

Oskar Keller

DIE GEOLOGISCHE GESCHICHTE DES BODENSEES

KURZFASSUNG

Der heutige Bodensee ist im Zusammenhang mit dem Abschmelzen der Eiszeitgletscher entstanden. Vor 24 000 Jahren, im Maximum der letzten Eiszeit, erfüllte der bis 1200 m mächtige Rhein-Vorlandgletscher den gesamten Bodenseeraum zwischen Isny und Schaffhausen. Im Bodenseegebiet und im Rheintal schürfte der Gletscher den Felsboden bis unter den Meeresspiegel aus, fortsetzend, was die Eisströme früherer Eiszeiten begonnen hatten.

Während dem ersten bedeutenden Rückschmelz-Stadial von Stein am Rhein vor 19 000 Jahren entstand in einem eisfrei gewordenen Zungenbecken bei Hemishofen als kleiner Zungenbeckensee der Ur-Bodensee. Dem weiter zurückweichenden Rheingletscher folgte in direktem Kontakt der laufend ausgedehnter werdende See. Ein weiterer bedeutender Rückschmelzhalt stellte sich vor 18 000 Jahren bei Konstanz ein. Hier sind die Frontmoränen und ihr Vorfeld für die Seeteilung in Obersee und Untersee verantwortlich.

Im Obersee und anschliessend im Rheintal erfolgte das Abschmelzen sehr rasch. Um 16 500 v.h. war das Alpenrheintal bis Reichenau westlich Chur eisfrei und wurde vom Bodensee eingenommen. Dieser erreichte damit seine grösste Ausdehnung mit mehr als der doppelten Fläche gegenüber heute.

Von den abtauenden Gletschern hinterlassener Schutt wurde von den Fliessgewässern in gewaltigen Mengen in den Riesensee verfrachtet, insbesondere weil damals eine vor Erosion schützende Vegetationsdecke noch weitgehend fehlte. Bereits um 16 000 trennte der Ill-Schuttfächer einen Rheintalsee vom Bodensee ab. Ähnliches vollbrachten Landquart und Seez kurz danach, sodass sich um 15 000 eine Phase mit vier Seen im Rheintal-Seezgebiet einstellte: Bodensee, Rheintalsee, Churer See, Walensee. Die Rheintalseen wurden bis 8000 v.h. vollständig zugeschüttet. Einzig der Walensee überdauerte dank grosser Tiefe bis heute sowie, nicht zu vergessen, der Bodensee.

Bis zur Römerzeit hatte sich die Rheintalebene bis Rheineck (Ad Rhenum) – Höchst – Bregenz (Brigantium) vorgeschoben. Seither entstanden zuerst das Rohrspitz-

Delta, ab 900 n.Chr. dasjenige des Rheinspitz bei Altenrhein. Der im Jahr 1900 mit dem Fussacher Durchstich direkt in den Bodensee geleitete Rhein begann umgehend in der untiefen Bucht ein neues Delta zu bilden. Um die Verlandung zu verhindern, wurden die Rheindämme um die jüngste Jahrhundertwende bis zum Abfall in das tiefe, zentrale Seebecken vorgebaut.

Trotzdem geht die Zuschüttung des Bodensees unaufhaltsam weiter. Gemäss groben Berechnungen dauert es mindestens 40 000 Jahre bis der Obersee bis Konstanz verfüllt sein wird. Zudem muss parallel zur Aufschüttung das gesamte Rheintal um rund 70 m aufgelandet werden, damit der Rhein bis Konstanz fließen kann.

Die Schlussgedanken zur Zukunft des Bodensees betreffen zwei gegensätzliche Visionen:

1. Es geht gemäss der Periodizität der Eiszeiten einer nächsten Grossvergletscherung entgegen. In diesem Fall wird der Bodensee durch den Rhein-Vorlandgletscher ausgelöscht.

2. Umgekehrt wird bei weiterer Klimaerwärmung um prognostizierte 4 °C keine Eiszeit mehr eintreten, was dann zur vollständigen Verfüllung des Bodensees führen wird.

1 EINLEITUNG

UNSERE REGION OHNE BODENSEE, NICHT AUSZUDENKEN!

Er ist das einzigartige Kernstück einer ausgedehnten Landschaft, die von allen Seiten auf ihn ausgerichtet ist. Das zeigen etwa bedeutende, in den See mündende Flüsse, aber auch zu ihm führende breite Talungen. Seine Ufer säumen viele, teils grosse Siedlungen. Als mächtiges stehendes Gewässer ist er ein wichtiges Wasserreservoir für die Versorgung der Bevölkerung in weitem Umkreis. Er ist ein von zahlreichen Schiffslinien erschlossener See und ein zentraler Anziehungsraum für Tourismus, für Freizeit-Aktivitäten und für Naherholung. Kurz, der Bodensee ist in jeder Beziehung das Herz einer von ihm nachhaltig beeinflussten Region. Berechtigt ist daher sehr wohl die Frage nach seiner Geschichte, seiner Herkunft und seiner Zukunft.

Beeindruckt durch seine Ausstrahlungskraft haben sich seit über 100 Jahren Erdwissenschaftler immer wieder mit seiner geologischen Vergangenheit auseinander gesetzt. Treffend hat Georg Wagner (WAGNER 1962) als Geologe, als Lehrer und als Forscher den Bodensee beschrieben: »Man sucht dort Erholung, freut sich an seiner Schönheit und bewundert das Farbenspiel seiner Wasserfläche. Aber nur wenige [...] sehen in ihm etwas Gewordenes und sich Wandelndes, erkennen, dass auch er eine Geschichte hat, die nur in anderen Zeitmassen verläuft als die der Menschen. [...] Es ist daher eine reizvolle Aufgabe für den Geologen [...] aus zuverlässigen Beobachtungen und mit kritisch gezügelter Fantasie seinen Werdegang zu erfassen.« (Abb. 1).



Abb. 1: Der Bodensee beeindruckt uns Menschen immer wieder durch seine grosse Weite, seine vielgestaltigen Küsten, durch das Wellenspiel seines Wassers und die oft wechselnden Stimmungen.
Foto: O. Keller

Die Worte Wagners im Gedächtnis behaltend wird unter Einbezug jüngster Erkenntnisse die geologische Geschichte des Bodensees geschildert, erklärt und begründet. Der See ist untrennbar mit der letzten Eiszeit verknüpft. Zwar existierte höchst wahrscheinlich schon davor ein Bodensee (KELLER 1994), aber die Gletscher der jüngsten Eiszeit haben ihn mit ihren Eismassen überfahren und ausgelöscht. Erst mit dem Abschmelzen der letzteiszeitlichen Gletscher konnte der heutige Bodensee entstehen.

Zahlreiche in den Text eingefügte Daten dienen einerseits der zeitlichen Fixierung der Entwicklungsprozesse und andererseits helfen sie dem Leser, sich ein Bild über die Zeiträume des Geschehens zu machen. Die Zeitangaben basieren grösstenteils auf ^{14}C -Altersbestimmungen an organischem Material. Sie sind kalibriert angegeben, das heisst auf konventionelle Kalenderjahre umgerechnet.

2 DIE EISÜBERFLUTUNG DES BODENSEERAUMS IN DER LETZTEN EISZEIT

Vor 30 000 Jahren war die letzte Eiszeit »Würm« schon mehr als 50 000 Jahre im Gange, wies aber im mittleren Abschnitt eine klimagünstigere Periode auf, das sogenannte Mittelwürm-Interstadial (Abb. 2). Das Innere der Alpen war auch damals in Höhenlagen weitgehend vergletschert. Der Rheingletscher dürfte westlich Chur bei Domat-Ems gestirnt haben (KELLER & KRAYSS 1991, 1993, 2005). Die Alpenrandgebirge, wie Alpstein (Säntisgebirge), Churfirten und Bregenzerwaldberge trugen selbständige Eiskappen. Die Voralpen und das Mittelland hingegen waren eisfrei, wobei auch an das kühle Klima angepasste Wälder, vor allem Nadelwälder, aufkommen konnten.

Ab etwa 30 000 Jahre vor heute setzte bei hocheiszeitlich werdendem Klima der gewaltige Vormarsch der Alpengletscher ein (Abb. 3). Die Front des Rheingletschers war um 28 000 Jahre v.h. bereits bis ins untere Rheintal vorgerückt und begann sich über das Becken des späteren Bodensee-Obersee auszubreiten. Schliesslich erreichte das Eis um 24 000 v.h. seine Maximalausdehnung, bei der es sich von Isny über Schussenried und Schaffhausen bis Winterthur erstreckte (Abb. 4). Wie eine Halbellipse breitete sich der Vorlandgletscher über das gesamte Bodenseebecken aus; alles versank unter einem bis 1200 m mächtigen Eispanzer. Im Toggenburg, im Appenzellerland und im Bregenzerwald entwickelte sich eine durchgehende Eisdecke, vor allem aufgebaut durch lokale Gletscher aus den Alpenrandgebirgen (Abb. 5).

Dieser Bodensee-Vorlandgletscher bedeckte inklusive Randalpen eine Fläche von rund 8 000 km², was $\frac{1}{5}$ der Fläche der Schweiz entspricht. Er war damit nebst dem Rhone-Gletscher der ausgedehnteste Vorlandgletscher der Alpen. Im mittleren Rheintal

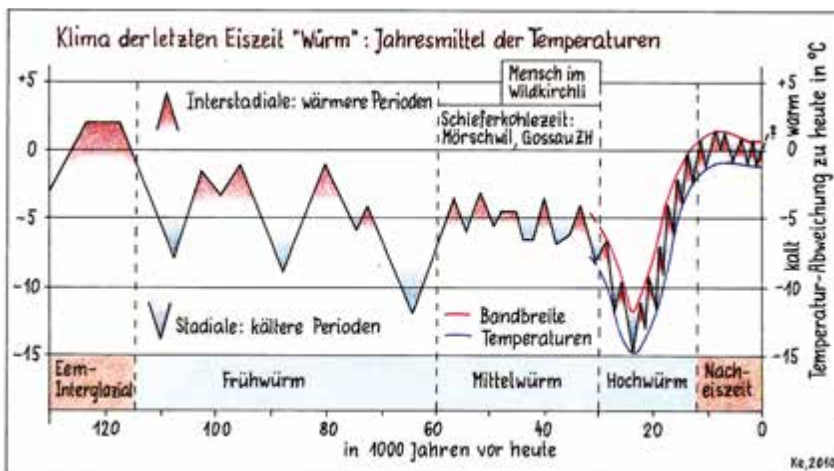


Abb. 2: Das Klima der letzten Eiszeit ist durch das Auf und Ab des Temperaturverlaufs charakterisiert. Eine erste glaziale Kälteperiode stellte sich vor gut 60 000 Jahren ein. Nach einer mitteleiszeitlichen Erholungsphase fielen die Temperaturen auf rund 15° C tiefere Mittelwerte gegenüber heute. Danach erreichte das Klima in nur etwas mehr als 10 000 Jahren nacheiszeitliche Wärme.



Abb. 3: Eine Reihe 14C-Daten ermöglicht die Rekonstruktion des Vorstosses und das Abschmelzen der eiszeitlichen Vergletscherung. In der geologisch kurzen Zeit von 12½ Jahrtausenden sind die riesigen Eismassen auf- und wieder abgebaut worden.

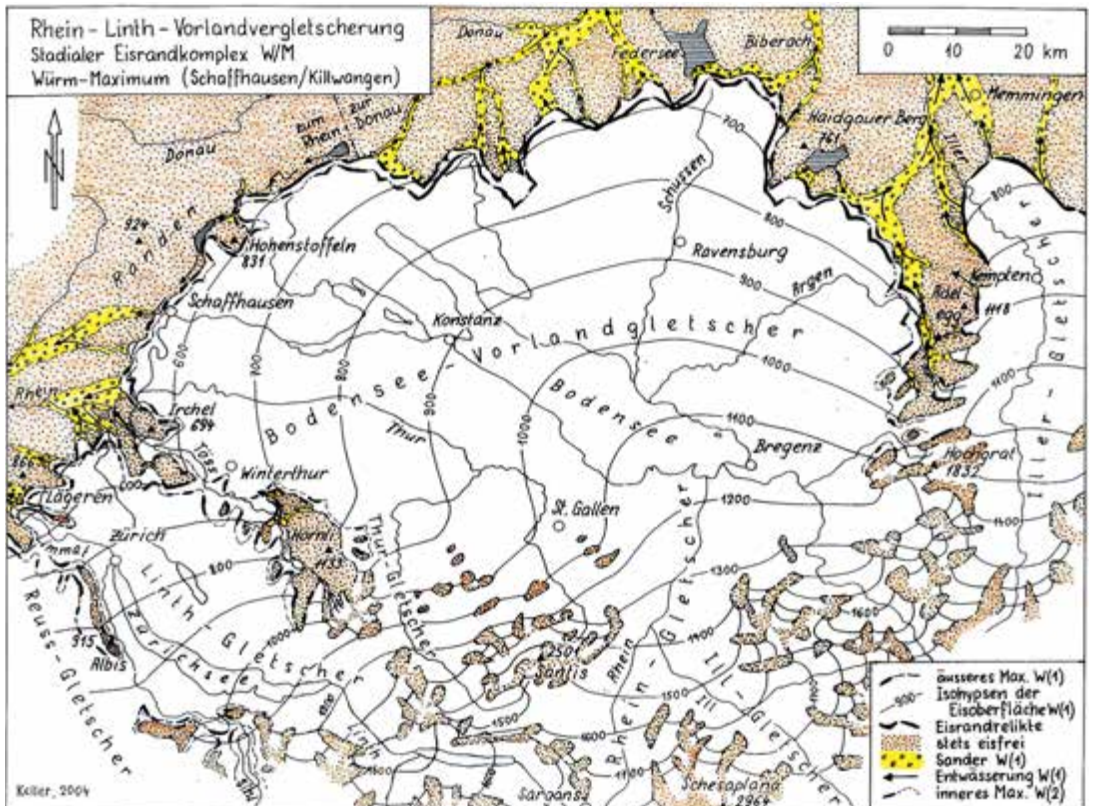


Abb. 4: Während der maximalen Vergletscherung vor 24 000 Jahren breitete sich der Vorlandgletscher bis Schaffhausen und bis gegen die Donau aus. Über dem oberen Bodensee stieg die Eisoberfläche bis auf 1100 m ü. M. an. Selbst der Pfänder und der Rorschacherberg versanken unter dem Eispanzer. Rhein- und Illgletscher waren die Haupteisströme aus den Alpen heraus.



Abb. 5: Im Alpeninneren und in den Randgebirgen ragten nur die höchsten Felskämme als Nunatakker (Eisinseln) aus dem alles überziehenden Eisstromnetz heraus. Dieses Bild aus Grönland vermittelt einen Eindruck, wie es in der letzten Eiszeit im Alpenraum aussah. Foto: Archiv O. Keller

im Raum Sargans wuchs der aus den Alpen heraus drängende Eisstrom auf nahezu eine Mächtigkeit von 2 000 m an. Damals sanken die Temperaturen auf eiszeitliche Tiefstwerte, die im Jahresdurchschnitt um 15°C gegenüber heute abgesenkt waren (Abb. 2). Das damalige Klima war vergleichsweise so wie dasjenige, das heute auf Spitzbergen in 80° nördlicher Breite herrscht (KELLER & KRAYSS 2005, KELLER 2012).

Um ca. 23 000 Jahre v.h. setzte das Abschmelzen des gewaltigen Vorlandgletschers ein (Abb. 3). Allerdings ging dies nicht gleichmässig vor sich, sondern es kam zu Stillständen oder auch zu kleineren Wiedervorstössen, ausgelöst durch zeitlich begrenzte Klimaverschlechterungen. Solche auch in der Landschaft erkennbare Eisrandlagen bilden »stadiale Eisrandkomplexe« mit mehreren, nahe beieinander liegenden Eisrandzeugen (Abb. 6). Dieses »Etappenspiel« hat für die Gestaltung und das Wachstum des Bodensees eine grosse Bedeutung, waren doch wachsender Bodensee und zurückschmelzender Rheingletscher in dauerndem Kontakt.

Besonders deutlich zeichnet sich im Gelände rund um den Bodensee der »Eisrandkomplex Stein am Rhein« ab, der auch als »Innere Jugendmoräne« bekannt ist. Er ist deutlich dreiteilig, das heisst er weist drei Stände auf: aussen »Stand Staffel W6«, den »Hauptstand Etwilen W7« und den inneren »Stand Stein am Rhein W8« im engeren Sinn (Abb. 7). Diese Periode kann im Mittel auf 19 500 Jahre v.h. datiert werden.

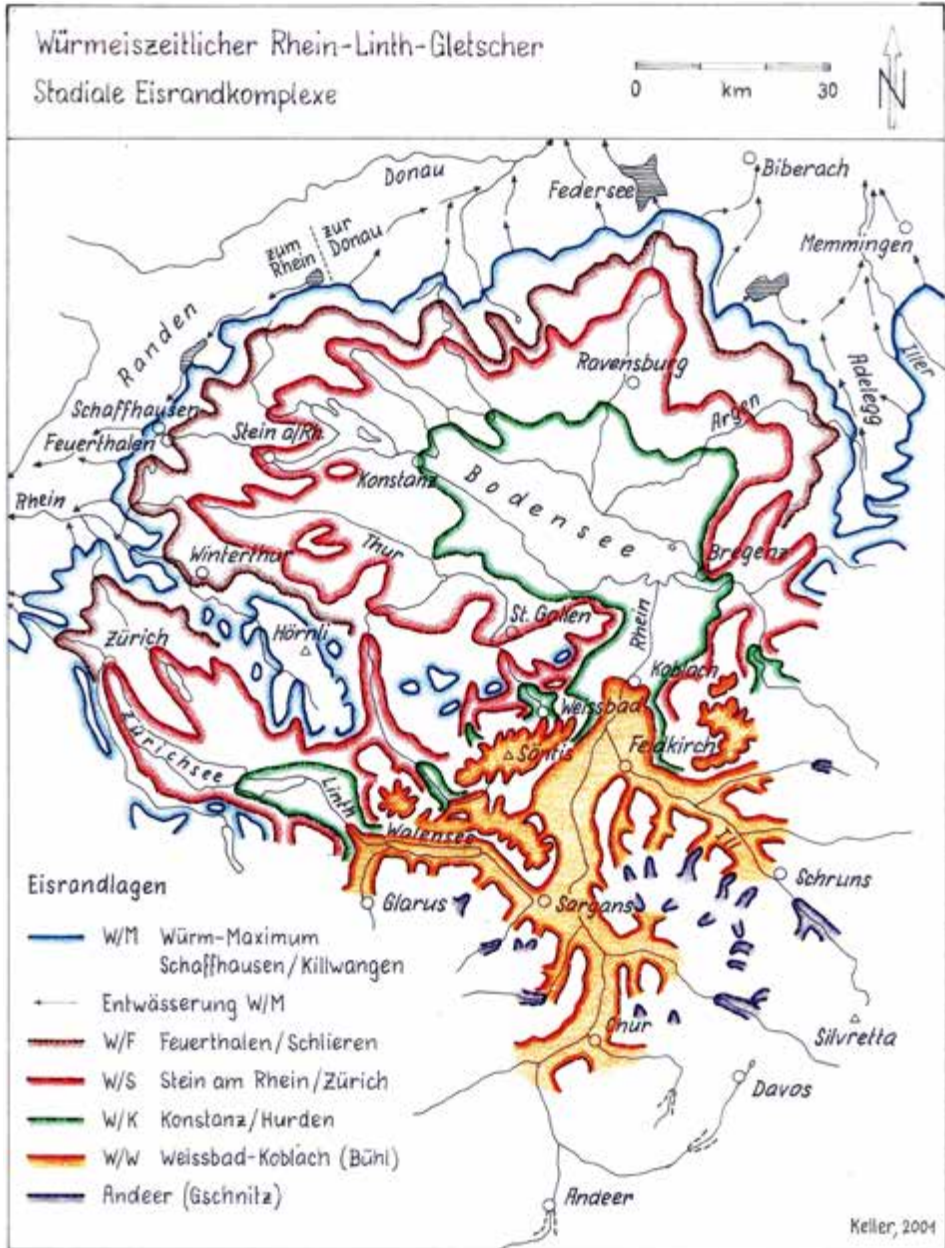


Abb. 6: Beim Zurückschmelzen führten Klima-Rückschläge zu einem etappenweisen Zurückweichen des Bodensee-Rheingletschers mit begrenzten Wiedervorstössen, was aus den Geländeformen der Eisrand-Komplexe abgeleitet werden kann.

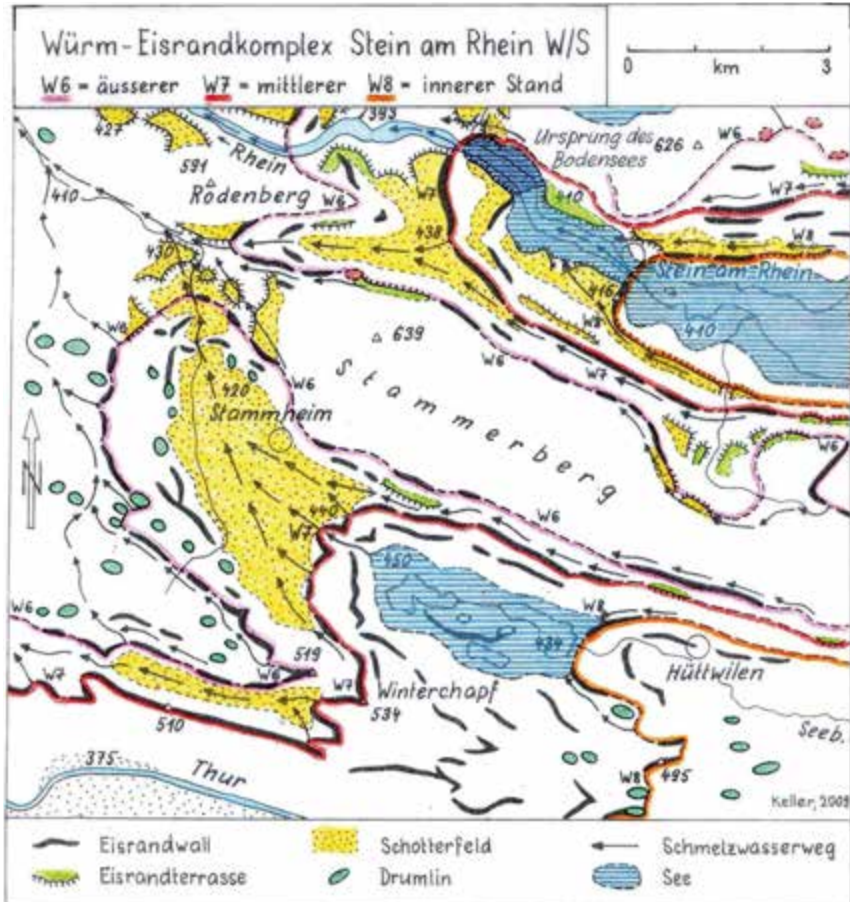


Abb. 7: Der Eisrand-Komplex Stein am Rhein weist drei Stände auf, die im Raum Stein am Rhein und im Thurtal-Stammheim durch reihenweise auftretende Moränenwälle deutlich in Erscheinung treten. Im Zungenbecken des mittleren Standes Etwilen entstand beim Eisrückzug um 19 000 Jahre v. h. der anfangs noch winzige Bodensee.

3 »GEBURTSSTUNDE« DES BODENSEES UND DER ZURÜCKSCHMELZENDE BODENSEE-GLETSCHER

Es war im August 19 003 v.h. oder 18 998 v.h. – das Jahr ist nicht so genau bekannt, niemand hat es aufgeschrieben, aber sicher ereignete es sich im Sommer – da schmolz während einer längeren Wärmeperiode das Eis am grossen Gletschertor des Rheingletschers bei Hemishofen (3 km unterhalb Stein am Rhein) in kurzer Zeit etliche hundert Meter zurück. Dabei wurden der Moränenwall und die Eisrandterrasse von Etwilen W7, der Hauptstand des Stein am Rhein-Eisrandkomplexes (Abb. 7 und 8), vom Eis verlassen. Die Gletscherfront sank ins Zungenbecken von Wagenhausen-Stein am Rhein zurück und kam damit tiefer zu liegen als das verlassene Gletschertor bei Hemishofen. Vor dieser neuen Eisfront staute sich das Schmelzwasser als kleiner See, bevor es als Rhein

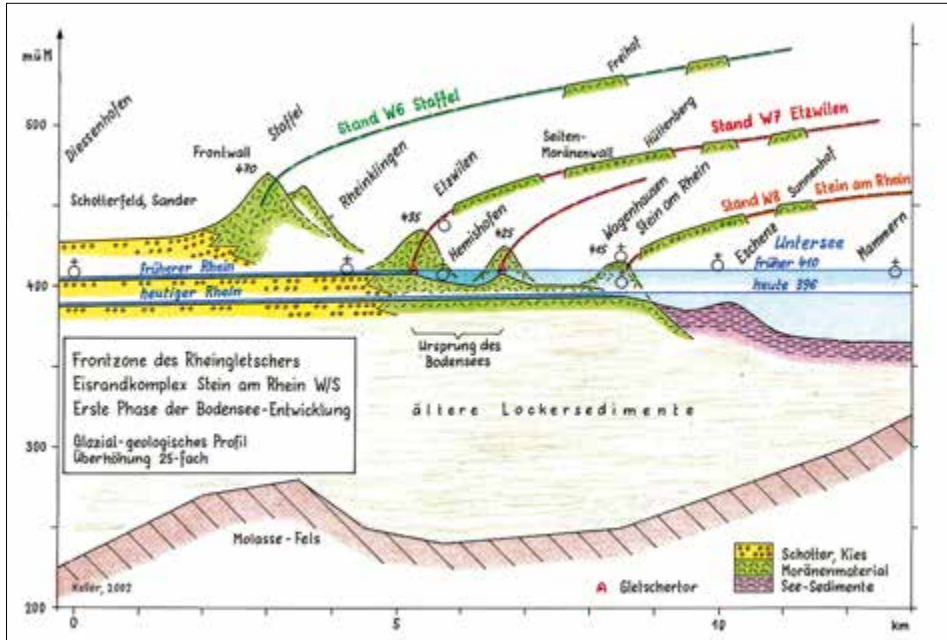


Abb. 8: Im Profil der Eisränder um Stein am Rhein ist der Ursprung des Bodensees als kleines Seelein innerhalb des mittleren Standes Etwilen gut zu erkennen. Damals spiegelte der See noch auf 410 m ü. M.



Abb. 9: Flugaufnahme vom Ende des Untersees mit dem abfließenden Rhein. Die Fluss-Ausweitung unterhalb Stein am Rhein war der Ursprung des Bodensees. Er wurde durch die Moränen und Terrassen von Etwilen-Hemishofen aufgestaut. Foto: Archäologie TG.

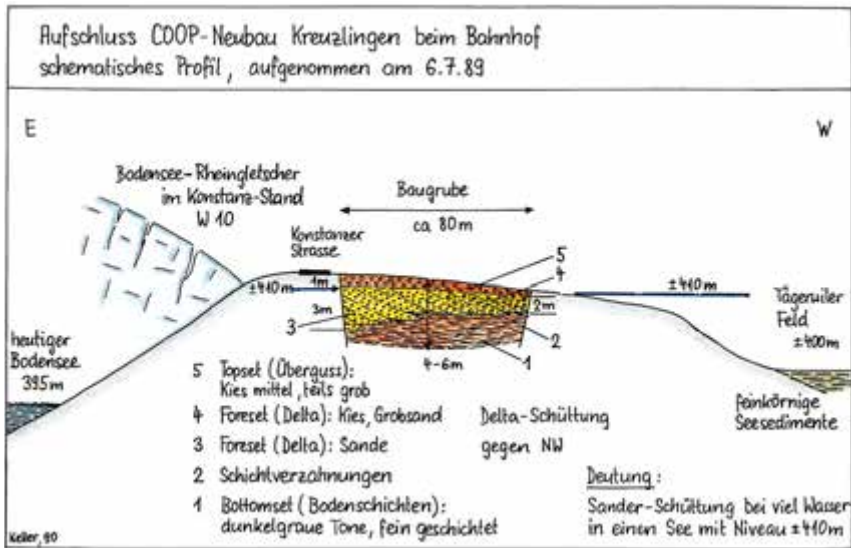


Abb. 10: Als der Rheingletscher bei Konstanz-Kreuzlingen stirnte, schütteten die Schmelzwässer beim Bahnhof Kreuzlingen ein Delta in den noch auf 410 m ü. M. stehenden Untersee.

über die Schwelle von Hemishofen überlaufen konnte: **Geburtsstunde des Bodensees!** (Abb. 9). Dieser noch kleine, zaghaft gebildete Zungenbeckensee war also der Anfang des werdenden Bodensee-Untersees vor rund 19 000 Jahren (Abb. 7 und 8). Er wies ein noch 15 m höheres Niveau auf als der heutige See (KELLER 1994).

Beim nächsten Abschmelzunterbruch erzeugte der Bodensee-Rheingletscher bei Kirche und Rathaus Stein am Rhein und auf der anderen Rheinseite bei Wagenhausen den inneren Moränenkranz Stein am Rhein W8. Dieser schliesst heute den Untersee ab (Abb. 7 Karte W/S, und 8 Profil Stein a/Rh). In der Folge gab der abtauende und zurückweichende Rheingletscher sukzessive den Steiner Arm des Untersees frei, dann den Zeller See und den Gnadensee sowie dazwischen die Insel Reichenau. Schliesslich stirnte der Vorlandgletscher vor etwa 18 000 Jahren gerade im Bereich der Konstanzer Altstadt. Jetzt breitete sich der gesamte Untersee als eisfreies stehendes Gewässer vor dem Gletscher aus, während die Eismassen das Becken des Obersees noch vollständig eindeckten. An der Front des Vorlandgletschers wurde der Moränenwall, der sich im Nordosten von Konstanz auf dem Landsporn von Staad über Petershausen gegen die Rheinbrücke hinzieht, aufgeschüttet. In der Konstanzer Altstadt steht das Münster exakt auf diesem Moränenwall, der südwärts durch Kreuzlingen über das Kloster weiter verläuft. Damals spiegelte der Untersee noch immer auf 410 m ü. M., wie verschiedene ehemalige Uferterrassen belegen, z. B. die Kirche Ermatingen oder die Terrasse von Mittelzell auf der Insel Reichenau. Ein Delta, das südlich des Bahnhofs Emmishofen (Hauptbahnhof) in einer Baugrube aufgeschlossen war, setzte ebenfalls auf 410 m ü. M. an (Abb. 10).

4 BODENSEEBECKEN UND RHEINTAL SIND »GLAZIAL ÜBERTIEFT«

Von Bächen und Flüssen ist bekannt, dass sie linienhaft eingeschnittene Täler erodieren, sogenannte V-Täler, manchmal auch Schluchten. Anders wirken die Gletscher. Sie schürfen ihre Fliesswege in die Breite und in die Tiefe aus. Es entstehen im Gebirge bei resistenteren Gesteinen steilwandige U- oder Trogtäler, im hügeligen Vorland mit »weicherem« Molasse-Untergrund weite Becken und breite Talzüge. Besonders auffällig ist dabei die Fähigkeit des fließenden Eises in die Tiefe zu wirken. Diese glaziale Exaration ist vor allem dort sehr kräftig, wo die fließenden Eismassen seitlich eingeeengt sind, wie in den grossen, aus den Alpen heraus führenden Tälern oder entlang der Hauptstromlinien in den Zungenbecken des Vorlandes. Der Felsuntergrund wird dabei in viel grössere Tiefen hinunter ausgekratzt als dies die Schmelzwasserflüsse in den von den Gletschern wegführenden Tälern vermögen.

Die Exaration in den Auslasstälern aus den Alpen sowie in den Becken und Haupttalachsen des Vorlandes erfolgte insbesondere während den Vorstoss- und Hochstandperioden der Eiszeitgletscher. Während den späteiszeitlichen Abschmelzphasen hingegen wurden in den Tiefzonen wieder glaziale Sedimente abgesetzt.

Diese Mechanismen können im Bodensee-Rheintalraum, wo sie mustergültig in Erscheinung treten, gut nachvollzogen werden (Abb. 11). Im Rheintal reicht der Felsboden bereits bei Sargans bis unter Meereshöhe hinab und liegt im unteren Rheintal sogar mindestens 200 m unter dem Meeresspiegel (WILDI 1984, KELLER 1990, 2009, OBERHAUSER 1998). Die tiefsten Tröge finden sich in den Talweitungen des Rheintals, wo der Eisstrom besser in die Tiefe schürfen konnte (Abb. 12). Der Felsuntergrund des Bodensee-Obersee ist von der Rheinmündung bis Meersburg bis unter 0 m ü. M. ausgekolkt, wobei die grösste Beckentiefe von rund 150 m unter Meeresniveau vor der Mündung des Alten Rheins ausgemacht worden ist (WILDI 1984, SCHREINER et al. 1991, KELLER & KRAYSS 1994). Das Tiefschürfen ist nicht nur der letzten Eiszeit anzulasten, sondern wurde bereits durch die Gletscher früherer Eiszeiten vorbereitet. Interessant ist die rinnenartige Tiefzone im Bodenseebecken, die zwischen Arbon und Langenargen beginnt, sich durch den ganzen Überlinger See fortsetzt und dabei im Obersee und wieder im Überlinger See unter Meereshöhe hinunter reicht. Diese Tiefenrinne liegt in der mittleren Vorstossachse des Rhein-Vorlandgletschers. Derartige schmale Rinnen treten in den übertieften Vorlandbecken öfters auf.

Bei Schaffhausen hingegen fliesst der Rhein in +390 m Meereshöhe direkt auf Felsboden über Jurakalke der Randen-Ausläufer und stürzt anschliessend über den Rheinfeld in ein altes Rheintal hinunter (Abb. 11). An diesen resistenten Jurakalken endet das Rheintal-Bodensee-Felsbecken in nahezu 400 m ü. M. Die durch glaziale Exaration ausgeschürfte, maximale Übertiefung beträgt somit erstaunliche 600 m. Zur Veran-

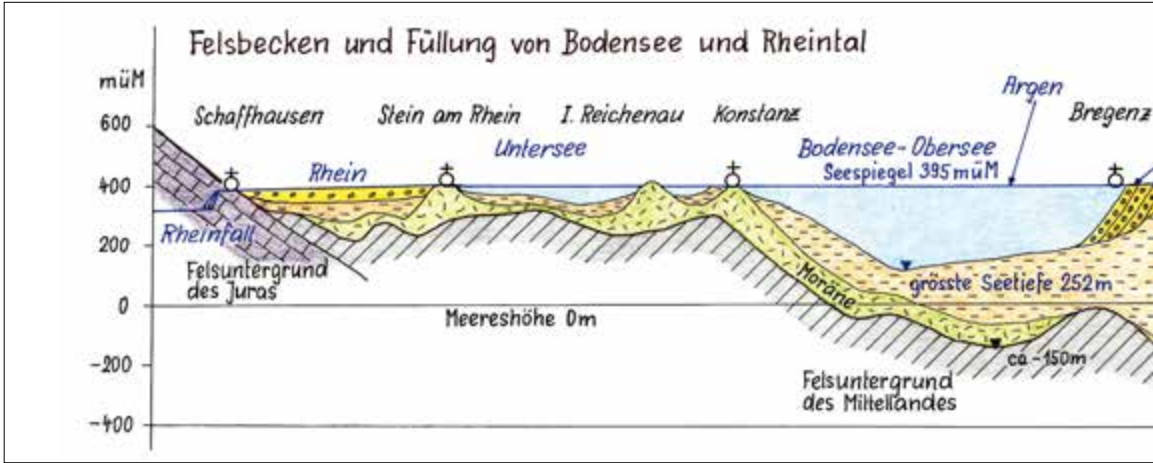
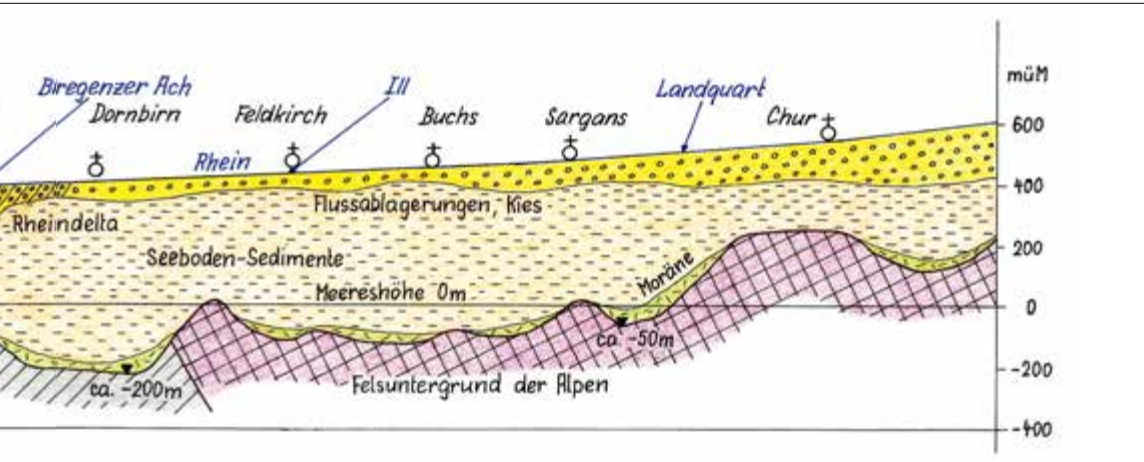


Abb. 11: Das Tiefenprofil durch den Bodensee und das Rheintal lässt den Verlauf des Felsbodens erkennen, der durch die Ausschürfung des Rheingletschers entstanden ist. Er steht unter dem oberen Bodensee bei 150 m, im unteren Rheintal bei 200 m unter dem Meeresspiegel an. Das übertiefte Becken endet bei Schaffhausen, wo der Rhein im Rheinfall über den Felsriegel des Randes hinunterstürzt.



Abb. 12: Vom Hohen Kasten herunter zeigt sich das Rheintal als tief in die Alpen eingelassenes eiszeitliches Trogtal. Zudem liegt der Felsboden noch weitere 500 m in der Tiefe unter der Talfüllung. Foto: O. Keller



schaulichung: Der Pfänder oder der Rorschacherberg erheben sich ebenso hoch über den Bodensee wie der Rheintaltrug in die Tiefe reicht.

5 DER KONSTANZ-GLETSCHERSTAND, ZEIT DER SEEN

Als der Rheingletscher um 18 000 v.h. bei Konstanz stirnte (Abb. 13), war der Obersee noch nicht vorhanden, breitete sich doch der Rheingletscher über das gesamte innere Bodenseebecken aus (KELLER & KRAYSS 1994, KELLER 2005). Aber rund um den klein gewordenen Vorlandgletscher bildeten sich zahlreiche Seen. Das Eis verbaute nämlich die dem Bodensee zustrebenden Täler, sodass Eisstauseen entstanden. Hinter Bregenz verstopfte der Rheingletscher den Ausgang des Bregenzer Ach-Tals, wodurch ein riesiger, fingerartig in die Täler des Bregenzerwaldes eingreifender See hochgestaut wurde (Abb. 14), der nordwärts über Weiler zur Oberen Argen überfloss (KELLER 1995). Diese ihrerseits wurde bei Wangen dem Eisrand entlang ins Schussental umgelenkt, wo ein Eisstausee sich nordwärts weit über Ravensburg hinaus erstreckte (KELLER & KRAYSS 1988). Der Abfluss dieses Gewässers, also die Schussen, bahnte sich einen Weg entlang des Eisrandes nach Westen über Markdorf in den nächsten, in den Linzgau-Eisstausee. Weiter dem Eisrand folgend mündete der bereits mächtige Schmelzwasserfluss in den kleineren See von Grasbeuren, um sich schliesslich in den Überlinger See zu ergiessen. Dieser Eisrandfluss muss eine gewaltige Wasserführung aufgewiesen haben, denn in ihm summierten sich Bregenzer Ach, Argen, Schussen und Linzgauer Ach auf. Nicht zu vergessen ist, dass mindestens im Sommer noch direkt Schmelzwasser vom Nordteil des Obersee-Vorlandgletschers dazukam. Der durch den Vorlandgletscher aufgestaute Überlinger See konnte um die Konstanz Eiszunge herum direkt in den damals noch wesentlich grösseren Untersee entwässern. Schliesslich führte der Rhein ab Stein am Rhein

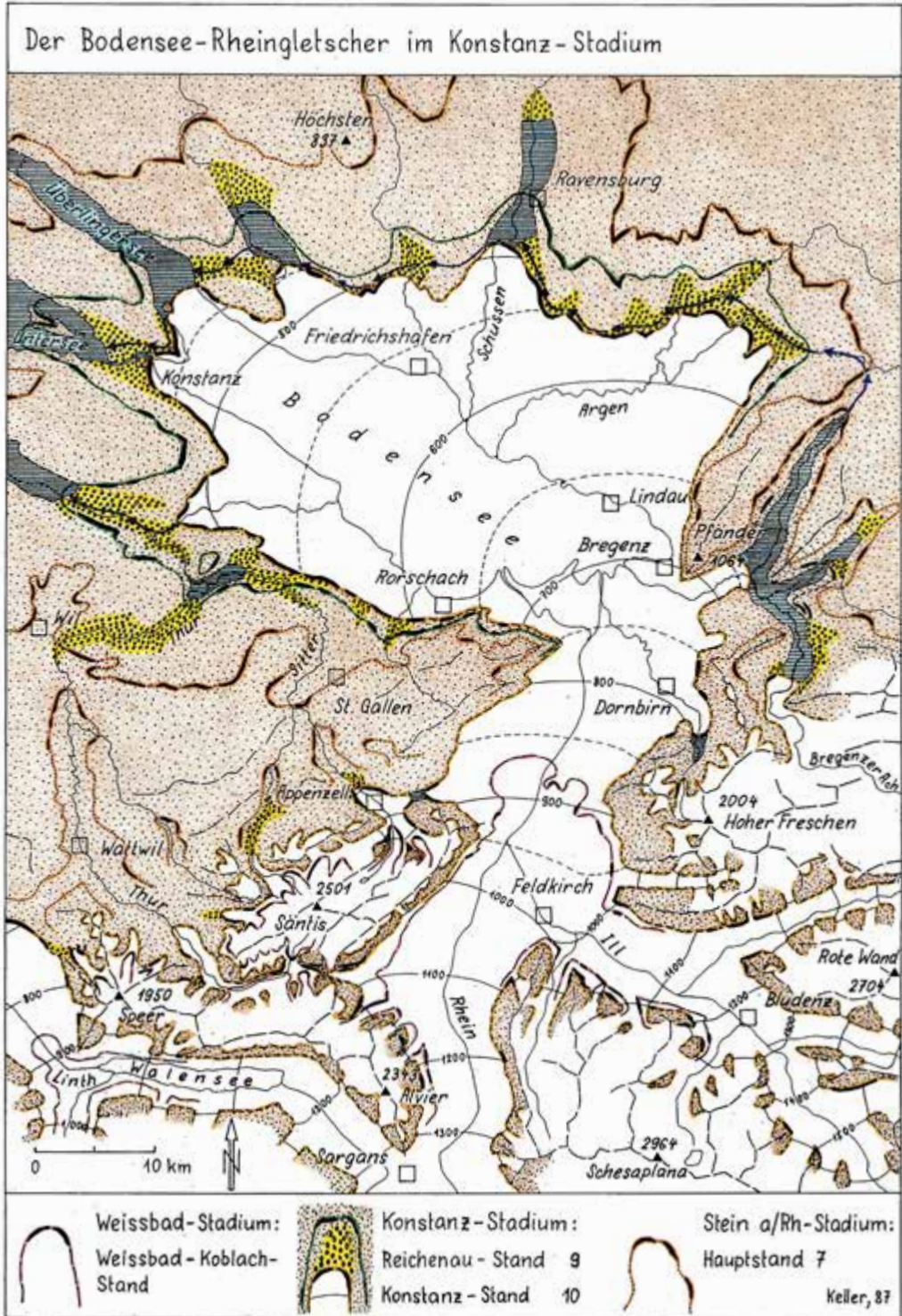


Abb. 13: Im Konstanz-Stadial vor 18 000 Jahren war das Becken des Bodensee-Obersees noch vollständig unter dem Eiskuchen begraben. Zahlreiche durch Gletscherzungen gestaute Seen säumten rundum den Gletscher. Eingezeichnet ist auch der Eisrand des Stein am Rhein-Stadials vor rund 19 000 Jahren. Nach dem Zurückschmelzen von Konstanz endete der Rheingletscher vor gut 17 000 Jahren bei Koblach nördlich Feldkirch.

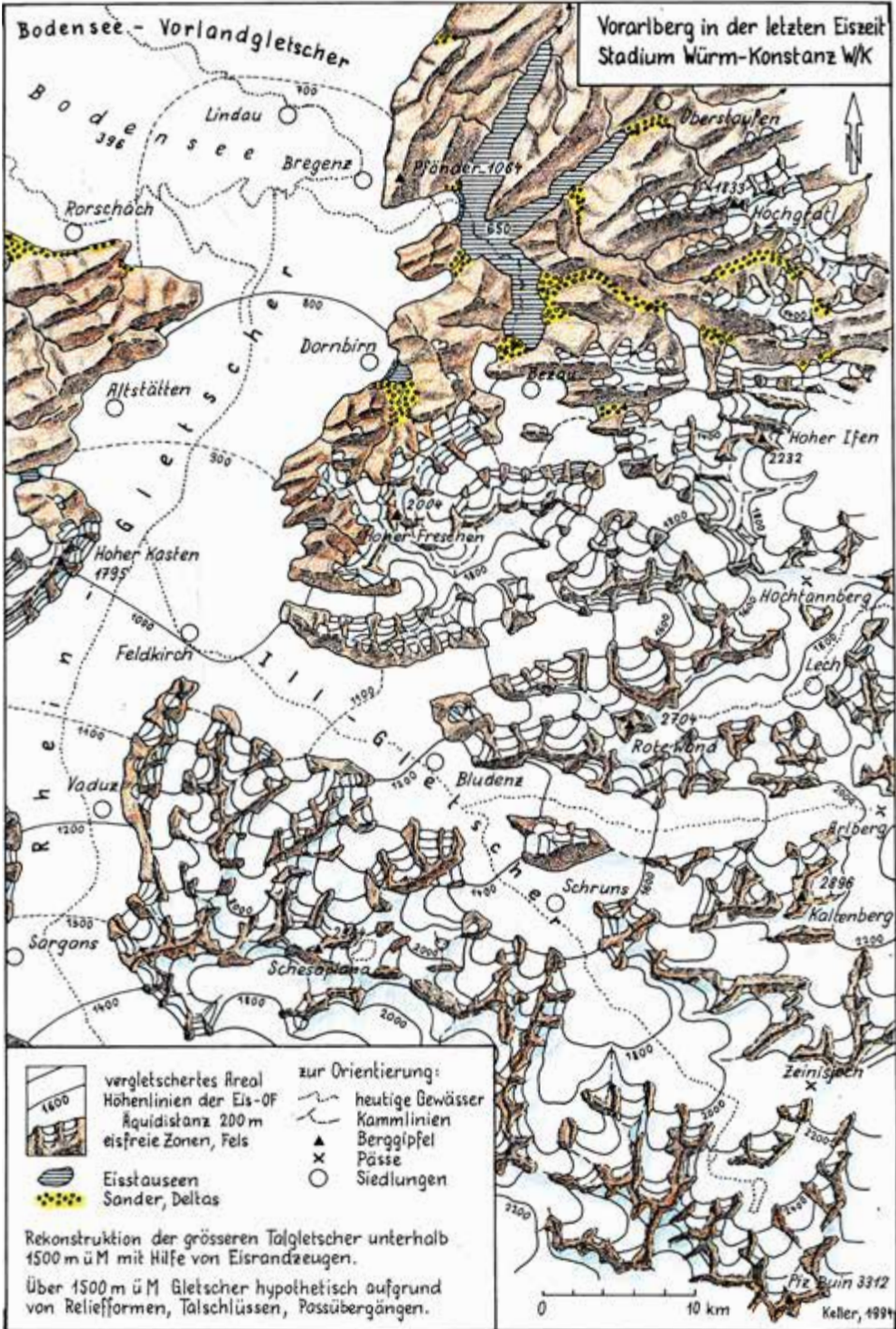


Abb. 14: Während dem Konstanz-Stadial war das Vorarlberg noch weitgehend vergletschert. Im nördlichen Landesteil jedoch waren die unteren Täler bereits eisfrei. Ein ausgedehnter, fingerförmiger Eisstausee bildete sich vor der Sperre des Rheingletschers im untersten Tal der Bregenzer Ach. Sein Abfluss erfolgte um den Pfänder herum nach Norden zur Argon.



Abb. 15: Der zurückschmelzende Rheingletscher stürzte im Bodensee, der stets unmittelbar der Eisfront folgte. Das Bild stammt aus Grönland, wo ein Gletscher in einem Fjord endet. Es soll die einstige Situation am Rheingletscher-Bodensee vergleichsweise zeigen. Foto: Archiv O. Keller

das Wasser der ganzen Seenkette ab. Vor der Gletscherfront von Konstanz begannen die Schmelzwässer den Untersee mit ihrer Schuttfracht sukzessive aufzufüllen, woraus die Vorfeldebenen von Tägerwilen und Wollmatingen hervor gingen. Sie und der Moränenwall von Konstanz-Kreuzlingen erklären, warum der Bodensee bei Konstanz zweigeteilt ist (Abb. 25).

Eine nachfolgende, offenbar markante Klimaerwärmung (KELLER 1988, KELLER & KRAYSS 2005) liess den Konstanz-stadialen Gletscher rasch abschmelzen, der Vorlandgletscher löste sich auf und das Eis schmolz ins Rheintal zurück. Dies bewirkte das Auslaufen der Eisstauseen, da jetzt die Eisbarrieren verschwanden. Erhalten blieben der tiefe Überlinger See und der Untersee als letzter der Seenkette. Dafür aber erschien der Bodensee-Obersee als Neuschöpfung im zentralen Becken, das er in seiner ganzen Weite ausfüllte. Der ins Rheintal zurückweichenden Eisfront folgend, wuchs er rasch an und dehnte sich südwärts aus (Abb. 15).

6 DER ÜBERLINGER SEE IST EIN SONDERLING

Wie ein neugieriger Elefantenrüssel streckt sich der Überlinger See als Anhängsel des Bodensees weit gegen Nordwesten in die Landschaft hinaus. Besser würde man von einem Mammutrüssel reden, denn die Mammuts haben das Werden des Überlinger Sees noch miterlebt, und es ist anzunehmen, dass sie an seinem Ufer gierig das eisgekühlte Wasser aufgesogen haben. Wie dem auch sei, schon ein erster Blick auf eine Karte zeigt die Eigentümlichkeiten dieses Gewässers auf. Es ist genau genommen kein eigenständiger See, sondern eine lang geratene Bucht des Bodensees. Im Weiteren muss erstaunen, dass der Rhein den See bei Konstanz verlässt und nicht am äussersten Seeende, wie es

regelkonform wäre, nämlich im Nordwesten des Überlinger Sees bei Bodman. Höchst auffällig ist auch der geradlinige und erst noch parallele Verlauf der Ufer. Ausserdem ist der See lang und schmal, wie ein riesiger mit Wasser gefüllter Graben. Betont wird dies durch die steilen, teils felsigen Ufer, indem die Hochplateaus des Sipplinger Berges und des Bodanrücks abrupt in den See abfallen (Abb. 16). Das Ganze hinterlässt den Eindruck eines kleinen Gegenstücks zum Roten Meer oder zur Oberrheinischen Tiefebene, die beide tektonische Grabenbrüche sind.

Diese doch vorerst oberflächlichen Feststellungen bedürfen der vertieften Erklärungen. Bereits PENCK (1909) stellte sich die Frage nach der Entstehung des Überlinger Sees, den er als Tal des Rheingletschers betrachtete. Später wurde diese Vorstellung verworfen und der Überlinger See als tektonischer Grabenbruch angesehen, der im Zusammenhang mit dem Hegau-Vulkanismus entstanden wäre. Diese tektonisch sehr aktive Phase liegt mehr als 7 Mio. Jahre zurück, und seither ist geologisch Vieles und Umwälzendes geschehen. Effektiv ist das Gebiet des Sipplinger Berges und auch des Bodanrücks von etlichen Störungen durchzogen, wobei Richtungen parallel, aber auch quer zum Überlinger See vorkommen. Diese müssten ein Absacken des Seebodens um mindestens 700 m verursacht haben, liegt doch der Felsuntergrund stellenweise unter



Abb. 16: Der Überlinger See ist beim Zurückschmelzen des Vorlandgletschers vom Stein am Rhein-Stadial zum Konstanz-Stadial zwischen 19 000 und 18 000 Jahren v. h. entstanden. Zuerst entwässerte er bei einem Seespiegel von 420 m ü. M. durch das Stahringertal. Im Konstanz-Stadial fand das Wasser einen neuen Abfluss bei einer Spiegelhöhe von 412 m ü. M. aus der Gegend der Mainau direkt nach Konstanz in den Untersee

o m Meereshöhe. Neuere geologische und seismische Untersuchungen weisen aber nur Sprunghöhen der Verwerfungen von höchstens Dekametern und nicht Hunderte Meter aus. Zudem überlagern die sogenannten Deckenschotter, deren Alter kaum mehr als eine Mio. Jahre beträgt, auf den Höhen beidseits des Sees flächig die Störungen. Als Zeugen von einstigen Flüssen quer zum Überlinger See müssen sie demzufolge auch über dem heutigen See abgesetzt worden sein (SCHREINER 1975, 2000).

Aus diesen Gründen ist die Genese anders zu erklären. Die Störungen und Brüche haben ohne Zweifel den Felssockel im Gebiet des Überlinger Sees zerrüttet und damit erosionsanfällig gemacht. Deshalb hatten die Gletscher der jüngeren Eiszeiten, die auf die Deckenschotter-Eiszeiten folgten, leichtes Spiel entlang dieser Leitlinien durch Exaration in die Tiefe zu schürfen. Zudem war hier die Tiefenerosion besonders ausgeprägt, weil die Achse des Überlinger Sees genau in der Verlängerung der Hauptstossrichtung des Bodensee-Rheingletschers liegt. Dieses Prinzip wurde bereits im Kapitel über »glazial übertiefte Becken« erläutert (Abb. 17).

Interessanterweise beginnt die »Lebensgeschichte« des Überlinger Sees (Abb. 16) wie diejenige des Untersees in Verbindung mit dem Stein am Rhein-Stadial – also Zwilingsgeburt zweier Seen! Die auch bei der Überlinger-Gletscherzunge sehr markanten Eisrandwälle des Stein am Rhein-Komplexes verbauen das Tal der Stockacher Aach zwischen Wahlwies und Stockach. Als hier, vor eben 19 000 Jahren, der Abschmelzprozess einsetzte, zog sich die Eisfront im Tal des Überlinger Sees wie beim Untersee schrittweise Richtung Konstanz zurück. Dabei wurde zuerst das tief eingeschnittene Stahringer Tal eisfrei, sodass der sich vor der Gletscherfront bildende Überlinger See hier einen



Abb. 17: Der langgezogene, schmale Überlinger See wird von steil ansteigenden, waldbedeckten Bergrücken flankiert. Die den Hochflächen aufsitzenden Deckenschotter belegen, dass das Trogtal des Sees erst in den jüngeren Eiszeiten ausgeschürft worden ist. Foto: O. Keller

Abfluss fand, eine Art »nördlicher Rhein«. Dieser lag auf 420 m ü. M., weshalb sich der Seespiegel vorerst auf dieser Höhe einspielte (Abb. 16). Auf der Höhe von Dingelsdorf-Nussdorf (drei km südöstlich Überlingen) stagnierte der Gletscher einige Zeit, belegt durch Moränenwälle bei Dingelsdorf und ein fossiles Delta bei Nussdorf auf eben 420 m ü. M. Zur gleichen Zeit endete die Untersee-Zunge auf der Insel Reichenau, weshalb vom Reichenau-Stand gesprochen wird (KRAYSS & KELLER 1996, Kartenbeilage).

Als der Rheingletscher vor 18 000 Jahren bis Konstanz zurückgeschmolzen war, verlief die nordwestliche Eisfront aufschwimmend im Überlinger See von der Insel Mainau hinüber nach Unter Uhldingen. In dieser Situation wurde die äusserste Konstanzer Ecke des Bodanrücks auf einer Höhe eisfrei, die tiefer lag als die Stahringer Rinne. In diesem dramatischen Moment verlagerte der »nördliche Rhein« seinen Lauf umgehend hierher und entwässerte den Überlinger See neu durch die Rinne von Petershausen nördlich an Konstanz vorbei direkt in den Untersee. Das zugehörige Schmelzwassertal ist noch heute in eindrucklicher Form, aber flusslos erhalten. Aus seiner Höhenlage ist abzuleiten, dass der Spiegel des Überlinger Sees in kürzester Zeit von 420 m auf etwa 412 m absackte und sich auf das damalige Niveau des Untersees ausrichtete.

7 DIE SPÄTEISZEITLICHE GLETSCHERSCHMELZE UND DER BODENSEE-RHEINTALSEE

Vielfach wird angenommen, dass die Gletscher am Ende der Eiszeit kollapsartig rasch abgetaut und rasant in die Alpen zurückgeschmolzen seien. In der Tat verlief das Schwinden der Vorlandgletscher nach dem Konstanz-Stadial um 18 000 v.h. schnell, denn um 17 300 v.h. stürzte der Rheingletscher bereits im mittleren Rheintal bei Koblach nahe Götzis. Nach einer kurzen Stabilisierung von wenigen Jahrhunderten (KELLER 1988) zog er sich, nochmals einen kurzen Halt bei Sargans einschaltend (Abb. 18), weiterhin schnell in die inneren Alpentäler Graubündens zurück (JORDI 1986). Die Berechnungen zeigen nun aber, dass der jährliche Eisschwund damals zwar ähnlich rasch wie das Abschmelzen der heutigen Alpengletscher erfolgte, von einem Kollaps jedoch trotz der riesigen Rückzugsdistanzen nicht die Rede sein kann (KELLER & KRAYSS 2005).

In gleichem Mass wie der Rheingletscher zurückschmolz, folgte ihm der Bodensee ins Rheintal hinein, dauernd mit der Eisfront, die im See kalbend Eisberge erzeugte, Kontakt haltend. Schliesslich wich der Rheingletscher sich aufteilend um 16 000 v.h. einerseits ins Vorderrheintal, anderseits ins Hinterrheintal zurück (KELLER & KRAYSS 2005, KELLER 2005), womit das Rheintal bis Reichenau westlich Chur eisfrei wurde. Das Churer Rheintal ist aufgrund von Seismik-Profilen ein tiefes Trogtal, dessen Felsboden etwa auf Meereshöhe anzunehmen ist und das mit mehr als 500 m mächtigen Lockersedimenten verfüllt ist (SCHÄLLI 2012, in Vorbereitung). Daraus kann abgeleitet werden, dass der Bodensee um etwa 16 500 v.h. bis über Chur hinaus gereicht hat (KELLER

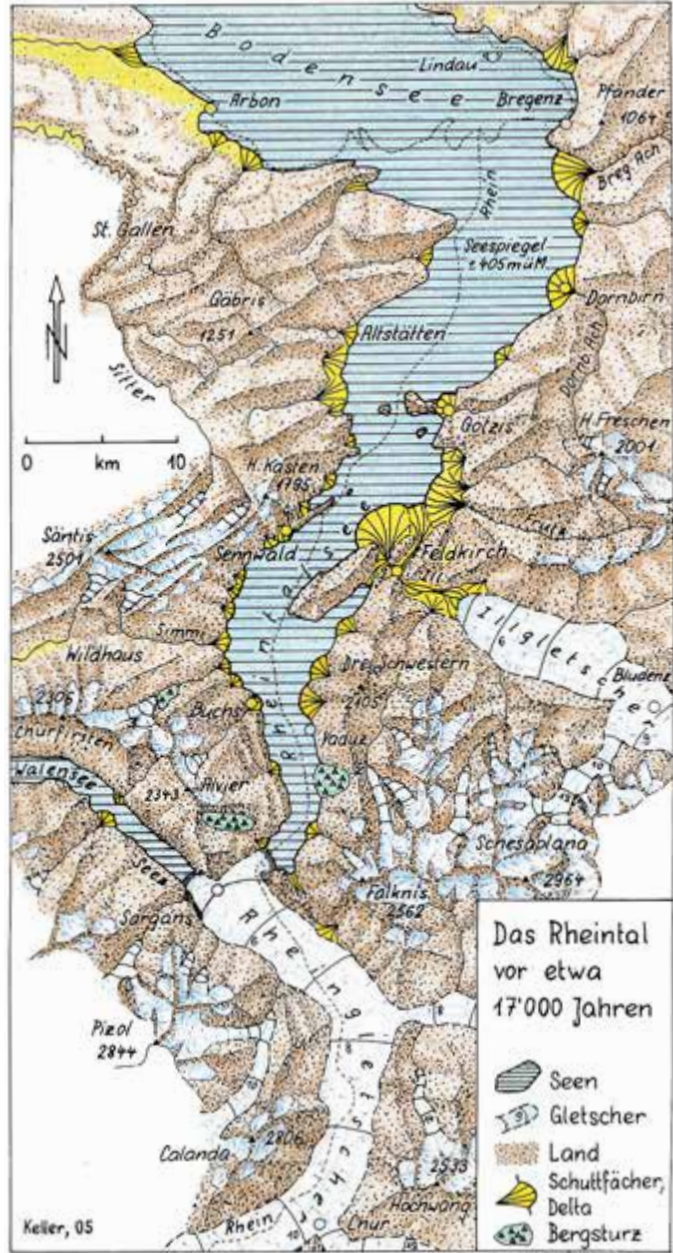


Abb. 18: Beim Rückschmelzen schaltete der Rheingletscher um 17'000 v. h. bei Sargans eine »Verschnaupause« ein. Der Rheintalsee und der Walensee reichten bis an das Zungenende heran. Bei Feldkirch begann die Ill ein Delta in den See vorzutreiben.

2009b). In dieser Zeit erreichte er seine grösste Ausdehnung mit mehr als der doppelten Fläche gegenüber heute (Abb. 19).

Jüngste Kernbohrungen im Raum Sargans-Mels, die in der Tiefe auf Seesedimente stiessen, lassen die Frage aufkommen, ob dieser See sogar via Walensee mit dem Zürichsee in Verbindung gestanden habe. Wenn ja, so wäre ein nahezu dreimal grösserer Bodensee als heute entstanden. In beiden Fällen war dies der gewaltigste aller je existierenden Alpenrandseen (Abb. 19).

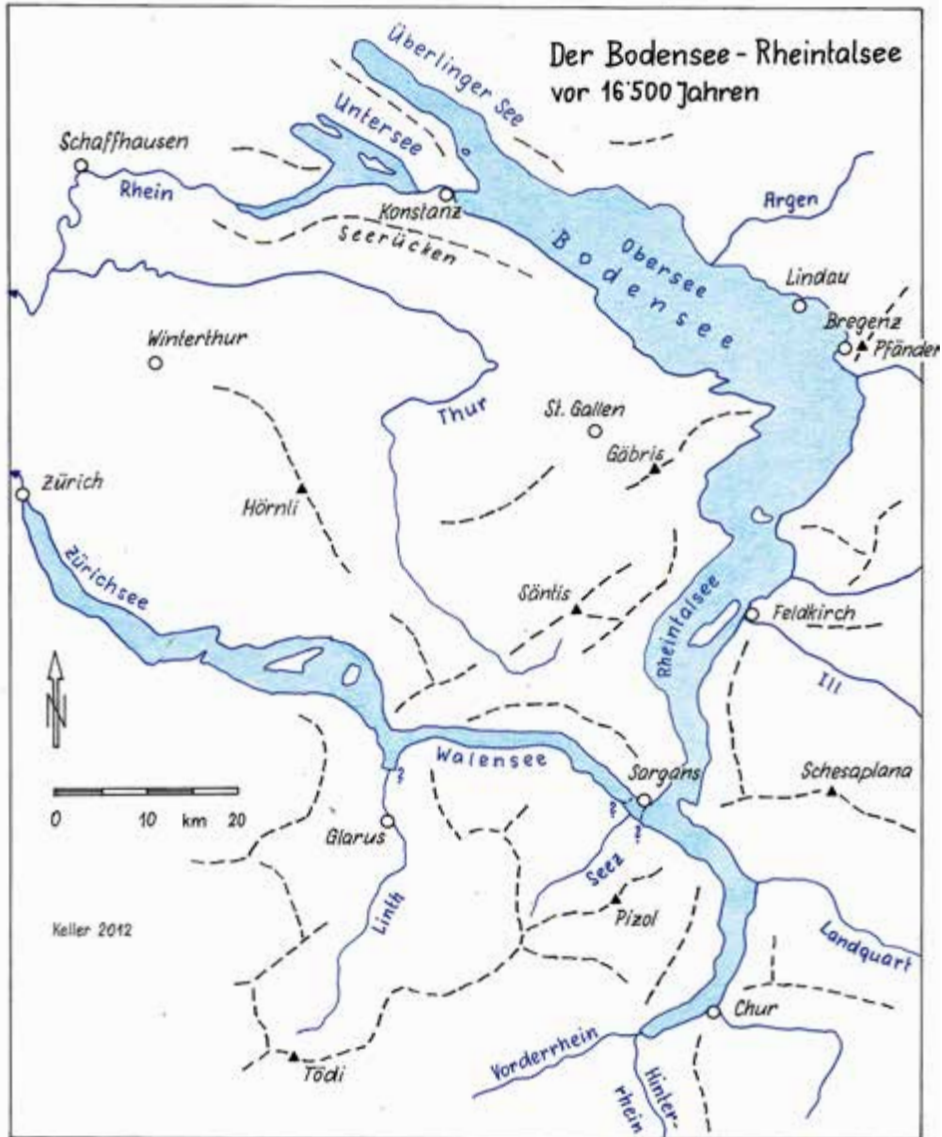


Abb. 19: Um 16 500 Jahre v. h. hatten sich alle Gletscher aus dem Rheintal und dem Walenseetal zurückgezogen. Es bildete sich ein Bodensee-Rheintalsee, der wie ein Fjord weit ins Gebirge hineingriff. Mit einer Gesamtlänge von rund 150 km war dies der grösste See, der je im Alpenraum sich ausbreitete. Unsicher ist, ob dieser See sogar noch mit dem Walensee-Zürichsee zusammenhing.

8 DIE RHEINTALSEEN UND IHR UNTERGANG

Die Lebensdauer des Riesensees war allerdings äusserst kurz. Zurück ins Rheintal ins Gebiet von Feldkirch. Zur gleichen Zeit wie der Rheingletscher nach Sargans zurückwich, schmolz auch der Illgletscher im Walgau rasch ab. Die schuttbeladenen Schmelzwässer von Ill und Frutz (aus dem Latenser Tal) begannen mächtige Schwemmfächer

in den Bodensee-Rheintalsee vorzutreiben (Abb. 18). Bereits um etwa 16 000 v.h. dürfte die Illschüttung die Gegenseite des Rheintals beim Hirschenprung-Oberriet erreicht und so einen Rheintalsee vom Bodensee abgeschnürt haben (Abb. 20). Ein Indiz für die sehr frühe Zweiteilung ergibt sich aus der Tatsache, dass die abschmelzenden Gletscher immense Schuttmengen hinterliessen und zudem noch kaum eine schützende Pflanzendecke den massenhaften Abtransport durch Flüsse und Bäche verhinderte. Erst ab 15 000 v.h. setzte mit dem Bölling-Interstadial zuerst noch zaghaft die nacheiszeitliche Wiederbewaldung im rheinischen Alpenraum ein (KELLER 2010), was die Schuttverfrachtung stark drosselte. Aus Untersuchungen von Bodensee-Sedimenten durch WESSELS (1995) geht hervor, dass ab ca. 16 500 v.h. von Eisbergen transportierte Gerölle (dropstones) ausbleiben. Daraus lässt sich folgern, dass im Rheintalsee treibende Eisberge nicht mehr in den Bodensee gelangen konnten, da der Ill-Schutfächer bereits eine Seeenge geschaffen und etwas später die Seen getrennt hatte.

Inzwischen hatte der Rhein beim Verlassen des Untersees sich vom Niveau 410 m auf etwa 400 m eingetieft, womit der gesamte Bodensee bis ins Rheintal auf dieses Niveau absank.

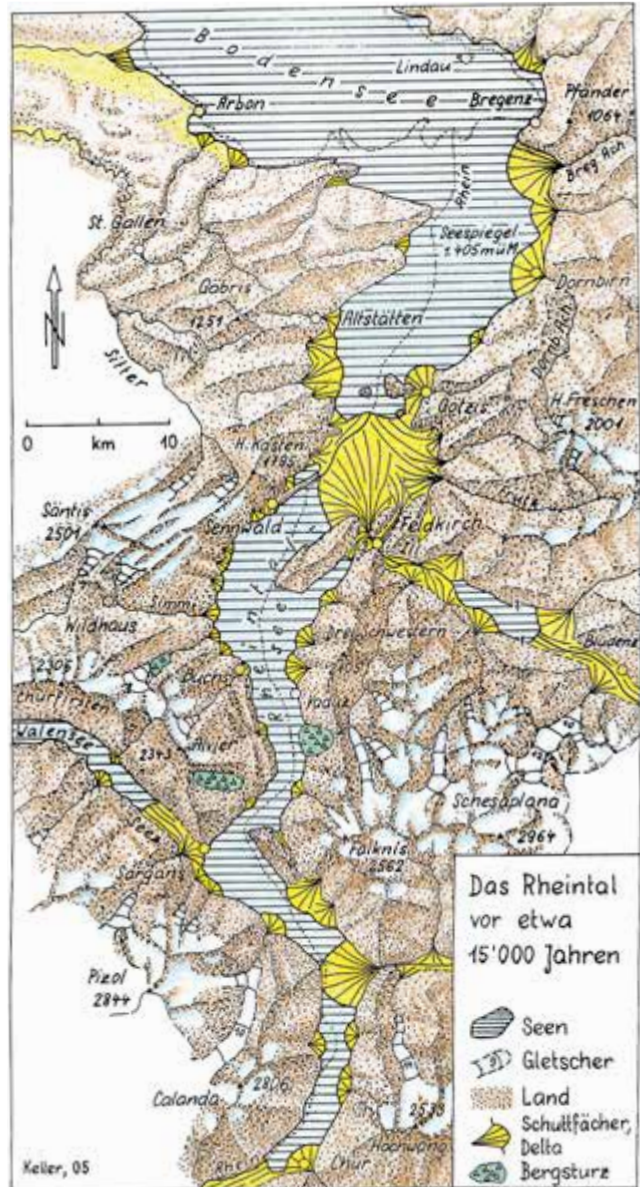


Abb. 20: Vor 15 000 Jahren hatten die Schutfächer der grössten Zuflüsse den riesigen See im Rheintal und Seetzal bereits unterteilt. Damals existierten gleichzeitig vier Seen: Bodensee, Rheintalsee, Churersee und Walensee. Im Walgau wurde der letzte Rest eines Illsees aufgefüllt.



Abb. 21: Thunersee (vorne) und Brienzsee sind durch den Schuttfächer der Lütshine bei Interlaken in die zwei Seen unterteilt. Das Bild dient als Vergleich für die einstigen Seeteilungen im Rheintal durch Ill, Landquart und Seez. Foto: Archiv O. Keller

Der Bodensee-Rheintalsee wurde also bereits um 16 000 v.h. zweigeteilt, was prinzipiell als Prozess mit der Trennung von Briener und Thuner See bei Interlaken verglichen werden kann (Abb. 21). Wie beim Briener See hatte die Teilung einen Hochstau des Rheintalsees zur Folge. Aus zahlreichen Bohrungen, in denen die Grenze zwischen Deltaschichten und überlagernden horizontalen Fluss-Ablagerungen des Rheins erkennbar ist (EBERLE 1987), muss der Spiegel des Rheintalsees auf 420 m gelegen haben (KELLER 1990, 2005). Da dieses Niveau auch im Seeztal vorhanden ist, kann angenommen werden, dass der Rheintalsee via Sargans mit dem Walensee zusammenhing, der seinerseits durch die Linth-Aufschüttungen vom Zürichsee abgetrennt worden war. Wie ein datierter Holzfund in rund 40 m Tiefe des Seez-Schuttkegels bei Mels belegt (MÜLLER 1995), wurde dieser Rheintal-Walensee aber bereits vor etwa 15 000 Jahren wieder unterteilt.

Im Churer Rheintal liegt der Übergang zwischen Deltaschichten und Flussakkumulationen auf 440 m, was bedeutet, dass die Landquart vor etwa 15 500 Jahren das wiederholt hat, was wenig vorher die Ill vollbracht hat, indem sie einen Churer See vom Rheintalsee abschnitt. So existierten schliesslich um 15 000 Jahre v.h. im Rheintal-Seezgebiet zu gleicher Zeit vier Seen: der Churer See, der Rheintalsee, der Walensee und der Bodensee (Abb. 20).

Der Churer See wurde zuerst und rasch verfüllt, was schätzungsweise um 14 500 v.h. eintrat. Dann folgte die Zuschüttung des Rheintalsees, der um 12 000 v.h. nur noch bis Buchs reichte (Abb. 22), was aufgrund der Aufschüttungsgeschwindigkeit und ^{14}C -Daten berechnet wurde (KELLER 1990). In einer Bohrung bei Ragaz waren nämlich in

26 m Tiefe unter Rheinkiesen Hölzer gefunden worden, die auf rund 12 000 Kalenderjahre vor heute datiert worden sind (HANTKE 1980). Von Buchs aus ging der Vorschub der Zuschüttung langsamer voran, da das Seebecken von Buchs bis Rütli (Seeende) tiefer und doppelt so breit war, als der südliche bereits verfüllte Teil. Zudem verringerte ab etwa 12 000 v.h. dichtere Waldvegetation die Schutzzufuhr deutlich. Daraus darf geschlossen werden, dass um 7 000–8 000 v.h. der Rheintalsee endgültig verschwand. Abgesichert wird diese Extrapolation durch das Katastrophenereignis des Bergsturzes von Salez-Sennwald, der in den letzten Rest des Rheintalsees niederfuhr. Die Sturzmassen liegen am Talrand auf Seesedimenten, in der Rheintalmitte aber bereits auf Kiesen des Rheindeltas (KELLER 1990, KOBEL 1990). Aufgrund einer Pollenanalyse in einem kleinen Moor zwischen den Bergsturzhängeln (KELLER P. 1929) muss der Sturz einiges älter sein als die frühe Tannenzeit vor 6 000–7 000 Jahren. Im Weiteren finden sich ab weniger als 8 000 Jahre v.h. in den Bodensee-Sedimenten erstmals solche, die aus dem alpinen Rheingebiet stammen (Wessels 1995). Dies bestätigt den Zeitpunkt des Verschwindens des Rheintalsees, indem jetzt der Rhein seine Fracht direkt im Bodensee absetzen konnte.

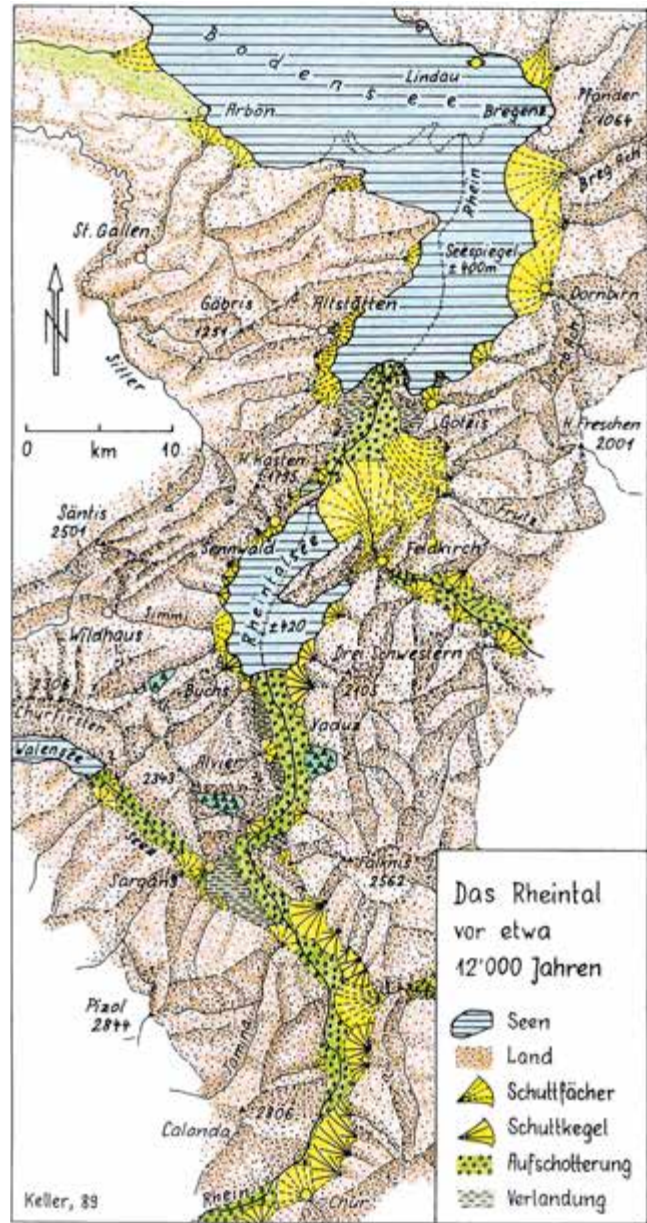


Abb. 22: Aufgrund verschiedener Indizien war der Rheintalsee vor 12 000 Jahren bereits durch den Rhein bis Buchs verfüllt. Gestaut wurde er durch den mächtigen Schuttfächer der III, die zusammen mit der Frutz im mittleren Rheintal ihr Delta im Bodensee bis Kiessern zwischen Altstätten und Götzis vorgetrieben hatten.

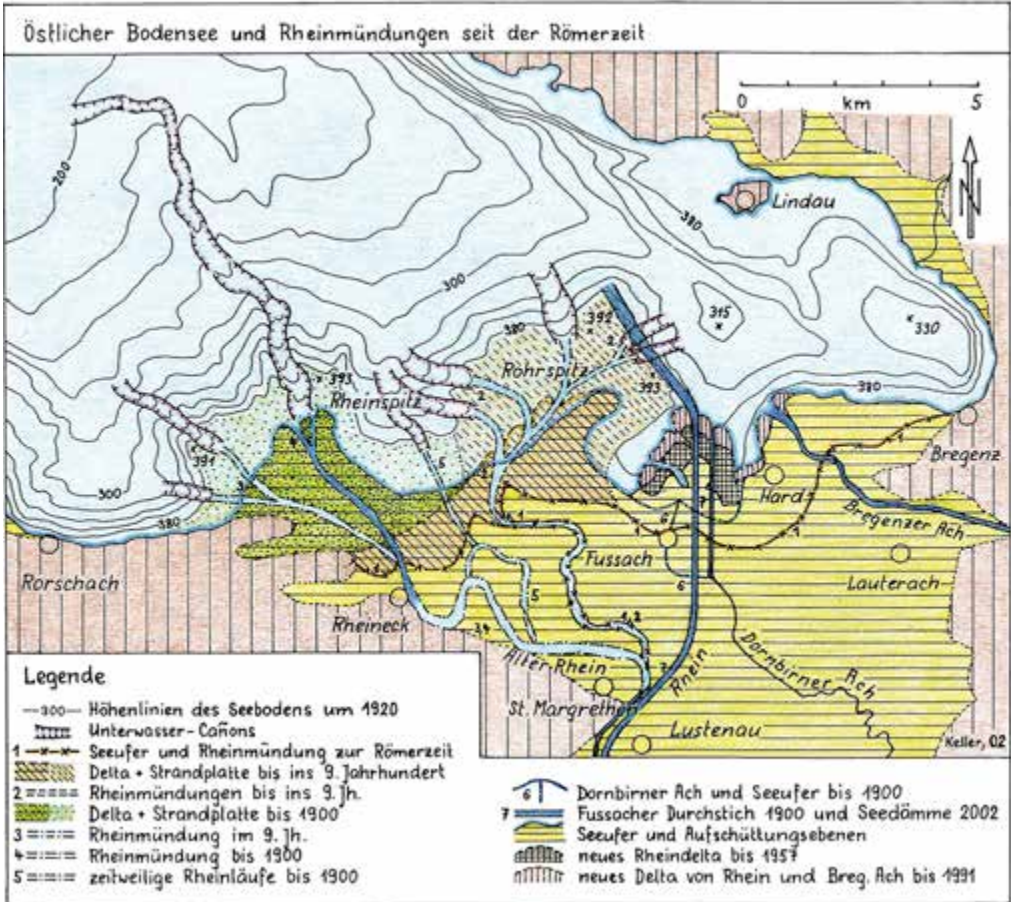


Abb. 23: Das jüngere Rheindelta weist eine vielfältige Entwicklung auf. In der Römerzeit vor 2000 Jahren verlief das Seeufer von Rheineck über Fussach nach Bregenz. Bis ins 9. Jahrhundert schüttete der Rhein das Rohrspitz-Delta auf, danach dasjenige des Rheinspitz. Ab 1900, mit dem künstlichen Durchstich von Fussach, begann die Auffüllung der Harder Bucht. Durch die Dammvorbauten geleitet wird heute der viel Schutt führende Rhein direkt zum tiefen Seebecken geleitet.

Im unteren Rheintal arbeiteten ab dem Eisfreierwerden vor rund 17 000 Jahren vorerst einmal Ill und Frutz, aber auch Dornbirner und Bregenzer Ach an der Verfüllung des Bodensees. Aus etlichen ^{14}C -Datierungen (Eberle 1987) ergibt sich, dass das Ill-Frutz-Delta um 12 000 v.h. sich bis Kiessern vorgeschoben hatte (Abb. 22). Nach 8000 v.h. kam nach dem Verschwinden des Rheintalsees auch der Rhein als Schuttlieferant dazu, weshalb jetzt die Auffüllung rascher voranschritt. Um etwa 4000 v.h. hatte sich das Rheindelta bis in die Gegend von Lustenau vorgeschoben.

Zur Römerzeit vor 2000 Jahren verlief die Bodenseeküste von Rheineck (Ad Rhenum) über Fussach nach Bregenz (Brigantium), was Siedlungsnamen, Strassenreste und Münzenfunde belegen (Abb. 23). Nach der Römerzeit baute der Rhein sein Delta bis ins 9. Jahrhundert im Rohrspitz auf, worauf er seinen Lauf weiter nach Westen verlegte und hier das Altenrhein-Delta vortrieb. Im 19. Jahrhundert griff der Mensch tiefgreifend ein, indem er durch Abkürzen der Flussläufe die Gefahr von Überschwem-



Abb. 24: Im Vordergrund breitet sich die Aufschüttungsebene mit dem Rohrspitz aus. Links neben diesem ist der See nur wenige Meter tief. Hier wurde das Delta durch die Wellenbrandung zerstört, der letzte Rest ist der Rohrspitz. Wegen der untiefen Strandplatte mussten die Rheindämme (Bildmitte) weit über den Rohrspitz hinaus vorgestreckt werden. Foto: O. Keller

mungen, die immer zahlreicher sich ereigneten, zu bannen versuchte. Mit dem Fussacher Durchstich wurde der Rhein um 1900 direkt in den See geleitet. Als man erkannte, dass die untiefe Fussacher Bucht in Kürze verfüllt sein würde, wurden in den letzten Jahrzehnten Dämme über die Strandplatte des Rohrspitzes hinaus vorgebaut. Die Materialfracht des Rheins gelangt so in das tiefe Hauptbecken des Bodensees, wo die Auffüllung noch lange ohne erkennbare Auswirkungen auf die Uferzone erfolgen kann (Abb. 24).

9 DIE ZUKUNFT DES BODENSEES

9.1 SZENARIEN ZUM ABSEHBAREN ENDE DES BODENSEE-OBERSEE

Wohl jedermann ist sich bewusst, dass der Bodensee unaufhörlich kleiner wird. So stellt sich die Frage nach der Lebenszeit, die er noch vor sich hat. Dazu einige einfache Szenarien.

Vorstehend wurde dargelegt, dass der Bodensee-Rheintalsee vor rund 16 000 Jahren mehr als die doppelte Fläche aufwies als heute. Wird nur der Obersee bis Konstanz in Betracht gezogen, so war der Rheintalsee bis Chur 1,5 mal so gross wie der Bodensee-



Abb. 25: Konstanz zwischen dem Obersee (vorne) und dem Untersee liegt auf den Aufschüttungen des Rheingletschers im Konstanz-Stadial vor 18 000 Jahren. Sie sind die Ursache der Zweiteilung des Bodensees. – Von den heutigen Mündungen her füllen der Rhein und die Nebenflüsse den Bodensee langsam zu. So fragt es sich, wann die Auffüllung des Obersees Konstanz erreicht. Dies dürfte gemäss Modellrechnungen erst in etwa 40 000 Jahren eintreten. Foto: Archäologie TG

Obersee. Nun liegt es auf der Hand zu folgern, dass der Obersee in rund 10 000 Jahren bis Konstanz verfüllt und damit verschwunden sein wird (Abb. 25).

Ein anderes einfaches Szenarium: Seit 1900 schüttete der umgelenkte Rhein zwischen Fussach und Höchst ein neues Delta in den See. Messungen seines Wachstums zwischen 1920 und 1957 ergaben einen Vorschub der Mündung von 0,6 km, was im Jahr 16 m ausmacht. Diesen Vortrieb als Grundlage nehmend, wäre bei gleich schnellem Längenwachstum die Mündung in 300 Jahren drüben in Lindau. In dieser Weise hätte die Aufschüttung in nur 2500 Jahren Konstanz erreicht. Bereits ums Jahr 4500 n. Chr. wäre damit der Obersee verfüllt und ausgelöscht.

Ein drittes Szenarium: Hier führt der Weg über eine Berechnung mit Hilfe des Eintrags von Lockermaterial (Abb. 26). Der Rhein und die übrigen Zuflüsse des Bodensees brachten in den vergangenen Jahrzehnten $3,6 \cdot 10^6$ m³/Jahr Feststoffe in den See. Infolge weiter fortschreitender Schutzbauten dürfte sich die Materialzufuhr auf rund $3 \cdot 10^6$ m³/Jahr Feststoffe reduzieren. Der Bodensee-Obersee hat ein Volumen von 41,5 km³. Um den See bis Konstanz zum Verschwinden zu bringen, muss der Wasserinhalt durch das Lockermaterial der Lieferanten ersetzt werden, was zur Rechnung führt: »Volumen : jährliche Zufuhr = Anzahl Jahre«. Demzufolge würde die Verfüllung $41,5 \text{ km}^3 : 3 \cdot 10^6 \text{ m}^3 = 13\,800$ Jahre dauern. Nach dieser Rechnung wäre das Ende des

Obersees nach rund 14 000 Jahren zu erwarten.

Welches Datum des Verschwindens stimmt jetzt, 2500 Jahre, 10 000 Jahre oder 14 000 Jahre? Die Resultate sind derart verschieden, dass Fehlschlüsse oder Unterlassungen vorliegen dürften. Bei allen drei Überlegungen und Rechnereien sind wichtige geologische Prozesse nicht oder nicht angemessen berücksichtigt worden.

9.2 EIN NEUER ANSATZ ZUR LEBENSDAUER DES BODENSEES

Das zweite der vorherigen Szenarien zum Ende des Bodensees nach nur 2500 Jahren ist ein Trugschluss. Es wurde nämlich nicht beachtet, dass ein Delta nicht linear nach vorne wächst, sondern flächig (quadratisch) auch in die Breite. Was vorne angelandet wird, muss auch seitlich angeschüttet werden, was heisst, dass bei gleich bleibender Vorschubstrecke die Deltafläche um ein Mehrfaches wachsen muss. Um das Tempo des Vormarsches konstant halten zu können, müsste jährlich immer mehr Material bei exponentieller Zunahme angeliefert werden, was in diesem Fall nicht denkbar ist. Zudem erfolgte die Deltabildung von 1920 bis 1957 in der nur wenige Meter tiefen Fussacher Bucht, die viel schneller bis auf Seespiegelhöhe verfüllt ist als die immerhin 70 m tiefe Bregenzer Bucht oder gar das 250 m tiefe Hauptbecken. Folgerung: 2500 Jahre sind für die Seeverlandung eine gewaltig zu kurze Zeitspanne.

Die erste Überlegung ergab für die Auffüllung des Bodensee-Obersees rund 10 000 Jahre, was aus den Zahlenwerten im Kapitel »Rheintalseen« hergeleitet wurde. In diesem Fall wurde nicht einbezogen, dass die hauptsächliche Verfüllung der Seen direkt im Vorfeld der abschmelzenden Gletscher vonstatten ging, die Unmengen an Moränenschutt hinterliessen. Ausserdem wurde nicht beachtet, dass in der damaligen Späteiszeit keine



Abb. 26: Eingeengt durch weit in den Bodensee vorgebaute Dämme führt der Rhein dem Bodensee jährlich rund 3 Millionen m³ Kies und Sand sowie eine bedeutende Menge Flusstrübe zu (Bild), was im Laufe riesiger Zeiträume den See gänzlich zum Verschwinden bringen wird. Foto: N. Wächter

oder höchstens eine geringe vor Abtrag schützende Pflanzendecke vorhanden war. Wie Datierungen an Holzfunden aus Bohrkernen belegen, befand sich die Deltaspitze von Ill und Frutz vor 10 000 Jahren bei Kriessern im mittleren Rheintal. 10 000 Jahre waren also nötig, um das von Bregenzer Ach und Dornbirner Ach bereits teilweise zugeschüttete untere Rheintal dem See zu entreissen. Folgerung: Selbst 10 000 Jahre sind eine viel zu kurz bemessene Verfüllungszeit.

Im dritten Szenarium stecken grosse Unterlassungsünden.

Die erste Unterlassung betrifft den Rhein als Fliessgewässer gegenüber dem See als stehendes Gewässer. Wenn der See von Bregenz bis Konstanz zur Aufschüttungsebene werden soll, so muss der Rhein bis Konstanz fließen, um Material transportieren und ablagern zu können. Das ist nur möglich, wenn der Rhein bei der heutigen Mündung in den See wenigstens 50 m höher zu liegen kommt als heute. Das heisst, er muss von Konstanz zurück bis Bregenz eine schiefe Ebene aufbauen (Abb. 27). Diese wird ohne Zweifel seitwärts weit über das heutige Seeufer hinaus auch ausgedehnte Areale des Küstenlandes überdecken. All dies benötigt bereits mindestens das doppelte Schuttvolumen als das Seebecken allein.

Die zweite Unterlassung betrifft das Rheintal und seine grossen Nebentäler. Wenn sich die Aufschüttungsebene bei Bregenz bis 70 m über dem Seeniveau ausbreiten muss, dann muss das ganze Rheintal höher zu liegen kommen. Die Konstruktion (Abb. 27)

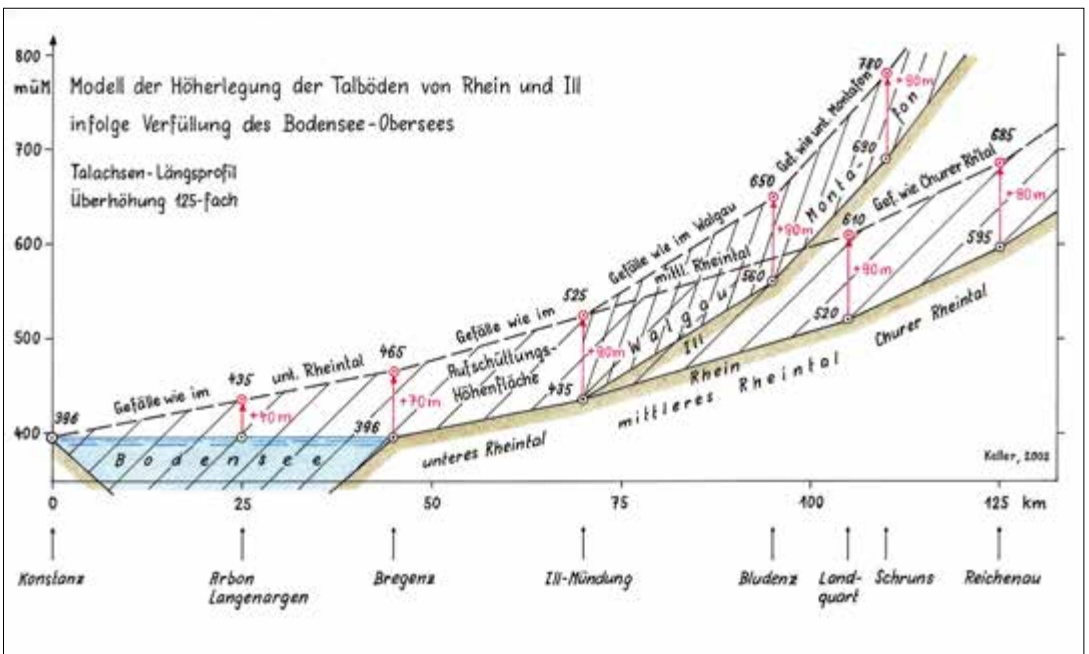


Abb. 27: Der Rhein und die Nebenflüsse füllen unaufhaltsam das Bodenseebecken mit Geröll, Sand und Feinmaterial auf. Dabei muss der Rhein, damit er fließen kann, bedeutend mehr als das eigentliche Seebecken aufschütten. Um den ganzen Obersee bis Konstanz eindecken zu können, muss er eine schiefe Ebene aufbauen, die das gesamte Rheintal und die unteren Nebentäler um 70 bis 90 m erhöhen wird.

basiert auf den Gefällsverhältnissen, die auch heute im natürlich gewachsenen Rheintal festzustellen sind, wobei alles von Bregenz nach Konstanz vorgeschoben wurde. Diese Aufschüttung zieht das Rheintal hinauf und wirkt sich bis Thusis aus, aber logischerweise auch bis ins Montafon hinein. Weitere Seitentäler, die flach ins Haupttal einmünden, werden ebenfalls durch Aufschüttung höher gelegt, wie Prättigau, Klostertal, unterstes Tal der Bregenzer Ach. Alles aufsummiert ergibt sich, dass das Aufschüttungsvolumen im Rheintalraum ein Mehrfaches der reinen Seeverfüllung ausmacht. Ausgehend von den 14 000 Jahren der Seeverfüllung ist daher mit einer etwa 3-fachen Dauer zu rechnen, bis der Obersee in der Konstanzer Bucht verschwindet und der Alpenrhein direkt in den Seerhein übergeht. Es werden deshalb bis zum »Verlöschen« des Bodensee-Obersees mindestens 40 000 Jahre verstreichen.

9.3 UNTERSEE UND ÜBERLINGER SEE – ZWEI SEHR VERSCHIEDENE SCHICKSALE

Beim Ausscheiden des Obersees als stehendes Gewässer nach rund 40 000 Jahren werden Untersee und Überlinger See noch immer existieren. Zwar wird der in weiten Teilen untefe Untersee durch die lokalen Bäche zu einem grösseren Teil verfüllt sein, aber die letzten Seereste bis Stein am Rhein werden dem Rhein vorbehalten bleiben. Sei-



Abb. 28: Entlang dem grossenteils wenig tiefen Untersee zeigen die zahlreichen Deltas der zufließenden Bäche, dass der See langsam, aber unaufhaltsam kleiner wird. Aber erst, wenn der Obersee verfüllt sein wird, beginnt die endgültige Zuschüttung durch den Rhein. So dürfte der Untersee erst in 50–60 000 Jahren völlig verschwinden. Foto: Archäologie TG

ne Auflandungsarbeit muss auch wieder, was nicht vergessen werden darf, Auswirkungen bis weit ins Rheintal zurück haben. Bis zur Endverfüllung des Untersees bis Stein am Rhein sind nochmals weitere 10 000 bis sogar 20 000 Jahre zu veranschlagen (Abb. 28).

Und was steht nach den 40 000 Jahren der Zuschüttung des Obersees dem Überlinger See bevor? Weil er noch heute mit 150 m sehr tief ist, wird er die lokale Materialzufuhr seiner Bäche über diese Zeit hinaus gut verkraften. Der Rhein, der dann über den verfüllten Obersee hinweg zum Untersee gerichtet ist, wird wenig zur Verfüllung beitragen. Im Gegenteil, der Überlinger See wird noch hoch gestaut, da der Rhein ja auch über dem Untersee eine schiefe Ebene aufbauen muss. Der verfüllte Untersee bedingt bei Konstanz schätzungsweise ein Niveau der Rheinebene von 420–430 m ü.M. So dürfte der Überlinger See 70 000 Jahre überstehen und, wer weiss, beim Aufstauen vielleicht von Neuem die Stahringer Rinne (vergleiche Kap. zum Überlinger See) als Abfluss benutzen wie damals vor 19 000 Jahren.

10 SCHLUSSGEDANKEN – ZWEI ZUKUNFTSVISIONEN

Das dargelegte, dem Bodensee bevorstehende Ende ist trotz Einbezug geologischer Mechanismen nur eine rechnerische Extrapolation. Sie könnte sich annähernd bewahrheiten, sofern die zugrunde gelegten landschaftsformenden Prozess weiterhin und in gleicher Intensität anhalten. Gerade dies ist jedoch in höchstem Mass fraglich. Verschiedene, alles Bisherige vollständig umwerfende Veränderungen sind denkbar. Zwei einander diametral gegenüberstehende Visionen sollen deshalb noch kurz angesprochen werden.

10.1 PERIODIZITÄT DER EISZEITEN

Die Erforschung des Eiszeitalters hat seit Mitte 20. Jahrhundert gewaltige Fortschritte gemacht. Insbesondere konnte immer klarer herausgearbeitet werden, dass innerhalb der letzten gut 2 Mio. Jahre Eiszeiten in grösserer Zahl als bisher angenommen vorgekommen sind. Sie traten auffällig periodisch und mit ähnlichen Klimaausschlägen auf. Der Rhythmus liegt bei den jüngeren Eiszeiten bei rund 100 000 Jahren, wobei darin die Warmzeiten jeweils nur etwa 10 000 Jahre ausmachen. Der Übergang von einer Warmzeit in die nächst folgende Eiszeit ist schleichend, dauert es doch, unterbrochen von ersten Kaltphasen, um die 80 000 Jahre bis zum glazialen Kälte-Maximum. Anschliessend führt eine rasche Erwärmungszeit zum nächsten Interglazial.

Von diesen Erkenntnissen ausgehend kann angenommen werden, dass die gegenwärtige Warmzeit auch ein Interglazial ist, das bereits mehr als 10 000 Jahre andauert. Ab »jetzt« müsste daher der Übergang zur nächsten Eiszeit fast unmerklich einsetzen (Abb. 29). In etwa 40 000 Jahren würden mit den ersten hochglazialen Käl-

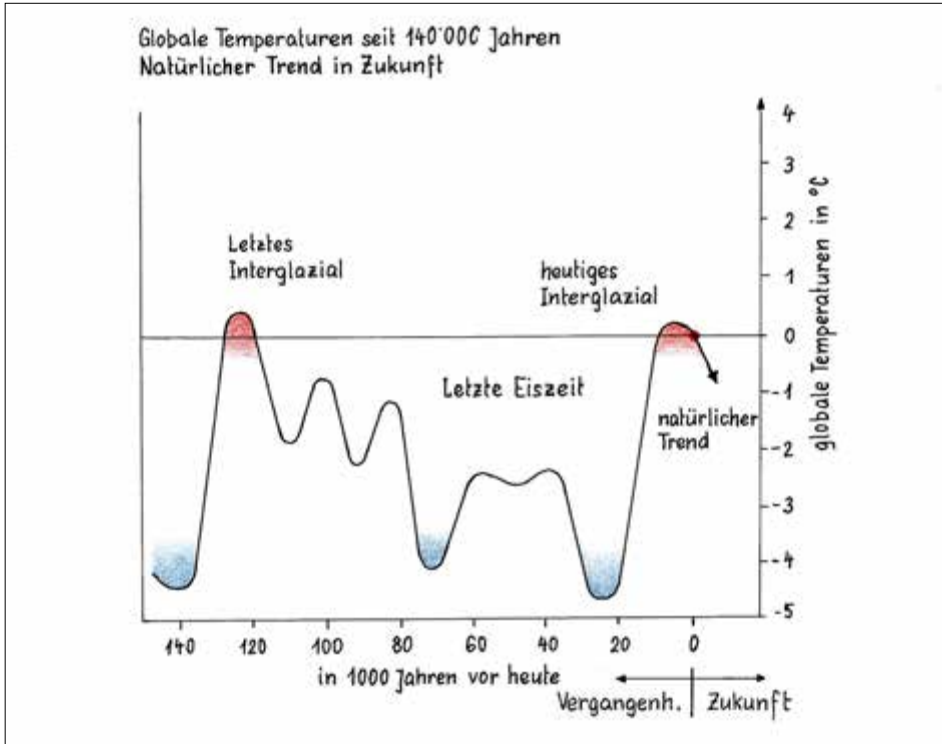


Abb. 29: Gemäss dem Temperaturverlauf der letzten Eiszeit ist anzunehmen, dass das heutige Interglazial langsam zu Ende geht und das Klima auf die nächste Eiszeit zustrebt. Ihre Gletscher würden den Bodensee lange vor der endgültigen Verfüllung wiederum unter Eis begraben.

teperioden die Gletscher aus den Alpen heraus bis ins Mittelland vorstossen. Der Rheingletscher würde dann den Bodensee, den Untersee und den Überlinger See unter einem gewaltigen Eispanzer begraben, noch kurz bevor der Obersee völlig verlandet ist.

10.2 ANTHROPOGEN AUSGELÖSTE KLIMAÄNDERUNG

Im gesamten Verlauf der Erdgeschichte haben Lebewesen und Klima sich stets gegenseitig beeinflusst. Tiefgreifende Umstellungen sind nach bisherigen Erkenntnissen immer von abrupten Klimaänderungen ausgelöst worden, welche in der Biosphäre zu Auslöschphänomenen und zu Neuorientierungen geführt haben. Noch nie aber ging umgekehrt von Lebewesen eine so starke Einflussnahme auf Atmosphäre, Land und Ozeane aus, dass dadurch geologisch »plötzlich« unabsehbare Prozesse in Gang gesetzt worden wären.

Gerade dies auszulösen, scheint der Mensch in jüngster Zeit im Begriff zu sein. Er könnte die Umwelt durch seine Beeinflussung aus dem sehr labilen Gleichgewicht werfen. Anzeichen dafür meint man allenthalben feststellen zu können. Bis Ende 21. Jahrhundert wird eine weltweite Temperaturzunahme um 4°C prognostiziert, was ein

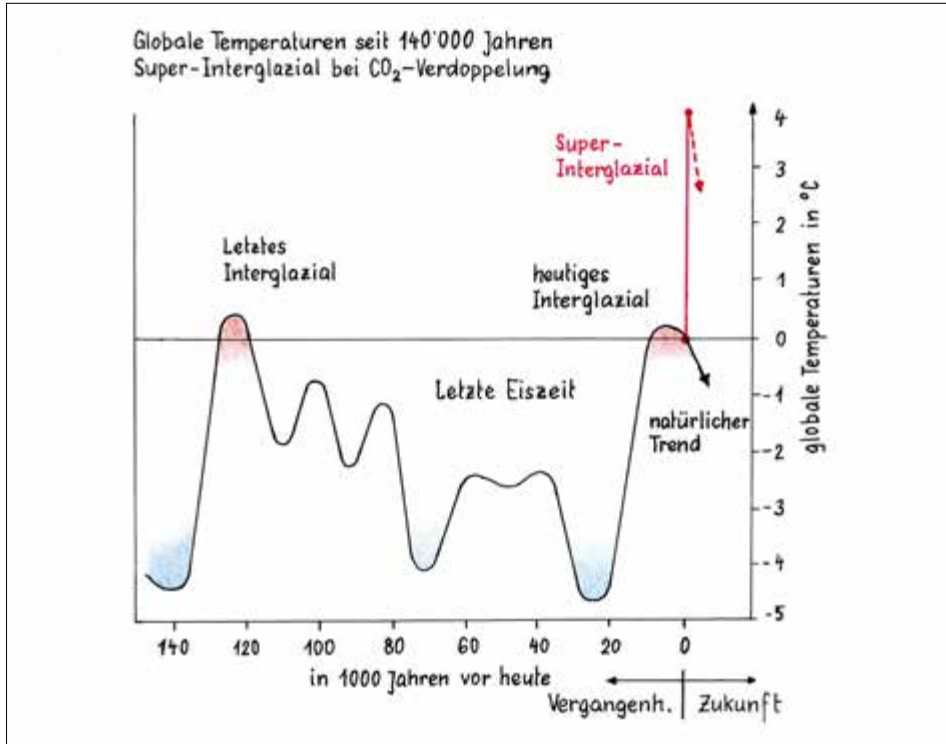


Abb. 30: Wenn für das laufende 21. Jahrhundert die Klimaerwärmung aufgrund der Modellrechnungen anhält, so ist bis 2100 eine um 4° C erhöhte Temperatur, ein Super-Interglazial, zu erwarten. Damit würde es keine nächste Eiszeit mehr geben und der gesamte Bodensee würde durch den Materialeintrag der Zuflüsse schliesslich vollständig verfüllt.

»Super-Interglazial« zur Folge haben könnte, welches eine nächste Eiszeit verhindern würde (Abb. 30). Für den Bodensee und sein Umfeld wäre dies von höchster Bedeutung, denn damit würde der Bodensee doch dem Verfüllungstod zugeführt. Im Weiteren könnten Klimaänderung, Schadstoffbelastung der Atmosphäre und der Böden die Vegetation und im Besonderen die Wälder im Gebirge so stark in Mitleidenschaft ziehen, dass ihre Schutzfunktion gegenüber Erosion weitgehend verloren ginge. Hochwasser-Katastrophen und gewaltige zu Tal beförderte Schuttmassen würden dann den Bodensee tatsächlich schon nach 10.000–20.000 Jahren auslöschen.

Dies sind Visionen. Sie könnten eintreten. Aber das zukünftige Geschehen kann auch völlig anders verlaufen. Wie auch immer – die Erde ist äusserst dynamisch und so werden stets geologische Prozesse wirksam sein, welche die Landschaft umgestalten und den Lebenslauf des Bodensees irgendwie und irgendwann einmal abschliessen (Abb. 31).



Abb. 31: Im menschlichen Zeitmass wird der Bodensee für die kommenden Generationen weiterhin das Wahrzeichen im nördlichen Alpenvorland sein. Er wird weiterhin die ihn aufsuchenden Menschen durch seine naturgegebene Schönheit und seine (hoffentlich erhaltenen) naturnahen Landschaftsabschnitte erfreuen. Foto: O. Keller

ZITIERTE LITERATUR

- EBERLE, M. (1987): Zur Lockergesteinsfüllung des St. Galler und des Liechtensteiner Rheintals. *Eclogae geologicae Helvetiae* 80/1: 193–206; Basel.
- HANTKE, R. (1980): Eiszeitalter, Band 2: 703 S.; Ott, Thun.
- JORDI, U. (1986): Glazialmorphologische und gletschergeschichtliche Untersuchungen im Taminatal und im Rheintalabschnitt zwischen Flims und Feldkirch. *Geographica Bernensis* G. 27, Bern.
- KELLER, O. (1988): Ältere spätwürmzeitliche Gletschervorstösse und Zerfall des Eisstromnetzes in den nördlichen Rheinalpen (Weissbad/Bühl-Stadium). *Physische Geographie* 27A: 241 S. und 27B: 291 S., Zürich.
- (1989): Geologie und Landschaftsgeschichte der Werdenberger Alpen. *Werdenberger Jahrbuch*: 27–32; Buchs SG.
 - (1990): Die geologische Entwicklung des Alpenrheintals. *Werdenberger Jahrbuch*: 12–19; Buchs SG.
 - (1994): Entstehung und Entwicklung des Bodensees – ein geologischer Lebenslauf. In: MAURER, H. (Hrsg.): *Umweltwandel am Bodensee*: 33–92; UVK, St. Gallen.
 - (1995): *Kleine Geologie und Landschaftsgeschichte Vorarlbergs*: 35 S.; Vigi-Druck, Dornbirn.
 - (2005): Letzte Eiszeit und Landschaftsformung am Hochrhein und am Alpenrhein. In: *Der Rhein – Lebensader einer Region*. *Neujahrsblatt der Natf. Ges. in Zürich*: 54–74, Zürich.
 - (2009a): Als der Alpenrhein sich von der Donau zum Oberrhein wandte. *Schrr VG Bodensee* 127: 193–208; Friedrichshafen.
 - (2009b): Geologische Geschichte des Alpenrheintals. In: BROGGI, M.F. (Hrsg.): *Natur und Landschaft im Alpenrheintal*. *Liechtenstein Politische Schriften* 45: 9–50; Liechtensteinische Akademische Ges., Schaan.
 - (2010): *Gewässer der Nordostschweiz – ihre Natur und Ihr Umfeld*. *Swissregiobank*: 64 S.; Gossau SG.
 - (2012): *Die Eiszeiten*. *Aktuell* 3/2012: 36 S., Lehrmittelzentrale Kanton St. Gallen, Rorschach.

- KELLER, O. & KRAYSS, E. (1988): Eisrandkomplexe im nördlichen Bodenseeraum. Führer zur Quartärexkursion der Universitäten Stuttgart-Hohenheim und Zürich-Irchel; Zürich.
- (1991): Geologie und Landschaftsgeschichte des voralpinen Appenzellerlandes. Das Land Appenzell 21/22: 115 S.; Herisau.
- (1993): The Rhine-Linth-Glacier in the Upper Würm: A model of the last alpine Glaciation. Quaternary International 18: 15–27; INQUA/Pergamon Press Ltd., Oxford, New York.
- (1994): Die Bodensee-Vorlandvereisung des Rheingletschers im Konstanz-Stadium der letzten Eiszeit. Berichte St. Gall. Natw. Ges. 87: 31–40; St. Gallen.
- (2005): Der Rhein-Linth-Gletscher im letzten Hochglazial. Vierteljahresschrift Natf. Ges. in Zürich 150 (1–2): 19–32 und (3–4): 69–85; Zürich.
- KELLER, P. (1929): Pollenanalytische Untersuchungen an Schweizer Mooren und ihre florensgeschichtliche Deutung. Jahrbuch St. Gall. Natw. Ges. 64; St. Gallen.
- KRAYSS, E. & KELLER, O. (1996): Hydrographie des Bodenseeraums während der letzten Vorlandvereisung. Schr. des Vereins für Gesch. des Bodensees und seiner Umgebung 114: 111–123; Friedrichshafen.
- KOBEL, M. (1990): Die hydrologischen Verhältnisse in der Talebene des Werdenbergs. Werdenberger Jahrbuch; Buchs SG.
- MÜLLER, B.U. (1995): Das Walensee-/Seeztal – eine Typusregion alpiner Talgenese. Diss. Geol. Inst. Univ. Bern: 227 S.; Bern.
- OBERHAUSER, R. (1998): Geologisch-tektonische Übersichtskarte von Vorarlberg 1:200 000 mit Erläuterungen: 42 S.; Geologische Bundesanstalt Wien.
- PENCK, A. & BRÜCKNER, E. (1909): Die Alpen im Eiszeitalter. 3 Bände: 1999 S. Tauchnitz, Leipzig.
- SCHREINER, A. (1975): Zur Frage der tektonischen oder glazigen-fluviatilen Entstehung des Bodensees. Jber. Mitt. Oberrhein. Geol. Verein, N.F. 57: 61–75; Stuttgart.
- (2000): Über die Entstehung des Bodenseebeckens (SW-Deutschland). Zool. Geol. Paläontol. Teil 1/3–4: 495–466; Stuttgart.
- SCHREINER, A., OBERHAUSER, R., OTT, G. & ZITZMANN, A. (1991): Geologische Übersichtskarte 1:200 000, Blatt CC 8718 Konstanz. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- WAGNER, G. (1962): Zur Geschichte des Bodensees. Jahrbuch des Ver. zum Schutz der Alpenpflanzen und -tiere, Bd. 27; München.
- WESSELS, M. (1995): Bodensee-Sedimente als Abbild von Umweltveränderungen im Spät- und Postglazial. Göttinger Arbeiten zur Geologie und Paläontologie 66: 109 S.; Göttingen.
- WILDI, W. (1984): Isohypsen-Karte der quartären Felstäler in der Nord- und Ostschweiz mit Erläuterungen. Eclogae geologicae Helvetiae 77/3; Basel.

Anschrift des Verfassers:

Priv.-Doz. Dr. Oskar Keller, Falzigenweg 1. 22, CH-9450 Lüchingen

o.keller@paus.ch