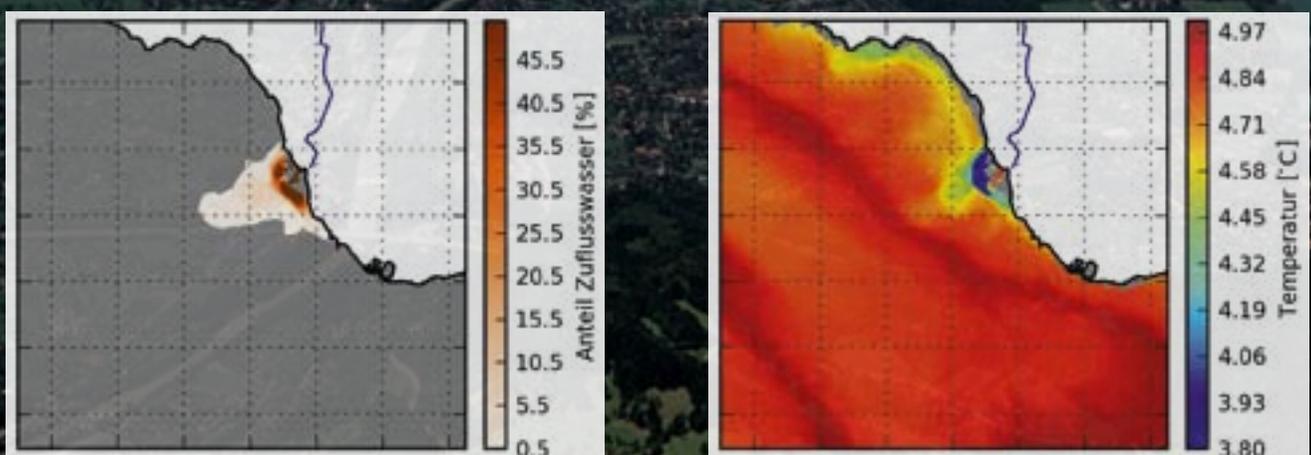


Abb. 9:

So breitete sich entsprechend einer Modellsimulation am 7. Februar 2009 um 20.00 Uhr das Wasser der Schussen im Bodensee aus. Deutlich ist vor der Mündung ein absinkender Dichtestrom zu erkennen. Dargestellt sind links der Anteil an Zuflusswasser und rechts die Wassertemperaturen am Seegrund.

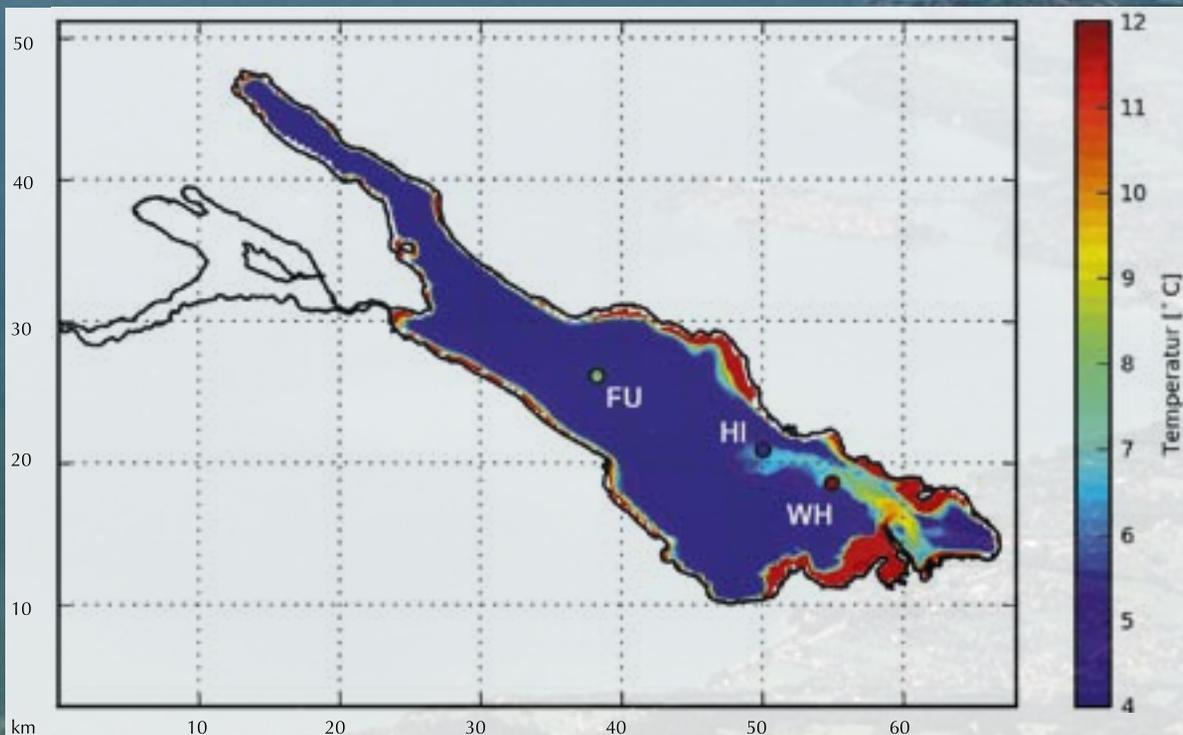


Abb. 10:

Im Juni 2012 flossen bei Hochwasser große Wassermengen aus dem Rhein in den Bodensee. Mit Hilfe von Temperaturmessungen an den Messstellen WH, HI und FU in unterschiedlichen Tiefen, ließ sich der Weg des wärmeren Rheinwassers im kälteren See verfolgen. In Übereinstimmung mit den Beobachtungen zeigen die hier dargestellten Ergebnisse einer Modellrechnung, wie sich das Rheinwasser am Seeboden ausbreitete. Dargestellt sind die Temperaturen am Seegrund. In den Flachwasserbereichen sind die Temperaturen erhöht, aber auch dort, wo sich der mit Schwebstoffen beladene Rhein entlang des Seegrundes ausbreitet. Man erkennt, wie der Rheinstrom zunächst hinter der in den See vorgebauten Mündung Richtung Lindau strömt und dann am Seegrund entlang nach Nordwesten und später nach Westen fließt. An der Messstelle HI verliert sich dann seine Temperaturspur.

Flachwasserzonen und Buchten: Was tragen sie zur Erneuerung des Tiefenwassers bei?

Zur Erneuerung des Tiefenwassers leisten auch kalte Dichteströme einen Beitrag.

Wenn sich Buchten und Flachwasserzonen in der kalten Jahreszeit schneller und stärker als der übrige See abkühlen, kann das etwa vier Grad kalte und damit schwere Wasser am Seegrund entlang Richtung Seemitte strömen (Abb. 2). Im Fachjargon wird dies Differential Cooling (unterschiedliches Abkühlen) genannt.

Die Modellberechnungen (Abb. 8) ergaben, dass dieser Prozess vor allem in mäßig kalten Zeiträumen wichtig ist. Damit wird dem Differential Cooling im Zuge des Klimawandels eine wachsende Bedeutung zukommen.

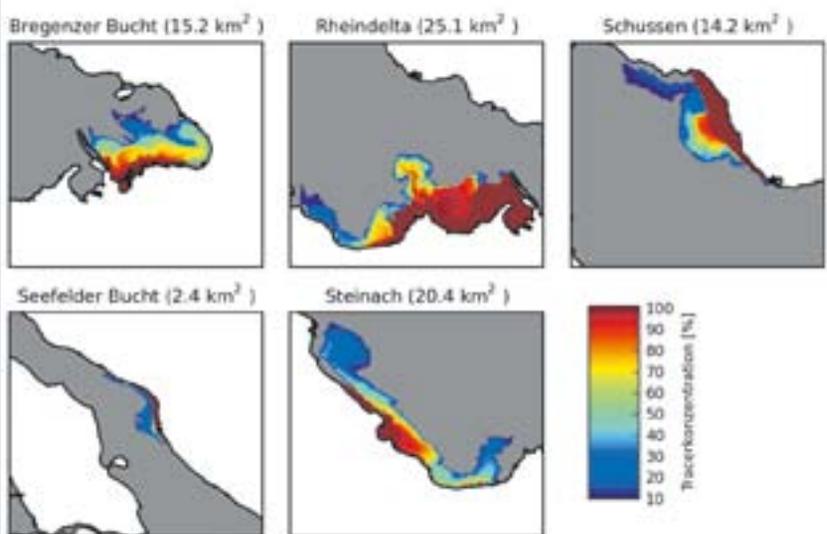


Abb. 8:

In dieser Abbildung wird für eine Wintersituation simuliert, wie sich bei einem in Zukunft wärmeren See Wasser aus Flachwasserzonen in größere Tiefen des Sees ausbreitet. Für die Rechnung wurde das Wasser in den Flachwasserbereichen mit einem fiktiven Markierungsstoff versetzt. Dieser vermischt sich bei der Ausbreitung allmählich mit dem Umgebungswasser und verdünnt sich dabei. Farblich dargestellt ist der Anteil des Wassers aus den flachen Seezonen nach fünf Tagen. Das abgekühlte Wasser aus den flachen Bereichen dringt teilweise recht weit in die tieferen Regionen des Sees vor. Dieser, durch die raschere Auskühlung der Randbereiche angetriebene Prozess, der Differential Cooling genannt wird, gewinnt bei wärmeren Seetemperaturen an Bedeutung. Vor dem Rheindelta begünstigen unterseeische Rinnen, die der Rhein in früheren Zeiten gebildet hat, ein Vordringen in größere Tiefen.

Modellierung von Transport- und Austauschprozessen im See

Im Projekt KlimBo wurden Modellsimulationen durchgeführt, die Ausbreitungs- und Durchmischungsvorgänge sowie Verweilzeiten im See mit Hilfe fiktiver Markierungsstoffe untersuchen.

Um zu überprüfen, wie gut Modelle die Wirklichkeit abbilden, sind reale Messungen erforderlich. Daher wurden im Rahmen des Projekts Messkampagnen zu einem geeigneten Spurenstoff durchgeführt. Die Wahl fiel dabei auf DMS (N,N-Dimethylsulfamid), das ein Abbauprodukt des inzwischen verbotenen Pflanzenschutzmittels Tolyfluanid ist. Neben regelmäßigen Messungen in 16 Zuflüssen, dem Abfluss bei Konstanz und zwei Tiefenprofilen in Seemitte und im Überlinger See, wurde eine Messkampagne in der Flachwasserzone durchgeführt. Auch ein Hochwasserereignis wurde erfasst. Die Messergebnisse zeigen, dass die Modellrechnungen meist recht gut die wirklichen Verhältnisse widerspiegeln.

Die so überprüften Modelle wurden für unterschiedliche Berechnungsszenarien angewandt. Diese zeigen auf, wie die Ausbreitungs- und Durchmischungsvorgänge im See von den meteorologischen und hydrologischen Verhältnissen abhängen.

Darüber hinaus lassen die DMS-Messungen generell Abschätzungen zu, wie schnell ein Spurenstoff aus dem See verschwindet, wenn der „Nachschub“ fehlt. Im Falle von DMS gingen die Konzentrationen zwischen 2008 bis 2014 kontinuierlich zurück (Abb. 11).

Im Untersuchungszeitraum von 2011 bis 2014 wurde etwa eine Tonne DMS aus dem See ausgetragen, wobei die Restbelastung des Sees im Jahr 2014 noch bei 1,75 Tonnen DMS lag.

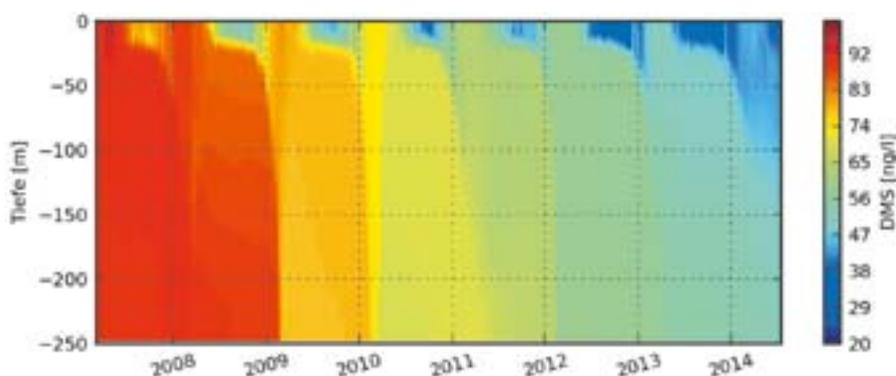


Abb. 11:

In dieser simulierten Grafik wird deutlich, wie die Konzentration des Spurenstoffs DMS zwischen 2008 und 2014 stetig gesunken ist. Berechnet wurde die Konzentrationsverteilung in der Seemitte.

Kann der Klimawandel in Zukunft die Trinkwasserversorgung aus dem Bodensee gefährden?

KlimBo ging im Rahmen einer Literaturstudie und einer Risikobewertung der Frage nach, welche Auswirkungen der Klimawandel auf die Trinkwasserversorgung haben wird.

Eine umfangreiche Abschätzung der möglichen Folgen der klimatischen Veränderungen lässt keine gravierenden Auswirkungen auf die Trinkwasserversorgung erkennen. Die zu erwartenden Wechselwirkungen und Prozessabläufe gleichen nämlich denen in der Vergangenheit – und damit haben die Wasserversorger bereits hinreichende Erfahrungen.

Sie können zum Beispiel mit den Folgen von Hochwasserereignissen, langen trockenen und heißen Perioden sowie Änderungen in der Wasserbeschaffenheit umgehen. Gleichwohl ist es wichtig, Anpassungsmaßnahmen an die sich verändernden klimatischen Bedingungen zu treffen, etwa im Hinblick auf die Hochwassersicherheit von Versorgungsanlagen.

Wie lässt sich der Bodensee thermisch nutzen?

Im Zuge des Klimawandels wird die Nutzung alternativer Energiequellen immer wichtiger. Der Bodensee kann hier einen wichtigen Beitrag leisten.

Um den Anstieg der bei der Verbrennung fossiler Energieträger entstehenden Treibhausgase zu bremsen, müssen zunehmend umweltfreundliche Techniken zur Erwärmung und Kühlung von Gebäuden eingesetzt werden. Hier kommt der im Bodensee gespeicherten thermischen Energie eine zunehmende Bedeutung zu. Diese kann im Winter mit Hilfe von Wärmepumpen zur Beheizung von Gebäuden genutzt werden und im Sommer über Wärmetauscher zu ihrer Kühlung. Dabei wird der See im Winter weiter abgekühlt und im Sommer zusätzlich erwärmt.

In Modellsimulationen wurde deshalb untersucht, wie sehr eine verstärkte thermische Nutzung des Bodensees die Temperaturen des Sees verändert. So wurde zum Beispiel simuliert, wie sich erwärmtes Kühlwasser in der näheren und weiteren Umgebung ausbreitet und das Temperaturfeld verändert (Abb. 12). Bei kleineren Seen, so ergab eine Literaturstudie, kommt die thermische Nutzung schnell an ihre ökologisch verträglichen Grenzen. Im Bodensee ist dagegen bei einer moderaten Nutzung von bis zu einem Gigawatt entnommener oder eingetragener Wärme nur mit sehr geringen Änderungen in den Temperaturverhältnissen zu rechnen. Im Vergleich hierzu ist der Energieeintrag der klimatischen Erwärmung, wie dieser bis zum Ende des Jahrhunderts erwartet wird, weitaus größer. Bei der thermischen Nutzung sind im konkreten Fall allerdings wichtige Vorgaben zur Entnahme und Rückgabe des genutzten Wassers zu beachten (Abb. 12), um negative Folgen für das Ökosystem auszuschließen oder weitestgehend zu minimieren.

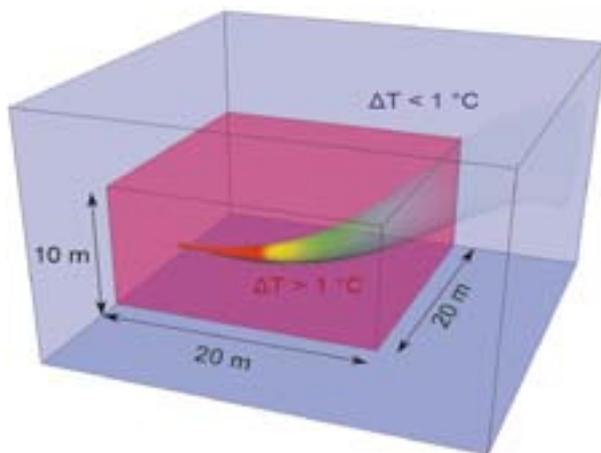


Abb. 12:

Wenn thermisch genutztes Wasser erwärmt oder abgekühlt in den See zurückgegeben wird, dann kommt es zu einer räumlichen Mischungszone. Die Rückgabe sollte so erfolgen, dass bestimmte Grenzwerte nicht überschritten werden: Außerhalb eines Volumens mit einer Grundfläche von 20 auf 20 Metern und einer Höhe von 10 Metern sollte die Temperaturänderung unter $1\text{ }^\circ\text{C}$ liegen.



Abb. 13:

Der Bodensee speichert große Mengen an Wärme.
Im Herbst macht der dampfende See dies oftmals eindrücklich sichtbar.

Impressum

Herausgeber Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB)

Bearbeitung Institut für Seenforschung (ISF)
der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz
Baden-Württemberg (LUBW) und Klaus Zintz

Stand Mai 2015

Layout Lorth Gessler Mittelstaedt GmbH, Konstanz, www.LGM.info

Bildnachweis LUBW, istock, fotolia, Lorth Gessler Mittelstaedt, Manfred Grohe,
Gerhard Kersting und Ulrich Schmid.

Bodensee-Daten

Seebecken:

bestehend aus Obersee und Untersee

Meereshöhe ü. NN : 395 m

Oberfläche gesamt : 536 km²

Obersee : 473 km²

Untersee : 63 km²

tiefste Stelle : 254 m

Rauminhalt : 48 km³

Uferlänge : 273 km

größte Länge : 63 km

größte Breite : 14 km

Uferlängen:

	in km	in %
insgesamt	273	100
Baden-Württemberg	155	57
Bayern	18	7
Österreich	28	10
Schweiz	72	26

Der Bodensee ist nach dem Plattensee und dem Genfersee der drittgrößte See in Mitteleuropa



EUROPÄISCHE UNION
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra



interreg IV
Alpenrhein | Bodensee | Hochrhein



Internationale
Gewässerschutzkommission
für den Bodensee

Weitere Informationen zur IGKB und zum Projekt KlimBo finden sie unter :

www.igkb.org