

Sedimentäre Architektur und 3-D-Georadaranalysen von kiesigen mäandrierenden Flussablagerungen (Neckartal, SW Deutschland)

Von BORIS KOSTIC und THOMAS AIGNER, Tübingen

Mit 6 Abbildungen

ZUSAMMENFASSUNG

Dieser gegenüber der Originalpublikation (KOSTIC & AIGNER 2007) stark verkürzte Artikel beschreibt die dreidimensionale sedimentäre Architektur quartärer kiesiger Flussablagerungen im Neckartal bei Tübingen, die anhand von sedimentologischen Aufschlussstudien und Georadaranalysen des Untergrunds charakterisiert wurde. Der obere Teil des Kieskörpers weist zwei architektonisch unterschiedliche Einheiten auf, die durch eine markante Erosionsfläche getrennt sind: (1) eine untere Einheit, die von trogförmigen Ablagerungselementen dominiert wird und intern von schräggeschichteten Rollkieslagen und schlecht sortierten, massiven Kieslagen aufgebaut ist; und (2) eine obere Einheit, die durch flach einfallende Kiesschichten und eingeschaltete dünne Sandlagen gekennzeichnet ist, die durch laterale Akkretion auf einer erosiven Basisfläche abgelagert wurden. Die untere Einheit deutet vermutlich auf Ablagerungen in einem verflochtenen („braided“) Flusssystem hin, während die Merkmale der oberen Einheit auf extensive „point bar“ Ablagerungen schließen lassen, die durch die laterale Migration von mäandrierenden Flusskanälen geformt wurden. Letzteres wird durch die Kartierung von Luftbildern bestätigt. Die lateralen Akkretionselemente sind eng assoziiert mit Durchbruchkanälen, Kiesdünen und Altarmablagerungen, während weitaushaltende tonige Überflutungssedimente die Kiesablagerungen überlagern. Georadarbilder, die die dreidimensionalen Geometrien der Ablagerungselemente offenlegen, bestätigen den Wechsel des sedimentären Stils zwischen den beiden stratigraphischen Einheiten. Kohlenstoff-14 Datierungen von Holzresten zeigen, dass dieser Wechsel zu Beginn des Holozäns stattfand und mit einer vermutlich durch klimatische Veränderungen ausgelösten Reorganisation des Flusssystems zusammenhängt. Die Integration von sedimentologischen Aufschlussstudien und Georadaranalysen hebt den heterogenen Aufbau der Neckartalflussablagerungen hervor, was ein wichtiger Faktor für die Modellierung von Grundwasserfließpfaden in Talaquiferen darstellt.

Schlüsselwörter: Kies, Flussablagerungen, Mäander, Georadar, Quartär

ABSTRACT

This paper represents a shortened version of the original publication by Kostic & Aigner (2007) and describes the three-dimensional sedimentary architecture of Quaternary coarse-grained fluvial deposits in the Neckar Valley close to Tübingen based on sedimentological outcrop analysis and sub-surface ground-penetrating radar (GPR) surveys. Two units characterised by different architectural

styles are distinguished within the upper part of the gravel body, separated by an erosional unconformity: (1) a lower unit dominated by trough-shaped depositional elements that are filled by cross-bedded sets of openwork and poorly sorted massive gravel; and (2) an upper unit characterised by gently inclined gravel sheets and thin, sandy interlayers that display lateral accretion on a lower erosional surface. The lower unit was deposited by a multi-channel, possibly braided river system, while the sedimentological characteristics of the upper unit suggest the preservation of extensive point bar deposits that were formed by the lateral migration of a meandering river channel. The presence of the latter is confirmed by aerial photographs. The lateral accretion elements are closely associated with chute channels, gravel dunes and muddy abandoned channel fills, while laterally widespread floodplain fines cover the gravel deposits. The GPR images, revealing the three-dimensional geometries of the depositional elements and their stacking patterns, confirm a change in sedimentary style between the two stratigraphic units. The change occurred at the onset of the Holocene, as indicated by ^{14}C -dating of wood fragments, and is related to a reorganisation of the fluvial system that probably was driven by climatic changes. The integration of sedimentological and GPR results highlights the heterogeneity of the Neckar fluvial deposits, a factor that is important for modelling groundwater flow in valley-fill aquifers.

Keywords: gravel-bed river, meander, ground-penetrating radar, Quaternary

EINFÜHRUNG

Quartäre Kiesbettablagerungen formen weitaushaltende Talaquifere in vielen Gebieten Mitteleuropas. Um Grundwasserfließpfade und Kontaminationswege in diesen häufig dicht besiedelten und industrialisierten Gegenden besser verstehen zu können, ist eine detaillierte Beschreibung der räumlichen Verteilung von hydraulischen Parametern (z. B. Permeabilitäten) nötig (HUGGENBERGER & AIGNER 1999). In Lockergesteinen sind diese Parameter stark abhängig von lithologischen Heterogenitäten, welche wiederum das Produkt von Transport- und Ablagerungsprozessen sind. So zeigen verschiedene Lithofaziestypen in Flusssystemen Abweichungen hydraulischer Durchlässigkeitsbeiwerte um mehrere Zehnerpotenzen.

Obwohl viele sedimentologische Studien über grobkörnige, verflochtene Flusssysteme existieren, sind Studien zur sedimentären Architektur von kiesigen mäandrierenden Flusssystemen vergleichsweise selten. Solche Ablagerungen sind in Deutschland zudem sehr selten aufgeschlossen und, wo diese Aufschlüsse existieren, verhindert häufig ein hoher Grundwasserspiegel detailliertere Studien. Das Neckartal in Südwestdeutschland stellt eine seltene Ausnahme dar. So sind Teile eines quartären Kieskörpers in der aktiven Kiesgrube bei Hirschau/Tübingen aufgrund des durch einen Stauwehr gesenkten Grundwasserspiegels frei zugänglich (Abb. 1). In dieser Kiesgrube und in unmittelbarer Umgebung wurden sedimentologische Aufschlussstudien unterstützt von Georadaranalysen mit dem Ziel durchgeführt, den Kieskörper hinsichtlich seines

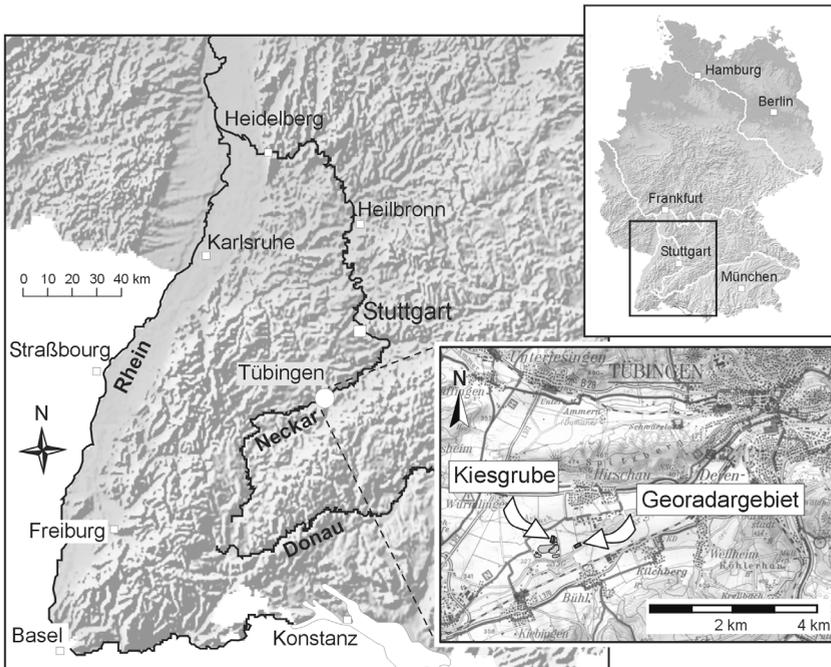


Abb. 1. Karte des Untersuchungsgebietes südwestlich von Hirschau, in der Nähe von Tübingen, wo grobkörnige Flussablagerungen des Neckars in einer Kiesgrube aufgeschlossen sind. Georadarmessungen wurden in unmittelbarer Nähe zur Kiesgrube im Brunnenschutzgebiet Gernfeld durchgeführt.

sedimentären (dreidimensionalen) Aufbau und seiner Entstehungsgeschichte zu beschreiben und daraus hydrogeologische Implikationen für Talaquifere abzuleiten.

UNTERSUCHUNGSGBIET UND METHODIK

Die quartären Flusssedimente des Neckars bei Tübingen, die auf obertriassischen Keuperablagerungen liegen (Abb. 2), stammen ursprünglich vom Schwarzwaldrand und benachbarten Gebieten. Sie bestehen zum größten Teil aus jurassischen und triassischen Kalksteinklasten, während die feinkörnige Matrix zwischen den Klasten überwiegend von triassischen Sandsteinen herrührt. Während des Holozäns wurden diese Kiesablagerungen durch ein mäandrierendes Flusssystem umgelagert, welches zudem bis ins 18. Jahrhundert weit-aushaltende, tonige Überflutungssedimente abgelagerte (KLEINERT 1976). Diese überlagern den Neckartalkieskörper mit einer Mächtigkeit von 0,2–2 m im Bereich des Untersuchungsgebietes. Obwohl der Neckar im letzten Jahrhundert begradigt und kanalisiert wurde, sind heute lokal immer noch Mäandergürtel in der Oberflächenmorphologie sichtbar. Diese wurden mit Hilfe von Luftbildern

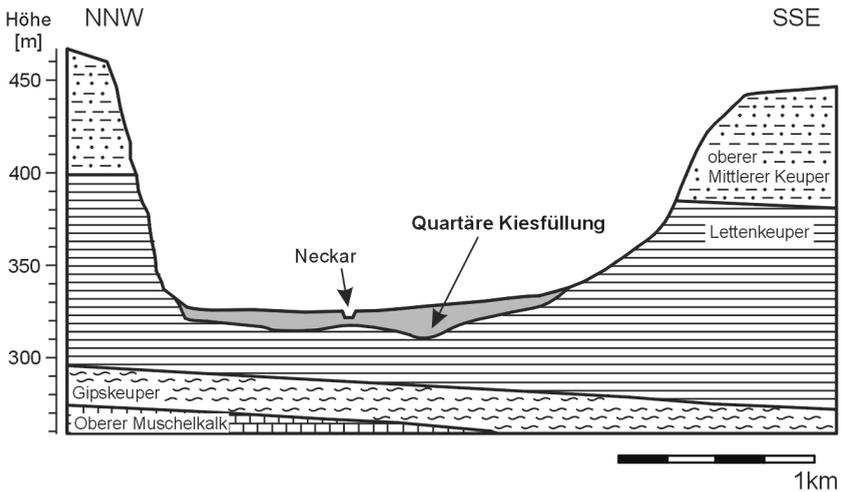


Abb. 2. Geologischer Querschnitt durch das Neckartal östlich von Hirschau (verändert nach KLEINERT 1976). Der untersuchte quartäre Kieskörper liegt auf obertriassischen Ablagerungen und zeigt laterale Mächtigkeitsschwankungen. Profil ist zehnfach überhöht.

kartiert, um die jüngste Flussbettmorphologie und die Dynamik des Flusssystems besser verstehen zu können.

Der Neckartalkieskörper wurde entlang einer über 120 m langen Aufschlusswand studiert und detailliert kartiert. Hinter der Aufschlusswand wurden Georadmessungen durchgeführt, um diese mit Aufschlussstudien zu kalibrieren und das Auflösungsvermögen der Georadarmethode zu erfassen. Der direkte Vergleich der Georadardaten mit Aufschlussdaten verifiziert die Integrität der Georadarmethode und half die in unmittelbarer Nähe zur Kiesgrube (siehe Abb.1) durchgeführten dreidimensionalen Georadar-Untergundsmessungen besser verstehen zu können. Beim Georadar handelt es sich um eine hochauflösende, nicht-destruktive Untersuchung des flachen Untergrundes mit ausgesendeten, elektromagnetischen Wellen, die im Frequenzbereich von Radiowellen liegen. Diese messen Unterschiede dielektrischer Eigenschaften des Untergrundes, die in erster Linie durch lithologische Heterogenitäten und vor allem durch Unterschiede im residualen Wassergehalt verursacht werden (z. B. HUGGENBERGER 1993; ASPIRON & AIGNER 1997, 1999). In der ungesättigten Zone hängt letzterer in erster Linie von der Größe und Geometrie des Porenraumes ab, der wiederum von der Korngröße und Sortierung des Lockergesteins kontrolliert wird.

LITHOFAZIES

Lithofaziestypen wurden im Aufschluss aufgrund der dominierenden Korngrößenklasse, Textur, Struktur, Schichtung, sowie des Rundungs- und

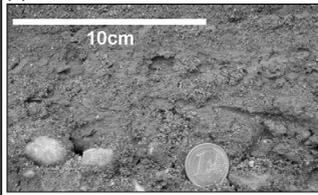
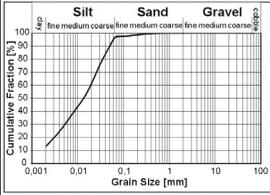
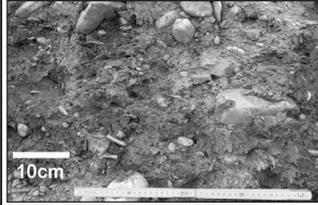
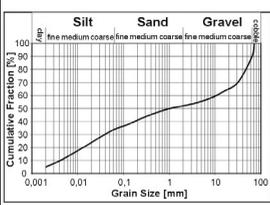
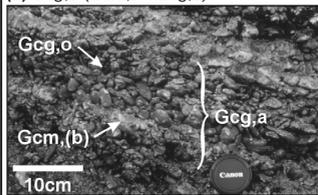
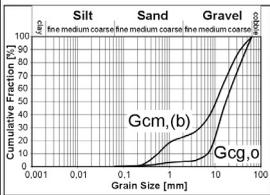
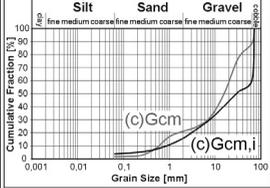
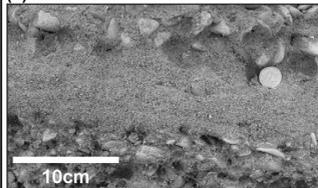
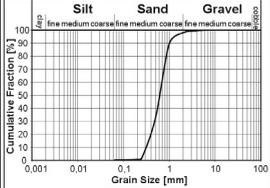
Lithofacies code	photo	Characteristic grain size distribution	Description and interpretation
(1) F-l, F-m			<p><u>Laminated / massive fines</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - interlamination of clay, silt and fine sand - or massive (with calcified traces of plant roots) - contains minor organic material <p>deposition from suspension and weak traction currents</p>
(2) fGcm - fGmm			<p><u>Fines-rich gravel</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - clast- to matrix-supported - high amount of fines - rounded components: aligned parallel to channel margins, or inversely graded <p>deposition from debris flows and/or migrating bedforms?</p>
(3) Gcg,a (Gcm,b - Gcg,o)			<p><u>Alternating gravel</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - clast-supported, graded - well rounded components - upper zone: matrix-free (Gcg,o) - lower zone: bi- to polymodal (Gcm,b - Gcm) - bed thickness: 5-30 cm <p>low-density bedload transport (deposited on inclined step)</p>
(4) (c)Gcm - (c)Gcm,i			<p><u>Massive gravel</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - clast-supported - moderate to poor sorting - rounded components - imbrication of larger clasts may occur: b-axis (imbricated) a-axis (transverse to flow) - bed thickness: 20-50 cm <p>low-density bedload sheets</p>
(5) S-x			<p><u>Stratified sand</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - well sorted - internal subhorizontal- to cross-stratification - forms subhorizontal units within gravel lithofacies - bed thickness: 5-15 cm <p>bedload transport as single particles</p>

Abb. 3. Zusammenfassung der am häufigsten vorkommenden Lithofaziestypen in den grobkörnigen Flussablagerungen des Neckartals.

Sortierungsgrades von Klanten bestimmt. Insgesamt wurden dabei fünf vorherrschende Lithofaziestypen des Neckartalkieskörpers identifiziert. Die Hauptmerkmale dieser Lithofaziestypen sind in Abb. 3 zusammengefasst. Diese erlauben Rückschlüsse auf die Transport- und Ablagerungsprozesse zu ziehen, und sagen somit etwas über die Dynamik des Ablagerungsmilieus aus.

ABLAGERUNGSELEMENTE

Diskrete Ablagerungselemente, als hierarchisch nächstgrößere Einheit, sind durch die Art ihrer Grenzflächen, externen Geometrien, internen Strukturen und Lithofazieszusammensetzungen gekennzeichnet. Diese architektonisch unterschiedlich aufgebauten Elemente sind kritisch für das Verständnis der dreidimensionalen Permeabilitätsverteilung, da sie zusammenhängende hydraulische Einheiten oder auch lokale bzw. regionale Fließbarrieren formen können. Im Untergrund wurden sie mit Hilfe von Georadarmessungen aufgrund der Art und Geometrie von Grenzreflektoren sowie internen Reflektorkonfigurationen bestimmt. Die dreidimensionale Geometrie der Ablagerungselemente im Untergrund und daraus abgeleitete hydrogeologische Implikationen sind in Abb.4 zusammenfassend illustriert. Im Folgenden soll nur ein Beispiel näher beschrieben werden.

Laterales Akkretionselement

Aufschlusscharakteristik

Dieses Element ist das am weitesten verbreitete im Untersuchungsgebiet (Abb.5). Es ist in der Regel zwischen 1–1,5 m mächtig, lateral über 100 m lang, durch eine erosive Basisfläche und eine irreguläre obere Grenzfläche gekennzeichnet. Intern ist es aus leicht einfallenden ($1-4^\circ$) Kiesschichten aufgebaut, die in erster Linie aus dünnen Rollkieslagen und massiven Kieslagen zusammengesetzt sind, mit lokal eingeschalteten, dünnen Sandschichten. Eine grobkörnige Lage, die häufig Steinkomponenten enthält, ist mitunter an der Basis dieses Elements sichtbar. Klastimbrikationen, die Richtung Nordosten weisen, deuten darauf hin, dass der Fließweg in etwa orthogonal zu den nach NW/NNW-einfallenden Hauptschichtflächen verlief.

Georadarcharakteristik

Dieses Element ist in der Regel in der oberen Hälfte (0–2,5 m unter der Oberfläche) auf den Georadarbildern erkennbar. Es ist charakterisiert durch leicht einfallende ($1-4^\circ$), kontinuierliche (10–45 m) Reflektoren von niedriger bis moderater Amplitude, die auf einen leicht wellenförmigen Basisreflektor ähnlicher Amplitude in einem flachen Winkel auftreten (Abb.5). Dieses Reflektormuster wiederholt sich lateral, ist aber häufig von ähnlichen Reflektorstrukturen abgeschnitten. Die Mächtigkeit variiert zwischen 1–1,5 m (20–30 nsec) und erstreckt sich lateral typischerweise in der Größenordnung von 50–100m.

Interpretation

Obige Merkmale integriert mit Luftbilddauswertungen, die auf einen mäandrierenden Flußverlauf hinweisen, deuten darauf hin, dass dieses Element durch laterale Akkretion entlang von ‚point bars‘ (und weniger wahrscheinlich entlang von Kiesbarren in einem verflochtenen Flusssystem) entstanden ist. Die flach einfallende Schichtung und Lithofazieszusammensetzung legen nahe, dass der

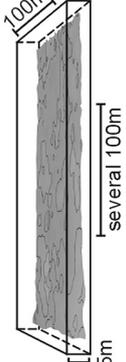
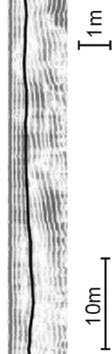
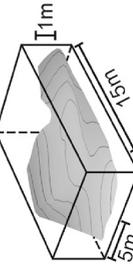
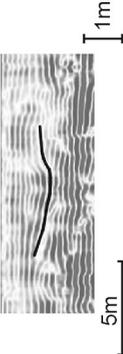
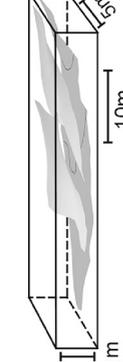
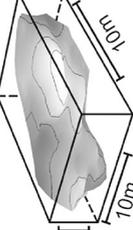
Sedimentological GPR interpretation ↑ hydrogeological implication	3D GPR elements	2D GPR pattern
<p>Floodplain element Massive F-m with local fGcm channel fills → Highly extensive (100 s m-km), sheets of very low permeability</p>		
<p>Chute channel Massive or steeply inclined, often deformed fGcm-fGmm layers → Elongated channels of low permeability</p>		
<p>Gravel dune Steeply inclined Gcg, a cross-beds (dominated by Gcg, o) → Small-scale (dm) alteration of moderately and highly permeable sheets</p>		
<p>Lateral accretion element Low-inclined sheets of Gcm, (i), Gcg, o, S-x; basal gravel lag (cGcm) common → Extensive (m-10 's m) highly permeable sheets embedded in moderately permeable sheets</p>		
<p>Confluence scour fill Trough-shaped cross-beds of Gcg, a and Gcm (rich in fine matrix) → Small-scale (dm-m) variation of low and high permeability trough-shaped units</p>		

Abb. 4. Georadarmuster und Geometrien der dominierenden Ablagerungselemente, die in den kiesigen, mäandrierenden Flussablagerungen des Neckartals identifiziert wurden. ‚Confluence scour fills‘ (Kolkablagerungen an Kanalmündungen) kommen in der unteren Einheit des Kieskörpers vor und deuten auf Ablagerungen in einem verflochtenen Flusssystem hin. Die Integration von sedimentologischen and Georadardaten erlaubt die Lithofazieszusammensetzung der verschiedenen Ablagerungselemente zu erfassen, was eine bessere Voraussage der hydraulischen Eigenschaften einzelner Elemente ermöglicht.

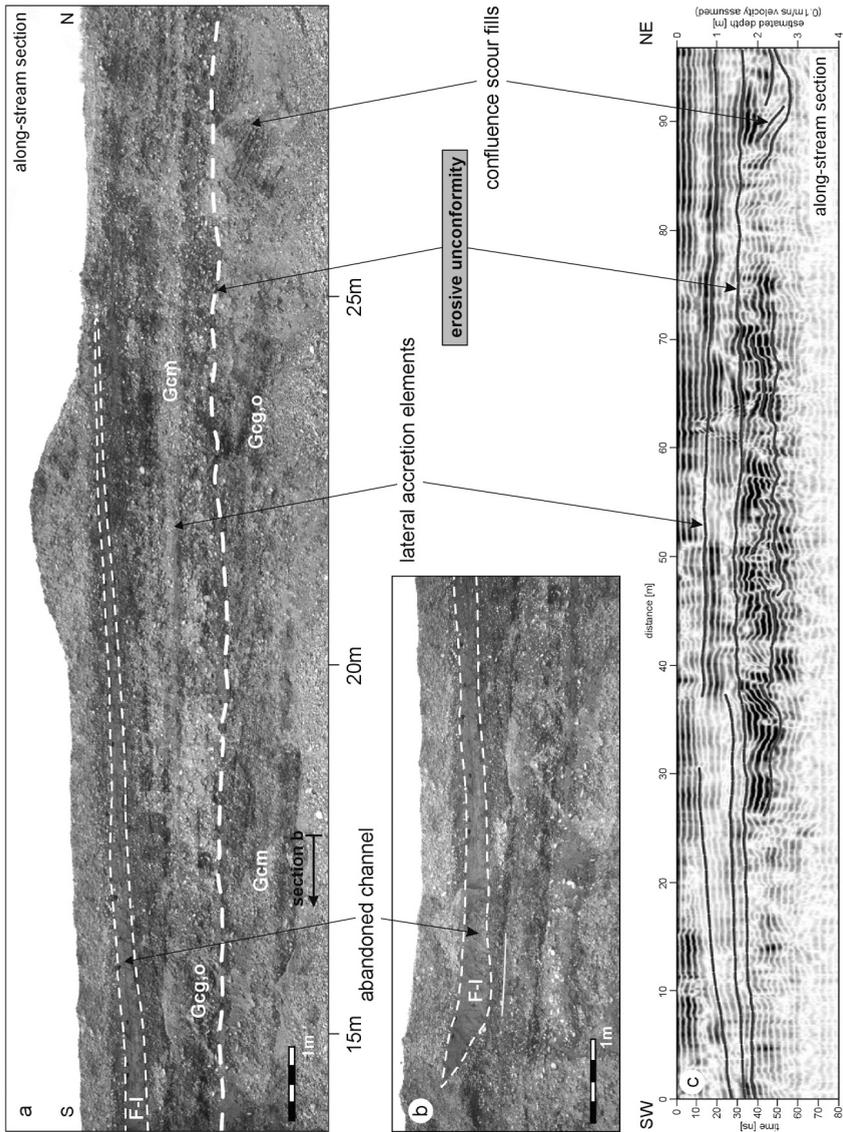


Abb. 5. Aufschlussfotos und Georadarstrukturen des Neckartalkieskörpers im Untersuchungsgebiet. Deutlich erkennbar ist die unterschiedliche sedimentäre Architektur unter und oberhalb der im Untersuchungsgebiet durchgehenden Erosionsfläche. Laterale Akkretionselemente sind das dominierende Element in der oberen Einheit und deuten auf mäandrierende Flussablagerungen hin.

Kies wahrscheinlich als schichtförmige Bodenfracht transportiert wurde (HEIN & WALKER 1997; GUSTAVSON 1978; FORBES 1983). Eingeschaltete dünne Sandschichten deuten auf Ablagerungen im Zuge abnehmender Strömungsenergie hin (BLUCK 1971; ARCHE 1983), während die grobkörnige Basislage vermutlich als sogenannter ‚channel lag‘ an der Basis des Flusskanals abgelagert wurde. Alternierende Lagen aus Rollkies und massivem Kies verursachen wahrscheinlich die schräg einfallenden internen Reflektionen, die im Georadarbild deutlich zu erkennen sind. Die relativ gute Sortierung und der sehr geringe Anteil an Tonmaterial in den massiven Kieslagen sind vermutlich dafür verantwortlich, dass Korngrößenunterschiede und als Folge davon der residuale Wasseranteil zwischen beiden Kiestypen relativ gering ist, was die generell niedrige Amplitude der Reflektoren erklären könnte. Letzteres könnte aber auch zur Ursache haben, dass manche Rollkieslagen aufgrund ihrer geringen Mächtigkeit ($< 0,1$ m) unter die Auflösungsgrenze des Georadars fallen und somit starke lithologische Kontraste unterdrückt werden. Der wellenförmige Basisreflektor im Georadarbild ist konsistent mit Aufschlussuntersuchungen und wird als Erosionsfläche resultierend aus der lateralen Migration des Flusskanals interpretiert.

SEDIMENTÄRE ARCHITEKTUR

Die vertikale und laterale Anordnung der verschiedenen Ablagerungselemente im Aufschluss als auch im Untergrund deuten darauf hin, dass der Neckartalkieskörper zwei verschiedene sedimentäre Architekturstile aufweist. Die untere Einheit, die in erster Linie durch basale Kanalablagerungen und sogenannte ‚confluence scour fills‘ (Kolkablagerungen im Zusammenfluss zweier Kanalmündungen) gekennzeichnet ist, wurde vermutlich durch ein verflochtenes Flusssystem abgelagert. Diese untere Einheit ist durch eine markante Erosionsfläche von der darüberliegenden Einheit getrennt, was vermuten lässt, dass ein Teil der verflochtenen Flussablagerungen erodiert und umgelagert wurde.

Die obere Einheit des Neckartalkieskörpers weist unter anderem einen hohen Anteil an feinkörnigen (tonreichen) Ablagerungen (z. B. Altarmablagerungen) als auch kontinuierlich einfallende laterale Akkretionsflächen auf. Die Integration mit Luftbildauswertungen, die deutliche Mäanderschleifen zeigen (Abb.6) und auf Georadarbildern direkt mit flach einfallenden Kiesschichten assoziiert sind (‚point bar‘ Ablagerungen), spricht für einen mäandrierenden Ursprung der oberen Neckartalkiesablagerungen.

Solch ein Wechsel im Flussstil von verflochten zu mäandrierend wurde für viele Flachlandflüsse in Europa zu Beginn des Holozäns dokumentiert (z. B. RUEGG 1994; HUISINK 2000; MOL et al., 2000; VAN HUISSTEDEN & KASSE 2001; ANTOINE et al. 2003). Ein ähnlicher Zeitpunkt wurde für die Neckarablagerungen im Untersuchungsgebiet durch Kohlenstoff-14-Datierungen an Holzfragmenten bestätigt. Die untere Einheit des Neckartalkieskörpers direkt unterhalb der Erosionsfläche weist ein Kohlenstoffalter von 9536 ± 130 und 8989 ± 68 Jahren auf, während für die obere Einheit ein Kohlenstoffalter von 828 ± 30 und 388 ± 28

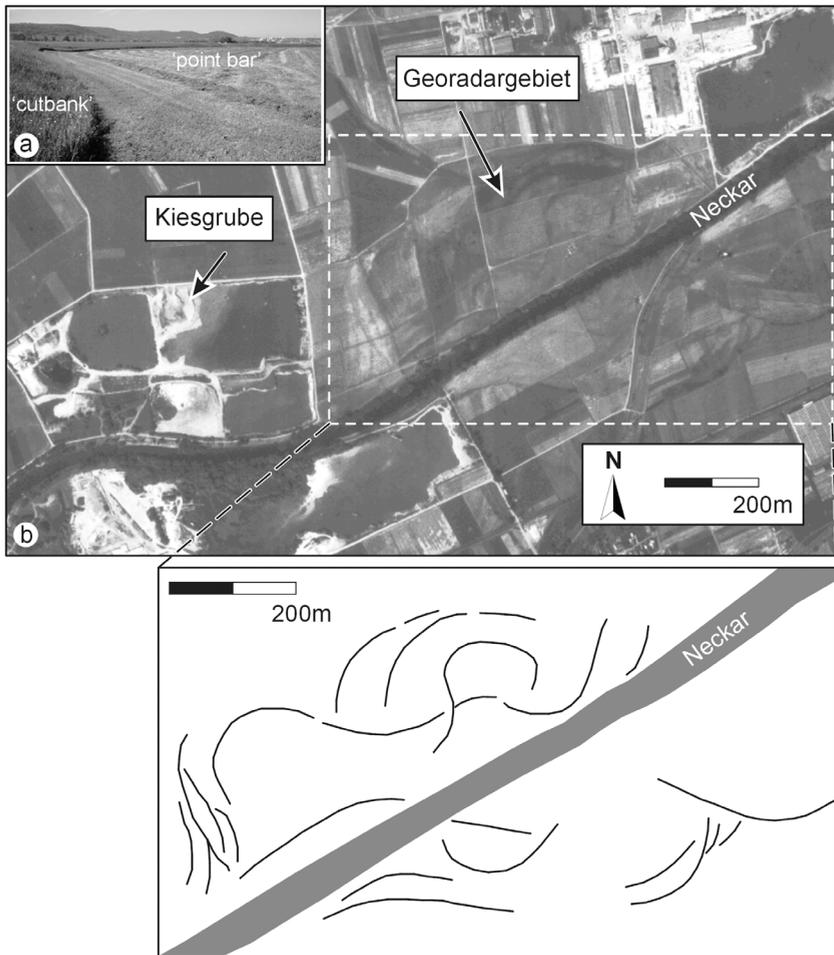


Abb. 6. (A) Aufschlussfoto der heutigen Oberflächenmorphologie und (B) Luftbildauswertungen im Bereich des Untersuchungsgebietes, die deutlich ausgeprägte Mäanderschleifen zeigen.

Jahren bestimmt wurde. Der Wechsel des Flussstils ist somit wahrscheinlich durch klimatisch-induzierte Veränderungen im Wasser-zu-Sediment-Abflussverhältnis hervorgerufen worden (HUISINK 2000; MOL et al. 2000; VAN HUISTEDEN & KASSE 2001; ANTOINE et al. 2003). Generell verursacht eine Abnahme der durchfließenden Wassermenge bei konstanter Talneigung eine Reduktion im Ausmaß der Flussverflechtung ('braiding'; LANE 1957; LEOPOLD & WOLMAN 1957; SCHUMM & KHAN 1972). In diesem Zusammenhang spielt die Vegetationsdichte eine wichtige Rolle, da sie die Stabilität der Flussläufe gegenüber Erosion als auch

die Rate der Sedimentzufuhr beeinflusst. Eine reduzierte Vegetationsbedeckung zusammen mit Solifluktuationsprozessen könnten für einen vermehrten Eintrag von suspendiertem Material während kälterer Perioden verantwortlich sein (z. B. untere Einheit des Neckartalkieskörpers).

SCHLUSSFOLGERUNGEN

1. Die sedimentäre Architektur des quartären Neckartalkieskörpers wurde durch die Integration von Aufschlussedimentologie, Georadarstudien und Luftbildauswertungen untersucht. Hierbei wurden sechs verschiedene Ablagerungselemente und deren Lithofaziesaufbau identifiziert, die zwei unterschiedliche Architekturstile des untersuchten Neckartalkieskörpers offenlegen. Die untere Einheit wurde vermutlich von einem verflochtenen („braided“) Flusssystem abgelagert, während die obere Einheit durch ein grobkörniges, mäandrierendes Flusssystem geformt wurde.
2. Der Wechsel im Flussstil wurde wahrscheinlich durch klimatische Veränderungen zu Beginn des Holozäns verursacht, wie Kohlenstoff-14-Datierungen und Vergleiche mit anderen europäischen Flusssystemen nahelegen.
3. Grobkörnige, mäandrierende Flussablagerungen wurden bisher nur selten untersucht, obwohl sie Teile von vielen quartären Talfüllungen formen und häufig wichtige Grundwasserspeicher darstellen. Grundwasserfluss in solchen Systemen wird vor allem durch schichtförmige, flach einfallende, hochdurchlässige Lagen beeinflusst, die den Einfallsrichtungen von „point bar“ Ablagerungen folgen.
4. Um jedoch regionale Grundwasserfließpfade vorherzusagen, sind kilometermaßstäbliche, dreidimensionale Georadaranalysen nötig, die die gesamte Talregion abdecken.

LITERATUR

- ANTOINE, P., MUNAUT, A.-V., LIMONDIN-LOZOUET, N., PONEL, P., DUPERON, J. und DUPERON, M. (2003): Response of the Selle River to climatic modifications during the Lateglacial and Early Holocene (Somme Basin-Northern France). *Quat. Sci. Rev.*, 22, 2061–2076.
- ARCHE, A. (1983): Coarse-grained meander lobe deposits in the Jarama River, Madrid, Spain. In: *Modern and ancient fluvial systems* (Eds J.D. Collinson and J. Lewin), *Spec. Publ. int. Ass. Sediment.*, 6, 313–321.
- ASPIRON, U. und AIGNER, T. (1997): Aquifer architecture analysis using ground penetrating radar: Triassic and Quaternary examples (S-Germany). *Environ. Geol.*, 28, 1–10.
- ASPIRON, U. und AIGNER, T. (1999): Towards realistic aquifer models: three-dimensional georadar surveys of Quaternary gravel deltas (Singen Basin, SW-Germany). *Sed. Geol.*, 129, 281–297.
- BLUCK, B. J. (1971): Sedimentation in the meandering River Endrick. *Scot. J. Geol.*, 7, 93–138.
- FORBES, D. L. (1983): Morphology and sedimentology of a sinuous gravel-bed channel system: lower Babbage River, Yukon coastal plain, Canada. In: *Modern and ancient*

- fluvial systems (Eds J. D. Collinson and J. Lewin), *Spec. Publs int. Ass. Sediment.*, 6, 195–206.
- GUSTAVSON, T.C.** (1978): Bed forms and stratification types of modern gravel meander lobes, Nueces River, Texas. *Sedimentology*, 25, 401–426.
- HEIN, F. J.** und **WALKER, R. G.** (1977): Bar evolution and development of stratification in the gravelly, braided, Kicking Horse River, British Columbia. *Can. J. Earth Sci.*, 44, 562–570.
- HUGGENBERGER, P.** (1993): Radar facies: recognition of facies patterns and heterogeneities within Pleistocene Rhine gravels, NE Switzerland. In: *Braided rivers* (Eds J. L. Best and C. S. Bristow), *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, 75, 163–176.
- HUGGENBERGER, P.** und **AIGNER, T.** (1999): Introduction to the special issue an Aquifer-sedimentology: problems, perspectives and modern approaches. *Sed. Geol.*, 129, 179–186.
- HUISINK, M.** (2000): Changing river styles in response to Weichselian climate changes in the Vecht valley, eastern Netherlands. *Sediment. Geol.*, 133, 115–134.
- KLEINERT, K.** (1976): Das Grundwasser im Kiesaquifer des oberen Neckartales zwischen Tübingen und Rottenburg. Unpubl. PhD Thesis, University of Tübingen, Tübingen, 220 pp.
- KOSTIC, B.** und **AIGNER, T.** (2007): Sedimentary architecture and 3D ground-penetrating radar analysis of gravelly meandering river deposits (Neckar Valley, SW Germany). *Sedimentology* (2007): Vol. 54, 789–808
- LANE, E. W.** (1957): A study of the shape of channels formed by natural streams flowing in erodable material. M.R.D. Sediment Series 9, US Army Corps of Engineers, Missouri River Division, Omaha, Nebraska.
- LEOPOLD, L. B.** und **WOLMAN, M. G.** (1957): River channel patterns; braided, meandering, and straight. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 282-B, 39–85.
- MOL, J., VANDENBERGHE, J.** und **KASSE, C.** (2000): River response to variations of periglacial climate in mid-latitude Europe. *Geomorphology*, 33, 131–148.
- RUEGG, G. H. J.** (1994): Alluvial architecture of the Quaternary Rhine-Meuse river system in the Netherlands. *Geo. Mijnbouw*, 72, 321–330.
- SCHUMM, S. A.** und **KHAN, H. R.** (1972): Experimental study of channel patterns. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 83, 1755–1770.
- VAN HUISSTEDEN, J.** und **KASSE, C.** (2001): Detection of rapid climate change in Last Glacial fluvial successions in The Netherlands. *Global Planet. Change*, 28, 319–339.

Anschrift der Verfasser:
Institut für Geowissenschaften
Universität Tübingen
Sigwartstr. 10
D-72076 Tübingen