

DIE GEOLOGISCHE ENTWICKLUNG DER RANDSENKE VON SCHÖNINGEN: IMPLIKATIONEN FÜR LANDSCHAFTSENTWICKLUNG UND ARCHÄOLOGIE

Einführung	191	Pleistozäne Ablagerungsprozesse und Landschaftsentwicklung	195
Regionaler Überblick	192	Füllung der subglazialen Rinne	195
Methoden	192	Warmzeitliche Sedimentation und die Entstehung der archäologischen Fundstellen	196
Ergebnisse	193	Schlussfolgerungen	197
Randsenken-Entwicklung	193	Danksagung	198
Salzaufstieg und Subsidenz der Randsenken	193	Literatur	199
Paläogene Randsenkenfüllung	194	Zusammenfassung/Abstract	200
Reaktivierung der Salzmauer durch Eisauflast	194		
Entstehung des pleistozänen Ablagerungszentrums	194		

EINFÜHRUNG

Im Rahmen eines durch das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur geförderten Projekts wurden von 2009 bis 2013 umfangreiche geologische Untersuchungen durchgeführt, die hier zusammenfassend vorgestellt werden. Die quartären Ablagerungen von Schöningen stellen ein herausragendes geologisches und archäologisches Archiv Mitteleuropas dar und die darin enthaltenen archäologischen Funde haben weltweite Aufmerksamkeit erlangt. Die Überlieferung eines nahezu vollständigen mittelpleistozänen bis holozänen Profils ist im Bereich Mitteleuropas äußerst selten, da die wiederholten Eisvorstöße meist zu einer Erosion der zuvor abgelagerten Schichtfolgen führten und deshalb oft nur lückenhafte Profile dokumentiert sind. Die hervorragenden Erhaltungsbedingungen in den warmzeitlichen Ablagerungen haben zur Überlieferung von zahlreichen Funden geführt, die die Aktivitäten des Menschen in der Region seit dem Paläolithikum dokumentieren. Die quartäre Abfolge bildet den jüngsten Teil der känozoischen Füllung der südwestlichen Randsenke der Helmstedt-Staßfurt Salzmauer.

Trotz der überragenden archäologischen Bedeutung fehlten bisher detaillierte Bearbeitungen der pleistozänen Abfolge, in der die archäologischen Funde eingebettet sind. Die zuvor durchgeführten Arbeiten beschäftigen sich im Wesentlichen mit palynologischen und paläontologischen Untersuchungen der warmzeitlichen Ablagerungen. Daher war bisher nur unzureichend geklärt, was zu der Entstehung und der außergewöhnlich guten Erhaltung der quartären Ablagerungen von Schöningen und der darin enthaltenen Funde geführt hat.

Zum Verständnis der Schöninger Fundstellen ist es notwendig, die geologische Entwicklung der Randsenke und ihrer Füllung unter dem Einfluss von Klima, Sedimentation und Tektonik zu verstehen. Das Ziel unserer Untersuchungen war es daher, die zentralen offenen Fragen zur (quartär-)geologischen Entwicklung der Randsenke von Schöningen zu klären:

- Wie haben sich die Salzrandsenke von Schöningen und ihre Füllung seit dem Paläogen entwickelt und gibt es einen Zusammenhang zwischen der Randsenkenentwicklung und der Erhaltung der mittelpleistozänen bis holozänen Abfolge?
- Wie wurde der Ablagerungsraum für die mächtige mittelpleistozäne bis holozäne Abfolge geschaffen und wie wurden die mittelpleistozänen Sedimente vor späterer Erosion geschützt?
- In welchem Ablagerungsmilieu wurden die mittelpleistozänen warmzeitlichen Sedimente abgelagert und wie ist die Verteilung der paläolithischen Fundstellen zu erklären?
- Welche Prozesse haben die quartäre Landschaftsentwicklung kontrolliert?

REGIONALER ÜBERBLICK

Der Tagebau Schöningen befindet sich in der südwestlichen Randsenke der Helmstedt-Staßfurt Salzmauer, einer 70km langen, nordwest-südost streichenden Salzmauer im Subherzyn Becken in Norddeutschland. Nach Westen wird die Randsenke durch den Elm-Sattel begrenzt (**Abb. 1**). Die Randsenkenfüllung besteht hauptsächlich aus bis zu 366m mächtigen, Braunkohle-führenden, randlich-marinen Ablagerungen des Paläogens (Brandes u. a. 2012; Riegel u. a. 2012; Osman u. a. 2013).

Während des Pleistozäns wurde das Arbeitsgebiet mehrfach von den elsterzeitlichen und saalezeitlichen Gletschern überfahren, während die jüngeren Eisvorstöße der Warthe- und Weichsel-Eiszeit das Untersuchungsgebiet nicht erreicht haben (Litt u. a. 2008; Ehlers u. a. 2011; Roskosch u. a. 2015). Die ca. 45m mächtige mittelpleistozäne bis holozäne Abfolge im Tagebau Schöningen umfasst elster- und saalezeitliche glazifluviale, glazilakustrine und subglaziale Ablagerungen, holstein- und eemzeitliche lakustrine Ablagerungen, weichselzeitlichen Löss und holozäne fluviatile Sedimente und Niedermoortorf (Urban u. a. 1988; 1991; Mania 1998; 2006; Elsner 2003; Lang u. a. 2012).

Die elster- und saalezeitlichen glazigenen Ablagerungen sind durch eine komplexe mittelpleistozäne warmzeitliche Abfolge getrennt, in welcher sich die paläolithischen Fundstellen befinden. Jede Fundstelle enthält mehrere archäologische Horizonte mit unterschiedlichen Fundkonzentrationen (Serangeli u. a. 2012). Die Fundstelle 13-II, Level 4, stellt durch die Entdeckung der paläolithischen Holz Waffen den bedeutendsten Fundhorizont dar (Thieme 1997; 1999). U/Th-Datierungen der Abfolge von Fundstelle 13-II zeigen eine Korrelation mit MIS 9 und der Holstein-Warmzeit an (Urban u. a. 2011; Sierralta u. a. 2012). Da die palynologischen Befunde von der Holstein-Warmzeit abweichen, wird die Abfolge lokal als Reinsdorf-Warmzeit bezeichnet (Urban 1995; 2007; Urban u. a. 2011).

METHODEN

Um die Entwicklung der Salzrandsenke von Schöningen und die Ablagerung und Erhaltung der paläogenen und pleistozänen Ablagerungen zu rekonstruieren, haben wir eine Kombination von verschiedenen geowissenschaftlichen Methoden angewandt. Als Datengrundlage dienten die sedimentologischen Aufnahmen der im Tagebau Schöningen aufgeschlossenen Abfolge, zwei Scherwellen-Reflexionsseismik Profile und lithologische Profile aus 744 Bohrungen. Um die übergeordnete Faziesarchitektur der Randsenkenfüllung zu rekonstruieren wurden aus den vorhandenen Datensätze 3D-Untergrundmodelle (GOCAD®) erstellt. Die sedimentologische, sequenzstratigraphische und tektonische Interpretation der Daten ermöglicht eine Rekonstruktion der Ablagerungsräume und deren räumliche und zeitliche Entwicklung. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für die paläogeographische Rekonstruktion der Landschaftsentwicklung. Die langfristige Sub-

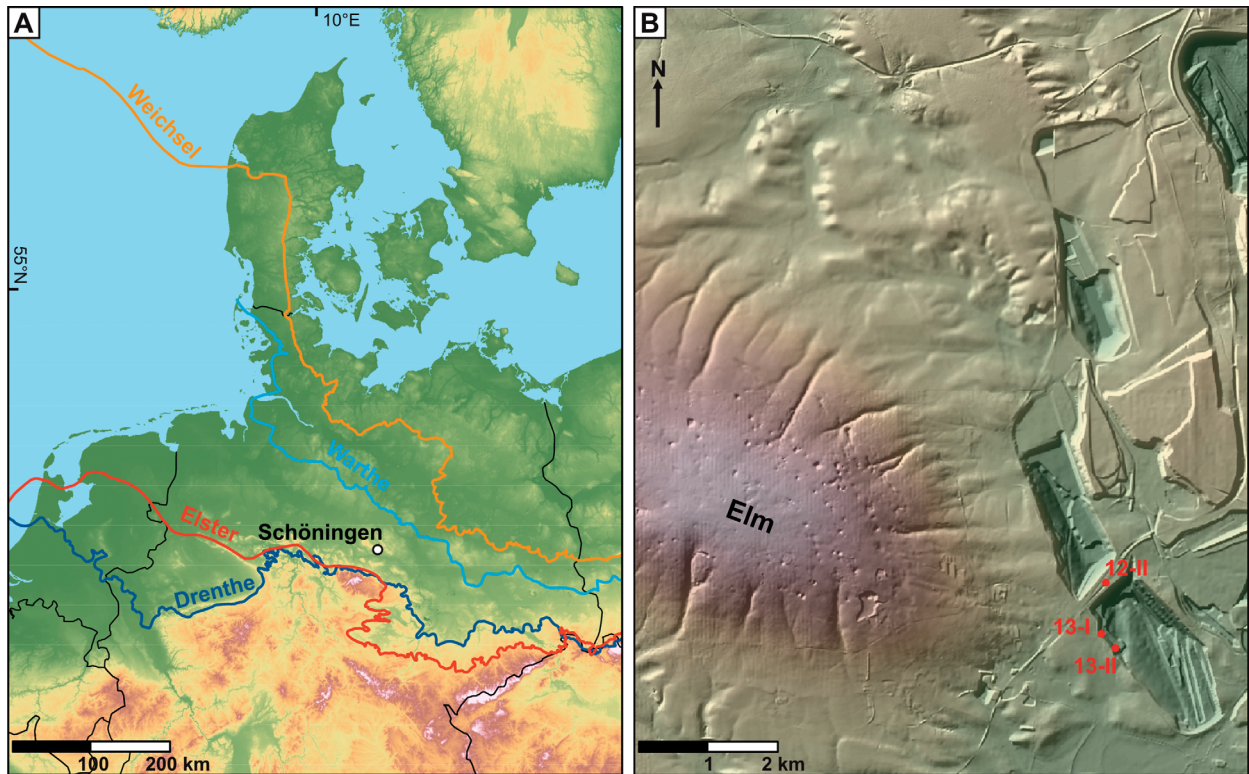


Abb. 1A Lage des Untersuchungsgebiets und maximale Ausdehnung der pleistozänen Eisvorstöße (Eisränder verändert nach Ehlers u. a. 2011). – **B** Das digitale Geländemodell des Arbeitsgebietes zeigt die Lage der Fundstellen im Tagebau Schöningen (12-II, 13-I und 13-II). Das Geländemodell basiert auf Daten des Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Niedersachsen (LGLN).

sidenzgeschichte der Randsenke wurde durch eine numerische Beckensimulation (PetroMod®) rekonstruiert. Um die Reaktion von Salzstrukturen auf Eisauflast und ihre Bedeutung für die Randsenkenentwicklung zu untersuchen, wurden numerische Simulationen mit der Finiten-Elemente Methode (ABAQUS™) durchgeführt.

ERGEBNISSE

Randsenken-Entwicklung

Salzaufstieg und Subsidenz der Randsenken

Die Helmstedt-Staßfurt Salzmauer entwickelte sich im Subherzyn Becken unter verschiedenen Spannungsfeldern. Die ersten Salzbewegungen in diesem Gebiet wurden sehr wahrscheinlich durch Extension ausgelöst, während spätere Phasen des Salzaufstiegs durch Kontraktion und Sedimentation in den Randsenken gesteuert wurden. Ein beschleunigter Aufstieg der Diapire an den Enden der Salzmauer erfolgte vermutlich im Zusammenhang mit der Verkürzung des Subherzyn Beckens in der späten Kreide (Brandes u. a. 2013). Die hohe Mächtigkeit der paläogenen Randsenkenfüllung zeigt an, dass der passive Salzaufstieg durch Sedimentation in den Randsenken für die Entwicklung der Salzmauer besonders wichtig war (Brandes u. a. 2012).

Die Subsidenzgeschichte der Randsenke von Schöningen wird durch die aus der Beckensimulation gewonnenen Subsidenz- und Sedimentationsraten deutlich. Zu Beginn der Randsenkenentwicklung wurden die höchsten Subsidenz- und Sedimentationsraten erreicht (60-80 mm/a zwischen 57 und 50 Ma), die im weiteren Verlauf der Randsenkenentwicklung abnahmen (32-56 mm/a zwischen 50 und 34 Ma). Am Ende der Randsenkenentwicklung betrug die Subsidenzrate nur noch 2-20 mm/a. Die sukzessive Abnahme der Subsidenzraten wird durch die Ausdünnung der Salzursprungsschicht verursacht. Die Geometrie der Randsenken ist im Verlauf ihrer Entwicklung sehr stabil, die Randsenken vertiefen sich, behalten aber ihre laterale Ausdehnung bei. Das Ablagerungszentrum der Randsenke von Schöningen ist räumlich und zeitlich mobil und wanderte zur Salzmauer hin (Brandes u. a. 2012; Osman u. a. 2013).

Paläogene Randsenkenfüllung

Die bis zu 366 m mächtige paläogene Füllung der Randsenke umfasst Sedimente verschiedener flachmariner und terrestrischer Ablagerungsmilieus, darunter 13 Braunkohlenflöze mit Mächtigkeiten zwischen 0,1 und 30 m (Brandes u. a. 2012; Riegel u. a. 2012; Osman u. a. 2013). Die Sedimentation wurde durch das Zusammenspiel von Salztektunik und globalen eustatischen Meeresspiegel-Schwankungen kontrolliert. Das Wachstum der Moore, welche die späteren Braunkohleflöze bildeten, wurde durch das warme und feuchte eozäne Klima begünstigt und durch Klimaschwankungen gesteuert. Während feuchterer Phasen bildeten sich ombotrophe Moore, wohingegen trockenere Phasen zur Bildung von rheotropen Mooren führten. Besonders mächtige Flöze bildeten sich während der initialen, schnellen Subsidenz. Die anhaltende Subsidenz der Randsenke brachte die organischen Ablagerungen unter die Erosionsbasis und ermöglichte so die Bildung und Überlieferung der wirtschaftlich wichtigen Braunkohlenflöze (Osman u. a. 2013).

Reaktivierung der Salzmauer durch Eisauflast

Unsere numerischen Simulationen zeigen, dass Salzstrukturen durch Eisauflast reaktiviert werden können und bestätigen existierende konzeptionelle Modelle (Liszkowski 1993; Sirocko u. a. 2008). Die Art der Reaktion hängt hauptsächlich von der Position des Eisrandes relativ zur Salzstruktur ab. Wenn bei einem Eisvorstoß auf eine Salzstruktur die Salzursprungsschicht belastet wird, löst dies ein viskoses Fließen von Salz aus der Ursprungsschicht in die Salzstruktur aus, was wiederum zum Aufstieg von Salz und damit Hebung der Salzstruktur führt. Sobald die Salzstruktur vom Eis überfahren wird, wird sie nach unten gedrückt, was zu einer deutlichen Absenkung der Oberfläche über der Salzstruktur führt (Lang u. a. 2014). In den Randsenken wurde nur eine geringe Deformation beobachtet, die unmittelbar durch die Eisauflast an der Erdoberfläche und nicht durch Salzfluss im Untergrund verursacht wird. Obwohl die in den Simulationen beobachteten Versätze relativ gering sind (Dezimeter bis einige Meter) können sie vermutlich glazigene Erosions-, Deformations- und Sedimentationsprozesse im Umfeld von Salzstrukturen beeinflussen (Lang u. a. 2014). Für die Salzrandsenke von Schöningen legen die durchgeführten Simulationen jedoch nahe, dass Eis-induzierte Salzbewegungen die Entwicklung des pleistozänen Ablagerungszentrums nicht beeinflusst haben.

Entstehung des pleistozänen Ablagerungszentrums

Das 3D-Untergrundmodell zeigt, dass das pleistozäne Ablagerungszentrum durch eine langgestreckte Rinne gebildet wird, die erosiv in die paläogene Randsenkenfüllung und das mesozoische Festgestein eingeschnitten ist (**Abb. 2**). Diese Erosionsstruktur ist mindestens 3500 m lang, 300-850 m breit, 40 m tief und hat

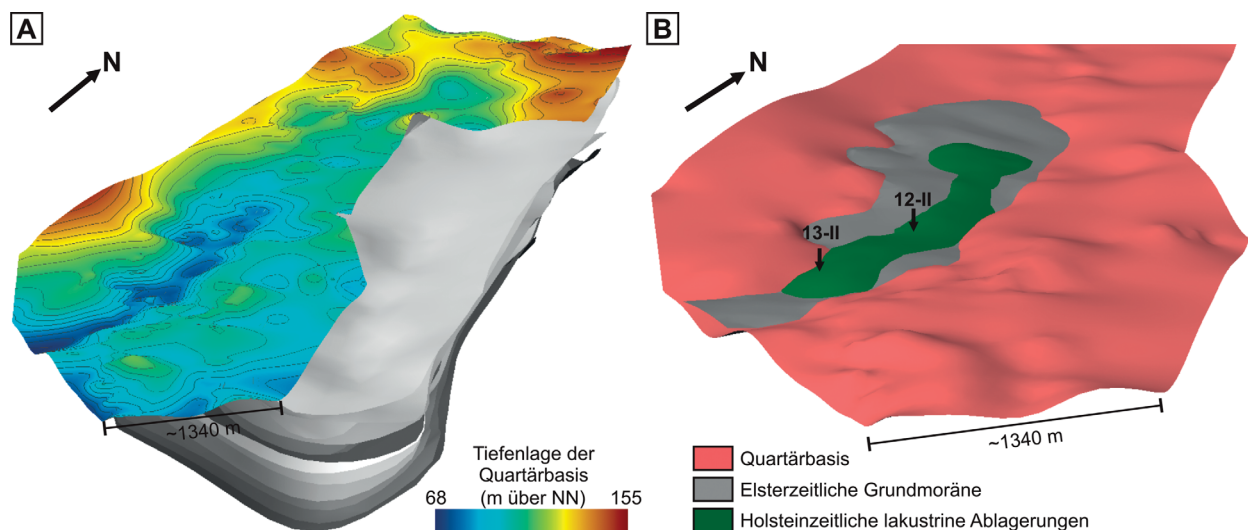


Abb. 2 Perspektivische Ansichten der 3D-Untergrundmodelle (5-fach überhöht). Der Umriss des Modellgebiets ist durch die Verfügbarkeit der Bohrdaten vorgegeben. **A** Ansicht der paläogenen Randsenkenfüllung (Brandes u. a. 2012) und der Quartärbasis (Lang u. a. 2012). Die grauen Schichten stellen die Braunkohleflöze dar. Die Tiefenkarte der Quartärbasis zeigt die subglaziale Rinne im südlichen Teil des Modellgebiets (Intervall der Tiefenlinien: 5 m). – **B** Die Quartärbasis wird diskordant durch elsterzeitliche Grundmoräne und holsteinzeitliche lakustrine Ablagerungen überlagert, die nur in der subglazialen Rinne erhalten sind. Die Pfeile zeigen die Lage der Fundstellen 12-II und 13-II (verändert nach Lang u. a. 2015, Abb. 3).

steil einfallende Flanken (Lang u. a. 2012). Die Gesamtlänge der Erosionsstruktur konnte nicht bestimmt werden, da sie das Modellgebiet nach Süden verlässt. Das wellige basale Profil, der abrupte Beginn und die Dimensionen dieser Rinne sind charakteristisch für subglaziale Rinnen (»tunnel valley«; Huuse/Lykke-Andersen 2000; Lutz u. a. 2009; Kehew u. a. 2012; Van der Vegt u. a. 2012), die unter dem Gletscher durch Schmelzwasser unter hohem Druck erodiert werden. Die subglaziale Rinne ist im Norden breiter und flacher, da sie dort in die unverfestigten paläogenen Ablagerungen eingeschnitten ist, wohingegen sie im Süden im mesozoischen Festgestein einen tieferen, V-förmigen Querschnitt aufweist (Lang u. a. 2012; 2015). Die unverfestigten paläogenen Ablagerungen stellten vermutlich einen bevorzugten Weg für die subglaziale Entwässerung und ein leicht zu erodierendes Substrat dar. Das Einschneiden durch subglaziales Schmelzwasser wird maßgeblich durch die hydraulische Konduktivität des Substrats kontrolliert (Kehew u. a. 2012; Janszen u. a. 2012). Das Einschneiden der subglazialen Rinne begann vermutlich in der Randsenkenfüllung und setzte sich dann im mesozoischen Festgestein fort. Da die basale Füllung der subglazialen Rinne unter holsteinzeitlichen Ablagerungen (MIS 9) liegt, ist ein Einschneiden während der Elster-Eiszeit wahrscheinlich (Abb. 2 B; Elsner 2003; Meyer 2012). Subglaziale Rinnen, die mit jüngeren Ablagerungen verfüllt und überdeckt wurden, sind ein typisches Merkmal der Elster-Eiszeit in Norddeutschland (z. B. Kuster/Meyer 1979; Eissmann 2002; Stackebrandt 2009; Roskosch u. a. 2015).

Pleistozäne Ablagerungsprozesse und Landschaftsentwicklung

Füllung der subglazialen Rinne

Die Architektur der basalen Füllung der subglazialen Rinne deutet auf eine komplexe Entstehung mit mehreren Erosions- und Sedimentationsphasen hin (Lang u. a. 2012). Die basale Erosionsfläche ist steil in die

paläogenen Sedimente eingeschnitten und wird von Schmelzwasserablagerungen überlagert. Diese werden diskordant durch Grundmoräne überlagert, die entweder während eines fortgeschrittenen Stadiums des Eiszerfalls (Piotrowski u. a. 1999) oder während eines erneuten Vorstoßes des Gletschers (Huuse/Lykke-Andersen, 2000) abgelagert wurde. In einem der seismischen Profile ist eine terrassenartige Verbreiterung der subglazialen Rinne zu erkennen und die Bohrdaten zeigen, dass die Grundmoräne in diesem Bereich das basale pleistozäne Sediment bildet (Lang u. a. 2012). Eine solche Verbreiterung in Kombination mit der Ablagerung von Grundmoräne ist ein Anzeichen für wiederholte Eisvorstöße und direkte Erosion durch den Gletscher (Huuse/Lykke-Andersen 2000; Stewart u. a. 2013). Die Grundmoräne geht relativ graduell in feinkörnige glazilakustrine Sedimente über, die als distale Fazies eines Deltas oder subaquatischen Fächers am zurückweichenden Eisrand interpretiert werden (Lang u. a. 2012). Eventuell lassen sich die wiederholten Erosionsphasen, die zur Bildung und Ausformung der subglazialen Rinne beigetragen haben, mit den beiden elsterzeitlichen Eisvorstößen im Leinetal während MIS 12 und MIS 10 korrelieren (Roskosch u. a. 2015). Nach dem vollständigen Abschmelzen des elsterzeitlichen Gletschers blieb ein Teil der subglazialen Rinne unverfüllt und es bildete sich ein See, der als Ablagerungszentrum für die nachfolgende Sedimentation diente. In diesem langlebigen See wurden Delta-Systeme abgelagert, die eine komplexe warmzeitliche Phase zwischen der Elster- und der Saale-Eiszeit dokumentieren. Neue Datierungen zeigen, dass die Abfolge von Fundstelle 13-II, aus der die meisten paläolithischen Funde stammen, mit der Holstein-Warmzeit und MIS 9 korreliert werden kann (Urban u. a. 2011; Sierralta u. a. 2012). Während des nachfolgenden saalezeitlichen Eisvorstoßes wurden Teile der subglazialen Rinne als proglaziale Schmelzwasserrinne reaktiviert, bevor sie durch glazilakustrine und glazifluviatile Ablagerungen komplett verfüllt wurde. Anschließend wurde die verfüllte Rinne von Grundmoräne und feinkörnigen glazilakustrinen Sedimenten vollständig überdeckt (Lang u. a. 2012). Die Position in einer subglazialen Rinne erklärt die hervorragende Erhaltung der warmzeitlichen Abfolge. Obwohl es während des nachfolgenden saalezeitlichen Eisvorstoßes zu weiträumiger Erosion und intensiver glazitektonischer Deformation kam, blieb die warmzeitliche Abfolge in der subglazialen Rinne erhalten und wurde nur lokal von glazitektonischer Deformation beeinflusst (Lang u. a. 2012).

Warmzeitliche Sedimentation und die Entstehung der archäologischen Fundstellen

Während der Holstein-Warmzeit wurden Organik-reicher Schluff, Feinsand und Torf in einem See abgelagert, der sich in der nur teilweise verfüllten subglazialen Rinne bildete. Die erhaltenen warmzeitlichen Ablagerungen bilden einen länglichen Sedimentkörper mit einer Länge von etwa 2500 m, einer Breite von 200 bis 400 m und einer maximalen Mächtigkeit von 7,5 m (**Abb. 2 B**). Sowohl die Aufschlüsse als auch die seismischen Profile zeigen eine asymmetrische, laterale Auffüllung des Sees von Westen her (Lang u. a. 2012; 2015). Diese in östliche Richtungen progradierenden Deltasysteme wurden durch Bäche aufgeschüttet, die durch Oberflächenabfluss und Quellen im Bereich des Elms gespeist wurden (**Abb. 3**). Im seismischen Profil lassen sich lateral und vertikal gestapelte Deltasysteme unterscheiden, die einen Deltakomplex aufbauen, der durch drei Diskordanzen unterteilt wird. Die Delta-Architektur zeigt einen übergeordneten Abfall des Seespiegels an. Die maximale ursprüngliche Wassertiefe kann aus der Höhe der Delta-Foresets abgeleitet werden und beträgt, unter Berücksichtigung einer Kompaktion von 20-30 % (vgl. Van Asselen 2010), etwa 7,5 m. Die Seespiegelabfälle, die zur Ausbildung der Diskordanzen führten, hatten demnach eine Magnitude von etwa 4-6 m. Die drei im seismischen Profil beobachteten Diskordanzen unterteilen den Deltakomplex, was die Verteilung der unterschiedlichen Fundstellen erklärt. Fundstelle 13-I befindet sich in einem älteren Teil des Deltakomplexes und ist durch eine Diskordanz von der räumlich benachbarten, jüngeren Fundstelle 13-II getrennt (Lang u. a. 2012; 2015).

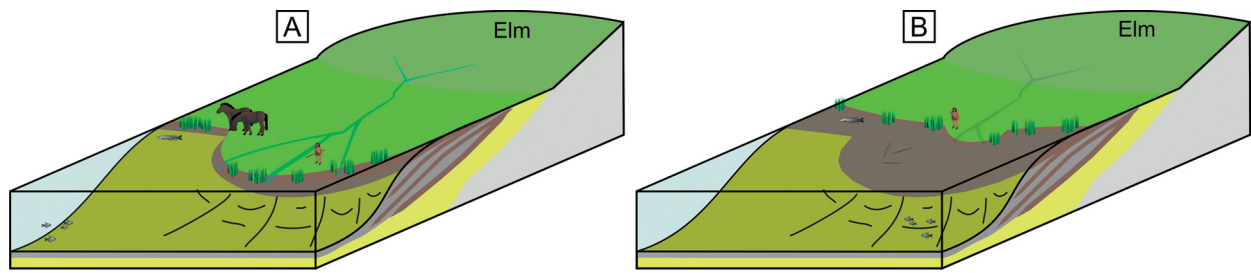


Abb. 3 Schematisches Ablagerungsmodell der holsteinzeitlichen lakustrinen Deltasysteme: **A** Die Deltaebenen waren attraktive Aufenthaltsorte für paläolithische Menschen. Artefakte wurden auf den Deltaebenen hinterlassen. – **B** Durch Seespiegelanstiege kam es zur Überflutung der Deltaebenen. Die Funde wurden nach dem Seespiegelanstieg in lakustrine Sedimente eingebettet. – (Verändert nach Lang u. a. 2012, Abb. 13c).

Im Aufschluss (Fundstellen 12-II und 13-II) sind fünf Parasequenzen zu erkennen, die hochfrequente Seespiegelschwankungen mit einer Magnitude von etwa 1-3 m anzeigen. Jede Parasequenz beginnt mit einer erosiven Transgressionsfläche, die von Ablagerungen des Prodeltas und der Deltafront überlagert wird, die in Ablagerungen der Deltaebene übergehen. Das Top jeder Parasequenz wird durch torffreie Ablagerungen gebildet, welche sumpfige Bedingungen auf der Deltaebene dokumentieren. Die Parasequenzen lassen sich mit den von Urban (2007) für die Fundstelle 13-II definierten Verlandungsfolgen korrelieren. Die Stapelung der Parasequenzen weist darauf hin, dass die Fundstellen 12-II und 13-II gleichzeitig gebildet wurden (Lang u. a. 2012; 2015), was auch durch die palynologischen Befunde bestätigt wird (Urban/Sierralta, 2012).

Die Korrelation der Seespiegelschwankungen mit den umfangreichen paläo-ökologischen Beobachtungen von Urban (1995; 2007), Böhme (2000), Jechorek (2000) und Urban u. a. (2011) deutet auf eine klimatische Steuerung hin. Klimatische Veränderungen beeinflussten den Seespiegel durch das Zusammenspiel von Grundwasserspiegel, Oberflächenabfluss und Vegetationsbedeckung (Lang u. a. 2012; 2015). Die Seespiegelabfälle höherer Magnitude, die zur Bildung der Diskordanzen in der warmzeitlichen Abfolge führten, wurden vermutlich durch größere Abkühlungsereignisse im Verlauf der Holstein-Warmzeit ausgelöst (z. B. Kühl/Litt 2007; Litt u. a. 2008; Koutsodendris u. a. 2013). Seespiegelschwankungen geringerer Magnitude, die durch die Parasequenzen dokumentiert sind, wurden vermutlich dagegen durch höherfrequente stadiale und interstadiale Klimaschwankungen gesteuert (Urban 2007).

Die Anwesenheit paläolithischer Menschen am Ufer des Sees und auf den Deltaebenen ist wiederholt nachgewiesen. Die meisten Funde wurden in den Ablagerungen der Deltaebenen entdeckt und Ansammlungen von Artefakten sind parallel zur früheren Uferlinie angeordnet, was den Aufenthalt paläolithischer Menschen auf der Deltaebene anzeigt. Die Einbettung der Funde erfolgte auf der Deltaebene während der wiederholten Seespiegelanstiege (Abb. 3; Lang u. a. 2012). Daher sind die Funde teilweise in Sedimente eingebettet, die auf größere Wassertiefen hinweisen (Stahlschmidt u. a. in Druck). Obwohl es während der Seespiegelanstiege zur Erosion kam, blieben die Artefakte weitgehend *in situ* erhalten. Durch ihre Lage innerhalb der elsterzeitlichen subglazialen Rinne blieben die Fundschichten vor nachfolgender Erosion geschützt (Lang u. a. 2012; 2015).

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Integration aller Aufschlussbeobachtungen, Bohrdaten und seismischen Profile zeigt klar an, dass die mittelpleistozäne Abfolge in einer langgestreckten Erosionsform überliefert wurde, die eindeutig als subgla-

ziale Rinne interpretiert werden kann. Das wellige basale Profil und die Geometrie der Erosionsform sprechen gegen einen Ursprung als fluviatile Rinne oder als Exarationswanne, wie früher vermutet wurde (z. B. Mania 1998; 2006; Elsner 2003), sind jedoch typisch für subglaziale Rinnen (Huuse/Lykke-Andersen 2000; Lutz u. a. 2009; Kehew u. a. 2012; Van der Vegt u. a. 2012). Andere mögliche Entstehungsmechanismen, wie etwa verstärkte Subsidenz der Salzrandsenke, differentielle Kompaktion oder Subrosion, sind nach unseren Ergebnissen sehr unwahrscheinlich. Die Rekonstruktion der Subsidenzgeschichte der Randsenke zeigt, dass die maximale Subsidenzrate im Eozän erreicht wurde und bereits im Eozän durch die Ausdünnung der Salzursprungsschicht stark nachließ. Die Position des mittelpleistozänen Ablagerungszentrums am äußeren westlichen Rand der Randsenke passt außerdem nicht zum generellen Migrationstrend des Ablagerungszentrums der Randsenke (Brandes u. a. 2012; Osman u. a. 2013). Die durchgeführte Simulation der Reaktion von Salzstrukturen auf Eisauflast zeigt zwar eine gewisse Reaktivierung des Salzaufstiegs an, aber die im Model beobachteten Subsidenzmuster weichen deutlich von der Position des mittelpleistozänen Ablagerungszentrums von Schöningen ab (Lang u. a. 2014). Auch gibt es keine Anzeichen für eine differentielle Kompaktion der liegenden Schichten oder für Subrosion (Lang u. a. 2012). Die Verbreitung der Braunkohlenflöze, die während der Einbettung stark kompaktiert werden können, passt nicht zur Lage des mittelpleistozänen Ablagerungszentrums (Brandes u. a. 2012; Osman u. a. 2013). Deformationsstrukturen, die für Subrosion typisch wären, fehlen ebenfalls.

Die subglaziale Rinne wurde während der Elster-Eiszeit eingeschnitten und diente als langlebiges Ablagerungszentrum für elster-, holstein- und saalezeitliche Ablagerungen. Der nach dem Abschmelzen des elsterzeitlichen Gletschers unverfüllt gebliebene Teil der subglazialen Rinne bildete den Akkommodationsraum für nachfolgende Sedimentation. Die Überlieferung warmzeitlicher Sedimente in elsterzeitlichen subglazialen Rinnen ist ein gut dokumentiertes Phänomen in Norddeutschland (Kuster/Meyer 1979; Eissmann 2002; Stephan u. a. 2011), den Niederlanden (Kluiving u. a. 2003), Dänemark (Jørgensen/Sandersen 2006) und England (Turner 1970; Preece u. a. 2006). Während der nachfolgenden Holstein-Warmzeit bildete sich ein See, der lateral durch feinkörnige Deltasysteme aufgefüllt wurde. Die Uferzone und insbesondere die Deltaebenen dieses Sees stellten einen attraktiven Ort für paläolithische Jäger und Sammler und ihre Beutetiere dar. Die verschiedenen archäologischen Fundstellen von Schöningen und ihre internen Fundschichten zeigen an, dass sich paläolithische Menschen immer wieder dort aufhielten, obwohl sich die klimatischen Bedingungen während der Bildung der Fundstellen deutlich veränderten (Thieme 1999; Urban 2007). Insbesondere während der kalten und trockenen Phasen am Anfang und am Ende der Warmzeit war das Feuchtgebiet der Deltaebene ein im Vergleich zur Umgebung begünstigtes Ökosystem (vgl. Preece u. a. 2006; Ashley u. a. 2010, Lang u. a. 2015). Unsere sequenzstratigraphische Analyse der klimatisch gesteuerten Seespiegelschwankungen erklärt die räumliche Verteilung der Fundstellen und ermöglicht ihre relative chronologische Einordnung. Die auf den Deltaebenen hinterlassenen Funde wurden bei der Überflutung der Deltaebene bei Seespiegelanstiegen in lakustrine Sedimente eingebettet.

DANKSAGUNG

Wir danken dem Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur für die großzügige Förderung des Projekts (Projekt-Nr.: 51420035 und Pro*Niedersachsen Projekt-Nr.: 11.2-76202-17-3/09). Der E.ON-Kraftwerke GmbH danken wir für die Erlaubnis zur Durchführung von Geländearbeiten im Tagebau Schöningen. Die Bohrdaten wurden freundlicherweise durch die

E.ON-Kraftwerke GmbH und das Niedersächsische Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie zur Verfügung gestellt. Wir danken insbesondere der Mannschaft der archäologischen Ausgrabung mit W. Berkemer, N. Haycock, B. Köhler, M. Kursch, J. Lehmann, W. Mertens und J. Neumann-Giesen für ihre Unterstützung im Gelände.

LITERATUR

- Ashley u.a. 2010: G. M. Ashley / M. Dominguez-Rodrigo / H. T. Bunn / A. Z. P. Mabulla / E. Baquedano, Sedimentary geology and human origins: a fresh look at Olduvai Gorge, Tanzania. *Journal of Sedimentary Research* 80, 2010, 703-709.
- Behre 2012: K.-E. Behre (Hrsg.), Die chronologische Einordnung der paläolithischen Fundstellen von Schöningen. The chronological setting of the Palaeolithic sites of Schöningen. *Forschungen zur Urgeschichte im Tagebau von Schöningen 1* (Mainz 2012).
- Böhme 2000: G. Böhme, Reste von Fischen, Amphibien und Reptilien aus der Fundstelle Schöningen 12 bei Helmstedt (Niedersachsen) – Erste Ergebnisse. *Praehistoria Thuringica* 4, 2000, 18-27.
- Brandes u.a. 2012: C. Brandes / L. Pollok / C. Schmidt / W. Riegel / V. Wilde / J. Winsemann, Basin modelling of a lignite-bearing salt rim syncline: insights into rim syncline evolution and salt diapirism in NW Germany. *Basin Research* 24, 2012, 699-716.
- Brandes u.a. 2013: C. Brandes / C. Schmidt / D. C. Tanner / J. Winsemann, Paleostress pattern and salt tectonics within a developing foreland basin (northwestern Subhercynian Basin), northern Germany. *International Journal of Earth Sciences* 102, 2013, 2255-2274.
- Ehlers u.a. 2011: J. Ehlers / A. Grube / H.-J. Stephan / S. Wansa, Pleistocene Glaciations of North Germany – New Results. In: J. Ehlers / P. L. Gibbard / P. D. Hughes (Hrsg.), *Quaternary Glaciations – Extent and Chronology – A Closer Look*. *Developments in Quaternary Science* 15 (Amsterdam u.a. 2011) 149-162.
- Elsner 2003: H. Elsner, Verbreitung und Ausbildung Elster-zeitlicher Ablagerungen zwischen Elm und Flechtinger Höhenzug. *Eiszeitalter und Gegenwart* 52, 2003, 91-116.
- Eissmann 2002: L. Eissmann, Quaternary geology of eastern Germany (Saxony, Saxon-Anhalt, South Brandenburg, Thuringia), type area of the Elsterian and Saalian Stages in Europe. *Quaternary Science Reviews* 21, 2002, 1275-1346.
- Huuse/Lykke-Andersen 2000: M. Huuse / H. Lykke-Andersen, Overdeepened Quaternary valleys in the eastern Danish North Sea: morphology and origin. *Quaternary Science Reviews* 19, 2000, 1233-1253.
- Janszen u.a. 2012: A. Janszen / M. Spaak / A. Moscariello, Effects of the substratum on the formation of glacial tunnel valleys: an example from the Middle Pleistocene of the southern North Sea. *Boreas* 41, 2012, 629-643.
- Jechorek 2000: H. Jechorek, Die fossile Flora des Reinsdorf-Interglazials. Paläokarpologische Untersuchungen an mittelpleistozänen Ablagerungen im Braunkohlentagebau Schöningen. *Praehistoria Thuringica* 4, 2000, 7-17.
- Jørgensen/Sandersen 2006: F. Jørgensen / P. B. E. Sandersen, Buried and open tunnel valleys in Denmark – erosion beneath multiple ice sheets. *Quaternary Science Reviews* 25, 2006, 1339-1363.
- Kehew u.a. 2012: A. E. Kehew / J. A. Piotrowski / F. Jørgensen, Tunnel valleys: Concepts and controversies – A review. *Earth-Science Reviews* 113, 2012, 33-58.
- Kluiwing u.a. 2003: S. J. Kluiwing / J. H. Aleid Bosch / J. H. J. Ebbing / C. S. Mesdag / R. S. Westerhoff, Onshore and offshore seismic and lithostratigraphic analysis of a deeply incised Quaternary buried valley-system in the Northern Netherlands. *Journal of Applied Geophysics* 53, 2003, 249-271.
- Koutsodendris u.a. 2013: A. Koutsodendris / A. F. Lotter / E. Kirilova / F. T. M. Verhagen / A. Brauer / J. Pross, Evolution of a Holsteinian (MIS 11c) palaeolake based on a 12-ka-long diatom record from Dethlingen (northern Germany). *Boreas* 42, 2013, 714-728.
- Kühl / Litt 2007: N. Kühl / T. Litt, Quantitative Time-Series Reconstructions of Holsteinian and Eemian Temperatures Using Botanical Data. In: F. Sirocko / M. Claussen / M. F. S. Goni / T. Litt (Hrsg.), *The Climate of Past Interglacials*. *Developments in Quaternary Science* 7 (Amsterdam u.a. 2007) 418-444.
- Kuster / Meyer 1979: H. Kuster / K. -D. Meyer, Glaziäre Rinnen im mittleren und nordöstlichen Niedersachsen. *Eiszeitalter und Gegenwart* 29, 1979, 135-156.
- Lang u.a. 2012: J. Lang / J. Winsemann / D. Steinmetz / L. Pollok / U. Polom / U. Böhner / J. Serangeli / C. Brandes / A. Hampel / S. Winghart, The Pleistocene of Schöningen (Germany): a complex tunnel valley-fill revealed from 3D subsurface modelling (GOCAD) and shear-wave seismics. *Quaternary Science Reviews* 39, 2012, 86-105.
- Lang u.a. 2014: J. Lang / A. Hampel / C. Brandes / J. Winsemann, Response of salt structures to ice-sheet loading: implications for ice-marginal and subglacial processes. *Quaternary Science Reviews* 101, 2014, 217-233.
- Lang u.a. 2015: J. Lang / U. Böhner / U. Polom / J. Serangeli / J. Winsemann, The Middle Pleistocene tunnel valley at Schöningen as a paleolithic archive. *Journal of Human Evolution* 89, 2015, 18-26.
- Liszkowski 1993: J. Liszkowski, The effects of Pleistocene ice-sheet loading-deload cycles on the bedrock structure of Poland. *Folia Quaternaria* 64, 1993, 7-23.
- Litt u.a. 2008: T. Litt / H. -U. Schmincke / M. Frechen / C. Schlüchter, Quaternary. In: T. McCann (Hrsg.), *The Geology of Central Europe. 2: Mesozoic and Cenozoic* (London 2008) 1287-1340.
- Lutz u.a. 2009: R. Lutz / S. Kalka / C. Gaedicke / L. Reinhardt / J. Winsemann, Pleistocene tunnel valleys in the German North Sea: spatial distribution and morphology. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 160, 2009, 225-235.
- Mania 1998: D. Mania, Zum Ablauf der Klimazyklen seit der Elstervereisung im Elbe-Saalegebiet. *Praehistoria Thuringica* 2, 1998, 5-21.
- Mania 2006: D. Mania, Stratigraphie, Klima- und Umweltentwicklung der letzten 400. 000 Jahre im Saalegebiet und Harzvorland (Forschungsstand 2006). *Hercynia N.F.* 39, 2006, 155-194.
- Meyer 2012: K.-D. Meyer, Stratigraphie des Saale-Komplexes in Niedersachsen und die Schöninger Profile. In: Behre 2012, 61-76.
- Osman u.a. 2013: A. Osman / L. Pollok / C. Brandes / J. Winsemann, Sequence stratigraphy of a Paleogene coal bearing rim syncline: interplay of salt dynamics and sea-level changes, Schöningen, Germany. *Basin Research* 25, 2013, 675-708.
- Piotrowski u.a. 1999: J. Piotrowski / J. Geletneký / R. Vater, Soft-bedded subglacial meltwater channel from the Welzow-Süd open-cast lignite mine, Lower Lusatia, eastern Germany. *Boreas* 28, 1999, 363-374.

- Preece u. a. 2006: R. C. Preece / J. A. J. Gowlett / S. A. Parfitt / D. R. Bridgland / S. G. Lewis, Humans in the Hoxnian: habitat, context and fire use at Beeches Pit, West Stow, Suffolk, UK. *Journal of Quaternary Science* 21, 2006, 485-496.
- Riegel u. a. 2012: W. Riegel / V. Wilde / O. K. Lenz, The Early Eocene of Schöningen (N-Germany) – an interim report. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105, 2012, 88-109.
- Roskosch u. a. 2015: J. Roskosch / J. Winsemann / U. Polom / C. Brandes / S. Tsukamoto / A. Weitkamp / W. A. Bartholomäus / D. Henningsen / M. Frechen, Luminescence dating of ice-marginal deposits in northern Germany: evidence for repeated glaciations during the Middle Pleistocene (MIS 12 to MIS 6). *Boreas*, 44, 2015, 103-126.
- Serangeli u. a. 2012: J. Serangeli / U. Böhner / H. Haßmann / N. J. Conard, Die Pleistozänen Fundstellen in Schöningen – eine Einführung. In: Behre 2012, 1-22.
- Sierralta u. a. 2012: M. Sierralta / M. Frechen / B. Urban, 230Th/U dating results from opencast mine Schöningen. In: Behre 2012, 143-154.
- Sirocko u. a. 2008: F. Sirocko / K. Reicherter / R. Lehné / C. Hübscher / J. Winsemann / W. Stackebrandt, Glaciation, salt and the present landscape. In: R. Littke / U. Bayer / D. Gajewski / S. Nelskamp (Hrsg.), *Dynamics of Complex Intracontinental Basins – The Central European Basin System* (Berlin u. a. 2008) 233-245.
- Stackebrandt 2009: W. Stackebrandt, Subglacial channels of Northern Germany – a brief review. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften* 60, 2009, 203-210.
- Stahlschmidt u. a. in Druck: M. C. Stahlschmidt / C. E. Miller / B. Ligouis / P. Goldberg / F. Berna / B. Urban / N. J. Conard, The depositional environments of Schöningen 13 II-4 and their archaeological implications. *Journal of Human Evolution*, in Druck.
- Stephan u. a. 2011: H. -J. Stephan / B. Urban / G. Lüttig / B. Menke / M. Sierralta, Palynologische, petrographische und geochronologische Untersuchungen an Ablagerungen der Leck-Warmzeit (spätes Mittelpleistozän) und begleitender Sedimente. *Geologisches Jahrbuch A* 160, 2011, 1-80.
- Stewart u. a. 2013: M. A. Stewart / L. Lonergan / G. Hampson, 3D seismic analysis of buried tunnel valleys in the central North Sea: morphology, cross-cutting generations and glacial history. *Quaternary Science Reviews* 72, 2013, 1-17.
- Thieme 1997: H. Thieme, Lower Palaeolithic hunting spears from Germany. *Nature* 385, 1997, 307-310.
- 1999: H. Thieme, Altpaläolithische Holzgeräte aus Schöningen, Ldkr. Helmstedt. *Bedeutsame Funde zur Kulturentwicklung des frühen Menschen*. *Germania* 77, 1999, 451-487.
- Turner 1970: C. Turner, The Middle Pleistocene deposits at Marks Tey, Essex. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 257, 1970, 373-437.
- Urban 1995: B. Urban, Palynological evidence of younger Middle Pleistocene Interglacials (Holsteinian, Reinsdorf, Schöningen) in the Schöningen open cast lignite mine (eastern Lower Saxony, Germany). *Mededelingen Rijks Geologische Dienst* 52, 1995, 175-186.
- 2007: B. Urban, Interglacial Pollen Records from Schöningen, North Germany. In: F. Sirocko / M. Claussen / M. F. S. Goni / T. Litt (Hrsg.), *The Climate of Past Interglacials. Developments in Quaternary Science 7* (Amsterdam 2007) 418-444.
- Urban/Sierralta, 2012: B. Urban / M. Sierralta, New palynological evidence and correlation of Early Palaeolithic sites in Schöningen 12 B and 13 II, Schöningen open lignite mine. In: Behre 2012, 77-96.
- Urban u. a. 1988: B. Urban / H. Thieme / H. Elsner, Biostratigraphische, quartärgeologische und urgeschichtliche Befunde aus dem Tagebau »Schöningen«, Ldkr. Helmstedt. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft* 139, 1988, 123-154.
- Urban u. a. 1991: B. Urban / R. Lenhard / D. Mania / B. Albrecht, Mittelpleistozän im Tagebau Schöningen, Ldkr. Helmstedt. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft* 142, 1991, 351-372.
- Urban u. a. 2011: B. Urban / M. Sierralta / M. Frechen, New evidence for vegetation development and timing of Upper Middle Pleistocene interglacials in Northern Germany and tentative correlations. *Quaternary International* 241, 2011, 125-142.
- Van Asselen 2010: S. Van Asselen, The contribution of peat compaction to total basin subsidence: implications for the provision of accommodation space in organic-rich deltas. *Basin Research* 23, 2010, 239-255.
- Van der Vegt u. a. 2012: P. Van der Vegt / A. Janszen / A. Moscarillo, Tunnel valleys: current knowledge and future perspectives. In: M. Huuse / J. Redfern / D. P. Le Heron / R. J. Dixon / A. Moscarillo / J. Craig (eds), *Glaciogenic reservoirs*. *Geological Society of London Special Publication* 368 (London 2012) 75-97.

ZUSAMMENFASSUNG / ABSTRACT

Die geologische Entwicklung der Randsenke von Schöningen: Implikationen für Landschaftsentwicklung und Archäologie

Die quartären Ablagerungen von Schöningen stellen eines der bedeutendsten geologischen und archäologischen Archive des Mittelpleistozäns in Mitteleuropa dar und die darin enthaltenden archäologischen Funde haben weltweite Aufmerksamkeit erlangt. Im Rahmen eines durch das Niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur geförderten Projekts haben wir die känozoische Entwicklungsgeschichte der Randsenke von Schöningen untersucht. Insbesondere war es unser Ziel, die Bildung des pleistozänen Ablagerungszentrums zu rekonstruieren und das Ablagerungsmilieu sowie die räumliche und zeitliche Verteilung der paläolithischen Funde zu analysieren.

Die Geometrie und Dimensionen des pleistozänen Ablagerungszentrums sind typisch für eine subglaziale Rinne. Die rekonstruierte elsterzeitliche subglaziale Rinne ist 300-850 m breit und 40 m tief, die Architektur ihrer basalen Füllung

deutet auf eine komplexe Entstehung mit mehreren Erosions- und Sedimentationsphasen hin. In der unvollständig verfüllten subglazialen Rinne bildete sich nachfolgend ein See, der als langlebiges Ablagerungszentrum für warmzeitliche Sedimente diente. Während der Holstein-Warmzeit (MIS 9) wurde der See lateral durch feinkörnige, Organik-reiche Deltasysteme aufgefüllt. Klimatisch gesteuerte Seespiegelschwankungen führten zur lateralen und vertikalen Stapelung unterschiedlicher Deltakörper. Die Uferzone und insbesondere die Deltaebenen des warmzeitlichen Sees stellten einen attraktiven Ort sowohl für paläolithische Jäger und Sammler als auch für die damalige Großfauna dar. Die meisten Funde wurden in den Ablagerungen der Deltaebenen parallel zur früheren Uferlinie entdeckt, was den Aufenthalt paläolithischer Menschen auf der Deltaebene anzeigt. Während wiederholter Seespiegelanstiege wurden die auf der Deltaebene hinterlassenen Artefakte in lakustrine Sedimente eingebettet. Obwohl es während der Seespiegelanstiege zur Erosion kam, blieben die meisten Funde in-situ erhalten. Durch ihre Lage innerhalb der elsterzeitlichen subglazialen Rinne blieben die Fundschichten vor nachfolgender Erosion geschützt und blieben so erhalten.

The geological development of the Schöningen rim syncline: implications for landscape evolution and archaeology

The Quaternary deposits of Schöningen represent one of the most important geological and archaeological archives of the Middle Pleistocene. The aim of our study was to understand the Cenozoic evolution of the Schöningen salt rim syncline, to reconstruct the formation and infill of the Pleistocene depocentre and to analyse the spatial and temporal distribution of the Palaeolithic artefacts.

The 300-850m wide and 40m deep Pleistocene depocentre formed as a subglacial tunnel valley during the Elsterian glaciation. The depositional architecture of the basal infill indicates a complex evolution with several phases of erosion and deposition. During the Holsteinian interglacial (MIS 9) a lake formed in the underfilled tunnel valley and fine-grained, organic-rich delta systems were deposited. Climatically controlled lake-level changes caused a lateral and vertical stacking of different delta bodies. The lake margins and especially the delta plains of the interglacial lake represented an attractive site for both large animals and Palaeolithic hunter-gatherers. Most artefacts were recovered from shoreline-parallel zones in the delta plain deposits and indicate the presence of Palaeolithic humans on the delta plain. During repeated lake-level rises the finds, which were left on the subaerial delta plains, were embedded in lacustrine sediment. Although minor erosion occurred during the lake-level rises most objects are preserved in-situ. Their position within the Elsterian tunnel valley protected the artefact-bearing strata from later erosion.