

Ein neues EEM-zeitliches Umweltarchiv am Spiezberg

(Schweizer Alpen) im Kontext
der mittel- und spätpleistozänen
Landschaftsentwicklung

Autoren

Peter Zwahlen,
Willy Tinner,
Elisa Vescovi

Zusammenfassung

Karten- und Profilkonstruktionen in der Region Thunersee (Berner Oberland, Schweiz) haben in vergangenen Untersuchungen zu Spekulationen über unterschiedliche, mehrphasige eiszeitliche Erosionsvorgänge und Sedimentakkumulationen geführt. Wissenschaftshistorisch nachweisbar sind bereits im 19. Jahrhundert Erklärungsmodelle mit mehreren quartären Eiszeiten. Bereits zu Beginn des barocken 18. Jahrhunderts besuchte und beschrieb Johann Jakob Scheuchzer die «sintflutlich» überschotterten Schieferkohlen entlang des damaligen Kanderlaufes und den im Bau befindlichen Kanderdurchstich durch die Strättligmoräne (SCHEUCHZER 1746, *Tafel 2*). Bei diesen Schieferkohlen handelt es sich um organische Sedimente aus Seen, Teichen und Mooren, die im Verlauf des 20. Jahrhunderts quartären Interglazialen und/oder Interstadialen zugeordnet wurden. Am Spiezberg über dem linken Thunerseeufer wurde 2005 zur geotechnischen Baugrunderkundung eine Sondierbohrung abgeteuft. Unerwartet erschloss diese 7 m mächtige intramoräne

Stillwassersedimente (laminierte Silte und Tone mit eingelagerter Gytja und fossilen Holzresten), welche sich ausgezeichnet für stratigraphische Studien eignen. Die vorliegenden Analysen (Sedimentologie, Palynologie, ¹⁴C-Datierung, Paläogeographie) führen zu folgenden Erkenntnissen: Bei den See- oder Teichsedimenten handelt es sich um warmzeitliche Ablagerungen, die wir als Arbeitshypothese vorerst dem Eem-Interglazial zugeordnet haben. Die Stillwasserablagerungen sind in kaltzeitliche Flussschotter und Moränen eingebettet. Paläogeographische Korrelationen mit bereits bekannten mittel- bis spätpleistozänen glazigenen Sedimenten aus der Region Thunersee – Aaretal erlauben eine räumliche Rekonstruktion einerseits der Eem-Gewässer und andererseits der nachfolgenden Frühwürm Vorstossschotter.

Abstract

Map and profile constructions in the region Lake Thun (Bernese Oberland, Switzerland) lead to speculations of different glacial erosions (extensive gravel during glacial advan-



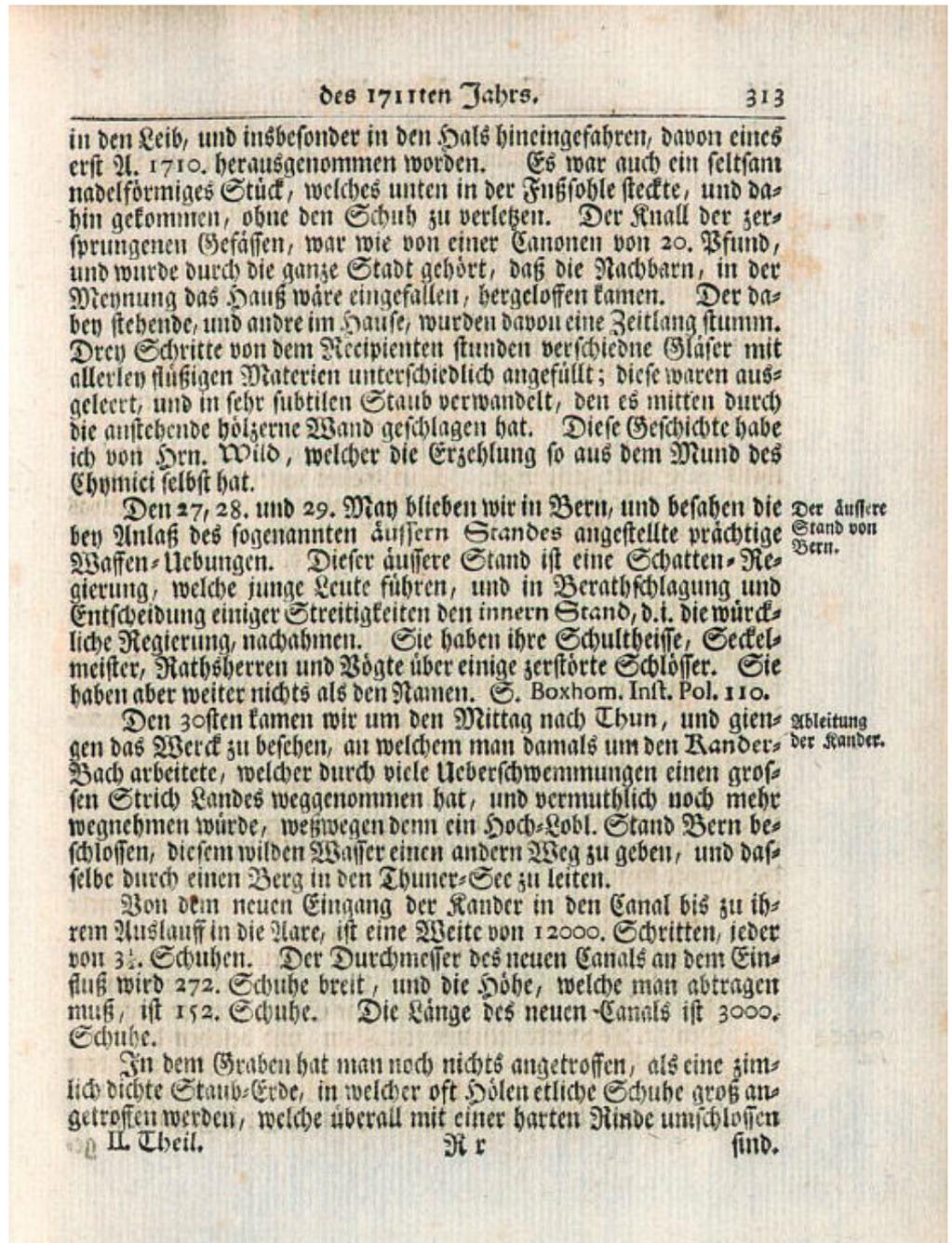
Abb. 1: Spiezberg Nord Blick ca. nach Osten.

Tafel 2: Scheuchzers Beschreibung der laufenden Bauarbeiten am Kanderdurchstich und der Schieferkohle-Schichten im Glütschbachtal, am damals noch aktiven Kander-Flusslauf.

Harte Rinde: Sinterbelag in Hohlräumen aus Kalzit oder Gips Morochti: weisser Chalcedon, Quarzit, Kieselsteine, oder «Marienglas».

Selenite Falcoso: Gips: grobspätig tafelig transparent, «Marienglas». **Gebraubene Fische:** hat seit Scheuchzer niemand mehr beobachtet.

Oeninger-Steinbruch: Fossilreiche Süßwasserkalke des Jungmiozäns bei Öhningen (Untersee Südbaden, Ldkr. Konstanz). Fossilien inkl. Scheuchzers «*homodiluvii testis*» siehe Heer (1879).



ce, dynamic erosion during ablation) in early studies. Historically explanatory models operating with several ice ages are proven back to the 19th century. At the beginning of the baroque 18th century, Johann Jakob Scheuchzer mislead himself to «diluvial» speculations based on his precise observations about «schist coals» covered by gravel

layers studied during the construction work for the Kander river deviation (SCHEUCHZER 1746, *Tafel 2*).

This «schist coals» consist of organic sediments from lakes and mires and were attributed to Quaternary interglacials or interstadials during the 20th century. In 2005, at Spiezberg, above the left shoreline of Lake

sind. In diesen Hölen finden sie Steine, welche Morochti geneunt werden. In andern Orten haben sie auch Lager von dem Selenite Falcolo angetroffen.

Bergwerke.

Wir giengen auch in Begleit Hrn. Prof. Eicin, eines Arme-
niers, Griechischer Religion, die neuen Bergwerke der Herren Vi-
schern zu besehen, welche in dem Berg an der Rander fast eine Stunde
in die Länge gehen. Wir sahen daselbst unter den feuerstein-artigen
Felsen ein Lager von 5 - 10. Zoll, von einem sehr feinen etwas gelben
Thon, woraus Kochgeschirz gemacht wird, welches das Feuer sehr
wol aushält; unter diesem Lager ist ein anders von Kieselsteinen, 2.
Zoll; unter diesem ist noch eines von gelbem mit braun untermeng-
ten Thon; unter diesem ein aschfarbichter Mergel; und endlich ein
sehr seltsames Lager von Holz, welches an der Luft theils hart wird,
theils in Stücke zerspringt. Von diesem unterirdischen Holz ist
merkwürdig, daß die Stämme und Aeste nicht rund, sondern etwas
platt zusammen gedrückt sind. Nichts destoweniger haben sie an ei-
nigen Orten die Rinde, ja gar die Blätter noch. Dieses Holz läßt
sich verbrennen, und gibt ein gar starkes Feuer, daß man es an statt
der Steinkohlen gebrauchen kan. Der Grund, warum dieses Holz
zusammen gedrückt und platt ist, ist meiner Meinung nach dieser:
weil dasselbe von dem Wasser der Sündfluth ganz weich gemacht, und
hernach von dem darüber gekommenen Felslager ist zusammen ge-
drückt worden. Diejenigen welche den Satz von der Ueberschwem-
mung nicht annehmen, kommen dadurch auf die Gedanken, ob nicht
die Natur so verschiedne Arten Holz in der Erde selbst vielleicht aus
Lett gestaltet hätte: mich aber bestärcken diese Beobachtungen in der
Meinung von der Ueberschwemmung; denn wie solte dieses Holz
nicht zusammen gedrückt worden seyn, von so viel Millionen Centnern
die darüber liegen. Fast ein gleiches siehet man an den gegrabnen
Fischen, welche auch zusammen gedrückt sind, daß man nichts mehr
siehet, als das Ohren-Bein und die Schuppen; desgleichen an un-
zähligen Schnecken und Muscheln, welche zerdrückt und zerbrochen
sind. Alle Fische, welche man in dem Deninger-Steinbruch findet,
haben den Rückgrat noch, weil nur wenige Steine darüber liegen.

Steinkoh-
len.

Den 31. Tag verreisten wir von Thun, und besahen die neuen
Steinkohlen-Gruben, welche an der andern Seite der Aare über dem
Dorff Erla sind, welches Dorff eine Viertelstunde von Stäffisburg
ist. Diese Steinkohlen sind pechschwarz, das Lager ist gegen Mittag
ge.

Thun, an exploration drilling was conducted for an excavation pit. As a result, 7 m thick intermoraine still water sediments (laminated silt and clay with gyttja and fossil wood residues) were unexpectedly found. This sediment profile has been ideally suited for stratigraphical studies. The presented analyses (sedimentology, palynology, radiocar-

bon dating, paleogeography) lead to the following results: The lake or pond sediments, respectively, are interglacial deposits, which, geo- and biostratigraphically, we assign to the Eemian interglacial. These still water deposits are intercalated between coarse river deposits and glacial till. Paleogeographical correlations with pre-identi-

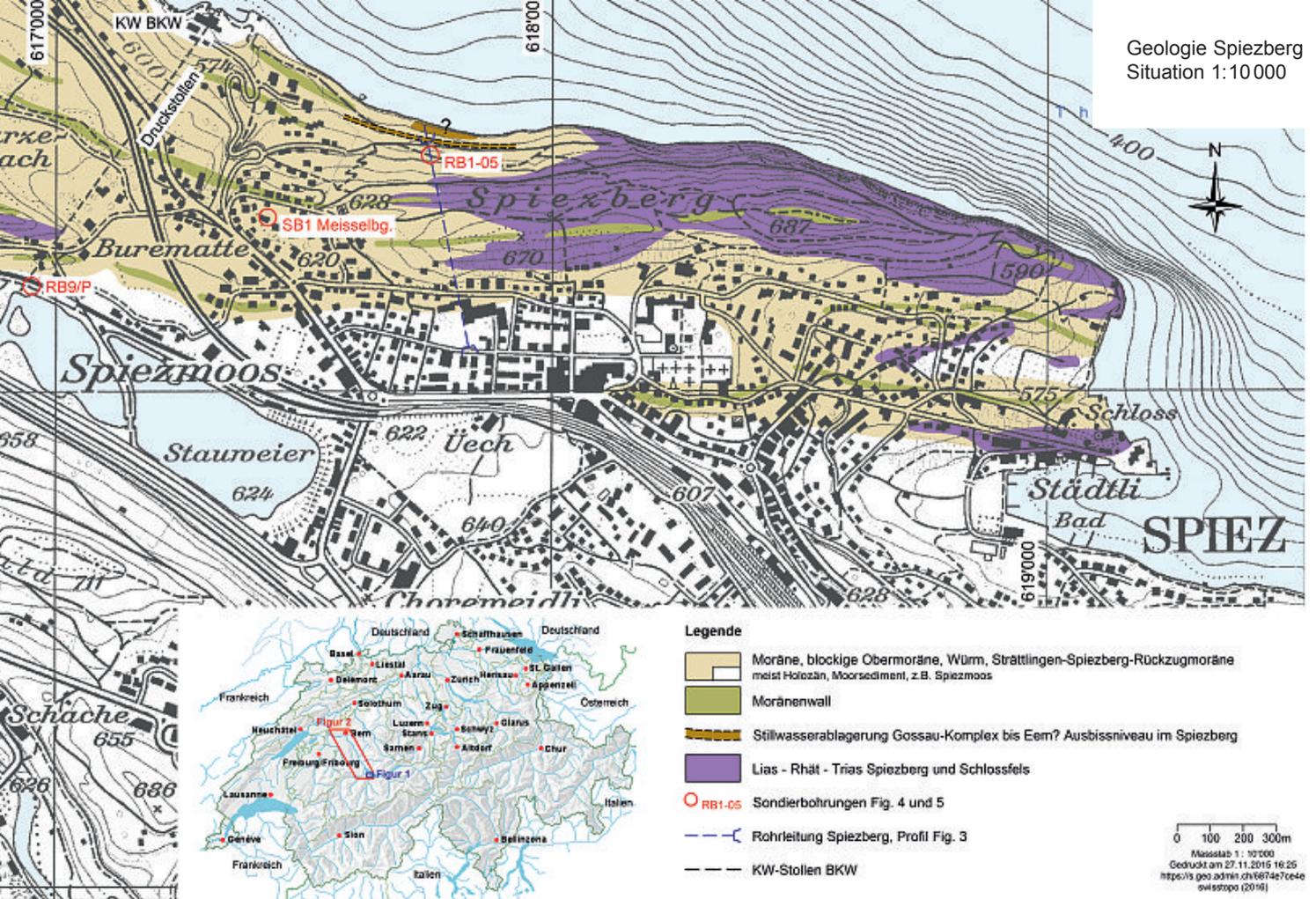


Abb. 2: Geologie Spiezberg, Situation Original 1:10 000, Abbildung gemäss Koordinaten und grafischem Massstab verkleinert gedruckt.

fied sediments from the middle to upper Pleistocene of the region Lake Thun – Aare Valley allow a spatial reconstruction of the Eemian-water bodies and the following early Würm glacial advance gravels.

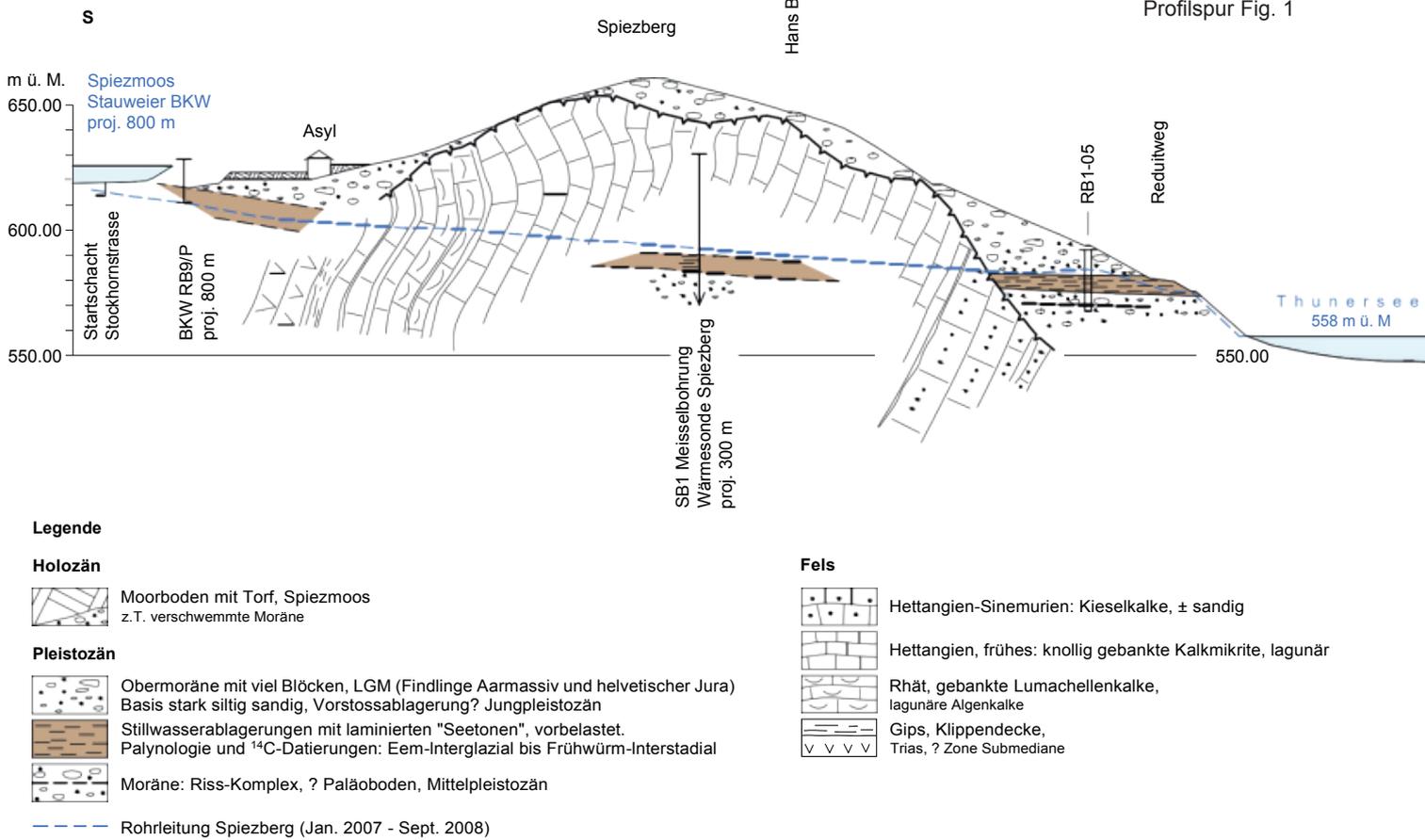
Einleitung

Im Sommer 2005 erteilte das Bauamt der Gemeinde Spiez den Projektierungsauftrag für eine Entwässerungsanlage an das Ingenieurbüro Kissling und Zbinden AG. Die Projektgenieure entwarfen eine Rohrleitung, als gesteuerte Richtbohrung ab einem Startschacht durch den Spiezberg an das Steilufer des Thunersees (Reditweg) vorgegraben, wo das Meteorwasser dann in einer erdverlegten Leitung in den See abgeleitet werden sollte (KISSLING + ZBINDEN 2010). Für die geologisch geotechnischen Untersuchungen wurde das Geotechnische Institut beauftragt (GI SPIEZ 2005), welches zur Erkundung der Felsoberfläche und der Moränenbedeckung neben mehreren Ramm-

sondierungen die Rotationskernbohrung RB1-05 über dem Seeufer ausführen liess. Die in den Jahren 2007 und 2008 realisierte Richtbohrung für die Rohrleitung ist auf der Situation *Abb. 2* (siehe *Kap. «Geologische Situation»*) und im geologischen Profil *Abb. 3* (siehe *Kap. «Geologische Situation»*) dargestellt. Die Projektgenieure charakterisierten den Vortrieb von S nach N wie folgt:

- Felsstrecke (Liaskalke): mittelhart, meist kleine Kalksplitter, max. 5 mm
- Obere Moräne Spiezberg N: erste 30 m wie Nagelfluh, hart und blockig, anschliessend 30 m
- Feinkörnige Seesedimente: Tonmergel und Ton mit eingelagerten Steinen und «Nagelfluhblöcken».

Die Moränenstrecke N war bohrtechnisch wegen der inhomogen blockigen Ausbildung (wechselhafte Druckfestigkeiten und Bohrwiderstände) sehr schwierig auszuführen. In den Seesedimenten driftete der Bohrkopf ab und musste mehrmals ausgewechselt



und neu gerichtet werden, was zu langfristigen Bauverzögerungen führte (KISSLING + ZBINDEN AG 2010, 2015).

Die lückenlos gekerntete Rotationsbohrung RB1-05 (Abb. 5, siehe Kap. «Sondierbohrung RB1-05») ermöglichte es den Autoren (P. Zwahlen verantwortlich für die Beschreibung der Geologie und W. Tinner & E. Vescovi für die Palynologie) die vertikale Abfolge der wärmezeitlichen Seesedimente zu dokumentieren und zu untersuchen. Insbesondere interessierte uns die Frage, ob die See- und Stillwassersedimente einem, in den Alpen und Alpenvorländern bekannten Würm-Interstadial und/oder Interglazial zugeordnet werden können. Die stratigraphische Lage der Stillwasserablagerungen zwischen verschiedenen Moränen liess ein Alter von über 30000 Jahren (Vorstoss des Aaregletschers zur Würmeiszeit bzw. zum letzten glazialen Maximum LGM) vermuten. Um diese Frage zu beantworten, wurden geologische (z.B. Körnung, Textur), physikalische (Radiokarbondatierung) und botanische (Palynologie)

Methoden eingesetzt, die neue Erkenntnisse zur Quartärgeologie und Vegetationsgeschichte am Spiezberg ermöglichten.

Die Bedeutung der neuen Spiezbergsedimente lässt sich anhand der Forschungsgeschichte veranschaulichen. Bereits SCHEUCHZER (1746) sowie später im 20. Jhd. BECK & GERBER (1925), SCHLÜCHTER (1976) und WELTEN (1982, 1988) und andere Forscher hatten die Schichtfolgen von kalt- und wärmezeitlichen Sedimenten (Vorstossschottern, Moränen, Deltaschottern, «Letten», und Schieferkohlen) beschrieben. Die wohl ältesten Interpretationen reichen bis ins frühe 18. Jahrhundert zurück. Sie erfolgten 1711 durch Johann Jakob Scheuchzer am damaligen Kanderlauf und beim Kanderdurchstich 1714 unter der Strättligmoräne (Gwatt, Thun Süd, SCHEUCHZER 1723 und 1746). SCHEUCHZER deutete in Unkenntnis von Eiszeitkonzepten seine noch heute gültigen Beobachtungen mit Sintfluthypothesen, wobei er die beobachteten und sogar botanisch klassifizierten Baumstämme und Zweige im Prinzip richtig

Abb. 3: Geologisches Profil 1:2857 Spiezberg, Profilspur Abb. 2.

als überschüttete Zeugen einer fruchtbaren (warmzeitlichen) Vegetation beurteilte (Tafel 2). Klar im eiszeitlichen Kontext interpretiert wurden die unterdessen klassischen Schieferkohleprofile erstmals durch BACHMANN (1870). Im 20. Jh. hat PAUL BECK (1925, 1932, 1934 und 1938) die regionale Quartärstratigraphie detailliert aufgenommen, beschrieben und bereits in einen Rahmen von mehrfachen Gletschervorstössen und zwischengeschalteten Warmzeiten gestellt. Später erarbeitete SCHLÜCHTER (1976) eine Detailstratigraphie unter Einbezug von ^{14}C -Altersdatierungen, die weitgehend in die Tab. 1 (siehe Kap. «Verwendete quartärstratigraphische Nomenklatur») übernommen wurden. Darauf aufbauend unternahm WELTEN (1982 und

1988) eine detaillierte palynologische Analyse der glazigenen Schichten im Glütschbachtal (Profile «Wässeriflue» und «Alte Schlyffi» mit 8 bzw. 7.5 m mächtigem Eem-Interglazial, WELTEN 1982). Daraus resultierte eine Klimarekonstruktion des Zeitraumes Riss-Würm. Weitere Recherchen in seismischen (BODMER ET AL. 1973, MATTER ET AL. 1971) und speläologischen (HÄUSELMANN 2010) Forschungsarbeiten im Thunerseebecken haben letztlich eine Modellierung der würmzeitlichen Talgenese ermöglicht. Hier betten wir die neuen Resultate vom Spiezberg in diesen Forschungskontext ein, um eine möglichst ganzheitliche und moderne Interpretation der vorhandenen Befunde zu ermöglichen.

Tab. 1: Stratigraphische Schichtbezeichnungen gemäss SCHLÜCHTER (1976) und WELTEN (1982).

Schicht, informelles Formationsglied oder Member	Epoche / Stufe	Alter J. BP
Alluvionen, Kander- und Glütschbachschotter	Holozän	< 11 700
Strättligen-Spiezberg-Moräne, Rückzugsmoräne, korrel. mit Koblach-Schänis-Stadial des Rheingletschers (Hantke 1980)	Älteste Dryas, Spätwürm	15 000 – 17 000
Bärenholz-Grundmoräne, bzw. Grundmoräne Alte Schlyffi oder Rotachewald-Grundmoräne	Jungpleistozän Würm LGM (MIS 2)	< 25 000
Münsingen-Schotter, Vorstössschotter	Spätwürm (Turicum 6)	< 30 000
Silte und kiesige Sande mit Schieferkohle, entspricht annähernd dem Gossau-Komplex (Burga 2006)	Mittelwürm Interstadiale (Turicum 4–5, MIS 3)	< 60 000
Guntelsei-Schotter, Fluss- und Moränenschotter, vorbelastet, lagenweise verwittert, oxidiert	Frühwürm Stadiale (Turicum 1–3, MIS 4–5a)	< 115 000 < 120 000 ?
Tonsilte und Sande, «Letten» mit wenig Schieferkohle viel Gastropoden, z.T. mit Guntelsei-Schotter, vorbelastet	Eem-Interglazial Jungpleistozän, (MIS 5e)	115 000 – 130 000
gelbliche Schotter, stark verfestigt, tiefgründig verwittert, Hani-Deltaschotter, Glütschtal-Deltamoräne, Guntelsei-Schotter (widersprüchliche Zuordnung)?	Mittelpleistozän Riss-Eiszeit, Spättriss (MIS 6 spät)	> 130 000
Hani-Grundmoräne	Mittelpleistozän, Riss Hochglazial (MIS 6–7?) Warthe – Drehnte	> 135 000, > 160 000 – 220 000 ?

Die Kaltzeiten oder Stadiale «Turicum 1–6» im Frühwürm sind gemäss WELTEN (1982), WEGMÜLLER (1992) und BURGA (2006) terminiert, MIS 2–6 gemäss Standard Marine Isotope Stage.

Geologische Situation

Der Spiezberg besteht aus einem Felsrücken mit steil gestellten, offen verfalteten Kalk- und Mergelschichten, d.h. aus Trias mit Gips und Rhätkalken im Süden und gebankten Liaskalken auf dem Felsrücken und am Felsufer des Thunersees (*Abb. 2* und *Abb. 3*). Das linke Thunerseeufer Spiez-Kanderdurchstich-Gwatt besteht damit aus aufgefaltetem Felsen der Klippendecke (*nappe des Préalpes médianes plastiques*). Das gesamte Thunerseebecken samt seiner pleistozänen Sedimentauflagerung folgt daher einer inneralpin gebildeten Grossstruktur. Die Krete und insbesondere der westliche Ausläufer des Spiezbergs ist in sehr wechselhaften Mächtigkeiten mit Würm Moränen der Strättligen-Spiezberg-Rückzugsmoränen bedeckt. Dies haben BECK & GERBER (1925) auf ihrer Geologischen Karte Thun-Stockhorn entsprechend kartiert und in BECK (1932 und 1938) beschrieben. Dass am Spiezberg unter den bekannten Würmmoränen warmzeitliche See- bzw. Stillwassersedimente mit eingelagertem Holz und reichlich Schneckenschalen lagern, ist erst mit der hier dargestellten Sondierbohrung RB1-05 (*Abb. 5*, Sondierbohrung RB 1-05 Spiezberg), bekannt geworden.

Verwendete quartärstratigraphische Nomenklatur

Wir halten uns hier weitgehend an die durch BECK (1932 und 1938) eingeführte quartärstratigraphische Nomenklatur, die durch SCHLÜCHTER (1976) leicht modifiziert übernommen wurde (*Tab. 1*). Um die verwirralichen und inkonsequent benutzten Begriffe wie letzteiszeitlich, vorletzte, grosse und grösste Vergletscherung zu vermeiden, verwenden wir hier die konventionellen Begriffe Würm-Eiszeit, Eem-Interglazial, Riss-Eiszeit und Holstein-Interglazial, dies gemäss PENK & BRÜCKNER (1901) und im Sinne von WELTEN (1982) und letztlich KELLER (2014). Unter «Würm» und «Riss» seien die Kaltzeiten sowie die entsprechenden glazialen Schotter der «Birrfield-Eiszeit» bzw. «Beringen-Eiszeit» gemäss GRAF (2009) verstanden, wobei wir der Meinung sind, dass diese Schotter, im Vorstossfeld der Linth- und Reussgletscher definiert, hier im Einzugsgebiet des Aareg-

letschers kaum korrelierbar sind. Mit KELLER (2014) verstehen wir unter «grösste Eiszeit» (MEG) das Mindel- oder Möhlin-Glazial.

Westlich von Spiez im Glütschbachtal und Kanderdurchstich (*Abb. 8*, Kap. «Überregionale Korrelationen» und Profile *Abb. 4a* und *4b*, Kap. «Charakterisierung der Schichtglieder») sind das Eem-Interglazial (Riss/Würm) und im Liegenden davon ältere Moränen und Delta-Schotter nachgewiesen (SCHLÜCHTER 1976, WELTEN 1982, 1988). Letztere werden dem Risskomplex zugeordnet. Im nahen Aaretal ist in der Thalgut-Sequenz biostratigraphisch und chronologisch sicher das

Westlich von Spiez im Glütschbachtal und Kanderdurchstich sind das Eem-Interglazial (Riss/Würm) und im Liegenden davon ältere Moränen und Delta-Schotter nachgewiesen.

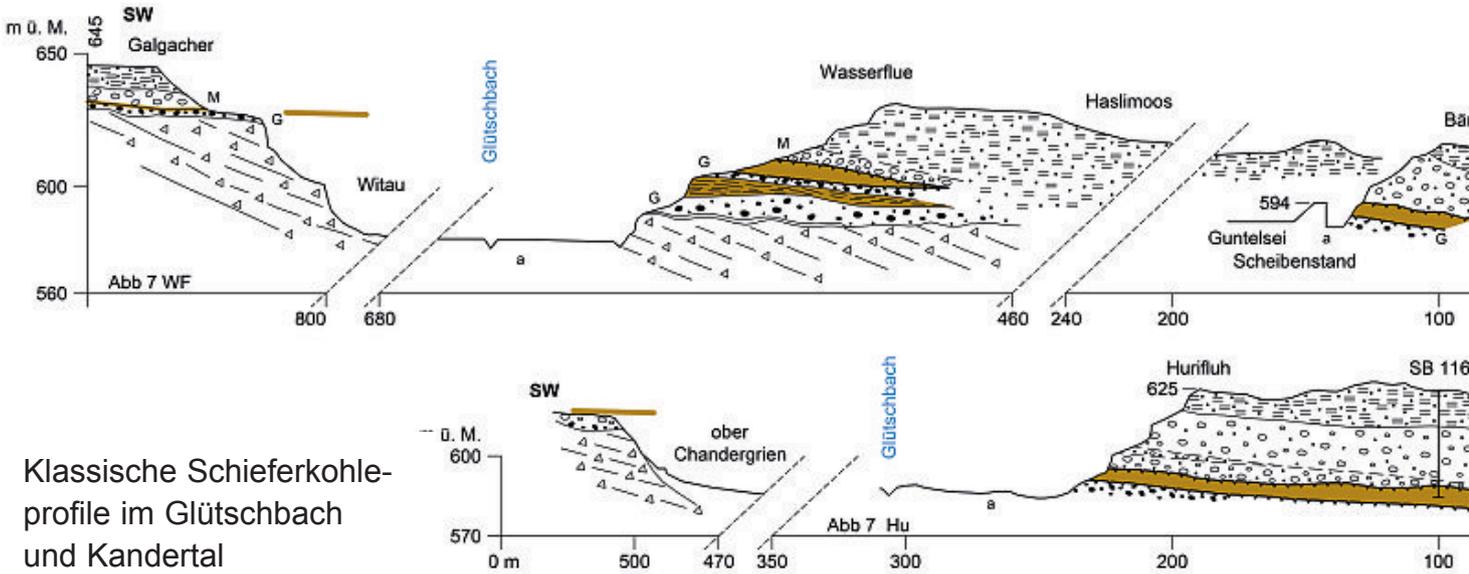
Eem Interglazial belegt (WELTEN 1988, PREUSSER & SCHLÜCHTER 2004, PREUSSER ET AL. 2005). Im Bernischen Oberaargau wurde das Pollenprofil Beerenmösli mittels U/Th Datierungen ($115\,700 \pm 4800$ Jahre BP) ins Eem datiert (WEGMÜLLER 1992). Andere Profile aus dem Oberaargau (Gondiswil-Seilern und -Mühle) enthalten die Eem-Warmzeit ebenso (WEGMÜLLER 1992, PREUSSER ET AL. 2004). Das Holstein-Interglazial (Mindel/Riss) wurde am Thunersee nirgends nachgewiesen, wohl aber im Aaretal zwischen Thun und Bern (WELTEN 1982 und 1988, SCHLÜCHTER 1976, *Abb. 9*, Frühwürm – Eem – Holstein – Ablagerungen Spiez – Meikirch, Längsprofil 1:200 000/10 000, Querprofile 1:100 000/10 000, Kap. «Überregionale Korrelationen»).

Charakterisierung der Schichtglieder (siehe Tab.1)

Vgl. dazu *Abb. 4a* und *4b*, Klassische Schieferkohleprofile im Glütschbach- und Kanderthal, Querprofile mit Legende.

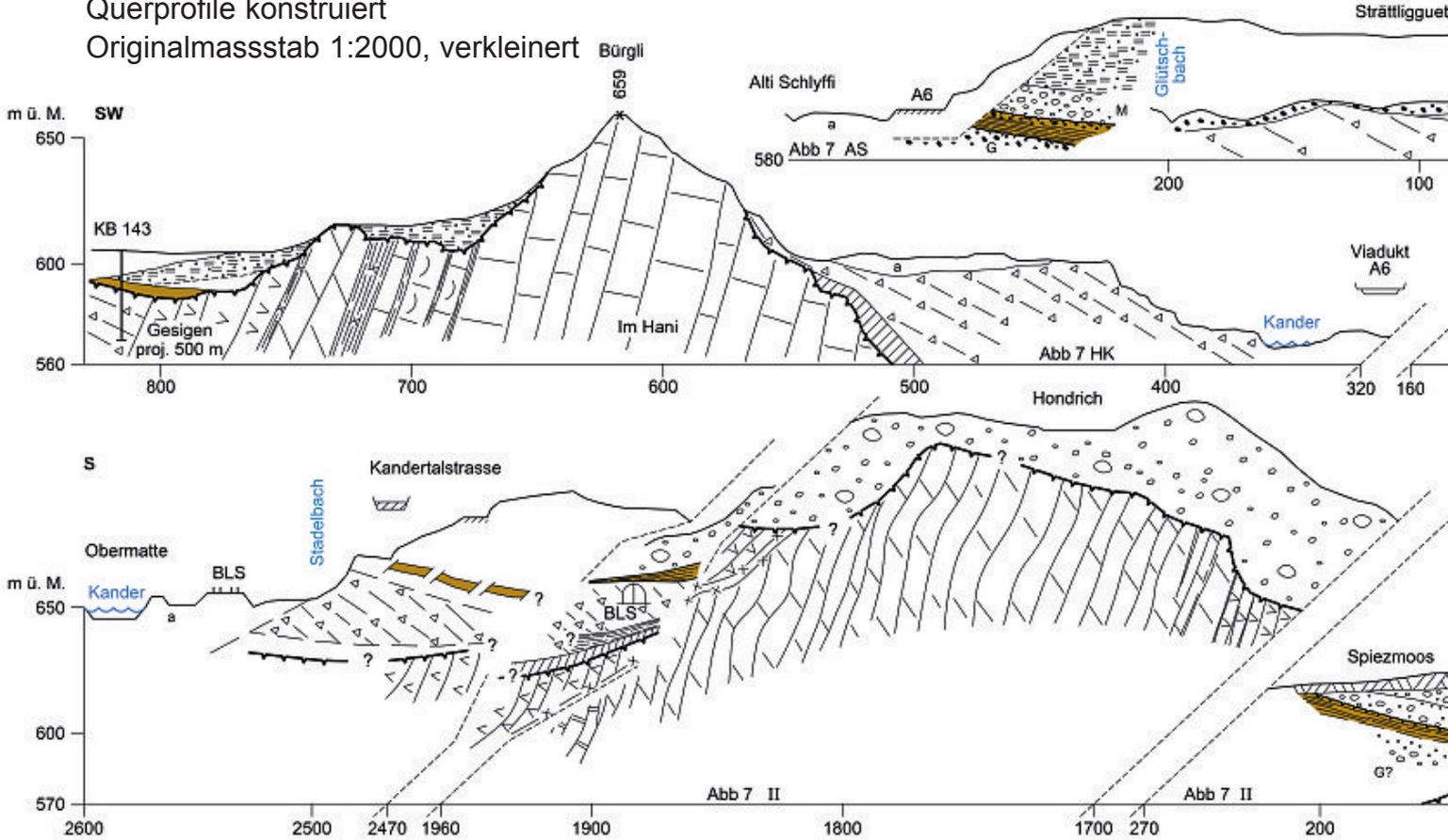
Strättligen-Spiezberg-Moräne

Blockreiche (Komponentenbestand gesamtes Helvetikum und Aar-Massiv) Seiten- bzw. jüngste Rückzugsmoräne des Aaregletschers. HANTKE (1980) korreliert diese etwa mit den Stadien von Koblach – Feldkirch



Klassische Schieferkohleprofile im Glütschbach und Kandertal

Querprofile konstruiert
Originalmasstab 1:2000, verkleinert



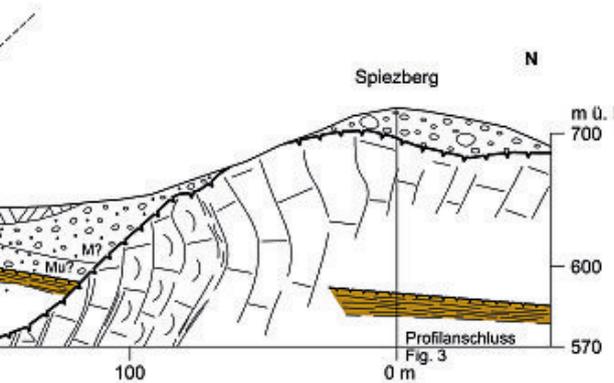
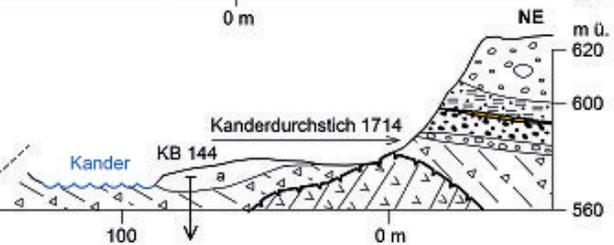
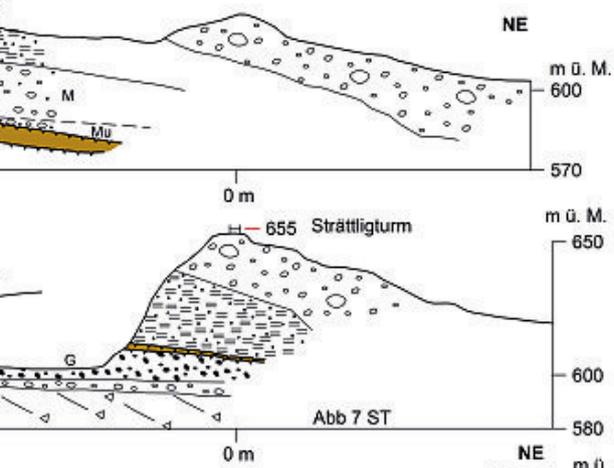
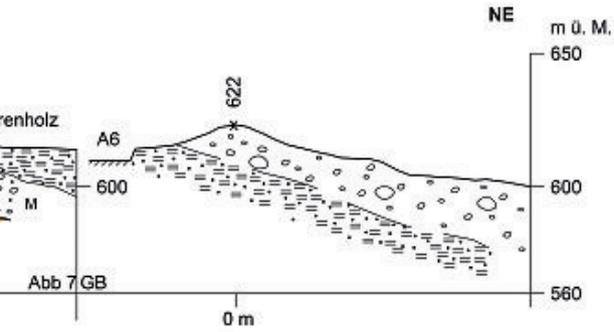


Abb. 4a und 4b:
Klassische Schiefer-
kohleprofile im
Glütschbach- und
Kandertal, Querpro-
file mit Legende.

Holozän

a Schotter der Kander und des Glütschbaches

Pleistozän

Strättligen Moräne - Spiezberg - Bürg post LGM, Rückzugsstadium
 Bärenholz - Moräne, Rotachewald - Grundmoräne Grundmoräne bei Alte Schlyffi
 Münsingen - Schotter i.A. M. (Brüggstutzschotter) Spiezer Schwankung (Beck 1932) , untere Münsingenschotter Mu Würm 1/11 - Schwankung (Beck & Rutsch 1949)
 Basis erosiv
 Silte und Sande mit Schieferkohle
 "Frühwürm" ~ Gossau-Komplex (Schlüchter et al. 1987, Burga 2006), regional proj. Schichtverlauf stark verwitterte, umgelagerte Moräne, Basis erosiv geschichtete Sande, Silte und Tone, ("Letten") mit Pflanzendetritus und viel Schneckenschalen, gelblich, rostig, schwarz. Eem - Interglazial
 Schotter der Guntelsei: Schotter unten, Moräne oben G
 "Riss" - Eiszeit, vermutlich spätstadial
 Basis erosiv
 Delta - Schotter (foreset - Schrägschichtung), Glütschtal - Deltamoräne - Deltaschotter "Riss" - Komplex
 Basis erosiv
 Grundmoräne Hani "Riss" - Komplex, Mindel (MEG) nicht ausgeschlossen
 Basis erosionsdiskordant auf Fels

Fels

Lias (Hettangien), gebankte Kalkmikrite
 Rhät, gebankte Lumachellenkalke mit Mergellagen
 Trias Gips, lagig z.T. mit Dolomitbändern oft angelöst, verursacht Dolinen, Einsturztrichter, örtliches Absacken des hangenden Quartärs, v.a. in der Umgebung des Kanderdurchstichs
 Trias, Rauwacke \ Dolomit und Kalk
 Scherzone, Überschiebung
 Sondierbohrungen
 Hondrichtunnel BLS

(Alpenrhein) und Weesen – Schänis (Linthebene) und ordnet sie damit der Klimastufe «Älteste Dryas» bzw. dem spätesten Pleistozän zu (vgl. ZWAHLEN 2018).

Bärenholz-Grundmoräne, Grundmoränen im Allgemeinen

Kies und Sand dicht bis sehr dicht gelagert in feinkörniger Matrix (Silt und Ton, meist Matrixgestützt, USCS-Klassifikation typischerweise GM bis GC-GM (VSS 2008). Komponenten angerundet bis gerundet, oft gestriemt, Komponentenbestand gesamtes Helvetikum und Aar-Massiv. Alter: Vorstoss zum LGM vor ca. 25 000 Jahren.

Münsingen-Schotter

Fluvioglaziale Vorstossschotter: siltig sandiger Kies mit Steinen; stärker siltig-sandige Lagen deuten eine Bankung an, Komponentengestützt, USCS-Klassifikation typischerweise GW-GM bis GM (VSS 2008). Komponenten gerundet, Komponentenbestand gesamtes Helvetikum und Aar-Massiv, überwiegend aber Kalkgerölle (SCHLÜCHTER 1976). Basale und interne Diskordanzen mit rostigen Verwitterungslagen deuten auf vermutlich erhebliche Schichtlücken (Erosion und/oder Omissionen). Die Münsingen-Schotter lagern diskordant auf entweder Eem- oder Schieferkohleschichten (Gossau-Komplex) und gehen im Hangenden meist fliegend in die Bärenholz-Grundmoräne über. Alter: Basis ca. 30 000 Jahre BP gemäss der jüngsten ¹⁴C-Datierungen in den Liegenden Schieferkohlen des Gossau-Komplexes (SCHLÜCHTER 1987, BURGA 2006). Innerhalb der Münsingen-Schotter und/oder Schieferkohleschichten gefundene Molaren von Mammut und Wollhaarnashorn werden spätpleistozänen, hochglazialen Arten zugeordnet (u.a. WEGMÜLLER 1992).

Schieferkohle-Schichten

Fluviatil-limnische Silte und Sande, z.T. schwach kiesig. Darin sind bis zu drei, 2 bis 15 cm mächtige Schieferkohleflöze eingelagert (vgl. SCHEUCHZER 1723 und 1746 bez. *Tafel 2*). Gemäss SCHLÜCHTER (1976) haben ¹⁴C-Datierungen darin Alter von > 50 000 bis 34 000 Jahren nachgewiesen. Die Schieferkohleschichten entsprechen damit denjenigen von Gossau gemäss BURGA (2006).

Tonsilte und Sande, sog «Letten», interglaziale Eem-Schichten

Die fluviolimnischen, warmzeitlichen Stillwassersedimente sind unter den Spiezberg-Moränen neu entdeckt worden. Auf diese fokussieren die Beschreibungen in den Kap. «Resultate der Untersuchungen» und «Interpretation und Modelldiskussion».

An dieser Stelle seien die regionalen Zusammenhänge im nahen Glütschbachtal und in der Kiesgrube Thalgut bei Kirchdorf (18 km NW von Spiez im Aaretal) zusammengefasst: Im Glütschbachtal ordnete WELTEN (1982) die Stillwassersedimente der Profile Wässerflue und Alte Schlyffi ebenfalls dem Eem-Interglazial zu. Typisch dafür sind Pollenabschnitte mit sehr hohem Anteil an Baumpollen (> 90%), viel Fichte und Weissstanne (*Picea* und *Abies*) und mit wärmeliebenden Baumarten des Eichenmischwaldes sowie sehr wenig Buche (*Fagus*, nur selten nachgewiesen < 2%). Die Ablagerungen sind reich an kleinen Schnecken. Das nächst ältere Interglazial Holstein ist im Glütschbachtal nicht erhalten, vermutlich risszeitlich erodiert.

In der Kiesgrube Thalgut weist WELTEN (1988) innerhalb der Thalgut-Seetone (SCHLÜCHTER 1976) mit einer vergleichbaren Biostratigraphie (v.a. Pollen) ebenfalls das Eem-Interglazial nach. Das Alter dieser Ablagerungen wurde durch PREUSSER & SCHLÜCHTER (2004) mittels Lumineszenz-Datierungen (90 bis 138 ka) bestätigt. Die Thalgut-Seetone lagern über mächtigen Kirchdorf-Deltaschottern (vgl. Hani-Deltaschotter unten) mit verslumpten Seesedimenten (Spätriss-Kaltzeit). Erst im Liegenden davon wies WELTEN (1988) in einer Tiefbohrung innerhalb von mächtigen tonig-siltigen Seesedimenten (ebenso in den «Jaberg-Seetonen» der nahe gelegenen Kiesgrube Jaberg) das ältere warmzeitliche Holstein-Interglazial mit dem Leitfossil *Pterocarya* (Flügelnuss) nach.

Guntelsei-Schotter (sog. Altmoränen)

Geringmächtige fluvioglaziale Fluss- und Moränenschotter, stark verwittert, rostig bis gelblich oxidiert mit mehreren Diskordanzen, oft sehr dicht gelagert und hart versintert. Die stratigraphische Position zu den



Tafel 1, Foto 1: Baugrubenabschluss Süd. Glaziale Schotter im Hangenden der See-sedimente mit diskordanten Mergellagen und Verwitterungshorizonten, vermutlich Münsingen-Schotter bzw. sog. Spiezer Schwankung.

Eem-Schichten (supra, intra oder infra) wird zwischen Welten (1982) und SCHLÜCHTER (1976) widersprüchlich dargestellt; möglicherweise sind in den unterschiedlichen Profilen alle Versionen anzutreffen.

Hani-Deltaschotter (Altmoränen)

Mächtige (>20 m) Deltaschotter mit ausgeprägter Schrägschichtung und gradierten «Foresets»; grobe Kiese mit Steinen bis kleinen Blöcken, hart gelagert, oft nagelfluhartig versintert. Die heutige Kanderschlucht (Kanderdurchstich) ist vollständig in die standfesten Deltaschotter eingeschnitten (vgl. Scheuchzer 1746, *Tafel 2*). Der Kontakt zu der liegenden Hani Grundmoräne oder den gefalteten Trias-Lias-Schichten der Préalpes sind erosiv diskordant. Alter: prä-Eem, kaltzeitliche Pollenvergesellschaftungen, Artemisia und Gräser vorherrschend (WELTEN 1982), Spätriss-Interstadiale.

Hani-Grundmoräne (Altmoräne)

Grundmoräne analog zu Kap. «Bärenholz-Grundmoräne, Grundmoränen im Allgemeinen»: Kies, Steine und kleine Blöcke (bis kopfgross, eckig bis angerundet) sind hart (verkittet und verhärtet) in einer Matrix aus graublauem tonig-siltigem Sand gelagert. Die Hani-Grundmoräne lagert diskordant auf Lias-Kalken und/oder Trias-Schichten (z.T. mit Gipslagern) der Klippendecke. Im Dach ist die Grundmoräne bis 1 m tief gelbbraun verwittert und die basalen Deltaschotter transgredieren auf rinnenartige Erosionsdiskordanzen. SCHLÜCHTER (1976) ordnet die Hani-Grundmoräne dem maxi-



Tafel 1, Foto 2: Zielschacht Westseite. Wechsellagerung von tonig-siltigen Kiesbänken mit Lehmlagen, beige- bis schwarzgrau gebändert, Schichtung flach gegen rechts (See) einfallend.



Tafel 1, Foto 3: Zielschacht Rohrvortrieb Nord, Baugrubenabschluss Süd unter Foto 1 anschliessend. Chaotisch gelagerte (? Glazialtektonik) Kiesbänke und Lehmlagen, beige- bis schwarzgrau gebändert.



Tafel 1, Foto 4: Detail von Foto 2 links unten und Foto 3 rechts unten anschliessend. Beige-grau gebänderte tonige Siltschicht zwischen vorbelasteten Kiesbänken gelagert. Kiesbänke dicht in tonig-siltige Matrix gepackt wie Grundmoräne.

malen Rissvorstoss (Drehnte-Vorstoss der nordischen Saale-Eiszeit) zu, welcher heute auf 200 000 Jahre BP abgeschätzt wird.

Abb. 5 Sondierbohrung RB1-05 siehe Kap. «Sondierbohrung RB1-05».

Objekt: Ableitung Stockhornstrasse - Spiezberg		Bericht Nr.: GI 133.0082.001	
Sondierbohrung Nr.: RB 1-05, Spiezberg			
Bohrfirma: Stump ForATec AG, Bern		Bohrung ausgeführt: 10.-15.6.2005	
Bohrmeister: Mano		Profil aufgenommen durch/Datum: R. Hänni, P. Zwahlen/14.06.2005	
Bauherr: Bauamt Einwohner Gemeinde Spiez		Aufgezeichnet/Datum: la/25.11.15	
Bauleitung: Geotechnisches Institut Spiez		<p style="text-align: right;">Geotechnisches Institut</p> <p style="text-align: right;">Sprengstrasse 7 Postfach 474 3700 Spiez</p>	
Höhenlage: ca. 592 m ü.M.	Neigung: vertikal		
Koordinaten: 617'757/171'488	Richtung: -		
<p style="font-size: small;">Telefon 033 450 72 89 Fax 033 450 72 88 info.sp@geo-online.com www.geo-online.com</p>			

Bohrprofil Originalmassstab 1 : 100, verkleinert

Bohrart Verrohrung	Tiefe ab OKT	Geologisches Profil	Beschreibung des aufgeschlossenen Bohrgutes	USCS- Klassifikation	Geologische Identifikation	Bemerkungen Einbauten Untersuchungen
Relationenbohrung Ø 6"	0.50		Waldboden / Unterboden, verwitterte Moräne		Deckschicht	
			Block, Kristallin, schieferiger Gneis, zerbohrt beiger, stark siltiger Sand mit Kies und Steinen, Lagerung steif, hart	SW-SM	Moräne	Strätigen-Moräne SPT 12/14/13 mitteldicht
			braungrauer siltiger Kies mit Sand und Steinen, oft > 10 cm Komponenten eckig bis gerundet, schwarze Kalke, Granit, Echinodermenbrekzie, Flysch und Sandstein (Dogger). Trocken, zerbohrt, Negativabdrücke von Steinen (Grundmoräne?)	GW-GM GM		SPT 11/16/14 mitteldicht bis dicht SPT 15/35/39 sehr dicht Bärenholz-Grundmoräne
	9.40		rostbrauner Kies mit Steinen und Sand, stark siltig, feucht, weich	GM		SPT 17/15/12 mitteldicht
	10.30		rotbrauner, leicht bis stark siltiger Kies und Sand, feucht, z.T. plastisch	GM GC-GM		? Münsingen-Schotter SPT 14/16/13 mitteldicht
			beiger Feinsand bis sandiger Silt, z.T. schwach tonig, feucht, steif Übergang zu grauem Silt, laminiert 70° zur Bohrachse, steif grauer, leicht toniger Silt, lagig bis knollig, feucht rötlichgrauer, toniger Silt, fein laminiert, 90° zur BA einzelne Schalenreste, feucht. Lagerung steif, hart	SM ML CL (CL-ML)	Siltwasserablagerungen, "Santonne"	SPT 34/37/41 sehr dicht Probe 14.30 m Probe 15.60 m 14°C dat.
	16.00		gelbgrauer, toniger Silt mit viel Schalenresten. Nach unten vereinzelt Feinkies. Trocken, hart gelagert. ?Dropstones? Holzreste bei 14.30-15.60 m, beige-grau, sieht rel. frisch aus	GM SM, CL	Glazial- kustisch, Übergangs- bereich	
	17.10		ockerbeiger, siltiger Kies mit Sand und Steinen, hart gelagert dunkelgrauer, toniger Silt, laminiert, Silt mit Sand, vereinzelt Kies	SM GM SM GM SM	Moräne, vorbelastet, zwei Vorstöße?	? Guntleisei-Moräne SPT > 50 sehr dicht ? Guntleisei-Moräne
	22.80		beigebrauner, siltiger Sand mit Kies und Steinen, hart Komponenten eckig bis kantengerundet, Kristallin und Kalke, Negativabdrücke, ? Grundmoräne silziger Kies mit Sand und Steinen, rötlich verfarbt, Paläoboden? braungrauer, stark siltiger Sand, feucht	GM GC-GM	Grund- moräne stark vor- belastet	sehr hart gelagert ? Hari-Grundmoräne
	24.50		grauer, stark siltiger, z.T. toniger Kies mit Sand und Steinen Komponenten eckig bis angerundet			

Abb. 6: Die Bohrprofile der benachbarten Sondierbohrung RB 9/P (Stauweiher BKW Spiezmoos) und der meisselnden Spülbohrung zur Erdsonde des EFH Walter (Umbau BE 1272 Spiezberg West) entsprechend dargestellt).

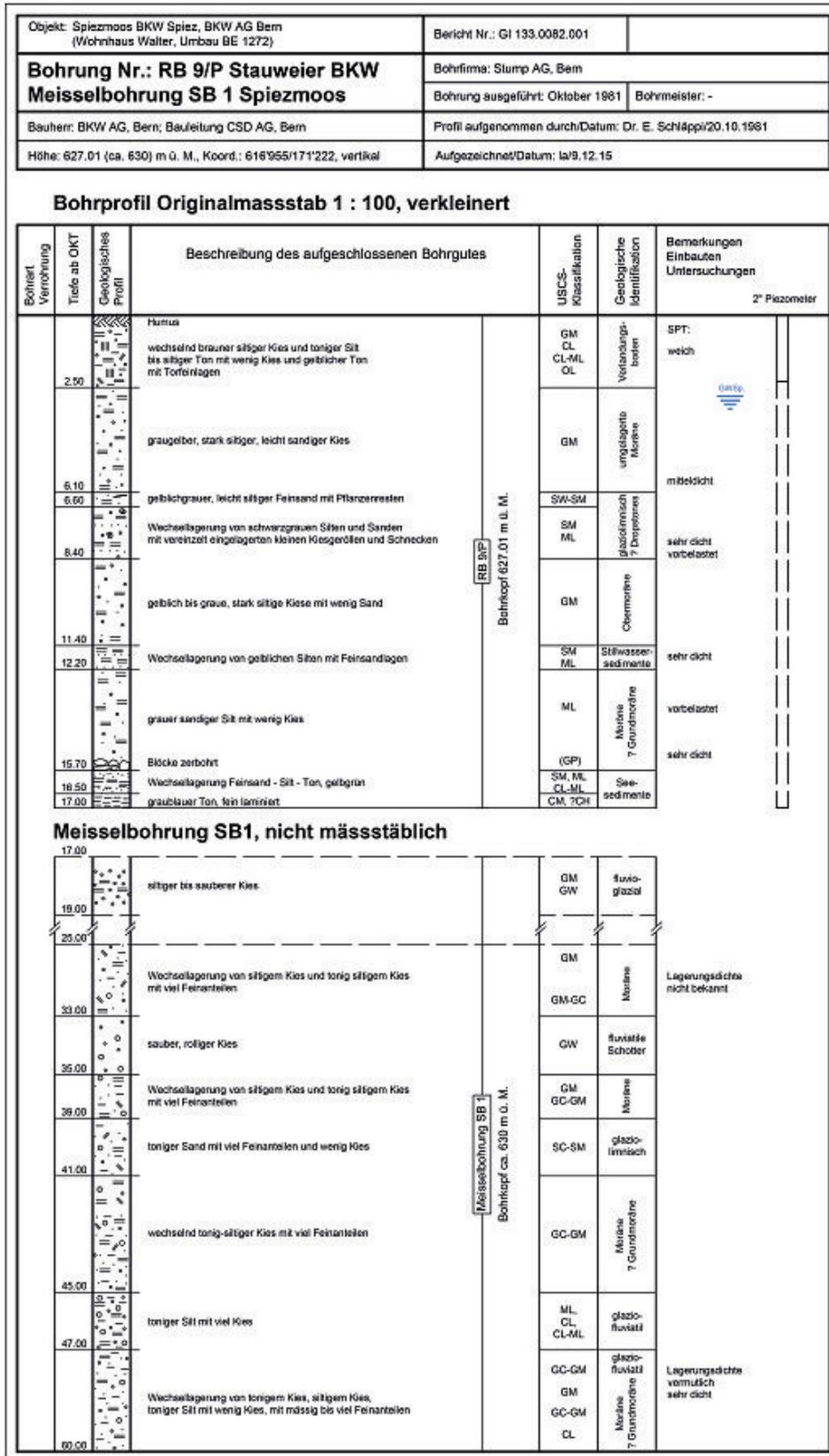
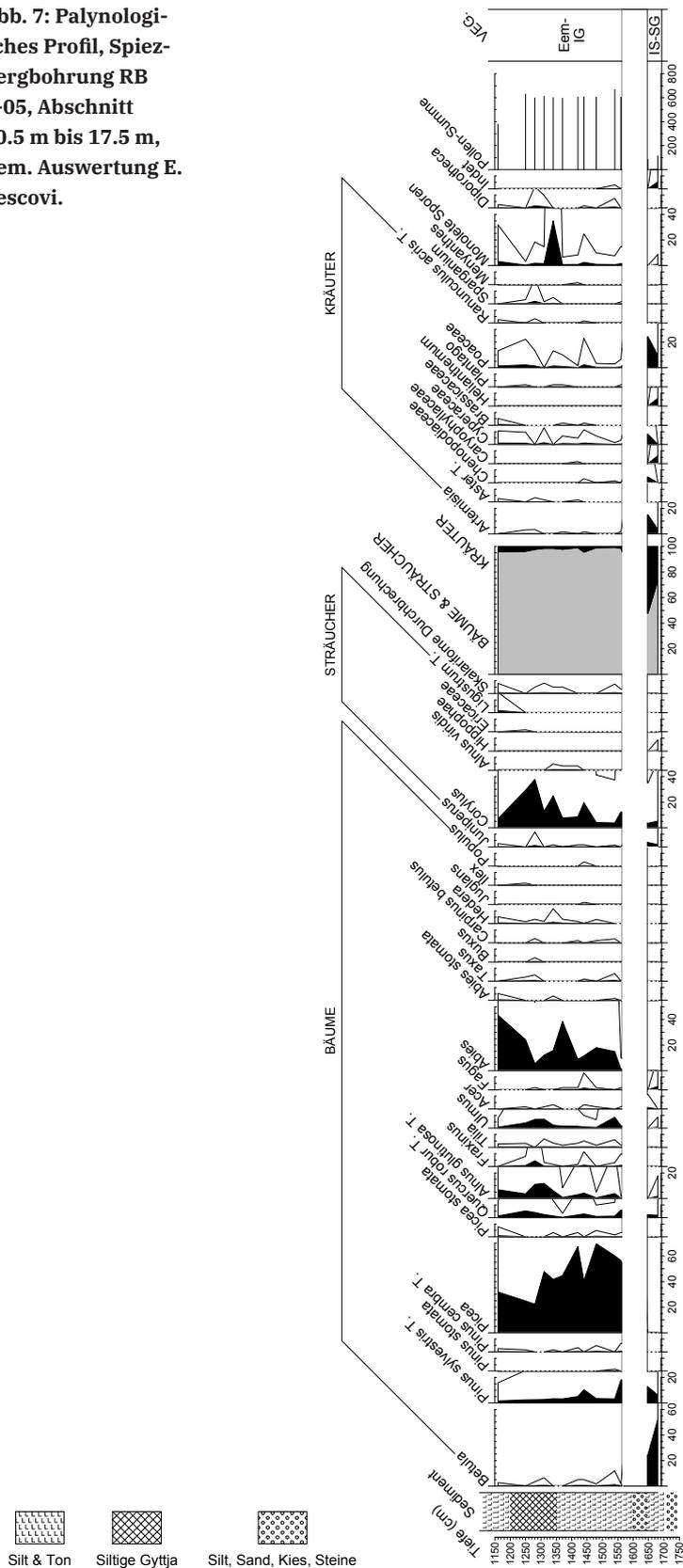


Abb. 7: Palynologisches Profil, Spiezbergbohrung RB 1-05, Abschnitt 10.5 m bis 17.5 m, Eem. Auswertung E. Vescovi.



Durchgeführte Untersuchungen

Sondierbohrung RB1-05 am Spiezberg *Abb. 5*
 Im Sommer 2005 wurde am Spiezberg über dem Thunerseeufer im Rahmen des in *Kap. «Einleitung»* vorgestellten Rohrvortriebes die geotechnische Sondierbohrung RB1-05, *Abb. 5* abgeteuft. Dabei wurden unter den Würmschottern die fossilführenden Seesedimente durchbohrt. Diese geotechnische Begleiterscheinung wird in der vorliegenden Arbeit zum hauptsächlichlichen Untersuchungsgegenstand. Die Bohrung wurde im Juni 2005 durch die Geologen des Geotechnischen Instituts R. Hänni und P. Zwahlen detailliert aufgenommen und im geotechnischen Bericht (GI SPIEZ 2005) dokumentiert.

Altersdatierung ¹⁴C von Holzproben aus dem Bohrabschnitt 14.30-15.6 m

Zur ¹⁴C-Altersdatierung (*Tab. 2*) haben wir aus dem Bohrabschnitt 14.3 bis 15.6 m (tonig siltige Seesedimente) zwei fossile Holzproben entnommen und bereits im Herbst 2005 am Radiokarbonlabor des Physikalischen Institutes der Universität Bern analysieren lassen. Beide Holzresten waren dicht in die «Seetone» gepackt. Ein feines Aststück war etwas vermodert wogegen die andere Probe aus Splintholzstücken bestand, welche zwar grau angewittert, flach gepresst (SCHEUCHZER!) aber sonst recht frisch konserviert erschienen.

Palynologie

Im Sommer 2005 haben wir am Bohrstandort das gesamte Bohrprofil (*Abb. 5*) auf sein palynologisches Potential begutachtet. Vier Bohrkisten mit den Kernen der Bohrmeter 10.0 bis 18.0 wurden angesichts der hervorragenden Qualität der Lockersedimente ans Institut für Pflanzenwissenschaften der Universität Bern gebracht und für die Pollenanalyse beprobt. Die palynologischen Untersuchungen (*Abb. 7*) folgten Standardansätzen zur chemisch-physikalischen Aufbereitung der Sedimentproben und zur Pollenbestimmung mit dem Durchlichtmikroskop (MOORE ET AL. 1991).

Zusammenstellung der vorliegenden Arbeit

Neben der Organisation und Aufarbeitung der

Tab. 2: ¹⁴C-Datierung: Altersresultate und Analysewerte.

Probennummer des Radio-karbonlabors; Probenlage in RB1-05, Bm Bohrmeter	Alter ¹⁴ C Labor Jahre BP	Messfehler ± Jahre	Analysewerte
B-8719 (3.11.05); Bm 14.3	> 58 000	¹⁴ C-Gehalt zu gering	D ¹⁴ C -1000 ‰; δ ¹³ C -29.0±0.2 ‰
B-8720 (3.11.05); Bm 15.6	46 400	+ 4500 -2900	D ¹⁴ C -996.9±1.3 ‰ δ ¹³ C -26.6±0.2 ‰

Projektunterlagen (Kap. «Einleitung») wurden umfangreiche Literaturgrundlagen gesichtet (siehe Literaturverzeichnis). In der Absicht möglichst viele Informationen graphisch in Karten, Profilen, Tabellen oder Illustrationsdokumenten darzustellen, waren die vorliegenden Figuren, Profile und Tafeln restlos neu zu entwerfen bzw. zu konstruieren. Dabei beziehen sich die *Abb. 2*, das Profil *Abb. 3*, die Bohrprofile *Abb. 5* und *6*, das palynologische Profil *Abb. 7* und die Fotodokumentation *Tafel 1* auf die unmittelbare Geologische Situation der neu erschlossenen Seesedimente am Spiezberg, wogegen die *Abb. 4a* und *Abb. 4b*, die Profile in *Abb. 8* und *Abb. 9* und die *Tafeln 2* den überregionalen stratigraphischen Bezug der interglazialen bzw. -stadialen Schichten aufzeigen sollen. Die vorliegenden geologischen Profile (*Abb. 8* und *Abb. 9*) wurden neu gemäss SCHLÜCHTER (2010 und 1976) sowie den detaillierten Orts- und Höhenangaben und der Palynologie von WELTEN (1982), zudem nach eigenen Feldaufnahmen aufgrund der Swisstopo (2016) konstruiert. In der *Abb. 8* wurde konstruktiv versucht, anhand der geneigten und zeitlich eng begrenzbaren Basisflächen der «Münsingen-Schotter» und der «Eem-Schichten» für die entsprechenden Zeiträume einen mittleren tektonischen Hebungsbeitrag am Alpenrand abzuschätzen. Mit den kombinierten, stark überhöhten Längs- und Querprofilen der *Abb. 9* soll das Modell der spätalpinen Hebungen am Alpenrand sowie der Bezug zum Becken des Thunersees graphisch skizziert werden.

Seismische Geschwindigkeiten in den quartären Beckenfüllungen

Zur Konstruktion der Seebecken und Talprofile in *Abb. 8* und *9* musste die Tiefenlage

der Felsoberfläche abgeschätzt werden. Dazu standen die in Kap. «Überregionale Korrelationen» erwähnten seismischen Sondierungen zur Verfügung. Im Seebecken rechneten MATTER ET AL. (1971) mit mittleren Wellengeschwindigkeiten von 1500 m/s, wobei ein grosses Unsicherheitsintervall von 1100 m/s bis 2500 m/s angegeben ist. In den grundwassergesättigten quartären Lockergesteinsfüllungen des Aaretals nördlich von Thun ergab die Auswertung der Seismogramme (TWT-Profil, two way time) von VOLLMAYR (1992) mit der Annahme von 2000 m/s Wellengeschwindigkeit die besten Übereinstimmungen mit den in Kap. «Überregionale Korrelationen» genannten Sondierungen.

Resultate der Untersuchungen

Sondierbohrung RB1-05 *Abb. 5*

Die geologisch geotechnischen Aufnahmen und Interpretationen der Sondierbohrung RB1-05 sind in *Abb. 5* umfassend dargestellt. Zusammenfassend lässt sich das Bohrprofil derart charakterisieren, dass warmzeitliche, feinkörnige Stillwasserschichten (Eem-Interglazial, vgl. Kap. «Geologische Situation») bis fraglich Frühwürm analog zum Gossau-Komplex (SCHLÜCHTER ET AL. 1987), zwischen einer Schotterabfolge im Hangenden (Spätwürm Strättligen-Spiezberg Rückzugsmoräne inklusive Grundmoräne und Münsingen-Vorstossschotter an deren Basis) und dicht vorbelasteten Riss-Schottern im Liegenden (fragliche Guntelsei-Schotter und/oder Hani-Grundmoräne) eingelagert sind. Diese begleitenden Schotter sind vorbelastet und weitgehend zu Nagelfluhbänken versintert, was den in Kap. «Einleitung» beschriebenen Rohrvortrieb stark behinderte. Von SCHEUCHZER (1746) über BECK (1934), SCHLÜCHTER

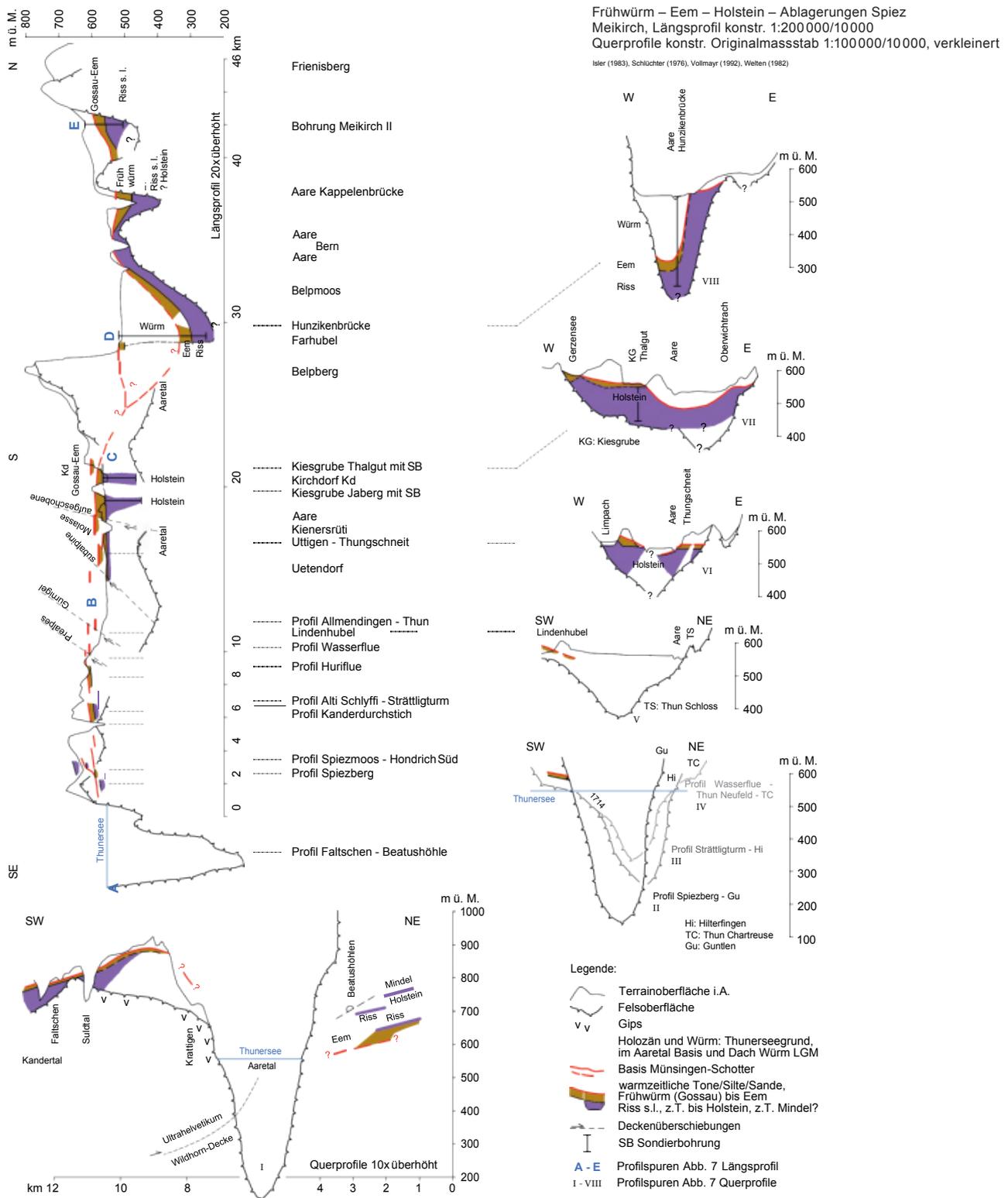


Abb. 9: Frühwürm – Eem – Holstein – Ablagerungen Spiez – Meikirch, Längsprofil Originalmassstab 1:200 000/10 000, verkleinert, Querprofile Originalmassstab 1:100 000/10 000, verkleinert.

(1976), WELTEN (1982) bis zum geotechnischen Bericht (GI SPIEZ 2005) haben alle Autoren diese Lithifizierung oder «starke Verfestigung» der «Konglomeratbänke» erwähnt.

Weitergehende Sedimentanalysen wurden nicht durchgeführt. Zum stratigraphischen Vergleich sind in *Abb. 6* die Bohrprofile der benachbarten Sondierbohrung RB 9/P (Stauweiher BKW Spiezmoos) und der meisselnden Spülbohrung zur Erdsonde des EFH Walter (Umbau BE 1272 Spiezberg West) entsprechend dargestellt.

Eine Fotodokumentation (*Tafel 1*) der offenen Baugrube des Zielschachtes Spiezberg Nord, illustriert die innerhalb von glazigenen Schottern lagernden warmzeitlichen Stillwasserablagerungen.

Altersdatierung ¹⁴C von Holzproben aus den Seesedimenten

Am 3.11.2005 hat das Radiokarbonlabor des Physikalischen Instituts der Universität Bern folgende Datierungsergebnisse vorgelegt: siehe *Tab. 2*.

Beide ¹⁴C-Alter liegen ausserhalb der Kalibrationskurve; die Holzproben sind schätzungsweise vor ≥ 50 000 Kalenderjahren BP abgestorben. Das absolute Altersdatum 46 400 J. BP erscheint für ein Eem Alter (vgl. *Kap. «Vegetationsgeschichte des Eem und Riss-Spätglazial am Spiezberg»*) viel zu jung. Diese Holzprobe liegt im Bohrprofil 1.3 m tiefer als diejenige, die > 58 000 J. BP ergeben hat, ist also in der Altersabfolge invers. Die Analysewerte zu 46 400 J. BP sind für die ¹⁴C-Methode an sich grenzwertig, wobei das Radiokarbonlabor auf Nachfrage bestätigte, ca. 3 ‰ ¹⁴C tatsächlich gemessen zu haben. Eine äusserst geringe Kontamination mit jüngerem organischem Material (z.B. Bohrfett oder Kernkiste) oder CO₂ kann zu diesem Resultat geführt haben.

Palynologie des Bohrkernabschnittes 10.5 bis 17.5 m (vgl. *Abb. 7*)

Die pflanzlichen Mikrofossilien (Pollen, Sporen, Holzreste) sind gut erhalten, die Konzentrationen in den Stillwasserablagerungen allgemein hoch. In den «Altmoränen» unterhalb von 17 m konnte nicht genügend Pollen für die Analyse gefunden werden. In den tonigen Silten zwischen 17 und 16.5 m Tiefe dominiert Pollen von Birke (*Betula*)

und Föhre (*Pinus sylvestris* T. =Typ) sowie von Kräutern wie Beifuss (*Artemisia*) und Süssgräser (Poaceae, *Abb. 7*). Der Kräuterpollenanteil ist mit 25 bis 50% hoch und umfasst zusätzliche typische Steppenpflanzen wie Sonnenröschen (*Helianthemum*), Gänsefüssgewächse (Chenopodiaceae) und Nelkengewächse (Caryophyllaceae). In diesem Abschnitt ist die Pollenkonzentration relativ gering. Es folgt nach oben eine moränenartige Schicht mit verfestigtem siltigen Sand, Kies und Steinen, die erneut keine Mikrofossilien führt.

Ab 15.9 m setzen wieder Stillwasserablagerungen ein. Darin dominiert am Anfang Pollen der Fichte (*Picea*), begleitet von Föhre (*Pinus sylvestris* T.) sowie untergeordnet die laubwerfende, wärmeliebende Eiche (*Quercus*), Hasel (*Corylus*), Esche (*Fraxinus*) und Ulme (*Ulmus*). Schon bald wird Pollen von Weisstanne (*Abies alba*) auf Kosten der borealen oder subalpinen Fichte (*Picea*) sowie der lichtliebenden Hasel (*Corylus*), der Eiche (*Quercus*) und der Esche (*Fraxinus*) wichtiger. Parallel zur Weisstanne breitet sich Pollen von Efeu (*Hedera*) aus, eine ebenfalls immergrüne, wärmeliebende und ozeanische Pflanze. Die Linde (*Tilia*) ist insektenbestäubt und deshalb im Pollenbild stark untervertreten. Neben Efeu (*Hedera*), Ulme (*Ulmus*), Linde (*Tilia*) und Eiche (*Quercus*) begleiten stets Erle (*Alnus*), Ahorn (*Acer*), Stechpalme (*Ilex*) und Eibe (*Taxus*) das Pollenspektrum. Pollen der Buche (*Fagus*) ist ziemlich selten, erreicht bei 15–14.5 m Tiefe einen kleinen Gipfel (< 2%) und verschwindet unter der Weisstannendominanz ganz. Allgemein ist in den Tiefen 15.5–11.5 m Kräuterpollen selten (< 5%). Die Wasserpflanze Igelkolben (*Sparganium*) kommt in den jüngeren Abschnitten regelmässig vor; Sporen von Farnen (monoleten) sind relativ häufig und erreichen Spitzenwerte von > 30%.

Ab 10.0 m folgen Moränenablagerungen, die für die Palynologie wieder ungeeignet waren.

Graphische Konstruktionen und Aufzeichnungen

Spiezberg, engerer Bereich des Neufundes

Die Fundlagen der Seesedimente innerhalb

der neueren Sondierbohrungen erlauben die geologische Detailkartierung (*Abb. 2, Kap. «Geologische Situation»*) und die Konstruktion eines Querprofils (*Abb. 3, Kap. «Geologische Situation»*). In letzteres wurden die im Spiezmoos abgeteuften Bohrungen RB 9/P A und Meisselbohrung (EFH Walter) hineinprojiziert. Daraus resultiert eine lokale Schichtneigung der Eem-Sedimente von 3° bis 5° gegen das Seebecken.

Überregionale Korrelationen

Die interglazialen (Eem) Seesedimente am Spiezberg lassen sich bezüglich ihrer stratigraphischen Position und ihres Ablagerungsalters (vgl. *Kap. «Altersintervall der Stillwasserablagerungen»*) mit den klassischen Schieferkohleprofilen im Glütschbachtal korrelieren (BECK 1925 und 1934, SCHLÜCHTER 1976, WELTEN 1982). Diese Beziehungen sind in *Abb. 4a und 4b* (Klassische Schieferkohleprofile im Glütschbach- und Kandertal, Querprofile mit Legende dazu siehe *Kap. «Charakterisierung der Schichtglieder»*), als neu nicht überhöht konstruierte Serie von Querprofilen 1:2000 analog zum Spiezbergprofil in *Abb. 3* dargestellt. Mit dem BLS-Tunnel Hondrich Süd wurden die Hani-Grundmoräne und Hani-Deltaschotter entlang von 370 Tunnelmetern durchfahren (KELLERHALS + HAEFELI 1985). Damit ist belegt und im untersten Profil der *Abb. 4* dargestellt, dass die mittelpleistozänen glazigenen Ablagerungen (Riss Altmoränen) bis weit in das Kandertal hinauf reichen. Überregionale Korrelationen der entsprechenden Schichten nach Norden über Uttigen, Thungschneit, die Kiesgruben Jaberg und Thalgut (SCHLÜCHTER 1976, WELTEN 1982, PREUSSER 2010) in das übertiefte Aaretal um Bern (GRUNER 1993 und 2001, ISLER 1983 und 2005, WELTEN 1982) bis zur unterdessen klassischen Forschungsbohrung Meikirch II (WELTEN 1982 und 1988, PREUSSER 2010) sind mit dem stark überhöhten Längsprofil der *Abb. 9* vollzogen. Die damit kombinierten Querprofile durch das Thunerseebecken wurden nach den seismischen Profilen in MATTER ET AL. (1971), diejenigen durch das Aaretal zwischen Thun und Münsingen (Profilschnitte bei Thalgut (VII) und Steffisburg – Thun Nord (V) in *Abb. 8* und *9*) nach den Seismogrammen der

Erdölprospektion VOLLMAYR (1992) in Kombination mit MATTER ET AL (1971) und ISLER (1983, Mindesttiefen der Felsoberfläche) konstruiert. Zwischen Wichtrach und Uetendorf (Thun) zeichnet sich in der Talachse eine Felsschwelle im Niveau von ca. 450 m ü.M. oder etwa 100 m unter dem Aaretal ab (VOLLMAYR 1992, ISLER 1983 und MATTER ET AL. 1971).

Tektonische Hebung der Basisflächen der Eem-Schichten und Münsingen-Schotter

Auf der Übersichtskarte 1:50 000 der *Abb. 8* (*Kap. «Charakterisierung der Schichtglieder»*) wurde versucht, die geneigte Basisfläche der Eem-Schichten (ca. Top Riss-Deltaschotter, siehe ockergelbe Isohypsen in *Abb. 8*) dreidimensional darzustellen. Diese Fläche bietet sich dazu an, weil sie zwischen dem Spiezberg und Allmendingen (Wasserflussprofil) und dann wieder von Uttigen –

Demnach kann angenommen werden, dass die Hebungsraten am Alpenrand in den vergangenen 120 000 Jahren im Mittel konstant (0.2 mm/Jahr) bis leicht erhöht (0.4 mm/Jahr) waren.

Thungschneit bis zum Gerzensee – Thalgut gut aufgeschlossen und beschrieben ist (vorliegende Arbeit, SCHLÜCHTER 1976, WELTEN 1982). Diese in *Abb. 8* konstruierte Fläche brachte uns auf den Gedanken, die tektonische Hebung an den Deckenbasen der Klippendecke, Gurnigel-Decke und der subalpinen Molasse in den vergangenen 120 000 Jahren zu testen. Aktuell werden zwischen Spiez (Klippendecke) und Uttigen (gefaltete Molasse) Hebungsunterschiede von 0.2 mm/Jahr gemessen (Hebungsunterschiede z.B. aus BUCKINGHAM ET AL. 2013). In 120 000 Jahren (mittleres Eem-Alter) würden sich damit 24 m aufsummieren. Dies ist quantitativ relativ gut erfassbar und manifestiert sich am deutlichsten an den Aufschiebungen der Préalpes-Gurnigel-Decken und der Subalpinen Molasse (siehe den Verlauf der Isohypsen 580 bis 600 m ü.M. in *Abb. 8* und im

Längsprofil der *Abb. 9*). Aus den *Abb. 3, 4* und in den Querprofilen II, III, IV und V *Abb. 9* ist ablesbar, dass das Niveau der Eem-Schichten am Spiezberg 20 m bis 30 m über dem heutigen Thunerseespiegel lagert und im Glütschbachtal (Kanderdurchstich bis Wasserflue) verglichen mit demjenigen von Uttigen – Jaberg – Thalgut um 30 m bis 50 m aufgeschoben erscheint. Demnach kann angenommen werden, dass die Hebungsraten am Alpenrand in den vergangenen 120 000 Jahren im Mittel konstant (0.2 mm/Jahr) bis leicht erhöht (0.4 mm/Jahr) waren.

Eine analoge Konstruktionsübung an der Basisfläche der Münsingen-Schotter bzw. dem Dach der Schieferkohleschichten (Alter 30 000 Jahre, violette Isohypsen in *Abb. 8*) würden unter den obigen Annahmen eine Hebung am Alpenrand von 6 m ergeben, was unter den bestehenden Konstruktionsunsicherheiten eine zu geringe Höhendifferenz ist, um daraus eine tektonische Hebungsrates abzuleiten. Aus dem Befund gemäss *Abb. 8* und *9* lässt sich höchstens schliessen, dass die Hebungsrates in den vergangenen 30 000 Jahren nicht wesentlich grösser war als heute.

Dem Eem-Interglazial wird heute allgemein ein mittleres Altersintervall von 126 000 bis 115 000 Jahren BP zugeordnet.

Beide Referenzflächen sind ziemlich regelmässig mit 2.5° gegen die Talachse Thunersee – Aaretal geneigt. Bei Spiez Hondrich (östlichstes Profil in *Abb. 4* bzw. BECK 1925) und im unteren Suldtal (östlichstes (unterstes) Profil in *Abb. 9*, GÜNZLER-SEIFFERT 1933) liesse sich die Fläche noch bis auf 660 m bzw. 870 m ü. M. erweitern. Westlich der Kander sind dazu allerdings keine korrelierbaren Referenzisohypsen bekannt.

Obige Abschätzungen bilden einen Versuch, anhand der vorliegenden Daten die tektonischen Hebungen am Alpenrand seit dem Eem Interglazial zu rekonstruieren. Ob damit postuliert werden kann, dass der Höhenunterschied von 25 m zwischen den

Eem-Gewässern und dem heutigen Thunersee nur mit tektonischer Hebung erklärbar sei, ist wohl nicht eindeutig. Für uns ist es eine plausible Hypothese. Die beobachteten Phänomene können andererseits auch zu fälligen Erosionsdifferenzen zugeschrieben werden.

Interpretation und Modelldiskussion

Regionale Korrelation der Frühwürm- bis Eem-Schichten

Die gemessenen ¹⁴C-Alter der in den Stillwassersedimenten eingelagerten Holzreste, die häufigen Schneckenschalen sowie die stratigraphische Position lassen es zumindest als plausibel erscheinen, die hier neu dargestellten Schichten vom Spiezberg mit den klassischen Profilen im Glütschbachtal zu korrelieren (vgl. *Abb. 4*). Es gibt aber Unterschiede: Typische Schieferkohlen sind am Spiezberg bisher unbekannt, dafür sind die «Seetone» mit 6 m viel mächtiger ausgebildet als im Glütschbachtal. Man mag dies als faziellen Unterschied erklären, etwa als distalere Lage in einem stehenden Gewässer. Andererseits weist selbst SCHLÜCHTER (1976) auf die sehr variable Schichtabfolge von Feinsedimenten, Schotterlagen, Verwitterungshorizonten und vermutlich grossen Schichtlücken unter den Glütschbachprofilen und WELTEN (1982) moniert die eigenen, schwer korrelierbaren palynologischen Profilanalysen. Für die Eem-Stillwassersedimente sind stets ein hoher Gehalt an Schnecken (*ex familia Planorbidae, Valvatidae, Lymnaeidae, Vallonidae*), Wasser- und Landschnecken, vgl. SCHLÜCHTER 1976) typisch.

Altersintervall der Stillwasserablagerungen

Die ¹⁴C-Datierungen in den Glütschbachprofilen und der Spiezbergbohrung weisen mit gemessenen 33 000 bis 42 000 bzw. 46 000 Jahren BP und den Minimalwerten > 44 000 bis > 58 000 Jahre BP übereinstimmend auf den Frühwürm Gossau-Komplex (BURGA 2006 und SCHLÜCHTER ET AL. 1987, Diskussion der Altersdatierung siehe *Kap. «Altersdatierung ¹⁴C von Holzproben aus den Seesedimenten»*) und das Eem Interglazial. WELTEN (1982) hat in den Profilen «Wasserflue» und «Alte Schlyffi» in den basalen kohligen «Let-

ten» (Lehme) und in den Jaberg-Seetonen (vgl. Kap. «Tonsilte und Sande, sog. «Letten», interglaziale Eem-Schichten») pollenanalytisch das Eem-Interglazial (dichter Weisstannenwald mit starkem *Picea*- und *Alnus*-Anteil sowie weiteren wärmeliebenden Bäumen wie *Buxus*, *Taxus* oder *Vitis*) nachgewiesen. Dem Eem-Interglazial wird heute allgemein ein mittleres Altersintervall von 126 000 bis 115 000 Jahren BP (erweiterter Bereich 130 000 bis 110 000 J.BP) zugeordnet.

Vegetationsgeschichte des Eem und Riss-Spätglazial am Spiezberg

Die vorliegenden ¹⁴C-Datierungen weisen auf ein frühwürminterstadiales (Gossau-Komplex) Mindestalter hin. Interglaziale sind pollenstratigraphisch erkennbar, da sie sich deutlich durch ihre wärmeliebende Flora von den Interstadialen, Stadialen oder Spätglazialen unterscheiden (WELTEN 1982, 1988, WEGMÜLLER 1992, DRESCHER-SCHNEIDER & PAPESCH 1998, WEGMÜLLER ET AL. 2002, PREUSSER ET AL. 2005). Biostratigraphisch gehören die Tiefen 17.0–16.5 m im Bohrkern RB 1-05 zu einer Kaltzeit. Offene Birken-, Föhrenwälder und Steppenvegetation herrschten damals vor. Gegen Ende des Interstadials breitete sich Steppenvegetation aus, im Wald nahm die Birkendominanz ab, was auf eine Kältephase im Spätriss hindeutet und auch stratigraphisch durch «siltigen Kies mit Sand und Steinen» bis 16 m im Bohrprofil Abb. 5 belegt ist. Eine Birkendominanz mit relativ offenen Waldverhältnissen (Baumpollen 50–80%) wurde auch für die Riss-Spätglaziale von Thungschneit, Dürnten und Sulzberg-Wettingen rekonstruiert (WELTEN 1982), während an anderen Standorten wie beispielsweise Thalgut (WELTEN 1988) und Beerenmösli (WEGMÜLLER 1992) üblicherweise Föhren (*Pinus sylvestris* T.) bedeutender waren als Birken (*Betula*). Zeitliche Wechsel in der Dominanz dieser beiden borealen Bäume kommen im Riss-Spätglazial (WELTEN 1982, WEGMÜLLER 1992, DRESCHER-SCHNEIDER & PAPESCH 1998) und Würm-Spätglazial (WELTEN 1982b) vor; sie können Sukzessionsvorgänge oder entsprechend unterschiedliche Klimaverhältnisse abbilden (die Birke ist ein Pionier und kältetoleranter). Die Anwesenheit von Eiche (*Quer-*

cus), Ulme (*Ulmus*), Ahorn (*Acer*) und Hasel (*Corylus*) ist auch in den Riss-Spätglazialen von Thungschneit, Sulzberg-Wettingen, Beerenmösli und Gondiswil-Seilern, insbesondere in den jüngeren Abschnitten, belegt (WELTEN 1982, 1988, WEGMÜLLER 1992). Allerdings sind diese Pollenfunde nur in Gondiswil-Seilern in autochthonem, organischem Material (Schieferkohle) abgelagert, während sie an den anderen Standorten wie auch am Spiezberg in allochthonem Ton, Silt und Sand vorkommen. Deshalb ist es schwierig auszuschliessen, dass es sich beim Pollen von wärmeliebenden Bäumen um aufgearbeitetes (also älteres) Material handelt. Andererseits ist es gut vorstellbar, dass diese Pollenfunde auf Eichenmischwälder unter kontinentalen Verhältnissen mit ziemlich warmen Sommern und sehr kalten Wintern hinweisen, wie sie für das Würm-Spätglazial südlich der Alpen aus autochthonen organischen Sedimenten rekonstruiert wurden (VESCOVI ET AL. 2007).

Nach einer instabilen Phase mit vermehrter Erosionstätigkeit (bei 16.0 m ist eine Schichtlücke bzw. Erosionsdiskordanz anzunehmen) herrschten Fichtenwälder mit wärmeliebenden Eichen (*Quercus*) und Haseln (*Corylus*) vor. Bald darauf wurden diese Wälder durch Fichten-Weisstannenwälder mit viel Ulmen (*Ulmus*), Erlen (*Alnus*), Eschen (*Fraxinus*), Eichen (*Quercus*) und Hasel (*Corylus*) abgelöst, in denen auch Efeu (*Hedera*), Buchs (*Buxus*), Eibe (*Taxus*) und Stechpalme (*Ilex*) wuchsen. Im Gegensatz zum Holozän war die Buche (*Fagus*) unbedeutend oder fehlte (< 2%). Solche von Fichte (*Picea*) und Weisstanne (*Abies*) beherrschten Mischwälder bzw. die Verdrängung der Fichte durch die Weisstanne, sind typisch für das Eem-Interglazial der Alpen und des nördlichen Alpenvorlandes. Sie kommen im Glütschtal (Wasserflue, Alte Schlyffi, WELTEN 1982), im Aaretal (Thungschneit, Thalgut, WELTEN 1982, 1988), im Oberaargau (Beerenmösli, Gondiswil, WEGMÜLLER 1992), im Limmattal (Sulzberg-Wettingen, WELTEN 1982), im Zürcher Oberland (Uster, WELTEN 1982) und in der Ostschweiz (Mörschwil, Wildhaus-Egg, WELTEN 1982, 1988) sowie weiter östlich in Oberösterreich am Mondsee vor. Besonders wichtig scheint, dass das U/

Th datierte Eem-Profil Beerenmösli bei Gondiswil (WEGMÜLLER 1992) sowie das lumineszenzdatierte Profil Thalgut im Aaretal (WELTEN 1988, PREUSSER UND SCHLÜCHTER 2004) ebenfalls eine solche Eem-interglaziale Vegetationsentwicklung aufzeigen. Somit ist die Zuweisung des Interglazials von Spiezberg ins Eem biostratigraphisch eindeutig. Vermutlich fehlt am Spiezberg der Beginn des Eem-Interglazials wie es sich mit *Picea*-Werten <30% am Beerenmösli und in Thalgut abbildet (WEGMÜLLER 1992, WELTEN 1988). Wie bei der Alten Schlyffi im Glütschtal (WELTEN 1982) fehlt auch die Eem-Endphase;

Vermutlich die gleichen «Nagelfluhschotter» sind im unteren Saal des Kinos Movieworld Spiez architektonisch sehr geschickt als Saalwand belassen worden und mit aufgespaltenen Blöcken sichtbar.

vermutlich auch hier wegen erosiver Schichtlücken (11.5 bis 10.3 m im Bohrprofil *Abb. 5 und Abb. 7*), verursacht durch die würmzeitlichen Münsingen-Vorstossschotter. Allgemein ist die Endphase des Eems in der Region nur im Beerenmösli bei Gondiswil gut erhalten, die meisten Sequenzen im Aaretal scheinen deshalb unvollständig zu sein. In der Endphase des Eem-Interglazials verschwanden die Weisstannenwälder, wogegen sich Fichten- und Föhrenwälder als Folge von kühleren und kontinentaleren Verhältnissen ausbreiteten. Mit dem Beginn der Würmeiszeit (oder des 1. Frühwürm-Stage) brachen schliesslich auch die Fichtenwälder zusammen und eine kälte- und trockenheitsangepasste Steppenvegetation breitete sich aus (DRESCHER-SCHNEIDER UND PAPESCH 1998).

Begleitende glazigene Schotter und Moränen

Grundbaulich-felsmechanische Eigenschaften der vorbelasteten «Altmoränen»

Beim Bau des Kanderdurchstiches 1711–1714 (historisch, hydraulisch und bautechnisch umfassend dargestellt in STRAUB & HUNZIKER

(2013) begünstigte die kompakte Lagerung und Versinterung (SCHEUCHZER 1746, *Tafel 2*) den Stollenvortrieb. Erst als mit der Einleitung der Kander die unkontrollierbare Sohlerosion einsetzte, stürzte der Stollen ein und die Kander erodierte innert weniger Jahre die heutige Kanderschlucht aus. Das in der Folge aufgeschüttete Kanderdelta im Thunersee (kartiert in BECK 1925) besteht weniger aus der erodierten Strättligen Moräne als aus dem 30 m tief und bis 400 m breit ausgeräumten ehemaligen Kandertal, der heutigen Augand südlich der Schlucht. Erst dadurch sind die langgezogenen Aufschlüsse der Hani-Deltaschotter und der Hani-Grundmoräne freigelegt worden. Gerade dieses hoch dynamische, kurzzeitige Erosionsereignis bietet sich als aktuelles Modell für die Erosionsleistung von eingespanntem turbulentem Wasser an. (vgl. *Kap. «Talbildung, subglaziale Hydraulik, Erosionsleistung»*).

Die hangende würmzeitliche Strättligen-Spiezberg-Rückzugsmoräne

Erst die oberhalb der Sondierbohrung anstehende Strättligen-Spiezberg-Rückzugsmoräne ist nur noch mitteldicht gelagert und kaum versintert. Diese Seitenmoräne des Spätwürm zeichnet sich durch ihren Blockreichtum entlang der Moränenrücken aus; teilweise erreichen die Findlinge Dimensionen in Zimmergrösse. Das Blockspektrum umfasst die wichtigsten Kristallinlithologien des Aar-Massivs (Granite, verschiedene Gneise, Amphibolite und nicht zuletzt Brekzien des Permokarbon) sowie die rigiden Sedimente der Wildhorn-Decke (u.A. Quintner-Kalk, Dogger-Sandsteine, verschiedene Kieselkalke). Diese Gesteinstypen sind museumswürdig zu Bausteinblöcken bearbeitet in die Grundmauern des Schlossturmes Spiez verbaut. Die mittelalterlichen Erbauer des Schlosses Spiez waren niemand anderes als die Freiherren und Minnesänger von Strättligen (urkundlich belegt zwischen 1175 und 1338), deren Stammsitz die Strättligburg war und heute die Typlokalität der Strättligen Moräne ist (drittes Querprofil in *Abb. 4*).

Kaltzeitliche (Mindel – Würm) Sedimente in den Beatushöhlen (*Abb. 9, Querprofil I*)

Häuselmann (2010) weist in den Beatushöhlen über dem rechten Thunerseeufer folgende Eintiefung durch Karstlösung (Warmzeiten bzw. eisfreier Vorfluter) bzw. kaltzeitliche Höhlensedimente (vereiste Vorflut) nach. Man beachte die inverse Altersabfolge der Karsterosion und -eintiefung innerhalb des Schratzenkalkes.

Obige Daten (*Tab. 3*) weisen darauf hin, dass die Tiefenerosion unter das heutige Seeniveau im Thunerseebecken erst im Verlauf der Würm-Eiszeit einsetzte. Gemäss den Untersuchungsergebnissen an Tiefbohrungen in Unterseen durch BODMER ET AL. (1973) konnten pollenanalytisch das Allerød, das Bølling und bis in 72 m Tiefe die kaltzeitliche Älteste Dryas nachgewiesen werden. Die nur seismisch ermittelte Felssohle wird bei Unterseen-Interlaken auf einer Felsschwelle in 100 m Tiefe erwartet. HANTKE (1980) ordnet die Rückzugsmoränen des Aaregletschers im Raum Interlaken dem Übergang Älteste Dryas/Bølling zu. Die Eintiefung des Seebeckens und dessen vermutlich initial subglaziale Aufsedimentierung scheinen also durchwegs Phänomene des Spätwürms zu sein. Im Seebecken wurden jedenfalls bis heute keine älteren Sedimente nachgewiesen.

Ausblick

Weitere Feldaufnahmen am Spiezberg

Das hier vorgestellte Bohrprofil mit der benachbarten Baugrube ist, abgesehen von dem am Institut für Pflanzenwissenschaften in Bern gelagerten Kernabschnitt (vgl. *Kap. «Palynologie des Bohrkernabschnittes 10.5 bis 17.5 m»*), nicht mehr einsehbar. Die Eem-Schichten könnten mit etwas Aufwand neu aufgeschlossen werden. Dazu müsste vorerst das Seeufer am Spiezberg neu und detailliert aufgenommen werden. Vermutlich könnten die entsprechenden Schichten an diesem Steilufer, das nach Osten in den Lias-Kalkfels übergeht, mittels einiger Baggerschlitze gefunden werden. Dies ist insofern vielversprechend, als auf der BECK-Karte (1925) Thun-Stockhorn am Ufer ein kleiner, schwer lesbarer oranger Farbfleck kartiert ist. In *Abb. 2* ist dieser am Reditweg und darunter am Ufer als «Stillwasserabla-

Interglazial (Alter in ka BP)	Eintiefung und Sedimentation (Höhlenbach)
Mindel – Holstein (500–320)	bis 760 m ü.M.
Frühriss und Interstadiale (260–190)	bis 700 m ü.M.
Spättriss und Eem (150–100)	bis 660 m ü.M.
Frühwürm (Gossau) bis LGM (< 100–20)	bis < 558 m ü.M. (heutiger Seespiegel)

Tab. 3: Interglaziale Eintiefungen in den Beatushöhlen (HÄUSELMANN 2010).

gerung» eingezeichnet. Grossräumiger liesse sich dazu ein Forschungsprojekt ansetzen, in dem die Sondierbohrungen an Spiezberg und diejenigen im Spiezmoos (*Abb. 5 und 6*) nachgebohrt würden.

Feldarbeiten im Raum Thunersee – Aeschi, Saxeten

Angaben von BECK (1925, 1932, 1934 und 1938) zur sog. «Spiezer-Schwankung» (= «Laufen-Schwankung») sowie die Kartierungen der «interglazialen Sundbreccie» nördlich des Thunersees (BECK 1910), der «interglazialen Suldtal-Schotter und -stadialen Saxetental-Schotter») auf dem Atlasblatt Lauterbrunnen (GÜNZLER SEIFFERT 1933, nur marginal erläutert, alle ohne Typlokalität) lassen eine Neubearbeitung vielversprechend erscheinen. Dazu müsste das Gebiet von Spiez, Hondrich, Faulensee, Krattigen, Leissigen, im unteren Suldtal- und Saxetental (alle auf der Landeskarte der Schweiz 1:25 000, Lauterbrunnen, Blatt 1228) neu kartiert und stratigraphisch aufgenommen werden. Ebenso kartiert BECK (1925) ohne Beschreibung sog. «Steghaldendeltaschotter (nach Riss)» in den linken Aaretalflanken (alte Erosionsböschungen der Kander vor 1714) bei Allmendingen. Beim Bahnhof Spiez ist in den Achtziger-Jahren für Gleiserweiterungen nach Süden eine etwa 10 m hohe und 500 m lange Pfahlwand gebohrt und abgebaut worden. Darin sind noch heute nagelfluhartige, blockige Schotter sichtbar. Vermutlich die gleichen «Nagelfluschotter» sind im unteren Saal des Kinos

Movieworld Spiez architektonisch sehr geschickt als Saalwand belassen worden und mit aufgespaltenen Blöcken sichtbar. Vermutlich handelt es sich dabei ebenfalls um sog. «Altmoränen», Guntelsei-Schotter oder Hani-Deltaschotter.

Es ist nicht auszuschliessen, dass am rechten Thunerseeufer doch noch sog. «Altmoränen» zu finden sind. So könnten der oligozänen Guntener Nagelfluh irgendwo noch unbemerkte mittelpleistozäne, nagelfluhartige Schotter angelagert sein. Die Unterscheidungsmerkmale hat SCHLÜCHTER (1976) definiert. Die erwähnten Schotterabsätze sind seit den 20er und 30er Jahren des letzten Jahrhunderts nicht mehr bearbeitet worden.

Neudatierungen

Ganz allgemein bedürfen die meisten, der in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Beschreibungen, Korrelationsversuche, Klimarekonstruktionen und v.A. die mit vielen

Das neu erschlossene Umweltarchiv Spiezberg zeigt einwandfrei, dass warmzeitliche Eem-Schichten in den Alpen unter Moränenlagen erhalten blieben.

Fragezeichen versehenen Datierungen, insbesondere die vielen unklaren ^{14}C -Mindestalter, detaillierter Revisionen. Dazu bieten sich die unterdessen weit fortgeschrittenen physikalischen Analysemethoden am ^{14}C -Zerfall, an der Uran-Thorium-Zerfallsreihe (WILDBERGER & HÄUSELMANN 2010), an kosmogenen instabilen Nukliden, der Lumineszenz sowie die Palynologie an.

Talbildung, subglaziale Hydraulik, Erosionsleistung

Das vorliegende Talbildungsmodell (*Abb. 8 und 9*) mögen die quartärgeschichtlichen Abläufe mit den ausgeräumten Gesteinsmassen skizzieren, aber über die eigentlichen glazigenen Erosionsprozesse sagt dies wenig aus. Wie und wann die Alpentäler und die Seebecken ausgeräumt worden sind, ist nach

wie vor eine offene Frage, dies u.A. auch im Alpenrheintal und dem Bodenseebecken, wo die Talsohlen nachweislich stellenweise bis unter den Meeresspiegel abgeteufelt und weitgehend ohne Moränenablagerungen mit Seesedimenten gefüllt sind. Inwiefern entsprechende vermutlich subglaziale Erosionsprozesse gewirkt haben mögen, wäre möglicherweise mit hydraulisch-geotechnisch-felsmechanischer Modellierung geophysikalisch zumindest plausibel zu erklären. Ingenieure und Geophysiker sind gefordert! Als einfacher, weil zeitlich und örtlich eng definierbarer Testfall könnte zum Einstieg die hoch dynamische Ausräumung am Kanderdurchstich von 1714 dienen (vgl. Kap. «Begleitende glazigene Schotter und Moränen»).

Schlussfolgerungen

Das neu erschlossene Umweltarchiv Spiezberg zeigt einwandfrei, dass warmzeitliche Eem-Schichten in den Alpen unter Moränenlagen erhalten blieben. Diese warmzeitlichen Stillwassersedimente sind reich an Mikro- und Makrofossilien und können mit vergleichbaren Sedimenten im Berner Aaretal und im übrigen Schweizerischen Mittelland geo- und biostratigraphisch korreliert werden.

Die Eem-Schichten sind nachweislich in kaltzeitliche Moränen und Schotter eingelagert. Dieser stratigraphische Kontext erlaubt es, die Talbildung im Raum des unteren Thunersees zu rekonstruieren. Damit können tiefgreifende Erosion, mehrere Vergletscherungen und Sedimentation seit dem Mittelpleistozän (Riss-Glazial) bis weit in die inneralpinen Täler nachgewiesen werden. Das Thunerseebecken selbst scheint jedoch erst im Spätpleistozän (Spätwürm) in die Tiefe ausgeräumt worden zu sein. Die Eem-Schichten als zeitlich eng fassbarer und räumlich grossregional verfolgbare Markerhorizont ermöglichen es, die heute gemessenen Hebungsraten von 0.2 mm/Jahr am Alpenrand modellhaft bis zur Grenze Mittel- /Spätpleistozän zurückzuverfolgen.

Noch interner gelegene interglaziale und -stadiale Schotter werden zur Neubearbeitung empfohlen.

Verdankungen

Die Grundlagepläne und -daten zur vorliegenden Arbeit wurden anlässlich des Entwässerungsprojektes Spiez – Spiezberg durch das Ingenieurbüro KISSLING und ZBINDEN AG Spiez (2005–2010) erarbeitet. Das GEOTECHNISCHE INSTITUT SPIEZ (2005) leitete die geologischen Untersuchungen und verfasste den geotechnischen Bericht. Beide Büros stellten ihre Berichte, Pläne und Dokumentationen unter Einwilligung des Bauamtes Spiez als Bauherr bereitwillig zur Verfügung.

Die Publikation, insbesondere die Digitalisierung der aufwändigen Pläne und Karten, die Figuren und Profile, die Literatursuche an Bibliotheken und im Internet sowie ein Korreferat der Endfassung wurden am Büro für Technische Geologie AG (BTG) in Sargans durch die Zeichnerin Vivianne La-reida, die Sekretärin Daniela Schwitter und den Ingenieurgeologen Daniel Figi redigiert. Das BTG hat dem Verfasser Peter Zwahlen die unverzichtbare Infrastruktur zur Verfügung gestellt.

Mit Planlieferungen, Datierungen und wissenschaftlichen Beratungen haben die Swisstopo, die Landesgeologie, das Radio-carbonlabor des Physikalischen Instituts der Universität Bern, das Geoportal des Kantons Bern, das Geologiebüro Kellerhals+Haefeli sowie indirekt und meistens unwissentlich die im Literaturverzeichnis erwähnten Autoren wissenschaftlicher Arbeiten wesentlich zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen. Dr. Reto Hänni, der ehemalige Projektleiter Geotechnik am Rohrvortrieb, kammte eine fortgeschrittene Entwurfsfassung als Korreferent durch und Erika Gobet als Co-Präsidentin der NGB hat letztlich vorgeschlagen, die Publikation «Umweltarchiv am Spiezberg» in die Mitteilungen 2021 der NGB aufzunehmen.

Literatur

- BACHMANN, I. (1870): Die Kander im Berner Oberland. Ein ehemaliges Gletscher- und Flussgebiet. – Bern, Dalp'sche Buch- und Kunsthandlung (K. Schmid).
- BECK, P. & GERBER, E. (1925): Geologische Karte Thun-Stockhorn 1:25 000, Spezialkarte No. 96. Geol. Komm. der Schweiz. naturf. Ges.
- BECK, P. (1910): Geologische Karte der Gebirge nördlich von Interlaken 1:50 000. – Beiträge zur geolog. Karte der Schweiz. Neue Folge Liefg. XXIX, Spezialkarte No. 56a.
- BECK, P. (1932): Über den eiszeitlichen Aaregletscher und die Quartärchronologie. – Verh. Schweiz. Natf. Ges. 113/1.
- BECK, P. (1934): Gletscherablagerungen der Kanderschlucht und des Glütschtales. – In: Exkursion Nr. 39 A Umgebung von Thun. Geologischer Führer der Schweiz 8, Basel (Wepf).
- BECK, P. (1938): Bericht über die ausserordentliche Frühjahrsversammlung der Schweizerischen Geologischen Gesellschaft in Thun 1938. – Eclogae geol. Helv. 31/1.
- BODMER, R., MATTER, A. & SCHELLER, E. (1973): Geologische, seismische und pollenanalytische Untersuchungen im Bödéli bei Interlaken. – Mitt. Natf. Ges. in Bern, N.F. Band 30 .
- BUCKINGHAM, TH., WALKER, S., MEYER, J. & KEEL, H. (2013): UNESCO-Welterbe Tektonikarena Sardona. – Verlag UNESCO-Welterbe, World Heritage 07.06.2013.
- BURGA, C.A. (2006): Zum Mittelwürm des Zürcher Oberlandes am Beispiel des Schieferkohle-Profiles von Gossau. – Vierteljahrschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich.
- DRESCHER-SCHNEIDER, R. & PAPESCH, W. (1998): A contribution towards the reconstruction of Eemian vegetation and climate in central Europe: first results of pollen and oxygen isotope investigations from Mondsee, Austria. *Vegetation History and Archaeobotany* 7, 235–240.
- GEOPORTAL DES KANTONS BERN, Geologische Grundlagedaten 616/171.12 (2015): Erneuerung Einlauf Bauwerk Spiezmoos, Stollen und Wasserschloss. Ber. CSD Nr. BE 1417A (1981). Spülbohrung Erdsonde zum Umbau Wohnhaus A. Walter, Spiez. Geoplan Obj.Nr. BE 1272.
- GEOTECHNISCHES INSTITUT SPIEZ [GI SPIEZ] (2005): Kanalisation Stockhornstrasse, Spiezmoos, Rohrleitung durch den Spiezberg. Bericht Baugrunduntersuchung, Auftrags-Nr. 133.00 82.001, Spiez, Juni 2005.
- GRAF, H.R. (2009): Stratigraphie von Mittel- und Spätpleistozän in der Nordschweiz. – Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz 168 (N.F.), Landesgeologie, swisstopo.
- GRUNER, U. (1993): Eiszeitliche Trogbildungen im Raum Bern. – Mitt. Natf. Ges. Bern N.F. 50.
- GRUNER, U. (2001): Geologischer Atlas der Schweiz 1:25 000 Blatt 1167 Worb. Erläute-

- rungen. – Bundesamt für Wasser und Geologie, Geologische Landesaufnahme.
- GÜNZLER-SEIFFERT, H. (1933): Geologischer Atlas der Schweiz 1:25 000 Blatt 395 Lauterbrunnen. Erläuterungen mit Beitrag über Quartär von P. Beck. – Geol. Komm. der Schweiz. Natf. Ges.
- HANTKE, R. (1980): Eiszeitalter 2. – Ott Verlag ASG Thun.
- HÄUSELMANN, P. (2010): Die St. Beatus-Höhlen: Zeugen eiszeitlicher Aktivitäten in den helvetischen Voralpen (Exkursion G am 10. April 2010). – in Geologische Exkursionen Bern, Geologie der Berner Alpen und ihres Vorlandes. Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins Band 92.
- HEER, O. (1879): Die Urwelt der Schweiz. Oeningen S. 480. – Zweite umgearbeitete Auflage, Druck und Verlag Friedrich Schulthess, Zürich 1879.
- ISLER, A. (2005): Geologischer Atlas der Schweiz 1:25 000 Blatt 1166 Bern. Erläuterungen. – Bundesamt für Wasser und Geologie, Geologische Landesaufnahme.
- ISLER, A. & KELLERHALS, P. (1983): Profilsérie durch die Quartärfüllung des Aare- und des Gürbetrog zwischen Thunersee und Bern. – *Eclogae geol. Helv.* 31/1.
- KELLER, O. (2014): Erwägung zur Korrelation mittelepleistozäner Relikte des Rheingletschers mit der nordschweizer Stratigraphie. – *E&G Quaternary Science Journal* Vol. 63, Nr. 1, 2014.
- KELLERHALS + HAEFELI AG, Kapellenstrasse 12 Bern, Dres. phil. nat. Geologen (1985): Geologische Aufnahmen des neuen Hondrichtunnels Süd 1 und 2. BLS Auftrags-Nr. 772.
- KISSLING + ZBINDEN AG, Ingenieure Planer USIC (2010, 2015): Einwohnergemeinde Spiez, Abschlussakten. Ableitung Stockhornstrasse, Bohrleitung Spiezberg
 a) Situationen, Längenprofile Plan Nr. 5.029/200 (A. Lauber)
 b) Startbereich Lockergesteinsstrecke Krankenheim Spiez (A. Lauber Dez. 2007)
 c) Zielbereich Lockergesteinsstrecke Nord (do.)
 d) Fotodokumentation Baustellen Lose 1 und 2 (A. Lauber 2007)
- MATTER, A., SÜSTRUNK, E., HINZ, K., & STURM, M. (1971): Ergebnisse reflexionsseismischer Untersuchungen im Thunersee. – *Eclogae geol. Helv.* 64/3.
- MOORE, P.D., WEBB, J.A. & COLLINSON, M.E. (1991). *Pollen Analysis*. Blackwell Scientific Publications. second edition, London.
- PENK, A. & BRÜCKNER, E. (1901): Die Alpen im Eiszeitalter. Verlag C. H. Tauchnitz. Leipzig 1901, I. und II. Lieferung.
- PREUSSER, F. & SCHLÜCHTER, CH. (2004): Dates from an important early Late Pleistocene ice advance in the Aare valley, Switzerland. – *Eclogae Geol. Helv.* 97, 245–253.
- PREUSSER, F., DRESCHER-SCHNEIDER, R., FIEBIG, M. & SCHLÜCHTER, C. (2005): Reinterpretation of the Meikirch pollen record, Swiss Alpine Foreland, and implications for Middle Pleistocene chronostratigraphy. *J. Quat. Sci.* 20, 607–620.
- PREUSSER, F. (2010): Stratigraphische Gliederung des Eiszeitalters in der Schweiz (Exkursion D am 8. April 2010). – in Geolog. Exkursionen Bern, Geologie der Berner Alpen und ihres Vorlandes. Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geolog. Vereins Band 92.
- SCHUCHZER, J.J. (1723): *Herbarium Diluvianum Collectum. – Lugdunum Batavorum, Petri Vander Aa, Bibliopolae, Ciivitatits atque Academiae Typographi.* S. 20 (... Trunci & stipites Lignosi in stratis faxeis prope Thunum ... itinere Anni 1711.) und S. 95 (... Quercinum ex strato lignorum fossilium supra Thunum) und S. 96... (Pini videtur ramus valde compressus... ex strato prope Strättligen supra Thunum).
- SCHUCHZER, J.J. (1731): *Kupfer-Bibel, Physica Sacra oder geheiligte Natur-Wissenschaft.* Verleger J.A. Pfeffel, Druck C.U. Wagner Augsburg und Ulm. *Homo Diluvii Testis: Erste Abtheilung* Tafel 49.
- SCHUCHZER, J.J. (1746): *Johann Jakob Scheuchzers Naturgeschichte des Schweizerlandes samt seiner Reisen über die schweizerischen Gebirge.* – Neuausgabe Zürich 1746 zweyter Theil. J.G. Sulzern (Herausgeber) & D. Gessner (Verlag). Vierte Berg-Reise 1705 (S. 194–195, Projekt Kanderdurchstich), Neunte Berg-Reise 1711 (S. 313–314, Kanderdurchstich im Bau, Schieferkohlen entlang des damaligen Kandertals).
- SCHLÜCHTER, CH. (1976): Geologische Untersuchungen im Quartär des Aaretals südlich von Bern. – *Beitr. Geol. Karte der Schweiz NF 148*, Schweiz. Geol. Komm.
- SCHLÜCHTER, CH. (1987): Talgenese im Quartär – eine Standortbestimmung. – *Beitr. Geol. Karte der Schweiz NF 148*, Schweiz. Geol. Komm.
- SCHLÜCHTER, CH. (2010): Die Kanderschlucht bei Spiez und ihre quartärgeologische Umgebung, Exkursion B. – in Geolog. Exkursionen Bern, Geologie der Berner Alpen und ihres Vorlandes. Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geolog. Vereins Band 92.

- SCHLÜCHTER, CH., BURGA, C.A., FITZE, P., KELLER, W.A., MAISCH, M., SUTER, J. & WYNISTORF, E. (1987): Das Schieferkohle-Profil von Gossau (Kanton Zürich) und seine stratigraphische Stellung innerhalb der letzten Eiszeit. – Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, 133/2.
- STRAUB, G & HUNZIKER, S. (Redaktion, 2013): 300 Jahre Kanderdurchstich.- Jahrbuch 2013 Uferschutzverband Thuner- und Brienersee (UTB), Selbstverlag UTB, Thomann Druck AG Brienz.
- SWISSTOPO (2016): <https://map.geo.admin.ch/Geokatalog/Grundlagen und Planung>.
- VESCOVI, E., RAVAZZI, C., ARPENTI, E., FINSINGER, W., PINI, R., VALSECCHI, V., WICK, L., AMMANN, B., & TINNER, W. (2007): Interactions between climate and vegetation during the lateglacial period as recorded by lake and mire sediment archives in Northern Italy and Southern Switzerland. Quaternary Science Reviews 26, 1650–1669.
- VOLLMAYR, TH. (1992): Strukturelle Ergebnisse der Kohlenwasserstoffextrapolation im Gebiet von Thun, Schweiz. – Eclogae Geol. Helv. 85/3.
- VSS SCHWEIZERISCHER VERBAND DER STRASSENFACHLEUTE (2008): Geotechnische Erkundung und Untersuchung. Bodenklassifizierung nach USCS. Schweizer Norm SN 670 004-2b-NA, VSS Zürich 2008.
- WEGMÜLLER, S. (1992): Vegetationsgeschichtliche und stratigraphische Untersuchungen an Schieferkohlen des nördlichen Alpenvorlandes. – Denkschriften der schweiz. Akad. der Natw., Band 102, Birkhäuser Verlag Basel.
- WEGMÜLLER, S., PREUSSER, F., MÜLLER, B.U. & SCHLÜCHTER, CH. (2002): Palynostratigraphic investigation and luminescence dating of the Galgenmoos section and implications for the chronology of the last glacial cycle in the northern Alpine Foreland of Switzerland. Eclogae Geol. Helv. 95, 115–126.
- WELTEN, M. (1982): Pollenanalytische Untersuchungen im Jüngeren Quartär des nördlichen Alpenvorlandes der Schweiz. – Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz, N.F. 156, Schweiz. Geol. Komm.
- WELTEN, M. (1982b): Vegetationsgeschichtliche Untersuchungen in den westlichen Schweizer Alpen: Bern-Wallis. – Denkschr. schweiz. natf. Ges. 95.
- WELTEN, M. (1988): Neue pollenanalytische Untersuchungen über das Jüngere Quartär des nördlichen Alpenvorlandes der Schweiz, Mittel- und Jungpleistozän. – Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz, N.F. 162, Schweiz. Geol. Komm.
- WILDBERGER, A., GEYH, M.A., GRONER, U., HÄUSELMANN, P., HELLER, F. & PLOETZE, M. (2010): Dating speleothems from the Silberen Cave System and surrounding areas: Speleogenesis in the Muota Valley (Central Switzerland). – Zeitschrift für Geomorphologie Vol. 54, Supl. 2, Stuttgart 2010.
- ZWAHLEN, P. (2018): Würmeiszeit und die Rückzugsstadien im Alpenrheintal, Korrelation von ¹⁴C-Datierungen aus Bohrprofilen mit Glazialstadien und -schwankungen, Klimaphasen, archäologischen Kulturen und Biozonen. CHGEOL Newsletter 16.01.2018 (digital).
- ZWAHLEN, P. (2018): Spätglaziale Klimarekonstruktion im Prättigau an Holzfunden aus den Umfahrungsprojekten A28 Küblis, Saas, Klosters-Serneus. Swiss Bulletin für angewandte Geologie, Vol. 23, 2018.

Abbildungen und Profile

Abb. 1: Spiezberg Nord Blick ca. nach Osten

Abb. 2: Geologie Spiezberg, Situation 1:10 000

Abb. 3: Geologisches Profil 1:2000 Spiezberg, Profilspur Abb. 2

Abb. 4a: Klassische Schieferkohleprofile im Glütschbach- und Kandertal, Querprofile

Abb. 4b: Legende zu Abb. 4a

Abb. 5: Sondierbohrung RB 1-05 Spiezberg

Abb. 6: Sondierbohrungen RB 9/P Stauweiher BKW, Meisselbohrung SB1 Spiezmoos

Abb. 7: Palynologisches Profil, Spiezbergbohrung RB 1-05, Abschnitt 10.5 m bis 17.5 m, Eem

Abb. 8: Topographische Übersicht Spiez – Glütschbachtal – Thun – Jaberg – Bern – Meikirch, Paläogeographie der Früh- und Prätwürm Interstadiale und Interglaziale

Abb. 9: Frühwürm – Eem – Holstein – Ablagerungen Spiez – Meikirch, Längsprofil 1:200 000/10 000, Querprofile 1:100 000/10 000

Tafeln

Tafel 1: Fotodokumentation. Zielschacht Rohrvortrieb Spiezberg Nord, 2008. Aufgeschlos-

sene glazigene Schotter und Stillwassersedimente.

Tafel 2: Johann Jakob Scheuchzer; Naturgeschichte des Schweizerlandes, neunte Berg-Reise von 1711. Auszug der Seiten 313 und 314 aus der Neuausgabe von 1746 zweyter Theil. J.G. Sulzern (Herausgeber) & D. Gessner (Verlag). Scheuchzers Beschreibung der laufenden Bauarbeiten am Kanderdurchstich und der Schieferkohle-Schichten im Glütschbachtal, am damals noch aktiven Kander-Flusslauf.

Tabellen

Tab. 1: Stratigraphische Schichtbezeichnungen/
Stratigraphic terms of layers

Tab. 2: ¹⁴C-Datierung: Altersresultate und Analysewerte/¹⁴C-dating: Age results and analysis values

Tab. 3: Interglaziale bez. Eintiefungen in den Beatushöhlen/Interglacials resp. deepening within the caves of Beatus

Figures and profiles

Abb. 1: Spiezberg Nord Blick ca. nach Osten

Abb. 2: Geology Spiezberg, Site map 1:10 000

Abb. 3: Vertical geological section 1:2000 Spiezberg, profile trace *Fig. 1*

Abb. 4a: Classic «shist coal» profiles at Glütschbach- and Kander valley, cross sections

Abb. 4b: Legend of *Abb. 4a*

Abb. 5: Exploration drilling RB 1-05 Spiezberg

Abb. 6: Exploration drilling RB 9/P Stauweiher BKW, destructive drilling SB1 Spiezmoos

Abb. 7: Palynological profile, Spiezberg drilling RB 1-05, section 10.5 m to 17.5 m, Eem

Abb. 8: Topographic map Spiez – Glütschbachtal – Thun – Jaberg – Bern – Meikirch, Paleogeography of the early Würm and Pre-Würm Interstadials and Interglacials

Abb. 9: Frühwürm – Eem – Holstein – deposits-Spiez – Meikirch, longitudinal section 1:200 000/10 000, cross sections 1:100 000/10 000

Plates

Tafel 1: Photographic documentation. Target shaft pipe driving Spiezberg North, 2008. Outcrop of glacial gravel and still water sediments.

Tafel 2: Johann Jakob Scheuchzer; Natural history of Switzerland, 9th mountain journey of 1711. Extract of pages 313 and 314 from the reissue of 1746, second part. J.G. Sulzern (editor) & D. Gessner (publisher). Scheuchzer's description during the construction work for the Kander river deviation and the schist coal layers at Glütschbach Valley, back then at the active Kander river.

Tables in text

Tab. 1: Stratigraphic terms of layers

Tab. 2: ¹⁴C-dating: Age results and analysis values

Tab. 3: Interglacials resp. deepening within the caves of Beatus

Prof. Dr. Willy Tinner



Willy Tinner hat an der Universität Bern Geographie, Biologie und Archäologie studiert und als Dr. phil. nat. in Biologie promoviert. Danach folgte ein Forschungsaufenthalt an der University of Illinois (USA), die Habilitation an der Universität Bern und eine SNF-Proessur an der ETH Zürich. Seit 2008 ist er an der Universität Bern Professor für Paläoökologie. Er ist Co-Präsident des globalen Forschungsprogramms PAGES. Sein Forschungsinteresse gilt der Rekonstruktion der Vegetationsdynamik nach Klimaänderungen und Störungen. Er ist Vater zweier Kinder und verbringt seine Freizeit am liebsten in seinem Heimattal Anzasca.

Kontakt: willy.tinner@ips.unibe.ch

Dr. Elisa Vescovi



Elisa Vescovi hat an der Universität Mailand Erdwissenschaften und Naturwissenschaften studiert und an der Universität Bern als Dr. phil. nat. in Klimawissenschaften promoviert. Nach einigen Jahren als Forscherin an der ETH Zürich und der Universität Bern wurde sie Mutter zweier Kinder und ist seitdem in Teilzeit tätig. Ihr Interesse gilt der Rekonstruktion der vergangenen Vegetations- und Ökosystemdynamik aus Sedimentablagerungen. Neben der Forschung ist sie aktive Imkerin und stark in der Verbesserung von Schulangeboten engagiert.

Dr. Peter Zwahlen



Peter Zwahlen hat ab 1971 an der Universität Bern Naturwissenschaften und Mathematik studiert und dabei 1974 das Sekundarlehrerdiplom, 1981 das Diplom in Geologie erworben und 1985 als Dr. phil. nat. in Geologie promoviert. Während seiner Studienzeit ist er Vater zweier Kinder

geworden und hat sich das Studium als Werkstudent (Teilzeitlehrstellen an Berner Schulen) ermöglicht. 1986 trat er bei Dr. T. Lardelli im Büro für technische Geologie AG (BTG) in Chur eine Stelle in angewandter Geologie an und erwarb sich unter Leitung erfahrener Ingenieurgeologen an der Projektierung u.a. des Vereina-Tunnels und mehrerer Nachdiplomstudien an der ETH-Z das Fachwissen in Ingenieurgeologie und Naturgefahren. Dies befähigte ihn, selbständig geotechnische Projektleitungen zu übernehmen.

Im Jahr 2000 berief ihn das Geotechnische Institut in Bern zur Leitung der Gruppe «Geotechnische Baubegleitung des BLS Lötschbergbasistunnels Nord (AT-LBT)». Während des LBT-Auftrages kooperierte P. Zwahlen mit Prof. Willy Tinner, einerseits durch die Datierung des holozänen Bergsturzes von Kandersteg (Moorsedimente im Voreinschnitt Frutigen) und andererseits in den gemeinsamen, vorliegenden Untersuchungen zu den Eem-Sedimenten am Spiezberg.

2006 wechselte P. Zwahlen nach Abschluss des LBT-Projektes wieder zurück zum BTG, diesmal in Sargans. Bis 2019 (off. Pensionierung 2015) leitete er mehrere geotechnische Bau- und Naturgefahrenprojekte, darunter die Sicherheitsüberwachung mehrerer Staubecken, Sicherung und Ausbau mehrerer Abschnitte von Kantons- und Nationalstrassen, (u.a. die Umfahrung Roveredo) und bis 2015 die ingenieurgeologische Projektierung des Pumpspeicherkraftwerkes «Lagobianco» der Repower sowie eine Sicherheitsanalyse zur Steinschlag- und Felssturzgefährdung des Ortes Poschiavo.

Kontakt: zw.geol@bluewin.ch