Zeitschrift: Mitteilungen der Thurgauischen Naturforschenden Gesellschaft
Herausgeber: Thurgauische Naturforschende Gesellschaft
Band: 72 (2024)

Artikel: Kieselalgen in den Sedimenten des Bichelsees und des Hüttwilersees
Autor: Grudzinska, Ieva / Heiri, Oliver
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1062288

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 20.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

6. Kieselalgen in den Sedimenten des Bichelsees und des Hüttwilersees

Ieva Grudzinska & Oliver Heiri

6.1 Kieselalgen als paläoökologische Indikatoren

Kieselalgen (Bacillariophyceae, Diatomeen) sind einzellige Algen, die als Primärproduzenten eine wichtige Funktion in der Nahrungskette von Gewässern spielen, sowohl im Süsswasser als auch im Salzwasser. Kieselalgen sind in aquatischen Ökosystemen in grosser Menge und Vielfalt vorhanden, weshalb sie oft die dominierenden Algen im Phytoplankton und Phytobenthos sind. Die Zellwand einer Kieselalge (auch «Frustel» genannt) besteht aus biogenem Silikat. Planktische Kieselalgen schweben frei im Wasser und leben hauptsächlich im oberen Teil der Wassersäule, wo genügend Licht für die Photosynthese vorhanden ist. Benthische Kieselalgen hingegen leben im oder auf dem Substrat am Boden (z. B. Schlamm, Sand) und sind beweglich oder haften an verschiedenen Oberflächen (z. B. Wasserpflanzen, Felsen). Sie sind ebenfalls auf genügend Licht angewiesen und darum in tieferen Seen v. a. in flacheren, ufernahen Abschnitten zu finden. Neben planktischen und benthischen Kieselalgen gibt es zwei weitere Gruppen – meroplanktische und tychoplanktische. Meroplanktische Kieselalgen haben in ihrem Lebenszyklus sowohl planktonische als auch benthische Phasen, während tychoplanktische Kieselalgen benthische Kieselalgen sind, die durch Störungen ihres benthischen Lebensraums oder durch Winde und Strömungen in die Wassersäule getragen werden und dort eine Zeit lang als Plankton leben können.

Kieselalgen werden häufig als Indikatoren für den ökologischen Zustand von Seen oder Fliessgewässern verwendet. Aber auch in Sedimentuntersuchungen werden Kieselalgen weithin als ausserordentlich aussagekräftige Indikatoren zur Rekonstruktion verschiedener Umweltvariablen verwendet, wie z. B. pH-Wert, Gesamtphosphor-Konzentrationen des Wassers (GP), Trübung, Schichtung oder Eisbedeckung *(Battarbee et al. 2001)*. Kieselalgen erfüllen eine Reihe von Kriterien, welche als Indikatoren für Sedimentuntersuchungen wichtig sind. Erstens sind ihre Frusteln robust und widerstandsfähig, sodass sie in der Regel in den Sedimenten gut erhalten sind. Zweitens weisen Kieselalgen eine hohe taxonomische Vielfalt und Abundanz auf. Drittens ist es möglich, Kieselalgen bis auf die Art oder sogar Unterart zu bestimmen, da geeignete Bestimmungsschlüssel vorhanden sind *(Battarbee et al. 2001)*. Schliesslich sind Kieselalgen in einem breiten Spektrum von Umweltbedingungen anzutreffen und sie reagieren empfindlich auf Veränderungen in ihrer aquatischen Umgebung. So werden sie beispielsweise häufig verwendet, um vergangene Veränderungen der Nährstoffkonzentrationen (des Trophiegrads) von Seen nachzuvollziehen *(Gąsiorowski et al. 2021)*, da viele Kieslalgenarten unterschiedliche Optima und enge Toleranzen für den Gesamtphosphorgehalt von Gewässern aufweisen und schnell auf Veränderungen der Nährstoffkonzentration reagieren.

Kieselalgen wurden in den Sedimenten des Bichelsees und des Hüttwilersees ab den mittelholozänzeitlichen Ablagerungen untersucht, allerdings waren sie nur im Hüttwilersee über grosse Teile des Mittel- und Spätholozäns durchgehend erhalten. Ziel der Untersuchungen war es, herauszufinden, wie sich die Zusammensetzung der planktischen und benthischen Kieselalgen über den Untersuchungszeitraum verändert hat und was dies über Umweltveränderungen in den Seen, aber auch über die Einflüsse von menschlichen Aktivitäten auf ihre Nährstoffkonzentrationen aussagt. Der nachweisbare menschliche Einfluss auf das Umland des Bichelsees und des Hüttwilersees beginnt mit den ersten landwirtschaftlichen Aktivitäten im Neolithikum *(Wick et al. in diesem Band)*. In dieser Studie liegt der Schwerpunkt jedoch verstärkt auf den letzten 2000 Jahren, beginnend mit der Römerzeit bis hin zur Neuzeit.

6.2 Methoden

Die Proben wurden nach *Battarbee et al. (2001)* vorbereitet. Zunächst wurden 0,5 cm^3 der feuchten Sedimente mit Salzsäure (HCl) 10 % behandelt, um Karbonate und Metallsalze zu entfernen. Danach wurden Wasserstoffperoxid (H_2O_2) 35 % hinzugefügt, um organisches Material zu oxidieren. Der Kieselalgen-Akkumulationsrate wurde danach eine bekannte Menge synthetischer Mikrokügelchen *(microspheres)* zugesetzt, damit die Kieselalgenkonzentration und Kieselalgen-Akkumulationsraten (KAR) berechnet werden konnten. Einige Tropfen der gereinigten Teilprobe wurden auf einem Deckglas verteilt, über Nacht bei Raumtemperatur getrocknet und mit Naphrax™ (Brechungsindex ~1,73) auf einen Objektträger aufgezogen. Kieselalgen wurden unter dem Lichtmikroskop (Leica DM2500) mit DIC-Beleuchtung bei 1000-facher Vergrösserung untersucht. Im Durchschnitt wurden etwa 500 Kieselalgen (Bichelsee: 499±53 [±Standardabweichung]; Hüttwilersee: 517±51) gezählt und auf Artniveau bestimmt. In 21 Proben aus dem Bichelsee und 8 Proben aus dem Hüttwilersee waren keine Kieselalgen zu finden. Zusätzlich wurden neben den Kieselalgen auch Zysten und Schuppen der Goldalgen (Chrysophyta), Phytolithen und Schwammnadeln (Porifera) gezählt.

Die Kieselalgen-Taxonomie basierte auf der etablierten Bestimmungsliteratur für Kieselalgen in Europa *(Krammer & Lange-Bertalot 1986, 1988, 1991a,b, Lange-Bertalot et al. 2017, Houk et al. 2010, 2014)*. Die bestimmten Arten wurden entsprechend ihrem bevorzugten Lebensraum in zwei Gruppen eingeteilt – planktisch und benthisch. Zusätzlich wurden kleine fragilarioide Kieselalgen, eine grosse, taxonomisch komplexe und morphologisch variable Gruppe benthischer und tychoplanktonischer Arten, von benthischen Gruppen getrennt, da tychoplanktonische Kieselalgen auch in der Wassersäule bis zu Tiefen von 6–8 m leben können *(Brugam et al. 1998)*. Zu dieser Gruppe gehören *Staurosira* (Ehrenberg) Williams und Round, *Staurosirella* Williams und Round sowie *Pseudostaurosira* (Grunow) Williams und Round. Kieselalgen-Diagramme wurden mit den Computerprogrammen Tilia v. 1.7.16 *(Grimm 2011)* und CorelDRAW 2019 gezeichnet.

Am Bichelsee war die Kieselalgenerhaltung insgesamt schlechter als am Hüttwilersee. 24 Proben aus dem Bichelsee (6 Proben von 60–108 cm, 1 bei 220 cm, 14 von

300–504 cm und 3 von 552–584 cm) enthielten keine bestimmbaren Kieselalgenreste. In einigen Präparaten mit schlechtem Erhaltungszustand waren nur stark verkieselte zentrale Bereiche der Schalen von *Pantocsekiella* spp. erhalten *(Abbildung 6-1)*, was eine chemische An- und Auflösung der Kieselalgenfrusteln nach der Ablagerung vermuten lässt.

Verwandte Kieselalgen-Taxa mit ähnlichen ökologischen Präferenzen wurden in Gruppen zusammengefasst. *Lindavia radiosa*, *L. balatonis* und *L. praetermissa* wurden als *Lindavia radiosa*-Gruppe bezeichnet. Kleine Cyclotelloide, die sich durch ähnliche, aber sehr variable zentrale Schalenbereiche auszeichnen, wie *Pantocsekiella comensis* und *P. pseudocomensis*, wurden in die *Pantocsekiella comensis*-Gruppe eingeordnet *(Abbildung 6-2)*.

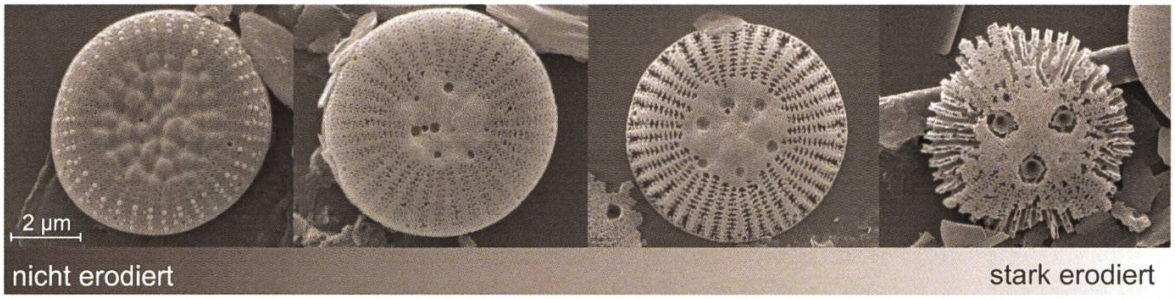


Abbildung 6-1: Verschiedene Stufen der chemischen Auflösung von kleinen Pantocsekiella spp *(SEM-Fotos: Geoökologie Universität Basel, Ieva Grudzinska; Nano Imaging Lab Universität Basel, Evi Bieler).*

6.3 Resultate und Diskussion

In den Sedimenten des Bichelsees wurden insgesamt 194 Kieselalgenarten aus 65 Gattungen gefunden, während im Hüttwilersee 357 Arten aus 81 Gattungen bestimmt wurden. In den zusammenfassenden Diagrammen der Kieselalgen *(Abbildungen 6-3* bis *6-7)* sind nur Arten aufgeführt, die in mindestens zwei Proben mehr als 2 % der Kieselalgen ausmachen.

Bichelsee

Im Bichelsee enthielten vier grössere Sedimentabschnitte keine Kieselalgen (*Abbildungen 6-3* und *6-4:* 584–552 cm, 504–300 cm, 220 cm und 108–60 cm). In zwei Proben (536 und 520 cm) waren die Frusteln zudem extrem schlecht erhalten, was darauf hindeutet, dass die limnologischen Bedingungen für die Entwicklung und Erhaltung der Kieselalgen in diesen Sedimentabschnitten ungeeignet waren *(Bradbury et al. 2002)*. Verschiedene Faktoren können den Erhaltungsgrad von Kieselalgen in Seesedimenten beeinflussen und möglicherweise erklären, wieso diese Proben keine Kieselalgen enthielten. Die Frusteln können sich auflösen, wenn der pH-Wert und/oder der Salzgehalt des Wassers oder im Sediment zu hoch ist oder ein Mangel an Kieselsäure in der Wassersäule besteht *(Barker et al. 1994, Ryves et al. 2001)*. Auch eine hohe Trübung des Wassers aufgrund starker Erosion kann nicht ausgeschlossen werden, was das Wachstum der Kieselalgen infolge Lichtmangels beeinträchtigen würde. Geringe Konzentrationen könnten auch mit sehr schnellen Akkumulationsraten zusammenhängen. Allerdings sind Mikrofossilien anderer Gruppen

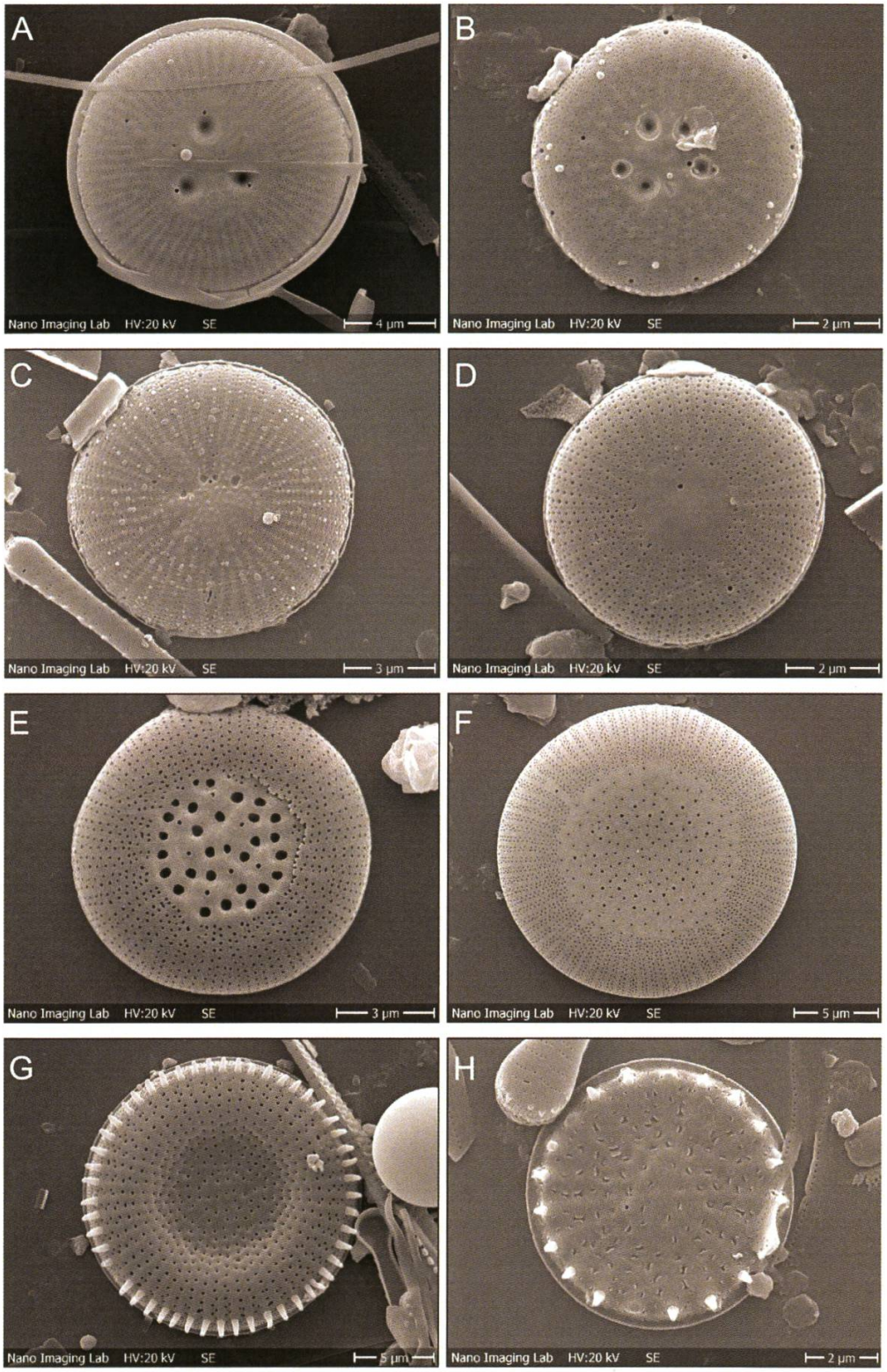
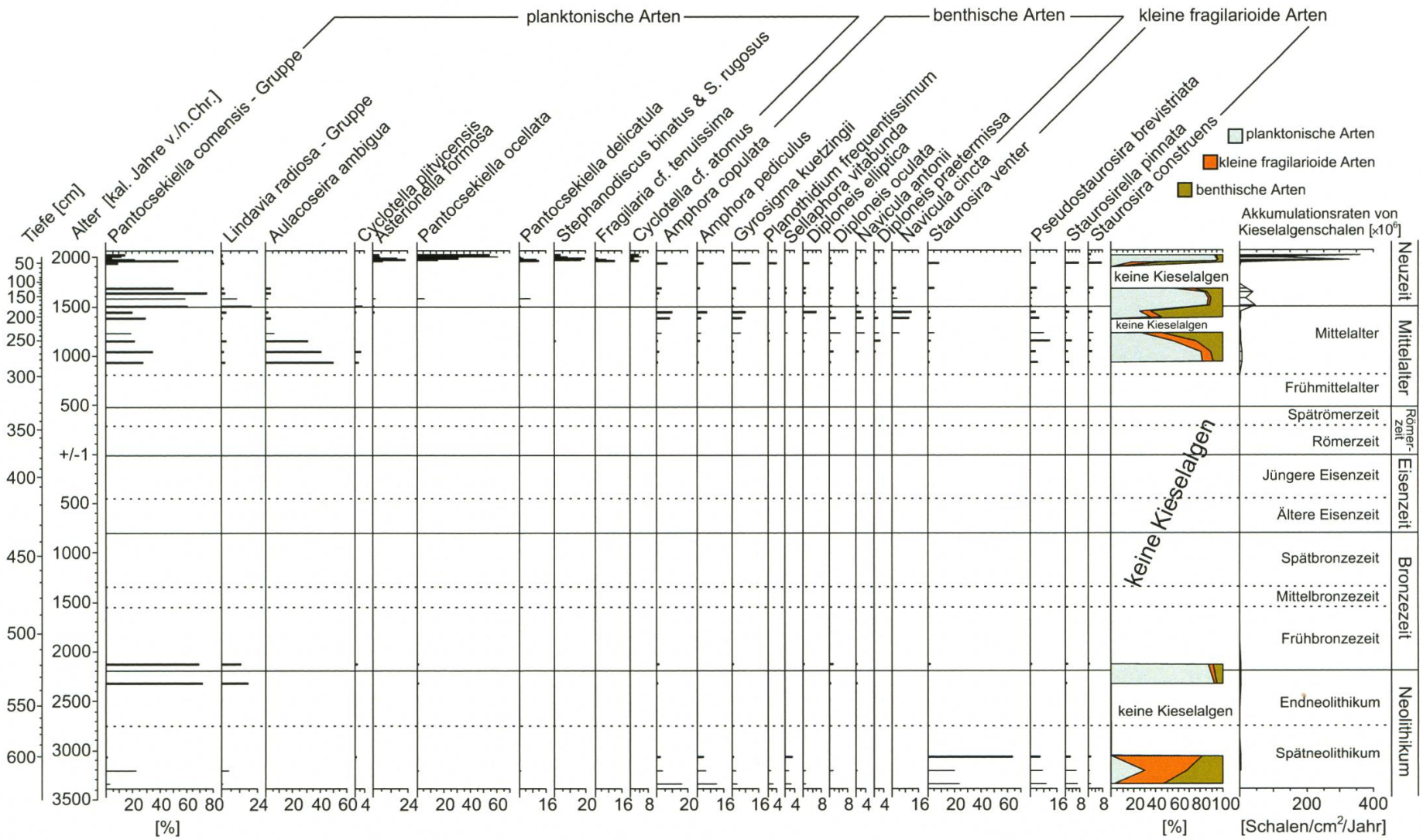


Abbildung 6-2: Kieselalgen des Bichelsees und des Hüttwilersees: A und B Pantocsekiella ocellata, *C und D* Pantocsekiella comensis-*Gruppe, E und F* Lindavia radiosa-*Gruppe, G* Stephanodiscus alpinus, *H* Stephanodiscus rugosus *(SEM-Fotos: Geoökologie Universität Basel, Ieva Grudzinska; Nano Imaging Lab Universität Basel, Evi Bieler).*

(Pollen, Chironomiden, Invertebraten) im Bichelsee durchgehend erhalten, was gegen diese Erklärung sprechen würde *(Lapellegerie et al. in diesem Band, Wick et al. in diesem Band)*.

Eine bessere Erhaltung erlaubte eine detaillierte Bestimmung und Rekonstruktion der Kieselalgen in bestimmten Kernabschnitten, z. B. in einzelnen Proben im Mittelholozän und ab ca. 1000 n. Chr. Im unteren Teil des untersuchten Sedimentkerns waren die häufigsten Kieselalgen kleine fragilarioide Arten (39–81 %), wie *Staurosira venter* (Ehrenberg) Cleve & J. D. Möller, *Pseudostaurosira brevistriata* (Grunow) D. M. Williams & Round, *Staurosirella pinnata* (Ehrenberg) D. M. Williams & Round und *Staurosira binodis* (Ehrenberg) Lange-Bertalot. Diese Gruppe umfasst viele, morphologisch vielfältige benthische Kieselalgenarten, die am Gewässergrund leben, aber auch in der Wassersäule bis in eine Tiefe von 6–8 m vorkommen können *(Brugam et al. 1998)*. Kleine Fragilarioide gelten als mögliche Anzeichen für Störungen der Ökosystembedingungen, sodass eine grosse Anzahl von ihnen möglicherweise auf verstärkte Erosion hinweisen könnte, die zu einer hohen Trübung der Wassersäule geführt hat. Am Bichelsee entsprechen einige der Proben mit hohen Konzentrationen von kleinen Fragilarioiden dem Beginn der Horgener Kultur im Spätneolithikum *(Wick et al. in diesem Band)*. Eine hohe Abundanz dieser Gruppe zusammen mit benthischen Taxa könnte auf flache Wasserbedingungen *(Brugam et al. 1998)* oder eine, relativ gesehen, erhöhte Primärproduktion im Seichtwasserbereich im Vergleich zum zentralen, tiefen Teil des Sees hinweisen.

In zwei einzelnen Proben in 536 und 520 cm Tiefe (2320–2130 v. Chr.), zwischen zwei kieselalgenarmen Sedimentabschnitten, waren Frusteln vorhanden, aber angelöst und schlecht erhalten *(Abbildungen 6-1* und *6-3)*, was die Bestimmung und Zählung der Kieselalgen erschwerte. In diesen beiden Proben dominierten die planktonische *Pantocsekiella comensis*-Gruppe (69–72 %) und die *Lindavia radiosa* (Grunow) De Toni & Forti-Gruppe (13–18 %). Die Dominanz der Cyclotelloiden könnte allerdings auch ein Artefakt des Erhaltungszustands der Kieselalgen sein *(Bradshaw et al. 2005)*. Im Gegensatz zu mehreren anderen Kieselalgentaxa bleiben die stark verkieselten zentralen Bereiche der Cyclotelloiden erhalten, selbst wenn die Schalen im Allgemeinen weggelöst sind *(Ryves et al. 2001)*. Die hohe Anzahl planktonischer *Pantocsekiella comensis* und *Lindavia radiosa* könnte auf einen höheren Seespiegel am Ende des Neolithikums und zu Beginn der Bronzezeit hinweisen, verglichen mit den früheren Bedingungen um ca. 3340–3060 v. Chr., als kleine fragilarioide Arten vorherrschten. Aber auch eine selektive Erhaltung der planktischen Kieselalgen, weniger Trübung oder eine geringere Kieselalgenproduktion im Uferbereich des Sees könnte diese Beobachtung erklären. In Sedimentschichten, die die Bronzezeit, die Eisenzeit, die Römerzeit und das frühe Mittelalter repräsentieren, sind Kieselalgen leider nicht erhalten. Kieselalgen wurden erst wieder in einer Tiefe von 284 cm gefunden, was etwa der Zeit um 930 n. Chr. entspricht. Die hier nachgewiesene hohe Anzahl meroplanktischer *Aulacoseira ambigua* (Grunow) Simonsen (31–51 % bei 284–252 cm; 930–1150 n. Chr.) könnte ein Hinweis auf einen etwas niedrigeren Seespiegel sein oder eine erhöhte Primärproduktion im Uferbereich anzeigen, da diese Kieselalge in flachen Seen sehr häufig vorkommt. Aber auch hohe Kieselsäurekonzentrationen im Wasser oder eine intensivere Durchmischung der Wasser-


planktonische Arten
benthische Arten
kleine fragilarioide Arten
Tiefe [cm]
Alter [kal. Jahre v./n.Chr.]
Pantocsekiella comensis - Gruppe
Lindavia radiosa - Gruppe
Aulacoseira ambigua
Cyclotella pliticensis
Asterionella formosa
Pantocsekiella ocellata
Pantocsekiella delicatula
Stephanodiscus binatus & S. rugosus
Fragilaria cf. tenuissima
Cyclotella cf. atomus
Amphora copulata
Amphora pediculus
Gyrosigma kuetzingii
Planothidium frequentissimum
Sellaphora vitabunda
Diploneis elliptica
Diploneis oculata
Navicula antonii
Diploneis praetermissa
Navicula cincta
Staurosira venter
Pseudostaurosira brevistriata
Staurosirella pinnata
Staurosira construens
planktonische Arten
kleine fragilarioide Arten
benthische Arten
Akkumulationsraten von Kieselalgenschalen [x10^6]
keine Kieselalgen
Neuzeit
Mittelalter
Frühmittelalter
Spätrömerzeit
Römerzeit
Römer-zeit
Jüngere Eisenzeit
Ältere Eisenzeit
Eisenzeit
Spätbronzezeit
Mittelbronzezeit
Frühbronzezeit
Bronzezeit
Endneolithikum
Spätneolithikum
Neolithikum
[%]
[Schalen/cm²/Jahr]

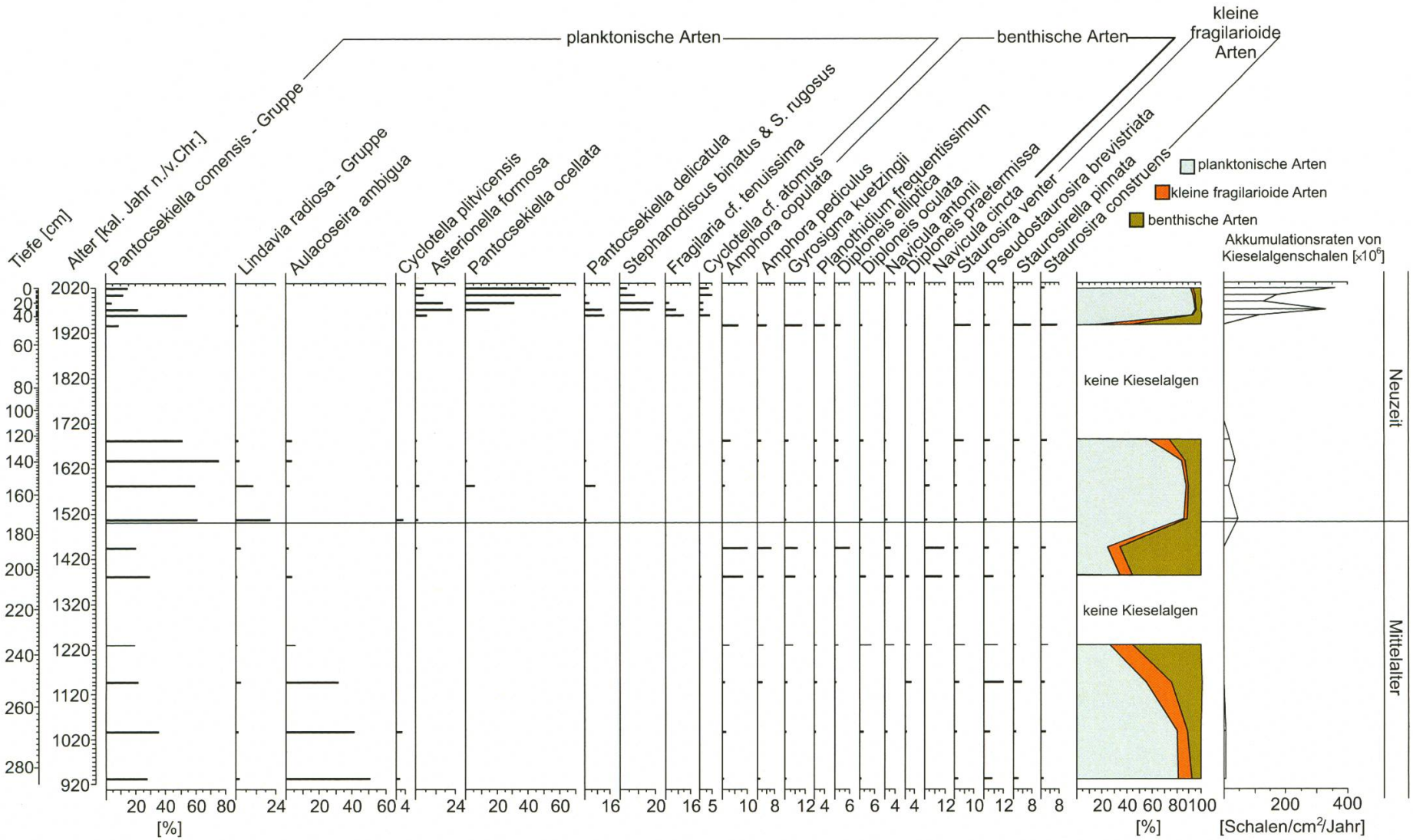
säule können diese Art fördern, da sie schwere Zellen hat, die in ruhigem Wasser schnell absinken *(Bradbury et al. 2002, Rühland et al. 2015, Kilham 1986)*.

Gegen Ende des Mittelalters (236–188 cm; 1230–1440) wurde ein deutlicher Anstieg der benthischen Kieselalgen (55–65 %) beobachtet. Die häufigsten Arten waren *Amphora copulata* (Kützing) Schoeman & R. E. M. Archibald (8–10 %), *A. pediculus* (Kützing) Grunow (bis zu 6 %), *Navicula cincta* (Ehrenberg) Ralfs (10–11 %) sowie *Gyrosigma kuetzingii* (Grunow) Cleve (6–8 %) und *Diploneis elliptica* (Kützing) Cleve (bis zu 6 %), die häufig in meso- bis eutrophen Gewässern vorkommen *(Dam et al. 1994)*. Die Dominanz dieser benthischen Kieselalgen könnte ein Indikator für eine weitere Senkung des Seespiegels oder noch produktivere Bedingungen im Uferbereich sein, aber auch auf schlechte Verhältnisse für das Wachstum der planktischen Kieselalgen im Sommer hinweisen. So könnten z. B. das erhöhte Wachstum von Cyanobakterien oder Grünalgen während des Sommers zu einer Reduktion der planktischen Kieselalgen geführt haben.

Auf ähnliche Weise könnte die Dominanz von *Aulacoseira ambigua* für diesen Zeitabschnitt ebenfalls auf tiefere Wasserspiegel oder eine hohe Primärproduktion im Uferbereich zurückzuführen sein und die anschliessende Zunahme der benthischen Kieselalgen auf noch niedrigere Seepegel oder ungeeignete Bedingungen für planktische Kieselalgen hinweisen. Eine hohe Anzahl von meroplanktischen *A. ambigua* kann z. B. durch turbulentere Wasserbedingungen und dem vorübergehenden Zusammenbruch der Schichtung im Spätsommer und Frühherbst erklärt werden *(Rühland et al. 2015)*, aber auch auf die Verfügbarkeit zusätzlicher Nährstoffe (wie Kieselsäure und Phosphor) *(Kilham 1986)* im See weisen. Phasen mit hohen Anteilen an benthischen Kieselalgen fallen mit Perioden der mittelalterlichen Warmzeit (950–1250 n. Chr., *Mann et al. 2009*) zusammen. Zudem war gemäss den Pollendaten der menschliche Einfluss im Einzugsgebiet des Bichelsees in grossen Teilen des Mittelalters sehr hoch *(Wick et al. in diesem Band)*, was ebenfalls die hohen Werte von Störungs- und Trübezeiger bei den Kieselalgen miterklären könnte.

Am Übergang vom Mittelalter zur Neuzeit, der mit dem Beginn der Kleinen Eiszeit um 1400–1700 zusammenfällt *(Mann et al. 2009)*, nimmt die Anzahl der benthischen Taxa auf ca. 11 % ab, während die Cyclotelloiden (z. B. *P. comensis*-Gruppe und *L. radiosa*-Gruppe) um bis zu 87 % zunehmen. Dies könnte die Folge eines höheren Seespiegels oder geringerer Trübung des Wassers sein, aber auch auf ruhigere Witterungsbedingungen während der Sommermonate hinweisen *(Bradbury et al. 2002)*. Im Zeitraum 1510–1680 wurde das erste Mal ein Anstieg der Kieselalgen-Akkumulationsraten auf bis zu 47×10^6 Schalen/cm^2/Jahr beobachtet. Allerdings war der folgende Sedimentabschnitt (1700–1900) wieder kieselalgenarm. Die Zusammensetzung der Kieselalgen zu Beginn des 20. Jahrhunderts war derjenigen am Ende des Mittelalters sehr ähnlich. Bei den Kieselalgen dominieren kleine fragi-

Abbildung 6-3: Diagramm ausgewählter Kieselalgen in den Sedimenten des Bichelsees (als Prozente). Akkumulationsraten von Kieselalgenschalen werden ebenfalls angezeigt, zusammen mit wichtigen prähistorischen und historischen Perioden (rechts im Diagramm).


planktonische Arten
benthische Arten
kleine fragilarioide Arten
Tiefe [cm]
Alter [kal. Jahr n./v.Chr.]
Pantocsekiella comensis - Gruppe
Lindavia radiosa - Gruppe
Aulacoseira ambigua
Cyclotella pliltvicensis
Asterionella formosa
Pantocsekiella ocellata
Pantocsekiella delicatula
Stephanodiscus binatus & S. rugosus
Fragilaria cf. tenuissima
Cyclotella cf. atomus
Amphora copulata
Amphora pediculus
Gyrosigma kuetzingii
Planothidium frequentissimum
Diploneis elliptica
Diploneis oculata
Navicula antonii
Diploneis praetermissa
Navicula cincta
Staurosira venter
Pseudostaurosira brevistriata
Staurosirella pinnata
Staurosira construens
planktonische Arten
kleine fragilarioide Arten
benthische Arten
Akkumulationsraten von Kieselalgenschalen [x10^6]
keine Kieselalgen
keine Kieselalgen
Neuzeit
Mittelalter
[%]
[%]
[Schalen/cm²/Jahr]

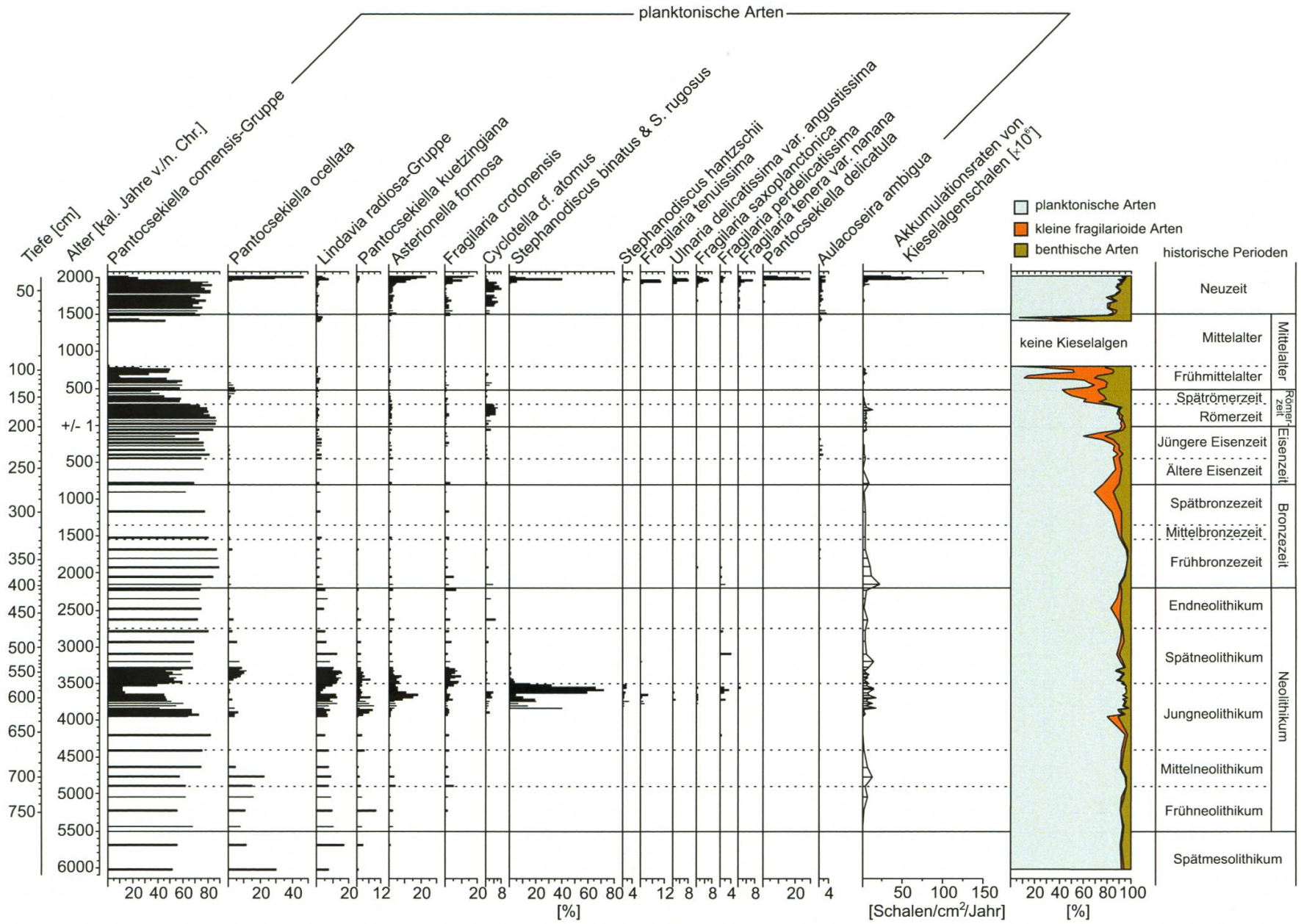
larioide Arten (ca. 27 %) wie *Staurosira venter, S. construens* und *Staurosirella pinnata* und benthische Kieselalgen (ca. 55 %) wie *Amphora copulata, A. pediculus, Gyrosigma kuetzingii* und *Planothidium frequentissimum* (Lange-Bertalot), die einen niedrigen Wasserstand, hohe Trübung, relativ gesehen höhere Produktion im Uferbereich und/oder hohe Nährstoffkonzentrationen anzeigen könnten.

Um die 1960er-Jahre ändert sich die Zusammensetzung der Kieselalgen deutlich. Neben der *Pantocsekiella comensis*-Gruppe (54 %) treten neue Kieselalgen-Arten wie die nadelförmige *Fragilaria* cf. *tenuissima* Lange-Bertalot & S. Ulrich und *Asterionella formosa* Hassall auf. Proben, die auf ca. 1970 und 1990 datiert sind, weisen die höchste Anzahl kleiner *Stephanodiscus* spp. auf (*Stephanodiscus binatus* Håkansson & H. J. Kling und *Stephanodiscus rugosus* Sieminska & Chudybowa), was auf einen höheren Nährstoffeintrag in den See hinweist *(Houk et al. 2014)*. Gleichzeitig wurde der höchste Anstieg (16–22 %) bei *A. formosa* beobachtet, die nach *Hundey et al. (2014)* einen erhöhten Eintrag von Stickstoff und Phosphor widerspiegelt. Der Anstieg der Nährstoffe wird auch durch eine deutliche Zunahme der Kieselalgen-Akkumulationsraten von 238×10^6 Schalen/cm^2/Jahr (1960) bis 359×10^6 Schalen/cm^2/Jahr in der obersten Probe (2019) angezeigt.

Die Veränderungen in der Zusammensetzung der Kieselalgen und der Akkumulationsraten im obersten Abschnitt lassen sich höchstwahrscheinlich durch die anthropogene Landnutzung und Veränderungen der Bodenbedeckung erklären. Nach *Bradshaw et al. (2005)* deuten hohe Konzentrationen von *A. formosa* auf eine stärkere Durchmischung der Wassersäule hin, die z. B. durch eine offenere Landschaft gefördert wird. Der weit verbreitete Eintrag von Nährstoffen in den 1970er-Jahren, sehr wahrscheinlich v.a. aus landwirtschaftlichen Flächen, aber möglicherweise auch durch häusliche Abwasser, zeigt sich auch in den hohen Gesamtphosphor (GP)-Messungen im Bichelsee im Jahr 1976, als die Spanne der GP-Werte zwischen 48–230 µg l^{-1} mit einem Mittelwert von 111 µg l^{-1} schwankte *(Datenquelle: Amt für Umwelt, Kanton Thurgau)*.

Interessanterweise wurde die *Pantocsekiella comensis*-Gruppe später von einer anderen kleinen Cyclotelloiden Art, *Pantocsekiella ocellata* (Pantocsek) K. T. Kiss & Ács, verdrängt, welche unter verschiedensten Nährstoffbedingungen in oligo- bis eutrophen Seen vorkommt *(Houk et al. 2010)*. Für den Bichelsee könnte die Zunahme von *P. ocellata* und die Abnahme von kleinen *Stephanodiscus* spp. und *A. formosa* auf eine Verringerung der verfügbaren Nährstoffe in der Wassersäule hinweisen. Vorhandene GP-Messungen stimmen ebenfalls mit dieser Interpretation überein, da sie zeigen, dass sich der Bichelsee zu Beginn des 21. Jahrhunderts von einem eutrophen zu einem mesotrophen See veränderte (gemessene GP-Werte im März 2004 zwischen 24–34 µg l^{-1} mit einem Mittelwert 28 µg l^{-1}; *Datenquelle: Amt für Umwelt, Kanton Thurgau)*.

Abbildung 6-4: Diagramm ausgewählter Kieselalgen in den jüngeren Sedimentabschnitten des Bichelsees (als Prozente). Akkumulationsraten von Kieselalgenschalen sowie historische Perioden sind ebenfalls angegeben.

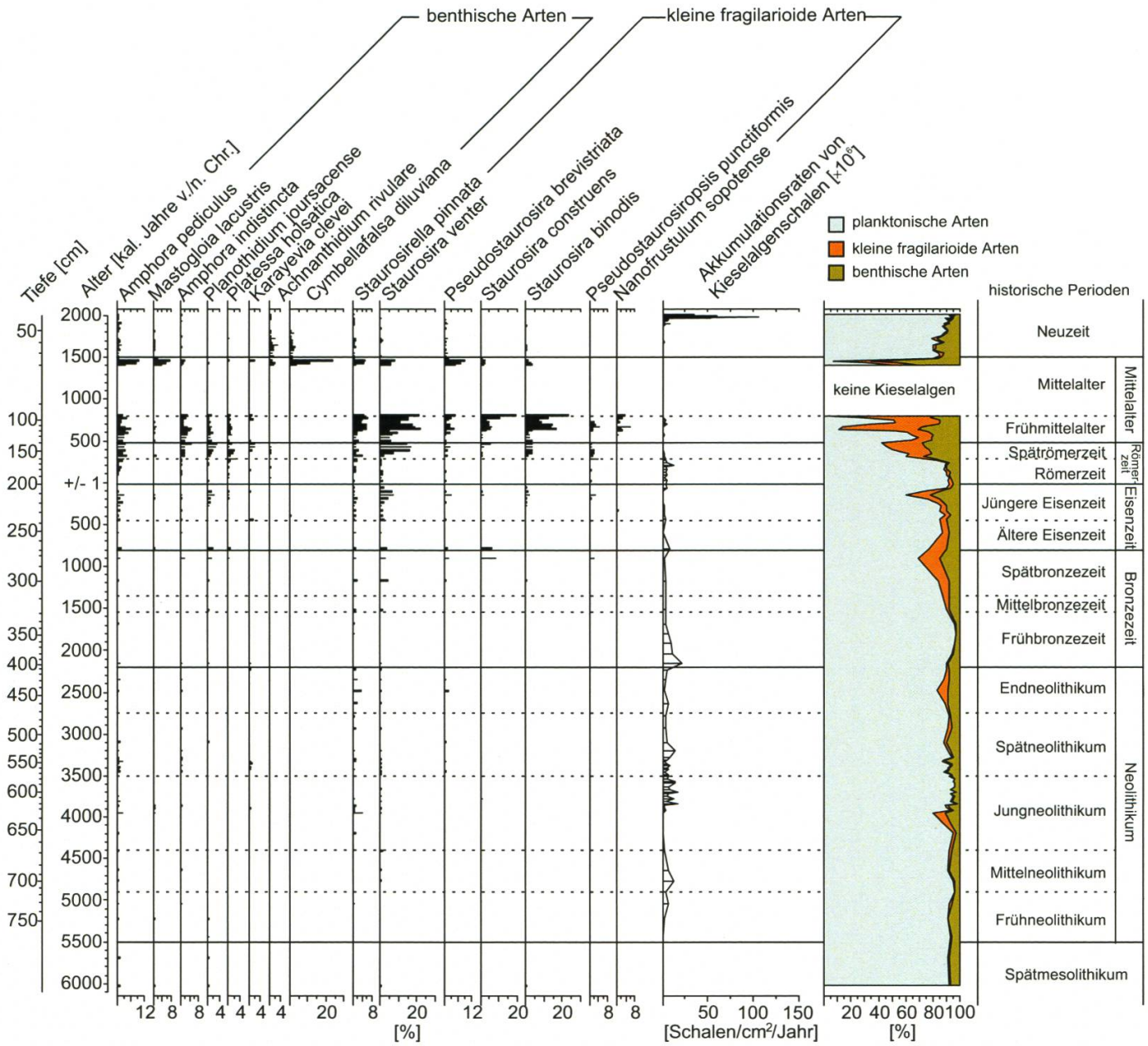

planktonische Arten
Tiefe [cm]
Alter [kal. Jahre v./n. Chr.]
Pantocsekiella comensis-Gruppe
Pantocsekiella ocellata
Lindavia radiosa-Gruppe
Pantocsekiella kuetzingiana
Asterionella formosa
Fragilaria crotonensis
Cyclotella cf. atomus
Stephanodiscus binatus & S. rugosus
Stephanodiscus hantzschii
Fragilaria tenuissima
Ulnaria delicatissima var. angustissima
Fragilaria saxoplanctonica
Fragilaria perdelicatissima
Fragilaria tenera var. nanana
Pantocsekiella delicatula
Aulacoseira ambigua
Akkumulationsraten von Kieselalgenschalen [x10⁶]
planktonische Arten
kleine fragilarioide Arten
benthische Arten
historische Perioden
keine Kieselalgen
Neuzeit
Mittelalter
Frühmittelalter
Spätrömerzeit
Römerzeit
Jüngere Eisenzeit
Ältere Eisenzeit
Spätbronzezeit
Mittelbronzezeit
Frühbronzezeit
Endneolithikum
Spätneolithikum
Jungneolithikum
Mittelneolithikum
Frühneolithikum
Spätmesolithikum
Mittelalter
Römerzeit
Eisenzeit
Bronzezeit
Neolithikum
[%]
[Schalen/cm²/Jahr]
[%]

Hüttwilersee

Im Hüttwilersee waren Kieselalgen, mit Ausnahme des Intervalls 84–92 cm, bedeutend besser erhalten als im Bichelsee. Die Kieselalgen-Analysen decken hier einen Zeitraum von 8000 Jahren ab (vom Endmesolithikum bis zur Gegenwart) *(Abbildungen 6-5* bis *6-7)*. Im Hüttwilersee herrschen aufgrund der höheren Seetiefe planktonische Kieselalgen vor, mit wenigen Ausnahmen während des Mittelalters, als auffallende Verschiebungen in der Kieselalgenzusammensetzung beobachtet wurden. Die vorherrschenden Kieselalgen im Hüttwilersee waren kleine Cyclotelloide, die unter der Gruppe *Pantocsekiella comensis* zusammengefasst werden. Die *P. comensis*-Gruppe vereint Arten, die häufig in einem breiten Spektrum trophischer Bedingungen (von oligotroph bis leicht eutroph) in tiefen Seen auf kalkhaltigem Untergrund vorkommen *(Houk et al. 2010, Talling 2012)*. Nach *Wunsam et al. (1995)* ist die Verfügbarkeit von Phosphor der wichtigste Faktor, der die Verbreitung verschiedener Cyclotelloiden beeinflusst. Ein weiterer wichtiger Einfluss ist, wie stabil die Schichtung (Stratifizierung) der Wassersäule in den Sommermonaten infolge des vertikalen Temperaturgradienten ist. Aufgrund der geringen Dichte und der pfannkuchenförmigen Schale sinken kleine Cyclotelloide weniger schnell ab als andere Arten. Sie können sich daher leichter in den lichtexponierten Wasserschichten von stark geschichteten Seen halten *(Rühland et al. 2015)*. Als Folge davon wächst diese Gruppe auch im Sommer oder Frühherbst in Gewässern wie dem Hüttwilersee. Andere planktonische Kieselalgen wie *Lindavia radiosa, Asterionella formosa, Fragilaria crotonensis* und *Pantocsekiella ocellata* waren ebenfalls in unterschiedlichen Anteilen im gesamten Sedimentabschnitt präsent.

Im Neolithikum, um ca. 3950 v. Chr., wurde eine Zunahme der kleinen fragilarioiden Diatomeen (bis zu 9 %) beobachtet. Wie bereits erwähnt, sind kleine Fragilarioide wie *Staurosirella, Staurosira, Pseudostaurosira* spp. Indikatoren für Störungen in den Umweltbedingungen für die Kieselalgen, was ein erstes Anzeichen von menschlichen Einflüssen auf den Hüttwilersee sein könnte. Wie ebenfalls erwähnt, würde die Zunahme der kleinen Fragilarioiden auch mit einem Absinken des Seespiegels oder Veränderungen in der Produktivität von Kieselalgen im Uferbereich übereinstimmen. Ein niedrigerer Seespiegel am Hüttwilersee während des Neolithikums wird auch durch die Reste von Pfahlbauten dokumentiert, welche heute ca. 4 m unterhalb des aktuellen Seespiegels liegen *(Hasenfratz & Schnyder 1998)*. Die ältesten bisher am Nussbaumersee gefundenen neolithischen Siedlungsreste stammen aus der Pfyner Kultur und werden auf ca. 3900 v. Chr. datiert *(Hasenfratz & Schnyder 1998)*. Etwa 100 Jahre später, um ca. 3840 v. Chr., tauchen zum ersten Mal kleine Kieselalgengruppen wie *Stephanodiscus binatus & S. rugosus, Stephanodiscus hantzschii* Grunow und *Cyclotella* cf. *atomus* Hustedt sowie die nadelförmigen araphiden *Fragilaria tenuissima* und *Fragilaria saxoplanctonica* Lange-Bertalot & S. Ulrich in den Sedimenten auf. Diese Arten lassen einen deutlichen Anstieg der Nährstoffe im Hüttwilersee vermuten. Archäologische Funde in organischen Kulturschichten deuten darauf hin, dass die Bewohnerinnen und Bewohner von neolithischen Seeufer-

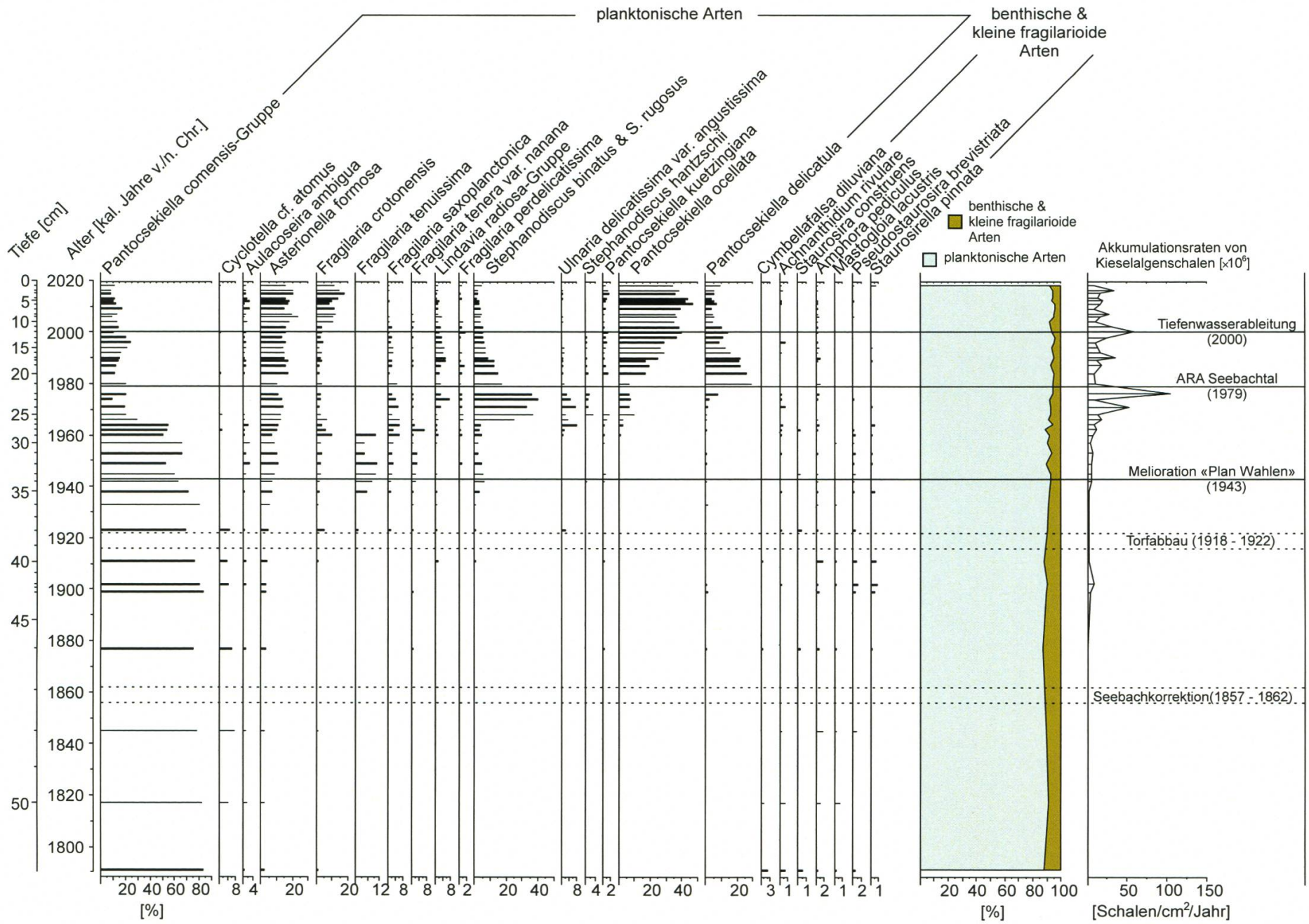
Abbildung 6-5: Diagramm ausgewählter planktonischer Kieselalgen in den Sedimenten des Hüttwilersees (als Prozente). Akkumulationsraten von Kieselalgenschalen und historische/prähistorische Perioden sind ebenfalls angegeben.


benthische Arten
kleine fragilarioide Arten
Tiefe [cm]
Alter [kal. Jahre v./n. Chr.]
Amphora pediculus
Mastogloia lacustris
Amphora indistincta
Planothidium joursacense
Platessa holsatica
Karayevia clevei
Achnanthidium rivulare
Cymbellafalsa diluviana
Staurosirella pinnata
Staurosira venter
Pseudostaurosira brevistriata
Staurosira construens
Staurosira binodis
Pseudostaurosiropsis punctiformis
Nanofrustulum sopotense
Akkumulationsraten von Kieselalgenschalen [x10⁶]
planktonische Arten
kleine fragilarioide Arten
benthische Arten
keine Kieselalgen
historische Perioden
Neuzeit
Mittelalter
Frühmittelalter
Spätrömerzeit
Römerzeit
Jüngere Eisenzeit
Ältere Eisenzeit
Spätbronzezeit
Mittelbronzezeit
Frühbronzezeit
Endneolithikum
Spätneolithikum
Jungneolithikum
Mittelneolithikum
Frühneolithikum
Spätmesolithikum
Mittelalter
Römerzeit
Eisenzeit
Bronzezeit
Neolithikum
[%]
[Schalen/cm²/Jahr]
[%]

siedlungen Abfälle und Fäkalien zwischen den Häusern entsorgten, wo organisches Material dann leicht in den See geschwemmt werden konnte *(Jacomet et al. 2004)*. Zudem legen Überreste von Insekten, die im Dung leben, nahe, dass das Vieh in unmittelbarer Nähe der Siedlungen weidete *(Jacomet et al. 2004)*. Solche Siedlungsabfälle und Dungeinträge haben wahrscheinlich zur Nährstoffzunahme im Hüttwilersee geführt. Ein weiterer Prozess, der die Zunahme von Nährstoffen und somit die oben genannten Kieselalgenblüten fördern könnte, ist die Öffnung der Wälder und der Landschaft durch anthropogene Aktivitäten. Wenn die ufernahe Waldvegetation gerodet wird, ist der See vermehrt Winden ausgesetzt, was zu einer leichteren Durchmischung des Wassers führen kann, was wiederum Nährstoffe aus dem Tiefenwasser in oberflächennahe Wasserschichten transportiert. Die Frühjahrsdurchmischung der Wassersäule und erhöhte Nährstoffbedingungen schaffen ideale Bedingungen für die Vermehrung kleiner Arten wie *Stephanodiscus* spp. Ähnliche ausgeprägte Wechsel der Algenflora während neolithischen Siedlungsphasen wurden auch in anderen Kleinseen der Schweiz beobachtet, so z. B. im Nussbaumersee, Burgäschisee und Moossee *(Hillbrand et al. 2014, Grudzinska et al. 2024)*. Beispielsweise treten im Nussbaumersee deutliche Änderungen in Algen- und Cyanobakterien-Gruppen um 3915–3690 v. Chr. auf *(Hillbrand et al. 2014)*, was (innerhalb des erwarteten Datierungsfehlers) gut mit der Nährstoffanreicherung im Hüttwilersee um 3830–3500 v. Chr. übereinstimmt. In der Studie von *Hillbrand et al. (2014)* wird spekuliert, dass möglicherweise Wasserstandsänderungen die Eutrophierung des Sees verstärkt haben, da bei niedrigem Wasserstand kleinere Seen schneller und stärker auf die zusätzlichen Nährstoffe reagieren. Die Zunahme von *F. crotonensis* und die Rückkehr von *P. ocellata* nach dieser Phase zeigen, dass sich das See-Ökosystem wieder erholte, was durch die Aufgabe der Siedlungen im Umland, aber möglicherweise auch durch den Anstieg des Wasserspiegels des Sees begünstigt worden sein könnte. Nach dendrochronologischen Daten wurde die neolithische Siedlung am gleich neben dem Hüttwilersee gelegenen Nussbaumersee nach 3582 v. Chr. aufgegeben *(Hasenfratz & Schnyder 1998)*.

Im oberen Teil des Kerns gibt es einige Veränderungen, die durch eine Zunahme kleiner fragilarioider Arten und durch einen leichten Anstieg benthischer Kieselalgen gekennzeichnet sind, z. B. am Ende des Neolithikums (2480–2350 v. Chr.), in der Bronzezeit (1250–790 v. Chr.) und in der Spätlatènezeit (150–110 v. Chr.). Allerdings sind die Veränderungen bei den Kieselalgen weniger ausgeprägt als während der Pfyner Kultur (3830–3500 v. Chr.). Die Zunahme von benthischen Kieselalgen und Störungszeigern könnte auf eine verstärkte Erosion durch menschliche Aktivitäten rund um den See hinweisen, obwohl die geochemischen Analysen erst ab der späteren Römerzeit klare Anzeichen von verstärkter Erosion zeigen (z. B. Anstiege von Titan, *Heiri et al. in diesem Band*). Zu diesen Zeiten wurden verschiedene archäologische Funde im Seebachtal gemacht, z .B. die grösste Siedlung am Ende der Bronzezeit im 9. Jahrhundert v. Chr. und einige Objekte aus der Jüngeren Eisenzeit *(Hasenfratz & Schnyder 1998)*. *Hillbrand et al. (2014)* vermuten, dass eine veränderte

Abbildung 6-6: Diagramm ausgewählter benthischer und kleiner fragilarioider Kieselalgen in den Sedimenten des Hüttwilersees (als Prozente). Akkumulationsraten von Kieselalgenschalen und historische/prähistorische Perioden sind ebenfalls angegeben.


planktonische Arten
benthische & kleine fragilarioide Arten
Tiefe [cm]
Alter [kal. Jahre v./n. Chr.]
Pantocsekiella comensis-Gruppe
Cyclotella cf. atomus
Aulacoseira ambigua
Asterionella formosa
Fragilaria crotonensis
Fragilaria tenuissima
Fragilaria saxoplanctonica
Fragilaria tenera var. nanana
Lindavia radiosa-Gruppe
Fragilaria perdelicatissima
Stephanodiscus binatus & S. rugosus
Ulnaria delicatissima var. angustissima
Stephanodiscus hantzschii
Pantocsekiella kuetzingiana
Pantocsekiella ocellata
Pantocsekiella delicatula
Cymbellafalsa diluviana
Achnanthidium rivulare
Staurosira construens
Amphora pediculus
Mastogloia lacustris
Pseudostaurosira brevistriata
Staurosirella pinnata
benthische & kleine fragilarioide Arten
planktonische Arten
Akkumulationsraten von Kieselalgenschalen [x10^6]
Tiefenwasserableitung (2000)
ARA Seebachtal (1979)
Melioration «Plan Wahlen» (1943)
Torfabbau (1918 - 1922)
Seebachkorrektion(1857 - 1862)
[%]
[%]
[Schalen/cm²/Jahr]

Lebensweise andere Auswirkungen auf die See-Ökosysteme gehabt haben könnte als während der Jungsteinzeit. Beispielsweise wäre der Phosphoreintrag geringer gewesen, wenn die Tiere weiter vom See entfernt gehalten worden wären.

Während der Römerzeit gibt es keine bemerkenswerten Veränderungen in der Kieselalgenzusammensetzung, abgesehen von einer höheren Konzentration von *Cyclotella* cf. *atomus* und einer Zunahme der Kieselalgen-Akkumulationsraten bis etwa 280 n. Chr. Die Algenproduktion stieg möglicherweise aufgrund günstiger klimatischer Bedingungen in Verbindung mit einem zusätzlichen Nährstoffeintrag durch landwirtschaftliche Aktivitäten im Seebachtal *(Hasenfratz & Schnyder 1998)*. Danach wurde ein beträchtlicher Rückgang der Kieselalgenanreicherungsraten festgestellt. Dies könnte auf ungünstige Bedingungen für planktische Kieselalgen zurückzuführen sein, da zur gleichen Zeit eine rasche Zunahme der benthischen Kieselalgen (einschliesslich kleiner fragilarioider Arten) zu beobachten war.

Bemerkenswert ist, dass während des Übergangs von der Römerzeit zum frühen Mittelalter eine geringe, aber stetige Zunahme von *Cyclotella ocellata* festzustellen ist. Diese Art wird als Indikator für kältere Klimabedingungen interpretiert *(Cherepanova et al. 2010)*. Für den Hüttwilersee wäre es jedoch voreilig, daraus zu schliessen, dass *C. ocellata* in diesem Abschnitt auf kühleres Klima hinweist. Dies, weil 6000–4750 v. Chr., also in einer Zeit, in der die Sommertemperaturen bedeutend wärmer waren *(Heiri et al. 2015)*, wesentlich höhere Häufigkeiten von *C. ocellata* beobachtet wurden. Zudem sind die höchsten Werte am Ende der jüngsten Klimaerwärmung im 21. Jahrhundert zu beobachten.

Ausgeprägte Veränderungen in der Zusammensetzung der Kieselalgen wurden im Mittelalter beobachtet, mit hohen Konzentrationen von kleinen fragilarioiden und periphytischen Kieselalgen. Allerdings gibt es auch längere Abschnitte des Mittelalters (850–1370) mit schlechter bzw. keiner Kieselalgenerhaltung. Proben aus dem ausgehenden Mittelalter (Mitte des 15. Jahrhunderts; 1430–1460) sind durch sehr geringe Kieselalgenanreicherungsraten gekennzeichnet. In diesen beiden Proben (78 und 76 cm) waren die meisten benthischen Arten (70–93 %) zu finden und es wurde ein deutlicher Anstieg von Chrysophytenzysten (32–47 %) beobachtet. Die sehr niedrige Produktivität und die hohe relative Häufigkeit benthischer Gruppen lässt vermuten, dass sich planktische Kieselalgen aufgrund von Kieselsäuremangel in der Wassersäule oder allgemein in Folge ungünstiger Umweltbedingungen aufgelöst haben. Dies wurde möglicherweise begünstigt durch menschliche Eingriffe, wie z. B. Erosion, die zu einer Trübung des Wassers geführt haben könnte. Periphytische Kieselalgen können trübe Bedingungen besser tolerieren und haben Zugang zu anderen Kieselsäurequellen als planktische Arten (z. B. aus den Sedimenten, Abfluss aus vom Umland und recycelten, abgelagerten Kieselalgenresten). Mensch und Vieh könnten durch Störungen im Litoral und Seeufer auch den Transport von periphytischen Kieselalgen in die Seemitte erleichtert haben, was die erhöhte Häufigkeit mit-

Abbildung 6-7: Diagramm ausgewählter Kieselalgen in den jüngsten Sedimenten des Hüttwilersees. Akkumulationsraten von Kieselalgenschalen sind ebenfalls angegeben. Zum Vergleich sind verschiedene möglicherweise wichtige Ereignisse für die Seeentwicklung eingezeichnet (Ehmann 2010).

erklären könnte. Obwohl die tiefen Werte der planktischen Kieselalgen darauf hinweisen, dass deren Lebensbedingungen suboptimal waren, scheinen die ökologischen Ansprüche der vorherrschenden periphytischen Arten *Cymbellafalsa diluviana* (Krasske) Lange-Bertalot & Metzeltin, *Mastogloia lacustris* (Grunow) Grunow und *Amphora pediculus* (Kützing) Grunow für die Zeit doch auf schwach mesotrophe Bedingungen hinzuweisen.

In der Neuzeit, besonders im 20. Jahrhundert, sind viele deutliche Änderungen in der Zusammensetzung der Kieselalgen zu beobachten. Ausgeprägte Veränderungen sind z. B. in den 1940er-Jahren ersichtlich, zur Zeit der Umsetzung des Plans Wahlen und den damit verbundenen Meliorationen im Umland des Sees. Dies führte in trockengelegten Mooren zu einer starken biochemischen Torfzersetzung und damit verbundenen Freisetzung von Nährstoffen, die in den Hüttwilersee gelangten. Zu diesem Zeitpunkt begann die *P. comensis*-Gruppe allmählich abzunehmen, während *Fragilaria tenuissima* auf bis zu 10 % anstieg und kleine *Stephanodiscus* spp. wiedererschienen. Ab den 1940er-Jahren wird auch eine zunehmende Verbreitung von *Asterionella formosa* festgestellt. Nach *Hundey et al. (2014)* werden Zunahmen von dieser Art durch erhöhte Stickstoff- und Phosphorkonzentrationen begünstigt, z. B. infolge veränderter anthropogener Landnutzung und Bodenbedeckung. Oft tritt *A. formosa* zusammen mit *F. crotonensis* auf, was auch für den Hüttwilersee beobachtet werden kann. Beide kommen in mesotrophen Gewässern vor *(Talling 2012)* und sind abhängig von hypolimnischen Nährstoffen, die während der Durchmischung der Wassersäule in das Epilimnion gelangen *(Bradbury et al. 2002)*. Im Allgemeinen deuten *A. formosa, F. crotonensis* und Cyclotelloide auf eine schwache Zirkulation und eine anhaltende Temperaturschichtung im Sommer und frühen Herbst hin *(Bradbury et al. 2002)*. Der höchste Prozentsatz an *S. binatus & S. rugosus* wurde Ende der 1960er- und in den 1970er-Jahren beobachtet, zu einer Zeit, in der die Nährstoffkonzentrationen in vielen Schweizer Gewässern zunahmen. Das Auftreten von *Stephanodiscus hantzschii*, einer Art, die häufig in eutrophen Gewässern zu finden ist *(Houk et al. 2014)*, weist ebenfalls auf hohe Nährstoffkonzentrationen in den 1970er-Jahren hin. *Fragilaria saxoplanctonica,* eine Kieselalge, welche das erste Mal während der Eutrophierungsphase im Neolithikum beobachtet wurde und danach grösstenteils abwesend war, ist in den 1960er- und 1970er-Jahren in den höchsten Prozentwerten zu finden. Phosphormessungen im Hüttwilersee begannen im Jahr 1976 und die höchsten GP-Werte (Mittelwert 226 µg/l, *Daten: Amt für Umwelt Kanton Thurgau)* wurden kurz danach im Jahr 1977 gemessen, was die hohe Nährstoffbelastung des Sees bestätigt.

Mit dem Bau der Abwasserreinigungsanlage (ARA) Seebachtal im Jahr 1979 wurden rasche Veränderungen der relativen Häufigkeiten verschiedener Taxa beobachtet. Die Gruppe der kleinen *Stephanodiscus* ging von 36 % auf 17 % zurück, während *Pantocsekiella delicatula* (Hustedt) K. T. Kiss & E. Ács von 7 % auf 29 % zunahm. Gleichzeitig wurde eine allmähliche Zunahme von *P. ocellata* festgestellt. Das Gewässerschutzgesetz begrenzte ab 1991 den Düngemitteleinsatz, und im Jahr 2000 wurde ein Tiefwasserabfluss am Hüttwilersee installiert *(Ehmann 2010)*, um den Abfluss von Nährstoffen aus dem Tiefenwasser und die Sauerstoffversorgung des Sees zu verbessern. Die Kieselalgenzusammensetzung änderte sich in diesem Intervall nicht

wesentlich, es wurde lediglich eine leichte Zunahme von *F. crotonensis* festgestellt. Den Monitoringdaten des Hüttwilersees zufolge hat sich der Trophiegrad des Sees bis 2003 von eutroph zu mesotroph geändert und im Jahr 2018 lag der durchschnittliche GP-Wert in der Wassersäule wieder bei 17 µg/l.

6.4 Fazit und Zusammenfassung

Veränderungen in der Zusammensetzung und Akkumulationsrate von Kieselalgen in den Sedimenten des Hüttwilersees spiegeln die hydrologischen und nährstoffbezogenen Verhältnisse vom Neolithikum bis zur Neuzeit wider. Die Artzusammensetzung war über weite Abschnitte typisch für oligo- bis mesotrophe Seen, allerdings mit Phasen, in denen die Kieselalgen auf ausgeprägte Zunahmen der Nährstoffkonzentrationen hinweisen. Die ersten bedeutenden Veränderungen im Hüttwilersee wurden während der Pfyner Kultur im Neolithikum (3830–3500 v. Chr.) beobachtet. Sie verweisen auf hohe Nährstoffkonzentrationen, begünstigt und sehr wahrscheinlich verursacht durch menschliche Aktivitäten am Ufer und in der Umgebung des Sees. Die zweite offensichtliche Änderung fand im Mittelalter statt. Die sehr niedrige Produktivität der Kieselalgen und der hohe Anteil benthischer Arten deuten darauf hin, dass die Häufigkeit planktischer Kieselalgen aufgrund von ungünstigen Umweltbedingungen beschränkt war oder sich ihre Frusteln infolge von Silikatmangel im Wasser selektiv an- und aufgelöst haben. Diese Bedingungen wurden möglicherweise durch menschliche Aktivitäten gefördert, welche die Erosion im Einzugsgebiet und die Trübung des Seewassers erhöhten. Die hohe zeitliche Auflösung der Analysen im jüngsten Sedimentabschnitt lassen erkennen, dass Veränderungen der Kieselalgenzusammensetzung im 20. Jahrhundert recht gut mit Veränderungen in der Landnutzung und Massnahmen zur Bekämpfung der Eutrophierung des Hüttwilersees übereinstimmen. So sind z. B. die Auswirkungen der Meliorationen im Zusammenhang mit dem Plan Wahlen in den 1940er-Jahren, die Phase mit intensiver Landwirtschaft und Nährstoffzunahmen an vielen Schweizer Seen in den 1960er- und 1970er-Jahren und die Folgen des Baus der Abwasserreinigungsanlage Seebachtal im Jahr 1979 im Kieselalgenprofil erkennbar.

Leider war der Sedimentkern aus dem Bichelsee für eine durchgehende, detaillierte Analyse der Kieselalgen nicht geeignet, da mehrere grosse Sedimentabschnitte keine oder kaum Kieselalgen enthielten. Einzelne Proben mit recht hohen Anteilen von benthischen Kieselalgen aus der Jungsteinzeit lassen vermuten, dass der Bichelsee zu Beginn der Horgener Kultur ein recht flacher See war oder die Häufigkeit von planktonischen Gruppen durch die vorherrschenden Umweltbedingungen, z. B. erhöhte Trübung des Seewassers, reduziert war. Ähnliche Bedingungen scheinen während bedeutender Abschnitte im Mittelalter geherrscht zu haben, in denen die Kieselalgenzusammensetzung im Bichelsee durch einen niedrigeren Seespiegel, einen hohen Kieselsäuregehalt des Seewassers und/oder durch eine intensive Durchmischung der Wassersäule erklärt werden könnte. Am Übergang vom Mittelalter zur Neuzeit, der mit dem Beginn der Kleinen Eiszeit zusammenfällt, nimmt der Anteil der planktischen Kieselalgen im Bichelsee wieder zu, was mit einem höheren Wasserspiegel, aber auch einer reduzierten Produktion von benthischen Algen im Uferbereich oder einer höheren Produktion von planktischen Algen erklärt werden könnte.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts deuten die Kieselalgen wiederum eher auf einen niedrigen Wasserstand, eine erhöhte Produktion von benthischen Arten und/oder eine reduzierte Produktion von planktischen Kieselalgen unter relativ hohen Nährstoffkonzentrationen. Ab den 1960er-Jahren ändert sich, ähnlich wie beim Hüttwilersee, die Zusammensetzung der Kieselalgen deutlich. Die Anwesenheit und bedeutende Anzahl von kleinen *Stephanodiscus* deutet auf die höchsten Nährstoffkonzentrationen im Bichelsee von ca. 1970 bis 1990 hin, möglicherweise verursacht durch den Einsatz von Düngemitteln und die intensive Landwirtschaft im Einzugsgebiet, wie in vielen anderen Seen des Schweizer Mittellandes.

Die Kieselalgen im Hüttwilersee und im Bichelsee lassen Ende des 20. und zu Beginn des 21. Jahrhunderts einen Wechsel von eutrophen zu mesotrophen Bedingungen und abnehmende Nährstoffkonzentrationen erkennen, was zusammen mit vorhandenen Wasserchemiemessungen dokumentiert, dass verschiedene Massnahmen zur Sanierung der Seen erfolgreich waren.

6.5 Literatur

- *Barker, P., Fontes, J.-C. & Gasse, F., 1994:* Experimental dissolution of diatom silica in concentrated salt solutions and implications for paleoenvironmental reconstruction. - Limnology and Oceanography, 39, 99-110.
- *Battarbee, R. W., Jones, V. J., Flower, R. J., Cameron, N. G., Bennion, H., Carvalho, L. & Juggins, S., 2001:* Diatoms. - In: «Tracking environmental change using lake sediments. Terrestrial, algal, and siliceous indicators», Smol, J. P., Birks, H. J. B., Last, W. M., Bradley, R. S. & Alverson, K. (Hrsg.), 155-202 - Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- *Bradbury, P., Cumming, B. & Laird, K. L, 2002:* A 1500-year record of climatic and environmental change in Elk Lake, Minnesota III: measures of past primary productivity. - Journal of Paleolimnology, 27, 321-340.
- *Bradshaw, E. G., Rasmussen, P., Nielsen, H. & Anderson, N. J., 2005:* Mid- to late-Holocene land-use change and lake development at Dallund Sø, Denmark: trends in lake primary production as reflected by algal and macrophyte remains. - The Holocene, 15, 1130-1142.
- *Brugam, R. B., McKeever, K. & Kolesa, L., 1998:* A diatom-inferred water depth reconstruction for an Upper Peninsula, Michigan, lake. - Journal of Paleolimnology, 20, 267-276.
- *Cherepanova, M. V., Usol'tseva, M. V., Pushkar, V. S. & Dubrovina, Y. F., 2010:* Morphogenesis in Cyclotella ocellata - complex from Lake El'gygytgyn (Chukchi Peninsula) during the Pleistocene-Holocene. - Paleontological Journal, 44, 1252-1261.
- *Dam, H., Mertens, A. & Sinkeldam, J., 1994:* A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from The Netherlands. - Netherlands Journal of Aquatic Ecology, 28, 117-133.
- *Ehmann, H., 2010:* Die Tiefenwasserableitung am Hüttwilersee. - In: «Das Seebachtal im Kanton Thurgau», Rieder, J. & Geisser, H. (Hrsg.), 45-58 - Mitteilungen der Thurgauischen Naturforschenden Gesellschaft, Band 64.
- *Gąsiorowski, M., Sienkiewicz, E., Ciołko, U., Kaucha, K., Kupryjanowicz, M. & Szal,*

M., 2021: Cultural eutrophication of a Central European lowland lake from the Bronze Age to the present recorded in diatom and Cladocera remains. - Catena, 204, 105404.

- *Grimm E., 2011:* Tilia Software v. 1.7.16. Illinois-State-Museum. Research and Collection Center, Springfield.
- *Grudzinska, I., Courtney-Mustaphi, C., Rey, F., Gobet, E., Tinner, W., Marchetto, A. & Heiri, O., 2024:* Neolithic human activity caused eutrophication in small central European lakes Catanea, 236, Artikel 107738.
- *Hasenfratz, A. & Schnyder, M., 1998:* Das Seebachtal. Eine archäologische und paläoökologische Bestandesaufnahme. Mit Beiträgen von Haas, J. N., Hadorn, Ph., Gollnisch, H., Junkes, M., Kaufmann, B., Leuzinger, U. & Markert, D. - Forschungen im Seebachtal 1 (Archäologie im Thurgau 4), Departement für Erziehung und Kultur des Kantons Thurgau, Frauenfeld, 268 pp.
- *Heiri, O., Ilyashuk, B., Millet, L., Samartin, S. & Lotter, A. F., 2015:* Stacking of discontinuous regional palaeoclimate records: Chironomid-based summer temperatures from the Alpine region. - The Holocene, 25, 137-149.
- *Hillbrand, M., van Geel, B., Hasenfratz, A., Hadorn, P. & Haas, J. N., 2014:* Non-pollen palynomorphs show human- and livestock-induced eutrophication of Lake Nussbaumersee (Thurgau, Switzerland) since Neolithic times (3840 bc). - The Holocene, 24, 559-568.
- *Houk, V., Klee, R. & Tanaka, H., 2010:* Atlas of freshwater centric diatoms with a brief key and descriptions. Part III. Stephanodiscaceae A Cyclotella, Tertiarius, Discotella. - Fottea 10 (Supplement). Czech Phycological Society, 498 pp.
- *Houk, V., Klee, R. & Tanaka, H., 2014:* Atlas of freshwater centric diatoms with a brief key and descriptions. Part IV. Stephanodiscaceae B Stephanodiscus, Cyclostephanos, Pliocaenicus, Hemistephanos, Stephanocostis, Mesodictyon & Spicaticribra. - Fottea 14 (Supplement). Czech Phycological Society, 532 pp.
- *Hundey, E. J., Moser, K. A., Longstaffe, F. J., Michelutti, N. & Hladyniuk, R., 2014:* Recent changes in production in oligotrophic Uinta Mountain lakes, Utah, identified using paleolimnology. - Limnology and Oceanography, 59, 1987-2001.
- *Jacomet, S., Leuzinger, U. & Schibler, J., 2004 (Hrsg.),* Die jungsteinzeitliche Seeufersiedlung Arbon-Bleiche 3. Archäologie im Thurgau 12, Departement für Erziehung und Kultur des Kantons Thurgau, Frauenfeld, 458 pp.
- *Kilham, S. S., 1986:* Dynamics of Lake Michigan natural phytoplankton communities in continuous cultures along a Si:P loading gradient. - Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 43, 351-360.
- *Krammer K. & Lange-Bertalot, H., 1986:* Bacillariophyceae 1. Teil Naviculaceae. - In: «Süsswasserflora von Mitteleuropa», Ettl, H., Gerloff, J., Heying, H., Mollenhauser, D. (Hrsg.), 2(1) - Gustav Fisher Verlag, Stuttgart, 876 pp.
- *Krammer K. & Lange-Bertalot, H., 1988:* Bacillariophyceae 2. Teil Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. - In: «Süsswasserflora von Mitteleuropa», Ettl, H., Gerloff, J., Heying, H., Mollenhauser, D. (Hrsg.), 2(2) - Gustav Fisher Verlag, Stuttgart, 876 pp.
- *Krammer K. & Lange-Bertalot, H., 1991a:* Bacillariophyceae 3. Teil Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. - In: «Süsswasserflora von Mitteleuropa», Ettl, H., Gerloff, J., Heying, H., Mollenhauser, D. (Hrsg.), 2(3) - Gustav Fisher Verlag, Stuttgart, 876 pp.

- *Krammer K. & Lange-Bertalot, H., 1991b:* Bacillariophyceae 4. Teil Achnanthaceae. - In: «Süsswasserflora von Mitteleuropa», Ettl, H., Gerloff, J., Heying, H., Mollenhauser, D. (Hrsg.), 2(4) - Gustav Fisher Verlag, Stuttgart, 876 pp.
- *Lange-Bertalot, H., Hofmann, G., Werum, M. & Cantonati, M., 2017 (Hrsg.):* Freshwater benthic diatoms of Central Europe: over 800 common species used in ecological assessment. Koeltz Botanical Books, Schmitten-Oberreifenberg, 942 pp.
- *Mann, M. E., Zhang, Z., Rutherford, S., Bradley, R. S., Hughes, M. K., Shindell, D., Ammann, C., Faluvegi, G. & Ni, F., 2009:* Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. - Science, 326, 1256.
- *Rühland, K. M., Paterson, A. M. & Smol, J. P., 2015:* Lake diatom responses to warming: reviewing the evidence. Journal of Paleolimnology, 54, 1-35.
- *Ryves, D. B., Juggins, S., Fritz, S. C. & Battarbee, R. W., 2001:* Experimental diatom dissolution and the quantification of microfossil preservation in sediments. - Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 172, 99-113.
- *Talling, J. F., 2012:* Freshwater phytoplankton ecology: the British contribution in retrospect. - Freshwater Reviews, 5, 1-20.
- *Wunsam, S., Schmidt, R. & Klee, R., 1995:* Cyclotella-taxa (Bacillariophyceae) in lakes of the Alpine region and their relationship to environmental variables. - Aquatic Sciences, 57, 360-386.