

Frühdiagenetische Karbonatzementation in glazigenen und fluviatilen Sedimenten des Wesertales NW Hameln

VON
Jörg ELBRACHT

Kurzfassung: Im Wesertal NW Hameln kommt in spätelster- bis drenthezeitlichen Sedimenten frühdiagenetische, mehrphasig entstandene Karbonatzementation vor. Die Zementation fand überwiegend im vadosen Milieu oberhalb der Grundwasseroberfläche statt. Dabei entstand hauptsächlich brauner Kalzitcement mit Kristallgrößen von < 5 bis $20 \mu\text{m}$. Neben Meniskuszement kommen noch weitere für den vadosen Bereich typische Zemente vor. In einem Abschnitt des spätelsterzeitlichen Mittelterrassen-Körpers tritt ein kalkzementierter Horizont auf, der wahrscheinlich in der Holstein-Warmzeit entstanden ist. Die Zementbildung setzte im höchsten Teil der Mittelterrassen-Sedimente bereits in der Spätphase der Mittelterrassen-Akkumulation ein. Die dabei entstandene Zementation wurde durch den nachfolgenden drenthezeitlichen Gletscher deformiert. Nach Abschmelzen des Eises fand weitere Zementation in mindestens drei Phasen statt, wobei nicht luminiszierender phreatischer, orange bis rot luminiszierender vadoser und nicht luminiszierender vadoser Kalzitcement entstand.

Abstract: In the Weser valley NW Hameln early diagenetic carbonate cementation is present in the upper Elsterian to Drenthe sediments. Examination of the calcite cement indicated a multiphase formation. Cementation occurred mainly in vadose environment above ground-water table. This process generated predominantly brown calcite cement with a crystal size of < 5 to $20 \mu\text{m}$. Next to meniscus-cement this fine-crystalline calcite forms further cements typical for vadose zone. In one layer of the „Mittelterrasse“-sediments, deposited in the late Elsterian age, a calcite cement is present, which may already have formed in the Holstein Interglacial. Cementation started in the upper-most layers of the „Mittelterrasse“-sediments in a late phase of „Mittelterrasse“-accumulation in this area. The so formed consolidated layers were deformed by the Drentheglacier. After ice melting cementation continued in at least 3 phases, creating nonluminiscent phreatic, orange to red luminiscent vadose and nonluminiscent vadose calcite cement.

1. EINLEITUNG

Mit dem vorliegenden Beitrag werden Teilergebnisse einer von Dr. J.-P. GROETZNER initiierten Dissertation über „Karbonatzementation pleistozäner Lockersedimente in NW-Deutschland“ vorgelegt. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein weites Spektrum frühdiagenetischer Karbonatzementationen untersucht, das von Kalkkonkretionen i.e.S. bis hin zu „Nagelfluh“-Bildungen reicht.

Ziel der Arbeit ist es, die Bildungsbedingungen der Zementationen zur rekonstruieren und den Zementationszeitraum einzuengen. Die in Rede stehenden Sedimente haben i.d.R. seit ihrer Ablagerung keine nennenswerte Versenkungstiefe erreicht. Deshalb spielen für die Diagenese vor allem solche Prozesse eine Rolle, die durch Oberflächeneinflüsse (z.B. Niederschlag, Temperatur) direkt oder indirekt gesteuert sind. Vor diesem Hintergrund lassen sich durch die Untersuchungsergebnis

läumweltbedingungen in NW-Deutschland während des Pleistozäns ableiten.

Die Untersuchung von Karbonatzementen ist ein wichtiges Hilfsmittel zur Rekonstruktion von Diageneseprozessen. Einen zusammenfassenden Überblick zu Karbonatzementen, zu einigen Untersuchungsmethoden und den aus der Zementbeschaffenheit abgeleiteten Genesevorstellungen geben KOCH & ZINKERNAGEL (1996).

2. METHODIK

Die Bestimmung des **Gesamtkarbonatgehaltes** von Sedimenten und Zementationen wurde im Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung (NLfB) mit dem Verfahren nach KLOSA (1994) durchgeführt, bei dem der Gasdruck, der bei einer Säure-Karbonat-Reaktion entsteht, durch Drucksensoren gemessen und mit Hilfe von Analog/Digitalwandlern von einem Meßwertrechner aufgezeichnet wird.

Die quantitative chemische Analyse an Zementkristallen wurde mit einer **Elektronenstrahl-Mikrosonde** am Mineralogischen Institut der Universität Hannover durchgeführt. Dabei wurden an polierten und mit Kohlenstoff bedampften Dünnschliffen die Elementgehalte von Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} und Sr^{2+} analysiert. Zusätzlich wurden Si-Konzentrationen gemessen, um Tonmineral-Kontaminationen bzw. die randliche Erfassung von siliziklastischem Detritus nachweisen zu können, die, trotz des kleinen Meßbereiches von wenigen μm , bisweilen bei den Messungen miterfaßt wurden. Die Meßdauer betrug bei Ca^{2+} und Si^{4+} 10 Sekunden, bei Mg^{2+} , Fe^{2+} und Mn^{2+} 20 Sekunden und bei Sr^{2+} 30 Sekunden. Die Messung erfolgte an einer Cameca Camebax-Microbeam-Mikrosonde mit einem Strahlstrom von 18-20 nA, einer Beschleunigungsspannung von 15 keV und einer Elementnachweisgrenze von ca. 300 ppm. Als Analyse Kristalle kamen je ein Lithiumfluorit- (Fe^{2+}) und ein Pentaerythrit (Ca^{2+} , Mn^{2+}) sowie zwei Taliumhydrogensthalat-Kristalle (Sr^{2+} , Si^{4+} bzw. Mg^{2+}) zum Einsatz. Die Eichung der Messungen wurde mit Hilfe natürlicher Standards bekannter Zusammensetzung durchgeführt.

Fluoreszenzmikroskopische Untersuchungen wurden an einem Mikroskop der Fa. Leitz mit Blaulichtanregung durchgeführt. Ausführlichere Informationen zur Methodik sind u.a. DRAVIS & YUREWICZ (1985) zu entnehmen.

Das **Kathodenlumineszenzverhalten (KL)** der Zemente wurde in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe Hannover (BGR) mit einer „heißen“ Kathodenanlage untersucht. Es kam eine Glühkathode mit einer Anregungsspannung von 20 keV und einer Strahlstromdichte von $0,3\text{mA}/(\text{mm}^2)$ zur Anwendung. Dabei wurden polierte und mit Kohlenstoff bedampfte Dünnschliffe analysiert. Nähere Angaben zur Methodik wurden u.a. von KOCH & ZINKERNAGEL (1996) dargestellt.

Die Bestimmung des **Durchlässigkeitsbeiwertes** (k_f -Wert), der im Zusammenhang mit hydrogeologischen Fragestellungen als Größe für die hydraulische Grundwasser-Leitfähigkeit verwendet wird (u.a. HÖLTING 1992), erfolgt hier durch die Berechnung aus der **Korngrößenverteilung**. Diese wurde in Anlehnung an die Vorgaben der DIN 18123 (1996) durchgeführt. Als Verfahren zur Berechnung des gesteinspezifischen k_f -Wertes wird die Sieblinienauswertung nach BEYER (1964) verwendet, die für vergleichbare Sedimente entwickelt und nach einem Vergleich verschiedener Verfahren von PEKDEGER & SCHULZ (1975) empfohlen wurde. Hinsichtlich weiterer Angaben u.a. zu Berechnungsgrundlagen, Grenzen und Randbedingungen dieses Verfahrens wird auf LANGGUTH & VOIGT (1980) verwiesen.

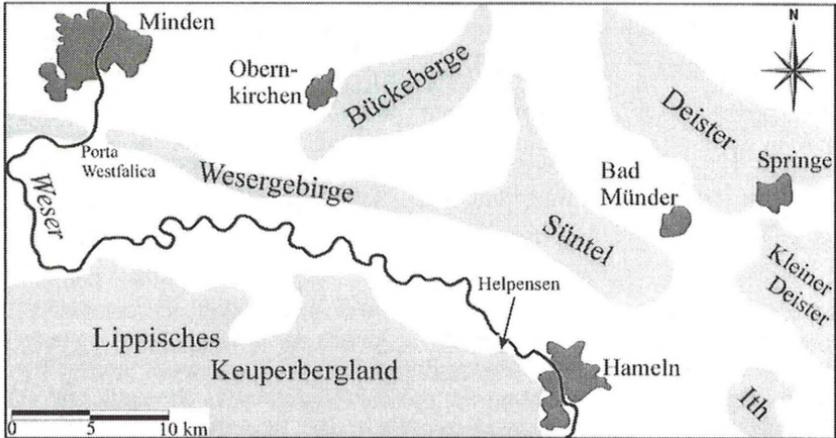


Abb. 1: Übersichtskarte des Wesertales zwischen Hameln und Minden. Die Sand-/Kiesgrube „Müller“ befindet sich ca. 3 km NW Hameln bei Helpensen.

3. GEOGRAPHISCH-GEOLOGISCHER ÜBERBLICK

Die bei Helpensen gelegene Sand-/Kiesgrube „Müller“ befindet sich ca. 3 km NW Hameln am Rand des Wesertales zwischen dem Lippischen Keuperbergland im S und dem von jurazeitlichen Gesteinen aufgebautem Wesergebirge bzw. Süntel im NW bzw. NE (Abb. 1). Da die Grube im nördlichen Teil bereits weitgehend mit Bauschutt verfüllt ist, konzentriert sich der Abbau auf den südlichen Grubenbereich (Grubenzentrum: r3520485, h5776150).

Durch das Tal am Südrand von Wesergebirge und Süntel zwischen Hameln und der Porta Westfalica entwässert die Weser erst ab der Elster-Kaltzeit, als der nach S vordringende elsterzeitliche Gletscher den bis dahin benutzten Weg abriegelte, der etwa von Hameln nach Springe über die Deisterpforte zwischen Deister und Kleinem Deister Richtung Hannover verlief (ROHDE 1994).

Die ältesten Ablagerungen des Quartärs sind hier Erosionsrelikte präelster- und möglicherweise elsterzeitlicher Ablagerungen. Es handelt sich einerseits um präglaziale Terrassenreste, die frei von nordischem Material sind (NAUMANN 1927) und um verschiedene Grundmoränen-Relikte, für die eine elsterzeitliche Entstehung angenommen wird (GRUPE et al. 1933, WELLMANN 1990).

Die **Mittelterrassen-Ablagerungen (qM//f)** der Weser wurden spätelsterzeitlich bis fröhndrenthezeitlich („Mittelterrassen-Zeit“ nach ROHDE 1994) vor dem Drenthe-Eisvorstoß abgelagert (RÖHM 1985). Sie bestehen überwiegend aus einheimisch mesozoischem Material, wobei neben Buntsandsteingeröllen Kalkstein des Muschelkalk und des Malms sowie Silt- und Sandstein des mittleren und oberen Keupers dominieren (KULLE 1985). Dazu kommen paläozoische Komponenten, namentlich hauptsächlich Kiesel-schiefer und Thüringer-Wald-Porphyr (KULLE 1985). Untergeordnet treten auch Gerölle nordischer Herkunft auf, was SIEGERT (1912) auf die Aufarbeitung einer älteren Grundmoräne zurückführt. Der Mittelterrassen-Körper ist nach KULLE (1985) im Untersuchungsgebiet ca. 8-9m mächtig. Schon NAUMANN (1927) stellte fest, daß diese Schichten durch Kalk z.T. „...konglomeratisch verkittet sind...“.

Mit der Blockade der Porta Westfalica durch den vordringenden Drenthe-Gletscher (SERAPHIM 1972) wurde das Entwässerungssystem dieses Talabschnittes erneut tiefgreifend gestört. Der Abfluß der Weser aus dem Niedersächsischen Bergland in die Norddeutsche Tiefebene war unterbunden oder zumindest sehr stark eingeschränkt, was zum Aufstau des Wassers und zur Bildung von Staubeckenablagerungen führte (SPETHMANN 1908). Diese sind in der Sand-/Kiesgrube „Müller“ nach KULLE (1985) insgesamt bis über 6m mächtig und bestehen aus einer Abfolge von „**Beckensand**“ und „**schluff**“ (qD//„b“) im unteren und **Warvit (qD//gl)** im oberen Teil.

Der in diesen Talabschnitt vorgedrungene Drenthegletscher hinterließ **Geschiebemergel (qD//Mg)**. KULLE (1985) konnte in der Sand-/Kiesgrube „Müller“ auf Grund schlechter Aufschlußverhältnisse nur eine Mächtigkeit von 2,5m belegen, nahm aber an, daß die Gesamtmächtigkeit 8m übersteigt. SERAPHIM (1972) stellte fest, daß die Grundmoräne im Bereich Helsen keine Portasandstein-Geschiebe mehr enthält. U. a. auf Grund dieses geschiebekundlichen Befundes schloß er, daß es sich hier nicht um Ablagerungen des Gletschers handeln kann, der durch die Porta Westfalica in das Betrachtungsgebiet eingedrungen ist, sondern es sich vielmehr um einen Eisstrom handeln muß, der „...knapp westlich am Süntel vorbei...“ in das Wesertal gelangt ist (SERAPHIM 1972). In der Weichsel-Kaltzeit hat das Inlandeis das Untersuchungsgebiet nicht mehr erreicht (u.a. KALTWANG 1992).

4. SCHICHTENFOLGE

Zunächst werden die in der Sand-/Kiesgrube „Müller“ anstehenden Sedimente beschrieben bevor in Kap. 5 die Karbonatzementationen dargestellt werden. Die stratigraphische Zuordnung der beschriebenen Sedimente orientiert sich an KULLE (1985).

Vom **Mittelterrassen-Körper** sind derzeit lediglich die oberen etwa 5m abgeschlossen. Die Sedimente bestehen vor allem aus z.T. kieshaltigem Mittel- bis Grobsand. Gelegentlich kommen Feinsand oder Steine als NebenkompONENTEN vor. Vor allem im höheren Teil sind oft sandführende Kies-schichten und -linsen eingeschaltet. Gelegentlich kommen, verstärkt im tieferen Teil, Feinsand- und Schlufflagen bzw. -linsen hinzu. Die Schichten sind insgesamt kalkig.

In einem stark verstrützten Bereich an der Westwand des südlichen Grubenteils (r3520420 h5776145) war temporär ca. 2,0 - 2,5m unterhalb der Basis der „Beckenablagerungen“ sensu KULLE (1985) ein **Kryoturbationshorizont** aufgeschlossen. In die Mittelterrassen-Sedimente sind dort bei ca. 72m ü. NN bogige und zungenförmige Fetzen eines schluffigen, hell-gelben Feinsandes eingearbeitet. Die Textur entspricht der des „Gemeinen Würgebodens“ nach EISSMANN (1981). Auf Grund der schlechten Aufschlußverhältnisse können keine Aussagen zur lateralen Entwicklung dieses etwa 1m mächtigen Abschnittes gemacht werden.

Die über dem Mittelterrassen-Körper lagernde, insgesamt ca. 4m mächtige Abfolge wird nach KULLE (1985) als „**Beckensand**“ und „**-schluff**“ bezeichnet. Sie setzt mit einer rotbraunen, im cm-Bereich feingeschichteten Lage aus schluffigem, mittelsandführendem Feinsand ein, die mit ca. 15-20 cm im SE der Grube ihre größte Mächtigkeit erreicht und nach NW auskeilt. Oberhalb dieses Horizontes bzw. im NW unmittelbar über Mittelterrassen-Ablagerungen folgt ein mm-geschichteter Warvit. Es handelt sich um eine insgesamt nur ca. 5cm mächtige, kalkige Wechselfolge aus dunklem, schluffigem Ton und braunem, tonhaltigem Schluff. Darüber kommen kräftig rotbraune sandige Schluffschichten, in die hell- bis rotbrauner, schluffiger bzw. z.T. stark mittelsandiger Feinsand linsig oder rinnenartig eingeschaltet ist.

Im Hangenden folgen **Warvit** und darüber drenthezeitliche **Grundmoräne**. Der obere Teil der Grundmoräne und darüberfolgende von KULLE (1985) beschriebene Lößderivate waren zum Untersuchungszeitpunkt im Rahmen der Vorbereitung zur Grubenerweiterung abgeschoben. Die Entkalkung der oberen Bereiche des Geschiebemergels, die hier 0,2 - 1,5m tief reichen kann (KULLE 1985), war wegen der Aufschlußsituation nicht mehr zu beobachten.

5. BESCHREIBUNG DER KARBONATZEMENTATION

In der Sand-/Kiesgrube „Müller“ treten vier Zementationsbereiche auf (Abb. 2). Die Karbonatzementationen lassen sich makroskopisch zwei Gruppen zuordnen:

1. Das Wirtssediment ist stellenweise zu einem Konglomerat verfestigt (Abb. 2: I., II. unten, III.). Es handelt sich um meist unregelmäßig begrenzte Bereiche mit größter Ausdehnung parallel zur Schichtung und unscharfem Übergang in das umgebende, unverfestigte Wirtssediment. Dieser Verfestigungstyp wird im Folgenden als **Zementation** bezeichnet.
2. Elliptisch bis diskusförmig verfestigte Bereiche, die zu Gruppen zusammengewachsen sein können (Abb. 2: II. oben, IV.). Sie sind i.d.R. scharf gegen das umgebende Lockersediment abgegrenzt. Diese Form wird gemäß der Definition z.B. von FÜCHTBAUER & RICHTER (1988: 392) als **Konkretion** bezeichnet.

Die bei der Beschreibung der Karbonatzemente verwendete Terminologie orientiert sich weitgehend an der Arbeit von KOCH & ZINKERNAGEL (1996), auf die hinsichtlich der Benennung einzelner Zementtypen verwiesen wird. Die in Abb. 2 dargestellten vier Zementationsbereiche treten in Mittelterrassen- und „Staubecken“-Ablagerungen auf.

5.1. Karbonatzementation von Mittelterrassen-Ablagerungen

5.1.1. Zementationsbereich I.

Der Zementationsbereich I. befindet sich innerhalb des Mittelterrassen-Körpers, ca. 3m unterhalb der Grenze zum „Beckensand /-schluff“ (Abb. 2: I.). Die schichtungsparelle Zementation besteht aus einem unteren und einem oberen Teil, die sich sowohl hinsichtlich des Zementationsgrades als auch der Zemente unterscheiden.

Der untere Teil des Zementationsbereiches I. tritt in einer mittelsandigen Feinsandschicht als schichtkonforme, ca. 2-4cm mächtige verfestigte Lage auf (Abb. 2: I. unten), in der der Porenraum nahezu vollständig mit Zement gefüllt ist. Der Feinsand, der in die ansonsten eher gröberkörnigen Mittelterrassen-Sedimente eingeschaltet ist, setzt sich vor allem aus Quarz, anderem siliziklastischen sowie karbonatischen Detritus zusammen. Zur lateralen Erstreckung dieses Horizontes ist auf Grund der mäßigen Aufschlußverhältnisse keine Aussage möglich.

Der granulare, feinkristalline Zement, mit Kristallgrößen zwischen meist < 5 µm bis max. 15µm, besteht aus hochreinem Kalzit mit MgCO₃-Gehalten zwischen 1,3 und 2,0 Mol % (Tab. 1: 1-3). Er hat eine braune Eigenfarbe. An vereinzelt vorkommenden Restporen zeigt sich bisweilen, daß die Zementation etwa gleichmäßige Säume um den Detritus bildet, also eher porenformerhaltend ist. Der Kalzitzement luminisiert nicht und auch fluoreszenz-

mikroskopisch treten keine Auffälligkeiten auf. Quarzkörner sind an den Rändern teilweise angelöst.

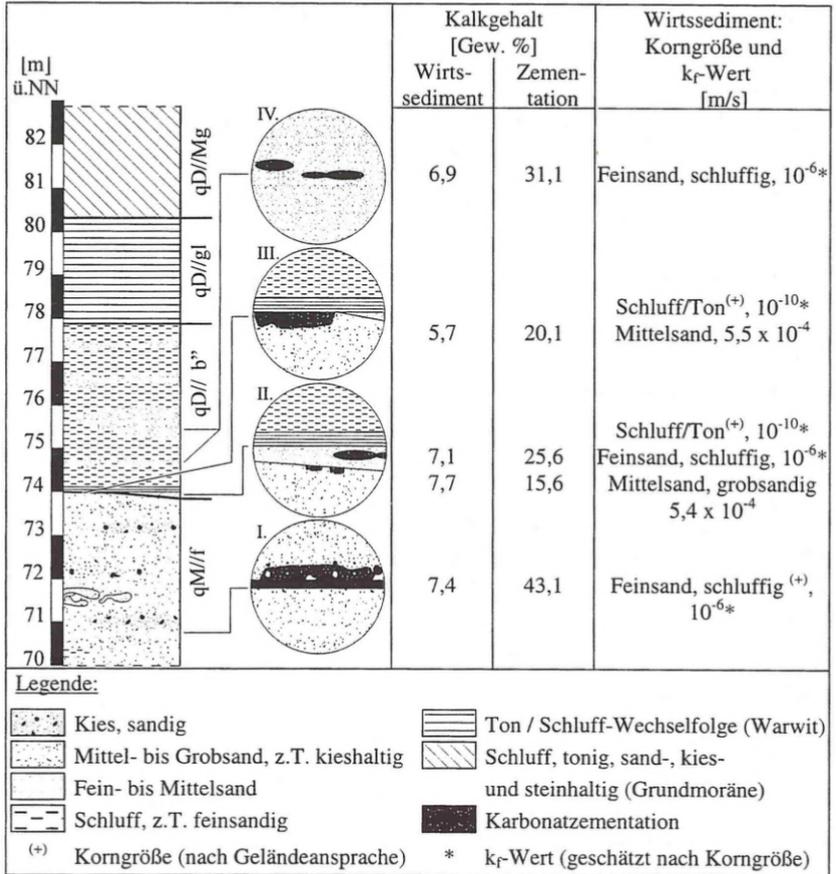


Abb. 2: Schematisches Säulenprofil der Sand-/Kiesgrube „Müller“ mit Detaildarstellung von Zementationsbereichen (I.-IV.), Kalkgehalts-, Korngrößenangaben und k_f -Werten. Der Durchmesser der Ausschnittsvergrößerungen von Horizonten, in denen Zementationsbereiche vorkommen, entspricht ca. 0,3m in der Natur.

Über dieser Lage folgt kieshaltiger Grobsand mit zementierten Bereichen. Diese bilden auf der Oberfläche der fest zementierten Schicht kuppige und beulige, einige cm durchmessende Verfestigungen und sind hinsichtlich der Verbreitung und des Zementationsgrades ausgesprochen unregelmäßig. Der Zement ist mit Kristallgrößen von meist $< 5\mu\text{m}$ bis max. $15\mu\text{m}$ ebenfalls feinkristallin. Auch hier handelt es sich um hochreinen Kalzit (Tab. 1: 4-5)

mit brauner Eigenfarbe. Vor allem die fluoreszenzmikroskopische Untersuchung hat ergeben, daß oft Meniskus- und gelegentlich Gravitationszement vorliegt. Während der Kalzitcement oberhalb von größeren, plattigen Geröllen die Poren z.T. fast vollständig ausfüllt, ist der Porenraum unmittelbar darunter kaum verfüllt bis nahezu zementfrei. Bereiche mit gleichem Zementationsgrad durchmessen oft nur einige 0,1mm bis mm und treten unregelmäßig fleckenhaft auf. Feinerkörnige Partien sind meist besser zementiert als gröbkörnige. Der Zement ist nicht luminszierend.

5.1.2. Zementationsbereiche II. und III.

Im höchsten Teil der Mittelterrassen-Ablagerungen treten unmittelbar unterhalb der hangenden „Beckenablagerungen“ weitere Zementationen in den Zementationsbereichen II. unten und III. auf. Die Abgrenzung der zementierten Bereiche gegenüber den unzementierten Sedimenten ist beuig ausgebildet und durch eine kontinuierliche Abnahme des Zementationsgrades nach unten und zu den Seiten i.d.R. unscharf. Die eher scharfe, obere Begrenzung wird zwar meist durch die Schichtgrenze zu den hangenden „Beckenablagerungen“ gebildet. Gelegentlich ist sie auch durch einige cm unverfestigten Wirtssedimentes von dieser getrennt.

In diesen Partien kommt hauptsächlich granularer, hellbrauner bis brauner, feinkristalliner Zement mit Kristallgrößen zwischen < 5 und ca. $20\mu\text{m}$ vor. In unregelmäßigen Zonen, die deutlich weniger als 1mm bis zu einigen mm durchmessen können, dominieren bestimmte Kristallgrößenbereiche ($< 5\mu\text{m}$, $5-10\mu\text{m}$, $8-15\mu\text{m}$, $10-20\mu\text{m}$). Vollständig ausgefüllte Poren sind zuweilen innerhalb der o.g. Kristallgrößenbereiche drusig zementiert. Es handelt sich um hochreinen Kalzit mit MgCO_3 - Gehalten von $0,2-1,8 \text{ Mol } \%$ (Tab. 1: 6-16, 24-29). Die Untersuchung des Luminszenzverhaltens hat gezeigt, daß es sich bei dem Zement einerseits um nichtluminszierende und andererseits um orange bis rot luminszierende Kristalle handelt. Letztere kommen in fleckenhaft-unregelmäßigen Arealen vor, die oft nur einige $0,1 \text{ mm}$ bis mm durchmessen. Sie bilden, falls sie vorhanden sind, i.d.R. als erste Zementgeneration Teilsäume auf Detritus, sind heterogen in Verteilung und Mächtigkeit und werden häufig von nicht luminszierendem Zement überwachsen.

Der Kalzitcement tritt häufig als Meniskus- und seltener als Gravitationszement auf. Er bildet oft unregelmäßige und ungleichmäßig große Flecken und Teilsäume vor allem auf siliziklastischem Detritus, feinerkörnige Bereiche sind meist besser zementiert als gröberkörnige. Der Zementationsgrad oberhalb plattiger Gerölle ist oft deutlich besser als darunter.

In senkrecht zur Schichtung orientierten Dünnschliffen waren gelegentlich plattige Gerölle angeschnitten, die in zementierten Bereichen aus feinkris-

tallinem, nicht luminiszierendem Zement auftreten und von der Zementation durch einen offenen Zwischenraum getrennt werden (Abb. 3a, b). Die Oberfläche der Körner wird durch die Kontur der Zementation nachgezeichnet, so daß Spalten weitgehend gleichmäßige Öffnungsweiten haben. Diese Zwischenräume, die oft **allseitig** bzw. z.T. nur **oberhalb** von Körnern vorkommen, haben Öffnungsweiten zwischen wenigen μm und max. 0,1mm. Ursache ihrer Entstehung ist wahrscheinlich das Herausdrücken der Körner aus der Zementation durch **seitlich** bzw. **seitlich von oben** ansetzenden Schub.

In vereinzelt Fällen wurden in zementierten Bereichen zerbrochene Gerölle beobachtet. Diese sind ebenfalls durch Zwischenräume von feinkristalliner Zementation getrennt, wobei der entstandene Spalt vor allem über Körnern auftritt. Die Öffnungsweite entspricht dem Versatzbetrag des jeweils zerbrochenen Kornes und die Kontur der Zementation läßt die Oberfläche des Gerölls vor dem Zerstörung errahnen (Abb. 3c). In einem Fall konnte das Zerbrechen eines Kornes auf den Schub eines seitlich benachbarten zurückgeführt werden. Auch dies deutet auf die Wirkung von **annähernd horizontalen** Schubspannungen hin.

Zuweilen tritt Saumzement aus säulen- („columnar“) oder blattförmigen („bladed“) Kristallen mit Kristallbreiten meist um $5\mu\text{m}$ und -längen bis $15\mu\text{m}$ auf. In Einzelfällen werden $10\text{-}20\mu\text{m}$ in der Breite und $30\text{-}100\mu\text{m}$ in der Länge erreicht. Sie sind euhedral, nahezu frei von Einschlüssen und nicht luminiszierend. Es handelt sich um hochreinen Kalzit, der sich geochemisch nicht signifikant von o.g. Zementen unterscheidet (Tab. 1: 17-23). Die Kristalle bilden vor allem um siliziklastischen Detritus allseitige Säume, wobei ihre Längsachsen normal bzw. subnormal zu dessen Oberfläche stehen. Die Säume sind meist lückenhaft, von schwankender Mächtigkeit und werden häufig von feinkristallinem, nicht luminiszierendem Zement überwachsen.

Dieser Zementtyp kommt auch in den oben beschriebenen Öffnungen zwischen plattigen Geröllen und feinkristalliner Zementation vor, wobei hier das Wachstum meist nicht von den Körnern sondern vom feinkristallinen Zement ausgegangen ist (Abb. 3b, 3c u. Taf. 1a, b). Desweiteren kommt um Echinodermenreste syntaxialer Karbonatzement vor. Während die Fossilreste oft KL-Zonierung zeigen, sind die Anwachssäume, wie der Großteil der übrigen Zemente, nicht luminiszierend.

Die Zementationen am Top des Mittelterrassen-Körpers hängen hinsichtlich ihrer Mächtigkeit und der lateralen Erstreckung von der Beschaffenheit der darüberlagernden Staubeckenablagerungen ab:

Im SE-Teil der Grube folgt über grobsandigem Mittelsand (qM//f) schluffiger, mittelsandführender nach NW auskeilender Feinsand (qD//„b“).

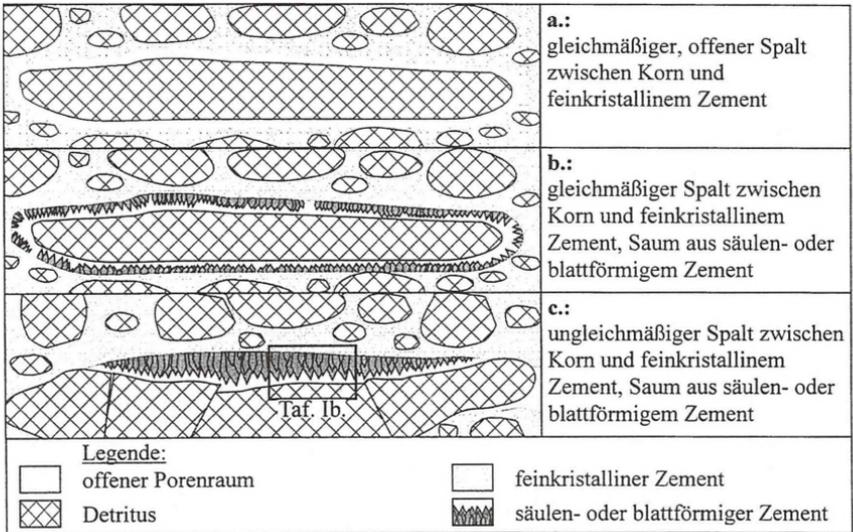


Abb. 3: Schematische Darstellung von Zementationsformen in den Zementationsbereichen II. Unten und III.: Öffnungen zwischen Körnern und feinkristalliner Zementation können offen (a.) bzw. durch säulen- oder blattförmigen Saumzement teilverfüllt sein (b., c.). Die Bildhöhe von a. entspricht ca. 0,1 mm, die von b. und c. ca. 0,2 mm. Der in c. gekennzeichnete Ausschnitt verweist auf die Taf. 1b.

Hier ist die karbonatische Zementation der Mittelterrassen-Ablagerungen nur einige mm - wenige cm mächtig, wobei sich zusammenhängend zementierte Bereiche lateral zwischen einigen cm und wenigen dm erstrecken. Nach Auskeilen des o.g. Feinsandes wird der Mittelterrassen-Körper von nur wenige cm mächtigem Warvit überlagert. Hier sind die zementierten Bereiche bis zu 15cm mächtig und erreichen eine laterale Erstreckung von einigen m.

5.2. Karbonatzementation von „Beckenablagerungen“

In den „Beckenablagerungen“ treten Konkretionen in schluffigem bis mittelsandigem Feinsand an der Basis (Zementationsbereich II. oben) und in eingeschalteten Zwischenschichten auf (Zementationsbereich IV.). Es handelt sich um diskusförmige bis elliptische Körper, die sowohl einzeln auftreten als auch durch das Zusammenwachsen mehrerer Individuen größere Komplexe bilden können. Die größte Ausdehnung erreichen Einzelkörper mit Werten bis ca. 10cm parallel zur Schichtung bei einer max. Höhe von etwa 3cm. Jedoch sind auch wesentlich kleinere Konkretionen mit Ausdehnungen von <1cm häufig. Die Messung von Längsachsen elliptischer Konkretionen ergab keine bevorzugte Orientierung. In den mäßig zementierten Konkretionen kommen verschiedene Zementtypen vor: Dominierend ist hell-

brauner bis brauner, feinkristalliner Zement, der aus granularen Kristallen besteht und häufig Meniskuszement bildet. Die Kristallgröße schwankt zwischen <5 und ca. $20\mu\text{m}$, wobei in unregelmäßigen, oft weniger als 1mm durchmessenden Zonen bestimmte Größenbereiche ($< 5\mu\text{m}$, $5\text{-}15\mu\text{m}$, $10\text{-}20\mu\text{m}$) vorherrschen. In feinerkörnigen Bereichen ist der Zementationsgrad meist höher als in gröberkörnigen. Der nicht luminiszierende Zement besteht aus hochreinem Kalzit mit MgCO_3 -Konzentrationen von weniger als $2,0\text{ Mol } \%$ (Tab. 1: 30-41).

Häufig kommen syntaxiale Anwachssäume vor. Dabei werden Echinodermereste, die oft KL-Zonierung zeigen, homoachsal von nicht luminiszierendem Zement überwachsen. Selten werden benachbarte siliziklastische Komponenten durch den Anwachssaum erreicht und teilweise umschlossen. Vereinzelt treten um plattige Gerölle unregelmäßige Säume aus säulen- („columnar“) oder blattförmigem („bladed“) Zement auf. Die Längsachse der Kristalle, die bevorzugt von siliziklastischem Detritus aus wachsen, steht normal bzw. subnormal zur Kornoberfläche. Einzelkristalle sind zwischen $5\text{ - }8\mu\text{m}$ breit und zwischen 10 und $20\mu\text{m}$ lang. Sie sind i.d.R. euhedral, nahezu frei von Einschlüssen und werden oft von feinkristallinem Zement überwachsen. Auch dieser Zementtyp luminisiert nicht.

6. INTERPRETATION DER UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

In der Sand-/Kiesgrube „Müller“ kommen Karbonatzementationen in vier Zementationsbereichen in Mittelterrassen-Ablagerungen und „Beckenablagerungen“ vor. Die Zemente bestehen durchweg aus hochreinem Kalzit mit MgCO_3 -Gehalten von meist deutlich unter $2\text{ Mol } \%$ (Tab. 1). Die Zusammensetzung ist nach HENDRY et al. (1996) typisch für eine Bildung unter meteorischen Bedingungen. Dieser Befund wird durch die geologische Entwicklung des Untersuchungsgebietes gestützt, wonach mariner Einfluß im betrachteten Zeitraum sicher ausgeschlossen werden kann.

Aufbau und Gestalt von Zementationen und Konkretionen -vor allem der zusammengewachsenen Formen- sprechen für die in-situ Bildung. Dies wird auch durch den mäßigen Zementationsgrad der meisten Verfestigungen gestützt, der fluviatilen Transport nicht erlaubt. Eine Deutung als Vorkommen auf sekundärer Lagerstätte kann danach ausgeschlossen werden.

Sowohl in den Zementationen der Mittelterrassen-Sedimente als auch in den Konkretionen innerhalb der Staubecken-Ablagerungen dominiert feinkristalliner, granularer, hellbrauner bis brauner Zement. Er bildet häufig Meniskuszement, Zementanreicherungen oberhalb von plattigen Geröllen sowie seltener Gravitationszement. Meniskuszement deutet DUNHAM (1971) als typische Bildung des vadosen Mileus, in dem der Porenraum sowohl mit Sickerwasser als auch mit Bodenluft gefüllt sein kann.

Nr.	Zementationsbereich und Wirtsediment	Zement	Mol%	Mol%	Mol%	Mol%	Mol%
			CaCO ₃	MgCO ₃	MnCO ₃	FeCO ₃	SrCO ₃
1	I. unten, qD//f	feinkristalliner Zement	98,25	1,69	n.n.	0,03	n.n.
2	I. unten, qD//f	feinkristalliner Zement	98,57	1,26	n.n.	0,14	0,03
3	I. unten, qD//f	feinkristalliner Zement	97,94	2,02	n.n.	n.n.	n.n.
4	I. oben, qD//f	Meniskuszement	98,70	1,23	n.n.	0,05	0,03
5	I. oben, qD//f	Meniskuszement	98,61	1,33	n.n.	0,03	0,03
6	II. unten, qD//f	Gravitationszement	98,73	0,99	0,09	0,10	0,09
7	II. unten, qD//f	feinkristalliner Zement	98,58	1,34	n.n.	n.n.	0,05
8	II. unten, qD//f	Meniskuszement	98,60	1,21	n.n.	0,18	n.n.
9	II. unten, qD//f	Meniskuszement	99,08	0,87	0,03	n.n.	n.n.
10	II. unten, qD//f	Meniskuszement	99,59	0,15	n.n.	0,22	n.n.
11	II. unten, qD//f	Meniskuszement	98,86	1,11	n.n.	0,03	n.n.
12	II. unten, qD//f	Meniskuszement	98,54	1,06	0,03	0,36	n.n.
13	II. unten, qD//f	Meniskuszement	98,54	1,45	n.n.	n.n.	n.n.
14	II. unten, qD//f	Meniskuszement	98,55	1,28	n.n.	0,10	0,07
15	II. unten, qD//f	Meniskuszement	98,23	1,50	n.n.	0,27	n.n.
16	II. unten, qD//f	Meniskuszement	98,80	1,13	0,07	n.n.	n.n.
17	III., qD//f	blattförmiger Zement	98,34	1,49	n.n.	0,17	n.n.
18	III., qD//f	blattförmiger Zement	97,78	2,11	n.n.	0,11	n.n.
19	III., qD//f	blattförmiger Zement	97,25	2,05	n.n.	0,65	0,05
20	III., qD//f	blattförmiger Zement	98,49	1,42	n.n.	0,08	n.n.
21	III., qD//f	blattförmiger Zement	97,99	1,53	n.n.	0,47	n.n.
22	III., qD//f	blattförmiger Zement	98,68	1,21	0,04	0,06	n.n.
23	III., qD//f	blattförmiger Zement	99,15	0,81	n.n.	0,03	n.n.
24	III., qD//f	Meniskuszement	98,78	1,17	n.n.	n.n.	n.n.
25	III., qD//f	Meniskuszement	98,37	1,62	n.n.	n.n.	n.n.
26	III., qD//f	Meniskuszement	98,87	1,02	n.n.	n.n.	0,09
27	III., qD//f	Meniskuszement	98,69	1,24	0,04	0,04	n.n.
28	III., qD//f	Meniskuszement	99,26	0,72	n.n.	n.n.	n.n.
29	III., qD//f	Meniskuszement	98,07	1,76	n.n.	0,11	0,05
30	II. oben, qD//,b*	Meniskuszement	98,71	1,15	n.n.	0,13	n.n.
31	II. oben, qD//,b*	Meniskuszement	98,63	1,15	n.n.	0,21	n.n.
32	II. oben, qD//,b*	Meniskuszement	98,16	1,16	n.n.	0,67	n.n.
33	II. oben, qD//,b*	Meniskuszement	98,11	1,54	0,08	0,24	0,03
34	II. oben, qD//,b*	Meniskuszement	97,88	1,95	0,07	0,10	n.n.
35	II. oben, qD//,b*	Meniskuszement	98,08	1,54	0,04	0,29	0,05
36	II. oben, qD//,b*	feinkristalliner Zement	98,57	0,91	n.n.	0,43	0,09
37	II. oben, qD//,b*	feinkristalliner Zement	98,55	1,25	0,03	0,17	n.n.
38	II. oben, qD//,b*	feinkristalliner Zement	98,71	1,07	n.n.	0,19	n.n.
39	II. oben, qD//,b*	feinkristalliner Zement	98,31	1,29	n.n.	0,33	0,07
40	II. oben, qD//,b*	feinkristalliner Zement	98,69	1,01	0,03	0,23	0,04
41	II. oben, qD//,b*	Gravitationszement	98,26	1,53	n.n.	0,21	n.n.

Tab. 1: Ergebnisse von Mikrosondenanalysen der Stoffkonzentrationen von Ca, Mg, Fe, Mn und Sr im karbonatischen Zement. Das Unterschreiten der Nachweisgrenze von 300 ppm durch die entsprechende Stoffkonzentration wurde mit „n.n.“ gekennzeichnet.

Hier bewegt sich in den Untergrund eindringendes Niederschlagswasser entsprechend der Schwerkraft durch den wasserungesättigten Porenraum nach unten (z.B. HÖLTING 1992). Unter dem Einfluß von Oberflächenspannungen kann ein Teil des Sickerwassers als Kapillarwasser in engen Porenräumen zwischen Körnern gegen die Schwerkraft gehalten werden (BEAR 1972). Durch die Verdunstung dieses Wassers kann sich der Lösungsinhalt

konzentrieren und bevorzugt im Bereich von Zwickeln zur Bildung von Zement führen (KOCH & ZINKERNAGEL 1996).

Über plattigen Geröllen tritt Zement häufig verstärkt auf, während der Porenraum darunter schlecht zementiert ist (Taf. 1c). Die Gerölle hemmen den vertikalen Transport des Sickerwassers, so daß es oberhalb durch eine Kombination von Aufstau- und Oberflächenspannungseffekten zu längeren Verweilzeiten und entsprechender Zementation kommt. Sofern das Wasser, das sich adhäsiv an den Kornoberflächen nach unten bewegt (KOCH & ZINKERNAGEL 1996), von benachbarten Körnern weitergeleitet wird, bleibt die Unterseite der plattigen Gerölle unbenetzt, wodurch Zementabscheidung verhindert wird. Obwohl dieser Zementationstyp im Untersuchungsgebiet ausgesprochen häufig auftritt, finden sich kaum vergleichbare Beispiele in der Literatur. Lediglich BADIOZAMANI et al. (1977) konnten ähnliche Bildungen im Rahmen experimenteller Karbonatzementation nachweisen.

Gravitationszement kommt selten vor. Dabei handelt es sich um Zementkristallisationen unterhalb von Geröllen, die sich nach MÜLLER (1971) in Haftwassertropfen bilden, die durch das Zusammenspiel von Oberflächenspannung und Schwerkraft entstehen. Gravitationszement ist ebenfalls ein eindeutiges Kriterium für die Bildung in vadosem Milieu (CHAFETZ et al. 1985). Weitere Hinweise auf die Entstehung in der vadosen Zone ergeben sich durch das fleckenhafte Auftreten von Zementation, den starken Schwankungen von Zementgröße und Zementationsgrad sowie dem Befund, daß feinerkörnige Bereiche besser zementiert sind als gröberkörnige (LONGMAN 1980).

Der feinkristalline, vados entstandene Zement hat sich **mehrphasig** gebildet: In den Zementationsbereichen II. unten und III. (qM/f) ist gelegentlich zu beobachten, daß Gerölle nach ihrer Zementation von der sie ehemals umschließenden Zementhülle getrennt wurden (Abb. 3). Einige der Körner zerbrachen nach der Zementation (Taf. 1a). Dies kann durch verschiedene Prozesse verursacht worden sein:

Ein einfaches und evtl. ungleichmäßiges Schrumpfen von Geröllen durch die Entwässerung z.B. von Tonmineralen kann zwar nicht in jedem Fall ausgeschlossen werden. Die petrographische Zusammensetzung vieler betroffener Komponenten (u.a. Kalkstein, Metamorphit) macht dies jedoch weitgehend unwahrscheinlich.

Gegen die Kompaktion durch Sedimentaflast spricht die geringe maximal denkbare Überlagerungsmächtigkeit über den Zementationen. Hier können höchstens wenige 10er m Sediment in Ansatz gebracht werden. Außerdem konnten Anzeichen für annähernd horizontale Schubspannung nachgewiesen werden, während sich bei lithostatischem Druck vor allem vertikale

Spannungen auswirken würden. Desweiteren haben sich entsprechende Korndeformationen an keinem anderen der untersuchten Zementationsvorkommen mit vergleichbarem Sedimentations- aber anderem Diageneseverlauf gezeigt.

Als wahrscheinlichste Erklärung für die postzementative Korndeformation ist die Wirkung des drenthezeitlichen Gletschers anzunehmen. Nach KALTWANG (1992) erreicht die Geschiebegrenze im unmittelbaren Umfeld von Helpensen ca. 205m ü. NN, wobei dieser Wert als Mindesthöhe der ehemaligen Eisbedeckung anzusehen ist. Daraus läßt sich ableiten, daß über dem in Rede stehenden Zementationsbereich noch mindestens 130m mächtiges Gletschereis gelagert hat. Da sich neben dem Eigengewicht u.a. auch das Fließverhalten von Gletschern auf den Untergrund auswirkt, kann dies als mögliche Ursache für die o.g. annähernd horizontalen Schubspannungen herangezogen werden. Trifft dies zu, so kommt als Zementationsperiode zunächst der Zeitraum von der Spätphase der Mittelterrassen-Bildung bis zur Gletscherüberlagerung in Betracht. Während der Entstehung und des Bestehens des Staubeckens, in dem „Beckenablagerungen“ und Warvit sedimentiert wurden, herrschten im Untergrund sicherlich ausschließlich phreatische Bedingungen, so daß die vadose Zementation noch vor dem Beginn der Staubeckenzeit stattgefunden haben mußte. Es ist außerdem zu folgern, daß Mittelterrassen-Sedimente zwar in einem Teil des Wesertales noch abgelagert wurden, ihre Akkumulation in einem anderen Teil, zu dem auch der Untersuchungsbereich gehört haben muß, bereits abgeschlossen war (Abb. 4).

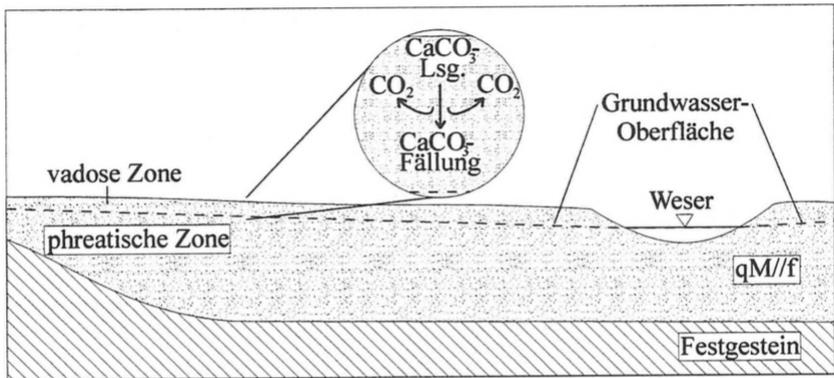


Abb. 4: Unmaßstäbliches Modell zur vadosen Zementation in der Spätphase der Mittelterrassenzeit. Während in einem Teil des Wesertales noch Mittelterrassen-Akkumulation stattfindet (rechte Bildseite), kommt es in einem Areal in dem diese bereits abgeschlossen ist zu Karbonatverlagerung durch zutretendes Niederschlagswasser (linker Bildbereich).

Untersuchungen von HALLEY & HARRIS (1979) und DAVIES (1967) haben gezeigt, daß quantitativ relevante Karbonatzementation unter natürlichen Bedingungen in weniger als 1000 bzw. sogar innerhalb von ca. 150 Jahren stattfinden kann. In einer Entwässerungsschicht, die Bestandteil einer Oberflächenabdeckung eines Deponiestandortes in Norddeutschland war, haben sich in weniger als 10 Jahren karbonatische Verkrustungen wahrscheinlich in vadosem Milieu gebildet (mündl. Mitt. SCHULZ, Fa. I.F.A.H. GbR). Dazu konnten THORSTENSON et al. (1972) experimentell nachweisen, daß in vadosem Milieu durchaus größere Zementproduktionsraten als in der phreatischen Zone möglich sind.

Ein wesentlicher Unterschied der o.g. zu den hier relevanten Bildungsbedingungen dürfte in der Bildungstemperatur liegen. Am Rand des westgrönländischen Inlandeises untersuchte SCHOLZ (1997) Eisrandstauseen in einem Sedimentationsraum, den er als rezentes Beispiel für entsprechende Ablagerungsbedingungen am Rande der pleistozänen Vereisungen ansieht. Dazu nennt er Jahresmitteltemperaturen von $-4,8^{\circ}\text{C}$, wobei in warmen Sommern Julimitteltemperaturen von $10,5^{\circ}\text{C}$ erreicht werden können, was sich als Vergleichswert für den in Frage kommenden Zeitraum ansetzen läßt. Daß Karbonatbildung auch unter Permafrost- bzw. subglaziären Bedingungen stattfinden kann, wird u.a. von SWETT (1974), LEMMENS et al. (1982) und SOUCHEZ & LEMMENS (1985) gezeigt. Als Quelle für den gebildeten Kalzit kommen bei vadoser Bildung mit vorherrschend vertikalem Lösungs-transport vor allem Schichten oberhalb der Zementationen in Frage. Kapillarer Aufstieg aus tieferen Schichtgliedern kann vernachlässigt werden, da die kapillare Steighöhe in vergleichbaren Sedimenten nur max. wenige dm beträgt (PRINZ 1991) und es in diesem Bereich keine Hinweise auf entsprechende Karbonatlösung gibt. Wie vor allem bodenkundliche Untersuchungen gezeigt haben (u.a. RABENHORST et al. 1984) kann quantitativ relevante Karbonatverlagerung schon in den obersten dm unterhalb der Geländeoberfläche stattfinden, so daß die Kalklösungszone möglicherweise nur einige cm bis dm mächtig war. Da sich die Zementationen am heutigen Top der Mittelterrassen-Ablagerungen befinden und die Staubeckensedimente zum oben vorgeschlagenen Zeitpunkt noch nicht existierten, müssen heute fehlende Schichtglieder als CaCO_3 -Lieferanten postuliert werden. Dazu beschreibt KULLE (1985) im Untersuchungsgebiet Hangsedimente bzw. Fließerde, die zwischen Mittelterrassen-Körper und „Beckenablagerungen“ auftreten können und die eine zeitliche Lücke zwischen der Mittelterrassen-Akkumulation und der Staubeckenphase ausdrücken, in der es durchaus zu lokaler Erosion der höchsten Teile der Mittelterrassen-Sedimente gekommen sein kann.

Der größte Teil des Sickerwassers dürfte aus Schnee bzw. Schmelzwasser stammen. Da in diesen sehr hohe CO_2 -Konzentrationen möglich sind (PAGE 1971) und damit höhere CaCO_3 -Löslichkeit des Wasser verbunden ist, kann

die Kalklösung vor allem in den oberen Teilen der Sickerstrecke vergleichsweise intensiv gewesen sein. Zur Kalzitausfällung ist es dann durch CO_2 -Entgasung und evtl. zusätzlich durch Erwärmung des Sickerwassers bei der Bodenpassage gekommen.

Den zementierten Konkretionen in den „Beckenablagerungen“ und dem Hauptteil der Zementation der Mittelterrassen-Ablagerungen fehlen die beschriebenen, durch die Eisauflast verursachten Deformationsstrukturen, was für eine Bildung nach dem Abschmelzen des drenthestadialen Gletschers spricht. Der postdrenthezeitlich, vados entstandene Zement läßt sich an Hand des Luminiszenzverhaltens in zwei Generationen gliedern: Orange bis rot luminiszierender Zement bildet, in den Bereichen in denen er vorkommt, die erste Generation und wird häufig von nicht luminiszierendem Zement überwachsen. Für die jüngeren Zementgenerationen kommen die Staubeckensedimente selbst, der überlagernde Geschiebemergel und Lößderivate als CaCO_3 -Lieferanten in Frage. Niederschlagswasser kann bei der langwierigen Passage durch die geringdurchlässigen, kalkhaltigen Schichten CaCO_3 im Idealfall bis zur Sättigungskonzentration aufnehmen. Beim Übertritt in den größtenteils luftgefüllten Porenraum des „Beckensandes“ bzw. der Mittelterrassen-Sedimente verringert sich durch CO_2 -Entgasung in die Bodenluft die Löslichkeit für Kalzit im Sickerwasser und es kommt zur Zementation.

Im unteren Teil des Zementationsbereiches I. wird der Porenraum durch feinkristallinen Zement nahezu vollständig ausgefüllt, was sich in auffälliger Weise vom eher mäßigen Zementationsgrad der übrigen Zementationen bzw. Konkretionen unterscheidet. Darüberhinaus kommen hier keine der genannten, für vados Entstehung typischen Bildungen (z.B. Meniskuszement) vor. Die Zementation wirkt insgesamt eher porenformerhaltend, was bei der Genese in phreatischem Milieu, also unterhalb der Grundwasseroberfläche, auftreten kann (BADIOZAMANI et al. 1977). Die Sedimentation der Mittelterrassen-Ablagerungen verlief nach RÖHM (1985: 94) in zwei Phasen: Eine spätelsterzeitliche Akkumulationsphase wird von einer fröhrendrezeitlichen durch eine holsteinzeitliche Erosions- und Entkalkungsphase unterbrochen. Obwohl in den untersuchten Ablagerungen weder signifikante Entkalkung in den tieferen Teilen des aufgeschlossenen Mittelterrassen-Körpers noch sich über den gesamten Aufschlußbereich nachvollziehbare Erosionsdiskordanzen auftreten, zeigt ein Kryoturbationshorizont eine Sedimentationsunterbrechung an und kann damit als Grenze zwischen den beiden Akkumulationsphasen RÖHMS (1985) angesehen werden.

Auf dem fest zementierten Horizont ist unter vadosen Bedingungen ein mäßig zementierter Bereich entstanden (Abb. 2: I. oben). Da ersterer älter als die vados Zementation ist, sich signifikant von allen anderen auftretenden Zementationen und Konkretionen, die sich drenthezeitlich oder jün-

ger gebildet haben, unterscheidet und zudem ca. 0,5 bis 1,0 m unterhalb des Niveaus des Kryoturbationshorizontes auftritt, kann eine holsteinzeitliche Entstehung postuliert werden.

Zementsäume aus blattförmigen Kalzitkristallen kommen vereinzelt in den Zementationen im höchsten Teil der Mittelterrassen-Sedimente und in den Konkretionen in den „Beckenablagerungen“ vor. Vergleichbare Zemente haben sich nach BUCHBINDER & FRIEDMAN (1980) in phreatischem Milieu gebildet. Syntaxiale Anwachssäume, die ebenfalls in den Zementationen am Top des Mittelterrassen-Körpers und den Konkretionen in den Staubeckenablagerungen vorkommen, werden nach LONGMAN (1980) in meteorisch-phreatischem Milieu gebildet. Beide Zementtypen sind jünger als der drenthezeitliche aber älter als der postdrenthezeitliche vadose Zement.

Zusammenfassend zeigt sich, daß die Bildung der in der Sand-/Kiesgrube „Müller“ auftretenden Kalzitemente durch die oben beschriebenen, unterschiedlichen Zementeigenschaften und Bildungsbedingungen in eine relative zeitliche Abfolge gebracht werden kann. Dabei konnten fünf Zementgenerationen festgestellt werden.

	Zementgeneration		
	Zementationsbereich	Zementationsbedingungen	
		Zement	
1	I. unten	phreatisch	feinkristallin, nicht luminiszierend
2	II. unten, III.	vados	feinkristallin, nicht luminiszierend
3	II., III., IV.	phreatisch	blattförmig, syntaxial, nicht luminiszierend
4	I. oben, II., III., IV.	vados	feinkristallin, orange bis rot luminiszierend
5	I. oben, II., III., IV.	vados	feinkristallin, nicht luminiszierend

Tab. 2: Einteilung der in der Sand-/Kiesgrube „Müller“ auftretenden Zemente in fünf Zementgenerationen mit Angaben zu Zementationsbereichen, -bedingungen und Zementen.

7. REKONSTRUKTION DES SEDIMENTATIONS- UND DIAGENESEVERLAUFS

Die Zementation der spätelster- bis drenthezeitlichen Sedimente hat in einem hydrogeologisch dynamischen Umfeld mehrphasig stattgefunden: Zunächst wurden die spätelsterzeitlichen Mittelterrassen-Sedimente wahrscheinlich bereits in der Holstein-Warmzeit zementiert (Zementgeneration 1). Zum Ende einer erneuten, fröhrendthezeitlichen Akkumulationsphase findet auf dem Mittelterrassen-Körper zumindest bereichsweise bereits Sedimentumlagerung (Hangsedimente / Fließerde) statt. In diesem Zeitraum kommt es zu erster vadoser Zementation in den oberen Bereichen des Mittelterrassen-Körpers (Zementgeneration 2) und lokal zu nicht allzu tief-

greifender Erosion am Top dieser Schichten. Der drenthestadiale Gletscher führt zu einer Deformation der vados zementierten Bereiche.

Nach dem Abschmelzen des drenthezeitlichen Eises begann die Weser sich in die glazigenen und fluviatilen Sedimente einzuschneiden (KULLE 1985). In diesem Zeitraum hatte sie hier ihren bis heute höchsten Stand, wie Verbreitung und Höhenlage jüngerer, fluviatiler Sedimente und das Niveau der heutigen Weser zeigen. Da durch den Wasserstand der Weser, die hier als Vorfluter fungiert, auch die Grundwasseroberfläche vergleichsweise hoch war, müssen die phreatischen Bedingungen, die zur Bildung der syntaxialen Anwachssäume und der blattförmigen Saumkristalle (Zementgeneration 3) geführt haben, für diesen Zeitraum angesetzt werden.

Durch fortschreitende Einschneidung der Weser verlagert sich auch die Grundwasseroberfläche nach unten. Dadurch etablieren sich erneut vadose Bedingungen im Bereich der Mittelterrassen-Ablagerungen und es entsteht zunächst orange bis rot luminiszierender (Zementgeneration 4) und dann nicht luminiszierender Kalzizement (Zementgeneration 5). Als mögliche Unterbrechung der beiden Zementationsphasen ist das Weichsel-Hochglazial denkbar.

DANK

Herrn Dr. J.-P. GROETZNER danke ich für wertvolle Anregungen sowie seine Unterstützung. Herrn KÖPKE (Inst. Min. Univ. Hannover) gilt mein Dank für das Ermöglichen der Mikrosonden-Analysen und die dabei gewährte Hilfe. Herrn Dr. OBERTHÜR (BGR Hannover) und Herrn D. KLOSA danke ich für die Nutzung der Kathodenluminiszenz-Anlage bzw. für die Hilfe bei den Kalkgehaltsbestimmungen. Herrn Dr. F. MAUTHE (Univ. Hannover) gilt mein Dank für die kritische Durchsicht dieses Manuskripts. Zu guter Letzt möchte ich noch Herrn Dr. C. REINHOLD (Fa. Preussag Energie GmbH Lingen), Herrn P. WELLMANN (Fa. Institut Für Angewandte Hydrogeologie Garbsen) und Frau H. WILLIAMS für ihre Unterstützung danken.

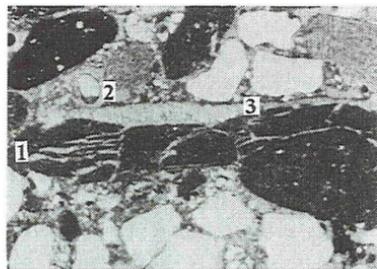
LITERATUR

- BADIOZAMANI, K. & MACKENZIE, F.T. & THORSTENSON, D.C. (1977): Experimental carbonate cementation: salinity, temperature and vados-phreatic effects. - *J. Sed. Pet.*, **47** (2): 529-542, 20 Abb.; Tulsa.
- BEAR, J. (1972): *Dynamics of Fluids in Porous Media*. - 764 S., div. Abb. u. Tab.; New York (Dover).
- BEYER, W. (1964): Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve. - *Wasserwirtschaft Wassertechnik WWT*, **14** (6): 165-168, 7 Abb., 3 Tab.; Berlin.
- BUCHBINDER, L.G. & FRIEDMAN, G.M. (1980): Vadose, phreatic, and marine diagenesis of Pleistocene-Holocene carbonates in a borehole: Mediterranean coast of Israel. - *J. Sed. Pet.*, **50** (2): 395-408, 5 Abb.; Tulsa.

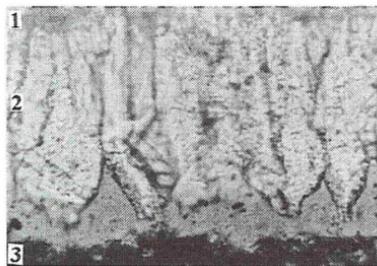
- CHAFETZ, H.S. & WILKINSON, B.H. & LOVE, K.M. (1985): Morphology and composition of non-marine carbonate cements in near-surface settings. - *SEPM Spec. Publ.*, **36**: 337-347, 15 Abb.; Tulsa.
- DAVIES, D.K. (1967): Origin of friable sandstone - calcareous sandstone rhythms in the upper Lias of England. - *J. Sed. Pet.*, **37** (4): 1179-1188, 12 Abb.; Tulsa.
- DIN [DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, Hrsg.] (1996): Bestimmung der Korngrößenverteilung. - *DIN*, **18123**: 12 S., 5 Abb., 8 Tab.; Berlin.
- DRAVIS, J.J. & YUREWICZ, D.A. (1985): Enhanced carbonate petrography using fluorescence microscopy. - *J. Sed. Pet.*, **55** (6): 795-804, 8 Abb.; Tulsa.
- DUNHAM, R.J. (1971): Meniscus cement. - In: Bricker, O.P. [Hrsg.]: *Carbonate Cements*, Johns Hopkins Univ. Studies in Geology, **19**: 297-300, 12 Abb.; Baltimore, London (Johns Hopkins).
- EISSMANN, L. (1981): Periglaziäre Prozesse und Permafroststrukturen aus sechs Kaltzeiten des Quartärs. - *Altenburger Naturwiss. Abh.*, **1**: 171 S., 67 Abb., 4 Tab., 42 Taf.; Altenburg.
- FÜCHTBAUER, H. & RICHTER, D.K. (1988): Karbonatgesteine. - In: FÜCHTBAUER, H. [Hrsg.]: *Sedimente und Sedimentgesteine*, 4. Aufl., *Sedimentpetrologie*, **2**: 233-434, div. Abb. u. Tab.; Stuttgart (Schweizerbart).
- GRUPE, O. & KOERT, W. & STACH, E. (1933): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern, Blatt Minden: 67 S.; Berlin. [TK25 3719]
- HALLEY, R. B. & HARRIS, P.M. (1979): Fresh-water cementation of a 1,000-year-old Oolite. - *J. Sed. Pet.*, **49** (3): 969-988, 14 Abb.; Tulsa.
- HENDRY, J. & TREWIN, N.H. & FALLICK, A.E. (1996): Low-Mg calcite marine cement in Cretaceous turbidites: origin, spatial distribution and relationship to seawater chemistry. - *Sedimentology*, **43**: 877-900, 9 Abb., 3 Tab.; Amsterdam.
- HÖLTING, B. (1992): Hydrogeologie.- 4. Aufl.: 415 S., div. Abb. u. Tab.; Stuttgart (Enke).
- KALTWANG, J. (1992): Die pleistozäne Vereisungsgrenze im südlichen Niedersachsen und im östlichen Westfalen. - *Mitt. geol. Inst. Univ. Hannover*, **33**: 161 S., 7 Abb., 38 Tab., 49 Kt.; Hannover.
- KLOSA, D. (1994): Eine rechnergestützte Methode zur Bestimmung des Gesamtkarbonatgehaltes in Sedimenten und Böden. - *Z. angew. Geol.*, **40** (1): 18-21, 4 Abb.; Berlin.
- KOCH, R. & ZINKERNAGEL, U. (1996): Zur Zementation in Kalksteinen. - *Zbl. Geol. Paläont.*, **1** 1994 (11/12): 1353-1398, 13 Abb., 2 Tab., 2 Taf.; Stuttgart.
- KULLE, S. (1985): Drenthe-stadiale Staubeckensedimente (Pleistozän) und ihr Lagerungsverband aus zwei Aufschlüssen im Wesertal zwischen Rinteln und Hameln. - **82** S., 18 Abb., 8 Tab., 4 Taf., 3 Anl.; Hannover (unveröffentl. Dipl.-Arbeit).
- LANGGUTH, H.R. & VOIGT, R. (1980): *Hydrogeologische Methoden*. - 486 S., 156 Abb., 72 Tab.; Berlin, Heidelberg, New York (Springer).
- LEMMENS, M. & LORRAIN, R. & HAREN, J. (1982): Isotopic composition of ice and subglacially precipitated calcite in an alpine area. - *Z. Gletscherkde. Glazialgeologie*, **18** (2): 151-159, 5 Abb.; Innsbruck.
- LONGMAN, M.W. (1980): Carbonate Diagenesis Textures from Nearsurface Diagenetic Environments. - *Amer. Assoc. Petr. Geol. Bull.*, **64** (4): 461-487, 18 Abb.; Tulsa.
- MÜLLER, G. (1971): "Gravitational" cement: an indicator for the vadose zone of the subaerial diagenetic environment. - In: Bricker, O.P. [Hrsg.]: *Carbonate Cements*, Johns Hopkins Univ. Studies in Geology, **19**: 301-302, 1 Abb.; Baltimore, London (Johns Hopkins).
- NAUMANN, E. (1927): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern, Blatt Hessisch-Oldendorf, Nr. 2246: 43 S., 1 Abb., 1 Taf.; Berlin. [TK25 3821]
- PAGE, N.R. (1971): Subglacial Limestone Deposits in the Canadian Rocky Mountains. - *Nature*, **229**: 42-43; London.
- PEKDEGER, A. & SCHULZ, H.D. (1975): Ein Methodenvergleich zur Laborbestimmung des k_f -Wertes von Sanden. - *Meyniana*, **27**: 35-40, 2 Abb.; Kiel.
- PRINZ, H. (1991): Abriß der Ingenieurgeologie. - 2. Aufl.: 466 S., 352 Abb., 74 Tab.; Stuttgart (Enke).

- RABENHORST, M.C. & WILDING, L.P. & WEST, L.T. (1984): Identification of Pedogenic Carbonates Using Stable Carbon Isotop and Microfabric Analyses. - *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **48**: 125-132, 5 Abb., 3 Tab.; Madison.
- ROHDE, P. (1994): Weser und Leine am Berglandrand zur Ober- und Mittelterrassen-Zeit. - *Eiszeitalter und Gegenwart*, **44**: 106-113, 2 Abb.; Hannover.
- RÖHM, H. (1985): Bau und Zusammensetzung Saale-Eiszeitlicher Sedimentkörper im Raum Hausberge-Veltheim/Weser. - 107 S., 53 Abb., 7 Anl.; Hannover (unveröffentl. Dipl.-Arbeit u. -Kartierung).
- SCHOLZ, H. (1997): Sedimente und Ablagerungsmechanismen in instabilen proglaziären Seen (Eisrandstauseen) in Westgrönland. - *Eiszeitalter und Gegenwart*, **47**: 42-77, 12 Abb., 7 Taf.; Hannover.
- SERAPHIM, E.T. (1972): Wege und Halte des saalezeitlichen Inlandeises zwischen Osning und Weser. - *Geol. Jb.*, **A3**: 85 S., 14 Abb., 6 Tab.; Hannover.
- SIEGERT, L. (1912): Über die Entwicklung des Wesertales. - *Z. dt. Geol. Ges.*, **64**: 233-264, 4 Abb.; Stuttgart.
- SOUCHEZ, R.A. & LEMMENS, M. (1985): Subglacial carbonate deposition: An isotopic study of a present-day case. - *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **51**: 357-364, 2 Abb.; Amsterdam.
- SPETHMANN, H. (1908): Glaziale Stillstandslagen im Gebiet der mittleren Weser. - *Mitt. Geogr. Ges. Naturhist. Museum Lübeck*, 2. Reihe, **22**: 3-17, 1 Kt.; Berlin.
- SWETT, K. (1974): Calcrete crusts in an arctic permafrost environment. - *Am. J. Sci.*, **274**: 1059-1064, 3 Abb.; New Haven.
- THORSTENSON, D.C. & MACKENZIE, F.T. & RISTVET, B.L. (1972): Experimental vadose and phreatic cementation of skeletal carbonate sand. - *J. Sed. Pet.*, **42**: 162-167, 5 Abb.; Tulsa.
- WELLMANN, P. (1990): Aufbau und Genese des Saale-eiszeitlichen Sedimentkörpers von Krankenhagen-Möllenbeck. - 84 S., 45 Abb., 1 Tab., 13 Anl.; Hannover (unveröffentl. Dipl.-Arbeit).

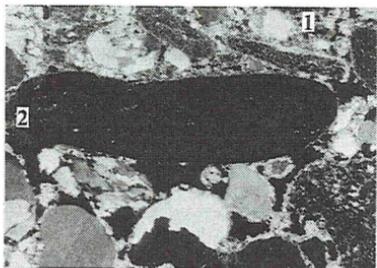
Anschrift des Autors: Institut für Geologie und Paläontologie, Universität Hannover, Callinstr. 30, 30167 Hannover.



a.



b.



c.

Tafel 1

- a: Zementationsbereich III.: In der Bildmitte befindet sich ein zerbrochenes Tonsteingeröll (1). Der darüberliegende zementierte Bereich (2) läßt die Form des unzerstörten Gerölls erahnen, was auf Bildung vor dem Zerschneiden des Kornes schließen läßt. In dem Spalt zwischen Korn und Zementation hat sich später blattförmiger Zement gebildet (3). Dünnschliff, parallele Nicols, Bildhöhe ca. 1,5mm.
- b: Detailausschnitt aus Taf. Ia: Der blattförmige Saumzement (2) ist vom feinkristallinen Zement (1) aus auf das zerbrochene plattige Geröll (3) zugewachsen. Dünnschliff, parallele Nicols, Bildhöhe ca. 0,2mm.
- c: Zementationsbereich II. unten: Zementanreicherung (1) von vados gebildetem feinkristallinem Kalzit oberhalb eines plattigen Gerölls (2) Dünnschliff, gekreuzte Nicols, Bildhöhe ca. 1,5mm.