

Rezente Kalktuffbildung auf der Wiesentalb – Bildungsbedingungen und jahreszeitlicher Verlauf*

von

ANJA KIESSLING

mit 6 Abbildungen

1 Einleitung

Kalktuffe sind Süßwasserkalke, die durch Fällung von Kalziumkarbonat aus übersättigter Lösung zustandekommen und im Gegensatz zum festen Kalksinter porös und leicht zerreiblich sind. Sie finden sich in Kalkgebieten vor allem unmittelbar unterhalb von Quellaustritten, aber auch weiter talwärts, dies jedoch nahezu ausschließlich in Nebentälern. Hauptbildungszeit war die postglaziale Wärmezeit. Damals entstanden die mächtigen Kalktufflager der Schwäbischen und Fränkischen Alb, die bereits vielfach untersucht wurden.

Heutige Bedingungen scheinen dagegen für die Bildung von Kalktuffen weit weniger geeignet zu sein: zum einen bilden bei weitem nicht alle Quellen und Wasserläufe der Alb auch Kalktuffablagerungen, zum anderen werden postglazial gebildete Vorkommen durch die rezenten Wasserläufe oft wieder zerschnitten. Ist Kalkabscheidung zu beobachten, so ist das Ausmaß offensichtlich geringer als während der postglazialen Wärmezeit. Außerdem fällt auf, daß unter rezenten Bedingungen Tuffbildung oftmals erst in einiger Entfernung vom Quellpunkt - also nicht direkt am Quellaustritt - einsetzt.

2 Ziel der Arbeit und Fragestellungen

Ziel der Arbeit ist die Analyse des Bildungsprozesses von rezenten Kalktuffen. Die konkreten Fragestellungen lauten:

1. Wie groß ist das Ausmaß der Kalktuffneubildung? Lassen sich hier räumliche Unterschiede feststellen?
2. Welche Faktoren beeinflussen die rezente Kalktuffbildung?
3. Läßt sich - in Abhängigkeit von jahreszeitlich gebundenen Intensitätsschwankungen der Bildungsfaktoren - auch ein jahreszeitlicher Verlauf des Bildungsprozesses feststellen?

*) Zusammenfassung einer Zulassungsarbeit zur 1. Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien mit gleichem Titel, die am Institut für Geographie der Universität Erlangen-Nürnberg im Jahr 1992 abgeschlossen wurde. Dort auch die Zusammenstellung aller gemessenen Daten und ausführliche Literaturangaben.

3 Vorgehensweise

Das Untersuchungsgebiet beschränkt sich auf den Bereich der Wiesentalb zwischen Erlangen und Bamberg. In diesem Gebiet wurden zunächst die Bereiche rezenter Kalktuffbildung kartiert und auffallende Gemeinsamkeiten bezüglich geologischer Lage und Formenschatz festgehalten.

Aus Geländebeobachtung und dem - im Prinzip bekannten - chemischen Prozeß der Kalkausfällung wurden Faktoren ("Variable") abgeleitet, die den Prozeß der rezenter Kalktuffbildung möglicherweise beeinflussen. Um zu überprüfen, welche Zusammenhänge hier tatsächlich bestehen, wurden die einzelnen Faktoren im Verlauf zweier ausgewählter Bäche aufgenommen und zur Intensität der Tuffbildung in Beziehung gesetzt.

Um Anhaltspunkte für das Ausmaß der Tuffneubildung zu gewinnen, wurden an mehreren Stellen der Bäche Teststäbe eingebracht und der Kalkniederschlag gemessen. Unabhängig davon wurden an verschiedenen Lokalitäten Sedimentproben entnommen und mit Hilfe von Binokular und Mikroskop untersucht.

Zur Analyse des jahreszeitlichen Verlaufs des Bildungsprozesses wurden in der Zeit von Dezember 1990 bis August 1991 alle variablen Größen zweimal pro Monat, und zwar jeweils gegen Ende einer wenigstens einige Tage herrschenden Witterungsperiode aufgenommen. Außerdem erfolgten 24-Stunden-Messungen im Januar, Mai und Juli, um tageszeitliche Unterschiede feststellen zu können.

4 Beobachtungen im Gelände

4.1 Bereiche rezenter Kalktuffbildung auf der Wiesentalb - Gemeinsamkeiten bezüglich geologischer Lage und Formenschatz

Kalktuff bildet sich rezent vornehmlich im Verlauf kleiner Bäche, deren Quellen am Albrand bzw. in weiten Nebentälern meist über Malm alpha, seltener an der Malm-Basis austreten (vgl. dazu die Karte, Abb. 1). Es handelt sich bei diesen Quellen also um Schichtquellen des Seichten Karstes. Kalktuffe treten somit vornehmlich am Rand des Karstgebietes auf, während sie diesem selbst fehlen. Gemeinsam ist den kalktuffbildenden Wasserläufen ein relativ langer Lauf zum Vorfluter, wobei sie beachtliche Höhenunterschiede überwinden. Wichtig ist die Beobachtung, daß die Bäche wegen ihrer geringen Wasserführung beim Überfließen von harten Schichten trotz gesteigerter Fließgeschwindigkeit nicht in der Lage sind, in die Tiefe zu erodieren und ihren Lauf entsprechend zu konzentrieren. Stattdessen kommt es an diesen Stellen zu einer Aufweitung des Gerinnebetts. In vielen Fällen setzt Kalkausfällung im Untersuchungsgebiet erst mit einer solchen Verbreiterung des Bachbetts - also in einiger Distanz zum Quellpunkt - ein. Die Abstände betragen in den untersuchten Fällen zwischen 5 und 70 m.

Rezente Kalktuffbildung auf der Wiesentalb

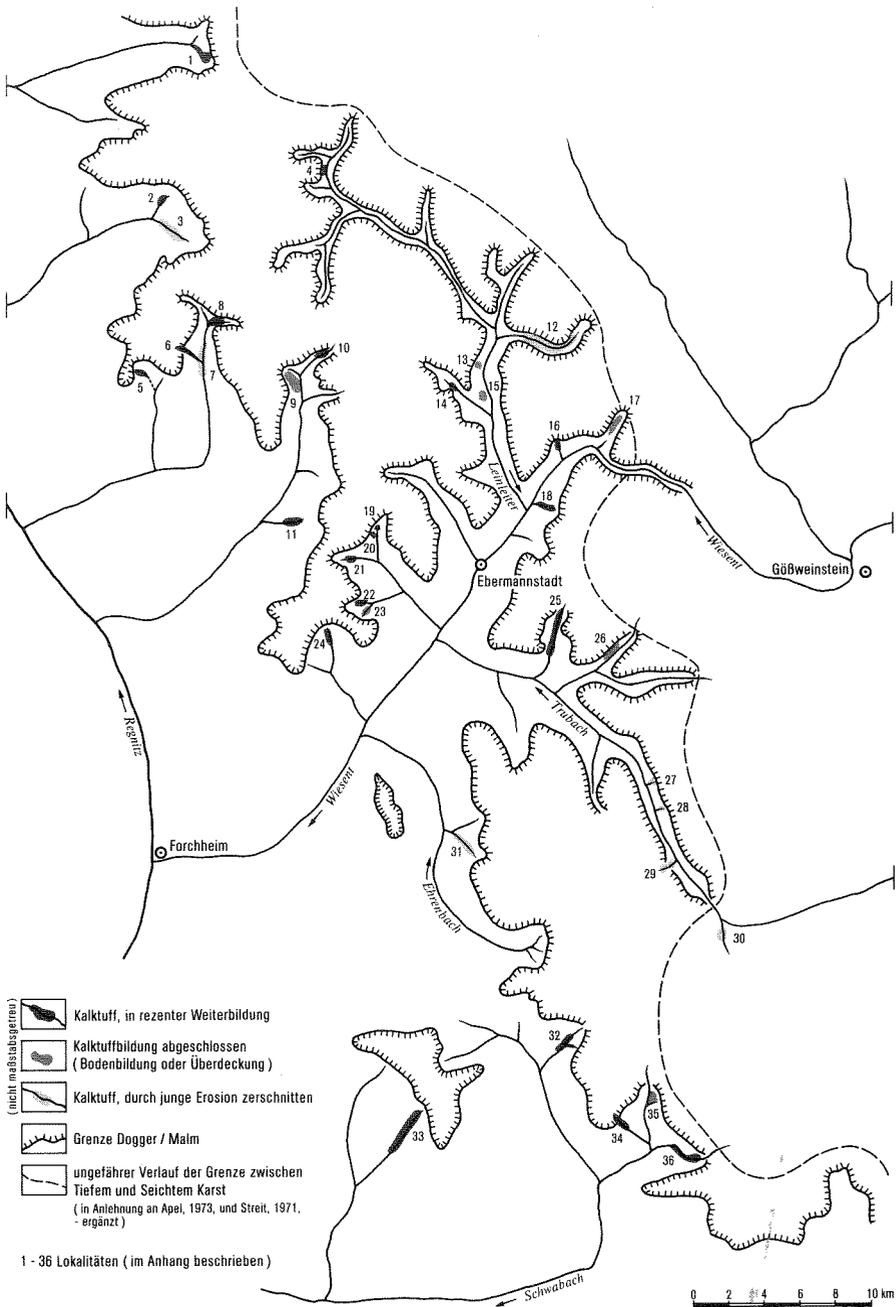


Abb. 1: Kalktuff in der nördlichen Frankenalb zwischen Erlangen und Bamberg

4.2 Die Kalktuffbildung an den Untersuchungsbeispielen Weißenbach und Wedenbach

Aus der Vielzahl möglicher Beispiele wurden der Weißenbach (Nr. 25 in der Karte, Abb. 1) und der Wedenbach (Nr. 16) als Untersuchungsobjekte gewählt.

Abb. 2 zeigt Verlauf, Breite und Längsprofil des Weißenbachs sowie einige charakteristische Querprofile. Nach dem Quellaustritt verläuft der Bach in einem schmalen, gering geneigten Bett (0,8 - 1,2 m Breite; durchschnittliches Gefälle 50 ‰) mit einer durchschnittlichen Wassertiefe von 13 cm (Querprofil 1 in Abb. 2), es bildet sich kein Tuff. Tuffbildung setzt erst nach 70 m bei leicht zunehmendem Gefälle und größerer Bachbreite langsam ein - basale Teile der am Bachrand wachsenden Moose zeigen eine Kalkhülle. Im Bereich größten Gefälles (bis zu 210 ‰) - 200-400 m vom Quellpunkt - ist die Tuffbildung am intensivsten: Das Wasser wird über der Dogger beta-Stufe flächig auf bis zu 5,5 m Breite verteilt, die Wassertiefe ist mit durchschnittlich 3 cm sehr gering (Querprofil 2 in Abb. 2). So tritt es in die Steilstrecke ein und dort kommt es nun zur Ausbildung von Tuffkaskaden, die in Steilstufen und kleine Verebnungen - teilweise mit ausgeprägten "pools" - gegliedert, von Moosen und Algen bewachsen sind und bis zu 2,9 m Höhe erreichen. In diesem Bereich sind alle Pflanzen sowie abgebrochene Äste und vorjähriges Laub im Bachbett vollständig mit einer Kalkhülle überzogen. Im anschließenden flacheren Bereich (80 ‰ Gefälle - 400-600 m vom Quellpunkt - verengt sich das Bachbett wieder auf durchschnittlich 1 m, die Tiefe nimmt zu (Querprofil 3 in Abb. 2). Hier kleidet Kalktuff das Bachbett flächig aus.

Der Wedenbach zeigt eine ähnliche Differenzierung, nur vollzieht sich dort der Prozeß auf 330 m und damit auf kürzerer Distanz.

Die beiden Bäche sind hinsichtlich der Zonierung ihrer Längsprofile repräsentativ für viele andere kalkabscheidende Bäche im Untersuchungsgebiet. Sie wurden für die weiteren Untersuchungen ausgewählt, weil sich bei ihnen die Intensitätsänderung der Kalktuffbildung über mehrere hundert Meter erstreckt, was wichtig ist, um bezüglich der die Kalktuffbildung möglicherweise beeinflussenden Parameter aussagekräftige Meßergebnisse zu erzielen.

5 Ableitung möglicher Einflußgrößen und Methoden der Analyse

Aus den Geländebeobachtungen ergeben sich hinsichtlich der Fragestellung nach möglichen Einflußgrößen des Bildungsprozesses folgende Ansatzpunkte:

Es handelt sich um Bäche mit gering schüttenden Quellen, somit stellt sich die Frage nach der Abhängigkeit von der *Quellschüttung*. Weiterhin ist zu fragen, welche Rolle die Faktoren *Gefälle*, *Bachbreite*, *Bachtiefe* und damit verbunden die *Fließgeschwindigkeit* spielen. Außerdem muß die Bedeutung der *Pflanzen* für die Kalkabscheidung im Bachbett untersucht werden.

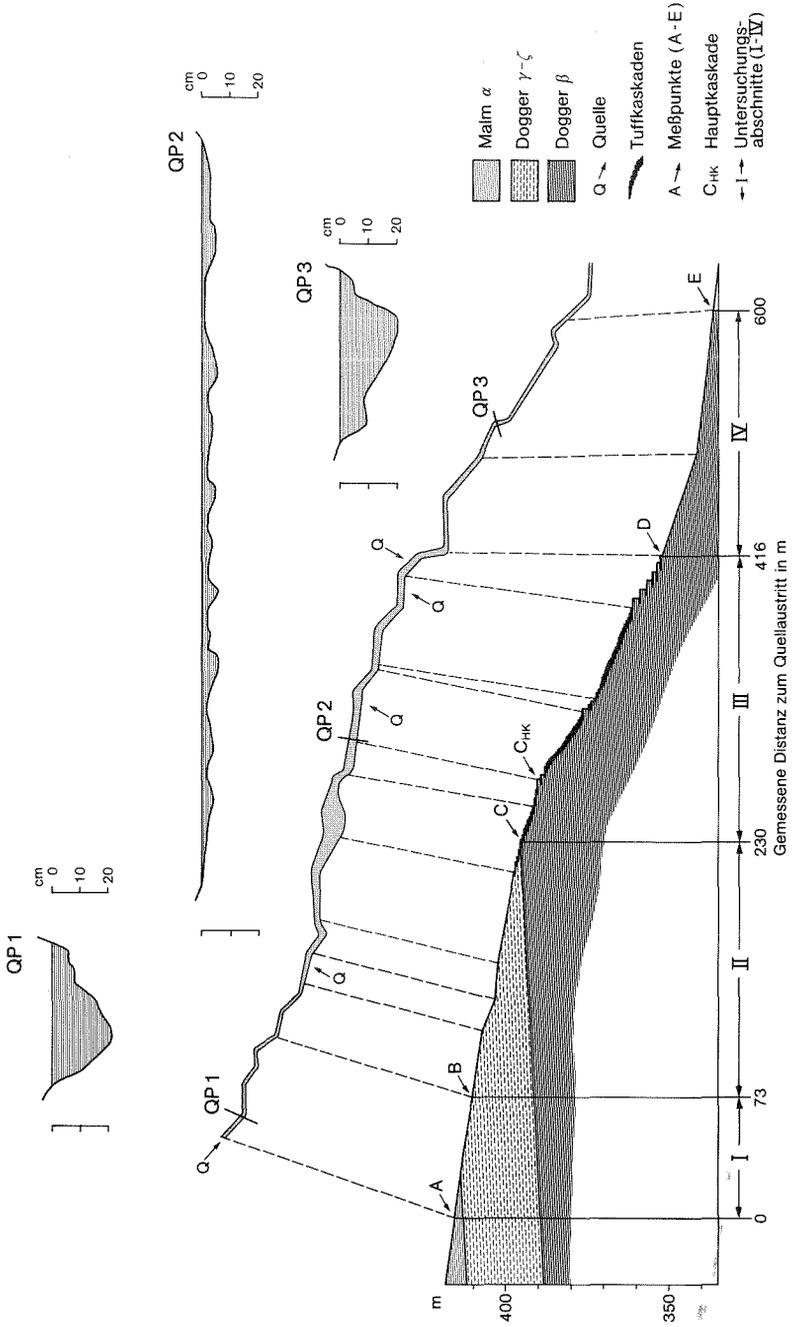


Abb. 2: Weißenbach - Verlauf, Gerinnebreite, Längsprofil (je 2-fach überhöht)

Aus dem chemischen Prozeß der Kalktuffbildung leiten sich weitere potentielle Einflußgrößen ab: Damit es zu Kalkausfällung kommen kann, muß Übersättigung der Lösung erreicht werden. Dies geschieht zum einen sicher durch Kohlendioxidabgabe an die Luft; dieser Prozeß ist umso stärker, je größer die Potentialdifferenz ist, d.h. je geringer die *Kohlendioxidkonzentration* der umgebenden Luft. Der Evasionsprozeß verläuft an der Grenzfläche der beiden Medien Wasser/Luft, was eine mögliche Abhängigkeit zwischen Kalkausfällung und Größe dieser *Austauschfläche* vermuten läßt. Reduktion des Lösungsmittels kann ebenfalls zu Übersättigung der Lösung führen - somit ist *Verdunstung* als ein weiterer Faktor zu berücksichtigen. Da kaltes Wasser mehr Kohlendioxid lösen kann als warmes Wasser, d.h. die Gleichgewichtskonstante temperaturabhängig ist, ergibt sich eine mögliche Abhängigkeit des Ausfällungsprozesses von der *Wassertemperatur*.

Um zu überprüfen, ob tatsächlich ein Zusammenhang zwischen den einzelnen möglichen Einflußgrößen und Tuffbildung besteht, mußte ein Maß für die Intensität der Tuffbildung gefunden werden. Durch Messung des Kalkniederschlags an den Teststäben wären zuverlässige Daten erst nach längerer Beobachtungsdauer als dem zur Verfügung stehenden Dreivierteljahr (Dezember 1990 bis August 1991) zu gewinnen gewesen. Näherungsweise kann hierfür jedoch die Reduktion der Kalziumionenkonzentration im Bachwasser herangezogen werden: reduziert sie sich zwischen zwei Punkten, so muß auf dieser Strecke Kalk - im chemischen Sinn - ausgefallen sein. Bei der Entnahme von Wasserproben im Abstand von 10 m konnten nun Bereiche festgestellt werden, in denen die Änderung der Kalziumionenkonzentration annähernd gleichmäßig verläuft. So ließen sich auf chemischem Weg Intensitätszonen der Tuffbildung abgrenzen, die gut mit den morphologischen Beobachtungen übereinstimmen.

Für den Weißenbach ergeben sich vier Abschnitte (vgl. Abb. 2 und 3). Im Bereich zwischen 0 und 70 m nach Quellaustritt ist keine Tuffbildung zu erkennen (Abschnitt I). Die Wasseranalysen liefern die Erklärung: das Wasser tritt an der Quelle untersättigt und damit kalkaggressiv aus. Nach Quellaustritt steigt der Kalkgehalt langsam an, d.h. das Wasser erreicht erst durch Aufnahme weiterer Kalziumionen aus dem Kalkschutt des Bachbettes den Gleichgewichtszustand. Das gleichzeitige Absinken der Hydrogenkarbonationenkonzentration läßt den Schluß zu, daß zusätzlich Entweichen von Kohlendioxid zum Erreichen des Gleichgewichtszustands bzw. zur Übersättigung führt. Somit klärt sich bereits an dieser Stelle, warum Tuffbildung hier - und in zahlreichen vergleichbaren Fällen - erst in einiger Entfernung vom Quellpunkt einsetzt. Ist Übersättigung erreicht, so kommt es langsam zur Kalkabscheidung. In diesem Bereich (II) zeigen lediglich basale Teile der Moose geringfügige Inkrustation. Erst zwischen 230 und 416 m nach Quellaustritt geht die Kalziumionenkonzentration stark zurück. Übereinstimmend damit ist dieser Abschnitt (III) der Bereich intensivster Tuffbildung. Im anschließenden Abschnitt IV reduziert sich die Ionenkonzentration nur noch geringfügig, die Kalktuffbildung ist entsprechend schwächer.

Nun konnte geprüft werden, welche der potentiellen Einflußgrößen sich von Bereichen schwacher zu Bereichen starker Ausfällung ändern. Ergab sich ein Zusammenhang, so war dieser - zumindest hypothetisch - zu begründen. Die Darstellung der Ergebnisse beschränkt sich auf den Weißenbach, da mit den Ergebnissen für den Wedenbach tendenziell Übereinstimmung besteht.

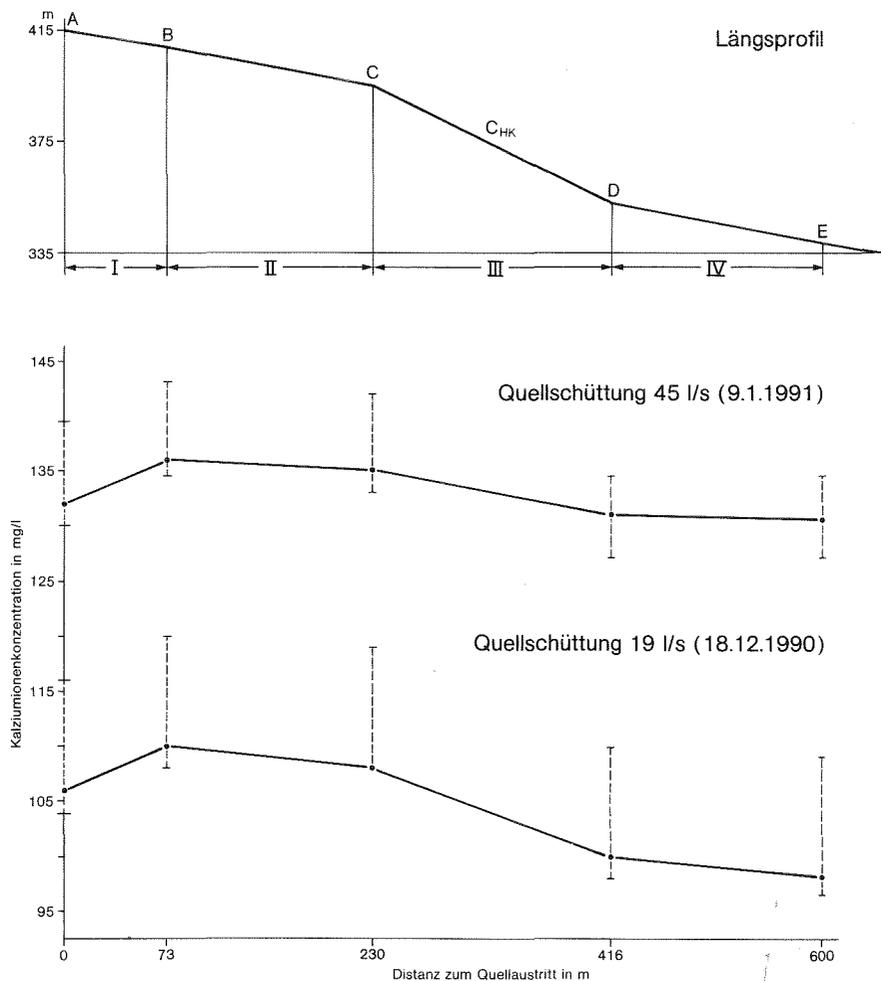


Abb. 3: Kalziumionenkonzentration im Bachverlauf des Weißenbaches in Abhängigkeit vom Gefälle

6 Ergebnisse der Analysen

6.1 Tuffbildung in Abhängigkeit vom Gefälle

Zur Überprüfung des vermuteten Zusammenhangs wurde die Kalziumionenkonzentration zum Längsprofil in Beziehung gesetzt. Abbildung 3 zeigt zwei Aufnahmen in den Wintermonaten, einmal bei hoher und einmal bei niedriger Quellschüttung (die Angabe der Spannweite aller unter vergleichbaren Bedingungen gemessenen Werte belegt die Repräsentativität der ausgewählten Aufnahmen). Die Tuffbildung ist jeweils dort am intensivsten, wo die größten Höhenunterschiede überwunden werden, und in flachen Abschnitten deutlich geringer. Dieser Zusammenhang kann zu allen Jahreszeiten unabhängig von der absoluten Höhe der Quellschüttung beobachtet werden. Zur Erklärung müssen weitere Parameter einbezogen werden.

6.2 Tuffbildung in Abhängigkeit von Bachbreite, Bachtiefe, Fließgeschwindigkeit, Quellschüttung: Abhängigkeit von der Austauschfläche

Um zu überprüfen, ob die Größe der Austauschfläche Wasser/Luft rezente Kalktuffbildung beeinflusst, mußte zunächst die Austauschfläche quantifizierbar gemacht werden: Mit Hilfe einfacher mathematischer Überlegungen konnte unter Einbeziehung von Bachbreite, Bachtiefe, Fließgeschwindigkeit und Quellschüttung $A = V : T$ (mit V = Wasservolumen; T = Wassertiefe) ermittelt werden. D.h. für eine bestimmte Quellschüttung läßt sich die Austauschfläche an verschiedenen Abschnitten näherungsweise durch die jeweilige Wassertiefe ausdrücken.

Es wurde nun jeweils die durchschnittliche Größe der Austauschfläche in den verschiedenen Abschnitten ermittelt, auf 101 bezogen, um einen Vergleich zu ermöglichen, und zur Kalziumionenkonzentration in Beziehung gesetzt.

Die Aufnahme vom 9.1.1991 mit hoher Wasserführung (Abb. 4a) zeigt, daß die Reduktion der Kalziumionenkonzentration dort am größten ist, wo die Austauschfläche durchschnittlich die größten Werte aufweist. Eine plausible Erklärung läßt sich aus dem Verhalten der Hydrogenkarbonationenkonzentration ableiten: Im Bereich der größten Austauschfläche ist die Reduktion der Hydrogenkarbonationenkonzentration am größten - d.h. der Evasionsprozeß von Kohlendioxid in Wasser zu Luft läuft hier verstärkt ab und begünstigt so die Kalkausfällung.

Noch deutlicher ist das Phänomen bei niedriger Quellschüttung (Aufnahme vom 18.12.1990; Abb. 4b) erkennbar. Hier war die absolute Kalkausfällung größer als bei hoher Quellschüttung, ebenso ging die Hydrogenkarbonationenkonzentration stärker zurück. Dies kann mit Größenunterschieden der Austauschfläche im Verhältnis zum Wasservolumen erklärt werden. Für geringere Werte der Quellschüttung konnten relativ größere Werte der Austauschfläche bestimmt werden, d.h. das

Wasser tritt bei niedriger Quellschüttung stärker mit der Luft in Kontakt. Dies ermöglicht stärkeres Entweichen von Kohlendioxid, wodurch Kalkabscheidung begünstigt wird.

Diese Abhängigkeiten konnten über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg beobachtet werden. Für die Bedeutung der Austauschfläche läßt sich also festhalten: Ist Übersättigung der Lösung erreicht, so ist die Kalkausfällung zu allen Jahreszeiten umso stärker, je größer die Austauschfläche Wasser/Luft im Verhältnis zum Wasservolumen ist.

Dieses Verhältnis wird einerseits bestimmt von Bachbreite und Bachtiefe. Es ist dort groß (und damit auch die Neigung zur Kalkausfällung), wo der Bach breit und die Wassertiefe gering ist; dies ist - wie beschrieben - an der Oberkante der Steilabschnitte und - dadurch bedingt - auch in diesen selbst der Fall. Andererseits beeinflußt die Höhe der Quellschüttung die Wirkung der Austauschfläche: je geringer die Quellschüttung ist, desto besser kann das Wasser mit der Luft in Kontakt treten und desto höher ist auch die Neigung zur Kalkausfällung. Doch ist mit den drei Parametern Bachbreite, Bachtiefe, Wassermenge/Zeiteinheit die Wirkung der Austauschfläche noch nicht voll erfaßt. Sie ist dort besonders groß, wo die Wasseroberfläche durch plötzliche Zunahme der Fließgeschwindigkeit an Gefällsteilen und durch entsprechend turbulenten bis schießenden Abfluß rau wird oder - an Wasserfällen - ganz aufreißt (vgl. dazu u. S. 53 ff). Dies ist der wesentliche Grund, weshalb die Kalktuffbildung sich auf die Gefällsteilen konzentriert.

Es ist also festzuhalten, daß die von den Jahreszeiten unabhängigen Geländefaktoren Gefälle, Bachbreite und Tiefe in Verbindung mit der Stärke der Quellschüttung und der Fließgeschwindigkeit über die Größe der Austauschfläche entscheidend die Evasion von Kohlendioxid und damit die Kalkausfällung beeinflussen.

6.3 Tuffbildung in Abhängigkeit von der Verdunstung

Um den Einfluß der Verdunstung auf die rezente Kalktuffbildung zu ermitteln, wurde die Verdunstungshöhe zweimal pro Monat nach der *HAUDE*-Formel berechnet. Die hierfür notwendige Bestimmung des Sättigungsdefizits erfolgte mit Hilfe eines Aspirationspsychrometers nach *ASSMANN*, und zwar am Weißen- wie am Wedenbach jeweils am Fuß der stärksten Gefälle, wo die Austauschfläche Wasser/Luft am größten ist, weil dort mit einem Maximum der Verdunstung gerechnet werden durfte. Die ermittelten Werte - zwischen 0,319 (Weißenbach, 25.3.1991) und 2,450 m/Tag (Wedenbach, 12.7.1991) - wurden jeweils zur entsprechenden Kalziumionenreduktion in Beziehung gesetzt. Es konnte kein Zusammenhang festgestellt werden.

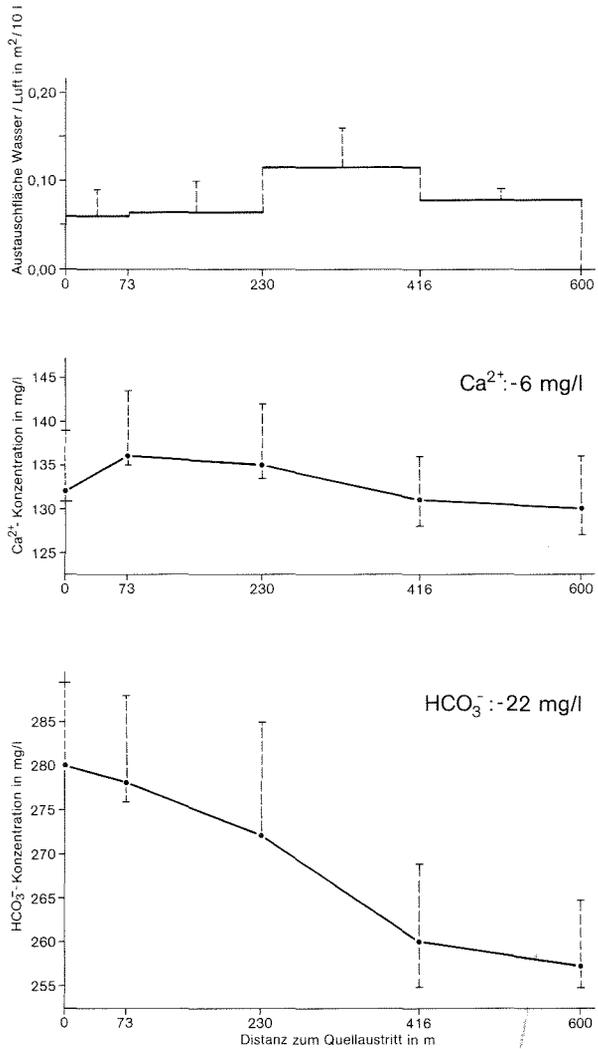


Abb. 4a: Kalzium- und Hydrogenkarbonationenkonzentration im Bachverlauf des Weißenbaches in Abhängigkeit von der Austauschfläche (Messung am 09.01.91, Quellschüttung 50 l/s)

Rezente Kalktuffbildung auf der Wiesentalb

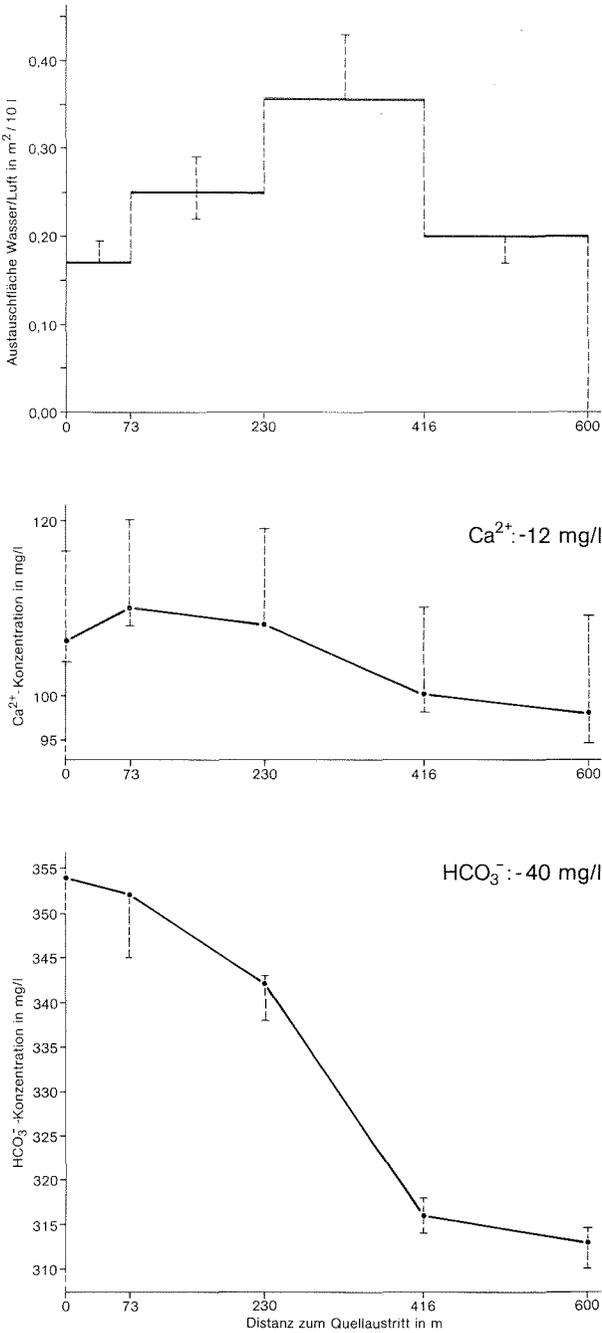


Abb.: 4b. Kalzium- und Hydrogenkarbonationenkonzentration im Bachverlauf des Weißenbaches in Abhängigkeit von der Austauschfläche (Messung am 18.12.90, Quellschüttung 19 l/s)

Unabhängig davon ergaben Geländebeobachtungen, daß die Verdunstung im Spritzwasserbereich von einer gewissen Bedeutung ist: Wassertropfen hinterlassen beim Verdunsten einen Kalkrückstand. Doch bestätigt das nur, daß die Verdunstung in den beobachteten Fällen nur eine geringe Rolle spielt: nur wenn sie lange wirken kann und wenn währenddessen kein Wassernachschub erfolgt, kommt es zu nennenswertem Kalkniederschlag.

6.4 Tuffbildung in Abhängigkeit von der Wassertemperatur

Um die Bedeutung der Wassertemperatur für die rezente Tuffbildung zu ermitteln, wurde überprüft, ob zwischen der Höhe des Rückgangs der Kalziumionenkonzentration und der Temperaturänderung zwischen zwei Meßpunkten ein Zusammenhang besteht. Die Überprüfung ergab bei sämtlichen Meßterminen Unabhängigkeit in allen Abschnitten. Dies ist auch plausibel, da bei ähnlicher Kalziumionenreduktion die Wassertemperatur zwischen Quellaustritt und dem letzten Meßpunkt teils steigt (bis $+0,6^\circ$ im August), teils fällt (bis $-0,7^\circ$ im Januar). Die gemessenen Änderungen der Wassertemperatur haben also offenbar keinen Einfluß auf die rezente Tuffbildung.

6.5 Tuffbildung in Abhängigkeit vom Kohlendioxidgehalt der umgebenden Luft

Zur Untersuchung der vermuteten Abhängigkeit wurde die Kohlendioxidkonzentration der Luft 10 cm über der Wasseroberfläche für die verschiedenen Intensitätszonen der Tuffbildung mit einem Ultrarotabsorptionsschreiber gemessen. Aus technischen Gründen mußten die Aufnahmen auf je 7 Tage im Januar, Mai und Juli beschränkt werden. Es wurde jeweils einmal pro Tag um 13.00 Uhr gemessen.

Die Aufnahmen zeigten, daß die Kohlendioxidkonzentration für Winter, Frühjahr und Sommer zwar unterschiedlich ist (Januar durchschnittlich 362 ppm, Mai 340 ppm, Juli 335 ppm), aber im Bachverlauf jeweils annähernd konstant. Folglich ist die Intensitätszonierung der Tuffbildung nicht durch unterschiedliche Kohlendioxidkonzentration der umgebenden Luft bedingt. Auch hat die im Winter höhere bzw. Frühjahr und Sommer niedrigere Kohlendioxidkonzentration der Luft keinen Einfluß auf das Ausfällungsverhalten, da bei gleicher Quellschüttung die Reduktion der Kalziumionenkonzentration im Bachwasser im Winter in genau der gleichen Größe erfolgt wie im Frühjahr oder Sommer.

6.6 Tuffbildung in Abhängigkeit vom Pflanzenbewuchs im Bachbett

Hierzu wurden die im Bachbett siedelnden Moose und Algen bestimmt. An Moosen konnten *Brachythetium rivulare*, *B. plumosum* und *B. rutabulum*, *Cratoneuron commutatum* und *Eurhynchium rusciforme* bestimmt werden. Bei den im Sommer sich ausbreitenden Algen ließ sich die knollig wachsende Gattung *Vaucheria* vom flächig siedelnden *Phormidium incrustatum* unterscheiden. Während der Wintermonate wird das gesamte Bachbett von einer schleimigen braun-schwarzen Schicht überzogen; hierbei handelt es sich um Kieselalgen, vorwiegend *Meridion circulare*.

Die Kartierung von Verteilung und Deckungsgrad der Moose und Algen - nach der Methode von *DAUBENMIRE* - lieferte eine Zonalität, die mit den Intensitätszonen der Tuffbildung in Verbindung gebracht werden kann:

- Im Abschnitt ohne Tuffbildung siedeln spärlich Moose (Deckungsgrad 5 - 25 %), Algen kommen nicht vor. Der spärliche Moosbewuchs dürfte hauptsächlich auf den losen Kalkschutt im Bachbett zurückzuführen sein, der aufgrund seiner Instabilität keinen geeigneten Untergrund für Pflanzenbewuchs bietet. Da in anderen Fällen Moose direkt am Quellaustritt wachsen, ist anzunehmen, daß chemische Kennwerte des Wassers nicht für den geringen Moosbewuchs verantwortlich sind. Wohl aber erklärt der niedrige pH-Wert das Fehlen von *Vaucheria* und *Phormidium*, da diese Algen neutrales bis alkalisches Milieu bevorzugen.
- Der Bereich intensiver Tuffbildung ist außer von Moosen reichlich von *Vaucheria* und *Phormidium* bewachsen (Deckungsgrad 75 %). Die Algen siedeln bevorzugt in Bereichen, die ständig von einem dünnen Wasserfilm überflossen werden. Ausschlaggebend für den starken Bewuchs dürfte die den ganzen Sommer über geringe Wassertemperatur - *Vaucheria* und *Phormidium* sind Kaltwasseralgen - in Verbindung mit der guten Durchlüftung des Wassers sein.
- Der an den Bereich intensiver Tuffbildung anschließende Abschnitt flächenhafter Tuffauskleidung des Bachbetts wird vom flächig wachsenden *Phormidium* dominiert (Deckungsgrad 95 %), *Vaucheria* und Moose kommen nicht vor.

Um die Wirkungsweise der Moose und Algen näher zu bestimmen, wurden einzelne Teile unter dem Mikroskop untersucht. Die verschiedenen Moose zeigen in ihrer Inkrustation keine Unterschiede. Auf den Moosen siedeln oftmals epiphytisch Algen. In deren gallertartiger Substanz schlägt sich Kalziumkarbonat bevorzugt nieder. Es kann aber auch die direkte Anlagerung von Kalziumkarbonat an die Moospflanze beobachtet werden, wobei nicht selten Stücke kleiner Zweige oder sonstige Materialien miteingeschlossen werden. Die Wuchsform der Moose führt stets zur Ausprägung eines sehr porösen Sediments.

Die Moose gestalten - vor allem im inkrustierten Zustand - das Kleinrelief des Bachbetts in einer die Kalktuffbildung begünstigenden Weise um: ihre Polster

6.6 Tuffbildung in Abhängigkeit vom Pflanzenbewuchs im Bachbett

Hierzu wurden die im Bachbett siedelnden Moose und Algen bestimmt. An Moosen konnten *Brachythetium rivulare*, *B. plumosum* und *B. rutabulum*, *Cratoneuron commutatum* und *Eurhynchium rusciforme* bestimmt werden. Bei den im Sommer sich ausbreitenden Algen ließ sich die knollig wachsende Gattung *Vaucheria* vom flächig siedelnden *Phormidium incrustatum* unterscheiden. Während der Wintermonate wird das gesamte Bachbett von einer schleimigen braun-schwarzen Schicht überzogen; hierbei handelt es sich um Kieselalgen, vorwiegend *Meridion circulare*.

Die Kartierung von Verteilung und Deckungsgrad der Moose und Algen - nach der Methode von *DAUBENMIRE* - lieferte eine Zonalität, die mit den Intensitätszonen der Tuffbildung in Verbindung gebracht werden kann:

- Im Abschnitt ohne Tuffbildung siedeln spärlich Moose (Deckungsgrad 5 - 25 %), Algen kommen nicht vor. Der spärliche Moosbewuchs dürfte hauptsächlich auf den losen Kalkschutt im Bachbett zurückzuführen sein, der aufgrund seiner Instabilität keinen geeigneten Untergrund für Pflanzenbewuchs bietet. Da in anderen Fällen Moose direkt am Quellaustritt wachsen, ist anzunehmen, daß chemische Kennwerte des Wassers nicht für den geringen Moosbewuchs verantwortlich sind. Wohl aber erklärt der niedrige pH-Wert das Fehlen von *Vaucheria* und *Phormidium*, da diese Algen neutrales bis alkalisches Milieu bevorzugen.
- Der Bereich intensiver Tuffbildung ist außer von Moosen reichlich von *Vaucheria* und *Phormidium* bewachsen (Deckungsgrad 75 %). Die Algen siedeln bevorzugt in Bereichen, die ständig von einem dünnen Wasserfilm überflossen werden. Ausschlaggebend für den starken Bewuchs dürfte die den ganzen Sommer über geringe Wassertemperatur - *Vaucheria* und *Phormidium* sind Kaltwasseralgen - in Verbindung mit der guten Durchlüftung des Wassers sein.
- Der an den Bereich intensiver Tuffbildung anschließende Abschnitt flächenhafter Tuffauskleidung des Bachbetts wird vom flächig wachsenden *Phormidium* dominiert (Deckungsgrad 95 %), *Vaucheria* und Moose kommen nicht vor.

Um die Wirkungsweise der Moose und Algen näher zu bestimmen, wurden einzelne Teile unter dem Mikroskop untersucht. Die verschiedenen Moose zeigen in ihrer Inkrustation keine Unterschiede. Auf den Moosen siedeln oftmals epiphytisch Algen. In deren gallertartiger Substanz schlägt sich Kalziumkarbonat bevorzugt nieder. Es kann aber auch die direkte Anlagerung von Kalziumkarbonat an die Moospflanze beobachtet werden, wobei nicht selten Stücke kleiner Zweige oder sonstige Materialien miteingeschlossen werden. Die Wuchsform der Moose führt stets zur Ausprägung eines sehr porösen Sediments.

Die Moose gestalten - vor allem im inkrustierten Zustand - das Kleinrelief des Bachbetts in einer die Kalktuffbildung begünstigenden Weise um: ihre Polster

zwingen das abfließende Wasser entweder zu Umwegen oder in übersteilte Strecken, führen damit zu Verwirbelungen und erzeugen Spritzwasser, so daß es zu einer - allerdings nicht quantifizierbaren - Vergrößerung der Austauschfläche Wasser/Luft kommt. Dadurch wird der Evasionsprozeß von Kohlendioxid und damit die Kalkausscheidung in starkem Maße begünstigt.

Im Gegensatz zu den Moosen besitzen manche Algen die Fähigkeit, aktiv Kalk zu fällen. Um zu überprüfen, ob aktive phytogene Kalkfällung von Bedeutung ist, wurden 24-Stunden-Messungen durchgeführt, d.h. die Reduktion der Kalziumionenkonzentration in Abhängigkeit vom Kohlendioxidgehalt der Luft im Tagesgang untersucht: Wäre aktive phytogene Kalkfällung von Bedeutung, so müßte vor allem im Frühjahr und Sommer zu Zeiten stärkster Photosynthese vermehrt Kalziumkarbonat ausfallen. Dies ist jedoch - wie Abb. 5 zeigt - nicht der Fall. Die Bedeutung der Algen für die Entstehung von Kalktuff liegt vielmehr in Niederschlag und Fixierung bereits ausgefallenen Kalziumkarbonats. Medium hierfür sind die von den Membranen der Algen gebildeten Schleime (vgl. dazu u. S. 56 ff).

6.7 Das Ausmaß der Kalktuffneubildung im jahreszeitlichen Verlauf

Aus der gemessenen Reduktion der Kalziumionenkonzentration läßt sich die ausgefallte Menge an Kalziumkarbonat näherungsweise berechnen. Die Überschlagsrechnung ergab gerundet für alle Monate eine Ausfällung von 0,1 g Kalziumkarbonat pro cm^2 . Hierbei wurde vereinfachend angenommen, daß alle Kalziumionen, die im chemischen Sinne ausfallen, sich auch in Form von Kalziumkarbonat niederschlagen. In der Realität wird jedoch sicherlich ein nicht unbeachtlicher Teil als Suspensoid weitertransportiert. Vor allem bei sehr hoher Quellschüttung dürften aus diesem Grund die errechneten Werte zu hoch sein. Des weiteren wurde auch nicht berücksichtigt, daß bereits gebildeter Tuff teilweise wieder erodiert werden kann. Dennoch geben die vereinfachten Berechnungen einen wichtigen Hinweis: In allen Monaten fällt annähernd dieselbe Menge an Kalziumkarbonat aus. Dies spräche für eine gleichmäßige Kalktuffbildung über das Jahr hinweg.

Dagegen steht die direkte Beobachtung des Bildungsprozesses. Anfang Dezember 1990 wurden an verschiedenen Stellen Teststäbe in das Bett des Weißenbachs eingebracht und laufend beobachtet. Zwei der Stäbe gingen während des Beobachtungszeitraums verloren, zwei konnten über neun Monate hinweg beobachtet werden. Der kurz unterhalb des Quellaustritts eingebrachte Stab zeigte bis zum August 1991 keinerlei Veränderung. Im Gegensatz dazu war der im Bereich der Hauptkaskade (C_{HK} in Abb. 2) eingebrachte Stab bereits Ende Dezember - also nach nur drei Wochen - von Kieselalgen überzogen, die Kalzitkristalle anzulagern begannen; bis Ende Februar entstand so eine zwar sehr dünne, aber kompakte Kalkhülle. Der Zuwachs war so gering, daß er nicht gemessen werden konnte. Ab April konnte dann das Wachstum von Phormidium beobachtet werden, das rasch

Rezente Kalkruffbildung auf der Wiesentalb

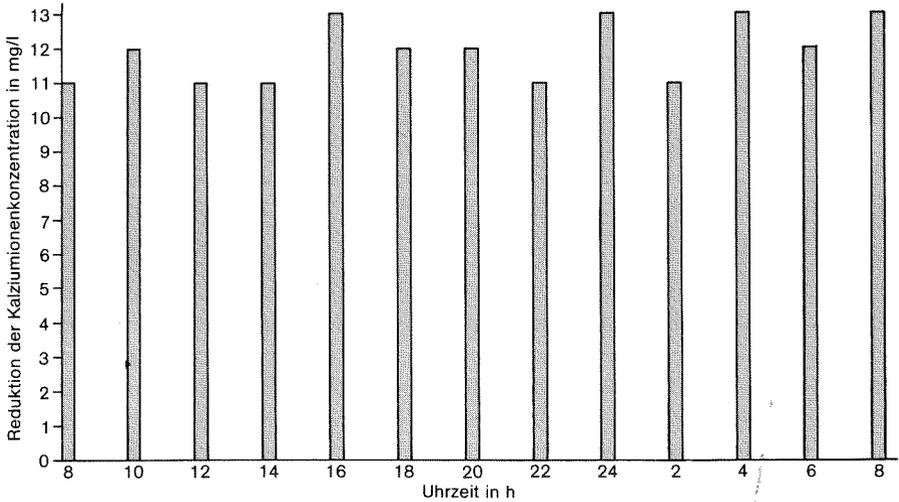
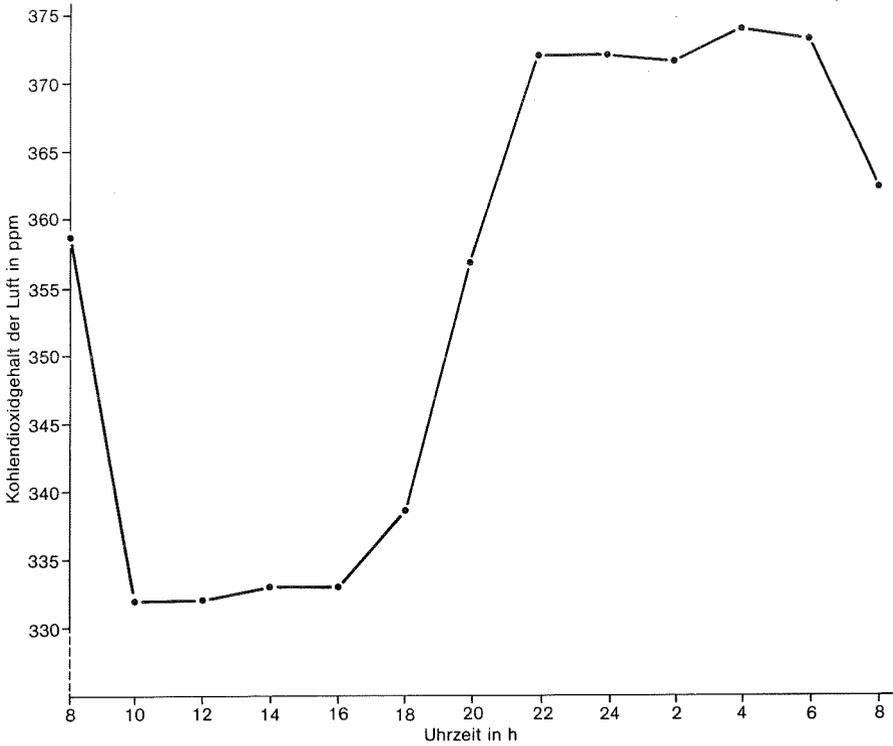


Abb. 5. Reduktion der Kalziumionenkonzentration im Weißenbach in Abhängigkeit vom Kohlendioxidgehalt der Luft im Tagesgang (24-h-Messung vom 11.07.91/8.00 Uhr bis 12.07.91/8.00 Uhr, Quellschüttung 12 l/s)

inkrustiert wurde: bis Ende August betrug der Zuwachs 3,8 mm! D.h. trotz annähernd konstanter Ausfällungsmenge an Kalziumkarbonat wächst die Tuffschicht im Spätfrühjahr und Sommer stärker als im Winter. Die Begründung hierfür ist in den Wachstumseigenschaften der Algen zu suchen. Wichtige Anhaltspunkte dafür liefert die Analyse mehrjähriger Kalktuffablagerungen.

6.8 Analyse mehrjähriger Kalktuffablagerungen

An 15 Bächen des Arbeitsgebiets wurden jeweils drei handstückgroße Kalktuffproben aus dem Sedimentkörper herausgeschnitten. Teile davon wurden nach entsprechender Aufbereitung massenspektrometrisch untersucht. Alle geprüften Kalktuffe bestehen danach hauptsächlich aus feinkörnigem Kalzit (ungefähr 96 %), der Anteil von Magnesit ist mit durchschnittlich 0,2 % sehr gering. Der Rest entfällt auf unlösliche Bestandteile, hauptsächlich Tone.

Die Handstücke lassen in nahezu allen Fällen einen regelmäßigen Wechsel von hellen kompakten und dunklen porösen Schichten erkennen. Die hellen Schichten sind mit 1-4 mm wesentlich dünner als die dunklen, die bis zu 18 mm dick sein können. Während die hellen Schichten meist gleichförmig verlaufen, zeigen die dunklen Schichten teilweise knollenförmige Auswölbungen (Abb. 6). Auffällig sind röhrenförmige Poren, die nur in den hellen Schichten vorkommen.

Die auffällige Zonierung der Kalktuffproben spiegelt einen jahreszeitlichen Wachstumsrhythmus wider, den die am Aufbau beteiligten Algen steuern. Das zeigt sich, wenn man Probenteile nach entsprechender Aufbereitung unter dem Binokular betrachtet. Löst man Proben einzelner Schichten in Salzsäure, so bleiben durchweg Algenfäden als Rückstände. Proben der mächtigeren dunklen Schichten hinterlassen Vaucheria- und Phormidiumfäden, sind also Sommerablagerungen. Die knollige Wuchsform von Vaucheria ist der Grund für die beschriebenen Auswölbungen der dunklen porösen Schichten. Die hellen Schichten beinhalten die kurzen Fäden von Kieselalgen, sind also Winterablagerungen.

Das Wachstumsverhalten verschiedener Algen zu verschiedenen Jahreszeiten erklärt also die unterschiedliche Schichtdicke und Porosität von hellen und dunklen Schichten. Das geringe Längenwachstum der Kieselalgen im Winter führt zu einer kompakten Anlagerung von Kalziumkarbonat, d.h. es bildet sich ein gleichförmiges Sediment ohne große Hohlräume. Im Gegensatz dazu läßt das rasche Längenwachstum von Phormidium und Vaucheria im Sommer ein poröses Sediment entstehen. Die großen Hohlräume zwischen den einzelnen inkrustierten Fäden und zahlreiche Materialeinschlüsse führen zu der dunklen Farbe.

Bei den nur in den hellen Schichten vorkommenden röhrenförmigen Poren handelt es sich um inkrustierte Zuckmückenlarvenröhren. Das Larvenstadium der Zuckmücken wird im Herbst erreicht, es kommt zur Absonderung eines klebrigen

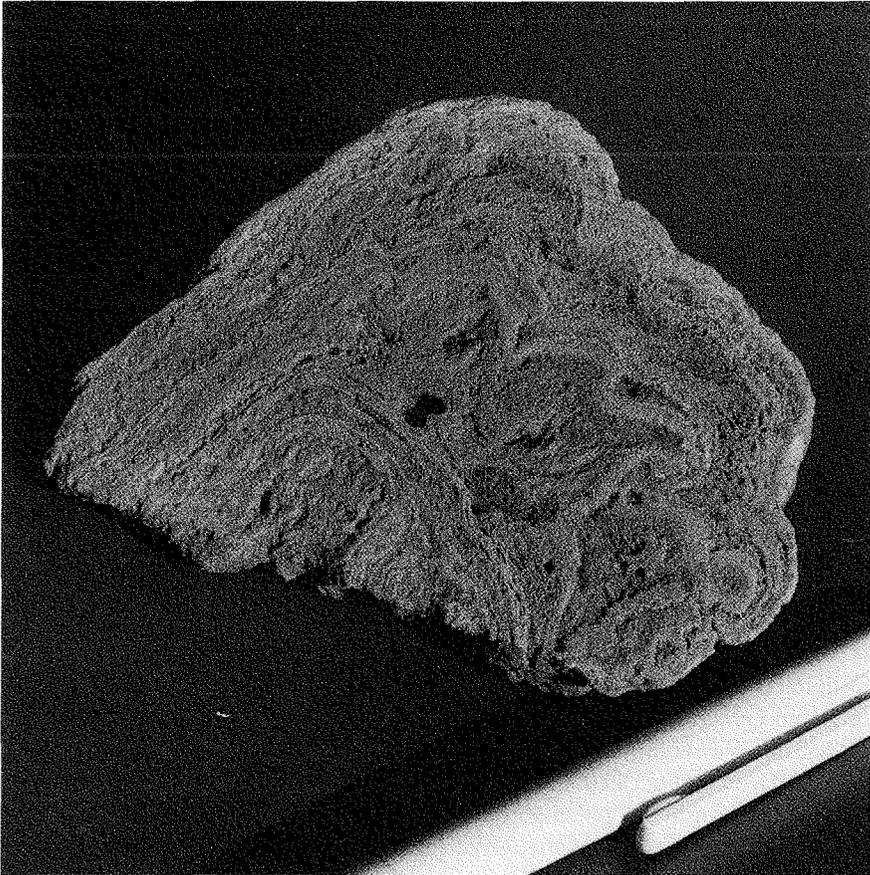


Abb. 6: Querschnitt eines Handstücks aus dem Bereich der Kaskaden (III) des Weißenbaches

Sekrets, weshalb die Röhrenchen rasch inkrustiert werden. Ungefähr im April des folgenden Jahres schlüpfen die Mücken und hinterlassen die röhrenförmigen Gänge. Aus diesem Grunde müssen die Schichten, in denen keine Röhrenporen vorkommen - also die dunklen porösen - in der Zeit von April bis in den Herbst gebildet worden sein. Die Bestimmung der hellen Schichten als Winter-, der dunklen als Sommerablagerungen wird dadurch zusätzlich abgesichert.

Als Ergebnis der Analyse mehrjähriger Kalktuffe im Hinblick auf den zeitlichen Ablauf der Tuffbildung ist also festzuhalten, daß bei ungefähr gleicher Kalziumkarbonatausfällung die Wachstumseigenschaften der Algen entscheidend sind für Struktur und Mächtigkeit der Ablagerungen. Im Herbst und Winter führen flächig wachsende Kieselalgen zu einer hellen, kompakten gleichförmigen Schicht von 1-4 mm Stärke, während rasches Längenwachstum von *Phormidium* und *Vaucheria* ab dem Frühjahr eine dunkle, poröse, teilweise knollige Schicht von bis zu 18 mm Mächtigkeit entstehen läßt.

7 Gesamtergebnis

Die Untersuchungen an zwei Bächen lieferten begründbare Hypothesen zur Beantwortung der eingangs formulierten Fragen:

1. Regionale Verbreitung und Ausmaß der Kalktuffneubildung:

Kalktuffneubildung tritt nur an bestimmten Stellen im Untersuchungsgebiet auf, also keineswegs an allen Quellaustritten und Wasserläufen. Erklären läßt sich das durch die Beobachtung, daß Tuffbildung häufig erst in einer gewissen Entfernung vom Quellpunkt einsetzt. Durch Wasseranalysen konnte nachgewiesen werden, daß das Wasser in diesen Fällen untersättigt, also kalkaggressiv, austritt und erst in einiger Distanz zum Quellaustritt den Gleichgewichtszustand bzw. Übersättigung erreicht und damit die potentielle Möglichkeit, Kalk abzuscheiden. Es ist zu vermuten (wäre aber noch durch weitere Untersuchungen zu belegen), daß Kalkuntersättigung der austretenden Wässer ein häufiger auftretendes Phänomen ist, das Fehlen von Kalktuffbildung an vielen Quellen und Wasserläufen der Alb demnach etwas ganz Normales wäre.

Wo Kalktuffbildung zu beobachten ist, tritt sie jeweils im Bereich vergrößerter Austauschflächen Luft/Wasser auf, insbesondere dort, wo das Wasser unterhalb der Ausstriche harter Gesteinsbänke - also in Steilstrecken - nicht konzentriert, sondern breitflächig abfließt. Als Zuwachs im Bereich intensivster Tuffbildung wurden während der neun Beobachtungsmonate maximal 3,8 mm gemessen.

2. *Faktoren, die die rezente Kalktuffbildung beeinflussen, und deren Wirkungszusammenhang:*

Damit es zu Tuffbildung kommen kann, muß Übersättigung des Wassers an Kalziumkarbonat erreicht werden. Der Zustand der Übersättigung stellt sich an den beobachteten zwei Bächen erst eine ganze Strecke unterhalb des Quellaustritts als Folge der Evasion von Kohlendioxid und weiterer Kalklösung ein. Das Erreichen des Gleichgewichtszustandes bzw. leichte Übersättigung führt noch nicht zwangsläufig zur Kalkausfällung. Erst wenn sich dem - im chemischen Sinn - ausgefallenen Kalziumkarbonat Anlagerungsmöglichkeiten bieten, kommt es zu Tuffbildung. Vor allem die gallertartige Substanz der Algen ist der bevorzugte Niederschlagsort; sie hält die Kalzitkristalle auch gegen die Strömung zurück. Moose führen zum einen aufgrund ihrer Wuchsform zu einer Vergrößerung der Austauschfläche und beschleunigen somit die Kohlendioxidabgabe von Wasser an die Luft. Zum anderen bieten sie Siedlungsraum für epiphytische Algen und fangen als Reusen Kleinpartikel auf.

Im Bereich intensivster Kalkabscheidung wirken eine Reihe Faktoren verstärkend zusammen: Gefällszunahme in Verbindung mit größerer Breite, geringerer Bachtiefe und stark variierender Fließgeschwindigkeit bewirken eine Vergrößerung der Austauschfläche, so daß vermehrt Kohlendioxid entweichen kann. Gleichzeitig stellen diese morphologischen Merkmale der Bachgerinne gute Siedlungsbedingungen für Moose und Algen bereit, so daß dem stark übersättigten Wasser ausreichend Kristallisationsmöglichkeiten zur Verfügung stehen. Primär inkrustierte Teile bilden aufgrund ihrer rauhen Oberfläche wiederum gute Anlagerungsmöglichkeiten, der Prozeß verstärkt sich damit selbst.

Der Rückgang der Kalkausfällung in geringer geneigten Bereichen bestätigt diese Wirkungszusammenhänge. Zonen geringeren Gefälles werden durch weniger widerständige Gesteinsschichten gebildet, so daß die Tiefenerosion zunimmt. Das bedingt größere Bachtiefe bei geringerer Breite und führt zu einer Verminderung der Austauschfläche. Außerdem fehlen die Wuchsbedingungen für Moose meist völlig, nur flächig wachsende Algen siedeln am Bachgrund. Damit sind die Bedingungen für die Kalkausfällung ungünstiger. Die flächig wachsenden Algen führen zu einer kompakten Tuffschicht, die das Bachbett eben auskleidet.

Ein Einfluß von Verdunstung, Kohlendioxidgehalt der Luft sowie der Wassertemperatur auf die Kalktuffbildung konnte nicht nachgewiesen werden. Es führen also einerseits die tages- und jahreszeitlich unabhängigen Geländefaktoren - welche die Größe der Austauschfläche Wasser/Luft bestimmen - in Verbindung mit der Stärke der Quellschüttung zur Kalziumkarbonatausfällung im chemischen Sinn. Andererseits ermöglicht erst das jahreszeitlich gebundene Wachstum von Algen und Moosen Niederschlag und Fixierung des ausgefallenen Kalziumkarbonats und bedingt damit die eigentliche Tuffbildung.

3. *Jahreszeitlicher Verlauf des Bildungsprozesses:*

Obwohl die ausgefällte Menge an Kalziumkarbonat über das Jahr hinweg annähernd konstant ist, ist das Ausmaß der Tuffneubildung im Frühjahr und Sommer deutlich größer als in den Herbst- und Wintermonaten, weil sie durch den Lebensrhythmus der die Kalktuffbildung fördernden Algenarten gesteuert wird: die dunkle poröse - auf das Wachstum von *Phormidium* und *Vaucheria* zurückzuführende - Sommerschicht der Sedimente ist ungefähr viermal so dick wie die helle kompakte - durch die Entwicklung von Kieselalgenmatten bedingte - Winterablagerung.

Es ist abschließend nochmals zu betonen, daß die Ergebnisse lediglich anhand zweier Untersuchungsbeispiele gewonnen wurden. Es wäre zu prüfen, inwieweit die ermittelten Zusammenhänge darüber hinaus Gültigkeit besitzen.