

**Exploring the 600'000 year old sedimentary record
of Lake Van (Turkey):**

**Lithostratigraphy, chronology and hydroclimatic
reconstruction**

A dissertation submitted to the
ETH ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by
MONA STOCKHECKE
MSc in Geography, University of Zurich

born 11 October 1983
citizen of Germany

accepted by the recommendation of
Prof. Dr. Flavio S. Anselmetti, University of Bern, examiner
Prof. Dr. Gerald Haug, ETH Zurich, co-examiner
Dr. Michael Sturm, Eawag Dübendorf, co-examiner
Prof. Dr. Thomas C. Johnson, University of Minnesota, Duluth, co-examiner

Summary

This thesis presents the lithostratigraphic and chronological framework of the 600'000 year old sedimentary sequence of the Lake Van (Turkey) and describes the lake's evolution from its initial fresh water state until its present state as greatest soda lake worldwide experiencing orbital- and millennial-scale climate change, along with tectonic and volcanic activity of catastrophic dimensions. The sedimentary sequence was recovered during 10 weeks of drilling at two sites ('Ahlat Ridge' in 360 m water depth, 'Northern Basin' in 175 m water depth) within the International Continental Scientific Drilling Program (ICDP) project PALEOVAN in summer 2010.

The sedimentary sequence of Lake Van extends back to the middle Pleistocene. The 219-m and 145-m long sedimentary sequences at the Ahlat Ridge and Northern Basin sites, respectively, contain i. six lacustrine lithotypes, which reflect different depositional conditions; ii. event deposits, such as volcanoclastics (~300 layers) and graded beds (~375 layers); and iii. fluvial gravels.

The deposition of the fluvial gravels and overlaying diatomaceous mud represent a fresh-water environment upon the initial flooding before ~600 ka, which contrasts to the saline lake of today. It lasted for at least ~100 ka. The first varves appear at the onset of the interglacial MIS 11. At that time, an environment similar to today's was established (e. g., strong seasonality, deep lake, anoxic bottom water, autochthonous calcite precipitation).

At ~413 ka a major catastrophic event, likely related to tectonic activity, occurred in Lake Van and caused the deformation of a 20-m-thick sediment succession covering all the deeper lake areas. The overthrust and deformed sediments cover the interval from ~413 to ~480 (MIS 11 and MIS 12) and include the first occurrence of varves. Several major volcanic events left volcanoclastic layers up to 10 meter thick on the lake's floor. Likely, the most dramatic one of those events occurred ~260 ka. Volcanic activity goes back to at least 513 ka.

Over the last five glacial-interglacial cycles, the lake responded in a systematic pattern to climate change: The varved clayey silts reflect rising lake levels and lake high stands during warm/wet interglacials. The banded, massive and mottled (bioturbated) lithotypes mark lake-level lowering or low stands during cold/dry glacials. Cold-to-warm transitions are characterized by accumulation of event deposits, likely caused by heavy rainfall and increased runoff. These beds intercalate with laminated background sediment. Warm-to-cold transitions are marked with sharp lithological contrasts and abrupt disappearance of laminations, reflecting lake-level decreases and water-column ventilation.

The recurring lithological patterns reflect major lake-level fluctuations and express variations in the hydroclimate and net water balance of the lake system. Regional hydrologic changes depend on storm tracks and precipitation patterns, which are ultimately controlled by orbital-cycles or shorter-term climate variability. However, during

the major interstadials, the lake likely rose over its threshold and experienced an overflow. Even during periods of low lake levels, the Ahlat Ridge drill site location was never exposed. Before 350 ka, the lake levels could have been below 360 m water depth (compared to today) without exposing the drill site, as the ridge likely was not formed at that time.

Multiple chronostratigraphic methods were used to precisely date the two composite profiles of the ICDP sites. Key-proxy curves from the 174-m long event-corrected composite Ahlat Ridge were climatostratigraphically aligned to the GICC05-based NGRIP isotopic record (0-116 ka BP), to the speleothem-based (116-400 ka BP) time series, and to the EDC3-based (400-600 ka BP) synthetic Greenland record. Absolute age control (five AMS- ^{14}C on terrestrial macroremains and nine argon-argon ages) together with the relative paleomagnetic intensities of the Lake Van record, confirm the correct identification of the marine stages and substages. The chronology of the 600 ka long Ahlat Ridge record was stratigraphically transferred to the 79 m long event-corrected composite record from the proximal Northern Basin, the latter covering ~ 90 ka BP. The lowermost part of the Northern Basin record contains several meter-thick mass-movement deposits. Associated turbidity plumes were transported over wide areas and eventually deposited as thin clay caps at the distal Ahlat Ridge.

The complete succession of Greenland Dansgaard-Oeschger (DO) events recognized in the last glacial in Greenland, are preserved as brown laminated, beige banded and grey mottled-bioturbated clayey silts in the Lake Van record. Millennial-scale humid conditions over Turkey during interstadials correspond to substantial warmings over Greenland, a northward shift of the Intertropical Convergence Zone, and an increase of monsoon rainfall over the Arabian Sea and in China. The lithological successions and the high-resolution time series of the sediment color capture the hydroclimate variability of each DO event in a three-step structure. Lake Van did not record a considerable difference between Heinrich and non-Heinrich stadials, owing to saturation effects, and complete drying over Turkey.

Hydroclimatic reconstructions and model simulations revealed that interstadial precipitation changes in Turkey are mainly caused by convergence of southwesterly wind anomalies, due to a weakened subtropical high. The wind anomalies over Turkey and North Africa during the last glacial follow the Atlantic Meridional Ocean Circulation variability. Four different Atlantic Meridional Ocean Circulation levels that characterize millennial-scale DO/Heinrich variability during the last glacial were distinguished. Three of them are consistently recorded in the Lake Van sediments. Transitions between the different levels typically occurred within a century or less and were likely coupled to glacial ice-sheet dynamics and fresh-water supply to the North Atlantic. Thus, the Lake Van record provides unprecedented insights into the time variability of the AMOC and, generally, a superb opportunity to study glacial-interglacial as well as shorter-term climate variability over more than half a million years.

Zusammenfassung

Diese Arbeit beschreibt, wie der weltweit grösste Sodasee in Ostanatolien vor mehr als einer halben Million Jahren als Frischwassersee entstand und wie das Seesystem während der letzten fünf glazialen/interglazialen Zyklen massiven Seespiegelschwankungen unterworfen war und mehrfach durch katastrophale Ereignisse (Vulkanismus und Erdbeben) erschüttert wurde. Das lithostratigraphische Profil und dessen Datierung sowie umweltsensitive Proxy-Zeitreihen belegen die vollständige Sedimentationsgeschichte eines einzigartigen terrestrischen Klima- und Umweltarchives.

Während einer zehnwöchigen Bohrkampagne im Sommer 2010 wurden im Rahmen des internationalen Tiefbohrprojekts PALEOVAN (International Continental Scientific Drilling Program; ICDP) in Wassertiefen von bis zu 360 m Sedimentkerne an zwei Bohrlokalitäten geborgen und von einer internationalen Forschergruppe aufgearbeitet. Es gelang, von der Bohrstelle 'Ahlat Ridge' ein 219 m und von der Bohrstelle 'Northern Basin' ein 145 m langes Sedimentprofil fast lückenlos zusammenzusetzen.

Die Sedimentprofile sind von sechs verschiedenen Sedimenttypen, die jeweils unterschiedliche Sedimentationsbedingungen widerspiegeln, unterschiedlichen Ereignislagen (~ 300 vulkanische Bims- und Aschelagen, ~ 375 gradierte Lagen) und fluvialen Kiesen charakterisiert. Fluviale Kiese markieren die Seentstehung als Flachwassersee um $\sim 600'000$ ka. Es folgte eine $\sim 100'000$ Jahre lange Frischwasserperiode mit hoher Produktivität und Kieselalgendominanz. Umweltbedingungen, wie sie heutzutage anzutreffen sind, traten das erste Mal vor mehr als $\sim 400'000$ Jahren auf (gevarvte Sedimente). Vor $\sim 413'000$ Jahren wurde ein 20 Meter mächtiges Sedimentpaket durch tektonische Prozesse mehrfach umgelagert und verformt. Über das ganze Profil spiegeln dutzende Mikrodeformationen vergangene Erdbeben wider. Die bis zu 10 Meter mächtigen vulkanischen Ablagerungen auf dem Seegrund weisen auf dramatische Bedingungen hin. Vulkanische Aktivität geht mindestens bis $\sim 513'000$ Jahre zurück. Datierte Extremereignisse durch tektonische und vulkanische Aktivität führten somit wiederholt zu katastrophalen Bedingungen in Ostanatolien.

Sedimentabfolgen der letzten fünf glazialen/interglazialen Zyklen sind trotz der Extremereignisse fast kontinuierlich erhalten und durch die Wiederholung von lithologisch ähnlichen Abfolgen charakterisiert. Die gevarvten, tonigen Silte (ansteigender Seespiegel während feuchter Warmzeiten) stehen gebänderten, massiven und gefleckten tonigen Silten (fallender oder tiefer Seespiegel während der ariden Glaziale) gegenüber. Die Übergänge zwischen Kalt- und Warmzeiten sind durch Wechselagerungen von gevarvten und gradierten Ereignislagen gekennzeichnet. Die Akkumulation von Ereignislagen wird Starkniederschlägen und erhöhten Abflussraten während der Deglaziationen zugeschrieben. Die Übergänge zwischen Warm- und Kaltzeiten sind durch scharfe lithologische Kontraste geprägt und dokumentieren abrupte Rückgänge des Seespiegels. Die systematischen Seespiegelschwankungen im Vansee folgen glazialen/interglazialen Zyklen und spiegeln die hydroklimatischen Veränderungen in den europäischen/asiatischen mittleren Breiten wider. Während der

interglazialen Hochstände stieg der Seespiegel so stark an, dass es wahrscheinlich zum Überlauf kam. Es wurden keinerlei Hinweise gefunden, dass die Bohrlokalisierung am Ahlat Ridge während der glazialen Tiefstände trocken gefallen ist. Da die Erhöhung am Seegrund (Ahlat Ridge) jedoch erst vor ungefähr 350'000 Jahren kontinuierlich entstand, kann ein Seespiegel unter 360 m (im Vergleich zu der heutigen Wasseroberfläche) vor 350'000 Jahren nicht ausgeschlossen werden.

Mittels verschiedener Datierungsmethoden konnten die See- und Klimageschichte sowie die vulkanischen und tektonische Ereignisse robust und genau datiert werden. Paläoklima-indikatoren der Vanseesedimente wurden mit der Chronologie von Grönland Eisbohrkernen (NGRIP sowie einer synthetisierten Grönland Abfolge) hochaufgelöst synchronisiert. Absolute Datierungen (fünf AMS- ^{14}C Alter von terrestrischen Makroresten und neun $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Alter von Tephren) und paleomagnetische Daten bestätigen die erstellte Chronologie. Die Chronologie des Ahlat Ridge Profils wurde mittels stratigraphischer Korrelation zu dem Profil der zweiten Bohrlokalisierung Northern Basin, welche die letzten 90'000 Jahre umfasst, übertragen.

Die Vanseesedimente der letzten Eiszeit sind geprägt von sich wiederholenden Abfolgen von braunen, gevarvten, beige gebänderten und grau gefleckten, bioturbierten Lithologien. Die hochaufgelösten Zeitreihen der Sedimentfarbe spiegeln die Anstiege der Seespiegel wider – synchron dazu sind die in Grönland beobachteten abrupten Temperaturanstiege, den in China beobachteten Anstiege der monsunalen Regefälle sowie die in den Tropen dokumentierten Nordwärts-Verschiebung der intertropischen Konvergenzzone während der Dansgaard-Oeschger (DO) Interstadiale.

Ein Vergleich der Muster von hochaufgelösten Niederschlags- oder Temperaturrekonstruktionen von den Tropen und den hohen Breiten zeigt auf, dass die verschiedenen Klimazonen unterschiedlich sensitiv je nach Zeitpunkt auf die kurzfristigen Veränderungen im Nordatlantik reagierten. Die Rekonstruktion und Modellsimulationen der hydroklimatischen Bedingungen in der Türkei weisen zwei bisher unbekannte Charakteristiken auf: 1. Die DO Oszillationen sind von einer abrupten Niederschlagszunahme während der Interstadiale und von zwei abrupten Niederschlagsabnahmen während der Interstadialen/Stadialen-Übergänge innerhalb weniger Jahrzehnte gekennzeichnet. 2. Es sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Heinrich-Stadialen und den Stadialen ohne Heinrich-Ereignisse festzustellen.

Diese zwei Charakteristiken stimmen mit den simulierten Niederschlagsanomalien für die Türkei sowie Nordafrika und den Nahen Osten überein und lassen sich auf südwestliche Windanomalien durch eine Abschwächung der subtropischen Hochdruckzone während der Interstadiale zurückführen. Die rekonstruierten und modellierten charakteristischen hydroklimatischen Bedingungen der semi-ariden/ariden Regionen spiegeln sich in drei Stufen der atlantischen meridionalen Overturningzirkulation wider und erlauben postulierte physikalische Mechanismen der DO Oszillationen zu evaluieren. Die stärkste Reduktion während der Heinrich-Ereignisse ist in den semi-ariden Regionen nicht nachweisbar. Letzteres erklärt sich durch die abnehmende Sensitivität arider Regionen bei zunehmender Trockenheit. Die Sedimentabfolge vom Vansee offenbart somit neue Erkenntnisse hinsichtlich der abrupten Klimaveränderungen des letzten Glazials. Folglich bietet das Archiv ausgezeichnete Möglichkeiten, um Umweltveränderungen über glaziale/interglaziale Zyklen sowie die kurzfristige Klimavariabilität über mehrere glaziale/interglaziale Zyklen zu untersuchen.