

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ
GEOTECHNISCHE SERIE

herausgegeben von der

Schweizerischen Geotechnischen Kommission

(Organ der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft)

MATÉRIAUX POUR LA GÉOLOGIE DE LA SUISSE
SÉRIE GÉOTECHNIQUE

publiés par la

Commission Géotechnique Suisse

(Organe de la Société Helvétique des Sciences Naturelles)

Lieferung 78

Herkunft und Zusammensetzung von Silt in fließenden Gewässern und Stauseen – Geotechnische Abtragsanalysen im Alpenraum

M. Ammann

1988

In Kommission bei Kümmerly & Frey AG, Geographischer Verlag, Bern

VORWORT DER SCHWEIZERISCHEN GEOTECHNISCHEN KOMMISSION

Die vorliegende Arbeit untersucht Zusammensetzung und Herkunft der Silte, die als Schwebefracht in unseren Flüssen transportiert und als Schlamm in künstlichen und natürlichen Becken abgelagert werden. Die Silte stellen mengenmässig eine sehr wichtige, aber wenig erforschte und schwer erfassbare Sedimentgruppe dar, da wegen der geringen Korngrösse komplexere analytische Methoden zur Untersuchung angewendet werden müssen. Gute Kenntnis der im Fluss transportierten Fracht lässt Rückschlüsse auf deren Herkunftsgebiet zu, mit quantitativen Untersuchungen lassen sich zudem Abtragsintensitäten abschätzen. Dies sind wichtige Grundlagen, um die ständig fortschreitende Bodenerosion, die durch die aktuelle Umweltzerstörung noch verstärkt wird, besser kontrollieren zu können.

Der Autor erarbeitet ein Verfahren (geotechnische Abtragsanalyse) für eine relativ-quantitative Bestimmung der Schlammherkunft, das dem aktuellen Stand der Technik und der Wissenschaft entspricht. Es wird auch in wissenschaftlicher und praktischer Hinsicht Bezug genommen auf Ergebnisse von Laborversuchen oder angewandten Methoden.

Das vom Autor erarbeitete Verfahren für eine relativ-quantitative Bestimmung der Schlammherkunft wird auf viele ausgewählte Gebiete der Schweiz angewendet. Besonders wird das Einzugsgebiet des Sihlsees bearbeitet. Kombiniert mit anderen Untersuchungsmethoden bildet hier die Schlammabtragsanalyse eine wertvolle geotechnische Grundlage.

Die Schweizerische Geotechnische Kommission freut sich, diesen aktuellen Artikel in ihrer Reihe «Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie» aufnehmen zu können, und dankt dem Autor für seine wertvolle und detaillierte Arbeit.

Die Drucklegung wurde dank einem namhaften Beitrag an die Druckkosten aus dem Jubiläumsfonds 1930 der ETH-Zürich möglich, wofür sich die Kommission bestens bedanken möchte.

Für den Inhalt von Text und Figuren ist der Autor alleine verantwortlich.

Zürich, Oktober 1988

Der Präsident der Schweizerischen
Geotechnischen Kommission
C. Schindler

VORWORT DES VERFASSERS

Im Februar 1987 reichte ich die hier vorliegende Arbeit an der Abteilung für Naturwissenschaften der ETH-Zürich als Dissertation ein. Ich verdanke es der Anregung und Unterstützung von Prof. Dr. C. Schindler, dass ich diese Arbeit jetzt als Band der Beiträge zur Geologie der Schweiz (Geotechnische Serie) einem weiteren Leserkreis zugänglich machen kann. Ebenso möchte ich Dr. R. Kündig und M. Liniger danken, die die Druckbegleitung organisierten und überwachten.

Prof. Dr. E. Dal Vesco hatte wenige Monate vor seinem unerwarteten Tode die Grundidee zur vorliegenden Arbeit gelegt. Nach seinem Tode im Februar 1980 erklärte sich Prof. Dr. K. Hsu bereit, vorübergehend die Leitung meiner Arbeit zu übernehmen. Im Jahre 1982 begann Dr. C. Schindler seine Lehrtätigkeit an der ETH-Zürich als Professor für Ingenieurgeologie in der Nachfolge von Prof. Dal Vesco. Bis zu diesem Zeitpunkt hatte ich bereits einen wesentlichen Teil der nötigen Daten gesammelt und das Konzept der Arbeit entwickelt. Trotzdem war Prof. Schindler sofort bereit, das Referat für die Doktorarbeit zu übernehmen. Er regte mein Interesse für die Betrachtung weiterer Gesichtspunkte an und begleitete die Endphase meiner Arbeit, die sich leider sehr verzögerte, als ich Anfang 1983 eine Stelle in der Privatwirtschaft antrat. Prof. Schindler nahm auch Kontakt auf zu Prof. Dr. D. Vischer und gewann ihn für die Übernahme des Korreferats. Ich verdanke Prof. Vischer wesentliche Anregungen und Hilfestellungen.

Während der Zeit der Datensammlung und Datenauswertung konnte ich auf die Hilfe folgender Herren zählen: Dr. W. Baumann unterstützte mich bei der Probennahme in verschiedenen Seen. Er ist grundlegend mitverantwort-

lich für das Gelingen meiner Arbeit während dieser Phase. Herr O. Martini von den Blenio Kraftwerken AG ermöglichte die Probennahme im Bacino di Malvaglia. In diesem Stausee konnte ich den Kastengreifer des Geologischen Instituts der Universität Bern einsetzen, der mir von Prof. Dr. A. Matter zur Verfügung gestellt wurde. In Zusammenarbeit mit Dr. H. Engelsing entnahm ich die Proben im Forggensee. Ich erinnere mich noch heute gerne an die Abende, an denen er mich in die Essgewohnheiten der Bayern eingeführt hat. Leberknödel mit Weissbier ist bis heute eine meiner Lieblingsspeisen geblieben. Für zahlreiche Hinweise und Tips bezüglich der Anwendung des Röntgendiffraktometers und der Auswertung der Messdaten bin ich Dr. A. Stahel zu Dank verpflichtet.

Auch während der Endphase meiner Arbeit konnte ich auf Unterstützung zählen. Dr. N. Liskay von der Landeshydrologie stellte mir Daten von Schwebstoffmessungen zur Verfügung. Dr. F. Matousek und Dr. A. Lambert lasen mein Manuskript kritisch durch. Auf ihre Anregung hin konnte ich meinen Text wesentlich verbessern. Weiter danke ich für Ratschläge, Diskussion und Hilfestellungen Frau Dr. M. Niggli, Dr. A. Baumann, M. Greller, Dr. W. Labhart, Dr. H. Naef, K. Nyffenegger, Dr. B. Oddson und P. Verstraete. Durch sie blieb meine Verbindung zur ETH auch während der Jahre erhalten, als ich in der Privatwirtschaft zu arbeiten begonnen hatte.

Die Druckkosten für diese Arbeit wurden in verdankenswerter Weise je zur Hälfte von der Schweizerischen Geotechnischen Kommission und dem Jubiläumsfonds 1930 der ETH-Zürich gedeckt.

Die Stiftung Dr. Joachim de Giacomi leistete einen Beitrag an die Druckkosten der farbigen Beilage.

Meinrad Ammann

INHALTSVERZEICHNIS

| | | | | |
|--|-------------|----------|--|-----------|
| VORWORT DER SCHWEIZERISCHEN GEOTECHNISCHEN KOMMISSION | III | 2.6.1 | Aufschlüsselung der Proben in Kompo- nenten | 15 |
| VORWORT DES VERFASSERS | IV | 2.6.2 | Korngrößenabhängigkeit der Mineral- gehalte | 16 |
| INHALTSVERZEICHNIS | V | 2.6.3 | Relativ-quantitative Herkunftsanalyse | 19 |
| VERZEICHNIS DER FIGUREN UND BEILAGEN | VII | 2.6.3.1 | Theoretische Grundlage | 19 |
| VERZEICHNIS DER TABELLEN | IX | 2.6.3.2 | Relativ-quantitative Herkunftsanalyse bei Bachverzweigungen | 20 |
| KURZFASSUNG | XI | 2.6.3.3 | Relativ-quantitative Herkunftsanalyse für Seeablagerungen | 22 |
| ABSTRACT | XIII | 3 | AKTUOGEOLOGISCHE SCHLAMM- UNTERSUCHUNGEN AN STAUSEEN UND DEREN EINZUGSGEBIETEN | 25 |
| 1 EINLEITUNG | 1 | 3.1 | Einleitung und Resultatübersicht | 25 |
| 1.1 Problemstellung | 1 | 3.2 | Sihlsee | 25 |
| 1.2 Wichtigste Begriffe und Definitionen | 1 | 3.2.1 | Proben aus dem See | 25 |
| 1.2.1 Verwitterung, Abtrag, Transport, Ablagerung | 2 | 3.2.2 | Abschätzung der im Sihlsee abgelagerten Sedimentmenge | 31 |
| 1.2.2 Abtragsmaterial und Transportgut | 3 | 3.2.3 | Herkunftsdeutung | 31 |
| 2 UNTERSUCHUNGSMETHODIK | 7 | 3.2.4 | Abtragsintensität im Einzugsgebiet des Sihlsees | 34 |
| 2.1 Übersicht über das erarbeitete Unter- suchungsverfahren | 7 | 3.2.5 | Schlammproben aus dem Einzugsgebiet des Sihlsees | 35 |
| 2.2 Probenentnahme | 7 | 3.3 | Untersuchungen über das Einzugsgebiet der Minster (Teileinzugsgebiet des Sihl- sees) | 35 |
| 2.2.1 Proben aus Seen | 7 | 3.3.1 | Feldkartierung «Gewässersohlenqualifi- zierung und Kartierung der Schlammquel- len im Einzugsgebiet der Minster» | 35 |
| 2.2.2 Proben aus Bächen und Flüssen | 7 | 3.3.1.1 | Thematisch ähnliche Kartierungsbeispiele aus der Literatur | 38 |
| 2.3 Schlammaufarbeitung und Korngrößen- analyse | 8 | 3.3.1.2 | Kartierungselemente | 38 |
| 2.4 Mikroskopische und chemische Unter- suchungsmethoden | 10 | 3.3.1.3 | Zusammenfassung der wesentlichen Er- gebnisse der Kartierung | 39 |
| 2.4.1 Dünnschliffuntersuchung | 10 | 3.3.2 | Detaillierte Auswertung der Feldkartie- rung | 39 |
| 2.4.2 Schwermineralanalyse | 10 | 3.3.2.1 | Unterteilung des Minster-Einzugsgebietes in Felder und deren geologisch-geotechni- sche Qualifizierung | 39 |
| 2.4.3 Titrimetrische Karbonatanalyse | 10 | 3.3.2.2 | Qualifizierung der geologisch-geotechni- schen Baueinheiten im Einzugsgebiet der Minster | 45 |
| 2.4.4 Titrimetrische Bestimmung des Gehaltes an organischem Kohlenstoff | 10 | 3.3.3 | Repetierte Schlammuntersuchungen im Minster-Einzugsgebiet | 48 |
| 2.4.5 Bodenkennwerte | 11 | 3.3.4 | Quantifizierung des Schlammabtrages im Minster-Einzugsgebiet | 56 |
| 2.5 Röntgendiffraktometrie | 11 | 3.3.4.1 | Erarbeitung einer Schlammabtragskarte | 56 |
| 2.5.1 Apparatur und Messprinzip | 11 | 3.3.4.2 | Diskussion der Schlammabtragskarte und der Abtragsintensitäten | 59 |
| 2.5.2 Präparateherstellung | 12 | | | |
| 2.5.3 Messung | 12 | | | |
| 2.5.4 Datenauswertungs-Programm | 13 | | | |
| 2.5.5 Diskussion der einzelnen kristallinen Komponenten | 14 | | | |
| 2.6 Untersuchungskonzept für die Herkunfts- analysen | 15 | | | |

| | | | | | |
|----------|---|-----------|----------|--|------------|
| 3.4 | Bacino di Malvaglia | 61 | 6.2 | Gebietsabtrag im Grossbereich (Gesteinspakete) | 100 |
| 3.5 | Sufnersee | 64 | 6.2.1 | Abhängigkeit von den geologisch-geotechnischen Verhältnissen | 100 |
| 3.6 | Forggensee | 67 | 6.2.2 | Kartographische Erfassung | 101 |
| 4 | AKTUOGEOLOGISCHE SCHLAMM- UNTERSUCHUNGEN AN AUS- GEWÄHLTEN FLUSS- UND BACH- SYSTEMEN | 71 | 6.2.3 | Transport und Ablagerung | 102 |
| 4.1 | Einleitung und Resultatübersicht | 71 | 6.3 | Gebietsabtrag im Grössenbereich der Kluftkörper | 102 |
| 4.2 | Flem GR | 72 | 6.3.1 | Abhängigkeit von den geologisch-geotechnischen Verhältnissen | 102 |
| 4.3 | Furtbach ZH | 74 | 6.3.2 | Kartographische Erfassung | 102 |
| 4.4 | Gerewasser VS | 76 | 6.3.3 | Abtrag, Transport und Ablagerung | 102 |
| 4.5 | Gross Laui OW | 79 | 6.4 | Gebietsabtrag im Grössenbereich von Sand, Silt und Ton | 102 |
| 4.6 | Kander BE | 79 | 6.4.1 | Abhängigkeit von den geologisch-geotechnischen Verhältnissen | 102 |
| 4.7 | Landquart GR | 81 | 6.4.2 | Kartographische Erfassung | 104 |
| 4.7.1 | Übersicht | 81 | 6.4.3 | Transport und Ablagerung | 104 |
| 4.7.2 | Relativ-quantitative Abschätzungen | 84 | 6.4.4 | Fossile Schlamme | 104 |
| 4.7.3 | Schwebstoffmessungen der Landeshydrologie | 84 | 6.5 | Quantitative Angaben zum Gebietsabtrag | 104 |
| 4.8 | Plessur GR | 84 | 6.5.1 | Allgemeines | 104 |
| 4.8.1 | Welschtobelbach/Plessur | 85 | 6.5.2 | Abtragsraten und Ablagerungsraten (Beispiele aus der Literatur) | 105 |
| 4.8.2 | Fondeier Bach/Sapüner Bach | 85 | 6.5.3 | Schwebstoff-Abtragsformeln | 107 |
| 4.9 | Sitter/Urnäsch AI, AR, SG | 87 | 6.5.4 | Zusammenstellung über den Schlammabtrag in einigen Einzugsgebieten der Schweiz | 108 |
| 4.10 | Steinibach NW | 88 | 6.5.4.1 | Erhebung der Daten | 108 |
| 4.11 | Weisse Lütschine BE | 92 | 6.5.4.2 | Beziehung zwischen dem Quotient «Bachnetzlänge/Einzugsgebietsfläche» und dem Schlammabtrag | 108 |
| 5 | UNTERSUCHUNG FOSSILER SCHLAMME AUS EINER BOHRUNG AM WALENSEE | 95 | 6.5.4.3 | Zusammenfassung der Resultate | 111 |
| 5.1 | Problemstellung | 95 | 7 | ANWENDUNG UND AUSBLICK | 113 |
| 5.2 | Resultate der Schlammuntersuchungen | 95 | | LITERATURVERZEICHNIS | 115 |
| 6 | SCHLUSSFOLGERUNGEN UND SYNTHESE | 99 | | ANHANG | 119 |
| 6.1 | Folgerungen für Abtrag, Transport und Ablagerung von Feststoffen | 99 | | | |
| 6.1.1 | Kurzdiskussion der qualitativen Zusammenhänge | 99 | | | |
| 6.1.2 | Einteilung des Abtragsgutes | 100 | | | |

VERZEICHNIS DER FIGUREN UND BEILAGEN

| | | | | | |
|----|---|----|----|--|----|
| 1 | Probenaufarbeitung im Labor | 8 | 30 | Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet der Minster, Entnahmen 1980–1983, Komponente Muscovit | 52 |
| 2 | Annäherung der Korngrößenverteilungen | 9 | 31 | Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet der Minster, Entnahmen 1980–1983, Komponente Mikroklin | 53 |
| 3 | Prinzip des Röntgen-Pulverdiffraktometers | 11 | 32 | Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet der Minster, Entnahmen 1980–1983, Komponente Untergrund | 54 |
| 4 | Röntgenstrahl-Beugung an Netzebenen- schar eines Kristalls | 12 | 33 | Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet der Minster, Entnahmen 1980–1983, Komponente Organisches Ma- terial | 55 |
| 5 | Herstellung des Präparatepulvers | 12 | 34 | Schlammabtragskarte für das Einzugsgebiet der Minster | 60 |
| 6 | Nettointensität einer kristallinen Kompo- nente | 13 | 35 | Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Bacino di Malvaglia | 62 |
| 7 | Vergleich der %-Werte für Calcit, titrimet- risch resp. diffraktometrisch ermittelt | 14 | 36 | Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet des Bacino di Malvaglia | 63 |
| 8 | Vergleich der %-Werte für Dolomit, titri- metrisch resp. diffraktometrisch ermittelt | 14 | 37 | Geologisch-geotechnische Kartenskizze des Einzugsgebietes des Bacino di Malvaglia | 63 |
| 9 | Quarzgehalt, diffraktometrisch an 2 ver- schiedenen Peaks bestimmt | 15 | 38 | Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Sufnersee | 65 |
| 10 | Prozentbalken Gesamtprobe | 16 | 39 | Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet des Sufnersees | 66 |
| 11 | Probe Suf3, Calcit und Dolomit | 17 | 40 | Geologisch-geotechnische Kartenskizze des Einzugsgebietes des Sufnersees | 66 |
| 12 | Probe Suf3, Quarz100 und Quarz101 | 17 | 41 | Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Forggensee | 68 |
| 13 | Probe Suf3, Muscovit und Mikroklin | 17 | 42 | Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet des Lech | 69 |
| 14 | Probe Fo3, Calcit | 18 | 43 | Übersicht Einzugsgebiet Flem/Turnigla | 72 |
| 15 | Probe Fo3, Dolomit | 18 | 44 | Übersicht Einzugsgebiet Furtbach/Neben- bach von Otelfingen | 75 |
| 16 | Probe Fo3, Quarz100 und Quarz101 | 18 | 45 | Übersicht Einzugsgebiet Gerewasser/Ne- benbach | 77 |
| 17 | Probe Fo3, Muscovit und Mikroklin | 18 | 46 | Übersicht Einzugsgebiet Gross Laui/Alti- bach | 79 |
| 18 | Grundprinzip der relativ-quantitativen Her- kunftsanalyse | 21 | 47 | Übersicht Einzugsgebiet Kander/Schwarz- bach | 79 |
| 19 | Untersuchungsgebiete | 26 | 48 | Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet der Landquart | 82 |
| 20 | Zusammensetzung (Mittelwerte) und Trockendichte des Schlammes im Sihlsee | 27 | 49 | Geologisch-geotechnische Kartenskizze des Einzugsgebietes der Landquart | 82 |
| 21 | Calcit- und Dolomitgehalt im Sihlsee- schlamm in Abhängigkeit von der Tiefe | 29 | 50 | Übersicht Einzugsgebiete Welschtobel- bach/Plessur und Fondeier Bach/Sapüner Bach | 85 |
| 22 | Sedimentmächtigkeit im Sihlsee | 30 | 51 | Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Gübsensee | 88 |
| 23 | Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet des Sihlsees | 36 | | | |
| 24 | Geologisch-geotechnische Kartenskizze des Einzugsgebietes des Sihlsees | 37 | | | |
| 25 | Unterteilung des Minster-Einzugsgebietes in 18 Felder | 41 | | | |
| 26 | Gewässernetzlänge und ausgewählte Sohl- len- und Ufertypen in Abhängigkeit des geologisch-geotechnischen Aufbaus des Einzugsgebietes | 48 | | | |
| 27 | Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet der Minster, Entnahmen 1980–1983, Komponente Calcit | 49 | | | |
| 28 | Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet der Minster, Entnahmen 1980–1983, Komponente Dolomit | 50 | | | |
| 29 | Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet der Minster, Entnahmen 1980–1983, Komponente Quarz | 51 | | | |

| | | | | | |
|----|---|----|----|--|-----|
| 52 | Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet von Sitter und Urnäsch | 89 | 57 | Aufbau der fossilen Seebodenlehme bei Tiefenwinkel in Vergleich mit rezenten Schlamm aus Flüssen und Bächen | 96 |
| 53 | Geologisch-geotechnische Kartenskizze des Einzugsgebietes von Sitter und Urnäsch | 89 | 58 | Beziehung zwischen dem Quotient «Gewässernetzlänge (inkl. tr. Ger.)/ Einzugsgebietsfläche» und der Schlammabtragsintensität | 110 |
| 54 | Übersicht Einzugsgebiet Steinibach/Koh- lerbach | 90 | | | |
| 55 | Übersicht Einzugsgebiet Weisse Lutschine/ Sefinen Lutschine | 93 | | | |
| 56 | Schlammmentnahmeorte für die Untersu- chung der fossilen Seebodenlehme bei Tiefenwinkel | 95 | | | |

Beilage Feldkartierung:

«Gewässersohlenqualifizierung und Kartierung
der Schlammquellen im Einzugsgebiet der Min-
ster»

VERZEICHNIS DER TABELLEN

| | | | | | |
|----|---|----|----|--|-----|
| 1 | Lockergesteinsklassifikation nach Korngrösse | 4 | 28 | Komponenten des Schlammes von Gross Laui/Altibach und Anteilbestimmung | 80 |
| 2 | Quantitative Erfassung des Transportgutes in Gewässern | 4 | 29 | Charakterisierung der Einzugsgebiete von Gross Laui und Altibach | 80 |
| 3 | Messbereiche des Diffraktometer-Messprogramms | 12 | 30 | Komponenten des Schlammes von Kander/Schwarzbach und Anteilbestimmung | 81 |
| 4 | Standardfehler der Mittelwerte der gemessenen kristallinen Komponenten | 15 | 31 | Charakterisierung der Einzugsgebiete von Kander und Schwarzbach | 81 |
| 5 | Die 7 Komponenten für die Schlammbeschreibung | 15 | 32 | Komponenten des Schlammes von Vereina-bach/Verstancabach und Anteilbestimmung | 83 |
| 6 | Abschätzung der Schlammmenge im Sihlsee | 32 | 33 | Charakterisierung der Einzugsgebiete von Vereinabach und Verstancabach | 83 |
| 7 | Geschätzter Schlammanteil von Minster, Sihl und Eubach im südlichen Sihlseebecken | 33 | 34 | Komponenten des Schlammes von Land-quart/Schanielabach und Anteilbestimmung | 84 |
| 8 | Das Einzugsgebiet des Sihlsees | 33 | 35 | Komponenten des Schlammes von Welsch-tobelbach/Plessur und Anteilbestimmung | 85 |
| 9 | Abschätzung der Herkunft des Schlammes im Sihlsee | 34 | 36 | Charakterisierung der Einzugsgebiete des Welschtobelbachs und der Plessur | 86 |
| 10 | Abschätzung der Abtragsintensität im Einzugsgebiet des Sihlsees | 34 | 37 | Komponenten des Schlammes von Sapüner Bach/Fondeier Bach und Anteilbestimmung | 86 |
| 11 | Qualifizierung der Felder «St» bis «Ho» | 42 | 38 | Charakterisierung der Einzugsgebiete des Sapüner Bachs und des Fondeier Bachs | 87 |
| 12 | Qualifizierung der Felder «Fa» bis «Mi4» | 43 | 39 | Schlamm- und Wasserproben aus dem Einzugsgebiet des Steinibachs und des Kohlerbachs | 90 |
| 13 | Qualifizierung der Felder «Su» bis «Wa» | 44 | 40 | Komponenten des Rückstandes der eingedampften Wasserproben von Steinibach/Kohlerbach und Anteilbestimmung | 91 |
| 14 | Qualifizierung der geologisch-geotechnischen Baueinheiten im Minster-Einzugsgebiet (abtragsanfällige Festgesteine) | 46 | 41 | Komponenten des Schlammes von Steini-bach/Kohlerbach und Anteilbestimmung, Schlamm des letzten Hochwassers vor dem 30.8.1982 | 91 |
| 15 | Qualifizierung der geologisch-geotechnischen Baueinheiten im Minster-Einzugsgebiet (kompakte Festgesteine und Lockergesteine) | 47 | 42 | Komponenten des Schlammes von Steini-bach/ Kohlerbach und Anteilbestimmung, Schlamm vom 30.8.1982 | 91 |
| 16 | Prozentanteile an den Verästelungsstellen | 57 | 43 | Komponenten des Schlammes von Steini-bach/Kohlerbach und Anteilbestimmung, Schlamm des letzten Hochwassers vor dem 5.11.1982 | 92 |
| 17 | SF-Werte der Felder im Minster-Einzugsgebiet und Klassenzugehörigkeit | 58 | 44 | Komponenten des Schlammes von Weisser Lutschine/Sefinen Lutschine und Anteilbestimmung | 93 |
| 18 | Klassenzuordnung der SF-Werte und entsprechende Schlammabtragsintensitäten | 60 | 45 | Charakterisierung der Einzugsgebiete der Weissen Lutschine und der Sefinen Lutschine | 94 |
| 19 | Bodenkennwerte der Sedimente im Bacino di Malvaglia | 64 | 46 | Komponenten des Schlammes von Gadmerwasser/Gentalwasser und Anteilbestimmung | 94 |
| 20 | Komponenten des Schlammes von Flem/ Turnigla und Anteilbestimmung | 73 | 47 | Grössenbereiche des Abtragsgutes | 100 |
| 21 | Charakterisierung der Einzugsgebiete von Flem und Turnigla | 74 | 48 | Kornverfeinerung durch Verwitterung und Transport | 101 |
| 22 | Komponenten des Schlammes von Furtbach/Nebenbach von Otelfingen und Anteilbestimmung, Probennahme Anfang Juli 1982 | 75 | 49 | Schlammabtrag in einigen Einzugsgebieten in der Schweiz | 109 |
| 23 | Komponenten des Schlammes von Furtbach/Nebenbach von Otelfingen und Anteilbestimmung, Probennahme Anfang August 1982, nach Regenperiode | 76 | | | |
| 24 | dito Tab. 23, Probe nach Verzweigung ca. 1 km weiter westlich entnommen | 76 | | | |
| 25 | Charakterisierung der Einzugsgebiete von Furtbach und Nebenbach von Otelfingen | 77 | | | |
| 26 | Komponenten des Schlammes von Gerewasser/Nebenbach und Anteilbestimmung | 78 | | | |
| 27 | Charakterisierung der Einzugsgebiete von Gerewasser und Nebenbach | 78 | | | |

KURZFASSUNG

Es ist das Ziel dieser Arbeit, die mengenmässig sehr wichtige, sonst aber wenig bekannte Sedimentgruppe der Silte zu untersuchen und Abklärungen in bezug auf deren Herkunft vorzunehmen. Silte werden vorwiegend als Schwebstoffe in den Gewässern transportiert und als *Schlamm* in Staubecken, in Seen oder im Meer abgelagert.

Der mineralische Aufbau der untersuchten Schlammproben stellt ein charakteristisches Abbild des geologisch-geotechnischen Aufbaus des Liefergebietes dar. Betrachtet man zudem verschiedene Kornverteilungen einer Schlammprobe (charakterisiert durch den D50-Wert der Kornverteilung), so zeigt sich teilweise eine starke Abhängigkeit des mineralischen Aufbaus des Schlammes vom D50-Wert der Kornverteilung. Dies hat zur Folge, dass allgemein nur Sedimentproben gleicher Korngrössenverteilung quantitativ miteinander verglichen werden können.

Für die Herkunftsabklärungen musste ein spezielles Untersuchungsverfahren neu erarbeitet werden (*geotechnische Abtragsanalyse*). Dieses umfasst als ersten Schritt die Aufarbeitung von Schlammproben zu vergleichbaren Korngrössenverteilungen. Anschliessend erfolgt die genaue Beschreibung der Schlammproben durch quantitative Bestimmung von sieben Komponenten, nämlich Calcit, Dolomit, Quarz, Mikroklin, Muscovit, organisches Material und Intensität der Untergundmessung bei der röntgenographischen Aufnahme. Als abschliessender Schritt wird die relativ-quantitative Aufschlüsselung ins Liefergebiet hinein vorgenommen. Dabei werden die relativen Lieferanteile (Herkunftsanalyse) der betrachteten Einzugsgebiete ohne Kenntnis der absoluten Mengen bestimmt.

Die Bestimmung der Schlammherkunft ist nur für ein einzelnes Tal oder eine geologisch-geotechnische Einheit als kleinstem Homogenitätsbereich möglich. Wo die eigentliche Desintegration des Ursprungsgesteins zum Schlammartikel (Schwebstoff) stattfindet (direkt am Aufschluss, zwischen Aufschluss und Gerinne oder erst im Gerinne selbst durch Abrieb von Geschiebekomponenten), kann nicht quantitativ erfasst werden.

An vielen Beispielen werden qualitative und relativ-quantitative Herkunftsabklärungen vorgenommen und mit dem geologisch-geotechnischen Aufbau des Einzugsgebietes verglichen. Die Testgebiete sind aufgrund ihres geologisch-geotechnischen Aufbaus ausgewählt worden.

Besonders eingehend wird das Einzugsgebiet des Sihl-sees untersucht. Nebst qualitativen Vergleichen werden zahlreiche relativ-quantitative Herkunftsabklärungen vorgenommen. Als Resultat ergab sich eine *«Schlammabtragskarte für das Einzugsgebiet der Minster»* (Teileinzugsgebiet des Sihl-sees). Aus einer Abschätzung des abgelagerten Schlammvolumens im Sihlsee wird die Schlammabtragsintensität (Abtragsvolumen/km² und Jahr) für das Minster-Einzugsgebiet zu 0.19 mm/a errechnet. Innerhalb des Minster-Einzugsgebietes zeigen sich aber gemäss der Schlammabtragskarte unterschiedliche Schlammabtragsintensitäten (0.02 – 1.5 mm/a, angenommene Dichte der Gesteine im Einzugsgebiet: 2.7 g/cm³). Diese grossen Unterschiede in der Abtragsbereitschaft können aus dem geologisch-geotechnischen Aufbau des Gebietes heraus verstanden werden. Tonig-mergelige Festgesteine mit schwacher Kornvermittlung und Tendenz zu Rutschungen sind für die teilweise hohen Abtragsintensitäten verantwortlich.

Das Gebiet der Minster wurde zudem geotechnisch kartiert (*«Gewässersohlenqualifizierung und Kartierung der Schlammquellen im Einzugsgebiet der Minster»*). Dabei wird der Zustand der Gewässersohle (eintiefend, umlagernd, ablagernd) erfasst. Weiter werden Bereiche, die nach geologischem Ermessen wesentlich zum Schlammabtrag beitragen (Schlammquellen), speziell auskartiert. In einer anschliessenden detaillierten Auswertung der Feldkartierung wurde die Beziehung zwischen den einzelnen Kartierungselementen (Gewässersohlentypen und Typen der Schlammquellen) und den ausscheidbaren geologisch-geotechnischen Baueinheiten untersucht. Dabei ergeben sich interessante, statistisch gesicherte Abhängigkeiten: Sowohl die Schlammquellen als auch der Charakter der Gewässersohle sind stark vom geologisch-geotechnischen Aufbau eines Einzugsgebietes abhängig. Als Beispiel zeigt die Baueinheit «Mergelschiefer + Mergelkalke» ein fast dreimal längeres Gewässernetz (inkl. trockene Gerinne) pro km² als die Baueinheit «Kalke». Noch grösser ist der Unterschied zwischen diesen Einheiten, wenn man die Anteile «Gewässersohle in Erosionszustand (im Lockergestein)» pro km² betrachtet. Die «Mergelschiefer + Mergelkalke» weisen dann einen siebenfach höheren Anteil als die «Kalke» auf.

Für zahlreiche Einzugsgebiete in der Schweiz wird die *Schlammabtragsintensität aus Literaturdaten* abgeleitet. Die ermittelten Werte liegen zwischen ca. 0.02 und ca. 0.6 mm/a. Ebenso wird der Wert «Gewässernetzlänge (inklusive trockene Gerinne) pro km² Einzugsgebiets-

fläche» für diese Beispiele bestimmt. Während der entsprechende Quotient für die meisten betrachteten Flussgebiete auf der Alpennordseite 1.2/km bis ca. 2.0/km beträgt, zeigen einige Einzugsgebiete im Tessin extrem hohe Werte (bis 3.57/km).

Das für die Herkunftsabklärungen erarbeitete Untersuchungsverfahren wird auch auf *fossile Silte* (Seeboden-

lehme) aus einer Bohrung bei Tiefenwinkel am Walensee angewendet. Mittels eines Vergleichs mit rezenten Schlammen aus Bächen und Flüssen kann gefolgert werden, dass die erbohrten Seebodensedimente nicht (oder nur zu einem geringfügigen Teil) durch Lokalbäche geschüttet wurden. Das Liefergebiet scheint Teile des heutigen Einzugsgebietes der Linth, der Seer und evtl. des Alpenrheins zu umfassen.

ABSTRACT

The purpose of this paper is the determination of the composition of silts and the investigation of their origin. Silt and siltstones represent an important category of detrital sediments. Silt is mainly transported as suspended loads by water and is deposited as mud in reservoirs, in lakes or in the sea.

It is shown, that the mineralogical structure of the examined mud samples depend strongly on the grain size and represent a characteristic image of the geological situation of the source area.

In determining the origin of the mud a suitable investigation procedure had to be developed (geotechnical erosion analysis). First the extracted mud has been separated into samples with comparable grain size distribution, then the concentration of 7 tracers was determined (calcite, dolomite, quartz, microcline, muscovite, organic material and back-ground intensity of the x-ray-measurements). Finally with the helps of tracer analysis the samples were assigned to the source areas. Further the erosion quotas can be determined quantitatively, if the total mud erosion of the area is known.

Several test areas were investigated. The main one is the Minster drainage area (affluent of the Sihlsee). The source area of the Minster was divided into 18 do-

main (single valleys or geological-geotechnical landscape unities as smallest homogeneity domains). The main result of this investigation is represented by the "mud erosion map" of the drainage area of the Minster. The mud erosion intensity of the 18 domains show variations by a factor of 70. From the mud volume in the Sihlsee a mean mud erosion intensity of 0.19 mm/year is estimated (rock density: 2.7 g/cm^3 in the lake drainage area) with deviations for the differentiated domains from 0.02 to 1.5 mm/year.

In addition the area of the Minster was geotechnically mapped. The condition of the river bed (deepening, re-depositing, depositing) was determined and areas showing important contributions to mud erosion were mapped. The interpretation showed distinct dependencies for example between river network length or river erosive parts and geological-geotechnical structures of the investigated area.

An evaluation of published data from numerous drainage areas in Switzerland gives a mud erosion intensity of about 0.02 to 0.6 mm/year.

The geotechnical erosion analysis was also employed on fossil silts (lake floor loams) from core samples from a borehole (Tiefenwinkel, Walensee).

1 EINLEITUNG

1.1 Problemstellung

In der vorliegenden Arbeit werden feinkörnige Sedimente im Korngrössenbereich der Silte untersucht (Tab. 1). Nebst der Erfassung einiger der Hauptkomponenten wird insbesondere ein Verfahren entwickelt, um die Beziehung zum Herkunftsgebiet zu untersuchen.

Die *Silte* (Lockergesteine) und die *Siltsteine* (Festgesteine) bilden eine sehr wichtige *Sedimentgruppe*. Zusammen mit den noch feinerkörnigen Gesteinen (Tone und Tonsteine) machen sie mengenmässig rund die Hälfte der weltweit vorhandenen Sedimentgesteine aus (PETTIJOHN 1975). In krassem Gegensatz zu dieser mengenmässigen Bedeutung steht aber der aktuelle Wissensstand über diese Gesteinsgruppe. Dies hängt im wesentlichen damit zusammen, dass die üblicherweise angewendeten klassischen Untersuchungsmethoden (insbesondere die Lichtmikroskopie) bei der Untersuchung der feinkörnigen detritischen Gesteine schwer anwendbar sind und weiterführende Methoden erst in jüngerer Zeit entwickelt wurden. Untersuchungen und Herkunftsabklärungen an Silten stellen deshalb primär grosse Probleme bezüglich der Untersuchungsmethodik.

Im Gegensatz zu Kies und Grobsand, die als Geschiebe im Kontakt mit der Gewässersohle bewegt werden, wird das Feinmaterial im Fluss in *Form von Schwebstoffen* transportiert. In der geologischen Forschung wurde der Untersuchung von rezentem und vor allem von fossilem Geschiebematerial (Kies!) grosse Bedeutung zugemessen. JÄCKLI (1948) veröffentlichte eine Arbeit über das rezente Geschiebe im Einzugsgebiet des Hinterrheins. Die rezenten Flusssande im Einzugsgebiet des Alpenrheins untersuchte später HAHN (1969). Betrachtet man die noch feinerkörnigen Sedimente, so fällt die an sich unlogische Tatsache auf, dass die mengenmässig grössere Sedimentmasse weniger intensiv untersucht wurde. Dies hängt einerseits mit den bereits erwähnten Schwierigkeiten der Untersuchung dieser feinkörnigen Sedimente zusammen, andererseits wird es mit abnehmender Korngrösse des Transportgutes auch immer schwieriger, eine Relation zwischen transportiertem Material und den Gesteinen im Einzugsgebiet zu finden. So schreibt schon JÄCKLI (1948) «...sind normalerweise die Schlammpartikel nicht herkunftstypisch, so dass man aus Schlammessungen vor der Mündung eines Flusses, wie sie äusserst systematisch z.B. von Krapf durchgeführt wurden, wohl über

die an der Untersuchungsstelle transportierte Menge, nicht aber über die Herkunft des Schlammes orientiert ist.»

Die vorliegende Arbeit will hier einhaken. Der Kenntnisstand über den Aufbau der Silte soll verbessert, weiter aber auch die Frage nach der Herkunftsabhängigkeit gestellt werden, d.h. inwieweit sich die Geologie des Einzugsgebietes im feinkörnigen Sediment niederschlägt. Dies macht die Betrachtung verschiedener Einzugsgebiete nötig.

Untersuchungen über die *Herkunft von Silten* stellen die Frage nach der Erkennbarkeit und Erfassbarkeit (Gebietsqualifizierung und Kartographie) der abtragsaktiven Bereiche in den untersuchten Einzugsgebieten. Dies hat praktische Bedeutung, da der Feststoffabtrag häufig den Interessen des Menschen zuwiderläuft. Die von den Gewässern transportierten Feststoffe (Geschiebe, Schwebstoffe und Schwimmstoffe) stellen ein bedeutendes Problem für die *Verlandung der Stauräume* dar. Der Mensch versucht dagegen Abhilfe auf drei Stufen zu schaffen:

- 1) Entfernen der Verlandungssedimente aus dem Nutzraum der Stauhaltungen. Dies geschieht durch Ausbaggern, Herausspülen oder Umlagern in den Totraum.
- 2) Abfangen der Sedimente, bevor sie in den Stauraum eintreten. Dies geschieht durch Geschiebefänger, Hochwasserumleitungsstollen, etc.
- 3) Massnahmen im Einzugsgebiet zur Verminderung des Abtrags, wie Bepflanzungen, Rutschsanierungen, Wildbachverbauungen.

Herkunftsabklärungen der Feststofffracht der Flüsse (hier insbesondere des feinkörnigen Sedimentanteils), vermögen indirekt einen Beitrag für die Abwehr der Verlandung in der dritten Stufe (Massnahmen im Einzugsgebiet) zu leisten.

Die heute vieldiskutierte *Problematik des Waldsterbens* und dessen mögliche Auswirkungen auf die Abtragstätigkeit in einem Einzugsgebiet verlangt eine genaue Registrierung des Istzustandes (Kartierung der Abtragstellen) für die Abschätzung der weiteren Entwicklung.

1.2 Wichtigste Begriffe und Definitionen

Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Begriffe und Definitionen kurz dargestellt, wie sie in der

vorliegenden Arbeit gebraucht werden. Auf die einzelnen Begriffe wird nur soweit eingetreten, als es für das Verständnis des Textes nötig erscheint.

1.2.1 Verwitterung, Abtrag, Transport, Ablagerung

a) Verwitterung

Unter Verwitterung wird die Veränderung des Gesteins verstanden, wenn es der Atmosphäre und der biologischen Tätigkeit ausgesetzt wird. Verwitterung greift an der Felsoberfläche, in Höhlen und Klüften und auf oder innerhalb der Lockergesteine an und macht damit das Gestein abtragsanfälliger. Die Verwitterungsintensität und der Verwitterungsmechanismus (physikalische und chemische Prozesse) sind von Klima, Gesteinstyp, Bodenbedeckung, Vegetation, Exposition, Luft- und Niederschlagsqualität und allenfalls anthropogenen Einflüssen wie Düngung etc. abhängig.

b) Abtrag, Transport, Ablagerung

In dieser Arbeit wird insbesondere Abtrag, Transport und Ablagerung der *Feststoffe* behandelt. Die chemischen Vorgänge werden nur insofern in die Betrachtung miteinbezogen, als sie mit Abtrag, Transport und Ablagerung von Feststoffen verknüpft sind.

Abtrag, Transport und Ablagerung bilden eine einheitliche Ereignisabfolge, bei der die potentielle Energie der Feststoffe (v.a. bei Massenbewegungen) und die kinetische Energie eines Transportmediums (Wasser, Wind) ausschlaggebend sind. Es ist eine grössere Energiemenge nötig, um einen Gesteinspartikel abzutragen (d.h. in Bewegung zu versetzen), als ihn zu transportieren (d.h. in Bewegung zu halten). Für den Abtrag von Feststoffen muss also eine gewisse Schwellenenergie überschritten werden. Den Zusammenhang zwischen Korngrösse, Fliessgeschwindigkeit des Wassers und Erosion/Transport/Sedimentation hat HJULSTRÖM (1935) formuliert.

Abtrag (+ Transport) erfolgt allgemein in Form von Erosion, Denudation und Massenbewegung. Abtragsprodukte sind Feststoffe und chemische Lösungsprodukte. Die Begriffe Erosion und Denudation werden uneinheitlich angewendet und teilweise wird der Transport der Abtragsprodukte in den Begriff miteinbezogen. Deshalb wird anschliessend umschrieben, wie die Begriffe in dieser Arbeit verstanden sein wollen. Dabei wird primär die Ereignisabfolge beim Abtrag von Feststoffen behandelt und der Begriff wenn nötig genauer qualifiziert (Bsp. Flusserosion, Winderosion).

Der Ausdruck *Gebietsabtrag* bezeichnet in der vorliegenden Arbeit nicht den Prozess des eigentlichen Loslösens (= Abtrag), sondern die abgetragene Masse an Fest- und Lockergestein. Der Gebietsabtrag kann als Abtragsintensität oder als Abtragsrate quantitativ beschrieben werden.

Unter *Flusserosion* versteht man den linienhaft wirkenden Abtrag des fliessenden Wassers. Die damit verbundene Eintiefung der Gerinnesohle (Tiefenerosion) verursacht häufig Massenbewegungen in den Uferbereichen, die je nach Fall grosse Kubaturen umfassen können. Durch Seitenerosion und weitere Tiefenerosion wird die Massenbewegung in Gang gehalten. Flusserosion, unterstützt durch Massenbewegungen, ist im Alpenraum der wesentliche Abtragsprozess. Es werden dabei Lösungsprodukte und Feststoffe in der Korngrösse von Ton, Silt, Sand, Kies und Steinen weggeführt.

Unter *Denudation* wird der flächenhaft wirkende Abtrag («Abspülung») verstanden. Denudation ist vor allem dort von Bedeutung, wo keine geschlossene Vegetationsdecke den Untergrund schützt, also in Trockengebieten mit sporadisch auftretenden Starkniederschlägen oder auch in Ackergebieten der gemässigten Breiten. Es werden dabei vor allem Partikel in Ton-, Silt- und Sandgrösse, aber auch chemische Lösungsprodukte abgetragen. Der eigentliche Abtragsprozess der Feststoffpartikel wird dabei durch die kinetische Energie des aufprallenden Wassertropfens verursacht (siehe HARTUNG 1959, FOURNIER 1960).

Massenbewegungen sind vor allem bei den Lockergesteinen von grosser Bedeutung. Diese Gesteinsmassen lassen sich charakterisieren durch die Kohäsion (c), den Winkel der inneren Reibung (ϕ), die Wassersättigungszahl (s_r) und die Reibung auf allenfalls vorhandenen Gleitflächen. Niederschlagsmenge und Niederschlagsintensität sind wesentlich für die Aktivierung und Beschleunigung der Massenbewegung, da dadurch die Sättigungszahl erhöht (die Masse wird grösser bei gleichbleibendem Volumen) und die Reibung auf der Gleitfläche und zwischen den einzelnen Komponenten erniedrigt wird. Die Massenbewegungen werden sehr oft durch Bäche und Flüsse ausgelöst, die den Fuss der bewegten Masse erodieren (Seiten- und Tiefenerosion). Der eigentliche interne Bewegungs- und Transportablauf ist aber ein selbständiger Mechanismus.

Abtragsrate: Angabe des Abtrags in $\text{m}^3/\text{km}^2 \times \text{a}$ oder in $\text{t}/\text{km}^2 \times \text{a}$. In der vorliegenden Arbeit wird speziell vermerkt, wenn nicht der gesamte Gebietsabtrag betrachtet wird. Die Kennzeichnung erfolgt dann beispielsweise als Schwebstoffabtragsrate. Um Abtragsraten (Angabe in $\text{m}^3/\text{km}^2 \times \text{a}$) sinnvoll vergleichen zu können, sollte jeweils bekannt sein, für welche Trockendichte die Angaben gelten.

Abtragsintensität: Angabe des mittleren Gebietsabtrags in mm/a . Es muss angegeben werden, für welche Trockendichte die Abtragsintensität errechnet wurde. In der Literatur werden die Abtragsintensitäten teilweise (wie in dieser Arbeit) für eine Trockendichte von $2.7 \text{ g}/\text{cm}^3$ errechnet, was der Dichte des anstehenden Felsens entspricht (Mittelwert). In verschiedenen Veröffentlichungen werden die Ablagerungsvolumina aber

auch direkt durch die entsprechenden Einzugsgebietsflächen dividiert, ohne den Dichteunterschied zwischen den Ablagerungen und dem Ursprungsgestein im Einzugsgebiet zu berücksichtigen!

Ablagerungsrate: Beispielsweise Angabe der Ablagerungen in einem See bezogen auf das Einzugsgebiet ($\text{m}^3/\text{km}^2 \times a$ oder $\text{t}/\text{km}^2 \times a$). Bei der Angabe in $\text{m}^3/\text{km}^2 \times a$ ist die zusätzliche Angabe der Trockendichte der Ablagerungen für Vergleiche nötig. Meist ist man aber auf Schätzungen der Trockendichte angewiesen.

Die *Ermittlung der Abtragsrate und -intensität* kann durch eine Direktmessung an einem fließenden Gewässer erfolgen (in der Praxis aufwendig und schwierig). Wenn das Einzugsgebiet mit einem See abschliesst, kann eventuell ermittelt werden, wie gross die im See abgelagerte Sedimentmenge ist (Ablagerungsrate). Sofern zusätzlich eine Schätzung der Sedimentmenge möglich ist, die den See passiert hat, so kann die Abtragsrate auf diesem Wege indirekt abgeschätzt werden. Abtragsraten und Abtragsintensitäten sind vom gewählten Abtragsniveau abhängig und stellen immer einen Mittelwert über das betrachtete Einzugsgebiet dar. Im Extremfall kann die Abtragsrate für ein gesamtes Einzugsgebiet sehr gering sein, obwohl innerhalb des Einzugsgebietes lokal Abtrag in einem gewaltigen Ausmass stattgefunden hat (Massenbewegungen und Rufen).

In den Staubecken des Alpenraumes spielt die *Ausfällung* und biogene Fixierung der *Lösungsfracht* eine sehr untergeordnete Rolle. In den grossen Alpenrandseen muss allerdings auf die Bedeutung der gelösten Fracht hingewiesen werden. So umschreibt MÜLLER (1966) die Verhältnisse im Bodensee mit folgenden Worten: «Die im Obersee biogen abgeschiedene Calcit-Menge kann grob mit 10–15% des klastischen Materials veranschlagt werden. Im Untersee liegen die Verhältnisse umgekehrt. Hier überwiegt der biogene Sedimentanteil bei weitem den klastischen. Als jährliche Sedimentationsrate kann auch hier eine Sedimentschicht von etwa 1 mm angenommen werden...».

Die *Ablagerung des Geschiebes* geschieht auf Schuttfächern im Mittellauf der Bäche und Flüsse oder im Deltabereich der Seen, sofern es nicht durch Geschiebesammler künstlich zurückgehalten wird. Abgelagertes Geschiebe kann stark mit Schwimmstoffen (v.a. Holz) durchsetzt sein, was dessen bautechnische Nutzung stark einschränkt.

Die *Ablagerung der Schwebstoffe* geschieht als Schlamm im Deltabereich, hauptsächlich aber deltafern über weite Bereiche eines Sees. Ebenso kommt es zu Ablagerungen von Schlamm in ufernahen Überflutungsreichen der Bäche und Flüsse und in Überschwemmungsgebieten.

Je nach Auffangwirkungsgrad eines Stauraumes oder eines Sees können auch grössere Mengen der Schweb-

stoffe den See passieren. BRUNE (1953) stellte den Auffangwirkungsgrad als Funktion des Verhältnisses Stauinhalt zu mittlerem Jahreszufluss dar. Schwebstoffbelastetes Wasser sedimentiert beim Einstürmen in den Stauraum oder natürlichen See gemäss *Prandtl* und *Stokes* vorerst den Sandanteil, darauf sukzessive den feinerkörnigen Anteil, behält aber den Tonanteil (+ evtl. Feinsilt) noch gefangen. Es können aber auch grundberührende *Dichteströme* vorkommen, die bis in deltaferne Bereiche vordringen, ohne ihre Sedimentfracht zu verlieren (LAMBERT 1985). NYDEGGER (1967) beschreibt insbesondere die Verhältnisse im Brienzersee. Er fand, dass sich die Zuströme der Aare und der Lüscherne bei Hochwasserereignissen im Sommer je nach Schwebstoffbelastung und Temperatur im Brienzersee stockwerkartig einschichten können und dadurch Trübungshorizonte bilden. Der in Schwebelohaltene Tonanteil kann monatelang im Trübungshorizont verbleiben, bis er sich schliesslich während der Wintermonate bei Homothermie des Seewassers absetzt.

1.2.2 Abtragsmaterial und Transportgut

Abtragsmaterial: Gesteine (Festgesteine und Lockergesteine).

Die *Festgesteine* lassen sich grob in Sedimentgesteine, magmatische Gesteine und metamorphe Gesteine einteilen. Der interne Aufbau umfasst einesteils Komponenten mit deutlicher Eigengestalt (Bsp. Quarzkorn in Sandsteinen, Feldspatleisten in magmatischen Gesteinen) und eine eigentliche Füllmasse (Bsp. Calcit als Zement in Sedimentgesteinen, xenomorphe Quarz-Füllung in vielen magmatischen Gesteinen, amorphe Glasmasse in vulkanischen Gesteinen).

Bei den *Lockergesteinen* fehlt die Verkittung der Komponenten. Als Komponenten treten Kluftkörper der Festgesteine, Festgesteinstrümmer in allen Korngrössen, aus Festgesteinen desintegrierte Mineralkörner, Verwitterungsprodukte und organische Substanz auf. Die Beschreibung der Lockergesteinsmassen kann anhand ihrer Kornverteilung, des mineralogisch-petrographischen Aufbaus, der Rundung und Sphärizität der Komponenten etc. erfolgen.

Der Begriff *Boden* wird in der vorliegenden Arbeit im geologischen Sinne angewandt: oberste Verwitterungsschicht des darunter liegenden Fest- oder Lockergesteins, vermischt mit abgestorbener (Humus) und noch lebender organischer Substanz. Der Ausdruck Boden wird also in etwa dem bautechnischen Begriff Kulturerde (= mineralische Substanz + Humus) gleichgesetzt. Der in den Ingenieurwissenschaften eingebürgerte Begriff «Bodenkennwerte» wird hier trotzdem in seinem ursprünglichen Sinne verwendet. Er bezeichnet allgemein physikalische Kenngrössen von Lockergesteinen.

Korngrößenverteilung

Die Unterteilung und Benennung der Lockergesteinsbestandteile (Tab. 1) erfolgt gemäss den Richtlinien der Schweizerischen Normenvereinigung SNV 670005 (VEREINIGUNG SCHWEIZERISCHER STRASSENFACHMÄNNER 1959).

Als *Silt* oder *Siltstein* wird ein Gestein dann bezeichnet, wenn der Hauptanteil der Komponenten der Siltfraktion zugeordnet werden kann (Tab. 1). In der vorliegenden Arbeit wird bis zur Sandgrösse konsequent folgende Regelung eingehalten: Silt bezeichnet ein Lockergestein, *Siltstein* bezeichnet ein Festgestein. Die Genese der Silte kann sehr verschieden sein, Möglichkeiten sind beispielsweise: Abtrag, Transport und Ablagerung von Material in der Siltfraktion durch Gletscher (feinkörnige Moränenanteile), biogen bedingte Karbonat-Ausfällung in Gewässern (Seekreide), Winderosion, Abtrag und Transport als Schwebstoff, etc ..

Tab. 1: Lockergesteinsklassifikation nach Korngrösse

| KORNFRAKTION | KORNDURCHMESSER | | | |
|--------------|-----------------|---|-------|----|
| Ton | 0 | - | 0.002 | mm |
| Silt | 0.002 | - | 0.06 | mm |
| Feinsilt | 0.002 | - | 0.006 | mm |
| Mittelsilt | 0.006 | - | 0.02 | mm |
| Grobsilt | 0.02 | - | 0.06 | mm |
| Sand | 0.06 | - | 2 | mm |
| Kies | 2 | - | 60 | mm |
| Steine | 60 | - | 200 | mm |
| Blöcke | 200 | - | | mm |

Der Begriff *Schlamm* kennzeichnet eine feinkörnige Ablagerung in Seen und Gewässerläufen, deren Bestandteile hauptsächlich als Schwebstoffe transportiert werden. In den Untersuchungen zur vorliegenden Arbeit wurde die Beobachtung gemacht, dass die Schlammte in Seen, Bächen und Flüssen sehr unterschiedliche, herkunftsspezifische Kornverteilungen aufweisen. Das heisst, dass das gemeinsame Merkmal dieser Ablagerungen nicht die identische Korngrösse, sondern die gleiche Entstehungs- und Transportart ist. Da in dieser Arbeit von der Transportart ausgegangen wird, wird der teilweise genetische, nicht an eine bestimmte Korngrössenfraktion gebundene Begriff Schlamm dem Ausdruck Silt vorgezogen. Der Begriff Silt wird nur gemäss der Definition in der Korngrössenbeschreibung verwendet.

Die Bestandteile eines Lockergesteins können als Summenkurve beschrieben werden. Ein kennzeichnender Wert dieser Summenkurve ist der Wert *D50*. *D50* bezeichnet den Korngrössenwert der Kornverteilung, bei dem 50 Massen-% der Körner kleiner und 50 Massen-% der Körner grösser als *D50* sind.

Transportgut in Gewässern:

- Lösung
- Feststoffe: Schwimmstoffe
Schwebstoffe
Geschiebe

In Zusammenhang mit dieser Arbeit interessieren vor allem Lösung, Schwebstoffe und Geschiebe, und zwar deren Konzentration, Transport pro Zeiteinheit und Transport pro ausgewählte Zeitperiode. Eine quantitative Beschreibung erfolgt mittels folgender Begriffe (Tab. 2, zum Teil nach VISCHER & HUBER 1978).

Tab. 2: Quantitative Erfassung des Transportgutes in Gewässern

| | MATERIALKONZENTRATION | MATERIALTRANSPORT pro Zeiteinheit | MATERIALTRANSPORT pro gewählte Zeitperiode |
|--------------|--|---|---|
| LOESUNG | Lösungskonzentration mmol/l | Lösungsführung mmol/s | Lösungsfracht mmol |
| SCHWEBSTOFFE | Schwebstoffbelastung mg/l, g/m ³ , kg/m ³ | Schwebstoffführung g/s, kg/s | Schwebstofffracht kg, m ³ |
| GESCHIEBE | Geschiebetrieb kg/m·s, m ³ /m·s *) | Geschiebeführung kg/s, m ³ /s | Geschiebefracht kg, m ³ |

*) pro m Gerinnebreite und Sekunde

Die *Lösung* spielt vor allem in jenen Gebieten eine bedeutende Rolle, wo chemisch leicht verwitterbare Gesteine anstehen. In humiden Klimaten gilt dies für Regionen mit Karbonatgesteinen und Evaporiten (vgl. MATOUSEK 1985). Das Gelöste stammt direkt von der Oberfläche, aus Porenräumen, offenen Klüftfugen und Höhlen. Verwitterung, Abtrag und Transport gehen dabei sukzessive ineinander über. Als Beispiel sei erwähnt, dass die Mineralquellen von Baden (Schwanenquelle und Verenaquelle) eine jährliche Lösungsfracht liefern, die einem Gesteinsvolumen von ca. 500 m³ entspricht (errechnet nach Angaben aus GÜBELI-LITSCHER 1948).

Die *Schwimmstoffe* setzen sich im Alpenraum vor allem aus Holz zusammen. In Extremfällen können dabei gewaltige Mengen anfallen. So wurden ins Bacino di Palagnedra im Centovalli (natürliches Einzugsgebiet 140 km²) während eines einzigen Hochwassers über 25 000 m³ Holz eingeschwemmt (MARTINI 1981, BUNDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT 1982).

Die Konzentration der *Schwebstoffe* in einem fließenden Gewässer ist starken Schwankungen unterworfen. Im Normalfall lässt sich keine einfache direkte Abhängigkeit zwischen Wasserführung und Schwebstoffbelastung (resp. Schwebstoffführung) formulieren. Naturgemäss hängt die Schwebstoffbelastung eines Gewässers stark vom geologischen Aufbau des Einzugsgebietes ab. Man kann im wesentlichen drei wichtige Mechanismen unterscheiden, durch die grosse Mengen von Schwebstoffen anfallen können: Denudation, Tiefen-/ Seitenerosion und Abrieb der Geschiebekomponenten (v.a. im Oberlauf der Bäche).

Die Froud'sche Kennzahl eines transportierten Gerölles bestimmt, ob es theoretisch zum Geschiebe oder zum schwebenden Anteil zu rechnen ist. Körner, die an sich dem Geschiebe zuzuzählen sind, können aber auch durch hüpfende Bewegungen zeitweise im Wasser schweben. Eine Diskussion der Problematik findet sich bei BURZ (1958) und KRESSER (1964).

Das *Geschiebe* prägt das Gesicht unserer Bäche und Flüsse. Funktionell lässt sich der Geschiebetrieb leichter mit der Wasserführung verknüpfen als die Schwebstoffbelastung. Die Geschiebefracht ist in grösseren Flüssen in der Regel viel geringer als die Schwebstofffracht. So transportiert beispielsweise der Alpenrhein pro Jahr ca. 3 Mio m³ Feststoffe in den Bodensee, wovon lediglich wenige Prozente auf das Geschiebe entfallen (HAHN 1969). Unsere Bergbäche erhalten ihr Geschiebe zur Hauptsache aus Massenbewegungen von Lockergesteinen (siehe auch Tab. 47). Festgesteine spielen als unmittelbare Geschiebequellen dort eine Rolle, wo sie schiefbrig, plattig oder sehr stark geklüftet sind.

Der *Abrieb der Geschiebekomponenten* spielt im obersten Teil eines Einzugsgebietes eine wichtige Rolle, wo das vorhandene Bachgeschiebe noch viele Komponenten enthält, die nur eine schlechte Abriebresistenz aufweisen. Zudem überall dort, wo das Bach- und Flussgeschiebe durch schlecht abriebresistentes Material neu beschickt wird. BAUER (1965) formuliert die Gesetzmässigkeiten des Abriebs. Die Resistenz der Gerölle gegen Abrieb ist sehr verschieden gross. Dies zeigen unter anderem auch Beobachtungen von JÄCKLI (1948) im Hinterrheingebiet.

2 UNTERSUCHUNGSMETHODIK

2.1 Übersicht über das erarbeitete Untersuchungsverfahren

Für die Untersuchung und Herkunftsabklärung der Silte (d.h. der Schlammproben aus Bächen, Flüssen und Seen) musste ein spezielles Untersuchungsverfahren entwickelt werden. Es umfasst folgende Schritte:

- Entnahme von Schlammproben (2.2)
- Korngrössenanalyse und Schlammaufarbeitung zu vergleichbaren Kornverteilungen (2.3)
- Titrimetrische Bestimmung des Gehaltes an organischem Kohlenstoff und Umrechnung in organisches Material (2.4.4)
- Quantitative Erfassung von 5 kristallinen Komponenten mittels Röntgendiffraktometrie (2.5)
- Relativ-quantitative Herkunftsanalyse (2.6.1, 2.6.3)

Der zentrale Schritt, nämlich die Bestimmung des mineralischen Aufbaus der Silte (Schlamme), stiess auf verschiedene Schwierigkeiten. Schliesslich gelang es mittels der Röntgendiffraktometrie, 5 kristalline Komponenten sehr gut reproduzierbar zu erfassen. Diese 5 Komponenten machen meist etwa $\frac{2}{3}$ der Probenmasse aus. Zusätzlich sind zwei weitere unabhängige Komponenten erfasst worden (Gehalt an organischem Material und Untergrundintensität bei der Röntgenaufnahme).

Im folgenden Kapitel sind auch jene Bestimmungsmethoden aufgeführt, die nicht zum gewünschten Erfolg führten. In diesem Zusammenhang sind bereits in dieses Kapitel erste Resultate eingeflochten.

2.2 Probenentnahme

2.2.1 Proben aus Seen

Es wurden insgesamt 108 Proben aus verschiedenen Stauseen entnommen. Dabei kamen folgende Geräte und Gewinnungsmethoden zum Einsatz:

Kastengreifer:

14 Proben aus dem Bacino di Malvaglia. Von einer Arbeitsplattform aus werden dem Seeboden mittels eines Ausstechkastens Proben von ca. 25×10×20 cm entnommen. Das Gerät wurde in verdankenswerter Weise vom Geologischen Institut der Universität Bern zur Verfügung gestellt. Eine Beschreibung eines sehr ähnlichen Gerätes findet sich in REINECK (1963).

Kurze Rammkerne:

68 Proben aus verschiedenen Stauseen.

Es wurde ein Kurzkern-Fallot mit Plastikrohren angewendet, das das Ziehen von bis zu 1 m langer Kerne mit einem Durchmesser von ca. 6 cm ermöglicht. Von einem Boot aus lässt man das Gerät an einem Zugseil in die Tiefe gleiten und stoppt es unmittelbar vor Erreichen des Seegrundes. Darauf gibt man das Zugseil frei. Durch das Gewicht des Fallotes bedingt (man montiert zusätzlich einige Bleiplatten im Gesamtgewicht von ca. 10–15 kg) rammt sich das Kernrohr in den Seegrund hinein. Das Erschlaffen des Zugseiles löst einen Mechanismus aus, der das Kernrohr oben abdichtet und dadurch verhindert, dass die gewonnene Sedimentsäule beim Ziehvorgang aus dem Kernrohr herausgleitet. Das angewendete Gerät wurde am Geologischen Institut der ETHZ konstruiert. Für die Untersuchungen wurde im Normalfall ein Längsschnitt über die ganze Sedimentsäule en bloc verwendet. Untersuchungen an einzelnen Schichtlagen wurden nur vereinzelt vorgenommen.

Ausstechproben von Hand:

24 Proben aus verschiedenen Stauseen.

In der Regel wurden Plastikrohre angewendet, wie sie beim Kurzkern-Fallot gebräuchlich sind. Die Ausstechproben wurden bei abgesenktem Wasserspiegel entnommen, und zwar ausschliesslich im Gebiet der Stauwurzel der Stauseen.

Sediment-Auffangwannen:

Im Bacino di Malvaglia wurden 5 eigens für diesen Zweck hergestellte Sedimentwannen auf den Seegrund abgesetzt und an Schwimmbojen vertäut. Leider wurden die Zugkabel von Unbekannten gekappt, weshalb auf diese Weise kein zusätzliches Material gewonnen werden konnte.

2.2.2 Proben aus Bächen und Flüssen

Geschiebeproben:

Es wurden nur wenige Geschiebeproben aus Bächen und Flüssen entnommen. Auf eine Wiedergabe der Resultate der Geschiebeanalysen wird in dieser Arbeit verzichtet.

Schlammproben:

Entnahme von 230 Proben, davon wurden 215 ausgewertet.

Die Proben sind aus dem bei Hochwasser überfluteten Bettbereich der Gewässer entnommen, und zwar aus jenen natürlich vorhandenen Eintiefungen, in denen bei Hochwasserrückgang vorerst Pfützen und Lachen zurückbleiben, deren Inhalt dann aber nach und nach versickert. Es wurde Wert darauf gelegt, dass alle aus einem Einzugsgebiet entnommenen Proben innert weniger Tage aufgesammelt werden konnten.

Schwebstoffproben:

Es wurden lediglich 6 Wasserproben entnommen, alle aus einem Wildbachgebiet westlich von Hergiswil (Steinibach). Das schwebstoffbelastete Wasser wurde direkt an Überfällen in Flaschen abgefüllt.

2.3 Schlammaufarbeitung und Korngrössenanalyse

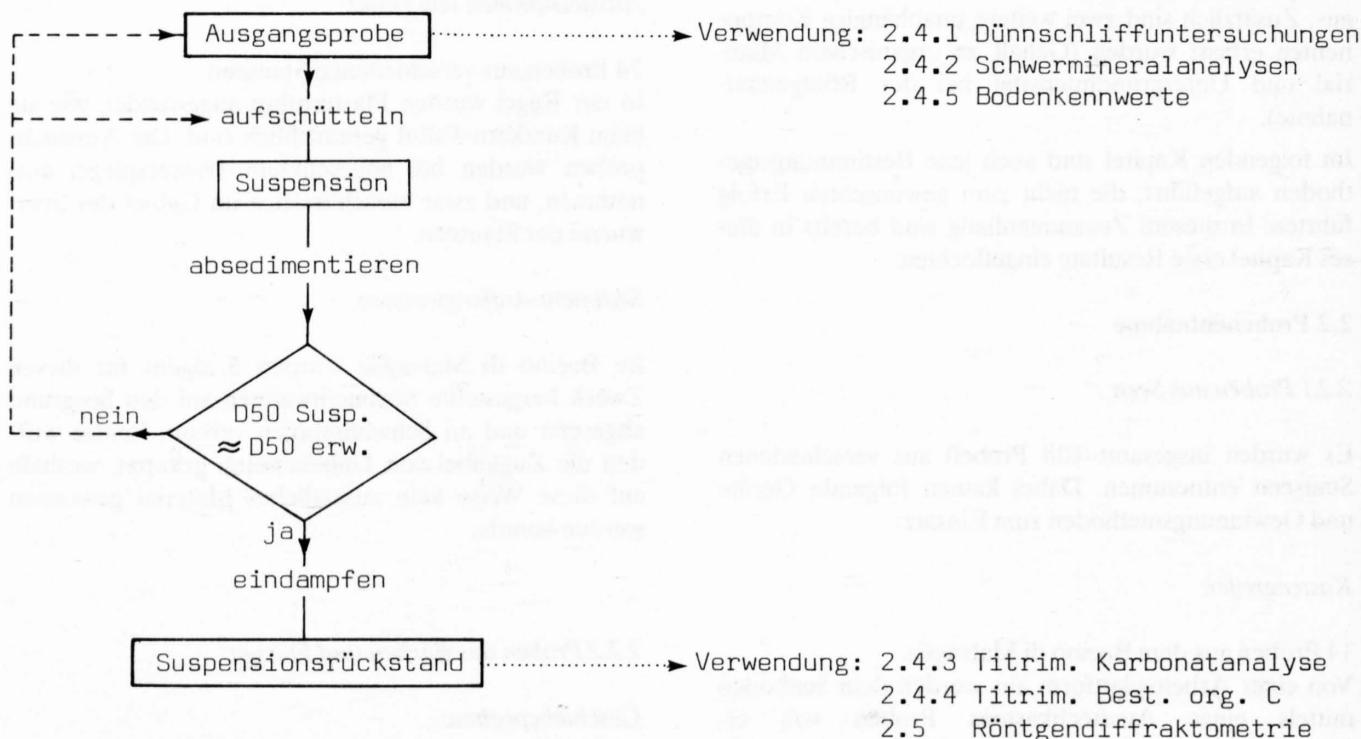
Anfangs wurden die Schlammproben lediglich durch ein Sieb mit der Maschenweite 0.125 mm gesiebt, um die größten Anteile zu entfernen. Diese einfache Vorbehandlung erwies sich aber später als ungenügend, da einzelne Proben mit viel Feinsandanteil dadurch ihre stark asymmetrische Häufigkeitsverteilung behielten.

Die Untersuchungen zeigten recht bald, dass der mineralische Aufbau von Schlammen hauptsächlich von 2 Faktoren abhängt:

- a) der Herkunft des Schlammes
- b) dem D50-Wert der Kornverteilung des Schlammes

Wegen der Abhängigkeit vom D50-Wert mussten alle Proben, die miteinander verglichen werden sollten, im Labor aufgearbeitet werden, bis sie eine möglichst ähnliche Kornverteilung aufwiesen. Um diese Anforderung zu erfüllen, wurde folgendes Vorgehen für die *Probenaufarbeitung* entwickelt und konsequent für alle Proben angewendet (siehe Schema Fig. 1).

Die feuchten *Ausgangsproben* wurden in einer Plastikflasche (10 Liter Inhalt, Ausguss knapp über der Bodenfläche) mit ca. 7 Litern entsalztem Wasser zu einer Suspension aufgeschüttelt. Nach einer je nach Ausgangsprobe unterschiedlich langen Absetzzeit konnte die über dem absedimentierten Grobanteil stehende Wassersäule (Suspension) durch den nahe am Flaschenboden angebrachten Ausguss abgelassen und zur Weiterverwendung aufgefangen werden. Der in der Plastikflasche verbleibende absedimentierte Grobanteil wurde anschliessend verworfen. Diese Operation konnte wenn nötig mehrmals wiederholt werden. Vor dem letzten Aufschütteln wurde die Suspension gesiebt



D50 Susp.: D50-Wert der Kornverteilung der Suspension

D50 erw. : Für Vergleichszwecke erwünschter D50-Wert der Kornverteilung

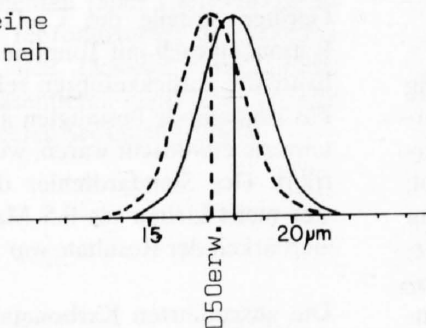
Fig. 1: Probenaufarbeitung im Labor

(Maschensieb 0.125 mm), um grobe Körner und grobe organische Reste zu entfernen.

Der Erfolg der *Kornverteilungs-Annäherung* an den erwünschten Wert D50_{erw.} wurde mittels des Korngrössenmessgerätes HIAC-ASAP 520 kontrolliert (Kurzbeschreibung des Gerätes siehe unten anschliessend). Dazu musste die Suspension erneut aufgeschüttelt und sehr rasch anschliessend 2 Prüfproben à 5 ml via Ausguss entnommen werden. Sofern die D50-Werte der beiden Prüfproben nicht weiter als 1 Mikrometer auseinanderlagen, wurden die beiden D50-Werte gemittelt und der erhaltene Mittelwert der Suspension zugeordnet. Wenn dieser Mittelwert nun ausreichend nahe an D50_{erw.} lag, wurde die Suspension für die anschliessenden Untersuchungen akzeptiert und im Trockenschrank bei 105 °C zum *Suspensionsrückstand* eingedampft. Lag der Mittelwert aber nicht genug nahe D50_{erw.}, so wurde die Suspension weiter bearbeitet oder aus der Ausgangsprobe neu hergestellt.

Ziel war es, alle Ausgangsproben eines gesamten Einzugsgebietes jeweils auf dasselbe D50_{erw.} aufzuarbeiten. Da dies natürlich kaum möglich ist, musste D50_{erw.} meistens vom höheren und tieferen Korngrössenbereich her angenähert und die im nächsten Untersuchungsschritt ermittelten Prozentwerte der mineralischen Komponenten linear auf den Wert D50_{erw.} interpoliert (evtl. extrapoliert) werden. Dieses Vorgehen ist auf Fig. 2 skizziert.

D50_{erw.} wird durch eine Suspension genügend nah erreicht



Suspension(en)

D50_{erw.} muss beidseitig durch je eine Suspension angenähert werden

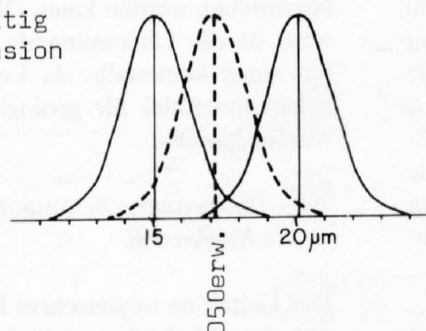


Fig. 2: Annäherung der Korngrössenverteilungen

Kurzbeschreibung des Korngrössenmessgerätes HIAC-ASAP 520:

Die Anlage am Geologischen Institut der ETHZ setzt sich aus Messeinheit, Steuereinheit und Zeicheneinheit zusammen.

In die vorhandene *Messeinheit* lassen sich verschiedene Sensoren einbauen. Für die vorliegenden Untersuchungen wurde ein Sensor verwendet, der eine Korngrössenanalyse von 2.5 bis 112.5 Mikrometer (unterteilt in 23 Kornfraktionen) erlaubt. Die stark verdünnte Suspension wird aus einem Gefäss (mit Rührwerk) mittels einer Vakuumpumpe abgesaugt und passiert eine Photodiode. Der durch ein einzelnes Korn verursachte Schatten erzeugt eine Spannungsänderung, die dann registriert wird.

Die Zählimpulse der Messeinheit werden von der *Steuereinheit* in 23 Kanälen aufsummiert. Ein zusätzlicher Kanal speichert die Zahl der Körner mit Übergrösse (Korngrösse grösser als 112.5 Mikrometer).

Die *Zeicheneinheit* stellt die Teilchenanzahl oder das der Anzahl entsprechende Volumen in Form von Häufigkeitsverteilungen oder Summationskurven dar. Der ablesbare Wert D50 gilt für das aufsummierte Volumen der Körner. Unter der Bedingung, dass die Dichte der Kornmasse (gemittelte Dichte aller Körner) links und rechts des Wertes D50 gleich ist, kann der Verlauf der

D50_{erw.} entspricht der Kornverteilung, die die meisten Schlammproben (Ausgangsproben) eines Sees oder eines Bachsystems von Natur aus aufweisen. Eine abweichende gröberkörnige Ausgangsprobe wird gemäss Fig. 2 angenähert.

Volumen-Summationskurve der Massen-Summationskurve gleichgesetzt werden. Dies ist für die geforderte Genauigkeit sicher erfüllt.

Das beschriebene Gerät ist in der praktischen Anwendung sehr schwierig zu handhaben und setzt viel Übung voraus. Insbesondere muss darauf geachtet werden, dass keine Luftbläschen mitgezählt werden.

2.4 Mikroskopische und chemische Untersuchungsmethoden

2.4.1 Dünnschliffuntersuchung

An 14 Proben aus dem Bacino di Malvaglia wurde der mineralogisch-petrographische Aufbau der Schlammproben in Dünnschliffen bestimmt. Die Sedimentproben wurden in Kunstharz eingegossen und nach Erhärtung Dünnschliffe erstellt. Die Volumenanteile der Mineral- und Gesteinstrümmerchen pro Fraktion können durch Flächenauszählung bestimmt werden. Leider sind derartige lichtoptische Untersuchungen nur bis zu einer gewissen Mindest-Korngrösse möglich (ca. 15 Mikrometer). Zudem resultieren wegen Bestimmungs- und Auszählungsungenauigkeiten relativ grosse Fehler.

Da die erreichbare Aussage den hohen Zeitaufwand nicht rechtfertigte, wurde dieses Verfahren wieder aufgegeben.

2.4.2 Schwermineralanalyse

Die Schwermineralanalyse beruht auf der Auszählung der Mineralkörner mit hoher Korndichte (normalerweise Korndichten grösser als 2.8 g/cm^3). Meist werden die Mengenverhältnisse von Granat, Rutil, Epidot, Apatit, Zirkon, Staurolith und Turmalin ermittelt. Man hat festgestellt, dass das Mengenverhältnis der Schwerminerale zueinander herkunftstypisch ist, d.h. dass verschiedene geologische Einheiten verschiedene Mengenverhältnisse aufweisen. Die Methode wird immer wieder in Frage gestellt, obwohl sie bedeutende Erfolge bei der Untersuchung von Sanden und Sandsteinen verzeichnete.

Ein wesentlicher, häufig aber nicht erwähnter Nachteil der Schwermineralanalyse besteht darin, dass aufgrund von wenigen Volumenprozenten des Sedimentes (die meisten Sedimenttypen bestehen überwiegend aus Leichtmineralen) auf die Herkunft der gesamten Sedimentmenge geschlossen werden muss. Leider ist die Verteilung der Leichtminerale niemals in derartigem Ausmasse herkunftstypisch wie jene der Schwerminerale.

Einige Proben aus dem Sihlsee wurden auf ihren Schwermineralinhalt hin untersucht. Da das üblicher-

weise angewendete Absedimentieren in Bromoform (bei Sanden üblich) nicht die gewünschte Auftrennung ergab, musste die Trennung mit Hilfe einer Zentrifuge durchgeführt werden. Als es sich zeigte, dass die Grösse der Schwerminerale im Feinsiltbereich lag (Ausgangsmaterial Mittelsilte), wurde auf weitere Untersuchungen verzichtet. Die genaue Bestimmung der sehr kleinen Körner war nicht möglich, obwohl verschiedene Einbettungsmittel mit verschiedenen Brechungsindices verwendet worden waren.

2.4.3 Titrimetrische Karbonatanalyse

Es wurde eine Methode angewendet, die in MÜLLER (1964) detailliert beschrieben ist. Deshalb wird hier auf eine Darstellung verzichtet und nur auf einige Abweichungen hingewiesen:

- Ca-Titration: Indikator HHSNN Merck 4595 anstelle von Murexid.
- Ca+Mg-Titration: Pro Titration Zugabe von 1 Indikator-tablette Merck 8430 plus 1 - 2 ml NH_3 25% anstelle von Indikator Eriochromschwarz-T und Ammoniak/Ammoniumchlorid-Puffer.
- Beide Titrationen wurden gegen 0.05-molare AeDTE-Lösung anstelle von 0.1-molarer AeDTE-Lösung durchgeführt.

Total wurden insgesamt knapp 800 Doppeltitrationen für Ca und Ca+Mg ausgeführt und daraus Prozentwerte für Calcit CaCO_3 und Dolomit $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ errechnet. Für den Dolomit wurde dabei angenommen, dass Ca und Mg im Verhältnis 1:1 vorhanden waren. Geringe Anteile des Ca-Gehaltes könnten evtl. auf Kationentausch mit Tonmineralien bei der Salzsäurebehandlung zurückzuführen sein. Stichkontrollen mit der Passonmethode bestätigten aber die Resultate. Da Mittelwerte erwünscht waren, wurde jede Probe dreimal titriert. Der Standardfehler des arithmetischen Mittels war meist kleiner als 0.5 Massen%, d.h. die Reproduzierbarkeit der Resultate war sehr gut.

Die ausgeführten Karbonatanalysen ergaben ein recht erstaunliches und unerwartetes Resultat. Proben aus dem Bacino di Malvaglia und dessen Einzugsgebiet zeigten (AMMANN 1981), dass der Zusammenhang zwischen den Sedimentproben aus dem See und jenen aus den Zuflüssen offenbar durch Leichtmineralanalysen beschrieben werden kann. Dies ist insofern bemerkenswert, da die Leichtminerale in feinkörnigen Sedimenten sonst keinesfalls als Leitminerale (im Sinne der Schwerminerale) für geologische Einheiten betrachtet werden können.

2.4.4 Titrimetrische Bestimmung des Gehaltes an organischem Kohlenstoff

Der Gehalt an organischem Kohlenstoff (org. C) wurde mit der Methode ermittelt, die MOHR (1979) beschreibt. Der Zeitaufwand pro Titration beträgt nur ca.

5 min. Der Gehalt an organischem Kohlenstoff wurde an sämtlichen Proben untersucht (stets zwei Messungen). Die Abweichungen zwischen den beiden Messungen betrug in der Regel nur wenige Zehntel eines Massenprozenten. Aus den erhaltenen org.C-Werten liessen sich mittels Erfahrungskonstanten (MOHR 1979) die Massenprozentanteile organischen Materials (Humusteilchen, Blattresten etc.) ableiten.

2.4.5 Bodenkennwerte

Für ca. 50 Proben aus Seen wurden die Trockendichte, teilweise auch Korndichte (Pyknometer), Wassergehalt und Porosität bestimmt.

2.5 Röntgendiffraktometrie

Aufgrund der positiven Resultate der Karbonattitrationen schien es angezeigt, nach weiteren Untersuchungsmethoden zu suchen, mit deren Hilfe der Leichtmineralbestand fassbar ist. Die grundlegende Fragestellung (Sedimentherkunft) verlangt vor allem eine gute Reproduzierbarkeit der erhaltenen Werte innerhalb derselben Messmethodik. Die absolute Richtigkeit der Messwerte spielt hingegen eher eine sekundäre Rolle, wird aber natürlich trotzdem angestrebt. Der Calcitgehalt einer Sedimentprobe beispielsweise lässt sich durch verschiedene Messmethoden annähern. Der absolut richtige Wert wird aber nur zufällig durch eine Methode erreicht, da jeder Methode spezifische Fehler anhaften.

Mittels der Röntgendiffraktometrie gelang es schliesslich, 5 kristalline Komponenten (alles Leichtminerale) von Sedimentproben gut reproduzierbar zu erfassen. Diese 5 Komponenten (Calcit, Dolomit, Quarz, Muscovit und Mikroklin) repräsentieren meist über 2/3 der Gesamtmasse der untersuchten Sedimentproben.

2.5.1 Apparatur und Messprinzip

Zur Anwendung gelangte das Röntgen-Pulverdiffraktometer des Institutes für Mineralogie und Petrographie an der ETHZ. (Philipps-Pulverdiffraktometer: Generator PW 1130/00/60, Vertikalgoniometer PW 1050/25, automatischer Probenwechsler PW 1170/01, Cu-Breitfokusröhre 40 kV, 25 mA).

Figur 3 und Figur 4 zeigen das Funktionsprinzip des Röntgendiffraktometers. Die Strahlung der Strahlenquelle wird durch einen Ni-Filter monochromatisiert auf 1.54Å. Der bestrahlte Probenbereich wird durch die Wahl von in den Strahlengang eingeschobenen Blenden festgelegt (Divergenzblende 1 Grad, Auffangblende 0.1 mm, Streustrahlblende 1 Grad).

Das in den Strahlengang eingeschobene, automatisch auswechselbare *Präparat* dreht sich an Ort um eine Achse. Ein Teil der Strahlung wird an den Kristallen gebeugt, löscht sich selber aber durch Interferenz grösstenteils aus. Trifft die Strahlung aber unter einem bestimmten Winkel auf die Netzebenen eines Kristalls, so ist die gebeugte Strahlung in Phase (Fig. 4). Durch Interferenz wird die Röntgenstrahlung dann verstärkt und im Zählrohr messbar. Die Theorie verlangt vom Präparatepulver, dass es möglichst feinkörnig sei und dass die Kristalle nicht eingeregelt sein dürfen, damit alle Kristallsorten in allen möglichen Lagen bestrahlt werden.

Das *Zählrohr* (Proportionalzähler) misst die Intensität der interferierten Strahlung. Die Konstruktion des Gerätes erlaubt es, automatisch die interessierenden Winkelbereiche auf dem Messkreis abzufahren.

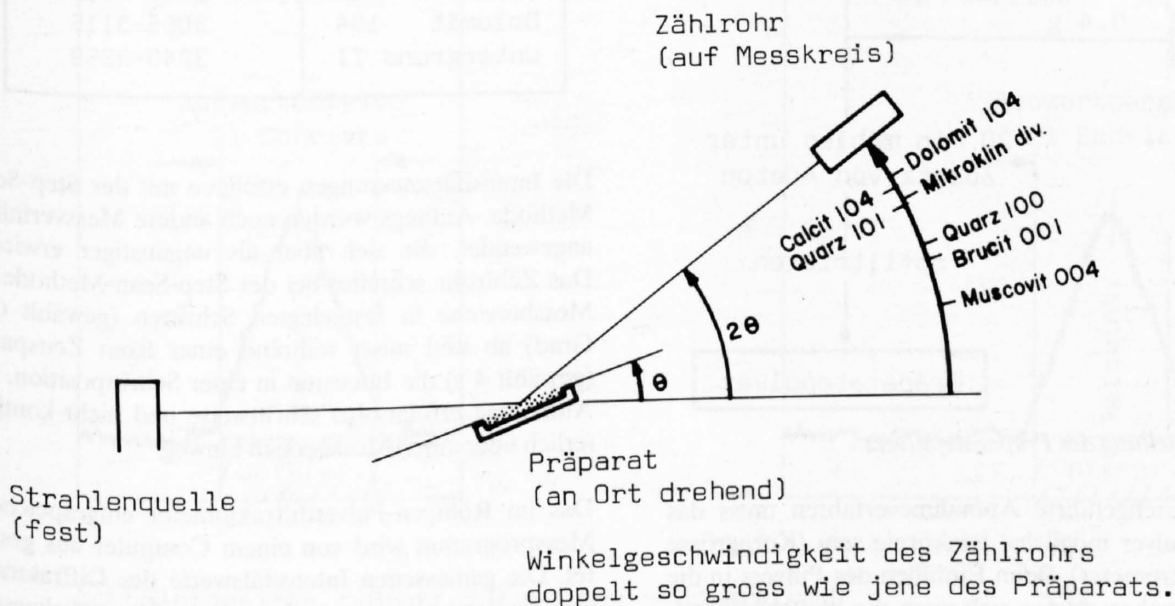
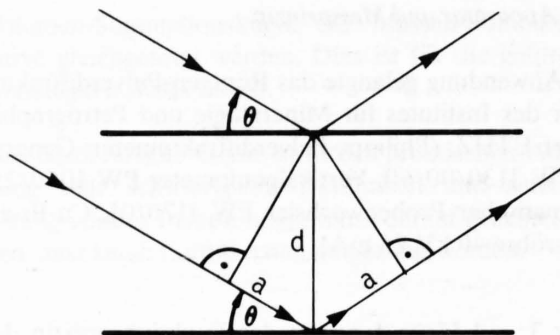


Fig. 3: Prinzip des Röntgen-Pulverdiffraktometers (ohne Blenden und Filter)



Bragg'sche Gleichung $n\lambda=2d\sin(\theta)=2a$

Sofern der Betrag $2a$ einem geradzahligem Vielfachen von λ entspricht, ist die quasi-reflektierte Strahlung in Phase. Die Netzebenen-schar muss parallel der Präparat-oberfläche verlaufen, damit die Strahlung im Zählrohr registriert wird.

Fig. 4: Röntgenstrahl-Beugung an Netzebenen-schar eines Kristalls, vereinfacht dargestelltes Prinzip (vgl. NICKEL 1971)

2.5.2 Präparateherstellung

Dem Suspensionsrückstand wird als *interner Standard* Brucit $Mg(OH)_2$ in bekannter Menge zugegeben (Fig. 5) und danach das Gemisch in einer Labor-Scheibenschwingmühle gemahlen (mit Zusatz von Aceton als Mahlhilfsmittel). Danach wird abfiltriert und der Filterkuchen zur Lockerung durch ein Ny-lonsieb (0.125 mm) gepresst. Das erhaltene Präparatepulver wird in Probenwännchen abgefüllt (mindestens drei Parallelpräparate), mit einem Zackenspatel (Kante der Spatelklinge sägeblattartig gezähnt) sorgsam verdichtet und mit sägenden Bewegungen nivelliert.

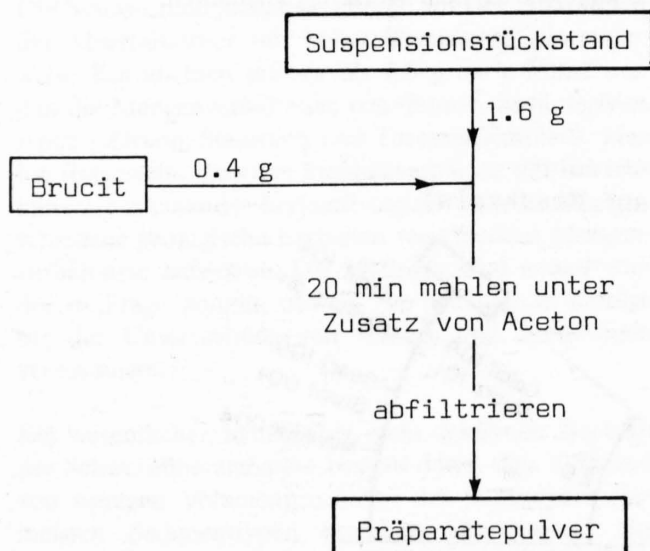


Fig. 5: Herstellung des Präparatepulvers

Für das durchgeführte Aufnahmeverfahren muss das Präparatepulver möglichst feinkörnig sein (Korngrösse wenige Mikrometer). Beim Einfüllen des Pulvers in die Probenwännchen dürfen sich auch die blättchenförmigen Mineralien nicht einregeln.

2.5.3 Messung

Der Programmeinheit des Röntgen-Pulverdiffraktometers wurde folgendes Messprogramm eingegeben (Tab. 3):

Tab. 3: Messbereiche des Diffraktometer-Messprogramms

| | Messbereich 2θ (in Grad) |
|---------------|------------------------------------|
| Untergrund I | 1710-1740 |
| Muscovit 004 | 1750-1800 |
| Brucit 001 | 1825-1875 |
| Quarz 100 | 2050-2100 |
| Quarz 101 | 2630-2680 |
| Mikroclin . | 2705-2755 |
| Calcit 104 | 2915-2965 |
| Dolomit 104 | 3065-3115 |
| Untergrund II | 3240-3259 |

Die Intensitätsmessungen erfolgten mit der Step-Scan-Methode. Anfangs wurden noch andere Messverfahren angewendet, die sich aber als ungünstiger erwiesen. Das Zählrohr schreitet bei der Step-Scan-Methode die Messbereiche in festgelegten Schritten (gewählt 0.01 Grad) ab und misst während einer fixen Zeitspanne (gewählt 4 s) die Intensität in einer Schrittposition. Die Aufnahme erfolgt also schrittweise und nicht kontinuierlich über einen Messbereich hinweg.

Das im Röntgen-Pulverdiffraktometer eingespeicherte Messprogramm wird von einem Computer aus gestartet. Die gemessenen Intensitätswerte des Diffraktometers werden sukzessive auf ein Datenfile zurückgespeichert.

2.5.4 Datenauswertungs-Programm

Für die Datenauswertung musste ein ausführliches *Computer-Rechenprogramm* geschrieben werden. Auf dessen Wiedergabe, auch auf die Wiedergabe des Flussdiagramms, wird hier verzichtet, da dadurch zuviel Raum beansprucht würde. Die Auswertungsschritte des Programms sind deshalb hier mittels weniger Skizzen und in Textform für eine kristalline Komponente erläutert.

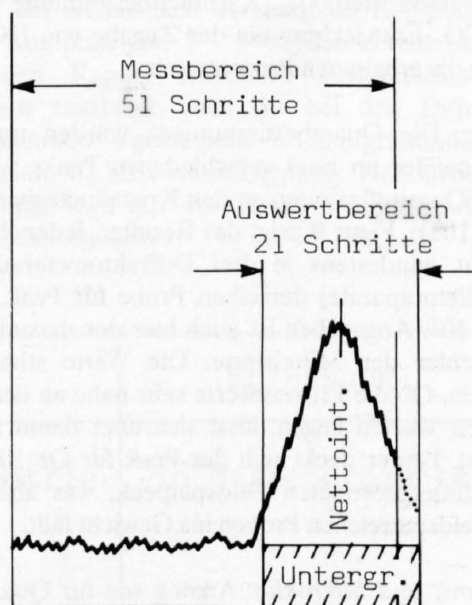
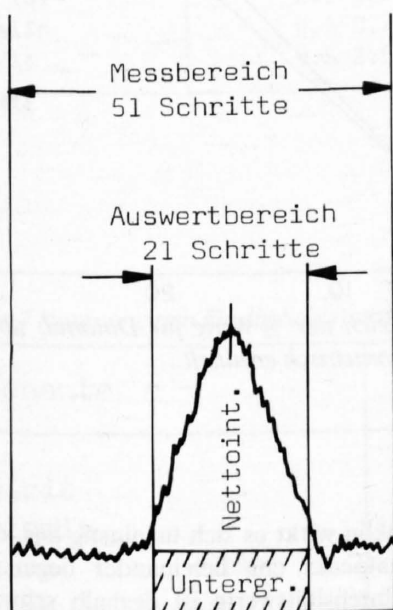
Suchen der Maximumposition im Messbereich: Für alle kristallinen Komponenten wird im entsprechenden Messbereich die Maximumposition der Intensitätsverteilung gesucht. Dies entspricht in der Regel der Peakspitze (vgl. Fig. 6). Damit aber in mehrgipfeligen Peaks die Maximumposition nicht auf einen möglicherweise lateral liegenden Peak zu liegen kommt, glättet das Auswertprogramm vorerst die aufgenommene Intensitätsverteilung. Das heisst, dass die Intensitätsverteilung rechnerisch umgeformt wird, damit die Maximumposition möglichst in der Symmetrieebene des Peaks liegt. Für die Glättung errechnet der Computer kontinuierlich aus je 3 benachbarten Intensitätswerten den zugehörigen Mittelwert. Diese Mittelwerte wiederum ergeben die korrigierte Intensitätsverteilung, in der nun die Maximumposition gesucht wird.

Ermittlung der Nettointensität einer kristallinen Komponente: Für jede kristalline Komponente wird vorerst

die Bruttointensität (Fig. 6) aufsummiert, indem 21 Messwerte der ursprünglichen, nicht geglätteten Intensitätsverteilung symmetrisch zur gefundenen Maximumposition aufsummiert werden. Gleichzeitig werden die Intensitäten der Untergrundmessbereiche aufsummiert und auf die Grösse des Auswertbereiches reduziert (21 Schritte). Die Nettointensität einer kristallinen Komponente ergibt sich danach durch die Subtraktion der Untergrundintensität von der Bruttointensität (Fig. 6). Wenn der Auswertbereich den Messbereich randlich überlappt, was bei deutlich ausgebildeten Peaks selten vorkommt, werden die fehlenden Werte durch entsprechende, symmetrisch liegende Werte der vorhandenen Peakflanke ersetzt (Fig. 6).

Da die Grösse der Nettointensität noch von äusseren Faktoren (bspw. Intensität der Messstrahlung) abhängt, muss die Nettointensität in eine *Relativintensität* umgerechnet werden. Diese ergibt sich durch die Division der Nettointensität einer Komponente durch die Nettointensität von Brucit (bei der Präparateherstellung als interner Standard beigegeben). Die Relativintensitäten würden nun im Prinzip für die Beschreibung der Sedimentproben ausreichen und die erwünschten Vergleiche und *Herkunftsanalysen* könnten direkt mit diesen *Relativintensitäten* gemacht werden.

Der Anschaulichkeit halber wurden die Relativintensitäten aber umgerechnet auf *Massenprozent*. Mittels im Labor hergestellter Gemische (ebenfalls mit dem inter-



$$\text{Nettointensität} = \text{Bruttointensität} - \text{Untergrund}$$

Fig. 6: Nettointensität einer kristallinen Komponente

nen Standard Brucit) werden für jede betrachtete kristalline Komponente Eichgeraden erstellt. Diese Eichgeraden werden für die Umrechnung der Relativintensitäten der kristallinen Komponenten in Prozentwerte benutzt. Dieses Vorgehen ist insofern etwas problematisch, da die erstellten Laborgemische nicht ohne weiteres mit den natürlich entstandenen Gemischen verglichen werden können. Da der Umrechnungsschritt linear ist, ergibt sich für die Herkunftsanalysen keine Qualitätseinbuße. Sofern möglich, wurden die erhaltenen Resultate durch andere Analysenmethoden zu bestätigen versucht (Titration, Passon).

2.5.5 Diskussion der einzelnen kristallinen Komponenten

Dolomit und Calcit: In Fig. 7 und 8 erfolgt eine direkte Gegenüberstellung der diffraktometrisch und titrimetrisch erzielten Werte für Calcit und Dolomit. Jeder Punkt in der Darstellung entspricht dem Mittelwert aus mindestens drei Titrationen resp. dem Mittelwert aus mindestens 3 Diffraktometeraufnahmen (Parallelpräparate) eines Suspensionsrückstandes. Zudem ist in den Figuren jeweils die maximale Grösse der Standardfehler der Mittelwerte angegeben. Die titrimetrisch erzielten Prozentwerte sind systematisch etwas höher als die diffraktometrischen (v.a. bei Calcit). An sich müssten beim Vergleich der beiden Methoden alle Punkte auf der 45-Grad-Geraden liegen, dies ist aber wegen methodenspezifischer systematischer Fehler nicht der Fall.

Da mittels zweier unterschiedlicher Methoden (Titration, Diffraktometer) sehr ähnliche Resultate erzielt wurden, kann man annehmen, dass die ermittelten Prozentwerte ziemlich nah an die absoluten wahren Prozentwerte herankommen. Einzelne Nachmessungen mit der Passon-Methode (Karbonatbestimmung aufgrund der CO₂-Entwicklung bei der Zugabe von HCl) bestätigten die erhaltenen Prozentwerte.

Quarz: Die Quarzbestimmungen wurden unabhängig voneinander an zwei verschiedenen Peaks vorgenommen (Quasireflexionen an den Kristallnetzebenen (100) und (101)). Figur 9 zeigt das Resultat. Jeder Punkt entspricht mindestens je drei Diffraktometeraufnahmen (Parallelpräparate) derselben Probe für Peak 100 und Peak 101. Angegeben ist auch hier der maximale Standardfehler der Mittelwerte. Die Werte stimmen gut überein. Ob die Prozentwerte sehr nahe an den absolut wahren Werten liegen, lässt sich aber damit nicht beweisen. Leider deckt sich der Peak für Qz 100 mit einem untergeordneten Feldspatpeak, was aber nur in sehr feldspatreichen Proben ins Gewicht fällt.

Muscovit und Mikroklin: Analog wie für Quarz wurde auch für diese zwei Komponenten versucht, die Resultate durch Aufnahmen an verschiedenen Peaks abzusichern. Allerdings scheiterte der Versuch, da keine derart gut ausgeprägten und erfassbaren Peaks wie bei Quarz auftreten.

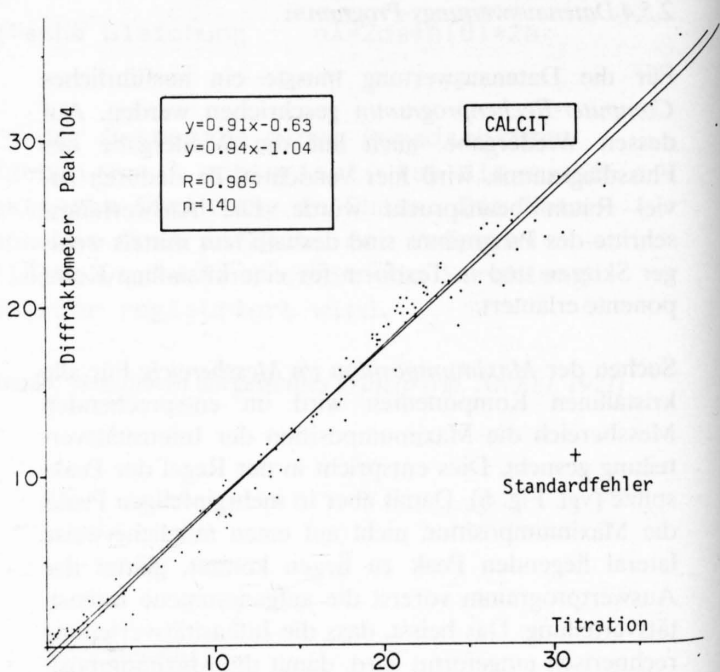


Fig. 7: Vergleich der %-Werte für Calcit, titrimetrisch resp. diffraktometrisch ermittelt

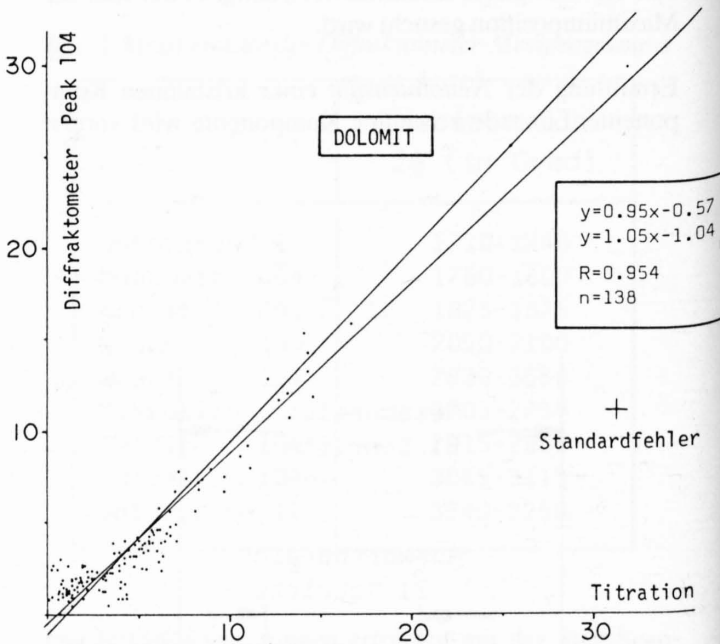


Fig. 8: Vergleich der %-Werte für Dolomit, titrimetrisch resp. diffraktometrisch ermittelt

Beim Mikroklin wirkt es sich ungünstig aus, dass mehrere Feldspatpeaks eng beieinander liegen. Die Eichung der Intensitätswerte ist deshalb schwierig und ungenau. Die Prozentangaben für den Mikroklin sind deshalb unsicher. Die Verwendbarkeit für relativ-quantitative Herkunftsanalysen ist aber trotzdem gewährleistet, da dafür die absolute Genauigkeit der Prozentwerte keine Rolle spielt und die Intensitätsmessungen

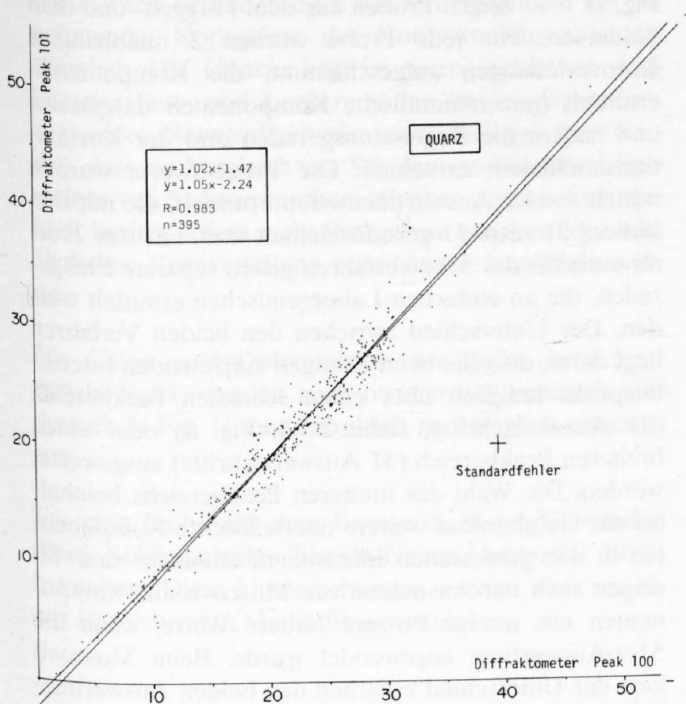


Fig. 9: Quarzgehalt, diffraktometrisch an 2 verschiedenen Peaks bestimmt

Tab. 4: Standardfehler der Mittelwerte der gemessenen kristallinen Komponenten (Massenprozent)

| Krist. Komponente | Standardfehler |
|-------------------|------------------|
| Calcit | 0.1-0.4% |
| Dolomit | 0.1-0.6% |
| Quarz 100 | 0.2-0.7% |
| Quarz 101 | 0.1-0.7% |
| Mikroclin | 0.1-0.7% (-3.0%) |
| Muscovit | 0.5-2.5% |

sich in den meisten Fällen als sehr gut reproduzierbar erwiesen. Auch die Prozentangaben für den Muscovit sind unsicher (vgl. 2.6.2). Die Verwendbarkeit des Muscovits für die relativ-quantitativen Herkunftsanalysen ist eingeschränkt, da die Reproduzierbarkeit der Messungen nicht gut ist (vgl. Tab. 4). Dies ist begründet in der blättrigen Gestalt des Minerals Muscovit (Schichtsilikat).

Die Reproduzierbarkeit der Diffraktometermessungen war sehr gut. Die Standardfehler der Mittelwerte, errechnet aus jeweils mindestens 3 Parallelpräparaten, sind auf Tab. 4 angegeben. Wurde nach der Aufnahme von 3 Präparaten der aufgeführte Standardfehler noch überschritten, so wurden noch mehr Parallelpräparate derselben Probe gefahren.

2.6 Untersuchungskonzept für die Herkunftsanalysen

Bei der Untersuchung von Schlammproben wurde die erstaunlich gute Erfassbarkeit einzelner Komponenten entdeckt. Daraus ergab sich dann die Möglichkeit, Herkunftsanalysen an Schlammproben vorzunehmen. In der Folge wurden aus verschiedenen Gebieten mit verschiedenen geologischen Einzugsgebieten weitere Schlammproben beschafft.

2.6.1 Aufschlüsselung der Proben in Komponenten

Die Probenentnahme ist bereits unter 2.2, die quantitative Untersuchung der Proben unter 2.4.4 und 2.5 beschrieben worden.

Auf Tab. 5 sind die 7 unabhängig voneinander erfassbaren Komponenten aufgeführt. Liegt ein Fehler in der Bestimmung einer Komponente vor, so wirkt sich das nicht auf die Genauigkeit der anderen Komponenten aus. Die Komponenten 1 – 5 wurden bereits im vorhergehenden Kapitel diskutiert. Erstaunlicherweise erwies sich zusätzlich auch die bei den Diffraktometeraufnahmen gemessene Untergrundintensität (Komponente 6) als herkunftstypisch. Der Gehalt an org. Material wird aus der Titration des organischen Kohlenstoffes abgeleitet.

Tab. 5: Die 7 Komponenten für die Schlammbeschreibung

| Komponente | Messmethode | Erfassung |
|------------------------|------------------------|--------------------|
| 1 Calcit | Röntgendiffraktometrie | in Massenprozenten |
| 2 Dolomit | " | " |
| 3 Quarz | " | " |
| 4 Muscovit | " | " |
| 5 Mikroclin | " | " |
| 6 Untergrundintensität | " | als Relativwert |
| 7 Organ. Material | Titration | in Massenprozenten |

Für die Durchführung der Herkunftsanalysen sind diese 7 Komponenten allerdings meist nicht alle gleichzeitig verwendbar. Dies hängt nicht nur mit der Qualität der Messverfahren, sondern auch mit der Tatsache zusammen, dass häufig Proben trotz verschiedener geologischer Herkunft sehr ähnliche quantitative Werte aufweisen. Über die Brauchbarkeit einer Komponente für die Herkunftsanalyse entscheidet, ob die Differenz der quantitativen Vergleichswerte deutlich grösser als die Standardfehler dieser Werte ist. Es zeigt sich generell, dass die Komponenten 1 – 3 am häufigsten brauchbar sind, gefolgt von 4 und 5. Komponenten 6 und 7 sind hingegen oft unbrauchbar (vgl. Beispiele Kap. 4).

Da der Gehalt an organischem Material einer Probe nicht im selben Ausmasse herkunftstypisch ist wie der Gehalt an mineralischen Komponenten, wurde die mineralische Substanz jeder Probe auf 100% umgerechnet (Fig. 10). Dies schliesst die Brauchbarkeit der organischen Substanz (= organisches Material) als unabhängige Komponente allerdings nicht aus.

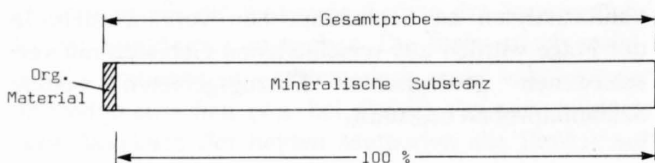


Fig. 10: Prozentbalken Gesamtprobe

Die mineralische Substanz ist in der Regel vollständig aus kristallinen Anteilen aufgebaut, wovon die oben erwähnten kristallinen Komponenten 1 – 5 in den untersuchten Proben normalerweise bis etwa 70 Massenprozent ausmachen. Der nicht untersuchte Anteil besteht vor allem aus Tonmineralen.

2.6.2 Korngrößenabhängigkeit der Mineralgehalte

Der mineralogische Aufbau der Schlammproben hängt natürlicherweise sehr stark von der Geologie des jeweiligen Einzugsgebietes ab. Wie schon andernorts erwähnt, entzieht sich aber der mineralogische Aufbau der Silte der direkten makroskopischen als auch teilweise der mikroskopischen Untersuchung. Die bisherigen Kenntnisse und Erfahrungen über Sedimentgesteine dieses Korngrößenbereiches sind daher lückenhaft.

Wurden von den vorhandenen Schlammproben mehrere Kornverteilungen aufgeschlämmt mit D50-Werten im Bereich von ca. 10 – 30 Mikrometer (an ca. 100 Proben durchgeführt), so zeigten sich folgende *Veränderungen mit zunehmender Korngrösse*: 60% der Proben zeigten eine Zunahme des Calcit- und Dolomitgehaltes. Der Quarzgehalt stieg sogar bei 80% der Proben (von den fehlenden 20% stammt die Hälfte der Proben aus dem Forggensee und aus dessen Einzugsgebiet). Der Muscovit- und Mikroklingehalt hingegen stieg nur in 40% der Proben mit zunehmender Korngrösse an.

Fig. 11 – 17 zeigen Proben aus dem Forggensee und dem Sufnersee. Für jede Probe wurden 3 unabhängige Kornverteilungen aufgeschlämmt, die Komponenten ermittelt (nur mineralische Komponenten dargestellt) und zudem die Regressionsgeraden und der Korrelationskoeffizient errechnet. Die Prozentwerte wurden mittels zweier Auswertmethoden ermittelt, die mit den Indices 21 resp. 51 gekennzeichnet sind. Für das 21er-als auch für das 51er-Verfahren gelten separate Eichgeraden, die an einfachen Laborgemischen ermittelt werden. Der Unterschied zwischen den beiden Verfahren liegt darin, dass die beim Röntgen auftretenden Intensitätspeaks lediglich über einen schmalen Peakbereich (21 Auswertungsschritte, siehe 2.5.4, Fig. 6) oder einen breiteren Peakbereich (51 Auswertungsschritte) ausgewertet werden. Die Wahl des breiteren Peakbereichs beinhaltet die Gefahr, dass weitere unerwünschte Komponenten in den gemessenen Intensitäten enthalten sind. So zeigen auch mit Ausnahme von Muscovit alle Komponenten um wenige Prozent höhere Werte, wenn die 51er-Auswertung angewendet wurde. Beim Muscovit liegt der Unterschied zwischen den beiden Auswertmethoden bis gegen 10%. Zudem ist der Standardfehler des arithmetischen Mittels mehrerer Messungen jeweils relativ gross (Tab. 4). Daraus muss man folgern, dass diese Mineralart (Schichtsilikat!) für die vorgenommenen Untersuchungen nur teilweise geeignet ist.

Die Darstellungen Fig. 11 – 17 sind Bestandteil methodischer Abtastungsversuche für die Anwendungsmöglichkeit in der vorhandenen Problematik. Für die Auswertungen und Vergleiche in dieser Arbeit wurden danach stets die 21er-Auswertungen verwendet, da sie sich als besser reproduzierbar erwiesen und auch einen engeren Zusammenhang zwischen Korngrösse und Komponenten-Prozentanteilen zeigten.

In praktisch allen Beispielen kann man eine *Abhängigkeit zwischen Prozentgehalt und Korngrösse* erkennen. Diese Abhängigkeit wurde trotz der nur 3 zur Verfügung stehenden Wertepaare auch mathematisch dargestellt (zur besseren Illustration). Die Berechnung und Konstruktion der beiden Regressionsgeraden stellt zweifellos wegen der wenigen zur Verfügung stehenden Wertepaare eine grobe Annäherung dar.

Die Tatsache, dass bei den meisten dargestellten Beispielen die Korngrößenabhängigkeit des Mineralgehaltes durch eine Gerade angenähert werden kann (natürlich nur über eine Distanz von wenigen Mikrometern), ist ein sehr erstaunlicher Befund. Er lässt auch zu, dass fehlende Werte zwischen vorhandenen Punkten zu Vergleichszwecken interpoliert werden können, dies natürlich nur als Notlösung. Über grössere Korngrößenbereiche ist eine lineare Abhängigkeit zwischen Korngrößenverteilung und Mineralgehalt sicher nicht gegeben und eine Formulierung auch für Vergleichszwecke nicht statthaft. Für jede Sedimentprobe müssten in diesem Fall mittels mehrerer Kornverteilungen die wahren Abhängigkeiten ermittelt werden.

Die starken Veränderungen der Mineralgehalte mit zunehmender Korngrösse der Kornverteilungen ist erstaunlich. Die Ursache liegt im petrographischen Aufbau der Fest- und Lockergesteine im jeweiligen Einzugsgebiet. Notwendigerweise muss auch gefolgert werden, dass ein Vergleich von Schlammproben oder allgemeiner von Sedimentproben offenbar geringe Aussagekraft besitzt, sofern nicht Proben mit gleicher oder sehr ähnlicher Kornverteilung miteinander verglichen werden.

Die Calcit- und Dolomitwerte der Probe Suf3 (entspricht Su34) wurden auch titrimetrisch ermittelt und deshalb in Fig. 11 zum Vergleich nachträglich eingetragen.

Für eine Probe aus dem Bacino di Malvaglia wurden diese Abhängigkeiten bereits früher (AMMANN 1981) formuliert. Diese Untersuchungen wurden aber mit einer abweichenden Methodik ausgeführt.

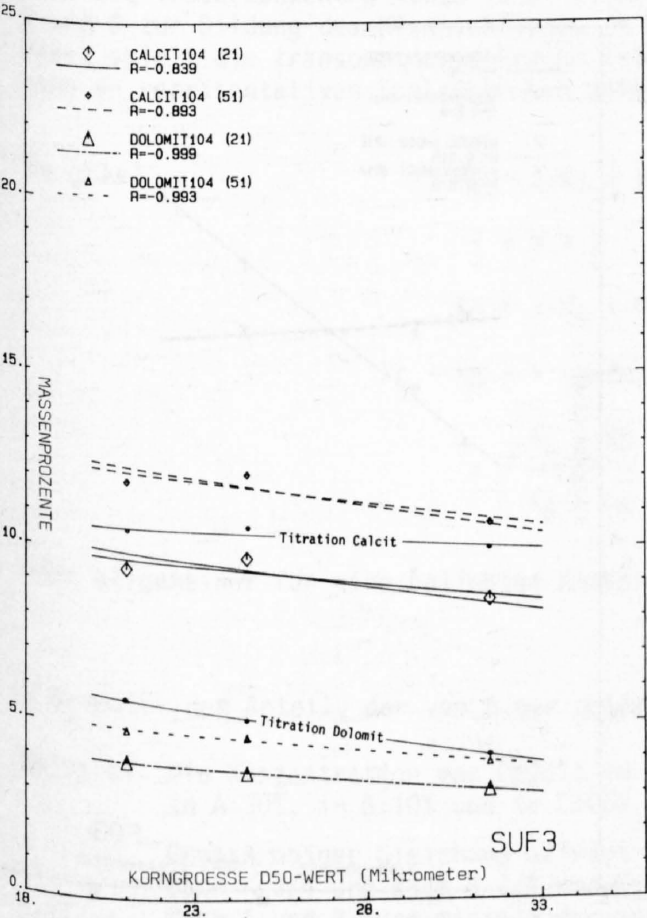


Fig. 11: Probe Suf3, Calcit und Dolomit

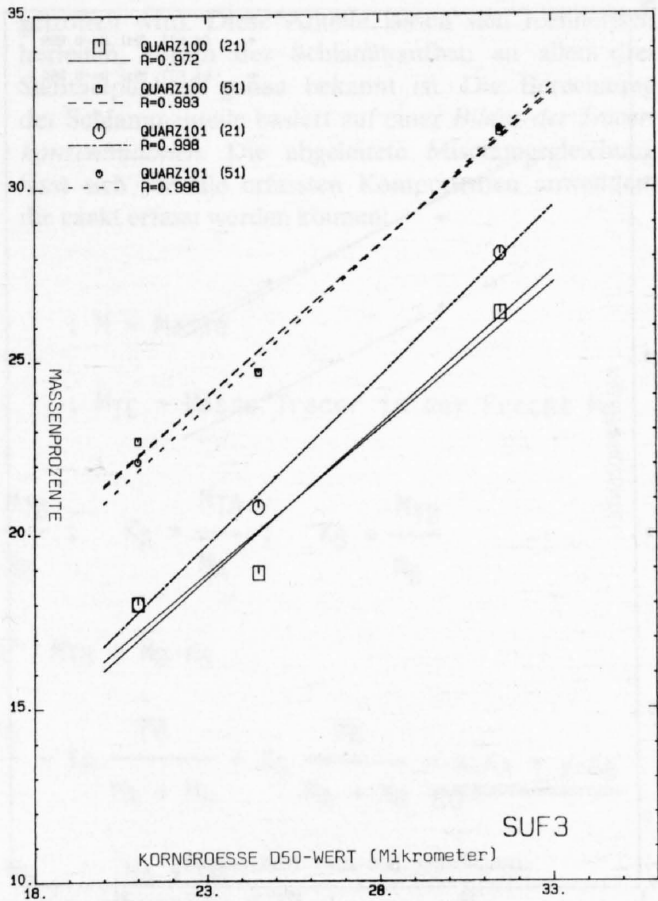


Fig. 12: Probe Suf3, Quarz100 und Quarz101

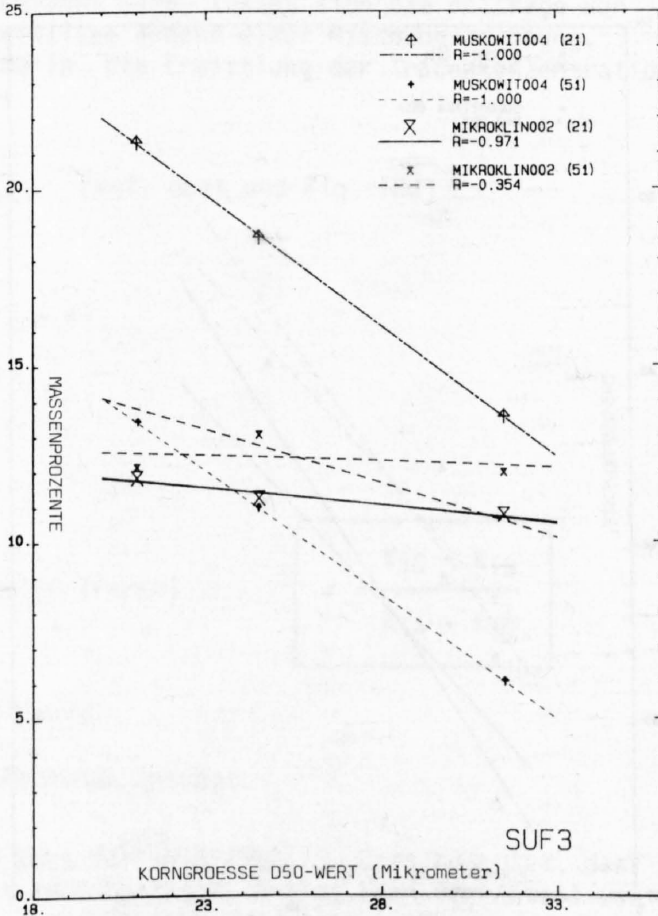
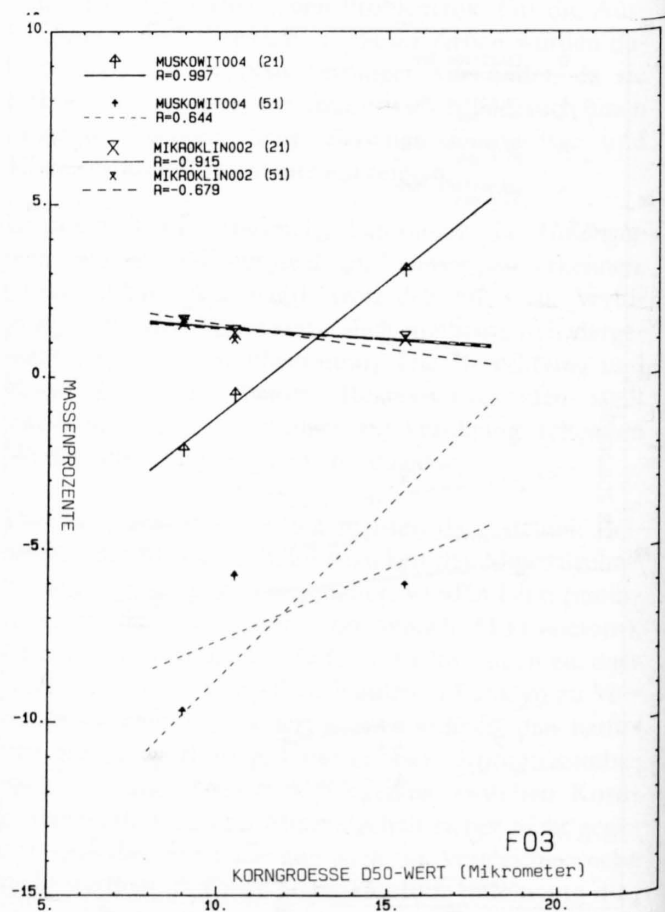
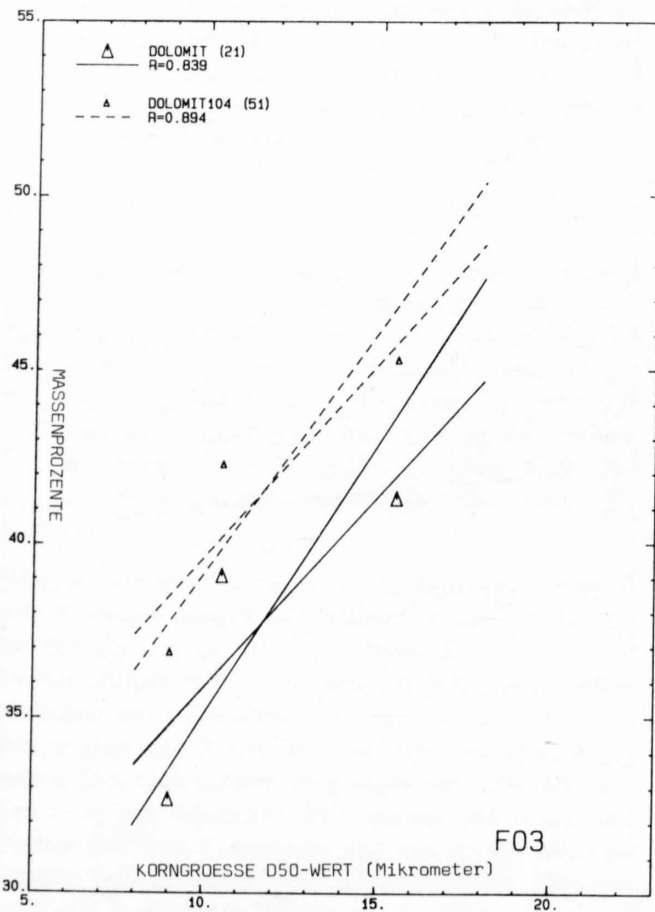
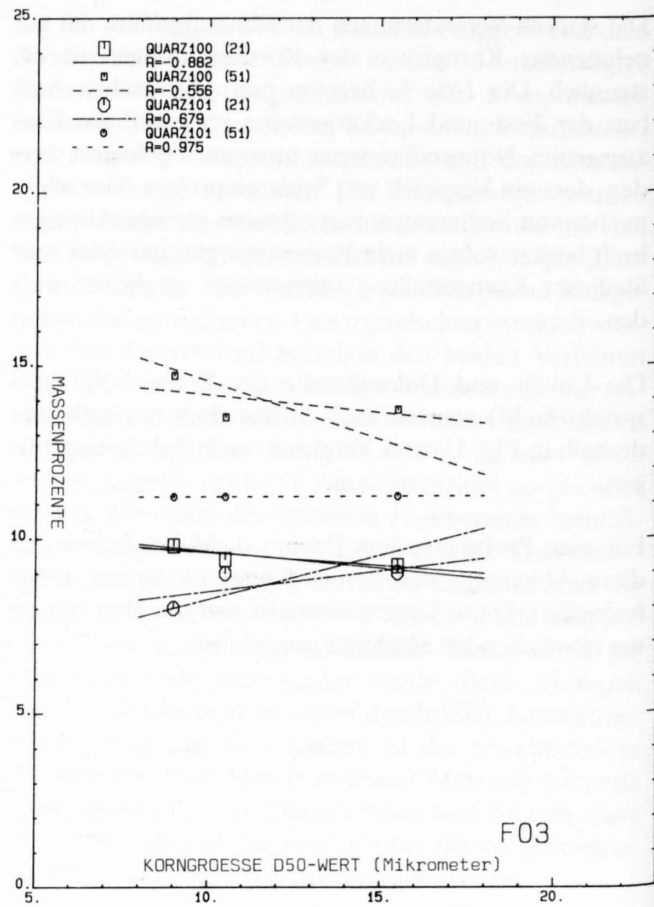
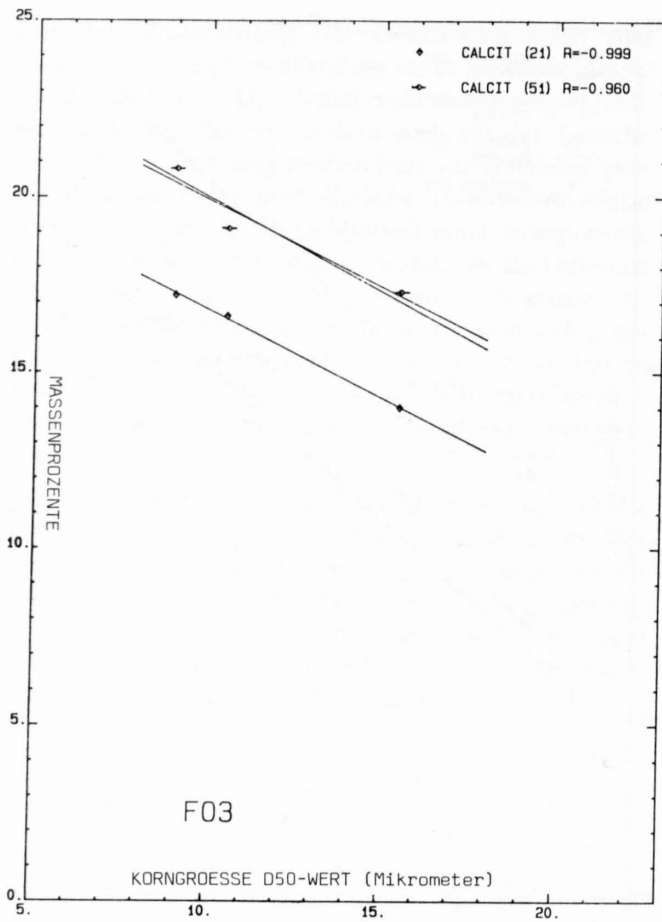


Fig. 13: Probe Suf3, Muscovit und Mikroklin



2.6.3 Relativ-quantitative Herkunftsanalyse

2.6.3.1 Theoretische Grundlage

Die relativ-quantitative Herkunftsanalyse geht auf folgende Grundidee zurück (Fig. 18a,b): Eine Schlammprobe in Punkt C setzt sich zu bestimmten Anteilen aus Schlamm zusammen, wie er in Punkt A und B an-

getroffen wird. Diese Anteile lassen sich rechnerisch herleiten, sofern der Schlammaufbau an allen drei Sammelpunkten genau bekannt ist. Die Berechnung der Schlammanteile basiert auf einer *Bilanz der Tracerkonzentrationen*. Die abgeleitete Mischungsgleichung lässt sich für alle erfassten Komponenten anwenden, die exakt erfasst werden können:

Frachtbilanz $M_C = M_A + M_B$; $M = \text{Masse}$

Tracerbilanz $M_{TC} = M_{TA} + M_{TB}$; $M_{TC} = \text{Masse Tracer in der Fracht } M_C$

Tracerkonzentrationen $K_C = \frac{M_{TC}}{M_C} = \frac{M_{TA} + M_{TB}}{M_A + M_B}$; $K_A = \frac{M_{TA}}{M_A}$; $K_B = \frac{M_{TB}}{M_B}$

Daraus lässt sich ableiten: $M_{TA} = M_A \cdot K_A$ und $M_{TB} = M_B \cdot K_B$

$$K_C = \frac{M_A \cdot K_A + M_B \cdot K_B}{M_A + M_B} = K_A \frac{M_A}{M_A + M_B} + K_B \frac{M_B}{M_A + M_B} = \underline{\underline{x \cdot K_A + y \cdot K_B}}$$

$$x + y = \frac{M_A}{M_A + M_B} + \frac{M_B}{M_A + M_B} = \frac{M_A + M_B}{M_A + M_B} = 1$$

Wenn die Tracerkonzentrationen in A, B und C bekannt sind, lassen sich die Beiträge von A und B zur Bildung des Mischschlammes in C herleiten anhand einer Mischungsrechnung. Dabei spielt die transportierte Fracht keine Rolle. Die Ermittlung der Tracerkonzentrationen kann an repräsentativen Schlammproben erfolgen.

Es gilt $K_C = x \cdot K_A + y \cdot K_B$ (vgl. oben und Fig. 18d)

$$1 = x + y$$

$$K_C = x \cdot K_A + K_B \cdot (1 - x)$$

$$K_C - K_B = x \cdot (K_A - K_B)$$

$$x = \frac{K_C - K_B}{K_A - K_B}$$

oder allgemeiner für eine beliebige Komponente (= Tracer) i:

$$x = \frac{K_{iC} - K_{iB}}{K_{iA} - K_{iB}}$$

x bedeutet den Anteil, der von A her geliefert wird.

Beispiel: Die Konzentration von Calcit im Bachschlamm beträgt in A:30%, in B:10% und in C:25%.

Gemäss obiger Gleichung beträgt der Wert für $x = 15/20 = 0.75$. Dies bedeutet, dass Bach A 3/4 und Bach B 1/4 zum Calcit in C beiträgt. Analog kann der Anteil von Bach A und B auch mittels der anderen Komponenten ermittelt werden und dann ein Mittelwert gebildet werden.

Die Herkunftsanalyse wird als relativ-quantitativ bezeichnet, da sie zwar die Schlammherkunft quantitativ aufschlüsselt, aber *keine Angabe über die absolute Grösse der Frachten* machen kann. Als den Schlamm beschreibende Komponente (Tracer) kann jede beliebige Substanz verwendet werden, deren Konzentration (Tracerkonzentration) exakt erfasst werden kann. In der vorliegenden Arbeit sind 7 unabhängige Komponenten ausgewählt worden. Die Anteilsbestimmungen können somit an 7 verschiedenen Komponenten erfolgen und werden anschliessend gemittelt, um die Aussagekraft zu erhöhen (vgl. Tab. 20). Die 7 Komponenten sind methodisch unabhängig voneinander ermittelt, d.h. wenn bei einer Komponente eine Fehlbestimmung vorliegt, hat das keine Auswirkung auf die anderen 6 Komponenten. Die Konzentrationen von 6 Tracern konnten im selben Arbeitsgang ermittelt werden.

Die Herkunftsanalyse ist nur unter der Einschränkung möglich, dass sich die Schlammte in A und B genügend voneinander unterscheiden und sich die Schlammzusammensetzung während des Transports von A und B nach C nicht verändert hat (Lösung von Calcit!). Deshalb muss die Distanz zwischen A (resp. B) und C minimal gehalten werden. Weiter ist wichtig, dass sich der Schlamm zwischen der Ablagerung und der Probenentnahme nicht verändert. Die betrachteten Einzugsgebiete sollten in sich ein möglichst ähnliches Niederschlagsregime aufweisen, damit grundsätzliche Aussagen über den Abtrag gemacht werden können. Damit verbindet sich automatisch die Forderung, dass solche Berechnungen nur an kleinen Einzugsgebieten auszuführen sind.

Die *Mischungsrechnungen* werden für alle 7 Komponenten mittels eines Computer-Rechenprogramms ausgeführt. Entspricht der erwünschte Wert D50, bei dem die Mischungsrechnung stattfinden soll, nicht einem vorhandenen D50-Wert, so können die quantitativen Werte für die Komponenten 1 – 7 linear aus den vorhandenen Werten interpoliert werden (nur über eine Distanz von wenigen Mikrometern). Die Berechnungen gemäss der abgeleiteten Mischungsgleichung lassen sich im Prinzip ohne Computereinsatz durchführen. Wenn aber die Berechnungen nicht nur überschlagsmässig und insbesondere für jedes frei wählbare D50 der Korngrössenverteilungen ausgeführt werden sollen, ist der Einsatz eines Rechenprogrammes sinnvoll.

Von den 7 Mischungsrechnungen werden jene ausgesondert, von denen die Ausgangswerte (Proben A und B) nicht um mehr als den dreifachen (resp. sechsfachen) Betrag des Standardfehlers voneinander abweichen. Die Resultate der übrigbleibenden Mischungsrechnungen werden gemittelt (vgl. auch Bsp. unter 4.2).

Die Schlammuntersuchungen wurden für die Einzugsgebiete der Minster (Tab. 16), des Furtbachs (Tab. 22–24) und des Steinibachs (Tab. 39) *mehrfach* durchgeführt.

2.6.3.2 Relativ-quantitative Herkunftsanalyse bei Bachverzweigungen

Während eines Hochwasserereignisses werden auch randliche, sonst trocken liegende Bettbereiche eines Baches überflutet (Fig. 18c). In diesen Überflutungsbereichen kommt es zur Ablagerung von Schlamm in eigentlichen «Schwebstofffallen» (bspw. in den Auskolkungen hinter grossen Steinen). Hier können später *Schlammproben* entnommen werden. In Bächen lassen sich in der Regel leicht solche *Schlammdepots* finden, sofern es sich nicht um kanalisierte Strecken handelt. Beim Durchgang der Hochwasserwelle können in diesen Überflutungsbereichen Veränderungen stattfinden, wie Umlagerung des Geschiebes und Abtrag des Feinmaterials. Nach Überschreiten der Spitze der Hochwasserwelle setzt wieder Ablagerung ein, insbesondere auch von Schwebstoffen in «Schwebstofffallen» (bspw. hinter grossen Steinen). Die Akkumulation findet statt, bis dieser randliche Bettbereich nicht mehr überflutet ist. Sofern die alten Schlammdepots während dem Anstieg der Hochwasserwelle nicht ausgeräumt werden, findet in den «Schwebstofffallen» eine Akkumulation von Ablagerungen mehrerer Hochwasserereignisse statt.

An Bachverzweigungen lässt sich der Schlamm an Entnahmestelle C aufschlüsseln auf Schlamm von Entnahmestelle A und B. Eine *grundlegende Forderung* an die Probestelle in Punkt C ist dabei, dass sie so weit von der Bachverzweigung entfernt liegen muss, dass sich der Schlamm aus Gebiet a und b gut durchmischt hat. Es stellt sich aber nun die Frage, wieweit die Schlamm-aufschlüsselung auch für die in Wirklichkeit transportierten *Schlammfrachten* repräsentativ ist, d.h. ob sich die Schlammischung in Punkt C auch gemäss dem Verhältnis der Schwebstofffrachten der beiden Zuflüsse aufbaut. An einem Modellfall wird im folgenden diese Frage diskutiert. Anschliessend werden die Auswirkungen von Abweichungen vom Modellfall erwähnt. Abschliessend erfolgt eine Diskussion des in der Natur wohl meistens verwirklichten Normalfalls.

Modellfall:

Gebiet a und Gebiet b werden kurz vor der Vereinigung der aus den beiden Gebieten ausströmenden Bäche in Punkt A und B beprobt (Fig. 18b). Für den Modellfall gelten folgende Annahmen: Gebiet a und b sind gleich gross und gleich aufgebaut (gleiche Abtragsintensitäten). Die Hochwasserwellen bei einem Niederschlagsereignis (gleiche Niederschlagsintensität, gleicher Zeitpunkt des Beginns und gleiche Dauer in beiden Gebieten vorausgesetzt) treffen aus Gebiet a und b gleichzeitig an der Vergabelungsstelle ein. Die Ganglinie der Schwebstoffführung in Punkt C ergibt sich aus der Summe der Ganglinien in den Punkten A und B (Fig. 18e). Die Ganglinie der Schwebstoffführung erreicht etwa gleichzeitig wie die Hochwasserganglinie ihr

Proben aus einem
See und Zuflüssen

Proben aus Bächen

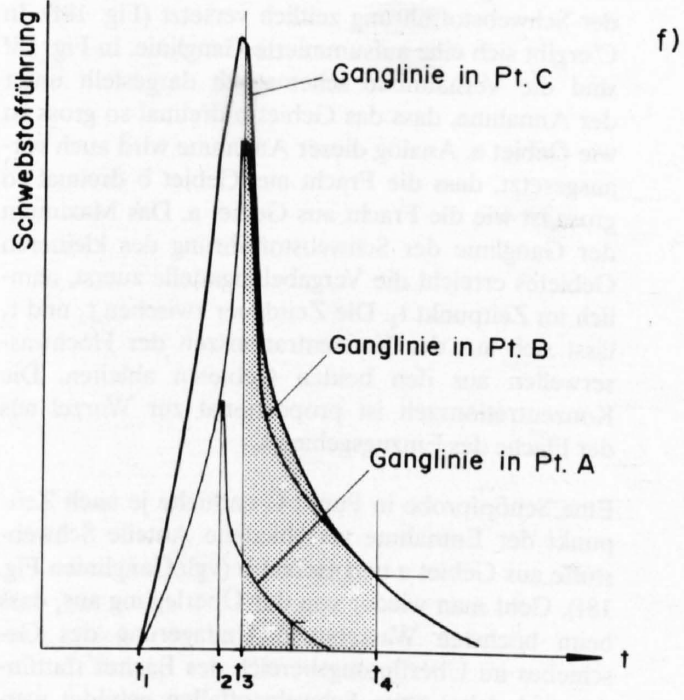
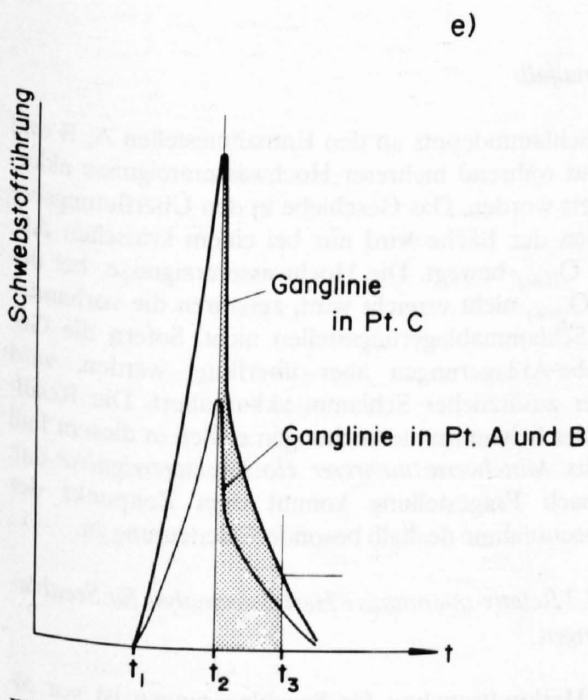
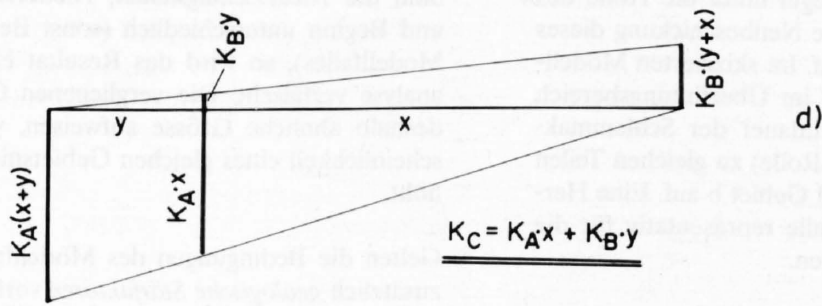
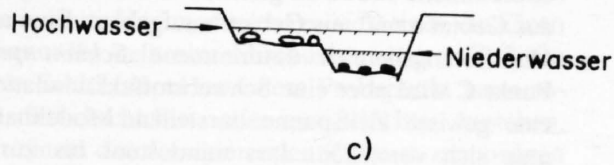
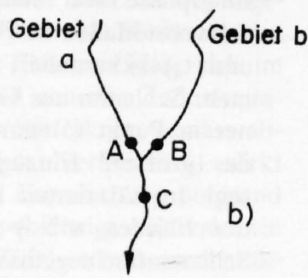
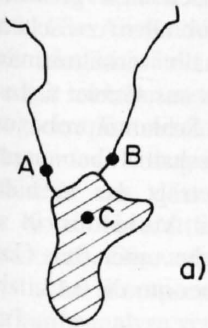


Fig. 18: Grundprinzip der relativ-quantitativen Herkunftsanalyse

Maximum (gilt annähernd für kleine Einzugsgebiete, vgl. NIPPES 1975).

Wird an einem beliebigen Zeitpunkt während des Hochwasserereignisses eine *Schöpfprobe* schwebstoffbelastetes Wasser entnommen, so ist die in Punkt C entnommene Probe zu gleichen Teilen aus Schwebstoff aus Gebiet a und aus Gebiet b aufgebaut. Eine aus dem Überflutungsbereich entnommene *Schlammprobe* in Punkt C wird aber eine Schwebstoffakkumulation über eine gewisse Zeitspanne darstellen. Modellhaft kann man sich vorstellen, dass mindestens bis zur Erreichung der Zeitmarke t_2 (also bis zum Höchstwasserstand) in den Punkten A, B und C im Überflutungsbereich des Bachbettes Umlagerung des Geschiebes und Abtrag der alten Schlammdepots stattfindet. Wenn die Ganglinie der Wasserführung absinkt und die Bewegung des Geschiebes aufhört, kann sich im Überflutungsbereich in neu entstandenen Schwebstofffallen wieder Schlamm ablagern. Nach gewisser Zeit (Zeitpunkt t_3) sinkt der Wasserspiegel unter die Höhe des Überflutungsbereiches, und die Neubeschickung dieses Gebietes mit Schlamm hört auf. Im skizzierten Modellfall baut sich der in Punkt C im Überflutungsbereich abgelagerte Schlamm (die Zeitdauer der Schlammakkumulation spielt dabei keine Rolle) zu gleichen Teilen aus Schlamm aus Gebiet a und Gebiet b auf. Eine Herkunftsanalyse ist in diesem Falle repräsentativ für die transportierten Schlammfrachten.

Abweichungen vom Modellfall:

– Bei grossen Unterschieden in der Gebietsgrösse (bspw. Gebiet b grösser als Gebiet a), aber sonst gleichen Bedingungen wie im skizzierten Modellfall, treffen die Hochwasserwellen zeitlich versetzt bei A und B ein. Analog sind auch die Maxima der Ganglinien der Schwebstoffführung zeitlich versetzt (Fig. 18f). In C ergibt sich eine aufsummierte Ganglinie. In Fig. 18f sind die Verhältnisse schematisch dargestellt unter der Annahme, dass das Gebiet b dreimal so gross ist wie Gebiet a. Analog dieser Annahme wird auch vorausgesetzt, dass die Fracht aus Gebiet b dreimal so gross ist wie die Fracht aus Gebiet a. Das Maximum der Ganglinie der Schwebstoffführung des kleineren Gebietes erreicht die Vergabelungsstelle zuerst, nämlich im Zeitpunkt t_2 . Die Zeitdauer zwischen t_2 und t_3 lässt sich aus der Konzentrationszeit der Hochwasserwellen aus den beiden Gebieten ableiten. Die Konzentrationszeit ist proportional zur Wurzel aus der Fläche des Einzugsgebietes.

Eine Schöpfprobe in Punkt C enthielte je nach Zeitpunkt der Entnahme verschiedene Anteile Schwebstoffe aus Gebiet a und Gebiet b (vgl. Ganglinien Fig. 18f). Geht man wieder von der Überlegung aus, dass beim höchsten Wasserstand Umlagerung des Geschiebes im Überflutungsbereich des Baches stattfindet und dabei neue Schwebstofffallen gebildet werden, so kann man folgende Überlegung anschliessen:

Bis zum Zeitpunkt t_3 hat bereits ein grösserer Prozentsatz der Schlammfracht aus Gebiet a als aus Gebiet b den Punkt C passiert. Während der Ablagerungsphase von Schlamm in den neu gebildeten Schwebstofffallen in Punkt C (vor allem zwischen t_3 und t_4) akkumuliert sich deshalb verhältnismässig mehr Schlamm aus Gebiet b als aus Gebiet a. In einer in Punkt C entnommenen Schlammprobe wird das grössere Einzugsgebiet deshalb übervertreten sein. Im skizzierten Beispiel beträgt das Verhältnis der Flächen $a:b = 0.33$, das Verhältnis in der Schlammfracht gemäss der Fläche unter den Ganglinien in Punkt C (von t_3 bis t_4) aber nur ca. 0.15.

- Gelten die Annahmen des Modellfalles, ist aber die *Abtragsintensität* der beiden Gebiete unterschiedlich, so gelten die Bedingungen des Modellfalls, d.h. in den Schlammdepots in Punkt C sind die beiden Gebiete gemäss ihrer Abtragsintensität vertreten.
- Sind die *Niederschlagsdauer*, Niederschlagsintensität und Beginn unterschiedlich (sonst Bedingungen des Modellfalles), so wird das Resultat einer Schlammanalyse verfälscht. Die verglichenen Gebiete sollten deshalb ähnliche Grösse aufweisen, was die Wahrscheinlichkeit eines gleichen Gebietsniederschlags erhöht.
- Gelten die Bedingungen des Modellfalles, sind aber zusätzlich *geologische Störfaktoren* vorhanden (Rüfen, Gletscher), so wird die Schlammanalyse schwer interpretierbar. Führt einer der beiden Bäche bspw. ständig Schwebstoffe (Bsp. Gletschermilch), so fehlt die bei Niederwasser transportierte Schlammfracht in der Betrachtung. Eine Verfälschung des Resultats tritt auch ein, wenn in einem Einzugsgebiet durch die Niederschläge Rüfen aktiviert werden.

Normalfall:

Die Schlammdepots an den Entnahmestellen A, B und C sind während mehrerer Hochwasserereignisse akkumuliert worden. Das Geschiebe in den Überflutungsbereichen der Bäche wird nur bei einem kritischen Abfluss $Q_{(krit.)}$ bewegt. Die Hochwasserereignisse, bei denen $Q_{(krit.)}$ nicht erreicht wird, zerstören die vorhandenen Schlammablagerungsstellen nicht. Sofern die Geschiebe-Ablagerungen aber überflutet werden, wird weiter zusätzlicher Schlamm akkumuliert. Die Resultate der Schlammuntersuchungen stellen in diesem Fall bereits *Mittelwerte mehrerer Hochwasserereignisse* dar. Je nach Fragestellung kommt dem Zeitpunkt der Probeentnahme deshalb besondere Bedeutung zu.

2.6.3.3 Relativ-quantitative Herkunftsanalyse für Seeablagerungen

Die Herkunftsanalyse für Seeablagerungen ist vor allem dann anwendbar, wenn nicht mehr als zwei domi-

nierende Zuflüsse vorhanden sind. Auch für den Fall dreier (evtl. mehrerer) dominierender Zuflüsse lässt sich die Herkunftsanalyse grafisch oder rechnerisch durchführen, das Resultat verliert aber an Aussagekraft. Die Anwendungsmöglichkeit der Methode wird nicht eingeschränkt durch die Tatsache, dass sich im See mit zunehmendem Abstand von der Zuflussmündung eine Entmischung in der Siltfraction gemäss abnehmender Korngrösse abspielt. Verfälschend wirkt sich aber aus, dass auch eine Entmischung aufgrund der Kornform stattfinden kann (blättrige Minerale wie Muscovit!). Die untersuchten Zuflüsse müssen charakteristische Komponentenunterschiede aufweisen. Die Herkunftsanalyse vermag auch keine Angaben über Sedimentfrachten zu liefern. Diese sind auf anderem Wege zu gewinnen. Das Sediment in einem See kann nur durch viele Proben an verschiedenen Probeorten repräsentativ erfasst werden. Dabei muss jede Probe ei-

nen möglichst grossen Schichtstapel umfassen (Rammkerne).

Schlammproben aus Seen repräsentieren Ablagerungen mehrerer bis sehr vieler Hochwasserereignisse. Bei der Entnahme von Rammkernen wird ein ganzes Schichtpaket gewonnen. Jede einzelne Schicht enthält Schlamm eines Hochwasserereignisses eines einzelnen Zuflusses oder stellt eine Mischung mehrerer Zuflüsse dar. Der Schichtstapel an einem Probepunkt kann somit aus Mischschichten oder aus Schichten bestehen, die nur einem der dominierenden Zuflüsse zuzuordnen sind. Die Untersuchung und Zuordnung einzelner Schichten in einem Sedimentkern ist sehr aufwendig. Wenn man einen Längsschnitt durch den ganzen Sedimentstapel homogenisiert und als Ganzes untersucht, erhält man einen Mittelwert für die Zuordnung zu den dominierenden Schlammlieferanten.

3 AKTUOGEOLOGISCHE SCHLAMMUNTERSUCHUNGEN AN STAUSEEN UND DEREN EINZUGSGEBIETEN

3.1 Einleitung und Resultatübersicht

Die Arbeiten zur vorliegenden Publikation gingen vom Bacino di Malvaglia aus und wurden auf Stauseen in geologisch andersartig aufgebauten Gebieten ausgedehnt (Sihlsee, Sufnersee, Forggensee). Da die Probenentnahme, die Laboruntersuchungen und die Erarbeitung eines neuen Untersuchungsverfahrens praktisch gleichzeitig in Angriff genommen werden mussten, entspricht der Sammelraster in den Einzugsgebieten nicht in allen Beispielen genau dem Verästlungsprinzip, wie es unter 2.6.3 (Fig. 18) beschrieben ist. Auf der Kartenskizze (Fig. 19) sind die ausgewählten Seen-Beispiele durch eine enge Schraffur hervorgehoben. Sie werden im vorliegenden Kapitel kommentiert.

Durch die Untersuchung von Schlamm aus Seen ist es teilweise möglich, Aussagen über die Herkunft des Schlammes zu machen. Für das *Bacino di Malvaglia* sind vor allem Gebiete mit Rauhwacken, Kalkglimmerschiefern und Tonschiefern als Schlammlieferanten wichtig, für den *Sufnersee* Gebiete mit metamorphen Gesteinen und für den *Forggensee* obertriadische Schichtserien.

Die weitestgehende Bearbeitung erfuhr das Beispiel *Sihlsee*. Gemäss Daten aus der Literatur und eigenen Untersuchungen wurde das bis heute abgelagerte Schlammvolumen auf mindestens 3 Mio m³ geschätzt. Eine sichere Zuordnung dieses Schlammes auf das Einzugsgebiet ist nur für einen Teil dieses Volumens möglich. Es zeigt sich aber klar, dass vor allem die *Minster* für die Schlammanlieferung verantwortlich ist. Das Einzugsgebiet der *Minster* wurde deshalb eingehender untersucht. Durch mehrmalige Schlammuntersuchungen im Einzugsgebiet der *Minster* konnte eine *Schlammabtragskarte* erstellt werden. Gemäss dieser Schlammabtragskarte schwanken die Schlammabtragsintensitäten in Teilgebieten des *Minster-Einzugsgebietes* von weniger als 0.02 bis ca. 1.5 mm/a. Vor allem Teilgebiete mit «Mergelschiefern + Mergelkalken (Helvetikum)» erwiesen sich als besonders abtragsaktiv.

Das Einzugsgebiet der *Minster* wurde zusätzlich geotechnisch kartiert mittels Kriterien, die den Schlammabtrag beschreiben. Die beigelegte Karte «*Gewässersohlenqualifizierung und Kartierung der Schlammquellen im Einzugsgebiet der Minster*» zeigt das Resultat. Der Vergleich mit der aus Schlammuntersuchungen erstellten Schlammabtragskarte zeigt ein kohärentes Abtrags-

bild. Die gewählten Kartierungskriterien vermitteln offenbar ein gutes Bild der Abtragsituation.

Eine *qualitative Auswertung der Feldkartierung* zeigt, dass sich die abtragsaktiven Gebiete durch die ausgewählten Kartierungskriterien klar von den abtragschwachen Gebieten unterscheiden. Generell haben abtragsaktive Gebiete grössere Anteile an Erosionsstrecken und nachrutschenden Uferstrecken. Erstaunlich ist aber vor allem das Resultat, dass die Gewässernetzlänge in abtragsaktiven Gebieten fast dreimal so gross sein kann wie in abtragschwachen Gebieten. Ob mittels der quantitativen Auswertung einer Feldkartierung direkt Aussagen über die Abtragsintensität möglich sind, wurde nicht weiter verfolgt.

Für das *Bacino di Malvaglia*, den *Sihlsee* und den *Sufnersee* erfolgte bereits eine frühere Darstellung in AMMANN (1981). Die Sedimentproben konnten damals allerdings nur anhand dreier Komponenten beschrieben werden, nämlich Calcit (Titration), Dolomit (Titration) und Quarz. Der Anteil Quarz wurde röntgenographisch mit der ursprünglich angewandten Peak-Scan-Methode gemessen (bei dieser Methode werden die Intensitäten über einen fest gewählten Messbereich direkt aufsummiert).

3.2 Sihlsee

Eine Beschreibung der Anlagen des Etzelwerkes findet sich bei JACKY (1936).

3.2.1 Proben aus dem See

Die Lokalisierung der aus dem *Sihlsee* gewonnenen Proben ist aus Fig. 20 ersichtlich. Es handelt sich um Kerne, die hauptsächlich vom Boot aus gezogen wurden. Lediglich die Proben im unmittelbaren Einflussbereich der wichtigsten Zuflüsse sind von Hand gestochen oder aufgesammelt. Die Grossbach-Probe stammt aus dem Bachbett.

Ungefähr jeder zweite Sedimentkern konnte bis in den alten Talboden hineingetrieben werden. Die darüberliegende Sedimentsäule repräsentiert die Ablagerungen seit dem ersten Aufstau des *Sihlsees* (1937). Dieser jüngere Sedimentanteil wurde über die ganze Länge in mehrere gleichwertige Portionen aufgeteilt:

An einer ersten Portion wurde die *Kornverteilung* der gesamten seit 1937 abgelagerten Sedimentsäule be-

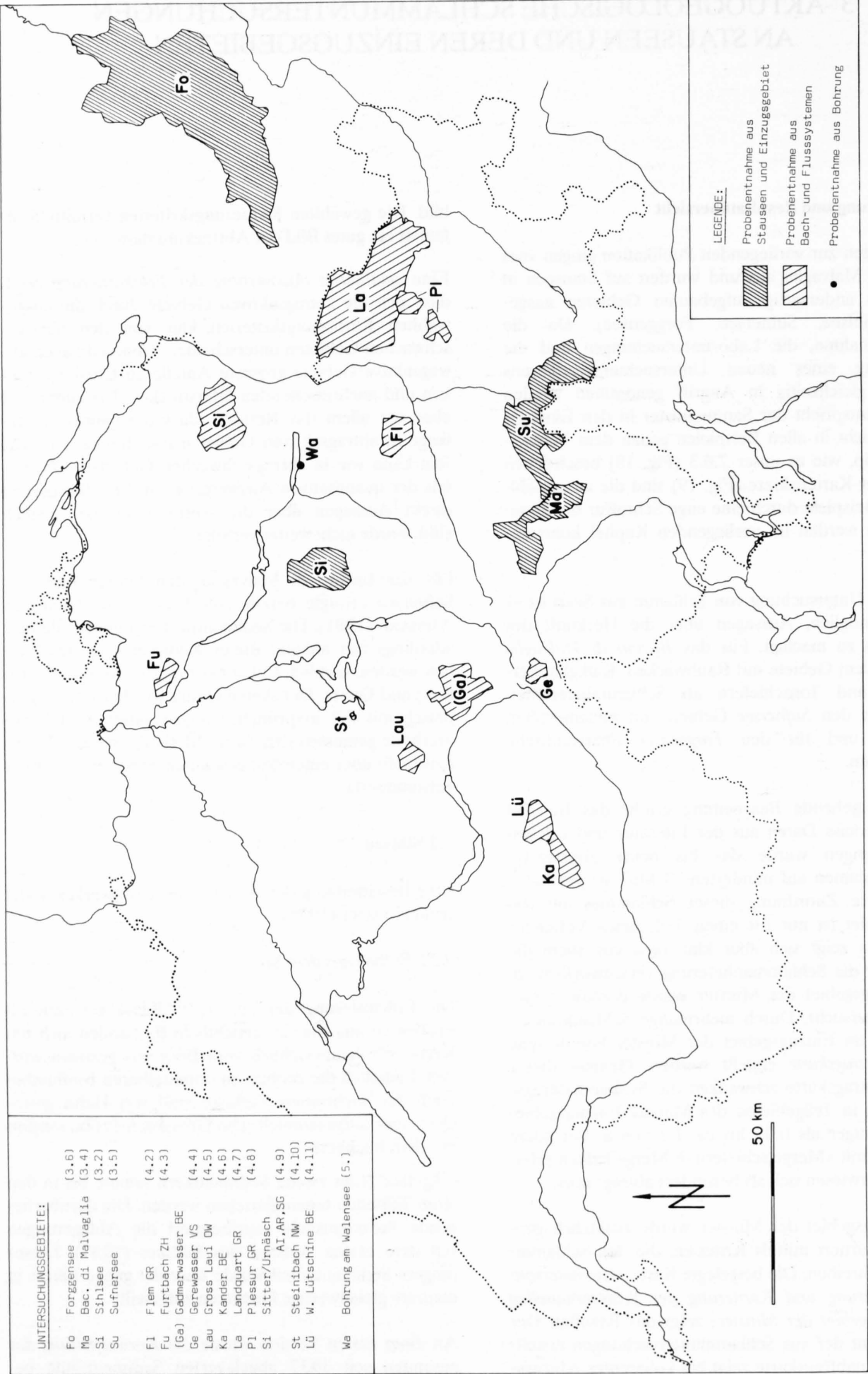


Fig. 19: Untersuchungsgebiete

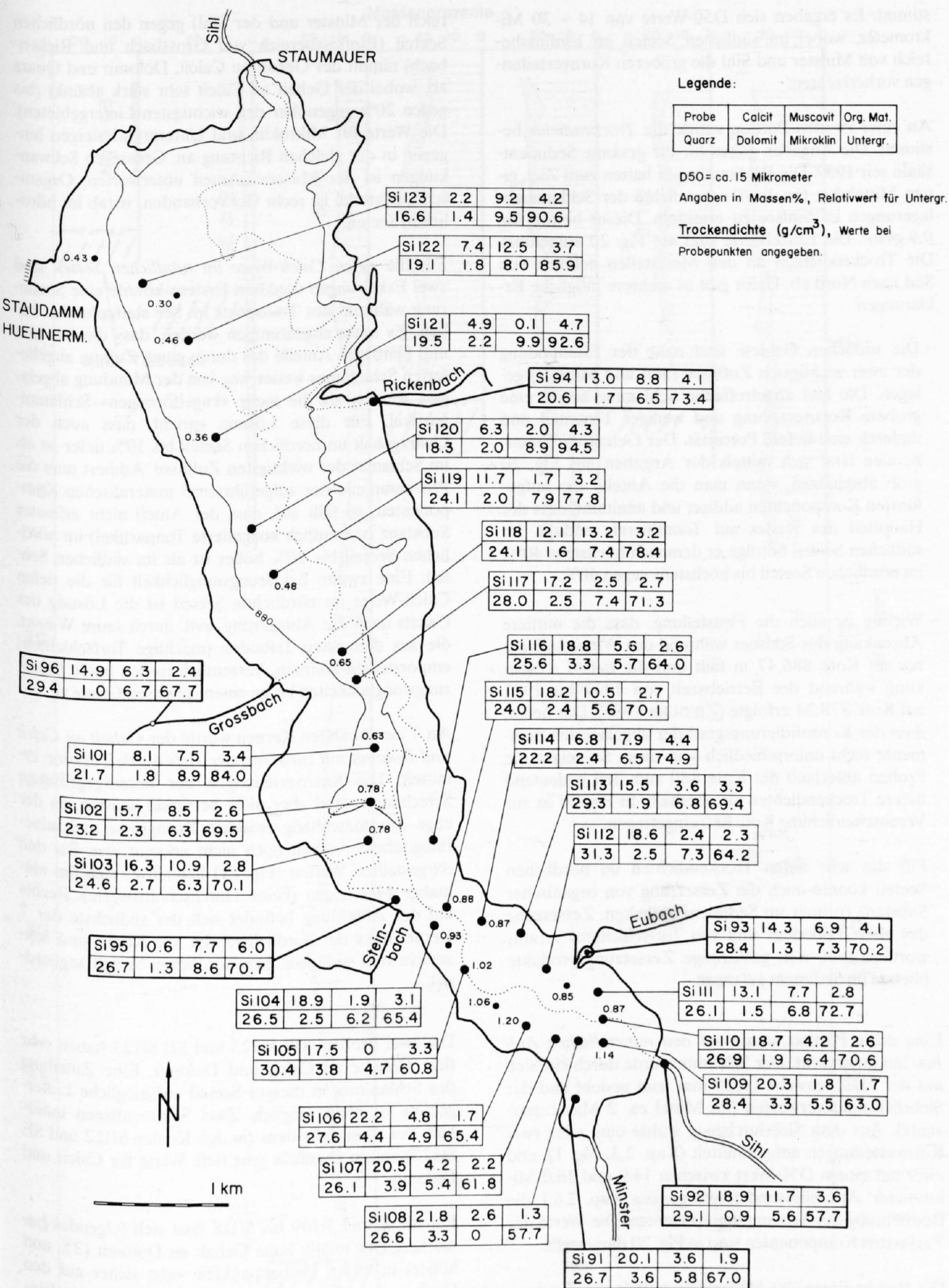


Fig. 20: Zusammensetzung (Mittelwerte) und Trockendichte des Schlammes im Sihlsee

stimmt. Es ergaben sich D50-Werte von 14 – 30 Mikrometer, wobei im südlichen Seeteil im Einflussbereich von Minster und Sihl die gröberen Kornverteilungen vorherrschten.

An einer zweiten Portion wurde die *Trockendichte* bestimmt. Die Angaben gelten für die gesamte Sedimentsäule seit 1937. Die Bestimmungen hatten zum Ziel, einen Mittelwert für die Trockendichte der Schlammablagerungen im Sihlsee zu ermitteln. Dieser beträgt *ca. 0.9 g/cm³*. Die Einzelwerte sind auf Fig. 20 aufgeführt. Die Trockendichten an den Messstellen nehmen von Süd nach Nord ab. Dafür gibt es mehrere mögliche Erklärungen:

- Die südlichen Gebiete sind nahe der Einmündung der zwei wichtigsten Zuflüsse (Sihl und Minster) gelegen. Die hier angetroffenen Schlamme zeigen eine gröbere Kornverteilung und weniger Tonanteil und dadurch eine tiefere Porosität. Der Gehalt an Tonmineralen lässt sich mittels der Angaben aus Fig. 20 grob abschätzen, wenn man die Anteile der aufgeführten Komponenten addiert und annimmt, dass der Hauptteil des Restes auf Tonminerale entfällt. Im südlichen Seeteil betrüge er demnach höchstens 40%, im nördlichen Seeteil bis höchstens gegen 60%.
- Wichtig ist auch die Feststellung, dass die mittlere Absenkung des Sihlsees während des Winterhalbjahres auf Kote 886.47 m fällt und die tiefste Absenkung während der Betriebszeit von 1937 bis 1981 auf Kote 878.34 erfolgte (ZIEGLER 1981). Das heisst, dass der Konsolidierungsgrad der abgelagerten Sedimente recht unterschiedlich sein muss. So zeigen die Proben unterhalb der Kote 880 zum Teil bedeutend tiefere Trockendichten als oberhalb. In Fig. 20 ist zur Veranschaulichung Kote 880 eingetragen.
- Für die sehr tiefen Trockendichten im nördlichen Seeteil könnte auch die Zersetzung von organischer Substanz (primär im Sediment enthalten, Zersetzung des alten Talbodens und von Torfschichten) verantwortlich sein, d.h. gasförmige Zersetzungsprodukte blieben im Sediment gefangen.

Eine dritte Portion wurde auf den *mineralischen Aufbau* hin untersucht. Der Schlamm wurde durch ein Sieb mit der Maschenweite 0.125 mm nass gesiebt und der Siebrückstand verworfen (im Mittel *ca. 2* Massenprozent). Aus dem Siebdurchgang wurde eine oder zwei Kornverteilungen aufgeschüttelt (Kap. 2.3, Fig. 1), und zwar mit einem D50-Wert zwischen 14.0 und 16.0 Mikrometer. Anschliessend folgte gemäss Kap. 2.6.1 die Bestimmung der Schlammkomponenten. Die Werte der 7 erfassten Komponenten sind in Fig. 20 dargestellt.

Die Beschreibung des Schlammes mittels der 7 erfassten Komponenten (Fig. 20) lässt sich wie folgt zusammenfassen: Vom südlichen Seeteil aus (v.a. Einflussbe-

reich der Minster und der Sihl) gegen den nördlichen Seeteil (Einflussbereich von Grossbach und Rickenbach) nimmt der Gehalt an Calcit, Dolomit und Quarz ab, wobei der Gehalt an Calcit sehr stark absinkt (bis gegen 20% gegenüber den wichtigsten Liefergebieten). Die Werte für Mikroklin und Untergrund steigen hingegen in der gleichen Richtung an. Grösseren Schwankungen ist der Muscovit-Anteil unterworfen. Organisches Material ist recht viel vorhanden, vorab im nördlichen Seeteil.

Für die *tiefen Calcit-Werte im nördlichen Seeteil* sind zwei Erklärungen denkbar: Erstens könnte eine Sortierung während des Transports im See stattgefunden haben. Es muss angenommen werden, dass die feineren und blättrigen Anteile des durch einen Zufluss angelieferten Schlammes weiter weg von der Mündung abgelagert werden als die mehr «kugelförmigen» Schlammpartikel. Für diese Lösung spricht, dass auch der Quarzgehalt im nördlichen Seeteil bis 10% tiefer ist als im Schlamm der wichtigsten Zuflüsse. Addiert man die Prozentanteile der aufgeführten 5 mineralischen Komponenten, so fällt auf, dass der Anteil nicht erfasster Substanz (vermutlich koagulierte Tonpartikel) im nördlichen Seeteil bis 20% höher ist als im südlichen Seeteil. Eine zweite Erklärungsmöglichkeit für die tiefen Calcit-Werte im nördlichen Seeteil ist die Lösung des Calcits nach der Ablagerung, evtl. durch saure Wässer, die aus dem alten Talboden (mächtige Torfschichten) emporsteigen könnten. Vermutlich treffen beide Erklärungsmöglichkeiten bis zu einem gewissen Grade zu.

An 7 ausgewählten Kernen wurde der *Gehalt an Calcit und Dolomit mit zunehmender Tiefe* durch Titration ermittelt. Die Kornverteilungen der herausgegriffenen Schichtlagen sind aber nicht bestimmt worden, da der enge Zusammenhang zwischen Korngrösse und mineralogischem Aufbau noch nicht erkannt war. Bei den dargestellten Werten (Fig. 21) handelt es sich um einmalige Messungen (keine Durchschnittswerte). Rechts auf der Abbildung befindet sich der südlichste der 7 Kerne, links der nördlichste, d.h. die Kerne sind sukzessive vom südlichen zum nördlichen Seeteil angeordnet.

Die zwei Proben NW Si123 und SE Si123 haben sehr tiefe Gehalte an Calcit und Dolomit. Eine Zuteilung des Schlammes in diesem Seeteil auf mögliche Liefergebiete ist nicht möglich. Zwei Sedimentlagen innerhalb des alten Talbodens (in den Kernen Si112 und SE Si123) zeigen ebenfalls sehr tiefe Werte für Calcit und Dolomit.

Für die Kerne Si109 bis Si118 lässt sich folgendes bemerken: Der relativ hohe Gehalt an Dolomit (3% und höher) in vielen Probenpunkten weist sicher auf den Einfluss der Minster hin, da lediglich im Minster-Einzugsgebiet derart hohe Dolomitgehalte gefunden werden konnten. Auffallend ist, dass helle Schichtlagen in

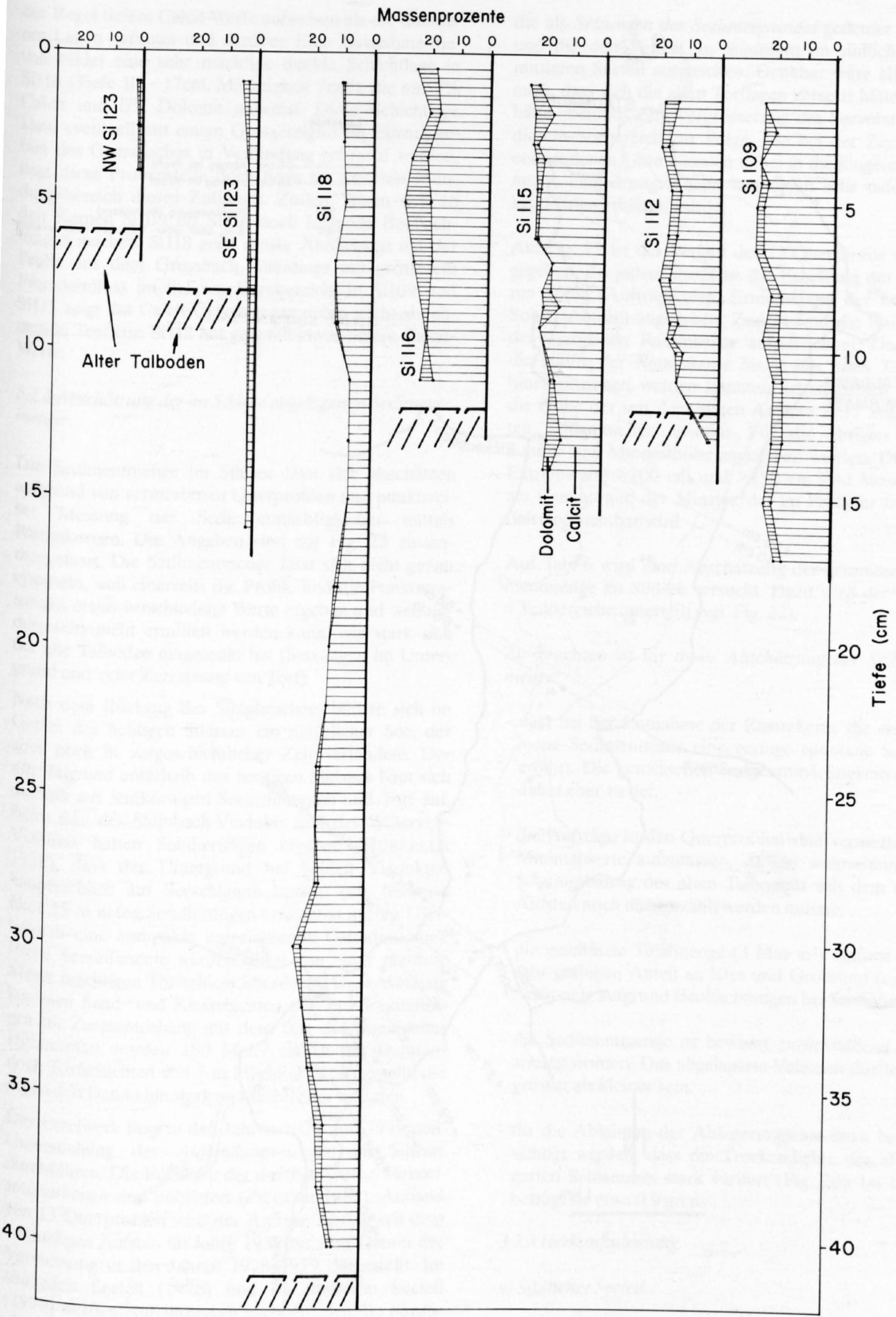


Fig. 21: Calcit- und Dolomitgehalt im Sihlseeschlamm in Abhängigkeit von der Tiefe

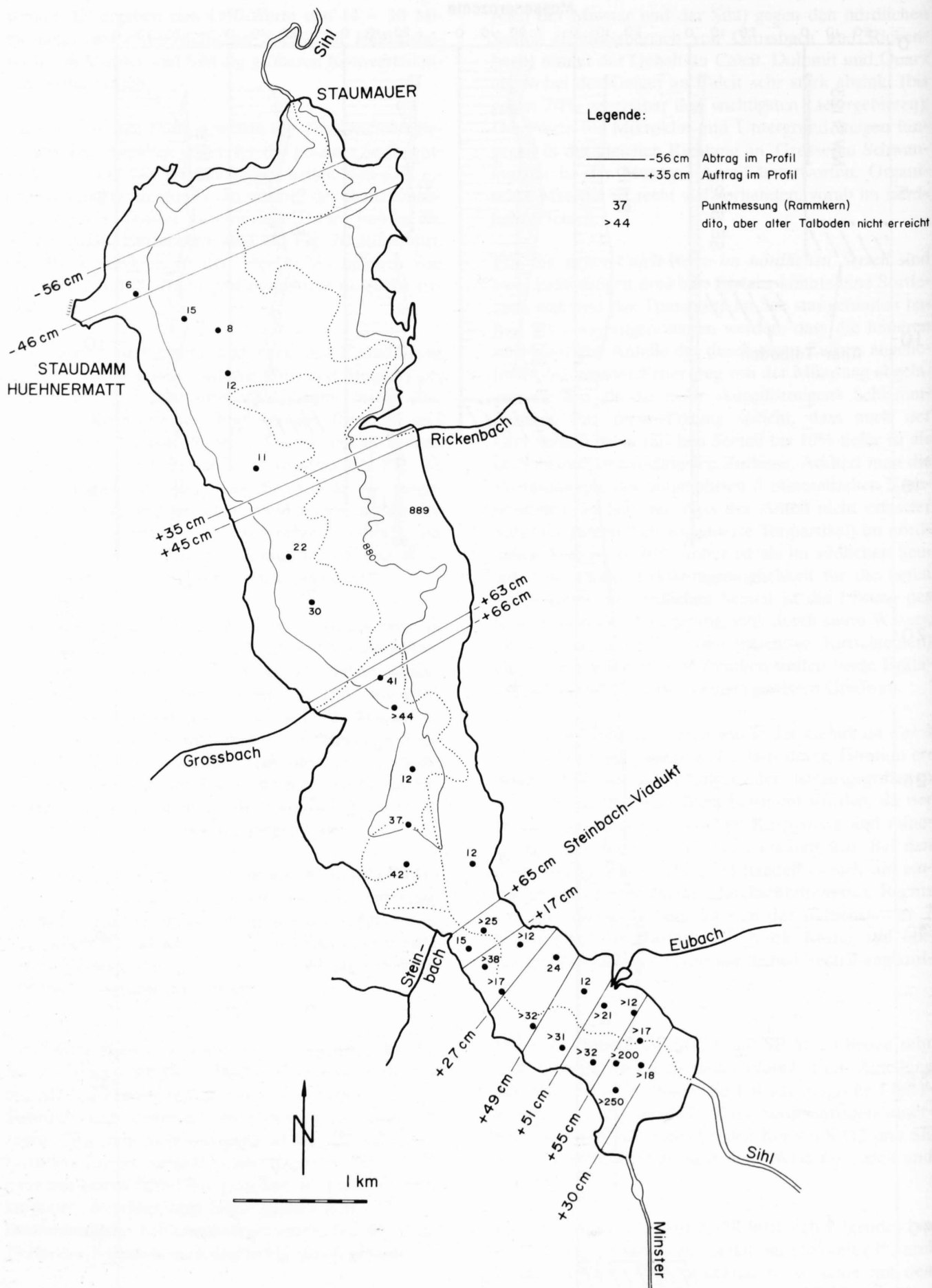


Fig. 22: Sedimentmächtigkeit im Sihlsee (in cm, Erläuterung im Text)

der Regel tiefere Calcit-Werte aufweisen als die dunkleren Lagen darunter und darüber. Eine Ausnahme hiervon bildet eine sehr mächtige dunkle Schichtlage in Si118 (Tiefe 10 – 17cm, Mächtigkeit 7cm!), die nur 7% Calcit und 0% Dolomit aufweist. Diese Schichtlage kann eventuell mit einem Grossereignis im Einzugsgebiet des Grossbaches in Verbindung gebracht werden, liegt diese Probenstelle doch noch im weiteren Mündungsbereich dieses Zuflusses. Zudem lassen sich an den Kernen Si109 bis Si118 noch folgende Beobachtungen machen: Si118 zeigt grosse Ähnlichkeit mit der Probe aus dem Grossbach, allerdings mit grösserem Fremdeinfluss im tieferen Kernbereich. In Si109 und Si115 zeigt der Calcit-Gehalt gegen unten leicht abnehmende Tendenz. Si112 hat generell etwas tiefere Calcit-Werte.

3.2.2 Abschätzung der im Sihlsee abgelagerten Sedimentmenge

Die Sedimentmenge im Sihlsee lässt sich abschätzen aufgrund von vermessenen Querprofilen und punktwieser Messung der Sedimentmächtigkeiten mittels Rammkernen. Die Angaben sind auf Fig. 22 zusammengefasst. Die Sedimentmenge lässt sich nicht genau ermitteln, weil einerseits die Profile und die Punktmessungen etwas verschiedene Werte ergeben und weil andererseits nicht ermittelt werden kann, wie stark sich der alte Talboden eingesenkt hat (Setzungen im Untergrund und/oder Zersetzung von Torf).

Nach dem Rückzug des Sihlgletschers bildete sich im Gebiet des heutigen Sihlsees ein natürlicher See, der aber noch in vorgeschichtlicher Zeit verlandete. Der *alte Talgrund* unterhalb des heutigen Sihlsees baut sich deshalb aus feinkörnigen Seesedimenten und Torf auf. Beim Bau des Steinbach-Viadukts und des Willerzell-Viadukts hatten Sondierungen ergeben (HÜRZELER 1938), dass der Untergrund bei beiden Viadukten hauptsächlich aus Seeschlamm besteht (die teilweise über 25 m tiefen Sondierungen erreichten nur im Uferbereich eine kompakte unterlagernde Grundmoräne). Diese Seesedimente werden meist von einer mehrere Meter mächtigen Torfschicht überdeckt. Unregelmässig kommen Sand- und Kiesschichten vor. Bei Sondierungen im Zusammenhang mit dem Bau des Staudamms Hühnermatt wurden 180 Meter östlich des Dammes noch Torfschichten von 7 m Mächtigkeit festgestellt, die gegen den Damm hin stark an Mächtigkeit verlieren.

Das Etzelwerk liess in den Jahren 1978 und 1979 eine Untersuchung der *Auflandungsmengen* im Sihlsee durchführen. Die Resultate der durchgeführten *Vermessungsarbeiten* sind publiziert (ZIEGLER 1981). Anhand von 13 Querprofilen wird der Auftrag/Abtrag seit dem erstmaligen Aufstau im Jahre 1937 bis zum Datum der Vermessung in den Jahren 1978/1979 dargestellt. Im südlichen Seeteil (1978) und im mittleren Seeteil (1979) werden Auflandungen nachgewiesen. Im nördlichen Seeteil (1979) stellte man aber grosse Abtragungen (vgl. Fig. 22, negative Werte bei Profils Spuren) fest,

die als *Setzungen des Seeuntergrundes* gedeutet werden und die den Verlust an Stauraum im südlichen und mittleren Seeteil ausgleichen. Denkbar wäre allerdings auch, dass sich die alten Torflagen zersetzt hätten. Dies hätte ebenfalls eine Vergrösserung des Seevolumens in diesem Seebereich zur Folge. Die bei der Zersetzung entstandenen Gase könnten dabei in die jüngeren Sedimente eingedrungen sein, was deren sehr tiefe Trockendichten erklären würde.

Auf Fig. 22 ist der Verlauf der 13 Querprofile wiedergegeben. Zu jedem Profil ist die Erhöhung der mittleren Sohle (Auftrag) resp. Erniedrigung der mittleren Sohle (Abtrag) angegeben. Zudem sind die Positionen der gezogenen Rammkerne aufgezeichnet. Da gegen die Hälfte der *Rammkerne bis in den alten Talboden* hineingetrieben werden konnten, ist an diesen Stellen die Höhe der seit dem ersten Aufstau 1937 abgelagerten Schlammmenge messbar. Für die übrigen Kerne konnte eine Mindesthöhe angegeben werden. Die zwei Extremwerte >200 cm und >250 cm sind Messungen am Canyonrand der Minster, der im Frühjahr bei Seetiefstand sichtbar wird.

Auf Tab. 6 wird eine Abschätzung der gesamten Sedimentmenge im Sihlsee versucht. Dazu wird der See in 4 Teilbereiche unterteilt (vgl. Fig. 22).

Zu beachten ist für diese *Abschätzung der Sedimentmenge*:

- dass bei der Entnahme der Rammkerne die entnommene Sedimentsäule eine geringe spontane Setzung erfährt. Die gemessenen Sedimentmächtigkeiten sind daher eher zu tief.
- die Aufträge in den Querprofilen sind vermutlich als Minimalwerte aufzufassen, da ein wahrscheinlicher Setzungsbetrag des alten Talbodens seit dem ersten Aufstau noch dazugezählt werden müsste.
- die geschätzte Totalmenge (3 Mio m³) umfasst einen sehr geringen Anteil an Kies und Grobsand (ca. 1%, Schätzung aufgrund Beobachtungen bei Seetiefstand).
- die Sedimentmenge ist bewusst *zurückhaltend abgeschätzt* worden. Das abgelagerte Volumen dürfte eher grösser als kleiner sein.
- für die Ableitung der Ablagerungsrate muss berücksichtigt werden, dass die Trockendichte des abgelagerten Schlammes stark variiert (Fig. 20). Im Mittel beträgt sie etwa 0.9 g/cm³.

3.2.3 Herkunftsdeutung

a) Südlicher Seeteil

Der Schlamm der Proben im südlichen Seeteil (Proben Si104 bis Si115) lässt sich relativ-quantitativ auf die

Tab. 6: Abschätzung der Schlammmenge im Sihlsee

| SEEBEREICH | MENGE |
|--|--------------------------|
| Hinterer Seeteil, Mündung Sihl und Minster bis Steinbach-Viadukt, nach ZIEGLER (1981) | 630 000 m ³ |
| Steinbach-Viadukt bis Mündung Grossbach Annahmen: Streifen im Norden 65 cm Sedimentmächtigkeit Breiter Zwischengürtel 40 cm " Streifen im Süden 65 cm " | 1 010 000 m ³ |
| Mündung Grossbach bis Mündung Rickenbach Annahmen: Streifen im Norden 40 cm Sedimentmächtigkeit Breiter Zwischengürtel 25 cm " Streifen im Süden 65 cm " | 730 000 m ³ |
| Mündung Rickenbach bis Staumauer Annahmen: Streifen im Süden 40 cm Sedimentmächtigkeit Restlicher Seeteil 10 cm " | 560 000 m ³ |
| <u>Totalmenge</u> <u>ca. 3 mio m³</u> | 2 930 000 m ³ |

zwei wichtigen Zuflüsse Sihl und Minster aufteilen. Dabei wird für jede Komponente (Quarz, Calcit, Dolomit etc.) jeder einzelnen Seeschlammprobe eine Mischungsrechnung erstellt mit den Werten des Sihlschlammes (repräsentiert durch Si92) und des Minsterschlammes (repräsentiert durch Si91) als Referenzgrößen. Das Verfahren ist in Fig. 18 (Kap. 2.6.3) dargestellt und an einem Beispiel (Kap. 4.2) detailliert ausgeführt. Nicht berücksichtigt ist hierbei vorerst der Schlammbeitrag des Eubaches. Wenn man berücksichtigt, dass das Einzugsgebiet des Eubachs lediglich 1/9 der Fläche des Einzugsgebietes von Sihl+Minster beträgt, scheint diese Vernachlässigung akzeptierbar.

Als Resultat ergibt sich, dass etwa 4/5 des Schlammes im südlichen Seeteil (bei einer Kornverteilung D50 = 15 Mikrometer) aus dem Einzugsgebiet der Minster stammt. Im Gebiet der Minster ist die Schlammabtragstätigkeit offenbar deutlich höher als im Gebiet der Sihl.

In dieser Abschätzung ist allerdings wie erwähnt der Einfluss des Eubaches nicht berücksichtigt, der ein Einzugsgebiet von 9.6 km² besitzt (Sihl 31.9 km², Min-

ster 57.9 km²). Aus einem Vergleich des geotechnischen Aufbaus der Einzugsgebiete kann man für das Eubach-Einzugsgebiet etwa die Hälfte bis die gleich grosse Schlammmenge postulieren wie für das Einzugsgebiet der Sihl. Unter dieser Annahme lassen sich die Anteile von Minster, Sihl und Eubach rechnerisch herleiten (Tab. 7).

Auch die Seeproben Si101, Si102, Si103 und Si116 können eher auf die Minster als auf die Sihl zurückgeführt werden. Allerdings wird durch die weiteren Sihlseezuflüsse die Herkunftsdeutung immer schwieriger.

b) Abschätzung für das gesamte Sihlseebecken

Der Schlamm im gesamten Sihlsee muss auf folgende Einzugsgebiete aufgeteilt werden (Tab. 8).

Für den südlichen Seeteil konnten die Schlammanteile aus dem Sediment abgeleitet werden. Für den mittleren und den nördlichen Seeteil ist dies hingegen nicht mehr möglich. Man ist hier völlig auf Schätzungen angewiesen. Anschliessend wird eine Annäherung versucht.

Tab. 7: Geschätzter Schlammanteil von Minster, Sihl und Eubach im südlichen Sihlseebecken

| | MINSTER | SIHL | EUBACH |
|------------------------------|---------|------|--------|
| Fläche (km ²) *) | 57.9 | 31.9 | 9.6 |
| Flächenanteil | 0.58 | 0.32 | 0.10 |
| Schlammanteil | 0.7 | 0.2 | 0.1 |
| Schlammanteil/Flächenanteil | 1.2 | 0.6 | 1.0 |

*) ohne Gebiete mit unterirdischer Entwässerung

Tab. 8: Das Einzugsgebiet des Sihlsees

| | FLAECHE km ² *) | FLAECHENANTEIL |
|--------------------------|----------------------------|----------------|
| Minster | 57.9 | 41.2 |
| Sihl | 31.9 | 22.7 |
| Eubach | 9.6 | 6.8 |
| Steinbach | 3.2 | 2.3 |
| Grossbach | 10.6 | 7.5 |
| Rickenbach | 9.3 | 6.6 |
| Restliches Einzugsgebiet | 18.2 | 12.9 |
| Total | 140.7 | 100.0 |

*) ohne Gebiete mit unterirdischer Entwässerung

Setzt man für die Minster, die Sihl und den Eubach bezogen auf das gesamte Sihlseebecken denselben SF-Wert (Schlammanteil/Flächenanteil-Wert) ein, wie er im südlichen Seeteil für diese drei Flüsse abgeleitet wurde, so müssen diesen drei Zuflüssen 2.1 Mio m³ Schlamm zugeordnet werden (Totalmenge geschätzt 3 Mio m³, siehe Kap. 3.2.2). Die fehlenden 900 000 m³ Schlamm (30%) müssten dem restlichen Einzugsgebiet (29.3 Flächenprozent) zugeschrieben werden. Dies ergäbe für dieses Restgebiet einen SF-Wert von ungefähr 1.0, was durchaus plausibel erscheint. Dabei ist zu beachten, dass fast die Hälfte dieses Gebietes zum direkten Einzugsgebiet des Sees gehört (Uferbereiche ohne gut entwickeltes Gewässernetz). Nimmt man für dieses direkte Einzugsgebiet des Sihlsees einen SF-Wert von höchstens 0.6 (Schätzung) an, so müsste zum Ausgleich beispielsweise der SF-Wert für Steinbach, Grossbach und Rickenbach auf ca. 1.3 erhöht werden. Diese Verteilung der Schlammfrachten ist vom geologisch-geotechnischen Standpunkt her betrachtet gut nachvoll-

ziehbar. Auf Tab. 9 ist diese Verteilung als Variante A dargestellt.

Auf Tab. 9 sind zwei weitere Verteilungsvarianten zum Vergleich angegeben. Der Vergleich mittels Varianten wurde durchgeführt, damit die mögliche Grösse der Schwankungsbreite der Schlammlieferung der Minster erkannt werden kann. Postuliert man beispielsweise, dass alle Einzugsgebiete gleich viel Schlamm in den Sihlsee liefern, ergäbe dies eine Verteilung gemäss Variante B. Diese Variante ist aber sehr unwahrscheinlich, wenn man bedenkt, dass das Einzugsgebiet des Sihlsees geologisch-geotechnisch sehr inhomogen aufgebaut ist. Variante B gibt einen Minimalwert für den Schlammabtrag im Minster-Einzugsgebiet an.

Variante C ist darauf ausgelegt, den Schlammabtrag im Einzugsgebiet der Minster gegen oben abzugrenzen. Als Kompensation wurden die Anteile der Sihl und des restlichen Einzugsgebietes wieder reduziert.

Tab. 9: Abschätzung der Herkunft des Schlammes im Sihlsee

| | VARIANTE A gemäss Herleitung im Text | | VARIANTE B (zum Vergleich) | | VARIANTE C (zum Vergleich) | |
|------------------------------|---|---------------|-------------------------------|---------------|-------------------------------|---------------|
| | SF-WERT *) | Schlammanteil | SF-WERT | Schlammanteil | SF-WERT | Schlammanteil |
| Minster | 1.2 | 1 500 000 m3 | 1.0 | 1 250 000 m3 | 1.4 | 1 750 000 m3 |
| Sihl | 0.6 | 400 000 m3 | 1.0 | 650 000 m3 | 0.7 | 450 000 m3 |
| Eubach | 1.0 | 200 000 m3 | 1.0 | 200 000 m3 | 1.0 | 200 000 m3 |
| Restliches Einzugsgebiet **) | 1.0 | 900 000 m3 | 1.0 | 900 000 m3 | 0.7 | 600 000 m3 |

*) SF-WERT = Schlammanteil/Flächenanteil
**) inkl. Steinbach, Grossbach, Rickenbach

3.2.4 Abtragsintensität im Einzugsgebiet des Sihlsees

Davon ausgehend, dass im Sihlsee während einer Zeitperiode von 44 Jahren mindestens 3 Mio m³ Schlamm abgelagert wurde (Kap. 3.2.2), lässt sich für das gesamte Einzugsgebiet des Sihlsees eine mittlere Schlammabtragsintensität von 0.16 mm/a errechnen. Dies gilt für eine Trockendichte von 2.7 g/cm³ der Gesteine im Einzugsgebiet und eine Trockendichte von 0.9 g/cm³ des abgelagerten Schlammes (vgl. Fig. 20).

ZIEGLER (1981) publiziert Daten über «Kies- und Schlammmentnahmen aus Kiessammlern der Bäche im Einzugsgebiet des Sihlsees». Danach wurden während 43 Betriebsjahren gut 350 000 m³ Kies und Schlamm entfernt. Daraus lässt sich eine Kies(Schlamm)-Abtragsintensität von knapp 0.05 mm/a ableiten (Trockendichte des Kies(Schlammes) 2.1 g/cm³, Abschätzung aus Vergleichswerten). Dieser Wert muss mit Vorsicht interpretiert werden und gilt nur für das Sihlsee-Einzugsgebiet in seiner heutigen Ausbildung mit den vorhandenen Gewässerverbauungen. Als Erosionsniveau sind die jeweiligen Kiessammler zu betrachten. Interessant ist die Tatsache, dass gemäss den von ZIEGLER (1981) gemachten Angaben die Minster (als dominante Schlammlieferantin) auch im Geschiebetransport eine wichtige Rolle spielt.

Der Ablauf Abtrag-Transport-Ablagerung durch das Medium Wasser ist beim Geschiebe insofern komplizierter als bei den Schwebstoffen, da häufig eine Zwischenlagerung des abgetragenen Grobanteils auf Bachschuttkegeln oder in Flussauen stattfindet, d.h. der Transport findet nicht bis zum gewünschten Erosionsniveau statt (hier der Sihlsee). Die Möglichkeit für die Anlegung solcher Zwischendepots ist gegeben, da das Einzugsgebiet des Sihlsees noch sehr stark glazial geprägt ist und die durch Glazialerosion geschaffenen

Ablagerungsräume noch keineswegs aufgefüllt sind. Besonders auffallend ist dies in Gebieten, die überwiegend aus Karbonatgesteinen aufgebaut sind.

Die Lösungsfracht aus dem Sihlsee-Einzugsgebiet muss mittels Werten aus anderen Gebieten abgeschätzt werden. Gemäss Angaben aus dem hydrologischen Jahrbuch der Schweiz (BUNDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ 1979–1982) lässt sich beispielsweise die Lösungsabtragsintensität der Thur bis Andelfingen zu 0.045 mm/a (1982) errechnen, des Rheins bis Schmitter (Diepoldsau) zu 0.05 mm/a (1979, 1980, 1981, 1982) und der Limmat bis Baden ebenso zu 0.05 mm/a (1979, 1980, 1981, 1982). Nach JÄCKLI (1958) beträgt der Abtrag durch chemisch Gelöstes für das bündnerische Rheingebiet 0.052 mm/a. MATOUSEK (1985) rechnet für das Waldenburgertal (Baselbieter Jura) mit einer Lösungsabtragsintensität von mindestens 0.09 mm/a. Dieses Gebiet ist allerdings von Karbonat- und Sulfatkarst geprägt und deshalb nicht mit dem Einzugsgebiet des Sihlsees zu vergleichen.

Tab. 10: Abschätzung der Abtragsintensität im Einzugsgebiet des Sihlsees, Erläuterungen im Text

| ABTRAGSMATERIAL | ABTRAGSINTENSITÄT |
|------------------------------|-------------------|
| Kies (untergeordnet Schlamm) | 0.05 mm/a |
| Schlamm *) | 0.16 mm/a |
| Lösung | 0.05 mm/a |
| Total rund | 0.25 mm/a |

*) ein möglicher Anteil Schlamm, der den See passiert hat, wird vernachlässigt.

Tab. 10 fasst die Resultate zusammen. Wichtig sind nebst den Grössenordnungen auch die Relationen, so

zum Beispiel dass die Schlammabtragsintensität das 3-fache der Geschiebeabtragsintensität beträgt. Dieser Befund hängt stark vom geologischen Aufbau des Einzugsgebietes des Sihlsees ab und kann nicht unbesehen auf andere Gebiete übertragen werden.

Die Werte auf Tab. 10 sind Mittelwerte. In Kap. 3.2.3 wird abgeleitet, dass die Schlammfracht aus dem Einzugsgebiet der *Minster* mindestens 1.5 Mio m³ beträgt (1937 bis Ende der 70er Jahre). Dies ergibt eine Schlammabtragsintensität von 0.19 mm/a für dieses Einzugsgebiet. Auf die unterschiedliche Schlammabtragsintensität innerhalb des *Minster*-Einzugsgebietes gibt Kap. 3.3.4 Auskunft.

3.2.5 Schlammproben aus dem Einzugsgebiet des Sihlsees

Eine Auswahl von Proben aus den Jahren 1980 und 1981 sind in Fig. 23 dargestellt. Es wurde versucht, möglichst viele geotechnisch verschieden aufgebaute Teileinzugsgebiete mit einer Probennahme zu erfassen, um den charakteristischen Schlammaufbau studieren zu können. Eine Übersicht über den geotechnischen Aufbau des untersuchten Gebietes gibt Fig. 24.

Aus den 7-Komponenten-Darstellungen in Fig. 23 wird ersichtlich, dass der unterschiedliche Aufbau der Teileinzugsgebiete sich jeweils auch in einer spezifischen Schlammzusammensetzung widerspiegelt, insbesondere wenn man nicht nur einzelne Komponenten betrachtet, sondern alle 7 Komponenten zum Vergleich heranzieht. Es muss hier darauf hingewiesen werden, dass die untersuchten Schlammproben einen D50-Wert im Mittelsiltbereich (D50 = 15.0 Mikrometer) aufweisen, also in einem Korngrößenbereich liegen, in dem der mineralogische Aufbau nurmehr mit technischen Hilfsmitteln erfasst werden kann und sich der üblichen makroskopischen Beurteilung weitgehend entzieht. Es fehlt insbesondere auch die Erfahrung und das «geologische Gefühl» für diese feinkörnigen Materialien, wie der Geologe es üblicherweise für gröbere Lockergesteine hat.

Auf eine detaillierte Beschreibung der *Beziehung zwischen Schlammaufbau, Geologie und Geotechnik* wird hier verzichtet. Es lassen sich aber folgende wichtigen Beobachtungen zusammenfassen:

Quarzgehalt:

- hoch in Gebieten mit Kieselkalken
- mittel in Gebieten mit mergeligen Gesteinen
- tief in Gebieten mit Dolomitgesteinen und im Gebiet der Ophiolithdecke von Iberg

Calcitgehalt:

- hoch in Gebieten mit Kalken
- mittel bis tief in Gebieten mit mergeligen Gesteinen
- tief in Gebieten mit Dolomitgesteinen und im Gebiet der Ophiolithdecke von Iberg

Dolomitgehalt:

- hoch in Gebieten mit Dolomitgesteinen und im Gebiet der Ophiolithdecke von Iberg

Muscovitgehalt:

- tief vor allem in Gebieten mit Kalken

Mikroklingehalt:

- eher tief in Gebieten mit Kalken

Organ. Material:

- unterschiedlich, abhängig vom Angebot (Bewaldung, etc.)

Untergrundintensität (Relativwert):

- tief in Gebieten mit Kalken (wenig Tongehalt!)

3.3 Untersuchungen über das Einzugsgebiet der *Minster* (Teileinzugsgebiet des Sihlsees)

Das Einzugsgebiet der *Minster* eignet sich aus mehreren Gründen für eine genauere Untersuchung. Zwar sind bauliche Korrekturen des Gewässernetzes vorhanden, die die Abtragstätigkeit verfälschen. Das Gewässernetz ist aber in seinem Aufbau noch vollständig, und die natürlichen Abflussverhältnisse sind nicht durch Wasserfassungen etc. grundsätzlich gestört. Die Morphologie und der geologisch-geotechnische Aufbau des Einzugsgebietes der *Minster* sind vielfältig. Relativ günstig ist auch die Verästelung des Gewässernetzes, optimal wäre allerdings eine Verästelung in stets gleich grosse Teilgebiete, die sich ihrerseits wieder gleichmässig weiterverästeln.

Die dominante Rolle der *Minster* als Schlammlieferantin für den Sihlsee wurde schon bei der Untersuchung der Sihlseesedimente erkannt. Die Vielfältigkeit des Einzugsgebietes des Sihlsees lässt weiter vermuten, dass die Schlammproduktion nicht homogen über das ganze Gebiet verteilt ist, sondern dass bedeutende Unterschiede bestehen.

3.3.1 Feldkartierung

«Gewässersohlenqualifizierung und Kartierung der Schlammquellen im Einzugsgebiet der *Minster*»

Siehe Karte im Anhang.

Zur genaueren Beschreibung des Einzugsgebietes der *Minster* wurde der Versuch unternommen, jene Faktoren kartographisch zu erfassen, die für die Schlammproduktion vor allem verantwortlich sind. Es handelt sich dabei um eine Kartierung der Gewässersohlen und Uferstrecken. Die Kartierungselemente sind in Kap. 3.3.1.2 beschrieben.

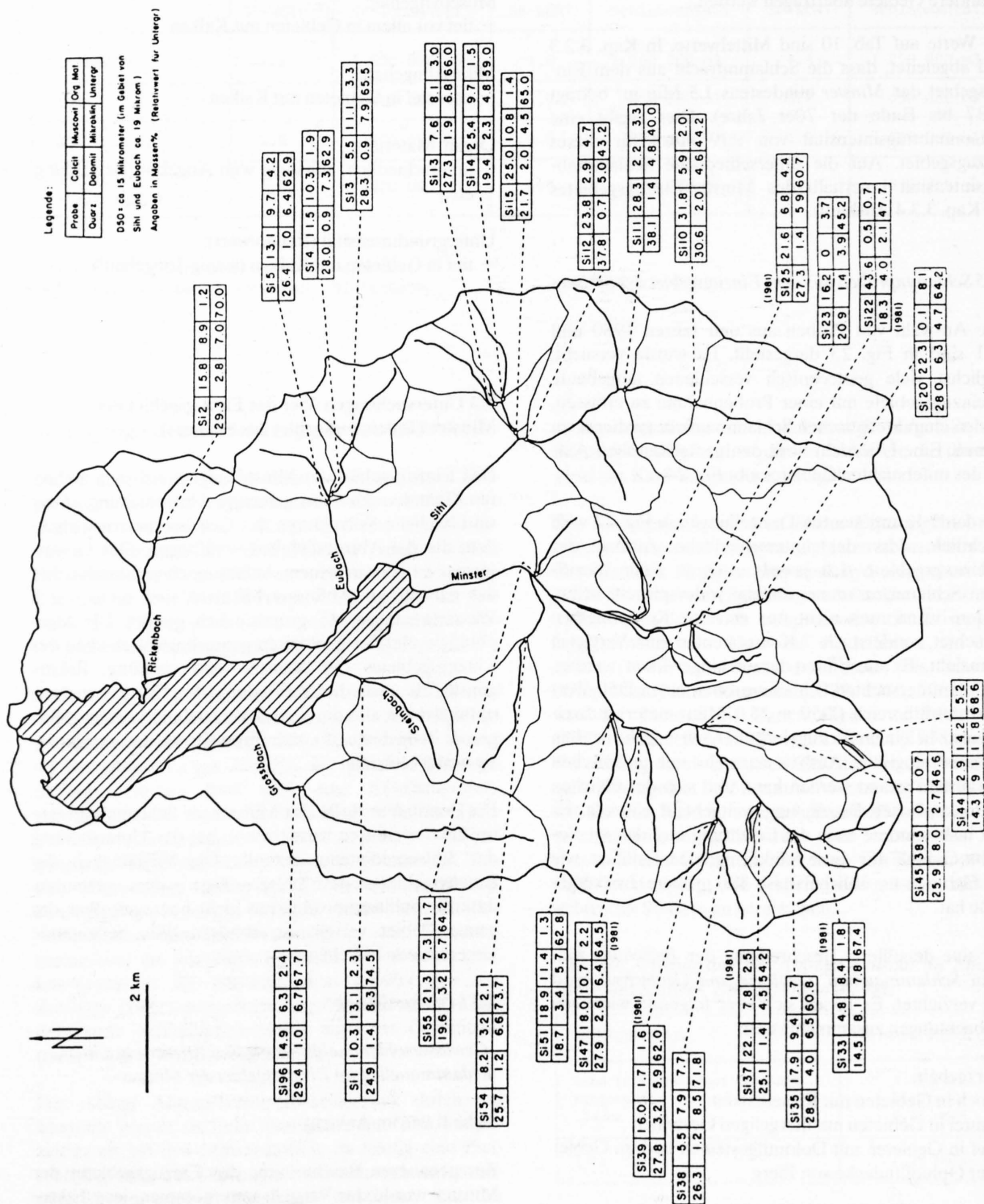


Fig. 23: Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet des Sihlsees. Entnahmen 1980, z.T. 1981

LEGENDE:

LOCKERGESTEINE



vorwiegend grobkörnige Ablagerungen (Bspw. Gehänge- und Bachschutt, Sande und Kiese)



vorwiegend sandig-siltig-tonige Ablagerungen, teilw. verrutscht (Bspw. Gehängelehm, Moränen mit überwiegendem Feinanteil)

FESTGESTEINE



vorwiegend Kalke (inkl. Kieselkalke, eingelagerte Sandsteine und Sandkalke)



vorwiegend Dolomitgesteine



mergelige Gesteine (z.T. mit Sandsteinen, Siltst. und Kalken)



- der Unteren Süswassermolasse



- der ultrahelvetisch-pannininischen Flyschserien



- der helvetischen Decken



Konglomerate der Unteren Süswassermolasse, in Wechsellagerung mit Sandsteinen und Molassemergeln



Radiolarite, Aptychenkalke, Tonschiefer, Ophiolithe (Ophiolithdecke von Iberg)

Quellen:

- QUERVAIN de & FREY (1963)
- QUERVAIN de et al. (1963)
- HANTKE u. MITARBEITER (1967)

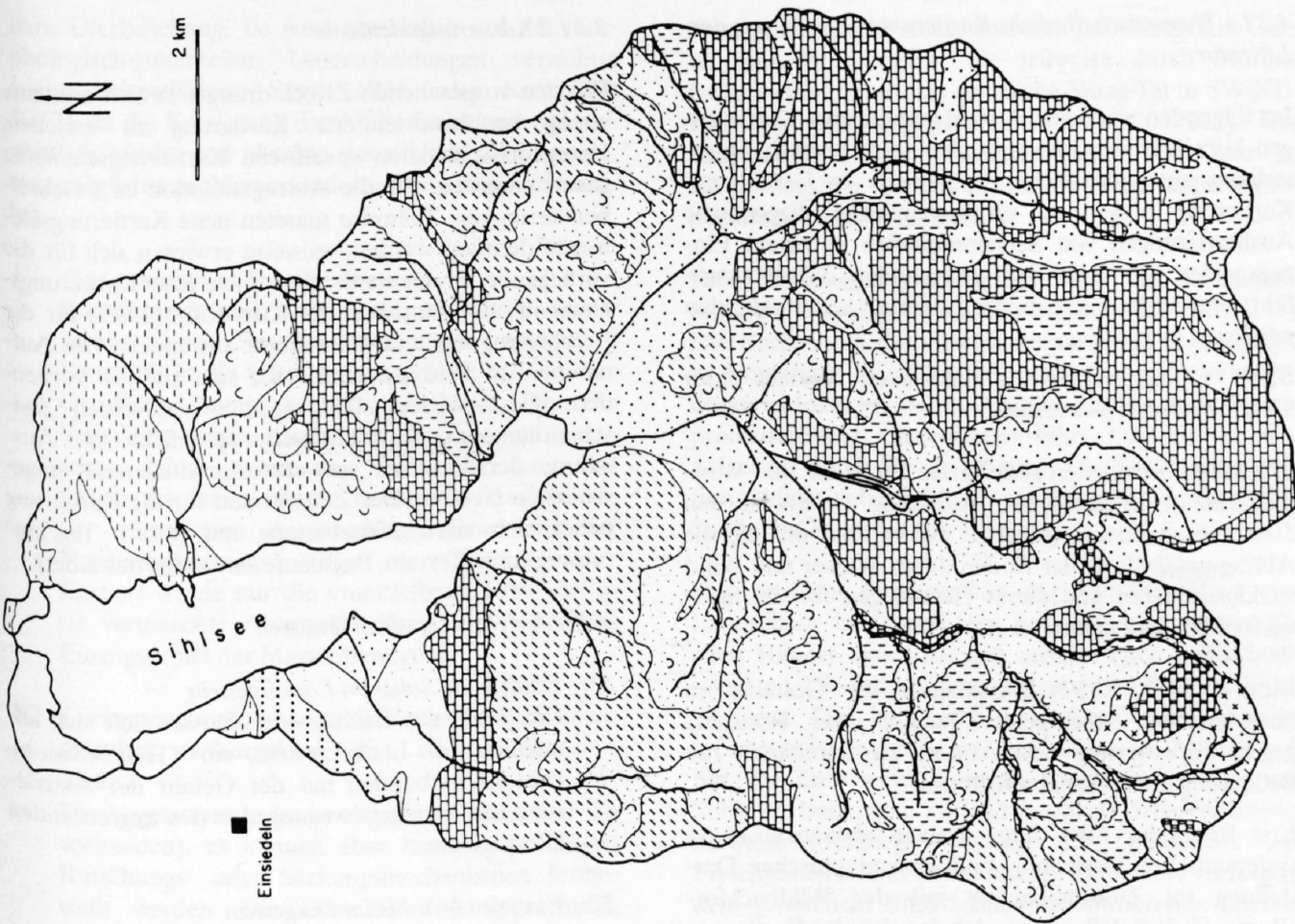


Fig. 24: Geologisch-geotechnische Kartenskizze des Einzugsgebietes des Sihlsees

3.3.1.1 Thematisch ähnliche Kartierungsbeispiele aus der Literatur

Im folgenden sind eine Anzahl publizierter Kartierungen kurz umrissen, die versuchen, eine je nach Fragestellung unterschiedliche Problematik in Form einer Kartierung besser zu veranschaulichen. Eigentliche Auskartierungen von Schlammquellen in einem Einzugsgebiet, wie es in der vorliegenden Arbeit ausgeführt wurde, konnten in der Literatur keine gefunden werden.

STINY (1931) versuchte, Wildwässer gemäss ihrer Geschiebeherde einzuteilen.

Eigentliche Bodenerosionskarten wurden in Westdeutschland in grösserem Ausmasse bereits in den 50er Jahren erstellt (GROSSE 1955). Ziel war es, die Abtragsgefährdung der Böden durch Wasser und Wind zu klassifizieren und damit Grundlagen für die landwirtschaftliche Planung zu erarbeiten.

JÄCKLI (1953, 1957) klassifizierte die Gesteine im bündnerischen Rheingebiet gemäss ihrer Resistenz gegen Verwitterung und Abtrag. Er unterstrich die Bedeutung der Massenbewegungen.

Erst Ende der 60er Jahre begann aber eine Phase systematischer Forschung und kartographischer Darstellung im Zusammenhang mit der Wildbachforschung. Zielvorstellung war dabei, nebst der Kartierung der Geschiebeherde auch deren Abtragsgefährdung im Hinblick auf künftige Schadenfälle (Hochwasserereignisse) abzuschätzen und dadurch Grundlagen für Verbauungsmassnahmen zu liefern. Kartographisch handelt es sich bei diesen Arbeiten um Aufzeichnungen der morphologischen Elemente, zusätzlich wird aber meist eine Bewertung bezüglich der Abtragsgefährdung miteinbezogen. MOSER (1973) versucht die Anfälligkeit der verschiedenen Gesteinstypen zur Geschiebeherdbildung abzuschätzen. Weitere Beispiele sind bei BUNZA (1975), HEMPEL (1968), KARL et al. (1969), PIGNATTI (1971) und STERN (1971) zu finden.

Etwas weiter geht KIENHOLZ (1977), der eine kombinierte geomorphologische Gefahrenkarte von Grindelwald (Kt. Bern) veröffentlichte. Er kartierte latente Gefahrenquellen, die die Landschaft abrupt verändern und/oder die menschliche Zivilisation mit ihren Bauwerken und Errungenschaften beeinträchtigen könnte. Er wendet eine ausführliche Gewässersohlen-Klassifizierung an und kartiert die als abtragsgefährdet auscheidbaren Gebiete. Die Karte umfasst zusätzlich morphologische Landschaftselemente, die nicht direkt mit dem Abtrag in Verbindung stehen.

Ohne weitere Diskussion soll noch auf die Arbeiten von DOORNKAMP et al. (1982), FÜGNER (1975, 1980), HEMPEL (1951), HAMPEL (1965), MÜCKENHAUSEN (1954), RANGE (1961), STEPANOV (1966) und STRELE (1932) hingewiesen werden.

3.3.1.2 Kartierungselemente

Für den vorgesehenen Zweck drängte es sich auf, eine streng problemorientierte Kartierung zu erstellen. Demgemäss mussten spezifische Kartierungselemente gesucht werden, die die Abtragssituation zu beschreiben vermögen. Teilweise mussten neue Kartierungselemente definiert werden, teilweise erwiesen sich für die vorliegende Problematik aber auch jene Kartierungselemente als brauchbar, die KIENHOLZ (1977) für die Erarbeitung einer Gefahrenkarte anwendete. Die Aufnahmen im Feld konzentrierten sich auf das vorhandene Gewässernetz. Die vegetationsbedeckten Zwischenräume wurden nicht weiter qualifiziert mit Ausnahme der als stark schwebstoffproduzierend eingeschätzten Gebiete. Der Zeitaufwand für die Kartierung belief sich nach Einarbeitung auf gut 1 Tag/km² (unwegsames Terrain, Bachläufe sind meist bewaldet).

a) Sohle der fliessenden Gewässer

S1: Eintiefende Sohle im Lockergestein

Die Sohle des Baches oder Flusses tieft sich allmählich im Lockergestein ein (Tiefenerosion). Dies ist verbunden mit der Gefahr der Aktivierung von Massenbewegungen in den angrenzenden Uferregionen.

S2: Eintiefende Sohle im Festgestein

Vorgänge und Gefahren wie bei S1. Tiefenerosion aber viel langsamer, je nach Art des Festgesteins.

S3: Sohle im Beharrungszustand, Verbauungsstrecke

An sich ein Übergangszustand. Die Bachsohle tieft sich weder ein, noch landet sie auf. Mit Verbauungen versucht man die Bach- oder Flusssohle in einen künstlichen Beharrungszustand zu zwingen.

S4: Auflandende Sohle und Umlagerungssohle

Die Transportkraft des Gewässers reicht nicht aus, das neu anfallende oder bereits mitgeführte Geschiebe sofort weiter zu transportieren. Das Geschiebe wird abgelagert (auflandende Sohle) oder zwischendeponiert (Umlagerungssohle). Die direkte Folge der auflandenden Sohle (oder der Umlagerungssohle) ist eine Bettverbreiterung. Damit besteht die Gefahr, dass das Gewässer mäandriert und dadurch Seitenerosion verursacht.

Für die Förderung, den Transport und die Ablagerung der Schwebstoffe spielt der Typ der Gewässersohle direkt keine entscheidende Rolle. Wesentlich sind aber die mit dem Sohlentyp verbundenen möglichen sekundären Auswirkungen auf die Uferregionen.

b) Uferregionen

Unter dem Begriff Uferregion wird im vorliegenden Falle das weitere, an das fliessende Gewässer angrenzende Gebiet verstanden, also nicht nur die unmittel-

bare Uferböschung. Es wird absichtlich auf die morphologisch-genetischen Unterscheidungen verzichtet (siehe beispielsweise STINY 1931 oder KIENHOLZ 1977), da die Kartierung damit überlastet und unübersichtlich würde, und ohnehin das erklärte Ziel besteht, eine möglichst problemorientierte Kartierung zu erstellen.

U1: Fuss von aktiven Rutschmassen

Rutschungen und Sackungen, die durch Translations- oder Rotationsbewegungen sporadisch Feststoffe in die Uferregionen nachliefern. An der Oberfläche meist vegetationsbedeckt, d.h. die Vegetation reitet passiv mit. Der Feststoffnachschub hängt nebst der Erosionsleistung des Gewässers von weiteren externen Ursachen ab, vor allem vom Niederschlagsregime und der Hangentwässerung.

Kartiert wurde nur die unmittelbare, vom Vorfluter verursachte Abtragsböschung, nicht aber das Einzugsgebiet der Massenbewegung.

U2: Lockergestein mit geringer Schlammabtragsresistenz (Moräne, Gehängelehm etc.), ohne Vegetationsdecke

Die Vegetationsdecke ist abgeglitten (oder war nie vorhanden), es können aber keine tiefgründigen Rutschungs- oder Sackungsmechanismen festgestellt werden. Die Gesteine sind ungeschützt, flächenhafter Abtrag (Denudation) wiegt vor.

U3: Festgestein mit geringer Schlammabtragsresistenz, ohne Vegetationsdecke

Unter Festgestein mit geringer Schlammabtragsresistenz werden schiefrige, mergelige und tonige Gesteine verstanden, deren Kornverband schlecht verkittet ist und/oder die eine hohe Klüftigkeit aufweisen. Sonst wie U2.

3.3.1.3 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse der Kartierung

Eine detaillierte Auswertung und Weiterverarbeitung der Resultate der Kartierung erfolgt in Kapitel 3.3.2.

Es fällt sofort auf (siehe beigelegte Karte), dass sich das Einzugsgebiet der Waag (rechts unten) klar vom übrigen Gebiet unterscheidet. Schlammproduzierende Uferbereiche treten hier stark in den Hintergrund, die Sohlen der Seitenbäche liegen zu einem grossen Teil direkt auf dem anstehenden Fels. Dies ist eine Folge des tektonischen und geologischen Aufbaus dieses Tales. Das Tal der Waag weist eine enge innere Wanne auf mit mächtigen Schuttkegeln an den steilen Talflanken. Die Steilstufe dieser Wanne wird gebildet durch helvetische Kalkgesteine, insbesondere den Schrattenkalk der Kreidezeit. Über der Steilstufe liegt terrassen-

förmig ein weniger steiler äusserer Talbereich. Ein Gürtel jüngerer Gesteine, die teilweise durch Moräne bedeckt sind, quert das nördliche Waag-Tal in SW-NE-Richtung (Richtung Koord. 703/211-705/212). Der andersartige Gesteinscharakter äussert sich klar im Kartierungsbild. Es treten hier vermehrt schlammproduzierende Uferbereiche auf.

Eine Eigenstellung beansprucht auch das Einzugsgebiet des *Nidlaubaches* (ca. Koord. 701-703/213.5-215). Die Bachsohlen des Gewässernetzes sind überwiegend in Eintiefung begriffen, Abrutschen der Vegetationsdecke ist lokal verbreitet, was zur Freilegung schlammproduzierender Uferbereiche führt. Das Gebiet wird aufgebaut durch Flyscheinheiten. Die Sedimentproduktion umfasst nebst Schlamm daher auch viel Material in Sand- und Kiesfraktion.

Das *restliche Einzugsgebiet* der Minster bildet eine Landschaft, bestehend aus weiträumigen, relativ flachen Hängen mit einzelnen ausgeprägten Schluchtabschnitten. Die mittlere Hangneigung beträgt etwa 17 bis 18 Grad. Das baumartig verästelte Gewässernetz ist grösstenteils eintiefend mit Ausnahme der Minster selber, die über weite Bereiche Umlagerungssohle und Sohle im Beharrungszustand (verbaute Streckenanteile) aufweist. Mergelige Gesteine der Oberkreide und Flyschgesteine sind dominierend. Dies führt zu folgendem generellem Bild: Schlammproduzierende Uferbereiche sind sehr häufig, in Gebieten mit hangparallelem Einfallen der Gesteinsschichten treten zudem zahlreiche Rutschgebiete auf (Heikentobel und Surbrunnbach-Einzugsgebiet, Koord. 699-701.5/211-213).

3.3.2 Detaillierte Auswertung der Feldkartierung

3.3.2.1 Unterteilung des Minster-Einzugsgebietes in Felder und deren geologisch-geotechnische Qualifizierung

Um den Abtrag im Minster-Einzugsgebiet genauer lokalisieren zu können, wurde das Gebiet in 18 Felder unterteilt. Kriterien für die Unterteilung waren die Situation im Gewässernetz und der geologisch-geotechnische Aufbau des jeweiligen Feldes. Mit der vorgenommenen Aufteilung (siehe Fig. 25) sind alle geologisch-geotechnischen Einheiten erfasst, die sich unter Berücksichtigung der Entwässerung nach dem Verästelungsprinzip (siehe Kap. 2.6.3.) im Minster-Einzugsgebiet erfassen liessen. Für jedes Feld findet sich in Fig. 25 zudem die Angabe der Fläche des Feldes und der mittleren Hangneigung innerhalb des Feldes. Die Angaben in Klammern gelten für das betreffende Feld inklusive alle im Gewässernetz höher liegenden Felder.

Das Prinzip der Einteilung in Felder lässt sich anhand von Fig. 25 erläutern:

- 1) Abfluss aus Feld «St» (auf Fig. 25 unten links) vereinigt sich mit Abfluss aus Feld «Wi».
 - 2) Durchgangsfeld «Is».
 - 3) Abfluss aus «St+Wi+Is» vereinigt sich mit dem Abfluss aus Feld «Ib».
 - 4) Durchgangsfeld «Mi1».
 - 5) Abfluss aus «St+Wi+Is+Ib+Mi1» vereinigt sich mit Abfluss aus «Wu+Ho+Fa».
- etc.

Eine Beschreibung der einzelnen Felder, insbesondere deren geologisch-geotechnischen Aufbau, erfolgt auf Tab. 11–13. Für jedes Feld sind folgende Angaben zusammengestellt:

- Fläche:
Bei der Berechnung der Flächen wurden die abflusslosen und in Karstsysteme entwässernden Gebiete weggelassen (vgl. Fig. 25).
- Mittlere Hangneigung:
Für die Bestimmung der mittleren Hangneigung wurde mittels eines Quadratrasters an mindestens 50 Punkten pro Feld die Hangneigung bestimmt (auf vergrösserten 1:25 000er-Kartenausschnitten) und anschliessend gemittelt.
- Geologisch-geotechnische Qualifizierung:
Die geologisch-geotechnische Qualifizierung erfolgt nach der «Geologischen Karte des Kt. Zürich und seiner Nachbargebiete 1:50 000» (HANTKE u. MITARBEITER 1967) in Anlehnung an die «Geotechnische Karte der Schweiz 1:200 000» (QUERVAIN DE et al. 1963, QUERVAIN DE & FREY 1963). Einen Überblick gibt auch die geologisch-geotechnische Kartenskizze des Einzugsgebietes des Sihlsees (Fig. 24). Insgesamt sind 7 Baueinheiten ausgeschieden (Auflistung in Kap. 3.3.2.2). Für jede der Baueinheiten wurde, sofern sie im untersuchten Feld vertreten war, der entsprechende Flächenanteil ermittelt.

In der Kolonne für die geologisch-geotechnische Qualifizierung ist jeweils noch die Legende der Relativwerte angegeben, die in den Kolonnen «Qualifizierung der Bachsohle» und «Qualifizierung der Uferstrecke» angegeben sind.

- Qualifizierung der *Bachsohle*:
Die beiliegende Karte «Gewässersohlenqualifizierung und Kartierung der Schlammquellen im Einzugsgebiet der Minster» diente als Grundlage zur Ermittlung der Daten für die numerische Qualifizierung der Bachsohlen.

In der Kolonne links ist jeweils die «kartierbare Strecke» aufgeführt, d.h. die Summe der rechts anschliessend erwähnten Bachsohlentypen. Der Ausdruck «kartierbare Strecke» will besagen, dass nie das gesamte Gewässernetz kartiert werden kann, sondern die obersten Anteile nahe der Quelle der Bäche stets fehlen. In der Landeskarte der Schweiz

1:25 000 betrifft dies immer die ersten ca. 200 m der Bäche. Auf der beigelegten Karte «Gewässersohlenqualifizierung und Kartierung der Schlammquellen im Einzugsgebiet der Minster» ist dies klar ersichtlich.

Weiter unterschieden sind (in Klammer Synonym auf Feldkartierung):

- Erosionsstrecke (= Eintiefende Sohle im Lockergestein)
- Ablagerungsstrecke/Umlagerungsstrecke (= Auflandende Sohle und Umlagerungssohle)
- Beharrungszustand (= Sohle im Beharrungszustand, Verbauungsstrecke)
- Sohle auf Fels (= Eintiefende Sohle im Festgestein).
- Qualifizierung der *Uferstrecke*:
Die Uferstrecken sind nur qualifiziert, sofern ihr Charakter zum Schlammabtrag wesentlich beiträgt. Linkes und rechtes Ufer wird dabei separat betrachtet. Unterschieden sind (in Klammer Synonym auf Feldkartierung):
 - nachrutschende (= Fuss von aktiven Rutschmassen)
 - Lockergestein, geringe Abtragsresistenz, ohne Vegetationsdecke (= Lockergestein mit geringer Schlammabtragsresistenz, ohne Vegetationsdecke)
 - Festgestein, geringe Abtragsresistenz, ohne Vegetationsdecke (= Festgestein mit geringer Schlammabtragsresistenz, ohne Vegetationsdecke).
- *Relativwerte* für die Bachsohle und die Uferstrecke:
Zusätzlich sind auf Tab. 11 – 13 Relativwerte (zum Vergleich der einzelnen Felder gegeneinander) angegeben, die aus der numerischen Qualifizierung abgeleitet wurden.
- kartierter Anteil/gesamte Einzugsgebietsfläche:
Die kartierbare Gesamtsohlenlänge (= «kartierbare Strecke»), als auch die Länge der verschiedenen Sohlentypen und Uferstrecken sind in Relation zur Einzugsgebietsfläche gesetzt, dies für jedes Feld als auch für die Bereiche gleichen geologisch-geotechnischen Aufbaus innerhalb jeden Feldes (Werte in Klammer, bezogen auf die entsprechenden Flächenanteile). Die erhaltenen Werte zeigen eine klare charakteristische Abhängigkeit der Anlage des Gewässernetzes vom geologisch-geotechnischen Aufbau der Landoberfläche (Diskussion im folgenden Kapitel).
- kartierter Anteil/gesamte kartierbare Strecke:
Weiter wurden die Zahlenwerte für die ausgeschiedenen Sohlen- und Ufertypen in Relation zur Länge der in einem Feld gesamthaft kartierbaren Sohlen- oder Uferstrecke gesetzt. Bei den Uferstrecken wurde der Bezug also entsprechend zur doppelten kartierbaren Sohlenstrecke errechnet.

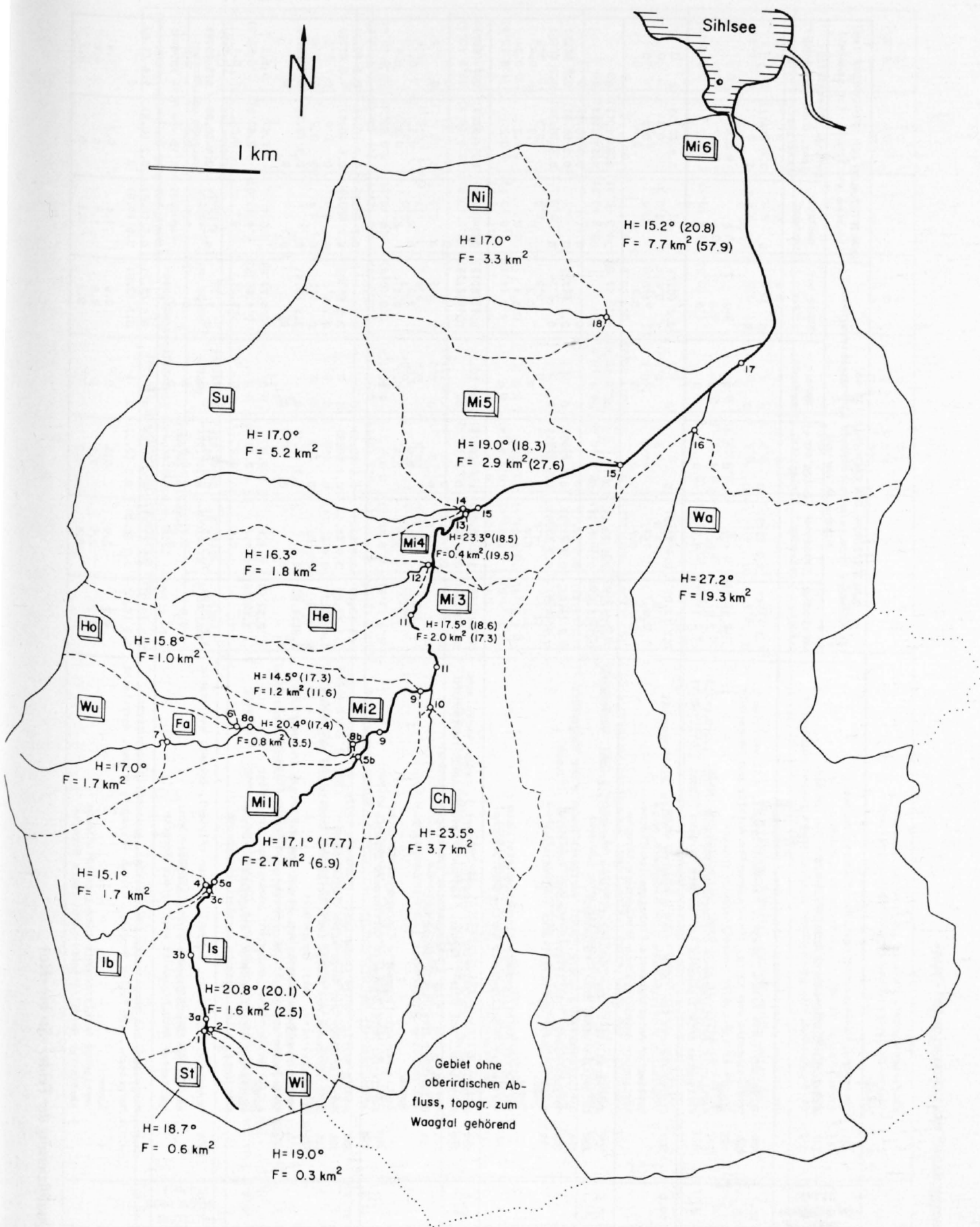


Fig. 25: Unterteilung des Minster-Einzugsgebietes in 18 Felder

| FELD | FLÄCHE (km2) | MITTLERE HANGNEIGUNG (Grad) | GEOLOGISCH-GEOTECHNISCHE QUALIFIZIERUNG | | QUALIFIZIERUNG DER BACHSOHLE (in km) | | | | | QUALIFIZIERUNG DER UFERSTRECKE (km) | | |
|------|-----------------|-----------------------------------|---|--|---|---|--|----------------------------------|--|---|---|---|
| | | | | | (in Klammer: Strecke/entsprechende Einzugsgebietsgrösse, Dimension km/km2) | kartierb. Strecke | Erosions- strecke | Ablag'str. Umlag'str. | Behar- rungszust. | Sohle auf Fels | nachrut- schend | geringe Abtragsresi- stenz, ohne Veg'decke Lockergest., Festgest. |
| St | 0.6 | 18.7 | 60% Mergelsch., mit Silt-, Sandst., Kalken (Flysch), z.T. verrutscht 40% Ophiolithdecke von Iberg, inkl. versackte Anteile und Hangschutt | Summe kartierter Anteil/gesamte Einzugsgebietsfläche (Bsp. 1.3:0.6+2.2) kartierter Anteil/gesamte kartierbare Strecke (Bsp. 1.2:1.3+0.9) | 1.3 (3.6) 0 1.3 2.2 - | 1.2 (3.3) 0 1.2 2.0 0.9 | 0 0 0 0 0 | >0 0 >0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0.4 (1.1) 0 0.4 0.7 0.2 |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| Wi | 0.3 | 19.0 | 100% Ophiolithdecke von Iberg, inkl.versackte Anteile und Hangschutt | kartierter Anteil/gesamte Einzugsgebietsfläche kartierter Anteil/gesamte kartierbare Strecke | 0.6 (2.0) 2.0 - | 0.4 (1.3) 1.3 0.7 | 0 0 0 | 0.2 (0.7) 0.7 0.3 | 0 0 0 | 0 2.3 0.6 | 0 0 0 | 0 0 0 |
| | | | | | | | | | | | | |
| Is | 1.6 | 20.8 | 50% sandig-siltig-tonige Lockergest. (vorw. Moräne), grosst. verrutscht 20% Dolomitgesteine, inkl. Hangschutt 15% Ophiolithdecke von Iberg, inkl. versackte Anteile und Hangschutt 10% Mergelschiefer, mit Siltst., Sandst. und Kalken (Flysch) 5% Mergelschiefer und Mergelkalke (Helvetikum) | Summe kartierter Anteil/gesamte Einzugsgebietsfläche kartierter Anteil/gesamte kartierbare Strecke | 2.6 (3.2) 0.3 (0.9) 0.5 (2.1) 0.9 (5.6) 0.9(11.3) | 2.6 (3.2) 0.3 (0.9) 0.5 (2.1) 0.3 (1.9) 0.3 (3.8) | 0 0 0 0.4 (2.5) 0.6 (7.5) | 0 0 0 0.2 0.1 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0.2 (1.2) 0 | 0 0 0 0 0 | 0.9 (1.1) 0.1 (0.3) 0.1 (0.4) 0.3 (1.9) 0.5 (6.3) |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| Ib | 1.7 | 15.1 | 50% Mergelsch. und Mergelkalke vorwiegend (Helvet.), teilw. verrutscht 35% Mergelsch., mit Silt-, Sandst., Kalken (Flysch), inkl. Hangschutt 10% sandig-siltig-tonige Lockergesteine (vorwiegend Moräne) 5% Dolomitgesteine, inkl. Hangschutt | Summe kartierter Anteil/gesamte Einzugsgebietsfläche kartierter Anteil/gesamte kartierbare Strecke | 4.3 (5.1) 0.3 (0.5) 0.8 (4.7) 0 | 3.4 (4.0) 0.2 (0.3) 0.2 (1.2) 0 | 0.6 (0.7) 0 0 0 | 0.2 (0.2) 0 0.6 (3.5) 0 | 0.2 (0.2) 0 0 0 | 0.1 (0.1) 0.1 (0.2) 0 0 | 0.2 (0.2) 0 0 0 | 0.5 (0.6) 0 0 0 |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| Mi1 | 2.7 | 17.1 | 35% sandig-siltig-tonige Lockergest. (Moräne), teilw. verrutscht 30% Mergelschiefer und Mergelkalke (Helvetikum) 20% Ophiolithdecke von Iberg, inkl. versackte Anteile und Hangschutt 7.5% Dolomitgesteine, inkl. Hangschutt 5% Kalke, eingelagert Sandkalke, Sandsteine und Mergel (Helvetikum) 2.5% Mergelschiefer, mit Siltst., Sandst. und Kalken (Flysch) | Summe kartierter Anteil/gesamte Einzugsgebietsfläche kartierter Anteil/gesamte kartierbare Strecke | 3.8 (3.9) 2.1 (2.6) 0.4 (0.7) 0 2.0(14.6) 0 | 3.3 (3.5) 0.9 (1.1) 0.4 (0.7) 0 0 0 | 0.5 (0.5) 0.4 (0.5) 0 0 1.1 (8.1) 0 | 0 0 0 0 0 0 | 0.2 (0.2) 0.2 (0.2) 0 0 0 0 | 0.8 (1.0) 0 0 0.9 (6.7) 0 | 0.2 (0.2) 0 0 0 0 0 | 0.7 (0.7) 0.5 (0.6) 0 0 0.3 (2.2) 0 |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| Wu | 1.7 | 17.0 | 100% Mergelsch., mit Silt-, Sandst., Kalken (Flysch), grosst. verrutscht | kartierter Anteil/gesamte Einzugsgebietsfläche kartierter Anteil/gesamte kartierbare Strecke | 6.7 (3.9) 3.9 - | 6.3 (3.7) 3.7 0.9 | 0.4 (0.2) 0.2 0.1 | >0 0 0 | 0 0 0 | 0.4 (0.2) 0.2 0 | 0.2 (0.1) 0.1 0 | 1.5 (0.9) 0.9 0.1 |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| Ho | 1.0 | 15.8 | ca.85% Mergelsch. und Mergelkalke (Helvetikum), grossteils verrutscht ca.15% Mergelsch., mit Silt-, Sandst., Kalken (Flysch), grosst. verrutscht | Summe kartierter Anteil/gesamte Einzugsgebietsfläche kartierter Anteil/gesamte kartierbare Strecke | 3.3 (3.9) 0.9 (6.0) 4.2 4.2 - | 2.2 (2.6) 0.3 (2.0) 2.5 2.5 0.6 | 0.5 (0.6) 0.3 (2.0) 0.8 0.8 0.2 | 0 0 0 0 0 | 0 0 0 0 0 | 0.6 (0.7) 0.3 (2.0) 0.9 0.9 0.2 | 0.5 (0.6) 0.6 (4.0) 1.1 1.1 0.1 | 1.4 (1.6) 0 0.2 0.2 0 |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |

Tab. 11: Qualifizierung der Felder «St» bis «Ho»

| FELD | FLÄCHE (km ²) | HANGNEIGUNG (Grad) | GEOLOGISCH-GEOTECHNISCHE QUALIFIZIERUNG | QUALIFIZIERUNG DER BACHSOHLE (in km) (in Klammer: Strecke/entsprechende Einzugsgebietsgrösse, Dimension km/km ²) | | | | | QUALIFIZIERUNG DER UFERSTRECKE (km) (rechtes und linkes Ufer separat) | | |
|------|------------------------------|-----------------------|--|--|---|---|-------------------------------------|---|--|--|---|
| | | | | kartierb. Strecke | Erosions- strecke | Ablag.'str. Umleg.'str. | Behar- rungszust. | Sohle auf Fels | nachrut- schend | geringe Abtragsresi- stenz, ohne Veg'decke Lockergest. | Festgest. |
| Fa | 0.8 | 20.4 | ca.70% Mergelschiefer und Mergelkalke (Helvetikum), grosst. verrutscht 10% Kalke, eingelagert Sandkalke, Sandsteine und Mergel ca.10% Mergelsch., mit Silt-, Sandst., Kalken (Flysch), grossst. verrutscht 10% sandig-siltig-tonige Lockergesteine (Moräne) | 1.7 (3.0) 0.3 (3.8) 0 0 | 0 0 0 0 | 1.3 (2.3) 0 0 0 | 0 0 0 0 | 0.4 (0.7) 0.3 (3.8) 0 0 | 1.1 (2.0) 0 0 0 | 0.5 (0.9) 0 0 0 | 1.0 (1.8) 0 0 0 |
| | | | Summe kartierter Anteil/gesamte Einzugsgebietsfläche (Bsp. 2.0:0.8=2.5) kartierter Anteil/gesamte kartierbare Strecke (Bsp. 1.3:2.0=0.65) | 2.0 2.5 - | 0 0 0 | 1.3 1.6 0.6 | 0 0 0 | 0.7 0.9 0.3 | 1.1 1.4 0.3 | 0.5 0.6 0.1 | 1.0 1.2 0.2 |
| | | | 60% Mergelschiefer und Mergelkalke (Helvetikum), grosst. verrutscht 40% sandig-siltig-tonige Lockergest. (vorwiegend Moräne) | 1.9 (2.6) 1.7 (3.5) 3.6 3.0 - | 0.9 (1.3) 0.6 (1.3) 1.5 1.3 0.4 | 0.1 (0.1) 0 0.1 0.1 0 | 0 0.8 (1.7) 0.8 0.7 0.2 | 0.9 (1.3) 0.3 (0.6) 1.2 1.0 0.3 | 1.6 (2.2) 0.4 (0.8) 2.0 1.7 0.3 | 0.1 (0.1) 0.1 (0.2) 0.2 0.2 0 | 0.6 (0.8) 0.4 (0.8) 1.0 0.8 0.1 |
| Ch | 3.7 | 23.5 | 40% Kalke, eingelagert Sandkalke, Sandst. und Mergel, inkl. Hangschutt 30% sandig-siltig-tonige Lockergest. (Moräne) 17.5% Dolomitgesteine, inkl. Hangschutt 10% Mergelschiefer und Mergelkalke (Helvetikum) 2.5% Ophiolithdecke von Iberg | 6.2 (4.2) 1.8 (1.6) 0.4 (0.6) 2.5 (6.8) 0.1 (1.1) | 2.9 (2.0) 0.7 (0.6) 0.4 (0.6) 0.5 (1.4) 0.1 (1.1) | 0.7 (0.5) 0.9 (0.8) 0 0.5 (1.4) 0 | 0 0 0 0 0 | 2.6 (1.8) 0.2 (0.2) 0 1.5 (4.1) 0 | 1.4 (0.9) 0.4 (0.4) 0 1.0 (2.7) 0 | 0.2 (0.1) 0.1 (0.1) 0 0 0 | 0.8 (0.5) 0.1 (0.1) 0 1.4 (3.8) 0 |
| | | | Summe kartierter Anteil/gesamte Einzugsgebietsfläche kartierter Anteil/gesamte kartierbare Strecke | 11.0 3.0 - | 4.6 1.2 0.4 | 2.1 0.6 0.2 | 0 0 0 | 4.3 1.2 0.4 | 2.9 0.8 0.1 | 0.3 0.1 0 | 2.3 0.6 0.1 |
| | | | 55% sandig-siltig-tonige Lockergesteine (Moräne) 25% Kalke, eingelagert Sandkalke, Sandst. und Mergel, inkl. Hangschutt 20% Mergelsch. und Mergelkalke (Helvetikum), grosst. verrutscht | 2.1 (1.9) 1.7 (3.4) 0.7 (1.4) | 1.6 (1.5) 0 0.5 (1.2) | 0.4 (0.4) 0 0 | 0.1 (0.1) 0.2 (0.4) 0.1 (0.2) | 0 1.5 (3.0) 0.1 (0.2) | 0.2 (0.2) 0.2 (0.4) 0 | 0.4 (0.4) 0.1 (0.2) 0 | 0 0 0 |
| He | 1.8 | 16.3 | Summe kartierter Anteil/gesamte Einzugsgebietsfläche kartierter Anteil/gesamte kartierbare Strecke | 4.5 2.2 - | 2.1 1.0 0.5 | 0.4 0.2 0.1 | 0.4 0.2 0.1 | 1.6 0.8 0.1 | 0.4 0.2 0 | 0.5 0.2 0.1 | 0 0 0 |
| | | | 90% Mergelsch. und Mergelkalke (Helvetikum), grosst. verrutscht 5% Kalke, eingelagert Sandkalke, Sandsteine und Mergel 5% sandig-siltig-tonige Lockergesteine (Moräne) | 9.5 (5.9) 0.1 (1.1) 0.3 (3.3) | 8.5 (5.2) 0 0 | 0 0.1 (1.1) 0.3 (3.3) | 0 0 0 | 1.0 (0.6) 0 0 | 9.6 (5.9) 0 0 | 0 0 0 | 3.3 (1.0) 0 0 |
| | | | Summe kartierter Anteil/gesamte Einzugsgebietsfläche kartierter Anteil/gesamte kartierbare Strecke | 9.9 5.5 - | 8.5 4.7 0.9 | 0.4 0.2 0 | 0 0 0 | 1.0 0.6 0.1 | 9.6 5.3 0.5 | 0 0 0 | 3.3 1.8 0.2 |
| Mi4 | 0.4 | 23.3 | 55% Mergelschiefer und Mergelkalke (Helvetikum), teilw. verrutscht 25% Kalke, eingelagert Sandkalke, Sandsteine und Mergel 15% sandig-siltig-tonige Lockergesteine (Moräne) 5% vorwiegend grobkörnige Lockergesteine (Alluvionen) | 0.1 (0.4) 0.3 (3.0) 0 0.2 (10.0) | 0 0 0 0 | 0.1 (0.4) 0.3 (3.0) 0 0.2 (10.0) | 0 0 0 0 | 0 0 0 0 | 0 0 0 0 | 0 0 0 0 | 0.1 (0.4) 0 0 0 |
| | | | Summe kartierter Anteil/gesamte Einzugsgebietsfläche kartierter Anteil/gesamte kartierbare Strecke | 0.6 1.5 - | 0 0 0 | 0.6 1.5 1.0 | 0 0 0 | 0 0 0 | 0 0 0 | 0 0 0 | 0.1 0.25 0.1 |
| | | | | | | | | | | | |

Tab. 12: Qualifizierung der Felder «Fa» bis «Mi4»

| FELD | FLÄCHE (km2) | MITTLERE HANGNEIGUNG (Grad) | GEOLOGISCH-GEOTECHNISCHE QUALIFIZIERUNG | QUALIFIZIERUNG DER BACHSOHLE (in km) (in Klammer: Strecke/entsprechende Einzugsgebietsgröße, Dimension km/km2) | | | | | QUALIFIZIERUNG DER UFERSTRECKE (km) (rechtes und linkes Ufer separat) | | |
|------|-----------------|-----------------------------------|--|--|----------------------|--------------------------|----------------------|-------------------|--|---|-----------|
| | | | | kartierb. Strecke | Erosions- strecke | Ablag'str. Umlag'str. | Behar- rungszust. | Sohle auf Fels | nachrut- schend | geringe Abtragsresi- stenz, ohne Veg'decke Lockergest., Festgest. | |
| Su | 5.2 | 17.0 | ca.60% Mergelschiefer und Mergelkalke (Helvetikum), grosst. verrutscht | 12.9 (4.1) | 10.8 (3.5) | 0.8 (0.3) | 0.6 (0.2) | 0.7 (0.2) | 5.0 (1.6) | 1.0 (0.3) | 2.2 (0.7) |
| | | | ca.35% Mergelsch., mit Silt-, Sandst., Kalken (Flysch), grosst. verrutscht | 8.9 (4.9) | 8.1 (4.5) | 0.3 (0.2) | 0 | 0.5 (0.3) | 4.5 (2.5) | 0.7 (0.4) | 0.9 (0.5) |
| | | | ca. 5% Kalke, eingelagert Sandkalke, Sandsteine und Mergel | 0.3 (1.2) | 0.3 (1.2) | 0 | 0 | 0 | 0.2 (0.8) | 0 | 0 |
| | | | Summe | 22.1 | 19.2 | 1.1 | 0.6 | 1.2 | 9.7 | 1.7 | 3.1 |
| M15 | 2.9 | 19.0 | kartierter Anteil/gesamte Einzugsgebietsfläche (Bsp. 22.1:5.2=4.2) | 4.2 | 3.7 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 1.9 | 0.3 | 0.6 |
| | | | kartierter Anteil/gesamte kartierbare Strecke (Bsp. 19.2:22.1=0.9) | - | 0.9 | 0 | 0 | 0.1 | 0.2 | 0 | 0.1 |
| | | | ca.60% Mergelschiefer und Mergelkalke (Helvetikum), grosst. verrutscht | 5.4 (3.1) | 4.9 (2.8) | 0 | 0.5 (0.3) | 0 | 2.3 (1.3) | 0.4 (0.2) | 0.2 (0.1) |
| | | | ca.20% Kalke, eingelagert Sandkalke, Sandst. und Mergel, inkl. Hangschutt | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ni | 3.3 | 17.0 | ca.10% Mergelsch., mit Silt-, Sandst., Kalken (Flysch), grosst. verrutscht | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | | ca. 5% sandig-siltig-tonige Lockergesteine (Moräne) | 0.2 (1.4) | 0.2 (1.4) | 0 | 0 | 0 | 0.1 (0.7) | 0 | 0 |
| | | | ca. 5% vorwiegend grobkörnige Lockergesteine (Alluvionen) | 1.5(10.3) | 0 | 0.6 (4.1) | 0.9 (6.2) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | | Summe | 7.1 | 5.1 | 0.6 | 1.4 | 0 | 2.4 | 0.4 | 0.2 |
| M16 | 7.7 | 15.2 | kartierter Anteil/gesamte Einzugsgebietsfläche | 2.4 | 1.8 | 0.2 | 0.5 | 0 | 0.8 | 0.1 | 0.1 |
| | | | kartierter Anteil/gesamte kartierbare Strecke | - | 0.7 | 0.1 | 0.2 | 0 | 0.2 | 0 | 0 |
| | | | 95% Mergelsch., mit Silt-, Sandst., Kalken (Flysch), grosst. verrutscht | 13.2 (4.2) | 11.3 (3.6) | 0 | 1.7 (0.5) | 0.2 (0.1) | 1.9 (0.6) | 1.4 (0.4) | 1.5 (0.5) |
| | | | 5% sandig-siltig-tonige Lockergesteine (Moräne) | 0.5 (3.0) | 0.2 (1.2) | 0 | 0.3 (1.8) | 0 | 0 | 0 | 0.1 (0.6) |
| Wa | 19.3 | 27.2 | Summe | 13.7 | 11.5 | 0 | 2.0 | 0.2 | 1.9 | 1.4 | 1.6 |
| | | | kartierter Anteil/gesamte Einzugsgebietsfläche | 4.2 | 3.5 | 0 | 0.6 | 0.1 | 0.6 | 0.4 | 0.5 |
| | | | kartierter Anteil/gesamte kartierbare Strecke | - | 0.8 | 0 | 0.1 | 0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| | | | 35% vorw. grobkörnige Lockergesteine (Alluvionen, Bachschuttkegel) | 7.8 (2.9) | 0 | 0.7 (0.3) | 7.1 (2.6) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | | 30% Mergelsch., mit Silt-, Sandst., Kalken (Flysch), z.Teil verrutscht | 3.9 (1.7) | 3.3 (1.4) | 0.1 (0) | 0 | 0.5 (0.2) | 0.5 (0.2) | 0.1 (0) | 0 |
| | | | 15% Kalke, eingelagert Sandkalke, Sandst. und Mergel, inkl. Hangschutt | 2.9 (2.5) | 0.7 (0.6) | 0 | 0.3 (0.3) | 1.9 (1.6) | 0.1 (0.1) | 0.1 (0.1) | 0.2 (0.2) |
| | | | 10% Mergelschiefer und Mergelkalke (Helvetikum), grosst. verrutscht | 2.2 (2.9) | 2.0 (2.6) | 0 | 0 | 0.2 (0.3) | 0.2 (0.3) | 0.3 (0.4) | 0.1 (0.1) |
| | | | 10% sandig-siltig-tonige Lockergesteine (Moräne) | 4.0 (5.2) | 3.3 (4.3) | 0.5 (0.6) | 0.2 (0.3) | 0 | 0.3 (0.4) | 1.0 (1.3) | 0 |
| | | | Summe | 20.8 | 9.3 | 1.3 | 7.6 | 2.6 | 1.1 | 1.5 | 0.3 |
| | | | kartierter Anteil/gesamte Einzugsgebietsfläche | 2.7 | 1.2 | 0.2 | 1.0 | 0.3 | 0.1 | 0.2 | 0 |
| | | | kartierter Anteil/gesamte kartierbare Strecke | - | 0.4 | 0.1 | 0.4 | 0.1 | 0 | 0 | 0 |
| | | | 65% Kalke, eingelagert Sandkalke, Sandst. und Mergel, inkl. Hangschutt | 14.8 (1.2) | 2.6 (0.2) | 0.7 (0.1) | 1.3 (0.1) | 10.2 (0.8) | 0.1 (0) | 0.6 (0) | 0 |
| | | | 12.5% Mergelschiefer und Mergelkalke (Helvetikum), grosst. verrutscht | 10.8 (4.5) | 5.8 (2.4) | 0 | 0 | 5.0 (2.1) | 1.9 (0.8) | 0.2 (0.1) | 1.8 (0.7) |
| | | | 10% sandig-siltig-tonige Lockergesteine (Moräne) | 2.8 (1.5) | 2.3 (1.2) | 0 | 0.5 (0.3) | 0 | 0.9 (0.5) | 0.2 (0.1) | 0 |
| | | | 10% vorwiegend grobkörnige Lockergesteine (Alluvionen) | 12.1 (6.3) | 0.1 (0.1) | 6.8 (3.5) | 5.2 (2.7) | 0 | 0 | 0.2 (0.1) | 0 |
| | | | 2.5% Mergelsch., mit Silt-, Sandst., Kalken (Flysch), stark verstürzt | 1.2 (2.5) | 1.1 (2.3) | 0 | 0 | 0.1 (0.2) | 0.6 (1.2) | 0 | 0 |
| | | | Summe | 41.7 | 11.9 | 7.5 | 7.0 | 15.3 | 3.5 | 1.2 | 1.8 |
| | | | kartierter Anteil/gesamte Einzugsgebietsfläche | 2.1 | 0.6 | 0.4 | 0.4 | 0.8 | 0.2 | 0.1 | 0.1 |
| | | | kartierter Anteil/gesamte kartierbare Strecke | - | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.4 | 0 | 0 | 0 |
| | | | | | | | | | | | |

Tab. 13: Qualifizierung der Felder «Su» bis «Wa»

Einige dieser Relativwerte sind sehr aussagekräftig, vorab das Verhältnis von Erosionsstrecke zur gesamten kartierbaren Sohlenlänge (Schwankung von 0 bis 0.95, d.h. im Extremfall befindet sich bis 95% des kartierten Gewässernetzes im Erosionszustand). Bedeutend ist ebenfalls das Verhältnis von Uferstrecke mit ständig nachrutschendem Rutschungsfuss zu kartierbarer Uferstrecke. Hier zeigten sich Schwankungen von 0 bis 0.5, d.h. bis 50% der kartierbaren Uferlänge gehören diesem Ufertypus an (was der Länge der kartierbaren Sohlenstrecke entspricht).

3.3.2.2 Qualifizierung der geologisch-geotechnischen Baueinheiten im Einzugsgebiet der Minster

Auf Tab. 14 und 15 sind die 7 ausgeschiedenen geologisch-geotechnischen Baueinheiten zusammengestellt (vgl. Tab. 11–13). Für jede unterschiedene Baueinheit wurden aus jedem der 18 unterschiedenen Felder des Minster-Einzugsgebietes die Anteile an Bachsohlentyp und Ufertyp aufsummiert. Dies allerdings nur, wenn sie im betrachteten Feld mindestens eine Fläche von 0.3 km² einnahmen. Diese Einschränkung musste vorgenommen werden, weil kleinflächige Gesteinseinheiten durch grosse benachbarte maskiert werden können, so dass sich ihre Eigenschaften nicht manifestieren können. Die geologisch-geotechnischen *Baueinheiten* sind in Tab. 14 und 15 wie folgt aufgereiht: Zuerst die Festgesteine (aufgereiht von a bis e gemäss ihrer vermuteten Resistenz gegen Abtrag als Schlamm), anschliessend die ausgeschiedenen Lockergesteine (f und g).

- a) Mergelschiefer und Mergelkalke (Helvetikum)
- b) Flysch
- c) Ophiolithdecke von Iberg
- d) Dolomitgesteine
- e) Kalke (Helvetikum)
- f) sandig-siltig-tonige Lockergesteine
- g) grobkörnige Lockergesteine

Der Aufbau der Tabellen 14 und 15 ist ähnlich dem Aufbau der Tabellen 11 – 13. Insbesondere sind auch hier die Relativwerte Summe/Fläche (d.h. Anteil eines Streckentyps pro km²) und Summe/kartierbare Strecke (d.h. Anteil eines Streckentyps pro km kartierbare Strecke) gebildet. Als interessant erwiesen sich vor allem die Relativwerte bezogen auf 1 km² der Einzugsgebietsfläche. Die Aufarbeitung der vorhandenen Daten (Tab. 14 und 15, Fig. 26) brachte interessante *Resultate*:

- kartierbare Bachstrecke pro km²:
Abnahme innerhalb der Festgesteinsgruppe etwa in der vorgegebenen Reihenfolge. Das Ergebnis ist sehr erstaunlich, vor allem in seinem Ausmass. Die «Mergelschiefer und Mergelkalke (a)» haben pro km² fast dreimal mehr kartierbare Bachstrecke als die «Kalke (e)». Ein Spezialfall sind die Alluvialgebiete, die ebenfalls einen hohen Wert aufweisen.

Die kartierbare Bachstrecke ist nur annähernd gleich der Länge des Gewässernetzes, da in der Kartierung die quellennahen Anteile der Bäche stets fehlen.

- Anteil Erosionsstrecke pro km²:
Abnahme in der Reihenfolge a – e innerhalb der Festgesteinsgruppe. Hier ist der Kontrast noch höher. Es werden etwa siebenmal mehr Erosionsstrecke pro km² in der Einheit «Mergelschiefer+Mergelkalke (a)» festgestellt als in der Einheit «Kalke (e)»!
- Anteil Ablagerungsstrecke und Umlagerungsstrecke pro km²:
Hier zeigen sich Schwankungen. Sicher spielen dabei lokalgeologische Gründe mit. So können beispielsweise natürliche Barrieren (Kalkriegel!) innerhalb einer Baueinheit den benachbarten geologisch-geotechnischen Baueinheiten Ablagerungsstrecken und Umlagerungsstrecken aufzwingen.
- Anteil Sohle im Beharrungszustand pro km²:
Korreliert eng mit dem Anteil an verbauten Streckenabschnitten. Dies zufolge der Definition des gewählten Kartierungskriteriums.
- Anteil Sohle auf Fels pro km²:
Hier zeigen «Kalke (e)» als auch «Mergelschiefer+Mergelkalke (a)» fast gleich hohe Werte.
- Anteil nachrutschende Uferstrecken pro km²:
«Mergelschiefer+Mergelkalke (a)», «Flysch (b)» und «sandig-siltig-tonige Lockergesteine (f)» haben bedeutende Werte. Diese drei Einheiten zeichnen sich dadurch aus, dass sie feinkörnige Gesteine umfassen, die von ihrem lithologischen Charakter her rutschungsanfällig sind.
- Anteil Uferpartien mit Lockergesteinen von geringer Abtragsresistenz (ohne Vegetationsbedeckung) pro km²:
Erwartungsgemäss hat hier die geologisch-geotechnische Baueinheit «sandig-siltig-tonige Lockergesteine (f)» einen hohen Wert, der aber noch deutlich von der versackten und verstützten Einheit «Ophiolithdecke von Iberg (c)» übertroffen wird.
- Anteil Uferpartien mit Festgesteinen von geringer Abtragsresistenz (ohne Vegetationsbedeckung) pro km²:
Die Baueinheit «Mergelschiefer+Mergelkalke (a)» dominiert gemäss ihrem Gesteinscharakter hier deutlich. Hoch ist auch der Wert für die Baueinheit «Flysch (b)».

Der geologisch-geotechnische Aufbau eines Einzugsgebietes bestimmt also nicht nur die Gestalt, sondern auch die *Länge des Gewässernetzes* und die abtragsbestimmenden Eigenschaften wie die *Sohlenbeschaffen-*

| GEOLOGISCH- GEOTECHNISCHE BAUEINHEITEN | FELD | FLAECH km ² | QUALIFIZIERUNG DER BACHSOHLE (in km) | | | | | QUALIFIZIERUNG DER UFERSTRECKE (km) (rechtes und linkes Ufer separat) | |
|--|---------------------------|---------------------------|--------------------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|-------------------|--|--|
| | | | kartierb. Strecke | Erosions- strecke | Ablag'str. Umlag'str. | Behar- rungszust. | Sohle auf Fels | nachrut- schend | geringe Abtragsresi- stenz, ohne Veg'decke Lockergest. Festgest. |
| a) Mergelschiefer und Mergelkalke (Helvetikum) grosst. verrutscht | Ib | 0.85 | 4.3 | 3.4 | 0.6 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.5 |
| | Mi1 | 0.81 | 2.1 | 0.9 | 0.4 | 0 | 0.8 | 0.2 | 0.5 |
| | Ho | 0.85 | 3.3 | 2.2 | 0.5 | 0 | 0.6 | 0.5 | 0.2 |
| | Fa | 0.56 | 1.7 | 0 | 1.3 | 0 | 0.4 | 1.1 | 0.5 |
| | Mi2 | 0.72 | 1.9 | 0.9 | 0.1 | 0 | 0.9 | 1.6 | 0.1 |
| | Ch | 0.37 | 2.5 | 0.5 | 0.5 | 0 | 1.5 | 1.0 | 0 |
| | Mi3 | 0.40 | 0.7 | 0.5 | 0 | 0.1 | 0.1 | 0 | 0 |
| | He | 1.62 | 9.5 | 8.5 | 0 | 0 | 1.0 | 9.6 | 0 |
| | Su | 3.12 | 12.9 | 10.8 | 0.8 | 0.6 | 0.7 | 5.0 | 1.0 |
| | Mi5 | 1.74 | 5.4 | 4.9 | 0 | 0.5 | 0 | 2.3 | 0.4 |
| | Mi6 | 0.77 | 2.2 | 2.0 | 0 | 0 | 0.2 | 0.2 | 0.3 |
| | Wa | 2.41 | 10.8 | 5.8 | 0 | 0 | 5.0 | 1.9 | 0.2 |
| | Summe | 14.22 | 57.3 | 40.4 | 4.2 | 1.4 | 11.3 | 23.6 | 3.7 |
| b) Mergelschiefer, mit Siltst., Sand- steinen und Kalken (Flysch) häufig verrutscht | Summe/Fläche | | 4.03 | 2.84 | 0.30 | 0.10 | 0.79 | 1.66 | 0.26 |
| | Summe/kartierbare Strecke | | | 0.71 | 0.07 | 0.02 | 0.20 | 0.21 | 0.03 |
| | St | 0.36 | 1.3 | 1.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.4 |
| | Ib | 0.60 | 0.3 | 0.2 | 0 | 0 | 0.1 | 0 | 0 |
| | Wu | 1.70 | 6.7 | 6.3 | 0.4 | 0 | 0 | 0.2 | 0.4 |
| | Su | 1.82 | 8.9 | 8.1 | 0.3 | 0 | 0.5 | 4.5 | 0.7 |
| | Ni | 3.14 | 13.2 | 11.3 | 0 | 1.7 | 0.2 | 1.9 | 1.4 |
| | Mi6 | 2.31 | 3.9 | 3.3 | 0.1 | 0 | 0.5 | 0.5 | 0.1 |
| | Wa | 0.48 | 1.2 | 1.1 | 0 | 0 | 0.1 | 0.6 | 0 |
| | Summe | 10.41 | 35.5 | 31.5 | 0.8 | 1.7 | 1.4 | 7.7 | 3.0 |
| | Summe/Fläche | | 3.41 | 3.03 | 0.08 | 0.16 | 0.13 | 0.74 | 0.29 |
| | Summe/kartierbare Strecke | | | 0.89 | 0.02 | 0.05 | 0.04 | 0.11 | 0.04 |
| | | | | | | | | | |
| c) Ophiolithdecke von Iberg, inkl. ver- sackte Anteile und Hangschutt | Wi | 0.30 | 0.6 | 0.4 | 0 | 0 | 0.2 | 0 | 0.7 |
| | Mi1 | 0.54 | 0.4 | 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Summe | 0.84 | 1.0 | 0.8 | 0 | 0 | 0.2 | 0 | 0.7 |
| | Summe/Fläche | | 1.19 | 0.95 | 0 | 0 | 0.24 | 0 | 0.83 |
| | Summe/kartierbare Strecke | | | 0.8 | 0 | 0 | 0.2 | 0 | 0.35 |

Tab. 14: Qualifizierung der geologisch-geotechnischen Baueinheiten im Minster-Einzugsgebiet (abtragsanfällige Festgesteine)

| GEOLOGISCH- GEOTECHNISCHE BAUEINHEITEN | FELD | FLÄCHE km ² | QUALIFIZIERUNG DER BACHSOHLE (in km) | | | | | QUALIFIZIERUNG DER UFERSTRECKE (km) (rechtes und linkes Ufer separat) | |
|--|---------------------------|---------------------------|--------------------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|-------------------|--|--|
| | | | kartierb. Strecke | Erosions- strecke | Ablag'str. Umlag'str. | Behar- rungszust. | Sohle auf Fels | nachrut- schend | geringe Abtragsresi- stenz, ohne Veg'decke Lockergest. Festgest. |
| d) Dolomitgesteine, inkl. Hangschutt | Is | 0.32 | 0.3 | 0.3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | Ch | 0.65 | 0.4 | 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0.1 | 0 |
| | Summe | 0.97 | 0.7 | 0.7 | 0 | 0 | 0 | 0.1 | 0 |
| | Summe/Fläche | 0.72 | 0.72 | 0.72 | 0 | 0 | 0 | 0.1 | 0 |
| e) Kalke, eingelagert Sandkalke, Sandst. und Mergel (Helvetikum) inkl. Hangschutt | Summe/kartierbare Strecke | | 1.00 | | 0 | 0 | 0 | 0.07 | 0 |
| | Ch | 1.48 | 6.2 | 2.9 | 0.7 | 0 | 2.6 | 1.4 | 0.2 |
| | Mi3 | 0.50 | 1.7 | 0 | 0 | 0.2 | 1.5 | 0.2 | 0.1 |
| | Mi5 | 0.58 | 0 | 0 | 0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 |
| | Mi6 | 1.16 | 2.9 | 0.7 | 0 | 0.3 | 1.9 | 0.1 | 0.1 |
| | Wa | 12.55 | 14.8 | 2.6 | 0.7 | 1.3 | 10.2 | 0.1 | 0.6 |
| | Summe | 16.27 | 25.6 | 6.2 | 1.4 | 1.8 | 16.2 | 1.8 | 1.0 |
| | Summe/Fläche | 1.57 | 1.57 | 0.38 | 0.09 | 0.11 | 1.00 | 0.11 | 0.06 |
| | Summe/kartierbare Strecke | | 0.24 | | 0.05 | 0.07 | 0.63 | 0.04 | 0.02 |
| | Is | 0.80 | 2.6 | 2.6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| f) sandig-siltig- tonige Lockergest. (vorw. Moräne) | Mi1 | 0.95 | 3.8 | 3.3 | 0.5 | 0 | 0 | 0.2 | 0.2 |
| | Mi2 | 0.48 | 1.7 | 0.6 | 0 | 0.8 | 0.3 | 0.4 | 0.4 |
| | Ch | 1.11 | 1.8 | 0.7 | 0.9 | 0 | 0.2 | 0.4 | 0.1 |
| | Mi3 | 1.10 | 2.1 | 1.6 | 0.4 | 0.1 | 0 | 0.2 | 0.4 |
| | Mi6 | 0.77 | 4.0 | 3.3 | 0.5 | 0.2 | 0 | 0.3 | 1.0 |
| | Wa | 1.93 | 2.8 | 2.3 | 0 | 0.5 | 0 | 0.9 | 0.2 |
| | Summe | 7.14 | 18.8 | 14.4 | 2.3 | 1.6 | 0.5 | 2.4 | 3.4 |
| | Summe/Fläche | 2.63 | 2.63 | 2.02 | 0.32 | 0.22 | 0.07 | 0.34 | 0.48 |
| | Summe/kartierbare Strecke | | 0.77 | | 0.12 | 0.09 | 0.03 | 0.06 | 0.09 |
| | Mi6 | 2.70 | 7.8 | 0 | 0.7 | 7.1 | 0 | 0 | 0 |
| g) vorw. grobkörnige Lockergesteine (Alluvionen, Bach- schuttkegel) | Wa | 1.93 | 12.1 | 0.1 | 6.8 | 5.2 | 0 | 0 | 0.2 |
| | Summe | 4.63 | 19.9 | 0.1 | 7.5 | 12.3 | 0 | 0 | 0.2 |
| | Summe/Fläche | 4.30 | 4.30 | 0.02 | 1.62 | 0 | 0 | 0 | 0.04 |
| | Summe/kartierbare Strecke | | 0.01 | | 0.38 | 0.62 | 0 | 0 | 0.01 |

Tab. 15: Qualifizierung der geologisch-geotechnischen Baueinheiten im Minster-Einzugsgebiet (kompakte Festgesteine und Lockergesteine)

| | FESTGESTEINE | | | | | LOCKERGESTEINE | |
|---|--|----------------------|--------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| | a) Mergelschiefer + Mergelkalke (Helvetikum) | b) Flysch | c) Ophiolithdecke von Iberg | d) Dolomitgesteine | e) Kalke (Helvetikum) | f) sandig-siltig- tonige Ablag. | g) grobkörnige Ablagerungen |
| Fläche | 14.2 km ² | 10.4 km ² | 0.8 km ² | 1.0 km ² | 16.3 km ² | 7.1 km ² | 4.6 km ² |
| kartierbare Strecke/km ² * | 4.0 | 3.4 | 1.2 | 0.7 | 1.6 | 2.6 | 4.3 |
| Erosionsstrecke/km ² | 2.8 | 3.0 | 1.0 | 0.7 | 0.4 | 2.0 | 0 |
| Nachrutschende Ufer- strecke/km ² | 1.7 | 0.7 | 0 | 0.1 | 0.1 | 0.3 | 0 |
| Lockergesteins- strecke/km ² ** | 0.3 | 0.3 | 0.8 | 0.1 | 0.1 | 0.5 | 0 |
| Festgesteins- strecke/km ² *** | 1.0 | 0.4 | 0 | 0 | 0.1 | 0.1 | 0 |

- * entspricht angenähert der Flussdichte (= Gewässernetzlänge/km²)
- ** Ufertyp Lockergestein mit geringer Abtragsresistenz, ohne Vegetationsdecke
- *** Ufertyp Festgestein mit geringer Abtragsresistenz, ohne Vegetationsdecke

Fig. 26: Gewässernetzlänge und ausgewählte Sohlen- und Ufertypen in Abhängigkeit des geologisch-geotechnischen Aufbaus des Einzugsgebietes

heit und vor allem die Uferbeschaffenheit. In Fig. 26 sind die abtragsfördernden Sohlen- und Ufertypen als auch die Länge des Gewässernetzes in schematischer Form für alle unterschiedenen geologisch-geotechnischen Baueinheiten dargestellt. Die Einheiten a, b und f dominieren gemäss den ausgewählten Kartierungskriterien deutlich. Man beachte, dass die erfassten Gebiete verschiedene Grössen aufweisen. Die nur in flächenmässig geringem Anteil vorhandenen Einheiten c und d haben beschränkte Aussagekraft.

Die Werte in Fig. 26 lassen sich statistisch prüfen (Chi-Quadrat-Test). Dies führt zu den folgenden für das Minster-Einzugsgebiet gültigen Aussagen (in Klammer die Irrtumswahrscheinlichkeit für die Richtigkeit der Aussage):

- Der Wert kartierbare Strecke/km² (P = 5%) und jeder in Fig. 26 aufgeführte Sohlen- oder Ufertyp (P = 0.1%) sind abhängig vom geologisch-geotechnischen Aufbau des betrachteten Gebietes.
- Die ausgeschiedenen geologisch-geotechnischen Baueinheiten a, e, f, g (P = 0.1%), die Einheit b (P = 2%) und die Einheit c (P = 5%) zeigen einen spezifischen Aufbau der Gewässersohle und der Ufer, der nicht dem Mittelwert für das gesamte Minster-Einzugsgebiet entspricht.

3.3.3 Repetierte Schlammuntersuchungen im Minster-Einzugsgebiet

Die Schlammdepots in den aus den unterschiedenen Feldern ausfliessenden Gewässern wurden 1980 bis 1983 an 4 gewählten Zeitpunkten aufgesammelt und

anschliessend untersucht. Es wurde generell versucht, die Schlammdepots des letzten vorangegangenen Hochwasserereignisses aufzusammeln. Bei den ersten zwei Entnahmezeitpunkten wurden nicht alle Probenpunkte des Sammelrasters beprobt (Fig. 27–33). Die repetierten Untersuchungen wurden durchgeführt, um die Schlammanlieferung über mehrere Jahre verfolgen zu können.

Erstaunlich sind die teilweise sehr geringen Schwankungen der %-Werte (Massen-%) zwischen den 4 Entnahmezeitpunkten für die gleiche Probenstelle. Dies trifft unter anderem auch für die Probenstelle 5a (Probenstelle am Anfang des Feldes «Mi1» = Anfang Mi1) zu (vgl. Fig. 27 – 33, Feldereinteilung siehe Fig. 25), wo von 1981–1983 folgende Schwankungsbreiten der Messresultate eruiert wurden: Calcit 15.5–16.2%, Dolomit 5.2–5.5%, Quarz 23.4–26.0%, Muscovit 4.2–5.1%, Mikroklin 6.2–6.7%, Untergrund 56.4–66.3% und organisches Material 1.4–1.9%. Dies zeigt die teilweise erstaunlich geringen Schwankungen von Sammelzeitpunkt zu Sammelzeitpunkt in der Zusammensetzung des abtransportierten Schlammes.

In Fig. 27 – 33 werden zur Veranschaulichung jeweils von unten nach oben die Mittelwerte aus allen Jahresmessungen am Hauptabfluss (d.h. hauptsächlich an der Minster) miteinander andeutungsweise durch eine Linie verbunden.

Eine Synthese der Beobachtungen (an Mittelwerten jeder Komponente) zeigt folgendes (die Zahlen in eckigen Klammern bezeichnen die Nummern der Probenstellen):

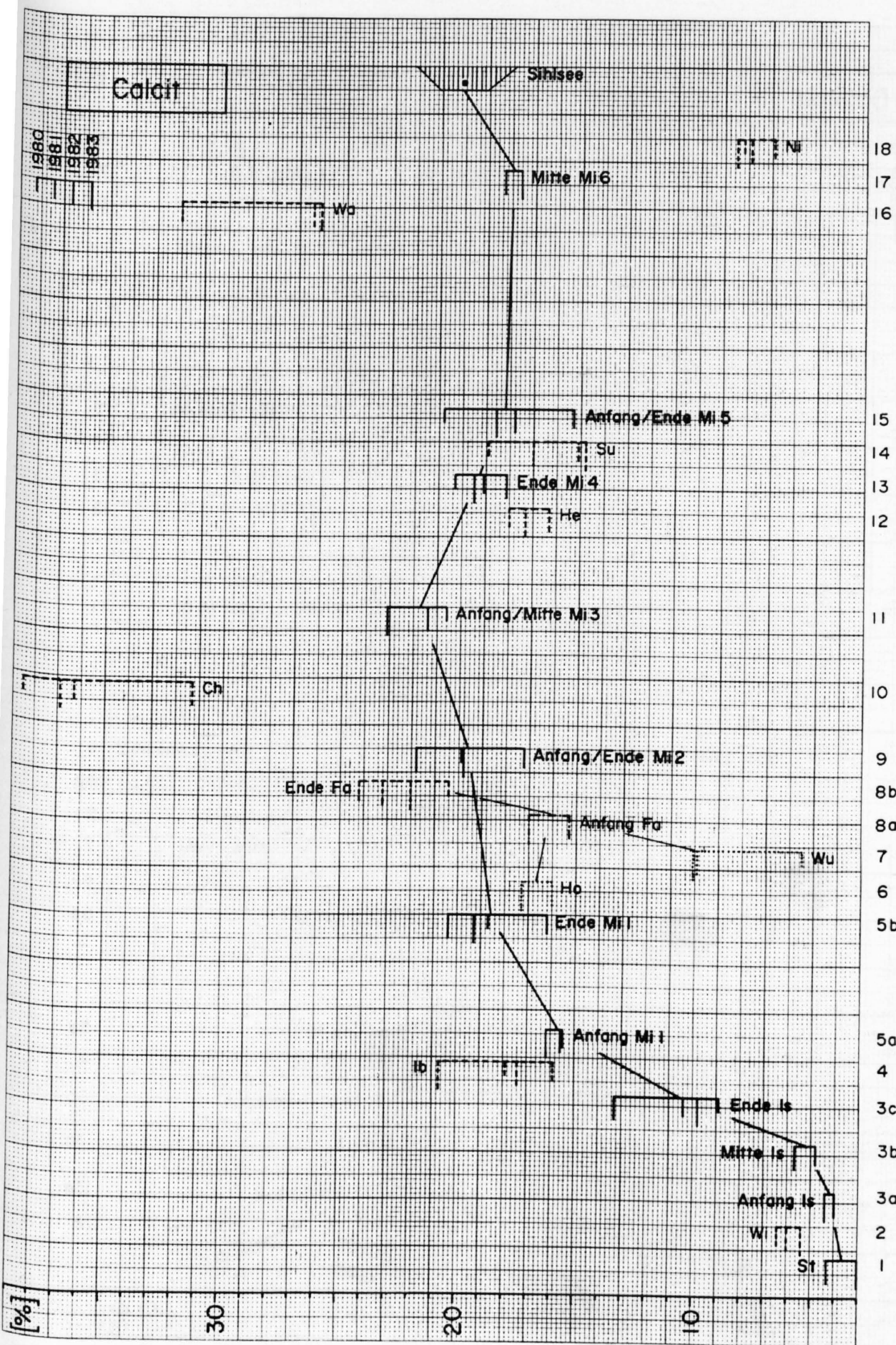


Fig. 27: Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet der Minster, Entnahmen 1980–1983, Komponente Calcit

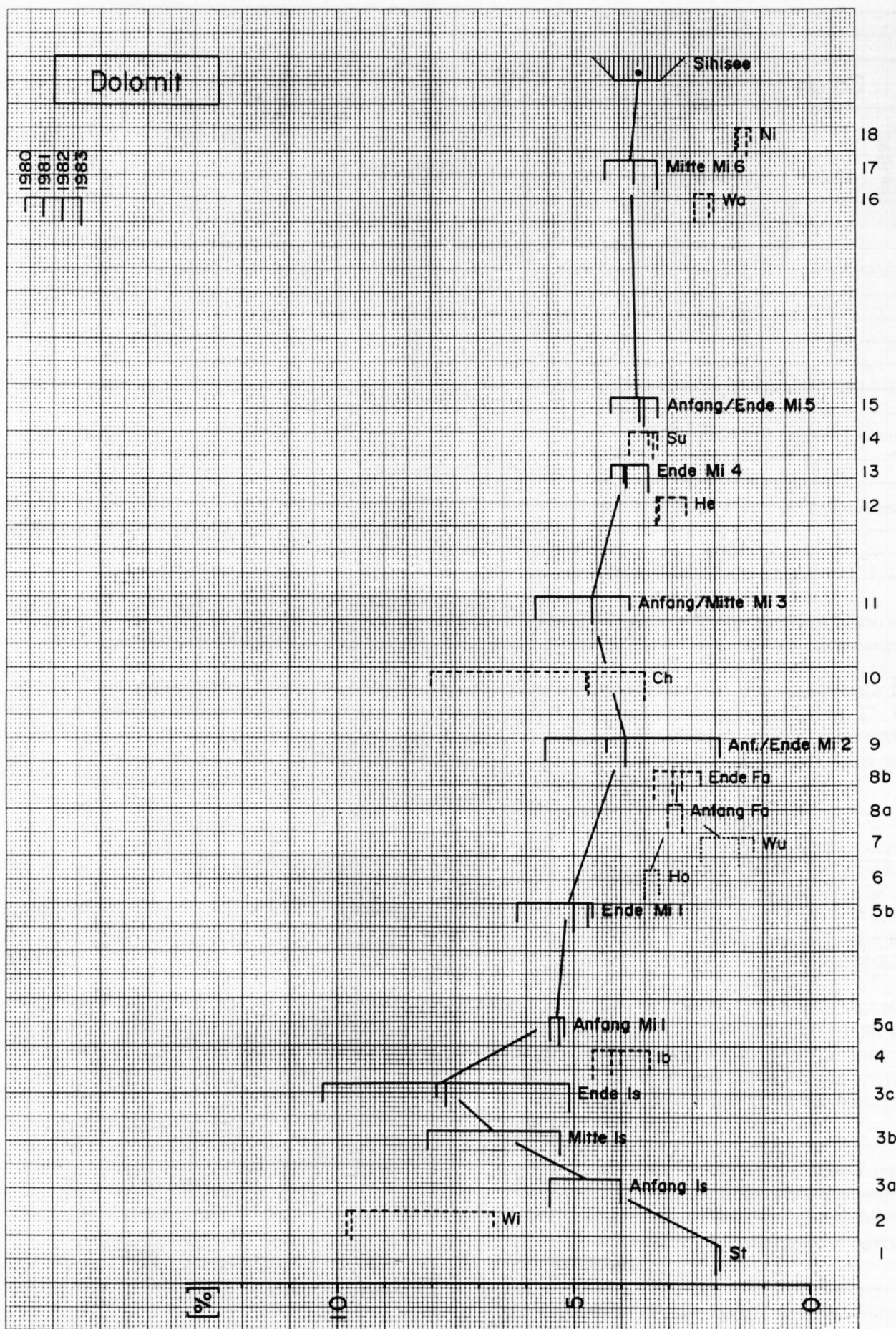


Fig. 28: Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet der Minster, Entnahmen 1980–1983, Komponente Dolomit

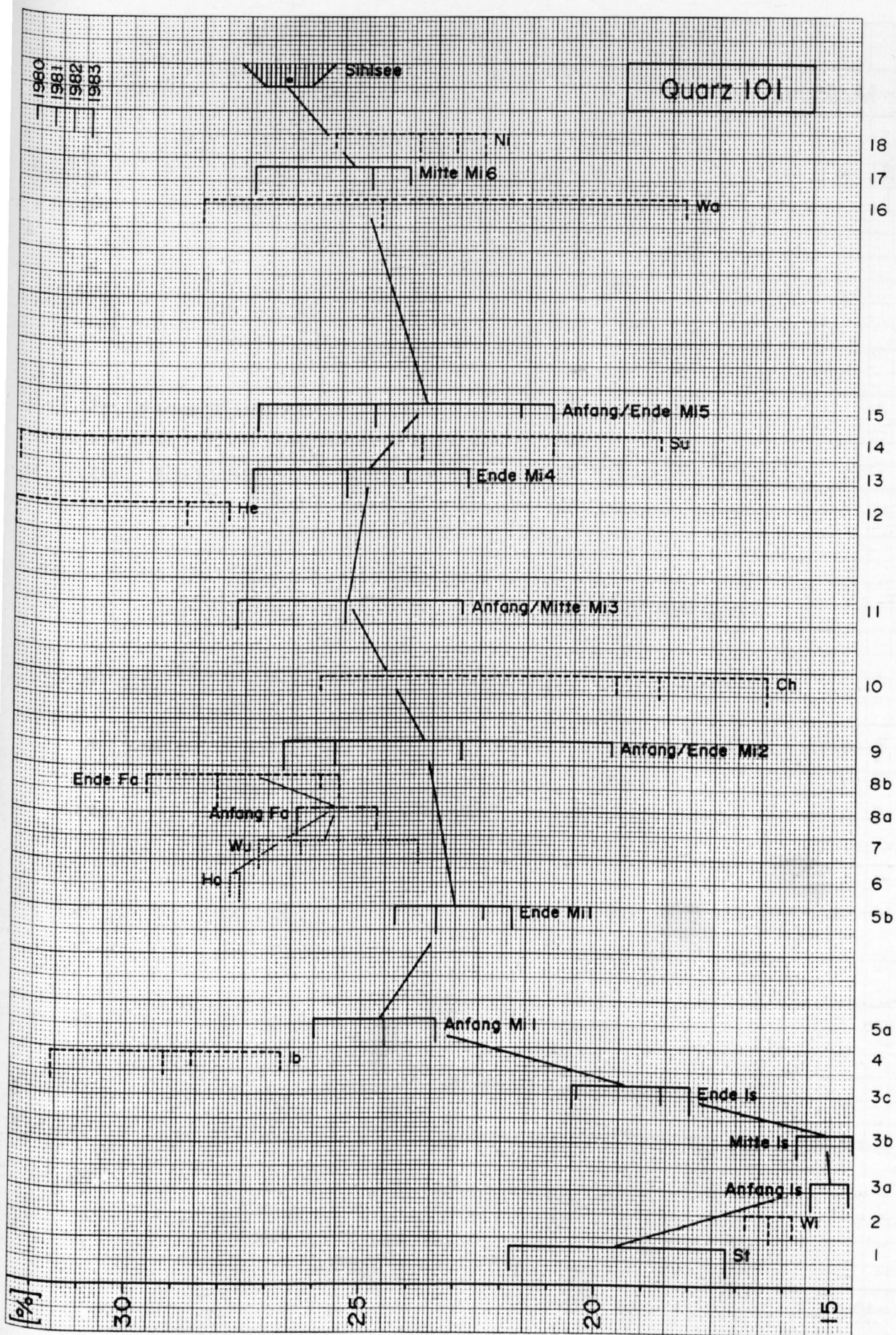


Fig. 29: Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet der Minster, Entnahmen 1980–1983, Komponente Quarz

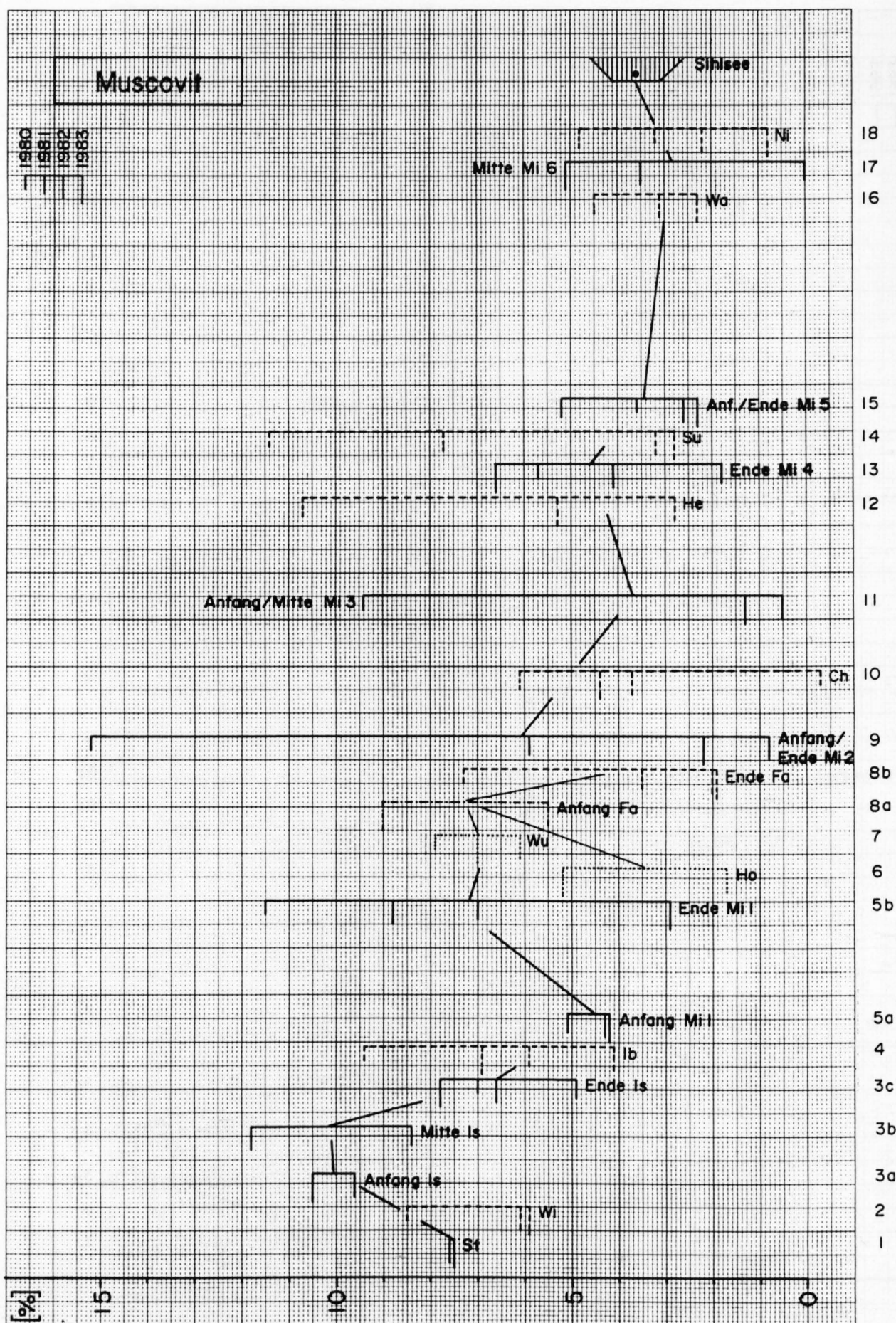


Fig. 30: Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet der Minster, Entnahmen 1980–1983, Komponente Muscovit

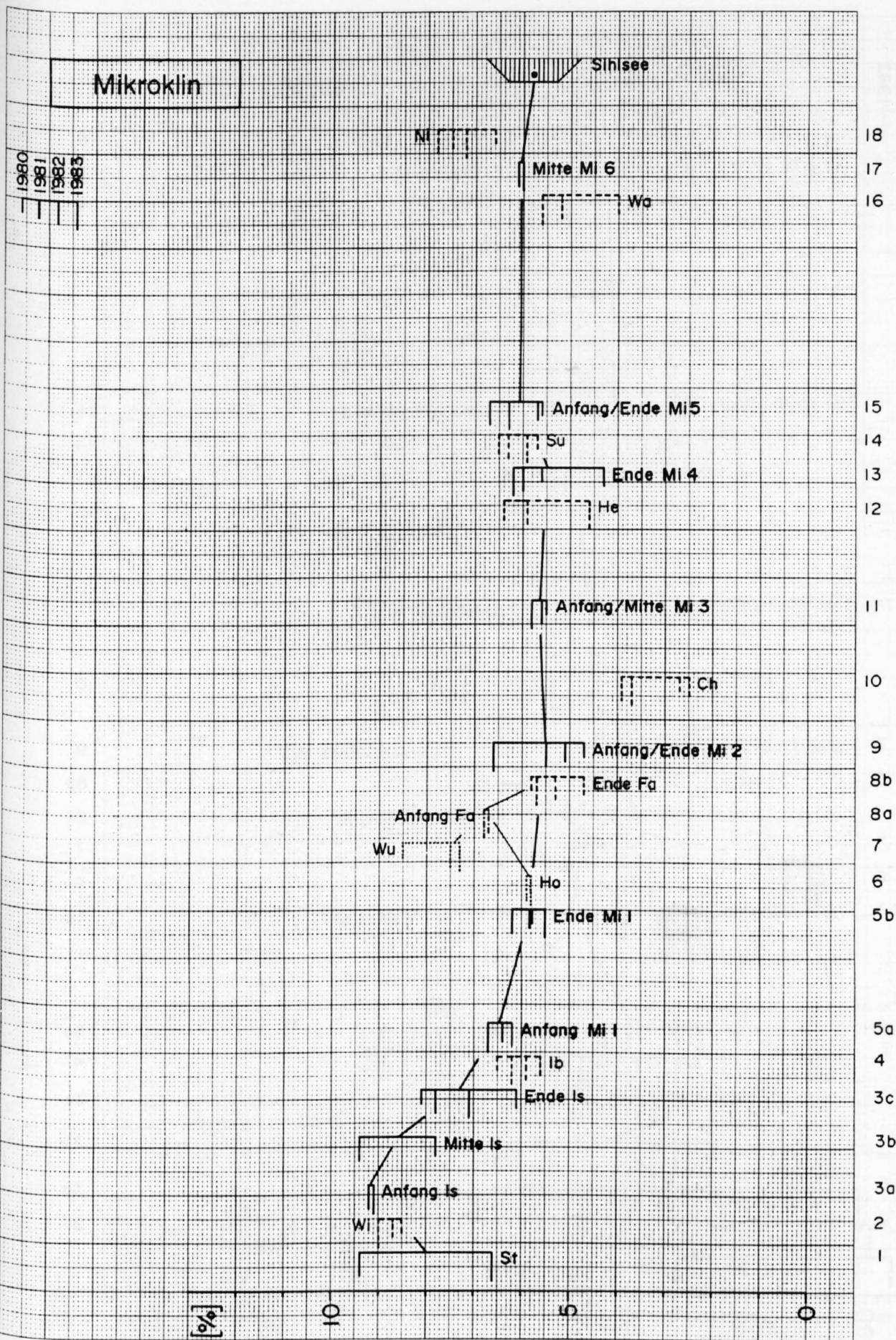


Fig. 31: Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet der Minster, Entnahmen 1980-1983, Komponente Mikroclin

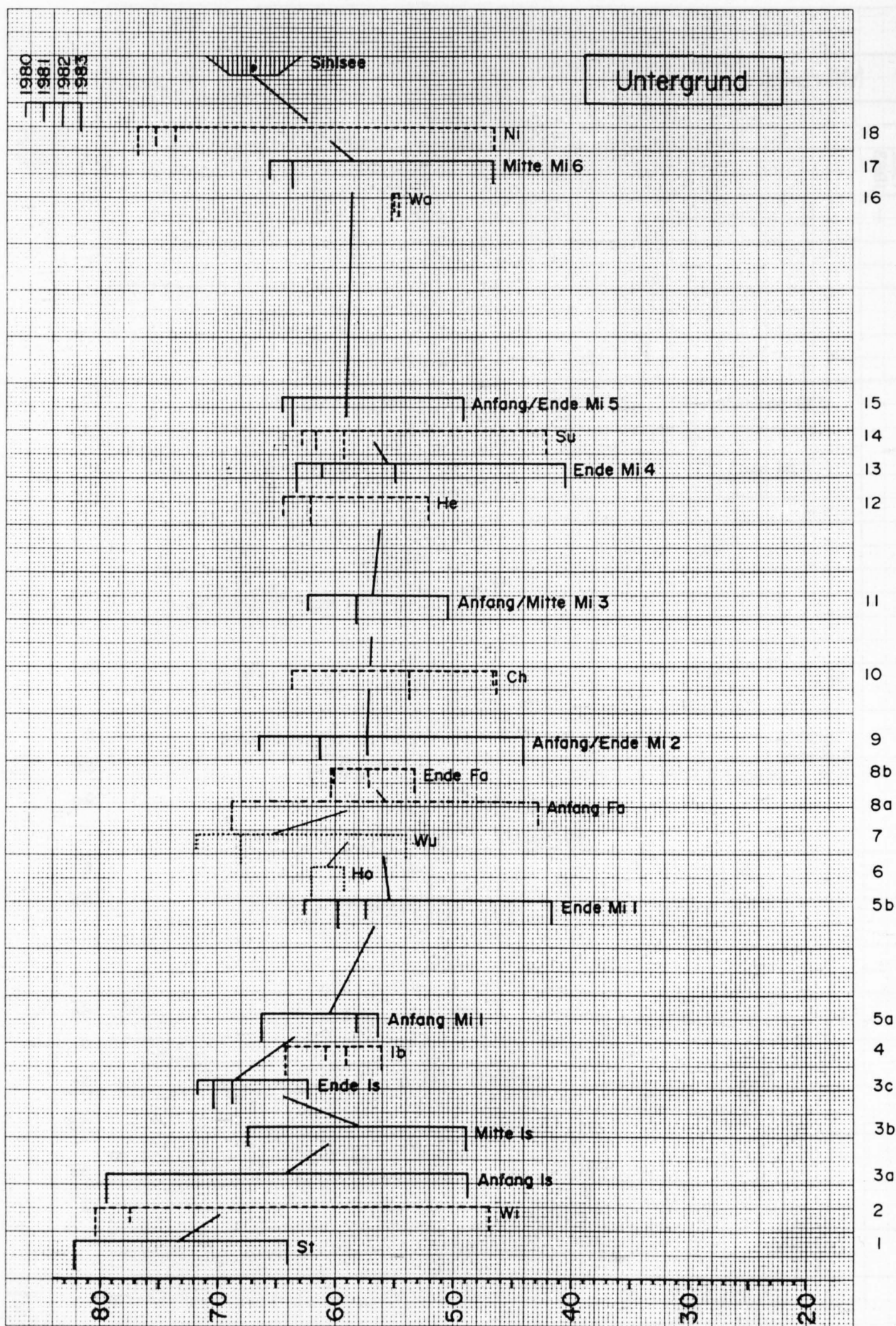


Fig. 32: Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet der Münster, Entnahmen 1980-1983, Komponente Untergrund

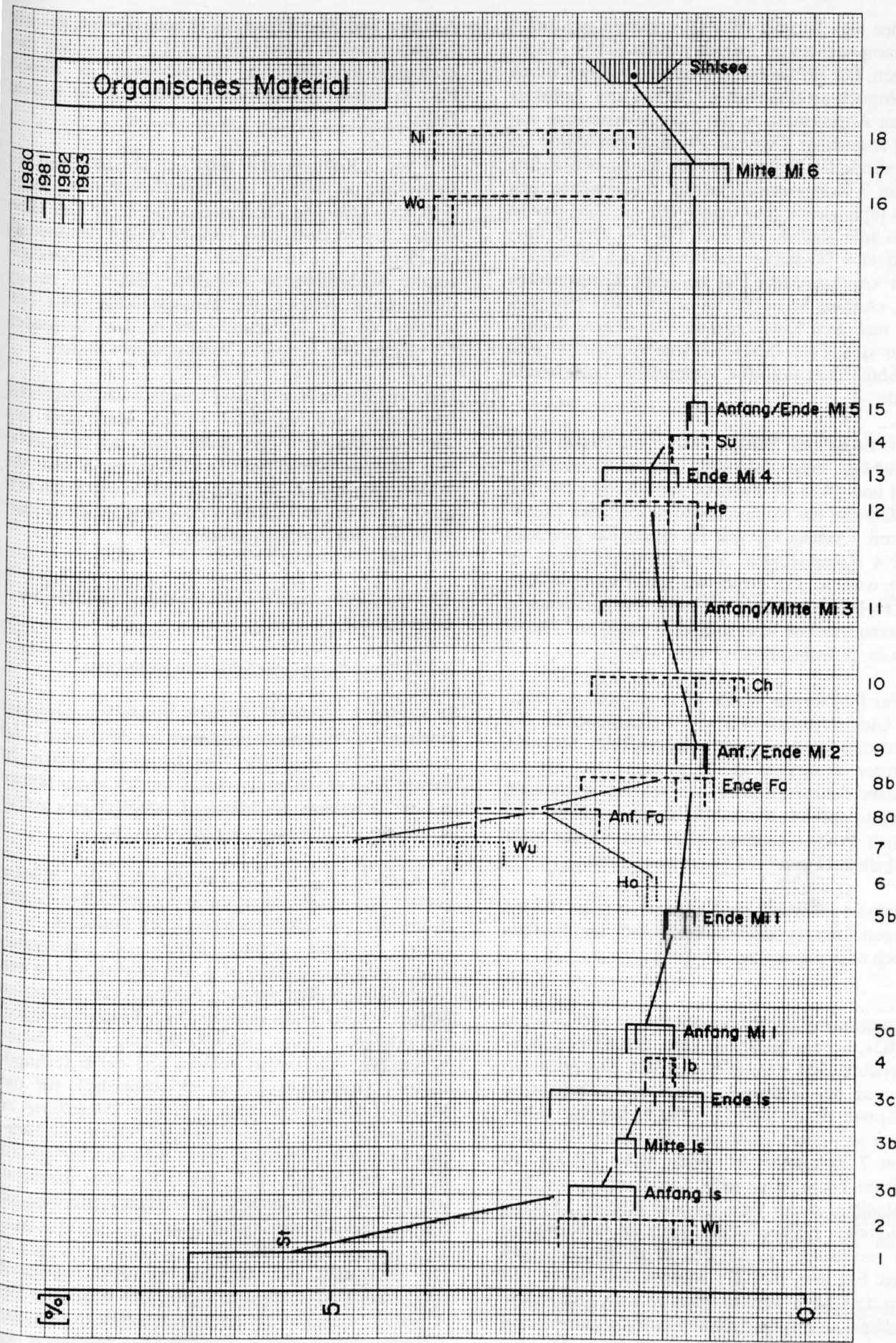


Fig. 33: Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet der Minster, Entnahmen 1980-1983, Komponente Organisches Material

Die Felder «St» [1] und «Wi» [2] ergänzen sich bei 5 von 7 Komponenten zu logisch verständlichen Mischschlammen. Bis «Mitte Is» [3b] ist eine weitere, durch den geologisch-geotechnischen Aufbau des Is-Feldes erklärbare Angleichung an die Zusammensetzung von «Wi» [2] feststellbar. Dasselbe gilt auch von «Mitte Is» [3b] bis «Ende Is» [3c], wo sich die Zusammensetzung bei 5 von 7 Komponenten an die Zusammensetzung von «Ib» [4] angleicht (der untere Teil von Feld «Is» ist Feld «Ib» sehr ähnlich, vgl. auch Fig. 24). Der Zufluss von Feld «Ib» [4] selber manifestiert sich im Mischschlamm «Anfang Mi1» [5a] bei allen Komponenten deutlich. «Anfang Mi1» [5a] bis «Ende Mi1» [5b] zeigt sich bei mehreren Komponenten eine weitere Angleichung an «Ib». Feld «Mi1» hat vom Aufbau her eine grosse Ähnlichkeit mit «Ib», zudem aber hohe Moränenanteile.

Das am Ende des Feldes «Mi1» mündende Feld «Wu+Ho+Fa» zeigt folgende interne Entwicklung: «Ho» [6] und «Wu» [7] ergänzen sich «Anfang Fa» [8a] in der Mehrzahl der Komponenten zu logischen Mischschlammen. «Anfang Fa» [8a] bis «Ende Fa» [8b] zeigt sich bei 4 Komponenten eine klare Annäherung an «Ho» [6], was mit dem geologisch-geotechnischen Aufbau des Fa-Feldes gut übereinstimmt. Die Komponente Calcit verändert sich innerhalb «Fa» stark (im Mittelwert von ca. 16% auf 22%).

«Ende Fa» [8b] vermag «Ende Mi1» [5b] klar zu beeinflussen. Dies zeigt sich in 6 von 7 Komponenten des resultierenden Mischwertes in «Anfang/Ende Mi2» [9]. Die Minster ist in Feld «Mi2» verbaut. Dies hat zur Folge, dass Schlammdepots nur spärlich vorhanden und schlecht entwickelt sind. Die insgesamt nur 4 entnommenen Proben «Anfang Mi2» und «Ende Mi2» sind deshalb auf Fig. 27–33 zusammengefasst.

Weiter talwärts lässt sich ein Einfluss von «Ch» [10] bei 3 Komponenten feststellen, bei 4 ist der Einfluss undeutlich oder gegenteilig.

Ein Zusammenzug der Probenstellen war auch nötig in Feld «Mi3», wo die Minster in einer Schlucht (Kalkstein) verläuft. Feld «He» [12] zeigt in 4 Komponenten Veränderung des Schlammes zwischen «Anfang/Mitte Mi3» [11] und «Ende Mi4» [13]. Das kleine Feld «Mi4» wurde nur am untern Ende beprobt. «Su» [14] vermag in 6 von 7 Komponenten «Ende Mi4» [13] klar zu beeinflussen. Diese festgestellte Beeinflussung des Minster-Schlammes durch Feld «He» (Fläche = 1.8 km²) und Feld «Su» (Fläche = 5.2 km²) ist insbesondere deshalb erstaunlich, da sie sich gegenüber dem viel grösseren Einzugsgebiet der Minster (Fläche = 17.3 km² resp. 19.5 km²) durchzusetzen vermag. Feld «Mi5» wurde einmal an der Position «Ende Mi5» und dreimal an der Position «Anfang Mi5» beprobt, wo die Probenahme einfacher ist. Unterhalb «Anfang Mi5» ist die Minster kanalisiert und schwer beprobbar.

Aus den Fig. 27 – 33 zeigt sich kein Einfluss des neu hinzustossenden Feldes «Wa» [16]. Dies ist aus den geologisch-geotechnischen Verhältnissen in diesem Feld erklärbar (Kalkgesteine dominieren in diesem Feld).

In 4 von 7 Komponenten zeigt sich abschliessend vor Erreichung des Sihlsees noch eine Beeinflussung durch Feld «Ni» [18]. Die Flächenungleichheit ist hier allerdings schon so gross, dass Vorsicht bei der Ausdeutung am Platze ist. Die zum Schluss zum Vergleich herangezogene Schlammprobe aus dem Sihlsee ist zudem durch einen anderen Ablagerungsmechanismus entstanden als die Schlammdepots in den fliessenden Gewässern. Dies könnte zu Verfälschungen führen.

Diese qualitative Betrachtung könnte noch detaillierter beschrieben und begründet werden. Man muss sich aber auch klar vor Augen halten, dass der Interpretation Grenzen gesetzt sind, vor allem wenn man die Schlammwerte eines Sammelzeitpunktes unter sich vergleicht (die obigen Diskussionen gelten für die Mittelwerte aus allen Sammelzeitpunkten).

3.3.4 Quantifizierung des Schlammabtrages im Minster-Einzugsgebiet

3.3.4.1 Erarbeitung einer Schlammabtragskarte

In Kapitel 3.2.3 wurde die dem Minster-Einzugsgebiet zufallende Schlammabtragsmenge zu mindestens 1.5 Mio m³ (1937 bis Ende 70er Jahre) abgeschätzt. In diesem Kapitel soll nun versucht werden, diese Menge auf die Teilgebiete des Minster-Einzugsgebietes aufzuschlüsseln.

In Kapitel 3.3.2 ist das Einzugsgebiet der Minster gemäss dem Verästelungsprinzip und unter Berücksichtigung des geologisch-geotechnischen Aufbaues in 18 Felder unterteilt worden. Mittels der repetierten Schlammuntersuchungen ist es nun möglich, die an den Verzweigungsstellen von den beiden Ästen gelieferten Schlammengen relativ-quantitativ (in Prozent-Anteilen) zu erfassen. Unter Berücksichtigung der diesen %-Anteilen anhaftenden Fehlern und deren rechnerischen Fortpflanzung gelingt es schliesslich, für das Minster-Einzugsgebiet eine *Schlamm-Abtragskarte* zu erstellen (mit den ausgeschiedenen Feldern als kleinsten kartierten Einheiten). Diese Schlammabtragskarte ist eine Möglichkeit, die erzielten Resultate darzustellen. Auf die Problematik einer solchen Karte wird am Schlusse dieses Kapitels eingetreten.

Die Erfassung der Proben bei den repetierten Schlammuntersuchungen erfolgte nach dem in dieser Arbeit entwickelten Untersuchungsverfahren, das den Schlamm mittels sieben Komponenten beschreibt. Im Einzugsgebiet der Minster werden mit den 5 mineralischen Komponenten ca. 60% der Schlammmasse direkt

Tab. 16: Prozentanteile an den Verästelungsstellen (4 Sammelzeitpunkte)

| FELDER | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Ni 16 Felder | | 20% ±15% 80% ±15% | 0% ±15% 100% ±15% | 0% ±10% 100% ±10% |
| Wa Mi5 (+14 höhere Felder) | | 0% ±20% 100% ±20% | 0% ± 5% 100% ± 5% | 5% ±10% 95% ±10% |
| Su Mi4 (+12 höhere Felder) | 50% ±30% 50% ±30% | 80% ±10% 20% ±10% | 75% ±30% 25% ±30% | 35% ±20% 65% ±20% |
| He Mi3 (+10 höhere Felder) | | | 70% ± 5% 30% ± 5% | 65% ±20% 35% ±20% |
| Ch Mi2 (+8 höhere Felder) | 10% ±15% 90% ±15% | | 5% ±15% 95% ±15% | 5% ±15% 95% ±15% |
| Ho Wu | | | 60% ±15% 40% ±15% | 65% ±20% 35% ±20% |
| Fa (+2 höhere Felder) Mi1 (+4 höhere Felder) | 10% ±30% 90% ±30% | 25% ±35% 75% ±35% | 30% ±35% 70% ±35% | 50% ±15% 50% ±15% |
| Ib Is (+2 höhere Felder) | | 80% ±10% 20% ±10% | 50% ±10% 50% ±10% | 55% ±10% 45% ±10% |
| Wi St | | | 70% ±30% 30% ±30% | 60% ±10% 40% ±10% |

erfasst. Dazu kommt die Komponente «organisches Material» und die Komponente «Untergrundintensität» (Relativwert). Letztere zeigt vor allem dort höhere Werte, wo die direkt ermittelten 5 mineralischen Komponenten tiefe Werte aufweisen. Dies hängt wahrscheinlich mit dem Tongehalt der Proben zusammen, der direkt nicht erfasst werden konnte, indirekt aber mit der Komponente «Untergrundintensität» möglicherweise zum Teil erfasst wird.

Die rechnerische Erarbeitung der Schlammabtragskarte umfasst 2 wesentliche Schritte, die hier kurz erläutert seien:

Errechnung der %-Anteile an den Verästelungsstellen:
An den vorhandenen Verästelungsstellen wurden die Schlammanteile auf die 2 Äste aufgeteilt, analog wie es in Kap. 4.2 an einem Einzelbeispiel bei einmaliger Probennahme detailliert dargestellt ist. Die erzielten Resul-

Tab. 17: SF-Werte der Felder im Minster-Einzugsgebiet und Klassenzugehörigkeit

| FELDER | SCHLAMMANTEIL/FLAECHENANTEIL | | KLASSIFIZIERUNG | |
|-------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|------------------------------|
| | SF-WERT | einfaches Streuungsintervall | KLASSE | einfaches Streuungsintervall |
| Mi6 | | | | |
| Ni | 1.01 | -0.99 + 3.01 | +I | 0 + +II |
| Wa | 0.04 | -0.25 + 0.33 | -IV | 0 + -II |
| Mi5 (+14 höhere Felder) | 1.67 | 1.23 + 2.13 | +I | +I + +II |
| Mi5 | 1.67 | | +I | |
| Su | 4.74 | 1.58 + 7.90 | +III | +I + +III |
| Mi4 (+12 höhere Felder) | 0.85 | 0.13 + 1.57 | -I | -III + +I |
| Mi4 | 0.85 | | -I | |
| He | 6.05 | -0.35 + 12.45 | +III | 0 + +IV |
| Mi3 (+10 höhere Felder) | 0.30 | -0.08 + 0.68 | -II | 0 + -I |
| Mi3 | 0.30 | | -II | |
| Ch | 0.08 | -0.23 + 0.39 | -IV | 0 + -II |
| Mi2 (+8 höhere Felder) | 0.37 | -0.22 + 0.96 | -II | 0 + -I |
| Mi2 | 0.37 | | -II | |
| Fa (+2 höhere Felder) | 0.32 | -0.56 + 1.20 | -II | 0 + +I |
| Fa | 0.32 | | -II | |
| Ho | 0.53 | -1.54 + 2.60 | -I | 0 + +II |
| Wu | 0.19 | -0.58 + 0.96 | -III | 0 + -I |
| Mi1 (+4 höhere Felder) | 0.40 | -0.47 + 1.27 | -II | 0 + +I |
| Mi1 | 0.40 | | -II | |
| Ib | 0.62 | -1.56 + 2.80 | -I | 0 + +II |
| Is (+2 höhere Felder) | 0.26 | -0.73 + 1.25 | -II | 0 + +I |
| Is | 0.26 | | -II | |
| Wi | 0.51 | -4.87 + 6.35 | -I | 0 + +III |
| St | 0.14 | -1.37 + 1.65 | -III | 0 + +I |

tate sind auf Tab. 16 wiedergegeben. Für die Sammelzeitpunkte 1982 und 1983 sind die Aufnahmen lückenlos vorhanden, 1980 und 1981 hingegen nur teilweise. Um bei der weiteren rechnerischen Behandlung eine Fehlerbetrachtung machen zu können, wurden jeweils die zugehörigen Fehler abgeschätzt.

Errechnung der Schlammprozentanteile für alle Felder:
Vom Sihlsee aus werden nun sukzessive über die verschiedenen Verzweigungsstellen ins Einzugsgebiet hinein die Schlammprozentanteile für alle Felder errechnet. Dazu können für jede Verzweigungsstelle aus Tab. 16 die %-Anteile herausgelesen, gemittelt und für die Schlamm aufteilung eingesetzt werden. Anschliessend wird der Quotient Schlammanteil/Flächenanteil (SF-Wert) für die Felder errechnet.

Bei diesem Vorgehen dürfen die Fehlerschranken nicht ausser acht gelassen werden. Es ist klar, dass sich die sehr hohen Fehler, mit denen die Werte auf Tab. 16

behaftet sind, bei diesem Verfahren sehr stark auswirken. Der mitverrechnete Fehler wächst gemäss Fehlerfortpflanzungsgesetz sukzessive an, je weiter man sich von der ersten Verzweigungsstelle ins Einzugsgebiet hinein entfernt.

Feld «Mi6» wurde vernachlässigt und aus der Betrachtung ausgeschlossen. Diese Vernachlässigung äussert sich eventuell in einer Überschätzung des nachfolgenden Feldes «Ni». Feld «Mi6» hat einen hohen Anteil Talebene und dazu sehr steile Bereiche, hat aber sicherlich eine geringe Schlammproduktion, was nach Studium der beigelegten Karte «Gewässersohlenqualifizierung und Kartierung der Schlammquellen im Einzugsgebiet der Minster» vermutet werden kann.

Eine erste Schlamm aufteilung ist möglich zwischen Feld «Ni» und dem gesamten Restgebiet des Minster-Einzugsgebietes. Der Mischschlamm musste im Sihlsee entnommen werden, und zwar handelt es sich um eine Probe, die im Frühjahr gestochen wurde. Sie repräsent

tiert Minsterschlamm mehrerer Jahre. Feld «Ni» erhält einen SF-Wert von 1.01. Eine weitere Aufteilung erfolgt zwischen Feld «Wa» und «Mi5+14 höhere Felder». Für Feld «Wa» errechnet sich der SF-Wert zu 0.04, für das Restgebiet «Mi5+14 höhere Felder» zu 1.67. Für Feld «Mi5» (Durchgangsfeld) kann der SF-Wert nicht bestimmt werden. Es bleibt nur die Möglichkeit, diesem Feld den Wert für «Mi5+14 höhere Felder» (d.h. den Mittelwert von insgesamt 15 Feldern) zuzuordnen. Daraus lässt sich dann rückwärts dem Feld «Mi5» ein Schlammanteil zurechnen, der anschliessend wieder von der Totalmenge subtrahiert werden muss. Die Restmenge wird ihrerseits wieder aufgeschlüsselt auf Feld «Su» resp. «Mi4+höhere Felder» etc. ...

Insgesamt müssen für «Mi5», «Mi4», «Mi3», «Mi2», «Mi1», «Is» und «Fa» die Mittelwerte für das jeweilige Rest-Einzugsgebiet zugeordnet werden. Dies führt zu einer Verfälschung der Karte.

Das *Schlussresultat* ist auf Tab. 17 zusammengefasst. Ebenfalls auf dieser Tabelle erfolgt eine *Klassifizierung der Felder* (Zuordnung der Klassen siehe Tab. 18) mit Angabe des rechnerisch erzeugten einfachen Streuungsintervalls. Diese Klassifizierung wurde wie folgt vorgenommen:

$$G = M \times 2^x$$

- G: Wert für die Klassengrenze (SF-Wert)
M: $M = 1$, d.h. Mittelwert für das ganze Minster-Einzugsgebiet (SF-Wert = 1)
x: folgende ganze Zahlen gewählt: -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3

Die Klassengrenzen wurden vom SF-Wert 1 aus nach oben und unten in Form einer Exponentialfunktion mit der Basis 2 eingeteilt. Die Wahl von x ergab die Klassengrenzen. Der Klasse, die durch $x = 0$ und $x = -1$ begrenzt ist, wurde die Kennziffer -I zugeordnet, der Klasse mit den Grenzen $x = -1$ und $x = -2$ die Kennziffer -II, etc.. Die Resultate sind graphisch dargestellt in Form einer Schlammabtragskarte (Fig. 34).









3.3.4.2 Diskussion der Schlammabtragskarte und der Abtragsintensitäten

a) Diskussion der Schlammabtragskarte

Die hier erarbeitete Schlammabtragskarte ist ein Mittel zur Veranschaulichung und zur quantitativen Erfassung des Schlammabtrages. Natürlich ist sie auch mit Mängeln, Fehlern und Unsicherheiten behaftet:

- Vorerst ist die *Feldereinteilung* nicht freigestellt, sondern vom Flussnetz und vom geologisch-geotechnischen Aufbau des Einzugsgebietes der Minster bestimmt. Eine Einteilung in möglichst gleich grosse Felder, die alle in sich geologisch-geotechnisch gleich aufgebaut wären, ist Wunschziel, aber nicht durchführbar.

- Die *Qualität* der entnommenen *Proben* ist unterschiedlich. In schlammreichen Gewässerläufen ist die Entnahme problemlos. In schlammarmen Gewässerläufen ist die Entnahme teilweise schwierig und kaum bestimmbar, auf wie viele Hochwasserereignisse die entnommene Menge zurückgeht. In kanalisierten Bach- und Flussabschnitten sind oft nur schwierig geeignete Schlammdepots auffindbar.
- Eine längere *Beobachtungsreihe* als die vorhandene (Tab. 16) würde die zeitlichen Schwankungen besser ausgleichen.
- Bei der Einrechnung der Schlammanteile vom Sihlsee her ins Einzugsgebiet der Minster hinein lassen sich die Fehlerschranken der Ausgangsgrössen in die Fehlerbetrachtung miteinbeziehen. Durch *Fehlerfortpflanzung* entsteht eine grosse rechnerische Unsicherheit, die die Aussagekraft der Karte abschwächt (siehe auch Fehlerschranken Tab. 16).
- Eine zusätzliche Ungenauigkeit entsteht durch die *Durchgangsfelder* «Mi5», «Mi4», «Mi3», «Mi2» und «Is», denen jeweils der SF-Wert des Rest-Einzugsgebietes zugeordnet werden muss. Aus Vergleich der Felder untereinander und unter Berücksichtigung des geologisch-geotechnischen Aufbaus und der Feldkartierung «Gewässersohlenqualifizierung und Kartierung der Schlammquellen im Einzugsgebiet der Minster» kann gefolgert werden, dass den Feldern «Mi5», «Mi4», und «Mi3» wahrscheinlich eine zu hohe Schlammabtragsleistung zugeschrieben wird (wodurch als Folge die Abtragsleistung der nachfolgenden Felder als zu gering eingestuft wäre). Für «Mi2», «Mi1» und «Is» entspricht die Zuordnung eher den wirklichen Verhältnissen.
- Probleme, die sich aus der *Position der Probenentnahmestellen* ergeben:
Aus Rücksicht auf den geologisch-geotechnischen Aufbau des Feldes «Wu» wurde die Verzweigungsstelle «Ho-Wu-Fa» auseinandergezogen. Der Vorteil besteht darin, dass dadurch Feld «Wu» einheitlich aufgebaut ist. Da die Strecke Austritt aus «Wu» bis zur Einmündung von «Ho» geotechnisch ähnlich aufgebaut ist wie «Ho» (aber Bachsohle nicht erosiv, z.T. einrutschende Uferpartien vorhanden), wird der Abtragsbetrag von «Ho» rechnerisch wahrscheinlich überschätzt.
Ein ähnliches Problem ergibt sich in Feld «Mi2». Die nach der Kreuzungsstelle «Mi1-Mi2-Fa» entnommene Probe in «Mi2» enthält wegen des vorhandenen ungünstigen Gewässernetzes bereits einen Grossteil der Abtragsmenge von «Mi2» selber, der somit «Fa» resp. «Mi1» zugeordnet wird.
Die genaue Plazierung der Probennahme in den Feldern «Mi3» und «Mi4» ist nicht von Bedeutung, da in diesen Feldern die Minster streng natürlich kanalisiert ist (Canyon in kompetenten, schwach

| SIGNATUR | KLASSE | SF-WERT | SCHLAMMABTRAGS- INTENSITAET (mm/a) |
|---|--------|--------------|---------------------------------------|
|  | + IV | > 8 | > 1.52 |
|  | +III | 4 - 8 | 0.76 - 1.52 |
|  | + II | 2 - 4 | 0.38 - 0.76 |
|  | + I | 1 - 2 | 0.19 - 0.38 |
|  | - I | 0.5 - 1 | 0.09 - 0.19 |
|  | - II | 0.25 - 0.5 | 0.05 - 0.09 |
|  | -III | 0.125 - 0.25 | 0.02 - 0.05 |
|  | - IV | < 0.125 | < 0.02 |

Tab. 18: Klassenzuordnung der SF-Werte und entsprechende Schlammabtragsintensitäten

SF-WERT: Schlammanteil dividiert durch Flächenanteil eines Feldes

Man beachte die rechnerischen Fehler gemäss Tab. 17 .

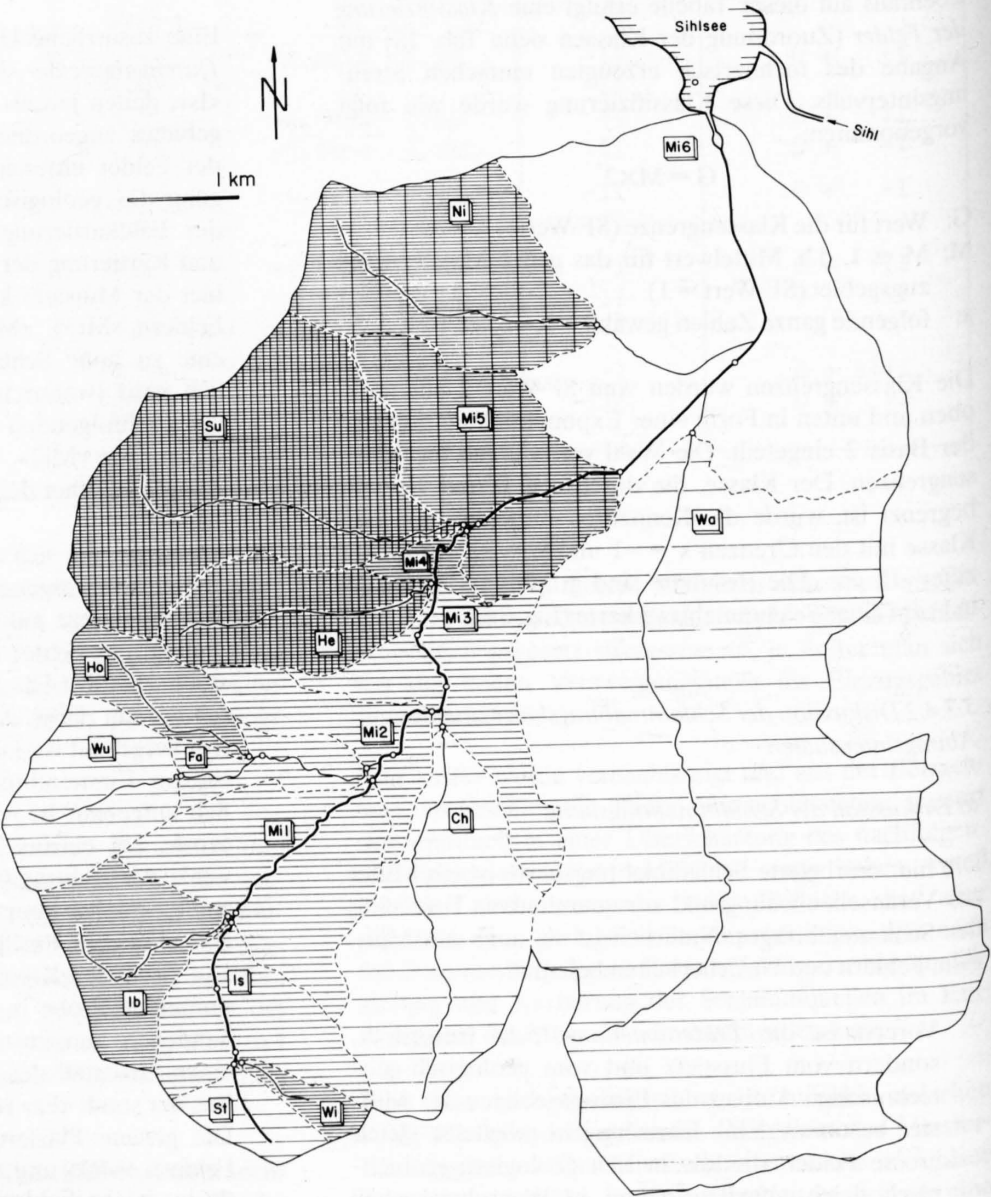


Fig. 34: Schlammabtragskarte für das Einzugsgebiet der Minster

schwebstoffproduzierenden Kalken) und nur unbedeutende, wenig abtragsaktive Bäche aufnimmt.

- Die Schlammabtragskarte beschreibt *nur* den Abtrag von *Schlamm*, der Abtrag von Lösung und Geschiebe ist natürlich nicht berücksichtigt. Eine Kartierung des Lösungs- und Geschiebe-Abtrags würde sicher ein anderes Bild ergeben, hinge beim Geschiebe aber auch stark von der Wahl der jeweiligen Erosionsbasis ab (Geschiebe-Zwischendepotien!).

Diese aufgelisteten Einschränkungen vermögen die Aussagekraft der Schlammabtragskarte nicht grundsätzlich in Frage zu stellen. Bei genauerem Studium der Geologie und der Geotechnik des Gebietes kann auch die Feststellung gemacht werden, dass die durch Daten-Auswertung erarbeitete Schlammabtragskarte dem «geologisch-geotechnischen Einfühlungsvermögen» in die vorgegebene Problematik (d.h. im weiteren Sinne der Schlammproduktion in Abhängigkeit vom Charakter der Fest- und Lockergesteine) nicht zuwiderläuft. Eine Ausnahme bilden die Felder «Mi5», «Mi4», «Mi3» und evtl. «Mi2», denen wahrscheinlich eine zu hohe Abtragsleistung zugeschrieben ist. Man muss daher annehmen, dass dafür die Abträge in den anderen Feldern eher etwas zu gering eingestuft sind. Es wurde natürlich darauf verzichtet, solche Interpretationen in die Karte hineinzuverarbeiten, d.h. die Karte bleibt das Produkt ausgewerteter, zahlenmässig erfassbarer Daten.

b) Schlammabtragsintensität

Eine Darstellung der Schlammabtragsintensität der ausgeschiedenen Felder im Minster-Einzugsgebiet geben Tab. 18 und Fig. 34:

Die niedrigsten Schlammabtragsintensitäten zeigen die Felder «Ch» und «Wa». Für beide beträgt sie weniger als 0.02 mm/a. Darauf folgt sukzessive eine grosse Gruppe von Feldern mit Abtragsintensitäten von 0.02 mm/a bis 0.19 mm/a. Extrem hohe Abtragsintensitäten zeigen die Felder «Su» und «He» (0.76 mm/a bis 1.52 mm/a).

Dieser Befund lässt sich in groben Zügen aufgrund der geologisch-geotechnischen Eigenschaften erklären. Fig. 26 und die Tabellen 14 und 15 zeigen den Charakter der wichtigsten im Minster-Einzugsgebiet anzutreffenden geologisch-geotechnischen Baueinheiten.

Die Felder «Wa» und «Ch» haben hohe Anteile an der Einheit «Kalke (e)», und zwar 65% und 40% (siehe Tab. 11–13). Die 30% «sandig-siltig-tonige Lockergesteine (f)» in Feld «Ch» vermögen das Bild nicht wesentlich zu verändern, da sie nicht verrutscht sind. Das Feld «Wa» hat nur 0.6 km Erosionsstrecke pro km², die Uferstrecken produzieren wenig Schwebstoffe.

Bei der Gruppe von Feldern mit 0.02 – 0.19 mm/a Abtragsintensität handelt es sich vor allem um Durchgangsfelder (Is, Mi1, Mi2, Mi3, Mi4). Diesen Feldern wurden jeweils die Mittelwerte des ganzen Restfeldes (d.h. inklusive höhere Felder) zugeordnet. Es ist daher nicht erstaunlich, dass diese Felder in dieser grossen Gruppe auftauchen.

Zusätzlich sind in der Gruppe mit 0.02 – 0.19 mm/a auch die Felder «St» und «Wu» vorhanden, beide von der Einheit «Flysch (b)» dominiert. Es handelt sich hier allerdings um Flyscheinheiten, die lithologisch nicht zu den Flyscheinheiten im Feld «Ni» gehören.

Die Felder «Wi», «Ib» und «Ho» liegen gemäss Schlammabtragskarte nahe dem mittleren Wert für das ganze Minster-Einzugsgebiet. Feld «Wi» ist dominiert von der Einheit «Ophiolithdecke von Iberg (c)», die Felder «Ib» und «Ho» von der Einheit «Mergelschiefer und Mergelkalke (a)». Beide Einheiten können gemäss Fig. 26 als abtragsaktiv eingestuft werden.

Die Felder «Mi5» und «Ni» haben positive Abtragsanteile, d.h. sie liegen über dem Mittel für das ganze Minster-Einzugsgebiet. «Mi5» ist ein Durchgangsfeld, es repräsentiert daher einen Mittelwert für das ganze höher liegende Einzugsgebiet. Es ist in seiner Abtragsleistung mit Sicherheit zu hoch eingestuft. Das Feld «Ni» ist zu 95% von der abtragsaktiven Einheit «Flysch (b)» dominiert.

Die Felder «Su» und «He» sind die wesentlichen Gebiete für den Schlammabtrag aus dem Minster-Einzugsgebiet. Die kartierte Schlammabtragsintensität beträgt 0.76 – 1.52 mm/a. Beide Gebiete haben sehr hohe Anteile Erosionsstrecken und schwebstoffproduzierende Uferstrecken pro km² Einzugsgebiet. Ihre Einzugsgebiete sind dominiert von den sehr abtragsaktiven «Mergelschiefern und Mergelkalken (a)», in Feld «Su» spielt zudem die Einheit «Flysch (b)» eine wichtige Rolle.

Einen Überblick über Schlammabtragsintensitäten in weiteren Einzugsgebieten in der Schweiz gibt Tab. 49.

3.4 Bacino di Malvaglia

Eine Darstellung der Anlagen der Bleniowerke findet sich in GESCHÄFTSLEITUNG DES KONSORTIUMS BLENIO KRAFTWERKE (1956).

Sowohl das Bacino di Malvaglia als auch die Zuflüsse aus dem direkten und indirekten Einzugsgebiet (Wasserfassungen im Bleniotal) wurden beprobt.

Die in Fig. 35 dargestellten Seeproben sind Mittelwerte über die Länge der gesamten gewonnenen Sedimentsäule. Die Kornverteilungen wurden auf einen Wert von D50 = 26.0 Mikrometer ausgerichtet.

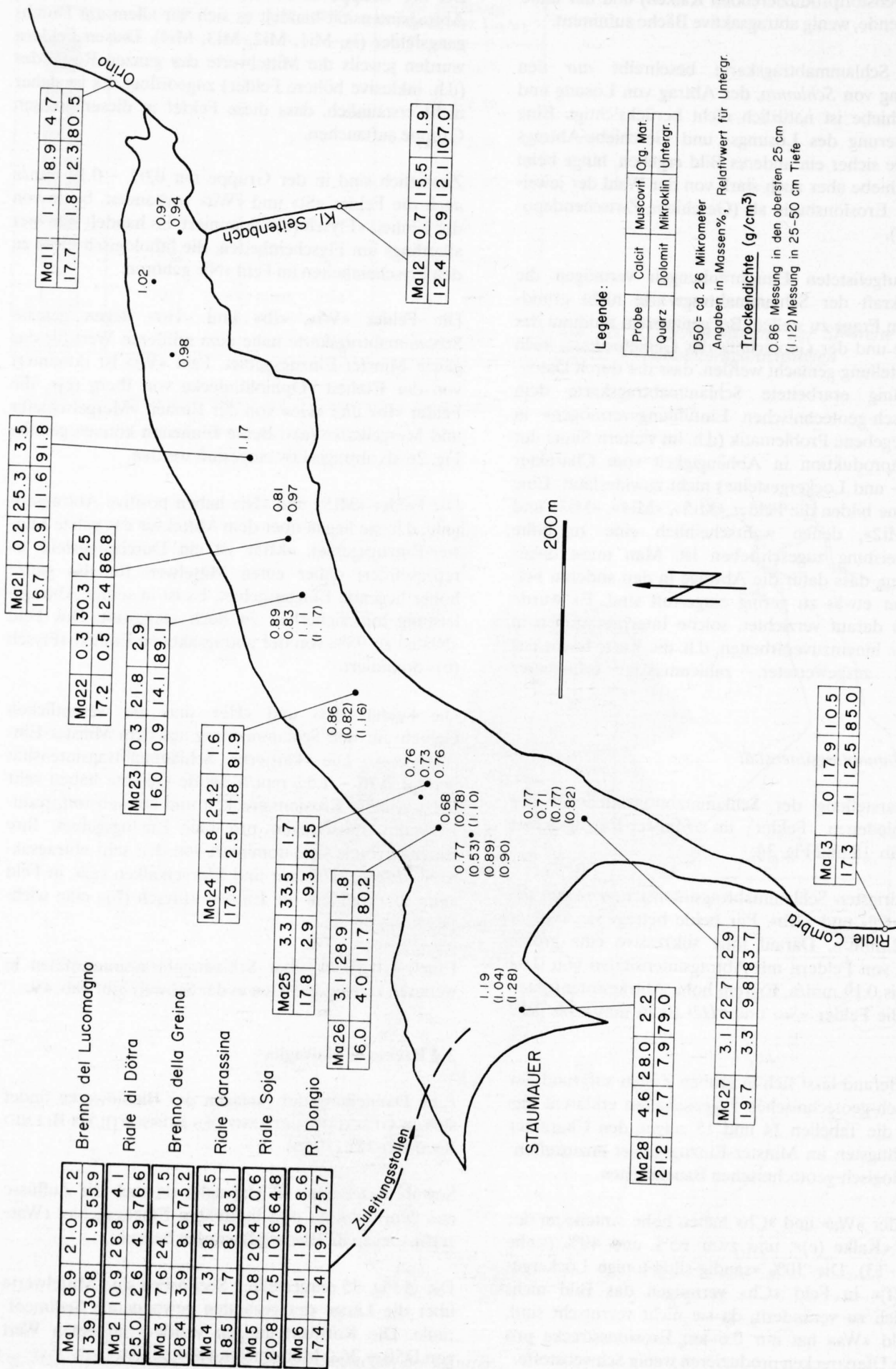


Fig. 35: Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Bacino di Malvaglia

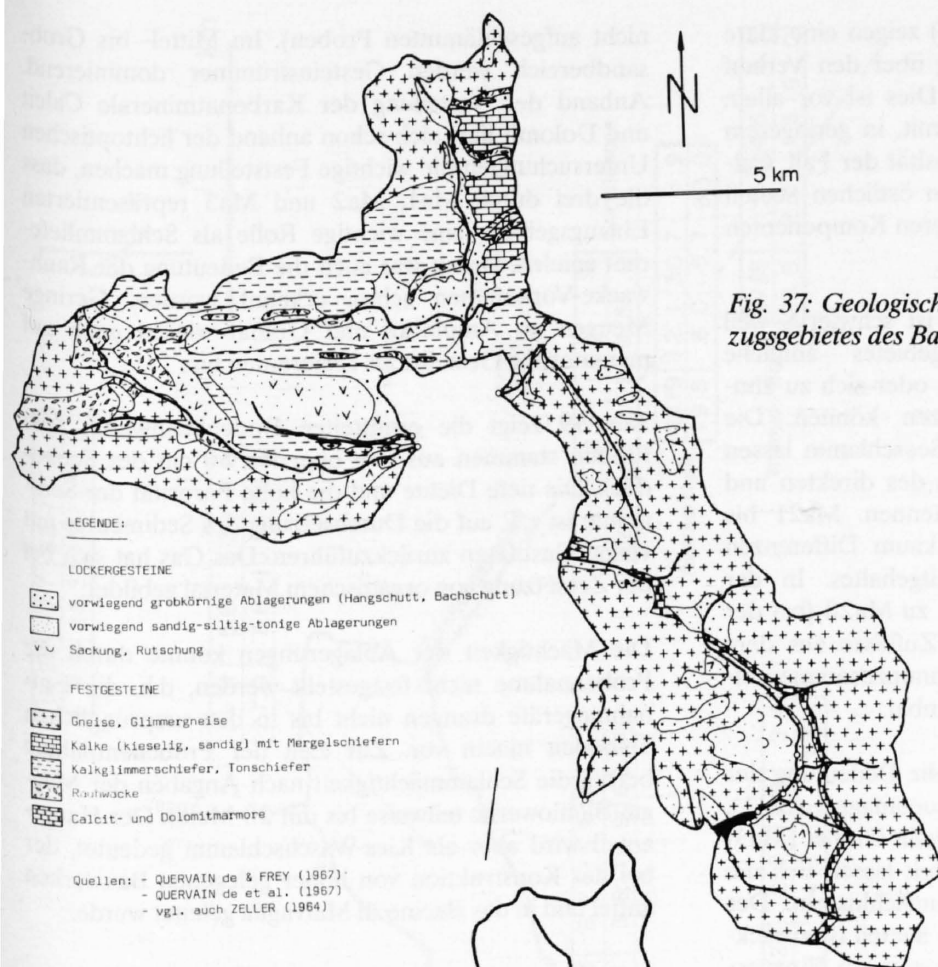


Fig. 37: Geologisch-geotechnische Kartenskizze des Einzugsgebietes des Bacino di Malvaglia

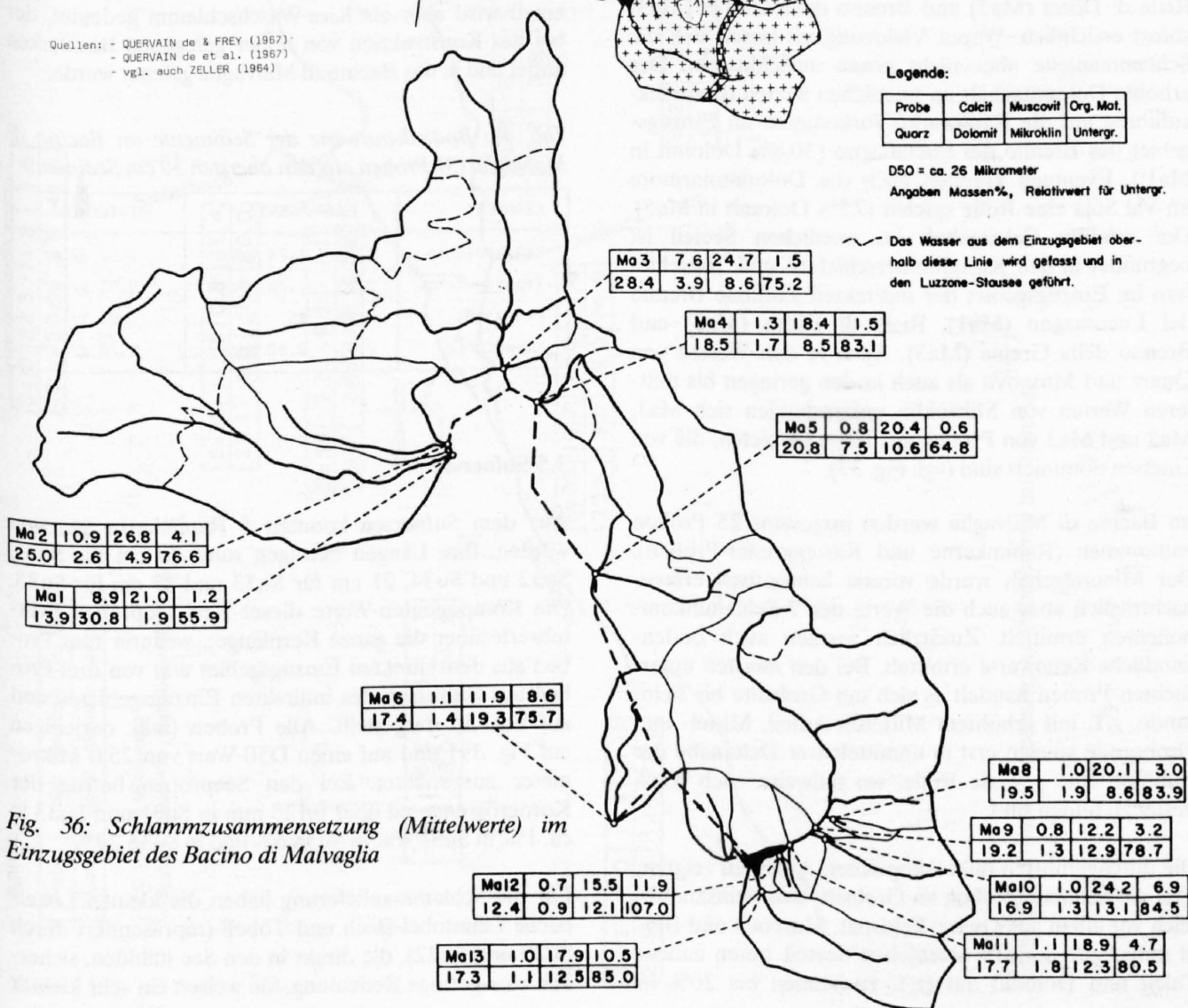


Fig. 36: Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet des Bacino di Malvaglia

Die Proben Ma21 – Ma28 (Fig. 35) zeigen eine klare Veränderung der Zusammensetzung über den Verlauf des Seebeckens hinweg betrachtet. Dies ist vor allem für den Gehalt an Calcit und Dolomit, in geringerem Masse auch für die Untergrundintensität der Fall. Calcit- und Dolomitgehalt nehmen vom östlichen Seeteil bis zur Staumauer stark zu. Die weiteren Komponenten zeigen keine klaren Tendenzen.

Eine genauere Herkunftsabklärung ist schwierig, weil mehrere Gebiete des Einzugsgebietes ähnliche Schlammzusammensetzungen zeigen oder sich zu ähnlichen Zusammensetzungen ergänzen können. Die Werte von Calcit und Dolomit im Seeschlamm lassen aber zumindest den Einflussbereich des direkten und des indirekten Einzugsgebietes erkennen. Ma21 bis Ma23 im östlichen Seeteil zeigen kaum Differenzen bezüglich des Calcit- und Dolomitgehaltes. In der Abfolge Ma24, Ma25, Ma26, Ma27 zu Ma28 (bei der Staumauer) wird der Einfluss der Zuflüsse aus dem indirekten Einzugsgebiet in der Schlammzusammensetzung aber kontinuierlich besser erkennbar.

Unter den indirekten Zuflüssen ist die Bedeutung der *Wasserfassungen* am Brenno del Lucomagno (Ma1), Riale di Dötra (Ma2) und Brenno della Greina (Ma3) sofort ersichtlich. Wegen Vieldeutigkeit lassen sich die Schlammanteile aber nicht genau aufschlüsseln. Der erhöhte Dolomitgehalt im westlichen Seeteil ist zurückzuführen auf die Rauhwake-Vorkommen im Einzugsgebiet des Brenno del Lucomagno (30.8% Dolomit in Ma1!). Eventuell könnten auch die Dolomitmarmore im Val Soja eine Rolle spielen (7.5% Dolomit in Ma5). Der erhöhte Calcitgehalt im westlichen Seeteil ist begründet in den Kalkglimmerschiefern und Tonschiefern im Einzugsgebiet der indirekten Zuflüsse Brenno del Lucomagno (Ma1), Riale di Dötra (Ma2) und Brenno della Greina (Ma3). Auch in den Werten von Quarz und Muscovit als auch in den geringen bis mittleren Werten von Mikroklin unterscheiden sich Ma1, Ma2 und Ma3 von Proben aus jenen Gebieten, die von Gneisen dominiert sind (vgl. Fig. 37).

Im Bacino di Malvaglia wurden insgesamt 25 Proben entnommen (Rammkerne und Kastengreifer-Proben). Der Mineralgehalt wurde vorerst lichtoptisch erfasst, nachträglich aber auch die Werte der 7 Schlammkomponenten ermittelt. Zusätzlich wurden auch bodenkundliche Kennwerte ermittelt. Bei den meisten untersuchten Proben handelt es sich um Grobsilte bis Feinsande, z.T. mit erhöhtem Mittelsilt-Anteil. Mittel- und Grobsande spielen erst in unmittelbarer Deltanähe der Zuflüsse eine gewisse Rolle, wo teilweise auch Kiesnester zu finden sind.

Die durchgeführten mikroskopischen Analysen zeigten, dass die Sedimentproben im Grobsilt- und Feinsandbereich vor allem aus Quarz, Feldspat, Muscovit und Biotit aufgebaut sind. Im westlichen Seeteil treten zudem Calcit und Dolomit auf (z.T. zusammen bis 20% in

nicht aufgeschlammten Proben). Im Mittel- bis Grobsandbereich werden Gesteinstrümmen dominierend. Anhand der Verteilung der Karbonatminerale Calcit und Dolomit liess sich schon anhand der lichtoptischen Untersuchungen die wichtige Feststellung machen, dass die drei durch Ma1, Ma2 und Ma3 repräsentierten Einzugsgebiete eine wichtige Rolle als Schlammlieferant spielen. Damit war auch die Bedeutung der Rauhwake-Vorkommen schon erkannt worden. Geringe Mengen an Amphibol und Granat wiesen auch auf metamorphe Gesteine als Lieferanten hin.

Tab. 19 zeigt die ermittelten Bodenkennwerte. Alle Proben stammen aus den obersten 50 cm des Seebodens. Die tiefe Dichte und die hohe Porosität der Sedimente ist z.T. auf die Durchsetzung des Sedimentes mit vielen Gasblasen zurückzuführen. Das Gas hat sich bei der Zersetzung von organischem Material gebildet.

Die Mächtigkeit der Ablagerungen konnte durch die Probennahme nicht festgestellt werden, d.h. die Entnahmegerate drangen nicht bis in den ursprünglichen Talboden hinein vor. Zur Zeit der Probenentnahme betrug die Schlammmächtigkeit nach Angaben der Maggia-Bleniowerke teilweise bis um 20 Meter. Der Hauptanteil wird aber als Kies-Waschschlamm gedeutet, der bei der Konstruktion von höher gelegenen Bauwerken anfiel und in das Bacino di Malvaglia geleitet wurde.

Tab. 19: Bodenkennwerte der Sedimente im Bacino di Malvaglia (31 Proben aus den obersten 50 cm Sediment)

| KENNWERT | EXTREMWERTE | MITTELWERT |
|---------------|-------------------------------|------------------------|
| Feuchtdichte | 1.31 - 1.74 g/cm ³ | 1.52 g/cm ³ |
| Trockendichte | 0.53 - 1.28 g/cm ³ | 0.91 g/cm ³ |
| Porosität | 46 - 85 % | 61 % |
| Korndichte | 2.51 - 2.80 g/cm ³ | 2.70 g/cm ³ |

3.5 Sufnersee

Aus dem Sufnersee konnten 5 Rammkerne gezogen werden. Ihre Längen betragen rund 40 cm für Su31, Su32 und Su34, 21 cm für Su33 und 17 cm für Su35. Die Komponenten-Werte dieser fünf Seeproben (Mittelwerte über die ganze Kernlänge), weiterer fünf Proben aus dem direkten Einzugsgebiet und von drei Proben aus Zuflüssen des indirekten Einzugsgebietes sind auf Fig. 38 dargestellt. Alle Proben (inkl. derjenigen auf Fig. 39) sind auf einen D50-Wert von 25.0 Mikrometer ausgerichtet. Bei den Seeproben betrug der Korngrößenanteil über 0.125 mm in Su31 und Su33 je ca. 1%, in Su32 4%, in Su34 6% und in Su35 29%.

Für die Schlammanlieferung haben die kleinen Lokalbäche Leimtobel-Bach und Töbéli (repräsentiert durch Su20 und Su22), die direkt in den See münden, sicherlich eine geringe Bedeutung. Sie weisen ein sehr kleines

Legende:

| Probe | Quarz | Calcit | Dolomit | Muscovit | Mikroklin | Org. Mat | Unterg. |
|-------|-------|--------|---------|----------|-----------|----------|---------|
| | | | | | | | |

D50 = ca. 25 Mikrometer
Angaben Massen%, Relativwert für Unterg.

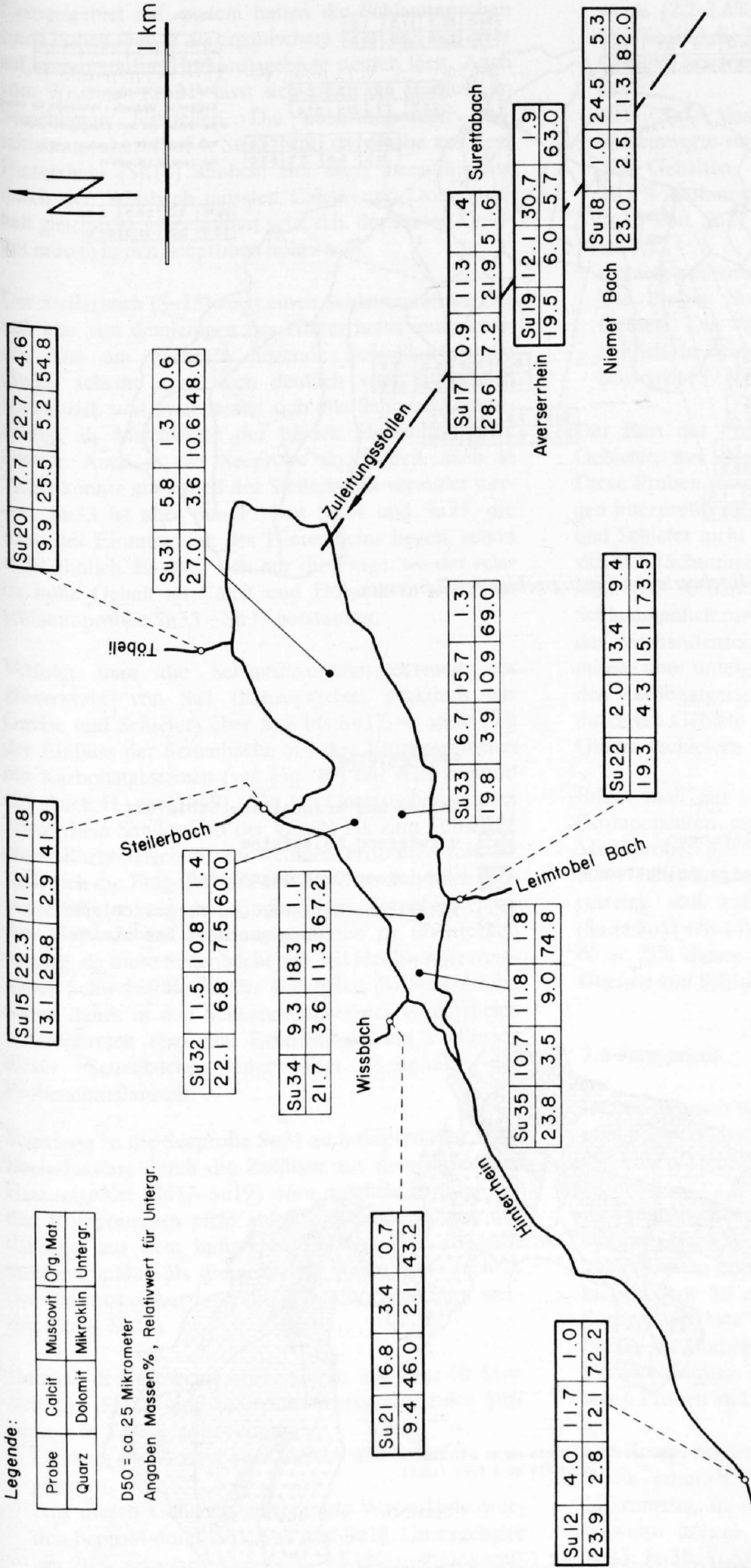


Fig. 38: Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Sufnersee

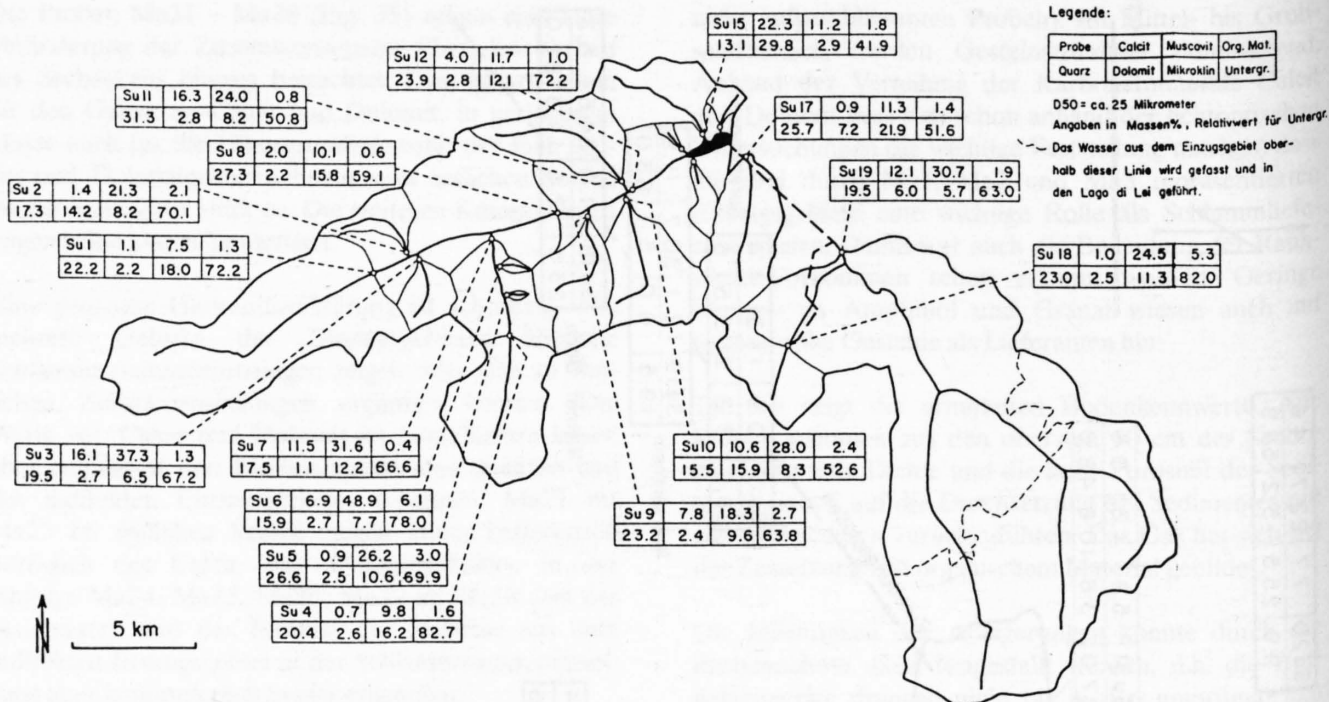


Fig. 39: Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet des Sufnersees

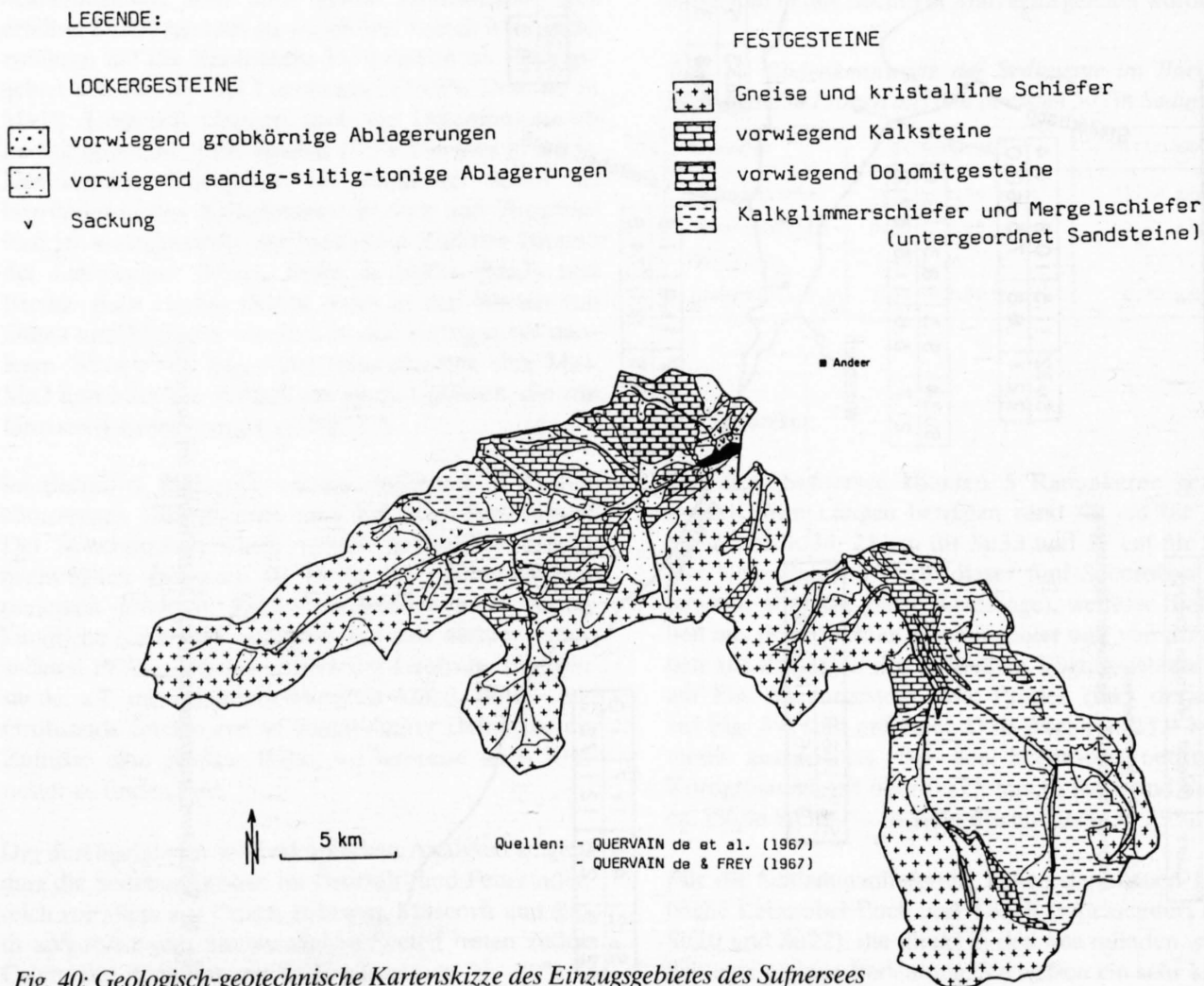


Fig. 40: Geologisch-geotechnische Kartenskizze des Einzugsgebietes des Sufnersees

Einzugsgebiet auf, zudem haben die Schlammproben einen hohen Gehalt an organischem Material, was eher auf schlammarme Herkunftsgebiete deuten lässt. Auch vom Wissbach (Su21) lässt sich kaum ein Einfluss im Seeschlamm feststellen. Die nächstliegenden Seeschlammproben (Su34, Su35) sind der Probe aus dem Hinterrhein (Su12) ähnlich. Bei einer Beeinflussung durch den Wissbach müssten Calcit- und Dolomitgehalt gleichmässig beeinflusst sein, d.h. der Anteil Dolomit müsste in den Seeproben höher sein.

Der Steilerbach (Su15) zeigt einen Schlammaufbau, der sich klar von demjenigen des Hinterrheins unterscheidet. Die am nächsten liegende Seeschlammprobe (Su32) scheint denn auch deutlich vom Steilerbach beeinflusst, und zwar lassen sich alle Schlammkomponenten als Mischwerte der beiden Herkunftsgebiete deuten. Auch in der Seeprobe Su33 (evtl. auch in Su34) könnte ein Anteil des Steilerbachs vermutet werden. Su33 ist aber den Proben Su34 und Su35, die nahe der Einmündung des Hinterrheins liegen, schon recht ähnlich. Es stellt sich nur die Frage, wo der relativ hohe Gehalt an Calcit und Dolomit in den Seeschlammproben Su33 – Su35 herkommt.

Verfolgt man die Schlammzusammensetzung des *Hinterrheins* von Su1 (Einzugsgebiet praktisch nur Gneise und Schiefer) über Su8 bis Su12, so stellt sich der Einfluss der Seitenbäche aus den Einzugsgebieten mit Karbonatgesteinen (vgl. Fig. 40) nur sehr zögernd ein. Auch HAHN (1969) stellt bei Untersuchungen des Hinterrhein-Sandes von der Quelle bis zum Sufnersee einen Karbonatgehalt von wenigen Prozenten fest. Es stellt sich die Frage, ob der ständig Gletschermilch führende Hinterrhein den Einfluss der Seitenbäche aus den Gebieten mit Karbonatgesteinen zu überdecken vermag, da diese Seitenbäche nur bei Hochwasserereignissen Schwebstoffe führen. Das heisst die Seitenbäche wären damit in den Schlammdepots des Hinterrheins untervertreten resp. die Erkennung eines Einflusses dieser Seitenbäche hinge vom Zeitpunkt der Probenentnahme ab.

Schwierig ist die Seeprobe Su31 zu interpretieren. Eine Beeinflussung durch die Zuflüsse aus dem indirekten Einzugsgebiet (Su17–Su19) wäre möglich, ist aber aus den Komponenten nicht ablesbar. Die Bedeutung der Zuflüsse aus dem indirekten Einzugsgebiet ist auch insofern unklar, als die gefassten Wasser z.T. auch in den Saisonspeicher im Valle di Lei hochgepumpt werden (Su18, Su19).

Gemäss der geotechnischen Skizze auf Fig. 40 lässt sich das direkte und indirekte *Einzugsgebiet* des Sufnersees in 3 *Hauptzonen* einteilen:

- Gebiete, vorwiegend aus Gneisen und Schiefen aufgebaut:
Aus diesen Gebieten austretende Wasserläufe wurden beprobt durch Su1, Su4 und Su18. Quarzgehalte um 20%, sehr tiefe Calcit- (0.7–1.1%) und Dolomit-

werte (2.2–2.6%) und hohe Mikroklinwerte (11.3–18.0%) sind die Hauptcharakteristika dieser Zone.

- Gebiete, vorwiegend aus Karbonatgesteinen aufgebaut:
Su11, Su15 und Su21 beschreiben diese Gebiete. Extremwerte sind hier typisch, bei sonst schwankenden Gehalten. Su11 enthält 31.3% Quarz, Su15 29.8% Dolomit und Su21 gar 46.0% Dolomit. In Su15 und Su21 treten Quarz und Mikroklin stark zurück.
- Gebiete mit vorwiegend kalkigen Glimmerschiefen:
Die Proben Su3 und Su6 charakterisieren diese Gebiete. Die Werte der Komponenten sind uneinheitlich. In beiden Proben werden hohe Gehalte an Muscovit (37.3% und 48.9%) gemessen.

Der Rest der Proben im Einzugsgebiet stammt aus Gebieten mit Anteilen aus allen drei Hauptzonen. Diese Proben lassen sich z.T. sinngemäss als Mischungen interpretieren. In Su20 ist der Einfluss der Gneise und Schiefer nicht festzustellen, in Su5 hingegen offensichtlich (Schutthalde!). Ebenso zeigt Su22 klare Dominanz der vorhandenen Gneise und Schiefer in der Schlammlieferung. In Su17 zeigt der Dolomitgehalt das Vorhandensein von Karbonatgesteinen (flächenmässig aber untergeordnet) deutlich an. Su10 wird von den Karbonatgesteinen dominiert. Su19 wird bestimmt durch die Gebiete mit Karbonatgesteinen und kalkigen Glimmerschiefen.

Bildet man aus den 5 Seeproben eine Mischprobe (Komponenten mitteln) und vergleicht sie mit einer Mischprobe aus dem Gneis/Schiefergebiet (Su1+Su4+Su18) und mit einer Mischprobe, die Karbonatgesteine und kalkige Glimmerschiefer repräsentiert (Su3+Su11+Su15), so erhält man als Resultat, dass ca. 60 – 75% dieses Seeschlammes aus dem Gebiet mit *Gneisen und Schiefen* stammen muss.

3.6 Forggensee

Der Forggensee liegt im Bundesland Bayern (BRD), in unmittelbarer Nähe der Grenze zur Bundesrepublik Österreich. Der Lech ist der Hauptzufluss.

Im Forggensee wurden insgesamt 26 Rammkerne entnommen (Fo1–Fo26) und davon 15 auf die 7 Standardkomponenten untersucht. Die Mehrzahl der Kerne enthielten über 50 cm Sediment. Zusätzlich wurden bei Seetiefstand vier Kerne von Hand gestochen (Fo30–Fo33). Im Einzugsgebiet des Forggensees wurden drei kleinere Zuflüsse beprobt (Fo40, Fo41, Fo42) und weitere 6 Proben im Lechtal aufgesammelt.

Die Komponentendarstellungen sind für folgende D50-Werte ermittelt: Im stauwurzelfernen Bereich um 9 Mikrometer, in der Nähe der einmündenden Flüsse teilweise höhere Werte um 12 Mikrometer (Fo12, Fo15, Fo30, Fo31, Fo33, Fo42). Ebenso gelten für die

Legende:

| Probe | Calcit | Muscovit | Org. Mat. |
|-------|---------|-----------|-----------|
| Quarz | Dolomit | Mikroclin | Untergr. |

D50 = ca. 9 Mikrometer (Fo12, Fo15,
Fo30, Fo31, Fo33, Fo42: ca. 12 Mikrom.)
Angaben in Massen%, Relativwert für
Untergrund

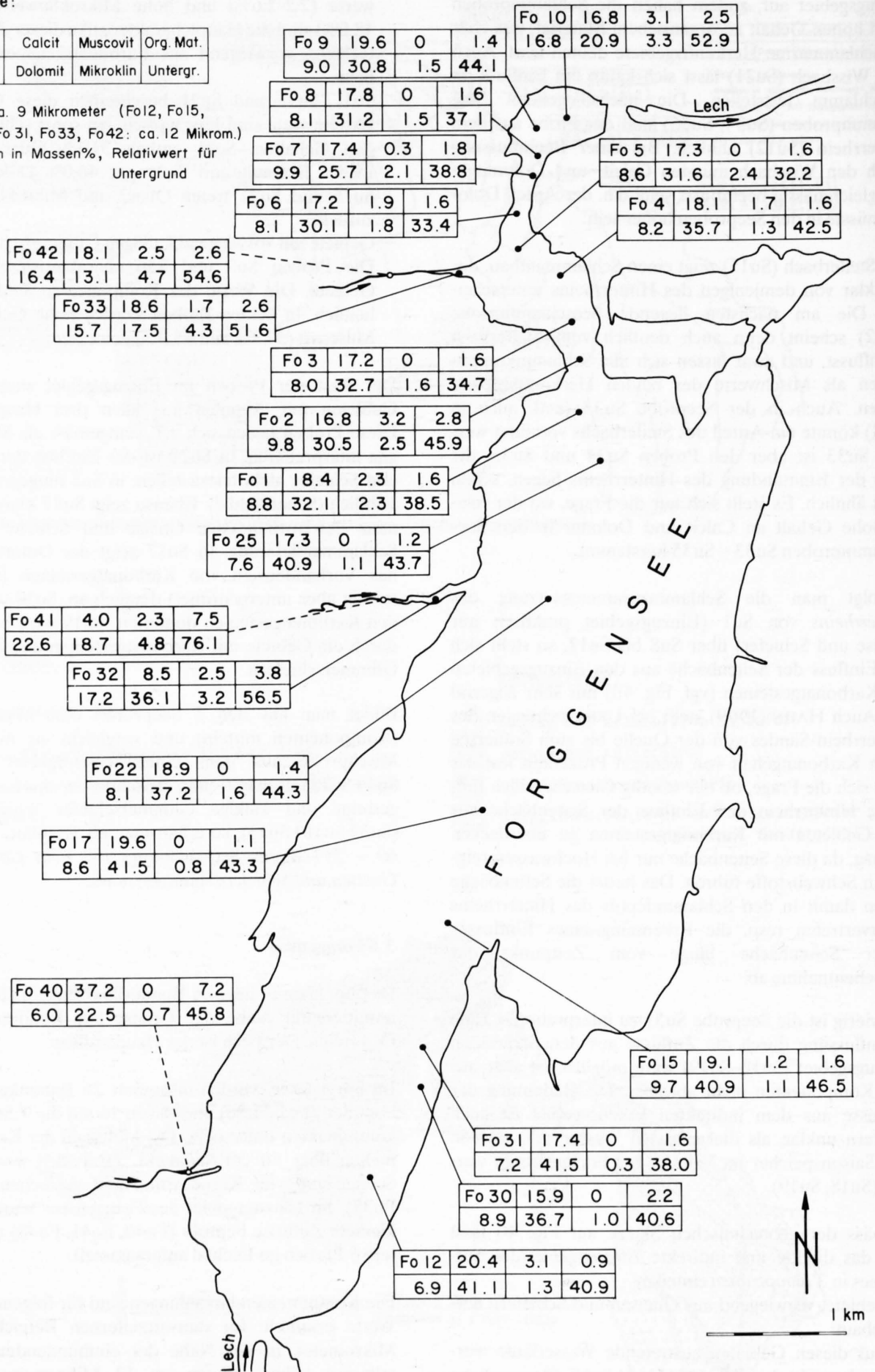


Fig. 41: Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Forggensee

Legende:

| Probe | Calcit | Muscovit | Org. Mat. |
|-------|---------|-----------|-----------|
| Quarz | Dolomit | Mikroklän | Untergr. |

D50 = ca. 12 Mikrometer

Angaben in Massen%, Relativwert für Untergr.

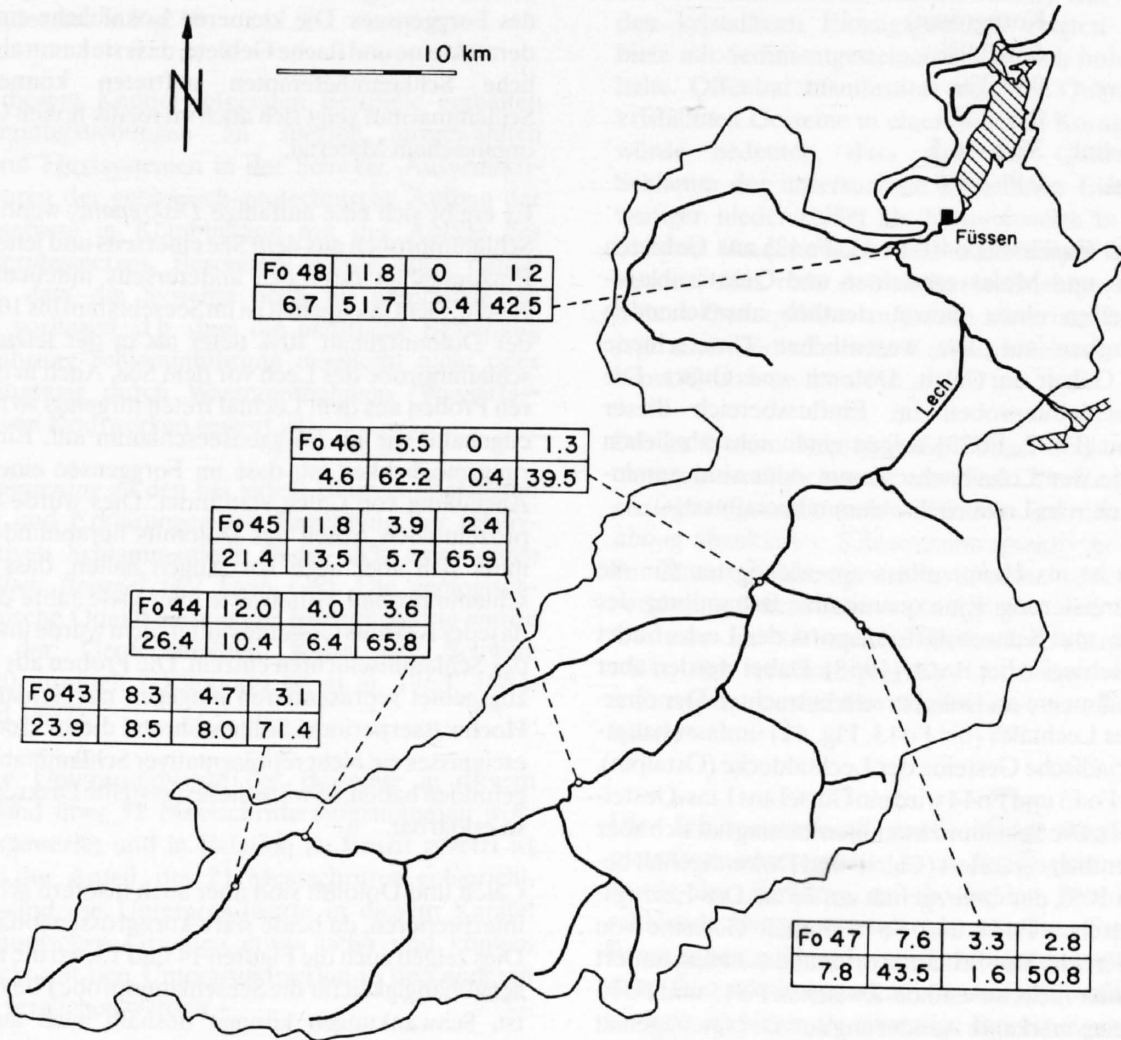


Fig. 42: Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet des Lech

Proben aus dem Einzugsgebiet des Lech D50-Werte um 12 Mikrometer. Es ist charakteristisch für den Schlamm im Forggensee, dass er sehr feinkörnig ist. Dementsprechend mussten auch aus dem Einzugsgebiet feinkörnige Schlammanteile untersucht werden.

Sämtliche Proben aus dem eigentlichen Seebecken zeigen einen ähnlichen Aufbau (siehe Fig. 41, Ausnahme Fo10):

| | |
|----------------|--|
| Calcit | 15.9–20.4% |
| Dolomit | 25.7–41.5% (stark abhängig von Korngrösse) |
| Quarz | 6.9–9.9% |
| Muscovit | 0–3.2% |
| Mikroclin | 0.3–2.5% |
| Untergrundint. | 32.2–46.5 |
| Organ. Mat. | 0.9–2.8% |

Die *lokalen Zuflüsse* (Fo40, Fo41, Fo42) aus Gebieten mit Flysch- und Molassegesteinen und Quartärablagerungen weisen einen hievon deutlich abweichenden Schlammaufbau auf. Die wesentlichen Unterschiede liegen im Gehalt an Calcit, Dolomit und Quarz. Die zwei Seeschlammproben im Einflussbereich dieser Lokalbäche (Fo32, Fo33) zeigen einen sehr ähnlichen Aufbau wie der Lokalbachschlamm oder sind zumindest deutlich vom Lokalbachschlamm beeinflusst.

Der *Lech* ist als Hauptzufluss am wichtigsten für die Schlammanlieferung. Eine quantitative Behandlung des Geschiebe- und Schwebstofftransports des Lechs findet sich beispielsweise bei BAUR (1968). Dabei werden aber nur die Sedimente im Deltabereich betrachtet. Der oberste Teil des Lechtales (bis Fo43, Fig. 42) umfasst hauptsächlich triadische Gesteine der Lechtaldecke (Ostalpin). Zwischen Fo43 und Fo44 wird ein Gürtel aus Lias-Gesteinen gequert. Die Schlammzusammensetzung hat sich aber nicht wesentlich verändert (Calcit- und Dolomitgehalt betragen um 10%, der Quarzgehalt um 25%). Das Einzugsgebiet zwischen Fo44 und Fo45 enthält Gesteine von Trias bis Kreide. Die Schlammzusammensetzung ändert sich auch hier nicht wesentlich. Zwischen Fo45 und Fo46 tritt aber eine markante Änderung auf. Der Quarzgehalt fällt stark ab auf Werte unter 10%, der Dolomitgehalt schnellst empor auf Werte über 50%. Ebenso fällt der Mikroklingehalt stark ab auf Werte nahe Null. Auch der Wert

für den Untergrund und der Anteil an organischem Material sinken deutlich ab. Diese Beobachtung lässt den Schluss zu, dass für die *Schlammanlieferung* zum Forggensee jene Gesteinseinheiten zur Hauptsache verantwortlich sein müssen, die unter anderem auch zwischen Fo45 und Fo46 vorhanden sind. Es handelt sich dabei mit Sicherheit um Gesteine der *Trias*, und zwar dürften die Kössener Schichten eine dominante Rolle spielen. Zudem könnten Rauhwacken der Raibler Schichten lokal eine gewisse Bedeutung haben.

Der *Lech* ist zweifellos der *dominante* Schlammlieferant des Forggensees. Die kleineren Lokalbäche entwässern derart kleine und flache Gebiete, dass sie kaum als wesentliche Schlammlieferanten auftreten können. Ihre Schlammarmut zeigt sich auch im relativ hohen Gehalt an organischem Material.

Es ergibt sich eine auffällige *Diskrepanz*, wenn man die Schlammproben aus dem See einerseits und jene aus dem Einzugsgebiet des Lech andererseits miteinander vergleicht. Der Calcitgehalt ist im Seeschlamm bis 10% höher, der Dolomitgehalt 10% tiefer als in der letzten Flussschlammprobe des Lech vor dem See. Auch in den anderen Proben aus dem Lechtal treten nirgends so hohe Calcitgehalte wie im Forggenseeschlamm auf. Eine Erklärungsmöglichkeit ist, dass im Forggensee eine biogene Ausfällung von Calcit stattfindet. Dies würde auch den prozentualen Anteil des Dolomits herabmindern. Man muss sich aber auch vor Augen halten, dass die Seeschlammproben Mittelwerte über viele Jahre darstellen, da jeder Kern als Gesamtes untersucht wurde und nicht jedes Schlammsschichten einzeln. Die Proben aus dem Einzugsgebiet repräsentieren hingegen nur Schlamm einer Hochwasserperiode. Sollte während dieses Hochwasserereignisses ein nicht repräsentativer Schlammabtrag stattgefunden haben, so wäre die festgestellte Diskrepanz auch so erklärbar.

Calcit und Dolomit sind aber auch insofern schwierig zu interpretieren, da beide stark korngrößenabhängig sind. Dies zeigen auch die Figuren 14 und 15, wo die Korngrößenabhängigkeit für die Seeschlammprobe Fo3 dargestellt ist. Schwankungen können deshalb auch aus diesem Grunde auftreten. Eine mögliche Ungenauigkeit bei der Korngrößenbestimmung würde sich hier also stark niederschlagen, dies vor allem im Dolomitgehalt.

4 AKTUO GEOLOGISCHE SCHLAMMUNTERSUCHUNGEN AN AUSGEWÄHLTEN FLUSS- UND BACHSYSTEMEN

4.1 Einleitung und Resultatübersicht

Eine geografische Übersicht der ausgewählten Beispiele findet sich in Fig. 19.

Die in diesem Kapitel folgenden Beispiele enthalten Schlammuntersuchungen an speziell ausgewählten Bach- und Flusssystemen in der Schweiz. Auswahlkriterien waren der geologisch-geotechnische Aufbau der Einzugsgebiete in Kombination mit der Anlage des Entwässerungsnetzes. Besonders wurde auch darauf geachtet, dass die Systeme noch im ursprünglichen Zustand vorliegen, d.h. dass die natürliche Beziehung Wasserführung/Schlammführung möglichst nicht oder nur geringfügig durch Wasserentnahmen (Wasserfassungen) von Kraftwerken gestört ist.

Eine *Erläuterung* zu den bei jedem Beispiel angefügten Tabellen und Erklärungen zur Ermittlung der relativ-quantitativen Schlammanteile findet sich *beim ersten dargestellten Beispiel (4.2 Flem GR)*. Die geologisch-geotechnische Qualifizierung der Einzugsgebiete wurde anhand der Geotechnischen Karte der Schweiz 1:200 000 ermittelt (QUERVAIN DE et al. 1963, 1964, 1965 und 1967).

Auch die Untergrundwerte der Beispiele in diesem Kapitel sind über 51 Messschritte aufgenommen worden. Ausgewertet und in Relation zu Brucit gesetzt ist aber nur der Anteil, der 21 Messschritten entspricht. Deshalb sind die Untergrundwerte in diesem Kapitel aus methodischen Gründen etwas tiefer und können nicht direkt mit den Untergrundwerten in den anderen Kapiteln verglichen werden.

Der *Schlammaufbau* eines Baches oder Flusses zeigt interessante und teilweise unerwartete *Zusammenhänge*. Als wichtigste Komponenten für die Herkunftsanalysen erwiesen sich Calcit, Dolomit und Quarz. Die weiteren mineralischen Komponenten Muscovit und Mikroklin können je nach Einzugsgebiet wichtige Bedeutung haben. Der Calcitgehalt schwankt in erwarteter Weise je nach Aufbau des Einzugsgebietes. Erstaunlich ist, dass dolomitische Gesteine sehr deutlich im abtransportierten Schlamm erkennbar sind, auch wenn das Vorkommen der dolomitischen Gesteine im Einzugsgebiet flächenmässig sehr klein ist. Dieser Zusammenhang zeigte sich sehr eindrücklich im Schlamm der Kander, des Welschtobelbachs und des Sapiüner Bachs. Interessant ist auch, dass sich kristal-

line Gebiete meistens durch einen tiefen Quarzgehalt im Schlamm ausdrücken (Bsp. vor allem Kander, Weisse Lutschine und Gadmerwasser). Im Vergleich zu den kristallinen Einzugsgebieten zeigten Einzugsgebiete mit Sedimentgesteinen erstaunlich hohe Quarzgehalte. Offenbar manifestiert sich der Quarzgehalt der kristallinen Gesteine in einer höheren Korngrösse. Dies würde bedeuten, dass sich der Quarzgehalt im Schlamm der untersuchten kristallinen Einzugsgebiete weniger niederschlägt als beispielsweise in der Sandfraktion. Andererseits muss auch darauf hingewiesen werden, dass reife detritische Sedimentgesteine häufig höhere Quarzgehalte aufweisen als kristalline Gesteine (vgl. auch Geotechnische Karte der Schweiz 1:200 000, bspw. QUERVAIN DE & FREY 1967).

Die in diesem Kapitel aufgeführten Schlammuntersuchungen ermöglichen es vor allem, die Bedeutung der *geologisch-geotechnischen Faktoren* auf den *Schlammabtrag* abzuklären. Schlammabtragsaktiv erweisen sich vor allem Sedimentgesteine, die eine schlechte Kornvermittlung aufweisen (mergelige und schiefrige Gesteine im Siltbereich). Besonders abtragsfördernd wirkt sich erwartungsgemäss aus, dass solche Gesteinstypen zusätzlich Tendenzen zu Rutschungen haben.

Die *Schlammherkunft* wurde wenn möglich *relativ-quantitativ abgeschätzt*, d.h. an den Bachverzweigungen wurde der Schlamm auf die beiden Bachäste aufgeschlüsselt. Die meisten der dargestellten Probenstellen konnten nur während einer Feldbegehung beprobt werden. Die relativ-quantitativen Aufschlüsselungen sind deshalb auch nur als einmalige Bewertungen zu verstehen. Einen Begriff über Schwankungen der relativ-quantitativen Schlammanlieferung an Bachverzweigungsstellen über eine grössere Zeitdauer geben die Beispiele des Minster-Einzugsgebietes (Tab. 16), des Furtbachs (Tab. 22–24) und des Steinibachs (Tab. 39). Es treten Probleme auf, wenn die Einzugsgebiete stark vergletschert sind. Für die vorliegenden Untersuchungen wurden stets Schlamme aus Hochwasser-Überflutungsbereichen entnommen. Dabei ist nicht berücksichtigt, dass ein Gletschermilch führender Bach über eine längere Zeitdauer Schwebstoffe führt als ein Bach aus einem gletscherfreien Gebiet, der nur bei Hochwasserereignissen Schwebstoffe führt. Die Resultate gelten dann nur für die entnommenen Proben und dürfen nicht für eine längere Zeitdauer verallgemeinert werden.

In diesem Kapitel wurde insbesondere auch das Beispiel des Steinibaches behandelt. Ein einziges Hochwasserereignis hat dieses Gebiet um einige mm erniedrigt. Für das Beispiel des Steinibachs konnten auch schwebstoffbelastete Wasserproben entnommen und quantitativ untersucht werden. Dieses Vorgehen erbrachte das gleiche Resultat wie die direkten Schlammuntersuchungen.

4.2 Flem GR

Stellvertretend für alle in Kapitel 4 angeführten Beispiele wird für das Bachsystem Flem/Turnigla der Aufbau und die Herleitung der angefügten Tabellen erklärt und das Prinzip der Schlammherkunftsabklärung erläutert.

Das getestete Gebiet Flem/Turnigla ist Bestandteil des Einzugsgebietes des Vorderrheins (Fig. 43). Interessant ist das Beispiel, weil das Einzugsgebiet der Flem Teile der *Flimser Bergsturzmasse* umfasst, das Einzugsgebiet der Turnigla hingegen grösstenteils im anstehenden Fels liegt.

Die Schlammuntersuchungen ergaben eine *Dominanz* von *Flem-Schlamm* unterhalb der Vereinigung mit der Turnigla (relativ-quantitativer Anteil Flem ca. 85%). Die Herleitung dieser Abschätzung ergibt sich wie

folgt: Für die beiden Bäche Flem und Turnigla wurden die Prozentwerte (resp. die relativen Intensitäten bei der Komponente Untergrund) für die sieben Schlammkomponenten ermittelt. Ebenso wurde die Schlammzusammensetzung nach der Vereinigung der beiden Bäche bestimmt. Die Entnahmestellen sind auf Fig. 43 eingezeichnet. Die Kornverteilung des Schlammes wurde auf einen D50-Wert von 13.0 Mikrometer ausgerichtet.

Die erzielten Werte finden sich in *Tab. 20*. In der Kolonne mit der Überschrift «s» ist der *grösste Standardfehler* der Mittelwerte der drei Proben angegeben, für Calcit beträgt er beispielsweise 0.7 Massenprozente. Die Werte rechts in der Spalte «Anteil Flem» sind für jede der sieben Komponenten durch eine Mischungsrechnung ermittelt worden, deren Ansatz wie folgt lautet (vgl. 2.6.3.1, hier für Calcit):

$$[\% \text{ Calcit Flem}]x + [\% \text{ Calcit Turn.}][1-x] = \% \text{ Calcit vereinigt}$$

x bezeichnet den Anteil Calcit, der von der Flem beige-steuert wird.

Die vier Kolonnen in der Spalte «Anteil Flem» bezeichnen von links nach rechts:

a) x-Werte aller Komponenten.

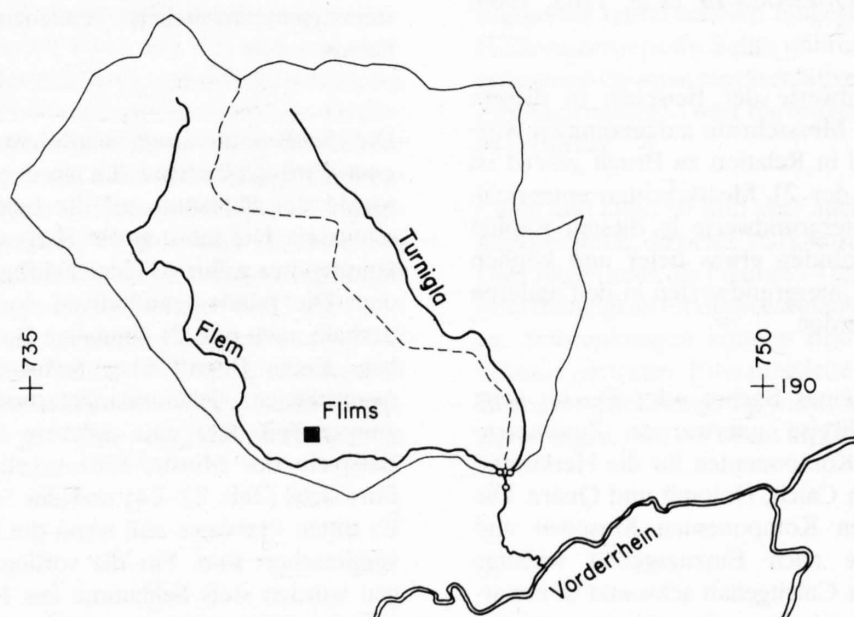


Fig. 43: Übersicht Einzugsgebiet Flem/Turnigla

Tab. 20: Komponenten des Schlammes von Flem/Turnigla und Anteilbestimmung

| | FLEM | TURNIGLA | vereinigt | s | ANTEIL FLEM | | | |
|-----------------------|--|----------|-----------|-----|-------------|------|------|------|
| | in Massen%, Relativwert für Untergrund | | | | a) | b) | c) | d) |
| CALCIT | 20.9 | 43.5 | 25.2 | 0.7 | 0.81 | 0.81 | 0.81 | 0.81 |
| DOLOMIT | 3.0 | 3.6 | 2.5 | 0.2 | 1.83 | | | |
| QUARZ | 13.1 | 11.9 | 12.8 | 0.7 | 0.75 | | | |
| MUSCOVIT | 12.0 | 9.7 | 5.5 | 2.0 | -1.82 | | | |
| MIKROKLIN | 10.3 | 4.1 | 8.9 | 1.3 | 0.77 | 0.77 | | |
| UNTERGRUND | 46.2 | 37.4 | 45.9 | 1.0 | 0.97 | 0.97 | 0.97 | |
| ORGAN. MAT. | 0.7 | 0.8 | 0.5 | 0.2 | 3.00 | | | |
| D50 = 13.0 Mikrometer | | | | | gemittelt | 0.90 | 0.85 | 0.89 |
| | | | | | | | 0.81 | |

- b) x-Werte nur aufgeführt, wenn die Ausgangswerte für die Flem und die Turnigla um mehr als den dreifachen Betrag des grössten Standardfehlers (3s) voneinander verschieden sind. Dies ist hier nur für Calcit, Mikroklin und Untergrund zutreffend.
- c) x-Werte nur aufgeführt, wenn die Ausgangswerte um mehr als den 6-fachen Betrag (6s) des grössten Standardfehlers voneinander abweichen.
- d) Wie vorhergehende Kolonne, aber ohne die Komponenten Untergrundintensität und ohne organisches Material.

Die Werte von jeder der vier *Kolonnen* a bis d werden *gemittelt*, wobei die Resultate der Kolonnen c und d die beste Aussagekraft besitzen. Der augenscheinliche Nachteil ist hingegen, dass die meisten der sieben Komponenten in den Kolonnen c und d den entsprechenden Auswahlkriterien zum Opfer gefallen sind. Es bleibt also keine andere Wahl, als auch die Kolonne b zumindest zu beachten. Das Resultat der Kolonne a widerspiegelt hingegen praktisch nurmehr ein Zufallsresultat (hier mit 0.90 zufällig sehr ähnlich den Werten in den nachfolgenden Kolonnen b, c und d). Die Kolonne a kann für einzelne Komponenten sehr hohe oder sehr tiefe Anteile für die beiden Ausgangsbäche enthalten, weil man nahezu identische Ausgangswerte (Differenz innerhalb des Standardfehlers) nicht rechnerisch vermischen kann, ohne sehr hohe oder sehr tiefe Anteilwerte zu erhalten.

In *Tab. 21* sind die beiden Einzugsgebiete näher charakterisiert. Für die Errechnung der mittleren Hangneigung wurde für jedes der beiden Teileinzugsgebiete mittels eines Quadratrasters an mindestens 50 Punkten die mittlere Hangneigung bestimmt (Grundlage: vergrösserte Ausschnitte aus der Landeskarte der Schweiz 1:25 000) und anschliessend gemittelt.

Der Schlammanteil wird in % als auch in relativer Form «Schlammanteil/Flächenanteil» (*SF-Wert*) angegeben. Die zwei SF-Werte dienen dem Vergleich zwischen der Schlammproduktion der Flem und der Turnigla. Sie dürfen aber nicht zum direkten Vergleich mit SF-Werten anderer Einzugsgebiete herangezogen werden. Der Quotient Schlammanteil/ $\sqrt{\text{Fläche-Anteil}}$ (*SWF-Wert*) berücksichtigt, dass die Grösse des Höchsthochwasserabflusses allgemein nicht linear, sondern lediglich mit der Wurzel aus der Einzugsgebietsgrösse anwächst. Für den Schwebstoffabtrag zweier ungleich grosser, ansonsten aber identisch aufgebauter Gebiete lässt sich dementsprechend folgern: Die Höchst-Schwebstoffführung eines Baches aus einem kleineren Gebiet ist verhältnismässig höher als die Höchst-Schwebstoffführung eines grösseren Gebietes. Die Schwebstofffrachten über eine längere Zeitperiode entsprechen aber dem Flächenverhältnis. Der SWF-Wert sollte folglich dann berücksichtigt werden, wenn die Grösse der zwei betrachteten Einzugsgebiete stark verschieden ist und nur Momentanproben entnommen worden sind (Bsp. Schöpfproben von schwebstoffhaltigem Wasser). Da die meisten gesammelten Proben aber akkumulierte Schlammproben darstellen, in denen das grössere Gebiet vermutlich bereits überrepräsentiert ist (vgl. Diskussion Fig. 18f), kommt dem SWF-Wert in den diskutierten Beispielen kaum Bedeutung zu.

Zudem ist auf *Tabelle 21* der *flächenmässige Aufbau* der Teileinzugsgebiete der Bäche Flem und Turnigla dargestellt. Als Grundlage wurde die Geotechnische Karte der Schweiz 1:200 000 benutzt (QUERVAIN DE et al. 1963). Für alle folgenden Beispiele findet eine analoge Aufteilung in Locker- und Festgesteine und Eis-/Firnbedeckung statt. Der Gesteinsuntergrund der von Eis und Firn bedeckten Flächen wurde nicht interpretiert, da die jeweilige Zuordnungsunsicherheit zu gross ist. Während Kolonne T direkt über den internen Auf-

Tab. 21: Charakterisierung der Einzugsgebiete von Flem und Turnigla

| CHARAKTERISIERUNG DER EINZUGSGEBIETE | FLEM | | TURNIGLA | |
|---|------------------------------|----|------------------------------|----|
| MITTLERE HANGNEIGUNG | 27 ° | | 31 ° | |
| FLAECHEN Anteil an Gesamtfläche | 45.4 km ² 58 % | | 33.4 km ² 42 % | |
| SCHLAMMANTEIL | 85 % | | 15 % | |
| Schlammanteil / Flächenanteil (SF-Wert) | 1.5 | | 0.4 | |
| Schlammanteil / $\sqrt{\text{Fläche}}$ -Anteil (SWF-Wert) | 1.6 | | 0.3 | |
| FLAECHENMAESSIGER AUFBAU, Anteile an Teileinzugsgebiet (T), resp. Gesamteinzugsgebiet (G) | T | G | T | G |
| LOCKERGESTEINE | % | % | % | % |
| - grobkörnige Ablagerungen (Schutt) | 36 | 21 | 12 | 5 |
| - vorw. sandig-siltig-tonige Ablag. (Lehme, Moränen) | 4 | 2 | 1.5 | 1 |
| FESTGESTEINE | | | | |
| - Kalksteine, massig, mit mergeligen Zwischenlagen | 36 | 21 | 70 | 29 |
| - Kalk-, Ton- und Mergelschiefer | 21 | 12 | 16 | 7 |
| EIS UND FIRN | 3 | <2 | 0.5 | >0 |

bau der zwei Teileinzugsgebiete Auskunft gibt (die Werte in jeder Kolonne mit der Überschrift T ergeben 100%) und damit die Interpretation der jeweiligen Schlammzusammensetzung eines Baches ermöglichen, sind die Werte in Kolonne G für direkte Vergleiche zwischen den zwei Bächen heranzuziehen, denn hier sind die Flächenwerte auf das gesamte vereinigte Einzugsgebiet umgerechnet (die Werte beider Kolonnen mit der Überschrift G ergeben zusammen 100%).

Das Flem-Einzugsgebiet liefert etwa das 1.5-fache (SF-Wert = 1.5) des Schlammes, der ihm gemäss der Einzugsgebietsgrösse zustehen würde. Hauptverantwortlich hierfür könnte der hohe Flächenanteil an grobkörnigen Lockergesteins-Ablagerungen (4mal mehr als im Turnigla-Einzugsgebiet), der fast doppelt so hohe Anteil an Kalk-, Ton- und Mergelschiefern und der höhere Bedeckungsgrad an Eis und Firn sein. Ein Grossteil der grobkörnigen Ablagerungen im Flem-Einzugsgebiet gehört zur Flimser Bergsturzmasse. Die Beobachtung, dass sich der Schlamm aus den beiden Einzugsgebieten markant im Calcit- und Mikroklingehalt unterscheidet, und die Tatsache, dass die Flimser Bergsturzmasse mineralogisch ähnlich den Festgesteinen im Turnigla-Einzugsgebiet ist, lässt an der Bedeutung der grobkörnigen Ablagerungen der Flimser Bergsturzmasse als Haupt-Schlammlieferant zweifeln. Offenbar sind es eher die Verrucano- und Flyschge-

steine (Gruppe Kalk-, Ton- und Mergelschiefer), die eine sehr wichtige Rolle spielen und nur im Flem-Einzugsgebiet vorkommen. Kalk- und Mergelschiefer des parautochthonen Helvetikums kommen hingegen in beiden Einzugsgebieten vor.

Gemäss Angaben aus dem Vorlesungsskript «Flussbau» (Teil B, p.76) von LICHTENHAHN 1977 beträgt die Feststofffracht des Flembaches beim Werk Pintrun 14000 m³ (keine Angabe über Art und Dauer der Messungen). Dies ergäbe eine spezifische Feststofffracht von 170 m³ pro km² und Jahr. Bei einer angenommenen Trockendichte von ca. 2.0 g/cm³ dieser Feststoffe und von 2.7 g/cm³ für das abgetragene Gestein im Einzugsgebiet errechnet sich eine spezifische Feststoff-Abtragsintensität von 0.13 mm/a.

4.3 Furtbach ZH

Der Furtbach (Fig. 44) entwässert das Furtal, ein E-W verlaufendes Seitental des Limmattales zwischen Zürich und Baden. Das betrachtete Gebiet liegt fast vollständig im Molassegebiet.

Das Einzugsgebiet des Furtbachs wurde zweimal beprobt während des Sommers 1982, erstmals Anfang Juli und wieder Anfang August nach einer längeren Regenperiode. Bei der zweiten Beprobung wurden

unterhalb der Verzweigungsstelle 2 Proben im Abstand von ca. 1 km entnommen. Leider ist die Qualität der Schlammproben aus dem Furtbach nicht sehr gut, was mit dem kanalisierten Bett des Furtbaches zusammenhängt.

Die Resultate sind auf den Tab. 22-25 (Tab. 25 vgl. QUERVAIN DE et al. 1963) dargestellt. Die einzelnen Komponenten zeigen erstaunlich grosse Unterschiede, obwohl beide Einzugs Terrains im Molassegebiet liegen. Der Nebenbach von Otelfingen umfasst aber stratigraphisch ältere Molasseeinheiten (Obere Meeresmolasse und Untere Süsswassermolasse, teilweise verrutscht) und zudem geringe Anteile an Karbonatgesteinen der Lägerenkette. Dies könnte für den erhöhten Gehalt an Calcit verantwortlich sein. Wesentlich für die grossen Unterschiede der Komponenten sind aber vermutlich die grösseren Flächen mit sandig-siltig-tonigen Ablagerungen (glazigene Lockergesteine) im Furttal. Erstaunlich hoch ist bei allen untersuchten Proben der Anteil an organischem Material. Dies ist sicher auf die dichte Besiedlung und intensive landwirtschaftliche Nutzung (v.a. auch grosser Anteil Ackerland) zurückzuführen.

In allen drei berechneten Fällen (Tab. 22-24) dominiert der Furtbach stark. Der Anteil beträgt ca. 90% und muss noch höher angesetzt werden, sofern man die Verteilung der Untergrundintensität und des organischen Materials mitberücksichtigt. Die Rechnung führt zu einem Schlammanteil/Flächenanteil-Wert von 1.2 für das Furttal, aber von nur 0.3 für den Nebenbach von Otelfingen.

Das Resultat erstaunt vor allem, wenn man die mittlere Hangneigung beider Gebiete betrachtet. Das Einzugs-

gebiet des Furtbaches hat lediglich einen Wert von 5 Grad gegenüber 15 Grad des Einzugsgebietes des Nebenbaches von Otelfingen. Grundsätzlich gibt es zwei *Erklärungsmöglichkeiten*: Entweder führt man die Dominanz des Furtbaches auf die grossen Anteile an sandig-siltig-tonigen Lockergesteins-Ablagerungen im Furttal zurück, oder man wertet den reliefmässig sehr unterschiedlichen Charakter der beiden Einzugsgebiete als ausschlaggebend. Das heisst, man nähme an, dass die Hochwasserwelle aus dem flachen, grossen Einzugsgebiet des Furtbaches zeitlich verzögert auftritt gegenüber der Hochwasserwelle aus dem steilen, kleinen Einzugsgebiet des Nebenbaches von Otelfingen. Dies würde bedeuten, dass der Schlamm des Furtbaches verspätet einträte und deshalb in den entnommenen Schlammproben überwiegen würde.

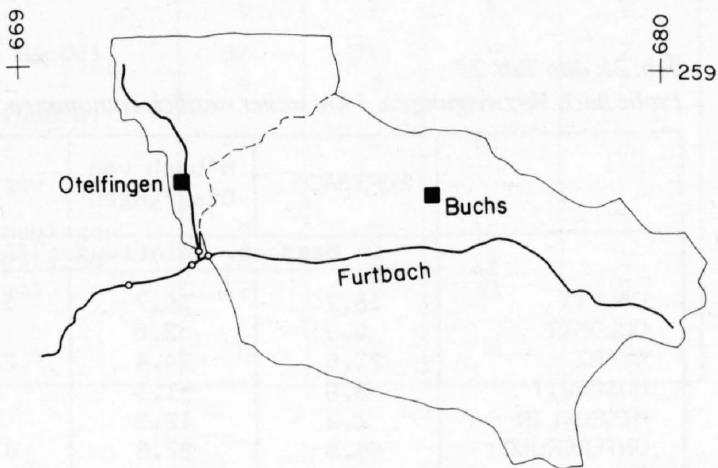


Fig. 44: Übersicht Einzugsgebiet Furtbach/Nebenbach von Otelfingen

Tab. 22: Komponenten des Schlammes von Furtbach/Nebenbach von Otelfingen und Anteilbestimmung. Probennahme Anfang Juli 1982

| | FURTBACH | N'bach von Otelfingen | vereinigt | s | ANTEIL FURTBACH | | | |
|-----------------------|--|-----------------------|-----------|-----------|-----------------|------|------|------|
| | in Massen%, Relativwert für Untergrund | | | | | | | |
| CALCIT | 15.8 | 23.0 | 15.9 | 0.5 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 |
| DOLOMIT | 8.0 | 2.2 | 6.3 | 0.5 | 0.71 | 0.71 | 0.71 | 0.71 |
| QUARZ | 23.1 | 31.4 | 22.5 | 0.8 | 1.07 | 1.07 | 1.07 | 1.07 |
| MUSCOVIT | 1.4 | -0.9 | 3.8 | 1.5 | 2.04 | | | |
| MIKROKLIN | 6.7 | 13.5 | 8.3 | 0.3 | 0.76 | 0.76 | 0.76 | 0.76 |
| UNTERGRUND | 41.4 | 31.7 | 43.8 | 1.2 | 1.25 | 1.25 | 1.25 | |
| ORGAN. MAT. | 9.4 | 4.4 | 10.7 | 0.2 | 1.26 | 1.26 | 1.26 | |
| D50 = 21.5 Mikrometer | | | | gemittelt | 1.15 | 1.01 | 1.01 | 0.88 |

Tab. 23: Komponenten des Schlammes von Furtbach/Nebenbach von Otelfingen und Anteilbestimmung. Probennahme Anfang August 1982, nach Regenperiode

| | FURTBACH | N'bach von Otelfingen | vereinigt | s | ANTEIL FURTBACH | | | |
|-----------------------|--|--------------------------|-----------|-----------|-----------------|------|------|------|
| | in Massen%, Relativwert für Untergrund | | | | | | | |
| CALCIT | 18.2 | 26.7 | 16.2 | 0.3 | 1.24 | 1.24 | 1.24 | 1.24 |
| DOLOMIT | 9.3 | 2.0 | 6.6 | 0.2 | 0.63 | 0.63 | 0.63 | 0.63 |
| QUARZ | 21.6 | 24.4 | 21.6 | 0.4 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| MUSCOVIT | 3.0 | -1.5 | 2.7 | 2.2 | 0.93 | | | |
| MIKROKLIN | 7.2 | 12.3 | 8.1 | 0.8 | 0.82 | 0.82 | 0.82 | 0.82 |
| UNTERGRUND | 44.3 | 37.6 | 46.7 | 0.9 | 1.36 | 1.36 | 1.36 | |
| ORGAN. MAT. | 8.6 | 5.8 | 10.6 | 0.2 | 1.71 | 1.71 | 1.71 | |
| D50 = 22.5 Mikrometer | | | | gemittelt | 1.10 | 1.13 | 1.13 | 0.92 |

Tab. 24: dito Tab. 23
Probe nach Verzweigung ca. 1 km weiter westlich entnommen

| | FURTBACH | N'bach von Otelfingen | vereinigt | s | ANTEIL FURTBACH | | | |
|-----------------------|--|--------------------------|-----------|-----------|-----------------|------|------|------|
| | in Massen%, Relativwert für Untergrund | | | | | | | |
| CALCIT | 18.2 | 26.7 | 14.9 | 0.3 | 1.39 | 1.39 | 1.39 | 1.39 |
| DOLOMIT | 9.3 | 2.0 | 6.2 | 0.2 | 0.58 | 0.58 | 0.58 | 0.58 |
| QUARZ | 21.6 | 24.4 | 22.0 | 0.6 | 0.86 | 0.86 | | |
| MUSCOVIT | 3.0 | -1.5 | 3.3 | 2.2 | 1.07 | | | |
| MIKROKLIN | 7.2 | 12.3 | 9.4 | 0.8 | 0.57 | 0.57 | 0.57 | 0.57 |
| UNTERGRUND | 44.3 | 37.6 | 49.7 | 0.9 | 1.81 | 1.81 | 1.81 | |
| ORGAN. MAT. | 8.6 | 5.8 | 10.9 | 0.2 | 1.82 | 1.82 | 1.82 | |
| D50 = 23.5 Mikrometer | | | | gemittelt | 1.16 | 1.17 | 1.23 | 0.85 |

4.4 Gerewasser VS

Das Gerental liegt im Oberwallis. Das Gerewasser entwässert das Tal zum Rotten hin. Tektonisch gehört das betrachtete Gebiet zum Gotthardmassiv. Fig. 45, Tab. 26 und Tab. 27 (erarbeitet aus QUERVAIN DE et al. 1967) umschreiben das Gebiet und fassen die Resultate zusammen.

Das Gerewasser und der einmündende Nebenbach sind bezüglich ihres Schlammkomponenten-Aufbaues unterschiedlich. Dies gilt insbesondere für die Werte von Quarz, Muscovit, Mikroklin, Untergrund und organisches Material. Der höhere Anteil an Quarz und Mikroklin im Schlamm des Gerewassers (vorw. Granite und Gneise im Einzugsgebiet, Tab. 27) und der hohe

Anteil Muscovit in demjenigen des Nebenbaches (100% glimmerreiche Gneise und Glimmerschiefer im Einzugsgebiet) lässt sich auf die Lithologie zurückführen. Der hohe Gehalt an organischem Material (und der wahrscheinlich teilweise damit zusammenhängende hohe Untergrundanteil) hängt mit der Schlammarmut des Nebenbaches zusammen.

Die Schlammförderung aus dem Gerewasser-Einzugsgebiet ist dominant. Der SF-Wert beträgt 1.1 für das Gerewasser und 0.4 für den Nebenbach. Der Hauptgrund für diese klare Dominanz ist sicher auf den hohen Anteil an Eis und Firm im Haupttal zurückzuführen. Nur von der Lithologie her betrachtet, würde man dem Nebenbach einen höheren Einfluss zuschreiben.

Tab. 25: Charakterisierung der Einzugsgebiete von Furtbach und Nebenbach von Otelfingen

| CHARAKTERISIERUNG DER EINZUGSGEBIETE | FURTBACH | | Bach v. Otelfingen | |
|---|----------------------|----|---------------------|---|
| MITTLERE HANGNEIGUNG | 5 ‰ | | 15 ‰ | |
| FLAECHE | 25.8 km ² | | 6.0 km ² | |
| Anteil an Gesamtfläche | 81 % | | 19 % | |
| SCHLAMMANTEIL | 95 % | | 5 % | |
| Schlammanteil / Flächenanteil (SF-Wert) | 1.2 | | 0.3 | |
| Schlammanteil / $\sqrt{\text{Fläche}}$ -Anteil (SWF-Wert) | 1.4 | | 0.2 | |
| FLAECHENMAESSIGER AUFBAU, Anteile an Teileinzugsgebiet (T), resp. Gesamteinzugsgebiet (G) | T | G | T | G |
| LOCKERGESTEINE | % | % | % | % |
| - grobk. Ablag. (Schutt, saubere Kiese und Sande) | 32 | 26 | 9 | 2 |
| - dito, verrutscht | 4 | 3 | 11 | 2 |
| - vorw. sandig-siltig-tonige Ablagerungen (Lehme, Moränen), untergeordnet Torf (im Furttal) | 42 | 34 | 19 | 3 |
| FESTGESTEINE | | | | |
| - Kalksteine, massig, mit mergeligen Zwischenlagen | 0 | 0 | 14 | 3 |
| - Molassegesteine: - vorwiegend Molassesandsteine | 10 | 8 | 14 | 3 |
| - vorwiegend Molassemergel | 12 | 10 | 33 | 6 |
| EIS UND FIRN | 0 | 0 | 0 | 0 |

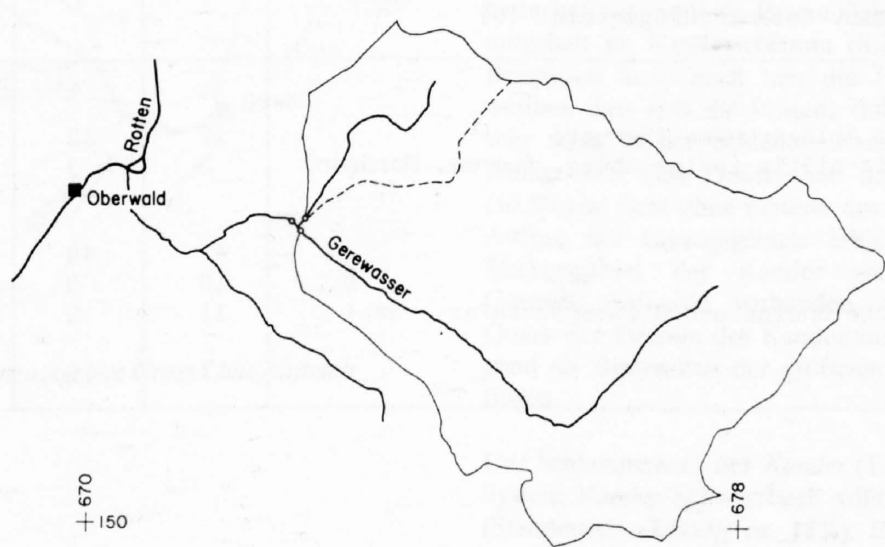


Fig. 45: Übersicht Einzugsgebiet Gerewasser/Nebenbach

Tab. 26: Komponenten des Schlammes von Gerewasser/Nebenbach und Anteilbestimmung

| | GEREWASSER | Nebenbach | vereinigt | s | ANTEIL GEREWASSER | | | |
|-----------------------|--|-----------|-----------|-----|-------------------|------|------|-----------|
| | in Massen%, Relativwert für Untergrund | | | | | | | |
| CALCIT | 1.6 | 1.5 | 1.3 | 0.2 | -2.00 | | | |
| DOLOMIT | 2.6 | 3.3 | 2.3 | 0.2 | 1.43 | 1.43 | | |
| QUARZ | 22.7 | 9.9 | 22.6 | 0.8 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 |
| MUSCOVIT | 4.6 | 35.5 | 5.5 | 2.6 | 0.97 | 0.97 | 0.97 | 0.97 |
| MIKROKLIN | 37.4 | 12.6 | 33.3 | 1.9 | 0.83 | 0.83 | 0.83 | 0.83 |
| UNTERGRUND | 36.1 | 78.4 | 38.3 | 1.1 | 0.95 | 0.95 | 0.95 | |
| ORGAN. MAT. | 1.6 | 9.0 | 1.1 | 0.2 | 1.07 | 1.07 | 1.07 | |
| D50 = 23.0 Mikrometer | | | | | gemittelt | 0.61 | 1.04 | 0.96 0.93 |

Tab. 27: Charakterisierung der Einzugsgebiete von Gerewasser und Nebenbach

| CHARAKTERISIERUNG DER EINZUGSGEBIETE | GEREWASSER | | Nebenbach | |
|---|----------------------|----|---------------------|----|
| MITTLERE HANGNEIGUNG | 32 ° | | 28 ° | |
| FLAECHE | 23.0 km ² | | 3.6 km ² | |
| Anteil an Gesamtfläche | 86 % | | 14 % | |
| SCHLAMMANTEIL | 95 % | | 5 % | |
| Schlammanteil / Flächenanteil (SF-Wert) | 1.1 | | 0.4 | |
| Schlammanteil / √Fläche -Anteil (SWF-Wert) | 1.3 | | 0.2 | |
| FLAECHENMAESSIGER AUFBAU, Anteile an Teileinzugsgebiet (T), resp. Gesamteinzugsgebiet (G) | T | G | T | G |
| LOCKERGESTEINE | % | % | % | % |
| - grobkörnige Ablagerungen (Schutt) | 12 | 10 | 0 | 0 |
| - vorw. sandig-siltig-tonige Ablag. (Lehme, Moränen) | 3 | 3 | 0 | 0 |
| FESTGESTEINE | | | | |
| - Granite | 47 | 40 | 0 | 0 |
| - Gneise | 10 | 9 | 0 | 0 |
| - Glimmerreiche Gneise und Glimmerschiefer | 11 | 9 | 99.5 | 14 |
| EIS UND FIRN | 17 | 15 | 0.5 | >0 |

4.5 Gross Laui OW

Die Gross Laui und der Altibach entwässern Gebiete im Kanton Obwalden in der Zentralschweiz. Helvetikum (Wildhorndecke), penninische Klippen (Giswiler Stöcke) und Flyschablagerungen bilden den tektonisch-geologischen Aufbau. Fig. 46 gibt eine geografische Skizze, Tab. 28 fasst die Untersuchungen des Schlammes zusammen, und Tab. 29 charakterisiert die Gebiete (vgl. QUERVAIN DE et al. 1964).

Der Schlamm aus beiden betrachteten Einzugsgebieten unterscheidet sich im Dolomit- und besonders im Calcitgehalt. Der bedeutend höhere Calcitgehalt des Altibachschlammes könnte sich aus den kalkigen und mergeligen Gesteinen des Helvetikums ableiten. Der Schlammaufbau der beiden Bäche ist vermutlich deshalb sehr ähnlich, weil beide Einzugsgebiete Flyschanteile haben (im Gross-Lau-Gebiet vor allem als Sandsteine und davon ableitbare Lockergesteine, im Altibach-Gebiet als Mergelschiefer und daraus entstandenen Lockergesteinen).

Die Gross Laui beherrscht die Schlammförderung. Der entsprechende SF-Wert beträgt 1.2 gegenüber 0.3 des Altibachs. Verantwortlich hierfür sind die Flyschanteile im Gross-Lau-Gebiet, die fast zur Hälfte in desintegrierter Form als sandig-siltig-tonige Lockergesteine vorliegen.

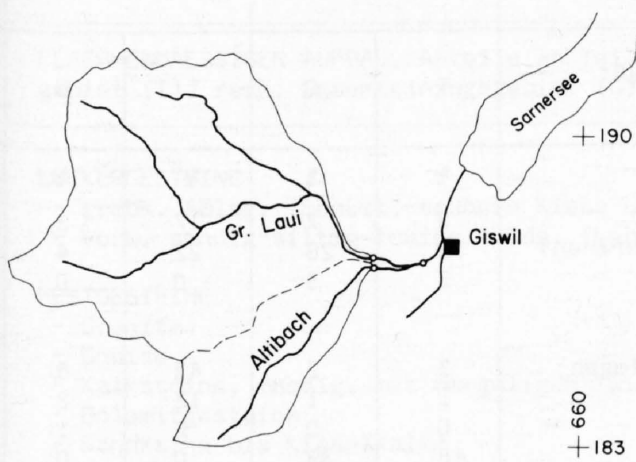


Fig. 46: Übersicht Einzugsgebiet Gross Laui/Altibach

4.6 Kander BE

Das Einzugsgebiet der Kander liegt im Berner Oberland, es besteht zu einem grossen Teil aus kristallinen Gesteinen. Südlich von Kandersteg nimmt die Kander den Schwarzbach auf (Fig. 47), der in seinem Einzugs-

gebiet ausschliesslich Sedimentgesteine aufweist. Tektonisch gesehen umfassen die beiden Bäche Teile des Aar-Massivs und dessen autochthone-parautochthone mesozoische Bedeckung. Tab. 30 und Tab. 31 (vgl. QUERVAIN DE et al. 1965) stellen das Gebiet vor und fassen die Resultate zusammen.

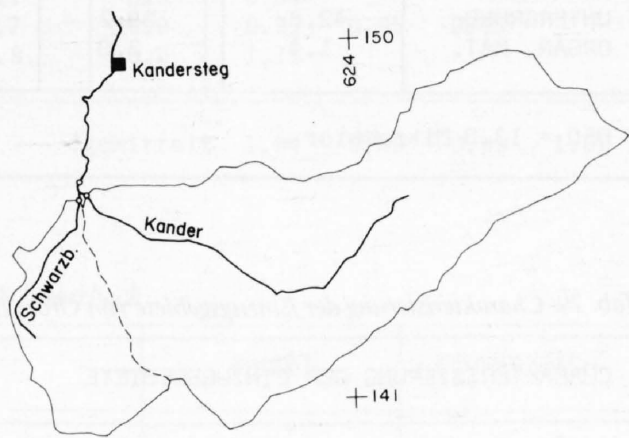


Fig. 47: Übersicht Einzugsgebiet Kander/Schwarzbach

Bei der Komponentendarstellung (Tab. 30) zeigen sich vor allem Unterschiede im Calcit-, Dolomit- und Quarzgehalt. Die Calcitgehalte sind für beide Gebiete hoch und vom geotechnischen Aufbau der Einzugsgebiete her verständlich. Erstaunlich ist der hohe Dolomitgehalt im Kanderschlamm (8.2%). Wie in andern Beispielen kann auch hier die Feststellung gemacht werden, dass sich die Präsenz dolomitischer Gesteine sehr stark in der Schlammzusammensetzung niederschlägt. Der tiefe Quarzgehalt des Kanderschlammes (15.3%) ist nicht ohne weiteres aus dem geotechnischen Aufbau der Einzugsgebiete erklärbar, sind doch im Einzugsgebiet der Kander recht viel kristalline Gesteine (Granite) vorhanden. Offenbar wird der Quarz der Granite des Kandereinzugsgebietes vorwiegend als Bestandteil der gröberen Sandfraktion abgetragen.

Der Schlammanteil der Kander (Tab. 31) dominiert im System Kander/Schwarzbach völlig. Er beträgt 100% (Standardabweichung ca. 15%). Der SF-Wert beträgt 1.2 für die Kander und 0 für den Schwarzbach. Diese Kanderdominanz hängt sicher mit der grossflächigen Eis/Firm-Bedeckung im Kandertal zusammen (29% der Gesamtfläche des Gesamtsystems). Unter der Gletscherdecke befinden sich vor allem kristalline Gesteine, aber auch Sedimentgesteine.

Tab. 28: Komponenten des Schlammes von Gross Laui/Altibach und Anteilbestimmung

| | GROSS LAUI | ALTIBACH | vereinigt | s | ANTEIL GROSS LAUI | | | |
|-----------------------|--|----------|-----------|-----------|-------------------|------|------|------|
| | in Massen%, Relativwert für Untergrund | | | | | | | |
| CALCIT | 20.9 | 30.8 | 20.1 | 0.3 | 1.08 | 1.08 | 1.08 | 1.08 |
| DOLOMIT | 6.9 | 4.6 | 6.4 | 0.1 | 0.78 | 0.78 | 0.78 | 0.78 |
| QUARZ | 19.3 | 19.1 | 17.7 | 0.6 | -7.00 | | | |
| MUSCOVIT | 6.1 | 4.2 | 9.4 | 1.4 | 2.74 | | | |
| MIKROKLIN | 6.8 | 4.4 | 6.0 | 0.8 | 0.67 | | | |
| UNTERGRUND | 42.8 | 39.2 | 47.1 | 1.1 | 2.19 | 2.19 | | |
| ORGAN. MAT. | 1.4 | 2.0 | 1.5 | 0.2 | 0.83 | | | |
| D50 = 13.0 Mikrometer | | | | gemittelt | 0.18 | 1.35 | 0.93 | 0.93 |

Tab. 29: Charakterisierung der Einzugsgebiete von Gross Laui und Altibach

| CHARAKTERISIERUNG DER EINZUGSGEBIETE | GROSS LAUI | | ALTIBACH | |
|--|------------------------------|----|-----------------------------|---|
| MITTLERE HANGNEIGUNG | 13 ° | | 14 ° | |
| FLAECHEN Anteil an Gesamtfläche | 34.5 km ² 81 % | | 8.0 km ² 19 % | |
| SCHLAMMANTEIL | 95 % | | 5 % | |
| Schlammanteil / Flächenanteil (SF-Wert) | 1.2 | | 0.3 | |
| Schlammanteil / $\sqrt{\text{Fläche}}$ -Anteil (SWF-Wert) | 1.4 | | 0.2 | |
| FLAECHEENMAESSIGER AUFBAU, Anteile an Teileinzugsgebiet (T), resp. Gesamteinzugsgebiet (G) | T | G | T | G |
| LOCKERGESTEINE | % | % | % | % |
| - grobkörnige Ablagerungen (Schutt) | 8 | 7 | 17 | 3 |
| - vorw. sandig-siltig-tonige Ablag. (Lehme, Moränen) | 32 | 26 | 22 | 4 |
| - dito, verrutscht | 3 | 3 | 0 | 0 |
| FESTGESTEINE | | | | |
| - Kalksteine, massig, mit mergeligen Zwischenlagen | 3 | 2 | 43 | 8 |
| - Dolomitgesteine | 1 | 1 | 12 | 2 |
| - Mergel und Mergelschiefer | 0 | 0 | 6 | 1 |
| - Sandsteine | 48 | 39 | 0 | 0 |
| - Gips, Rauhwacken | 5 | 4 | 0 | 0 |
| EIS UND FIRN | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tab. 30: Komponenten des Schlammes von Kander/Schwarzbach und Anteilbestimmung

| | KANDER | SCHWARZBACH | vereinigt | s | ANTEIL KANDER | | | |
|---------------------------------|--|-------------|-----------|-----|---------------|------|------|-----------|
| | in Massen%, Relativwert für Untergrund | | | | | | | |
| CALCIT | 48.0 | 58.2 | 46.1 | 0.7 | 1.19 | 1.19 | 1.19 | 1.19 |
| DOLOMIT | 8.2 | 1.6 | 6.8 | 0.2 | 0.79 | 0.79 | 0.79 | 0.79 |
| QUARZ | 15.3 | 24.8 | 15.1 | 0.5 | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 1.02 |
| MUSCOVIT | 2.7 | -0.8 | 2.6 | 1.2 | 0.97 | | | |
| MIKROKLIN | 1.6 | 0.2 | 1.1 | 0.5 | 0.64 | | | |
| UNTERGRUND | 32.0 | 25.5 | 31.7 | 0.8 | 0.95 | 0.95 | 0.95 | |
| ORGAN. MAT. | 0.6 | 0.2 | 0.9 | 0.2 | 1.75 | | | |
| D50 = 16.5/16.0/18.0 Mikrometer | | | | | gemittelt | 1.04 | 0.99 | 0.99 1.00 |

Tab. 31: Charakterisierung der Einzugsgebiete von Kander und Schwarzbach

| CHARAKTERISIERUNG DER EINZUGSGEBIETE | KANDER | | SCHWARZBACH | |
|---|----------------------|-----|----------------------|---|
| MITTLERE HANGNEIGUNG | 21 ° | | 19 ° | |
| FLAECHE | 58.5 km ² | | 12.1 km ² | |
| Anteil an Gesamtfläche | 83 % | | 17 % | |
| SCHLAMMANTEIL | 100 % | | 0 % | |
| Schlammanteil / Flächenanteil (SF-Wert) | 1.2 | | 0 | |
| Schlammanteil / √Fläche -Anteil (SWF-Wert) | 1.4 | | 0 | |
| FLAECHENMAESSIGER AUFBAU, Anteile an Teileinzugsgebiet (T), resp. Gesamteinzugsgebiet (G) | T | G | T | G |
| LOCKERGESTEINE | % | % | % | % |
| - grobk. Ablag. (Schutt, saubere Kiese und Sande) | 8 | 7 | 5 | 1 |
| - vorw. sandig-siltig-tonige Ablag. (Lehme, Moränen) | 2 | 2 | 12 | 2 |
| FESTGESTEINE | | | | |
| - Granite | 21 | 17 | 0 | 0 |
| - Gneise | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 |
| - Kalksteine, massig, mit mergeligen Zwischenlagen | 16 | 13 | 47 | 8 |
| - Dolomitgesteine | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 |
| - Sandkalke bis Kieselkalke | 16 | 13 | 13 | 2 |
| - Mergelschiefer | 1 | 1 | 3 | 1 |
| EIS UND FIRN | 35 | 29 | 20 | 3 |

4.7 Landquart GR

4.7.1 Übersicht

Die Landquart mündet beim gleichnamigen Ort unterhalb von Chur in den Rhein. Sie entwässert das *Prättigau*, ein bedeutendes Seitental des Rheins.

Der *geologisch-geotechnische Aufbau* des Tales gestaltet sich wie folgt (siehe Fig. 49):

Im obersten Teil des Tales stehen kristalline Gesteine (Gneise, Glimmerschiefer und Amphibolite) der

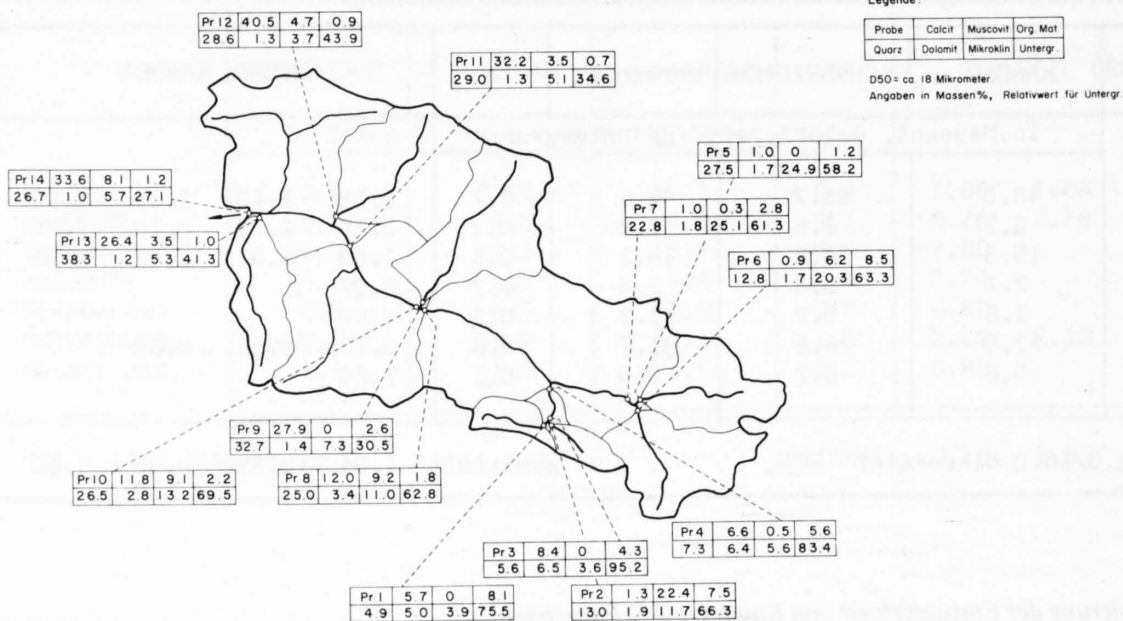


Fig. 48: Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet der Landquart

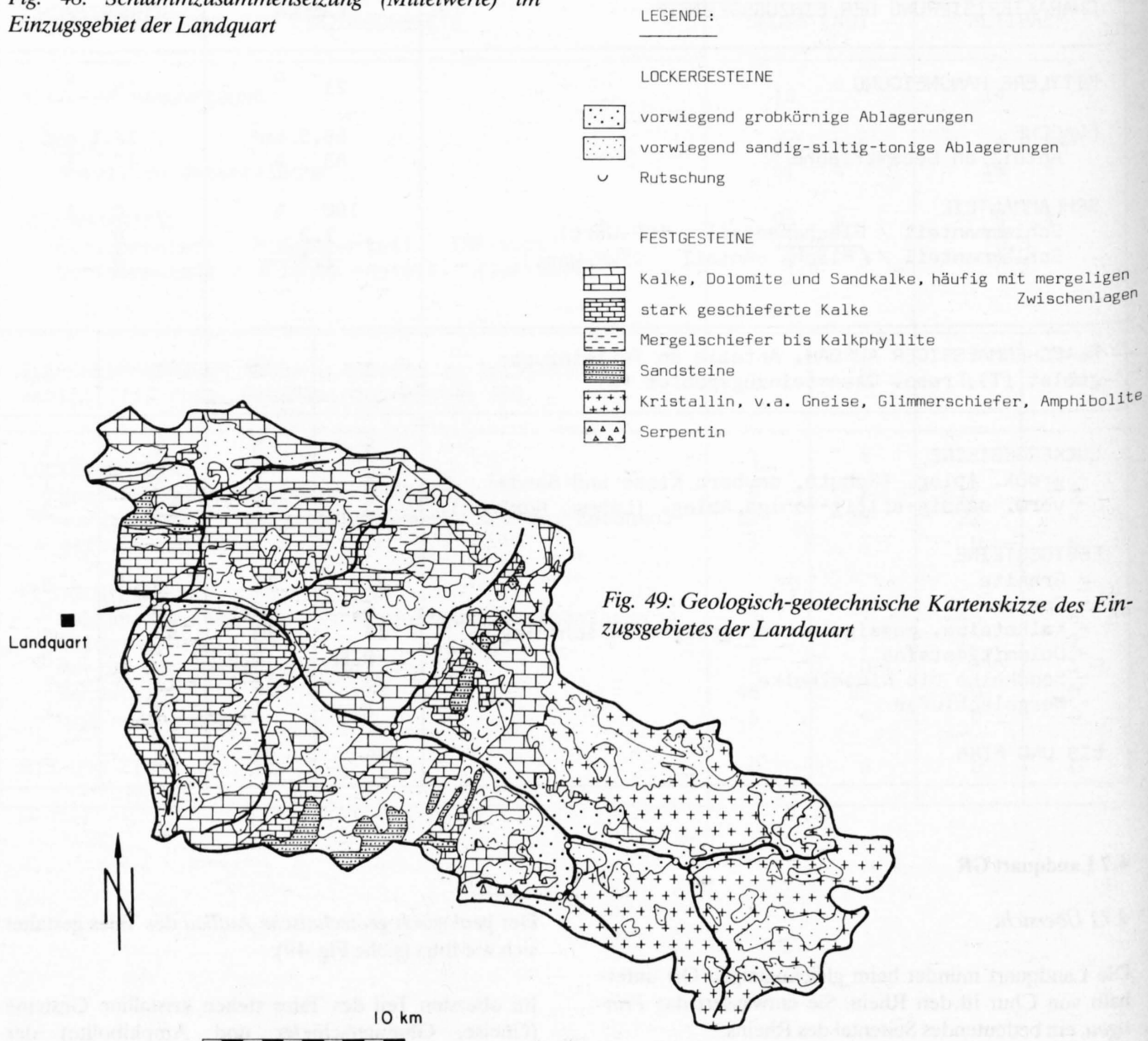


Fig. 49: Geologisch-geotechnische Kartenskizze des Einzugsgebietes der Landquart

Silvretta-Decke an (Ostalpin). Flussabwärts im Bereich von Pr1, Pr3 und Pr4 wird das Tal durch einen schmalen Gürtel penninischer Gesteine der Falknis-Sulzfluh-Decke und der Aroser Schuppenzone gequert (Karbonatgesteine, Kristallin und ultrabasische Gesteine). Dieser schmale Gürtel folgt als Saum der nördlichen Wasserscheide des Prättigaus bis zum Rheintal. Der gegen NW anschliessende flächenmässig grösste Teil des Prättigaus wird aus Prättigau-Flysch und Bündnerschiefer gebildet. Mergelschiefer und Sandsteine, stark geschieferte Kalke und Sandkalke und daraus entstandene feinkörnige Lockergesteine sind hier die wichtigsten Gesteinstypen.

Der geschilderte geologisch-geotechnische Aufbau widerspiegelt sich auch in der Schlammszusammensetzung (Fig. 48). Eine Sonderstellung nimmt die Probe Pr1 ein, in deren Einzugsgebiet ultrabasische Gesteine und Karbonatgesteine anstehen. Bemerkenswert ist vor allem der Gehalt an Quarz, Calcit und Dolomit dieser Probe (alle je ca. 5%). Die Proben aus dem Kristallin-gebiet (Pr2, Pr5, Pr6) haben durchwegs tiefe Werte für Calcit und Dolomit. Der Gehalt an Quarz und Muscovit schwankt stark. Sehr hohe Werte erreicht Mikroklin (bis 24.9%). Talabwärts gleicht sich die vom Kristallin geprägte Schlammszusammensetzung dem durchquerten Gebiet an. Insbesondere der ansteigende Calcitgehalt

Tab. 32: Komponenten des Schlammes von Vereinabach/Verstanclabach und Anteilbestimmung

| | VEREINABACH | VERSTANCLABACH | vereinigt | s | ANTEIL VEREINABACH | | | |
|-----------------------|--|----------------|-----------|-----|--------------------|-------|------|-----------|
| | in Massen%, Relativwert für Untergrund | | | | | | | |
| CALCIT | 0.9 | 1.1 | 1.1 | 0.2 | 0.00 | | | |
| DOLOMIT | 1.7 | 1.8 | 1.7 | 0.2 | 1.00 | | | |
| QUARZ | 12.0 | 26.0 | 20.4 | 0.6 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.40 |
| MUSCOVIT | 5.7 | -1.1 | 0.3 | 2.2 | -0.21 | 0.21 | | |
| MIKROKLIN | 21.6 | 26.3 | 26.7 | 0.8 | -0.09 | -0.09 | | |
| UNTERGRUND | 59.1 | 55.1 | 56.3 | 7.9 | 0.30 | | | |
| ORGAN. MAT. | 8.8 | 1.1 | 3.0 | 0.2 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | |
| D50 = 16.0 Mikrometer | | | | | gemittelt | 0.30 | 0.19 | 0.32 0.40 |

Tab. 33: Charakterisierung der Einzugsgebiete von Vereinabach und Verstanclabach

| CHARAKTERISIERUNG DER TEILEINZUGSGEBIETE | VEREINABACH | | VERSTANCLABACH | |
|--|-------------|-----------------|----------------|-----------------|
| MITTLERE HANGNEIGUNG | 16 | ° | 19 | ° |
| FLAECHE | 42.5 | km ² | 27.7 | km ² |
| Anteil an Gesamteinzugsgebiet | 61 | % | 39 | % |
| SCHLAMMANTEIL | 30 | % | 70 | % |
| Schlammanteil / Flächenanteil (SF-Wert) | 0.5 | | 1.8 | |
| Schlammanteil / √Fläche'-Anteil (SWF-Wert) | 0.5 | | 1.6 | |
| FLAECHEENMAESSIGER AUFBAU, Anteile an Teileinzugsgebiet (T), resp. Gesamteinzugsgebiet (G) | T | G | T | G |
| LOCKERGESTEINE | % | % | % | % |
| - grobkörnige Ablagerungen (Schutt) | 8 | 5 | 14 | 5 |
| - vorw. sandig-siltig-tonige Ablag. (Lehme, Moränen) | 21 | 13 | 22 | 8 |
| FESTGESTEINE | | | | |
| - Gneis | 21 | 13 | 43 | 17 |
| - Biotitreiche Gneise und Glimmerschiefer | 15 | 9 | 1.5 | 1 |
| - Amphibolite, häufig Wechsellag. mit Glimmersch. | 33 | 20 | 12 | 5 |
| EIS UND FIRN | 2 | 1 | 7.5 | 3 |

Tab. 34: Komponenten des Schlammes von Landquart/Schanielabach und Anteilbestimmung

| | LANDQUART | SCHANIELA-BACH | vereinigt | s | ANTEIL LANDQUART | | | |
|-----------------------|--|----------------|-----------|-----|------------------|------|------|-----------|
| | in Massen%, Relativwert für Untergrund | | | | | | | |
| CALCIT | 12.0 | 27.9 | 11.8 | 0.7 | 1.01 | 1.01 | 1.01 | 1.01 |
| DOLOMIT | 3.4 | 1.4 | 2.8 | 0.2 | 0.70 | 0.70 | 0.70 | 0.70 |
| QUARZ | 25.0 | 32.7 | 26.5 | 0.5 | 0.81 | 0.81 | 0.81 | 0.81 |
| MUSCOVIT | 9.2 | 0.0 | 9.1 | 1.8 | 0.99 | 0.99 | | |
| MIKROKLIN | 11.0 | 7.3 | 13.2 | 0.8 | 1.59 | 1.59 | | |
| UNTERGRUND | 62.8 | 30.5 | 69.5 | 5.0 | 1.21 | 1.21 | 1.21 | |
| ORGAN. MAT. | 1.8 | 2.6 | 2.2 | 0.2 | 0.50 | 0.50 | | |
| D50 = 18.0 Mikrometer | | | | | gemittelt | 0.97 | 0.97 | 0.93 0.84 |

und die Abnahme von Mikroklin sind sehr deutlich. Eine wesentliche Veränderung ergibt sich zwischen Pr10 und Pr11, die vor allem durch den hochschnellen- den Calcitgehalt, den absackenden Mikroklingehalt und durch den starken Rückgang des Untergrundwer- tes gekennzeichnet ist.

4.7.2 Relativ-quantitative Abschätzungen

Verzweigungsstelle Pr1, Pr2, Pr3:

Hier ist keine Aussage möglich. Das Probengut hat eine schlechte Qualität. Der nur in geringem Masse vorhandene Schlammanteil musste an mehreren Stellen pro Probenpunkt zusammengekratzt werden.

Verzweigungsstelle Pr5, Pr6, Pr7:

Das Einzugsgebiet des Vereinabaches (Pr6) als auch des Verstanclabaches (Pr5) liegt im Kristallin. Der Schlamm unterscheidet sich nur im Quarzgehalt wesentlich (Fig. 48, Tab. 32 und 33), der Schlamm des Vereinabachs enthält mit 12.8% nur etwa die Hälfte des Gehaltes des Verstanclabaches. Offenbar liefern die biotitreichen Gneise, die Glimmerschiefer und die Amphibolite (Wechselagerung mit Glimmerschiefern) wenig Quarz. Vom geotechnischen Aufbau her gesehen würde man erwarten, dass der Vereinabach Haupt- schlammproduzent wäre. Dem ist aber nicht so, ledig- lich ca. 30% stammen aus diesem Einzugsgebiet. Der höhere Gletscheranteil im *Verstanclabach-Einzugsgebiet* scheint den Ausschlag zu geben. Der negative Wert für Muscovit (-1.1%) zeigt, dass Schwierigkeiten bei der Bestimmung dieser Komponente bestehen (vgl. Diskus- sion unter 2.5.5).

Verzweigungsstelle Pr8, Pr9, Pr10:

Die beiden durch die Proben Pr8 (Landquart) und Pr9 (Schanielabach) repräsentierten Einzugsgebiete zeigen einen gut unterscheidbaren Schlammaufbau. Das Spek- trum des Schanielabachs ist geprägt durch die Sedi- mentgesteine in seinem Einzugsgebiet. Der Anteil *Landquartschlamm* in Pr10 nach dem Zusammenfluss ist sehr hoch (ca. 95%). Dieses Resultat ist einerseits plausibel, wenn man den Grössenunterschied der bei- den Gebiete und den Umstand betrachtet, dass die Sedimentgesteine im Einzugsgebiet des Schanielabachs relativ kompetent sind und damit eine gewisse Ero- sionsresistenz aufweisen. Die Bestimmung ist anderer- seits aber fraglich, da der Einfluss der vorhandenen Wasserfassungen auf die natürliche Schlammabführung unklar ist.

4.7.3 Schwebstoffmessungen der Landeshydrologie

Bei Felsenbach östlich Landquart befindet sich eine Schwebstoffmessstelle der Landeshydrologie. Für die Jahre 1979 bis 1982 wurde hier für die Landquart eine mittlere jährliche Schwebstofffracht von 942 500 t ermittelt. Dies entspricht einer Schwebstoffabtragsrate von 567 m³/km²×a (Tab. 49).

4.8 Plessur GR

Die Plessur entwässert das Schanfigg und mündet bei Chur in den Rhein. Im Einzugsgebiet der Plessur konn- ten zwei Bachverzweigungen beprobt werden (Fig. 50).

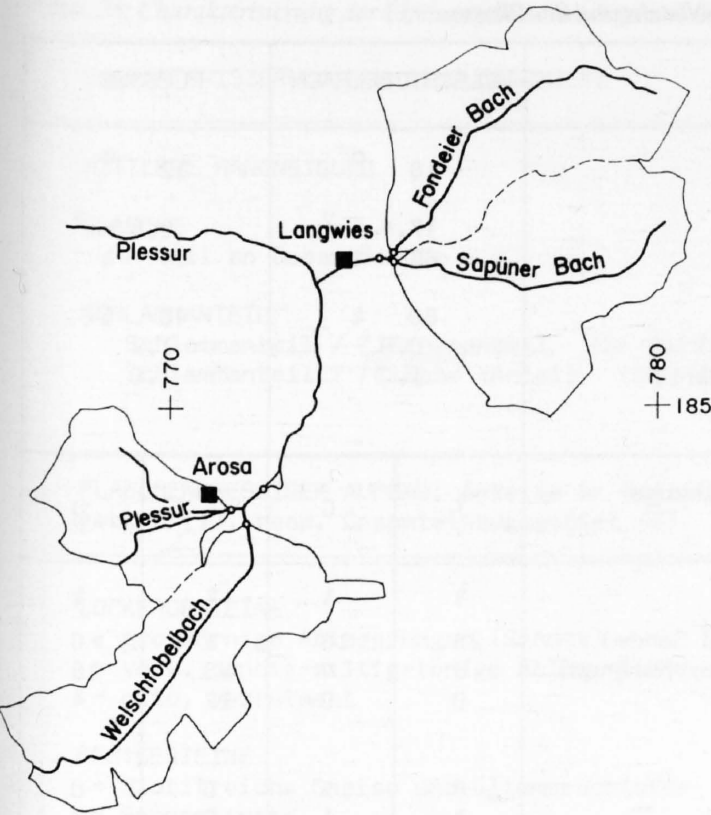


Fig. 50: Übersicht Einzugsgebiete Welschtobelbach/Plessur und Fondeier Bach/Sapüner Bach

4.8.1 Welschtobelbach/Plessur

Der tektonische Aufbau der beiden Gebiete ist sehr verschieden. Das Gebiet des Welschtobelbachs liegt zur Hauptsache im Bereich der Ostalpinen Decken, jenes der Plessur im Gebiet der Aroser Schuppenzone (Penninikum). Dieser Unterschied drückt sich auch in der Gesteinszusammensetzung (Tab. 36, vgl. QUERVAIN DE et al. 1963, 1967) aus: Im Einzugsgebiet des Welschtobelbachs dominieren die Festgesteine (Dolomitgesteine), auch grobkörnige Lockergesteine sind hier häufig.

Im Einzugsgebiet der Plessur dominieren die Lockergesteine (vorwiegend sandig-siltig-tonige Ablagerungen, die teilweise verrutscht sind).

Die Schlammmzusammensetzung unterscheidet sich vor allem (Tab. 35) in den Komponenten Dolomit (Welschtobelbach 72.1%), Quarz (Welschtobelbach 0.6%, Plessur 9.5%) und Mikroklin (Welschtobelbach 0%, Plessur 6.5%). Die Dominanz des Plessurgebietes in den Komponenten Quarz und Mikroklin leitet sich aus den Lockergesteinen ab. Diese sind zu einem bedeutenden Anteil aufgearbeitete kristalline Gesteine.

In der Schlammmzusammensetzung nach dem Zusammenfluss dominiert der Welschtobelbach leicht. Wenn man aber die Fläche der Einzugsgebiete mit in die Betrachtung einbezieht, gelangt man zum Resultat, dass der Schlammabtrag aus dem Gebiet der Plessur grösser ist (SF-Wert der Plessur 1.2). Beachtlich ist die Tatsache, dass das Gebiet der Plessur eine bedeutend geringere mittlere Hangneigung (12 Grad) hat als das Einzugsgebiet des Welschtobelbachs (18 Grad).

4.8.2 Fondeier Bach/Sapüner Bach

Während das Einzugsgebiet des Sapüner Bachs vorwiegend zum Penninikum (Aroser Schuppenzone, Falknis-Sulzfluh-Decke) und zum Ostalpin gehört, umfasst das Einzugsgebiet des Fondeier Bachs vorwiegend penninische Flyschserien (Prättigau-Flysch). In der Gesteinsbeschreibung äussert sich dieser Unterschied nicht so krass wie erwartet (Tab. 38, vgl. QUERVAIN DE et al. 1963). Dies hängt zum Teil mit dem sehr grossen Anteil an Lockergesteinen in beiden Einzugsgebieten zusammen, die nicht petrographisch, sondern granulometrisch erfasst sind.

Deutlich ist der Unterschied der beiden Gebiete aber im Aufbau des Schlammes zu sehen (Tab. 37). Die Flyschgesteine manifestieren sich deutlich im hohen Calcit- und Quarzgehalt und auch im tiefen Dolomitgehalt. Das Hauptcharakteristikum des Schlammes aus

Tab. 35: Komponenten des Schlammes von Welschtobelbach, Plessur und Anteilbestimmung

| | WELSCHTOBELBACH | PLESSUR | vereinigt | s | ANTEIL WELSCHTOBELBACH | | | |
|-----------------------|--|---------|-----------|-----------|------------------------|------|------|------|
| | in Massen%, Relativwert für Untergrund | | | | | | | |
| CALCIT | 3.7 | 3.3 | 3.9 | 0.2 | 1.50 | | | |
| DOLOMIT | 72.1 | 5.9 | 46.1 | 1.5 | 0.61 | 0.61 | 0.61 | 0.61 |
| QUARZ | 0.6 | 9.5 | 5.8 | 0.4 | 0.42 | 0.42 | 0.42 | 0.42 |
| MUSCOVIT | -1.3 | 4.0 | 0.9 | 2.1 | 0.58 | | | |
| MIKROKLIN | 0.0 | 6.5 | 2.1 | 0.6 | 0.68 | 0.68 | 0.68 | 0.68 |
| UNTERGRUND | 26.3 | 61.5 | 37.8 | 1.3 | 0.67 | 0.67 | 0.67 | |
| ORGAN. MAT. | 1.3 | 5.4 | 2.4 | 0.2 | 0.73 | 0.73 | 0.73 | |
| D50 = 14.5 Mikrometer | | | | gemittelt | 0.74 | 0.62 | 0.62 | 0.57 |

Tab. 36: Charakterisierung der Einzugsgebiete des Welschtobelbachs und der Plessur

| CHARAKTERISIERUNG DER EINZUGSGEBIETE | WELSCHTOBELBACH | | PLESSUR | |
|---|-----------------|-----------------|---------|-----------------|
| MITTLERE HANGNEIGUNG | 18 | ° | 12 | ° |
| FLAECHE | 17.4 | km ² | 8.8 | km ² |
| Anteil an Gesamtfläche | 66 | % | 34 | % |
| SCHLAMMANTEIL | 60 | % | 40 | % |
| Schlammanteil / Flächenanteil (SF-Wert) | 0.9 | | 1.2 | |
| Schlammanteil / $\sqrt{\text{Fläche}}$ -Anteil (SWF-Wert) | 1.0 | | 1.0 | |
| FLAECHENMAESSIGER AUFBAU, Anteile an Teileinzugsgebiet (T), resp. Gesamteinzugsgebiet (G) | T | G | T | G |
| LOCKERGESTEINE | % | % | % | % |
| - grobk. Ablag. (Schutt, saubere Kiese und Sande) | 28 | 18 | 1 | >0 |
| - vorw. sandig-siltig-tonige Ablag. (Lehme, Moränen) | 6 | 4 | 53 | 18 |
| - dito, verrutscht | 0 | 0 | 12 | 4 |
| FESTGESTEINE | | | | |
| - Quarzporphyre | 8 | 5 | 0 | 0 |
| - Gneise | 1 | 1 | 0 | 0 |
| - Serizit- bis Chlorit-Gneise bis -Schiefer | 0 | 0 | 7 | 2 |
| - Serpentine | 0 | 0 | 9 | 3 |
| - Konglomerate und Brekzien, geschiefert | 2 | 1 | 0 | 0 |
| - Kalksteine, massig, mit mergeligen Zwischenlagen | 12 | 8 | 5 | 2 |
| - Dolomitgesteine | 43 | 29 | 13 | 5 |
| EIS UND FIRN | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tab. 37: Komponenten des Schlammes von Sapüner Bach/Fondeier Bach und Anteilbestimmung

| | SAPUENER BACH | FONDEIER BACH | vereinigt | s | ANTEIL SAPUENER BACH | | | | |
|----------------------|--|------------------|-----------|-----|----------------------|------|------|------|------|
| | in Massen%, Relativwert für Untergrund | | | | | | | | |
| CALCIT | 7.6 | 32.4 | 22.7 | 0.5 | 0.39 | 0.39 | 0.39 | 0.39 | |
| DOLOMIT | 25.5 | 2.7 | 7.3 | 0.7 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | |
| QUARZ | 14.0 | 29.4 | 23.2 | 0.6 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | 0.40 | |
| MUSCOVIT | 9.2 | 2.4 | 2.7 | 1.7 | 0.04 | 0.04 | | | |
| MIKROKLIN | 5.9 | 4.6 | 5.7 | 0.5 | 0.85 | | | | |
| UNTERGRUND | 45.5 | 36.0 | 42.1 | 0.9 | 0.64 | 0.64 | 0.64 | | |
| ORGAN. MAT. | 2.6 | 1.0 | 1.6 | 0.2 | 0.38 | 0.38 | 0.38 | | |
| D50 =15.0 Mikrometer | | | | | gemittelt | 0.41 | 0.34 | 0.40 | 0.33 |

dem Sapüner Bach ist der relativ hohe Dolomitgehalt (25.5%).
Im Schlammanteil nach dem Bachzusammenfluss dominiert der *Fondeier Bach* (Tab. 37) mit ca. 65% Anteil. Nach der Flächenbetrachtung erhält man für den Fondeier Bach einen SF-Wert von 1.4 (Sapüner

Bach 0.7), d.h. dass der Fondeier Bach 1.4 mal soviel Schlammanteil liefert, als ihm gemäss dem Flächenanteil zustehen würde, wenn der Schlammabtrag homogen über die beiden Gebiete verteilt wäre. In der Dominanz des Fondeier Bachs äussern sich die Flysch-sedimente.

Tab. 38: Charakterisierung der Einzugsgebiete des Sapiüner Bachs und des Fondeier Bachs

| CHARAKTERISIERUNG DER EINZUGSGEBIETE | SAPUENER BACH | | FONDEIER BACH | |
|---|----------------------|----|----------------------|----|
| MITTLERE HANGNEIGUNG | 15 ° | | 14 ° | |
| FLAECHE | 18.4 km ² | | 16.7 km ² | |
| Anteil an Gesamtfläche | 52 % | | 48 % | |
| SCHLAMMANTEIL | 35 % | | 65 % | |
| Schlammanteil / Flächenanteil (SF-Wert) | 0.7 | | 1.4 | |
| Schlammanteil / $\sqrt{\text{Fläche}}$ -Anteil (SWF-Wert) | 0.7 | | 1.3 | |
| FLAECHENMAESSIGER AUFBAU, Anteile an Teileinzugsgebiet (T), resp. Gesamteinzugsgebiet (G) | T | G | T | G |
| LOCKERGESTEINE | % | % | % | % |
| - grobkörnige Ablagerungen (Schutt) | 11 | 6 | 10 | 5 |
| - vorw. sandig-siltig-tonige Ablag. (Lehme, Moränen) | 36 | 18 | 28 | 13 |
| - dito, verrutscht | 0 | 0 | 24 | 11 |
| FESTGESTEINE | | | | |
| - Biotitreiche Gneise und Glimmerschiefer | 13 | 7 | 0 | 0 |
| - Serpentine | 4 | 2 | 0 | 0 |
| - Kalke, stark geschiefert | 2 | 1 | 8 | 4 |
| - Kalke, massig, mit mergeligen Zwischenlagen | 15 | 8 | 10 | 5 |
| - Dolomitgesteine | 18 | 9 | 4 | 2 |
| - Sandkalke bis Kieselkalke, z.T. Flyschsandsteine | 1 | 1 | 16 | 8 |
| EIS UND FIRN | 0 | 0 | 0 | 0 |

4.9 Sitter/Urnäsch AI, AR, SG

Das Einzugsgebiet der Sitter und der Urnäsch liegt südöstlich von Herisau. Sitter als auch Urnäsch durchqueren ungefähr analoge Molasseeinheiten, bei der Sitter bilden aber die helvetischen Decken noch einen bedeutenden Anteil des Einzugsgebietes (Fig. 53).

Sowohl an der Sitter als auch an der Urnäsch bestehen Wasserfassungen, die das Wasser in den Gübsensee ableiten. Deshalb wird hier auch versucht, die Ablagerungen im Gübsensee mit dem Schlamm im indirekten Einzugsgebiet zu vergleichen.

Es wurden sandig-siltig-tonige Proben entnommen. Für die hier durchgeführten Vergleiche wurde der sandige Anteil der Proben abgeschieden und die Proben auf einen D50-Wert von 19.0 Mikrometer aufgearbeitet. Die Aussagekraft der Resultate leidet vermutlich darunter, dass nicht primär Schlammdepots aufgesammelt wurden.

Im Einzugsgebiet der Sitter und der Urnäsch lassen sich beim vorgegebenen Entnahmемuster keine quantitativen Abschätzungen vornehmen.

Die Molassegesteine und die helvetischen Gesteine verursachen folgenden Schlammaufbau in den Gewässern (Fig. 52): Das *Helvetikum* ist charakterisiert durch einen hohen Calcitgehalt (über 30%), der Dolomitgehalt hingegen ist sehr tief (um 1%). Die *Molassegebiete* weisen unterschiedliche Sedimentgesteinstypen auf und tragen meist eine Lockergesteinsdecke, die umgelagerte helvetische Gesteine enthält. Die Molassegebiete zeigen einen tieferen Calcitgehalt, der meist etwas über 20% liegt (Ausnahme 14.1% in Ur3). Der Dolomitgehalt zeigt höhere Werte als im helvetischen Einflussbereich, nämlich knapp 8% bis knapp 15%. Die restlichen Komponenten sind nicht wesentlich verschieden.

Die *Molassegebiete* spiegeln im Schlammaufbau der Urnäsch und auch der Sitter ihre ausschlaggebende Rolle wider. Ein möglicher Anteil aus dem Helvetikum

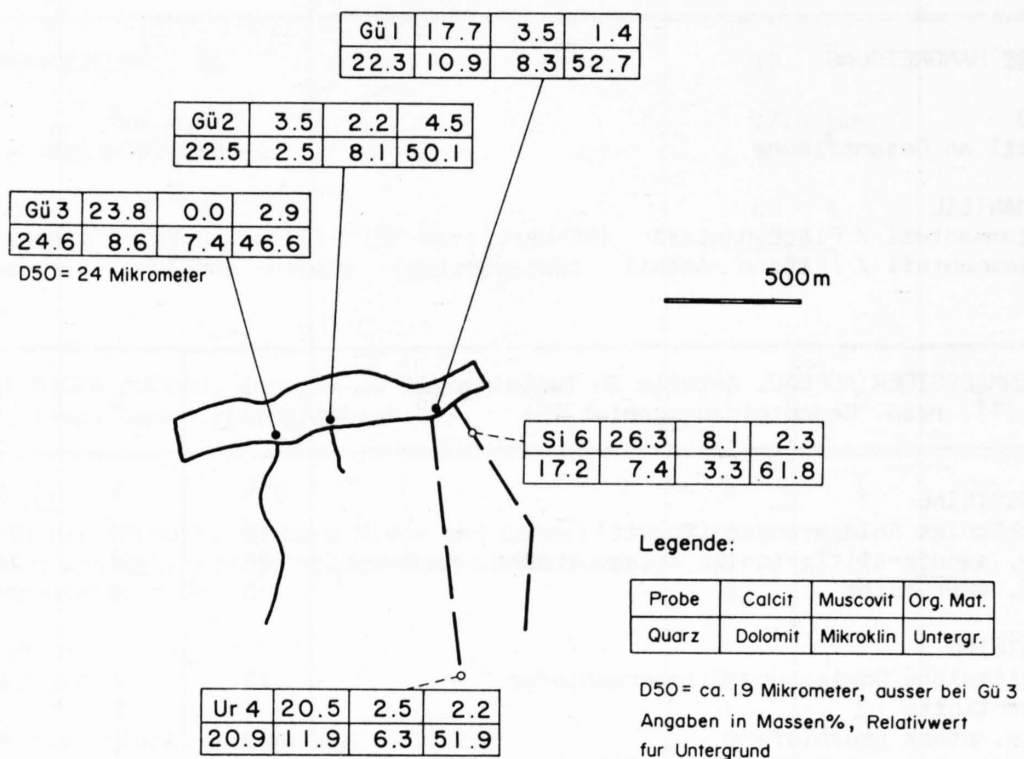


Fig. 51: Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Gübsensee

(Si1 und Si2) ist schon in Si4 kaum mehr erkennbar. Lediglich der tiefe Dolomitgehalt in Si4 könnte noch ein Hinweis auf eine teilweise Herkunft des Schlammes aus dem Helvetikum sein. Erschwerend für die Interpretation wirkt sich aber wie erwähnt aus, dass im Molassegebiet umfangreiche eiszeitliche Ablagerungen vorhanden sind.

Die Proben aus dem *Gübsensee* (von Hand bei Seetiefstand gestochene Kerne) sind unterschiedlich aufgebaut. Dies erklärt sich aus der Tatsache, dass die Proben aus dem Deltabereich zweier kleiner Lokalbäche einerseits (Gü2 und Gü3) und andererseits aus dem Deltabereich der Wasserstollen (Gü1) von der Sitter und Urnäsch her stammen (Fig. 51). Während Gü3 Ähnlichkeit mit Si3 und Ur2 zeigt, manifestiert Gü2 mit seinen sehr tiefen Werten für Dolomit und Calcit die Eigenständigkeit dieses sehr kleinen Einzugsgebietes. Gü1 (Probe mit viel Grob- und Feinsand) zeigt gewisse Ähnlichkeit mit den Werten der Urnäschprobe Ur4 und der Probe aus dem Sitterstollen Si6.

4.10 Steinibach NW

Der Steinibach entwässert ein steiles Gebiet nördlich des Pilatus Richtung Osten in den Vierwaldstättersee. Geologisch gesehen handelt es sich um ein Flyschgebiet (zentraler Teil), umrandet im Süden durch helvetische Kalkgesteine und im Norden durch Molassegesteine. Das ganze Gebiet ist aber stark überprägt durch Lockergesteine, die teilweise ausgeprägte Rutschmassen bilden (COLOMBI et al. 1985).

Der Steinibach wurde bekannt wegen seines *Hochwassers vom 1. Juni 1979* und der dabei aufgetretenen Schäden. Der Abtrag in Form von Geschiebe betrug ca. 30 000 m³ (Schätzung in ZELLER & RÖTHLISBERGER 1980). Rechnet man diesen Betrag um auf die Einzugsgebietsfläche (nur zu Vergleichszwecken, Fläche = 3.7 km², Annahme: Für das Geschiebe eine Trockendichte von 2.0 t/m³ und für die Gesteine im Einzugsgebiet von 2.7 t/m³), so erhält man einen flächenhaften Abtrag von 6 mm für dieses Hochwasserereignis. Die

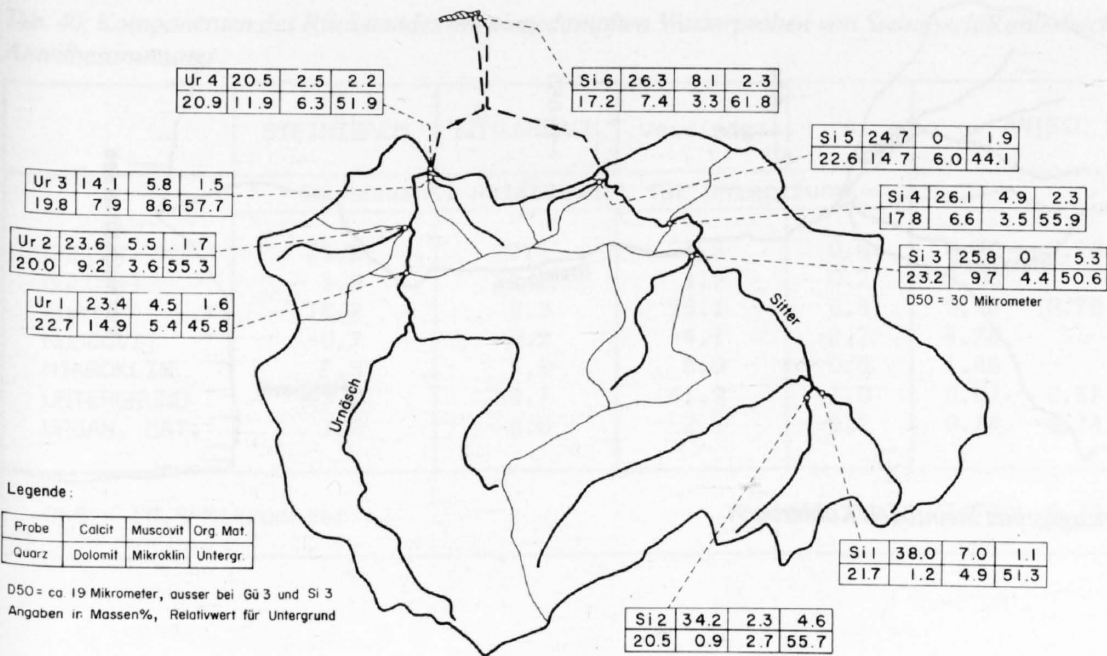


Fig. 52: Schlammzusammensetzung (Mittelwerte) im Einzugsgebiet von Sitter und Urnäsch

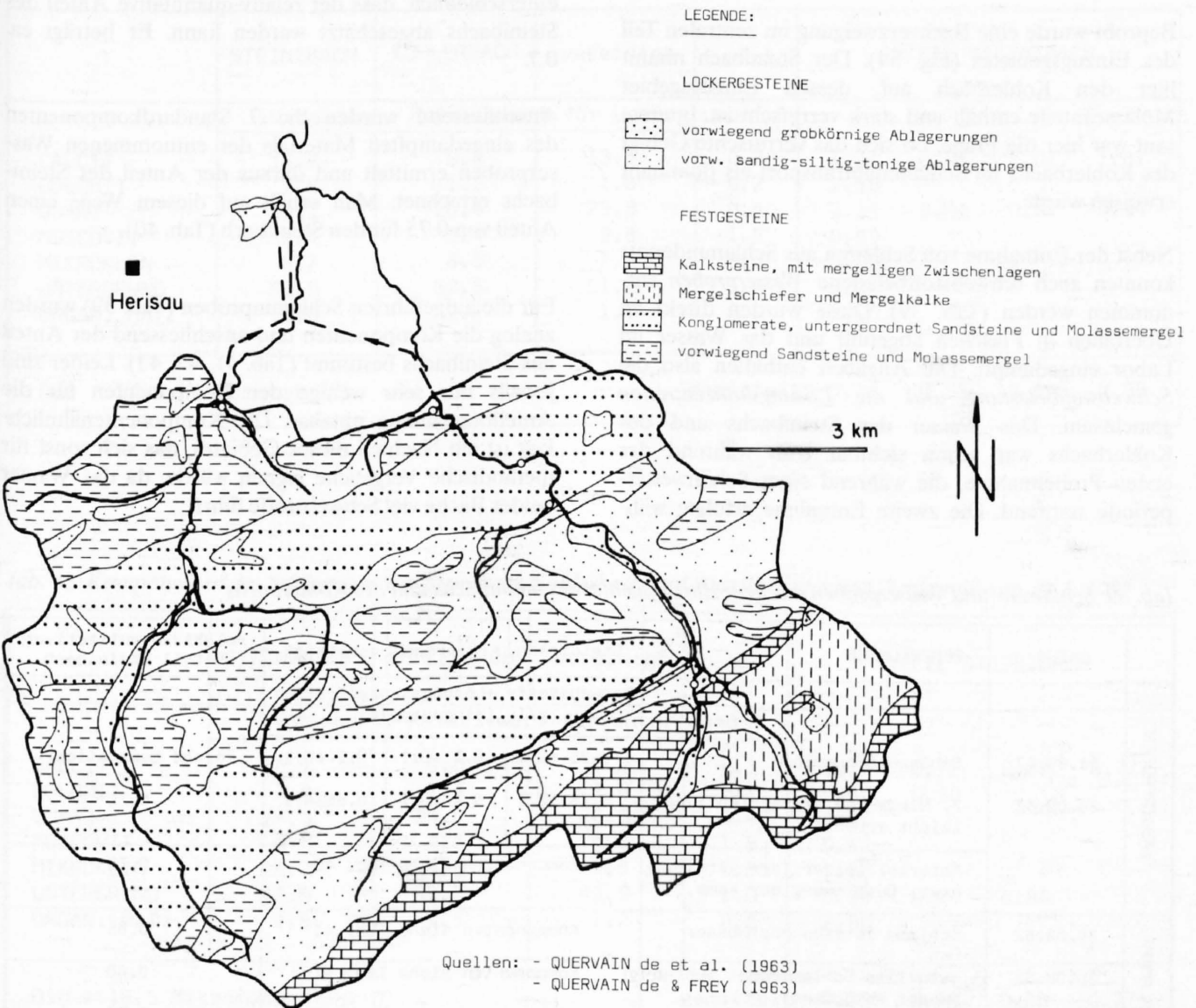


Fig. 53: Geologisch-geotechnische Kartenskizze des Einzugsgebietes von Sitter und Urnäsch

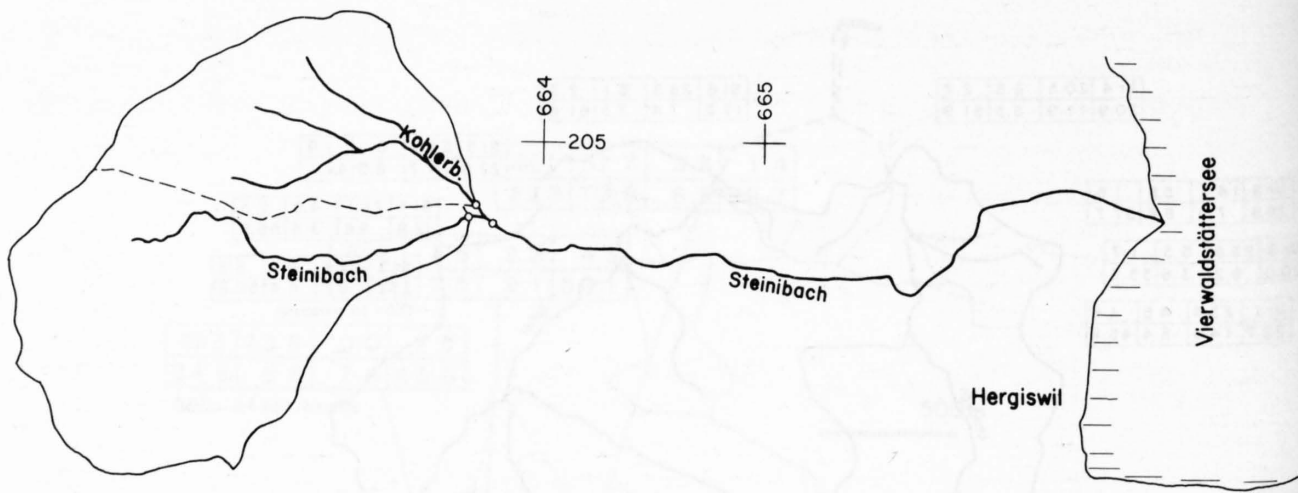


Fig. 54: Übersicht Einzugsgebiet Steinibach/Kohlerbach

eingetretenen Schäden werden von ZELLER & RÖTHLISBERGER (1980) beschrieben.

Beprobt wurde eine Bachverzweigung im zentralen Teil des Einzugsgebietes (Fig. 54). Der Steinibach nimmt hier den Kohlerbach auf, dessen Einzugsgebiet Molasseanteile enthält und stark verrutscht ist. Interessant war hier die Frage, ob sich das verrutschte Gebiet des Kohlerbachs im Schlammabtransport als dominant erweisen würde.

Nebst der Entnahme von Schlamm aus Schlammdepots konnten auch schwebstoffbeladene Wasserproben entnommen werden (Tab. 39). Diese wurden direkt an Überfällen in Flaschen abgefüllt und das Wasser im Labor eingedampft. Die Angaben enthalten also die Schwebstoffbelastung und die Lösungskonzentration gemeinsam. Das Wasser des Steinibachs und des Kohlerbachs war schon sichtbar trüb während der ersten Probennahme, die während einer Schönwetterperiode stattfand. Die zweite Entnahme erfolgte wäh-

rend einer Regenperiode. Bei dieser zweiten Entnahme sind die Konzentrationen der beiden Bäche derart unterschiedlich, dass der relativ-quantitative Anteil des Steinibachs abgeschätzt werden kann. Er beträgt ca. 0.7.

Anschliessend wurden die 7 Standardkomponenten des eingedampften Materials der entnommenen Wasserproben ermittelt und daraus der Anteil des Steinibachs errechnet. Man erhält auf diesem Wege einen Anteil von 0.75 für den Steinibach (Tab. 40).

Für die aufgeführten Schlammproben (Tab. 39) wurden analog die Komponenten und anschliessend der Anteil des Steinibachs bestimmt (Tab. 41, 42, 43). Leider sind jeweils nur sehr wenige der Komponenten für die Anteilberechnung nutzbar. Die Komponentenähnlichkeit ist ein Nachteil dieses Gebietes, das sich sonst für methodische Vergleiche eignen würde, da das Wasser beider Bäche viel Schwebstoffe führt.

Tab. 39: Schlamm- und Wasserproben aus dem Einzugsgebiet des Steinibachs und des Kohlerbachs

| | DATUM | BEMERKUNGEN | Steinibach | Kohlerbach | vereinigt | relativ-quantitativer Anteil Steinibach |
|--------------|----------|--|---------------------------|--|------------|---|
| | | | Schwebstoff- g/l | +Lösungskonzentration (eingedampft) | | |
| WASSERPROBEN | 14.09.82 | Schönwetterperiode | 0.25 ± 0.1 | 0.2 ± 0.1 | 0.2 ± 0.1 | nicht beurteilbar |
| | 23.09.82 | 2. Niederschlagstag (Abfluss leicht erhöht) | 0.75 ± 0.1 | 0.4 ± 0.1 | 0.65 ± 0.1 | 0.70 |
| | | Material beider Tage vereinigt, Bestimmung der Kömp. | Komponenten siehe Tab. 40 | | | 0.75 |
| SCHLAMMPR. | 30.08.82 | Schlamm letztes Hochwasser | Komponenten siehe Tab. 41 | | | 0.95 |
| | 30.08.82 | aktuelles Schlammdepot (unter Wasser entnommen) | Komponenten siehe Tab. 42 | | | 0.80 |
| | 05.11.82 | Schlamm letztes Hochwasser | Komponenten siehe Tab. 43 | | | 0.70 |

Tab. 40: Komponenten des Rückstandes der eingedampften Wasserproben von Steinibach/Kohlerbach und Anteilbestimmung

| | STEINIBACH | KOHLERBACH | vereinigt | s | ANTEIL STEINIBACH | | | |
|--|--|------------|-----------|-----------|-------------------|------|------|------|
| CALCIT DOLOMIT QUARZ MUSCOVIT MIKROKLIN UNTERGRUND ORGAN. MAT. | in Massen%, Relativwert für Untergrund | | | | | | | |
| | 25.2 | 32.2 | 27.3 | 0.6 | 0.70 | 0.70 | 0.70 | 0.70 |
| | 1.3 | 1.2 | 1.5 | 0.2 | 3.00 | | | |
| | 16.7 | 9.3 | 15.1 | 0.6 | 0.78 | 0.78 | 0.78 | 0.78 |
| | -0.7 | 0.2 | -4.1 | 2.7 | 4.78 | | | |
| | 6.3 | 5.0 | 6.9 | 0.8 | 1.46 | | | |
| | 43.0 | 39.7 | 41.9 | 1.0 | 0.67 | 0.67 | | |
| | 1.7 | 3.6 | 2.2 | 0.2 | 0.74 | 0.74 | 0.74 | |
| D50 = 10.5 Mikrometer | | | | gemittelt | 1.73 | 0.72 | 0.74 | 0.74 |

Tab. 41: Komponenten des Schlammes von Steinibach/Kohlerbach und Anteilbestimmung, Schlamm des letzten Hochwassers vor dem 30. 8. 1982

| | STEINIBACH | KOHLERBACH | vereinigt | s | ANTEIL STEINIBACH | | | |
|--|--|------------|-----------|-----------|-------------------|------|------|------|
| CALCIT DOLOMIT QUARZ MUSCOVIT MIKROKLIN UNTERGRUND ORGAN. MAT. | in Massen%, Relativwert für Untergrund | | | | | | | |
| | 13.2 | 5.9 | 13.3 | 0.2 | 1.01 | 1.01 | 1.01 | 1.01 |
| | 1.6 | 1.2 | 1.8 | 0.2 | 1.50 | | | |
| | 23.1 | 26.4 | 23.3 | 0.4 | 0.94 | 0.94 | 0.94 | 0.94 |
| | 7.4 | 5.4 | 3.8 | 1.6 | -0.80 | | | |
| | 8.7 | 8.5 | 7.3 | 0.5 | -6.00 | | | |
| | 50.0 | 52.5 | 51.2 | 1.0 | 0.52 | | | |
| | 1.8 | 2.2 | 1.6 | 0.2 | 1.50 | | | |
| D50 = 14.0 Mikrometer | | | | gemittelt | -0.19 | 0.98 | 0.98 | 0.98 |

Tab. 42: Komponenten des Schlammes von Steinibach/Kohlerbach und Anteilbestimmung, Schlamm vom 30. 8. 1982

| | STEINIBACH | KOHLERBACH | vereinigt | s | ANTEIL STEINIBACH | | | |
|--|--|------------|-----------|-----------|-------------------|------|------|------|
| CALCIT DOLOMIT QUARZ MUSCOVIT MIKROKLIN UNTERGRUND ORGAN. MAT. | in Massen%, Relativwert für Untergrund | | | | | | | |
| | 14.1 | 6.0 | 12.2 | 0.3 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.77 |
| | 1.8 | 1.4 | 1.6 | 0.1 | 0.50 | 0.50 | | |
| | 24.3 | 24.6 | 26.0 | 0.4 | -4.66 | | | |
| | 9.0 | 4.7 | 6.6 | 1.8 | 0.44 | | | |
| | 8.3 | 8.9 | 7.8 | 0.6 | 1.83 | | | |
| | 48.5 | 55.1 | 48.9 | 1.0 | 0.94 | 0.94 | 0.94 | |
| | 1.6 | 1.5 | 1.7 | 0.2 | 2.00 | | | |
| D50 = 16.5 Mikrometer | | | | gemittelt | 0.26 | 0.74 | 0.86 | 0.77 |

Tab. 43: Komponenten des Schlammes von Steinibach/Kohlerbach und Anteilbestimmung, Schlamm des letzten Hochwassers vor dem 5. 11. 1982

| | STEINIBACH | KOHLERBACH | vereinigt | s | ANTEIL STEINIBACH | | | |
|-----------------------|--|------------|-----------|-----------|-------------------|-------|------|------|
| | in Massen%, Relativwert für Untergrund | | | | | | | |
| CALCIT | 14.6 | 9.4 | 13.2 | 0.3 | 0.73 | 0.73 | 0.73 | 0.73 |
| DOLOMIT | 2.1 | 1.5 | 1.6 | 0.2 | 0.17 | | | |
| QUARZ | 27.1 | 24.4 | 23.8 | 0.5 | -0.22 | -0.22 | | |
| MUSCOVIT | 7.0 | 5.7 | 4.1 | 1.8 | -1.23 | | | |
| MIKROKLIN | 8.3 | 8.6 | 8.2 | 0.5 | 1.33 | | | |
| UNTERGRUND | 49.4 | 49.5 | 47.1 | 1.2 | 24.00 | | | |
| ORGAN. MAT. | 1.8 | 2.3 | 1.5 | 0.2 | 1.60 | | | |
| D50 = 13.5 Mikrometer | | | | gemittelt | 3.77 | 0.26 | 0.73 | 0.73 |

Der Schlammaufbau von Steinibach und Kohlerbach ist hier anschliessend zusammengefasst (Tab. 41–43): Der Calcitgehalt ist tief, der Steinibach zeigt um 14%, der Kohlerbach deutlich unter 10%. Erstaunlich tief ist auch der Dolomitgehalt (1–2%). Der Quarzgehalt andererseits zeigt relativ hohe Werte um 25% für beide Einzugsgebiete. Der Muscovitgehalt liegt deutlich unter 10% für den Steinibach, für den Kohlerbach um 5%. Die Werte für Mikroklin, Untergrund und organisches Material des Schlammes der beiden Bäche sind einander sehr ähnlich. Erstaunlich sind die sehr geringen Schwankungen der Prozentwerte der Schlammkomponenten für die mehrmaligen Probennahmen.

Die Komponenten des Rückstandes der *eingedampften Wasserproben* (Tab. 40) unterscheiden sich von den Komponenten der Schlammproben (Tab. 41–43) deutlich im *erhöhten Calcitgehalt*. Dies ist erklärbar aus der Tatsache, dass die schwebstoffhaltigen Wasserproben eingedampft wurden, d.h. der Lösungsrückstand ebenfalls enthalten ist. Der erhöhte Calcitgehalt liesse sich beispielsweise mit 0.05–0.1 g/l Calcit in gelöster Form erklären. Durch diesen erhöhten Calcitgehalt sinken die Konzentrationen der anderen Komponenten entsprechend ab.

Die insgesamt fünf relativ-quantitativen Abschätzungen (Tab. 39) zeigen eine *Dominanz des Steinibachs*, der gemittelte Wert beträgt ca. 0.8 gegenüber 0.2 des Kohlerbachs. Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Berechnung der Anteile aus dem Schlamm-aufbau einerseits und den direkten Messungen an schwebstoffbeladenen Wasserproben.

Die Flächenbetrachtung für die beiden Gebiete ergibt für den Steinibach 1.7 km² (63 Flächen-%) und für den Kohlerbach 1.0 km² (37 Flächen-%). Daraus ergibt sich ein gemittelter SF-Wert (Schlammanteil/Flächenanteil) von ca. 1.25 für den Steinibach und ca. 0.55 für den Kohlerbach. Interessant ist folgende Gegenüberstellung: Der *SF-Wert* für die akkumulierten Schlammproben beträgt $81/63 = 1.28$ (Steinibach) und $19/37 = 0.51$ (Kohlerbach). Der *SWF-Wert* für die Schöpfproben beträgt $72.5/57 = 1.27$ (Steinibach) und $27.5/43 = 0.63$ (Kohlerbach). Dies entspricht der theoretischen Überlegung, dass für akkumulierte Schlammproben der SF-Wert, für Schöpfproben aber der SWF-Wert als Vergleichsgrösse gelten muss (vgl. Kap. 4.2). Diese Abschätzung ist natürlich nur für den untersuchten Korngrössenbereich (Silte) gültig. Eine wesentliche Veränderung in der Aktivität der Rutschungen im Einzugsgebiet des Kohlerbachs könnte das Resultat stark verändern.

4.11 Weisse Lutschine BE

Die Weisse Lutschine und die Sefinen-Lutschine entwässern das oberste Lauterbrunnental im Berner Oberland (Fig. 55). Das hier betrachtete Gebiet umfasst Anteile des Aar-Massivs (Weisse Lutschine), Anteile der Wildhorndecke und der autochthonen und parautochthonen mesozoischen Bedeckung des Aar-Massivs (Einzugsgebiet der Sefinen-Lutschine und Teile des Einzugsgebietes der Weissen Lutschine).

Der Gesteinsaufbau ist dementsprechend ausgebildet. Ein Unterschied der beiden Teilgebiete liegt darin, dass nur im Einzugsgebiet der Weissen Lutschine Granite und Gneise stark vertreten sind. Im Einzugsgebiet der Sefinen-Lutschine kommt den vorhandenen Mergelschiefern eine gewisse Bedeutung zu. Der wesentlichste Unterschied zwischen den beiden Gebieten liegt aber in der Tatsache, dass das Gebiet der Sefinen-Lutschine nur geringfügig vergletschert ist, das Einzugsgebiet der Weissen Lutschine aber zu 38%.

Der verschiedenartige Gesteinsaufbau zeichnet sich in den Schlammkomponenten klar ab. Im Schlamm der Sefinen-Lutschine herrscht Calcit vor (57.2%), der Dolomitgehalt beträgt 4.5%. Der Quarzgehalt ist tief (13.3%), Muscovit und Mikroklin fehlen praktisch, und der Untergrundwert ist extrem tief. Der Schlamm aus dem Einzugsgebiet der Weissen Lutschine enthält knapp 20% Calcit. Der Mikroklingehalt ist hoch (12.3%), der Muscovitgehalt tief (4.9%). Erstaunlich sind die lediglich knapp 18% Quarz für dieses Einzugsgebiet, d.h. der Schlamm aus diesem vorwiegend kristallinen Gebiet enthält nur unwesentlich mehr Quarz als der Schlamm aus dem Einzugsgebiet der Sefinen-Lutschine, das fast ausschliesslich aus Sedimentgesteinen aufgebaut ist (vgl. QUERVAIND E et al. 1965).

Die Auswertung zeigt ein überaus erstaunliches Resultat. Es ist nicht die Weisse Lutschine (mit 38% Eis und Firn!), sondern das Einzugsgebiet der Sefinen-Lutschine, das dominiert. Der errechnete Schlammannteil der Sefinen-Lutschine beträgt ca. 75% (Tab. 44 und 45), was einen SF-Wert von 2.2 ergibt (Weisse Lutschine 0.4). Verantwortlich für die Dominanz der Sefinen-Lutschine sind sicher die Mergelschiefer (25% des Einzugsgebietes der Sefinen-Lutschine) und evtl. auch die weitverbreiteten Sackungsmassen in diesem Einzugsgebiet.

Das Resultat repräsentiert die letzte Hochwasserwelle und ist nicht repräsentativ für eine längere Zeitdauer, da die Weisse Lutschine stets Gletschermilch führt.

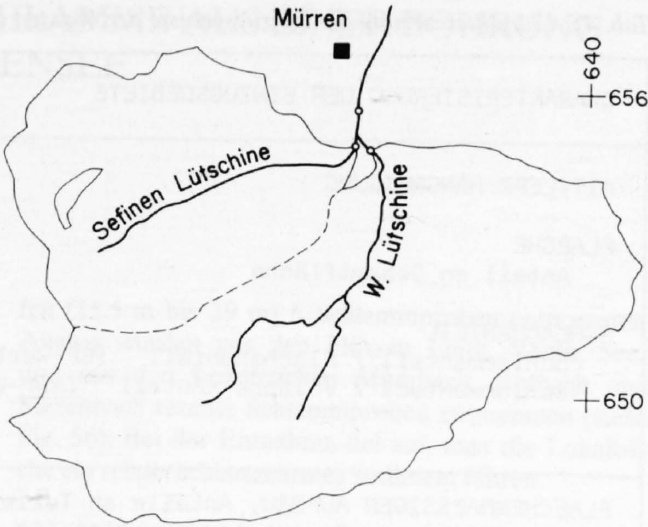


Fig. 55: Übersicht Einzugsgebiet Weisse Lutschine/ Sefinen-Lutschine

Das Einzugsgebiet der Weissen Lutschine/Sefinen-Lutschine zeigt Analogien zum Einzugsgebiet Kander/Schwarzbach auf. Der tektonische Aufbau beider Gebiete ist ähnlich. Ein weiteres Beispiel mit tektonisch ähnlichem Umfeld wurde im Gadmertal (Gadmerwasser/Gentalwasser) beprobt. Der Schlamm des Gentalwassers (Einzugsgebiet Sedimentgesteine, Fläche ca. 30 km²) dominiert über den Schlamm des Gadmerwassers (Einzugsgebiet: vorwiegend kristalline Gesteine, Fläche ca. 120 km², davon 1/5 Gletscher). Leider sind im Gadmertal die natürlichen Abflussverhältnisse durch Wasserfassungen gestört, so dass die Aussagekraft des Resultats unklar bleibt.

Tab. 46 gibt die Komponenten des Schlammes dieses Beispiels aus dem Gadmertal wieder: Der Gadmerwasserschlam hat tiefe Werte in Calcit und Dolomit, hohen Gehalt an Quarz und sehr hohen Gehalt an Muscovit und Mikroklin. Der Gentalwasserschlam zeigt einen unerwartet tiefen Gehalt an Calcit und mitt-

Tab. 44: Komponenten des Schlammes von Weisser Lutschine/Sefinen-Lutschine und Anteilbestimmung

| | WEISSE LUETSCHINE | SEFINEN LUETSCHINE | vereinigt | s | ANTEIL WEISSE LUETSCHINE | | | |
|-----------------------|--|--------------------|-----------|-----|--------------------------|------|------|-----------|
| | in Massen%, Relativwert für Untergrund | | | | | | | |
| CALCIT | 19.8 | 57.2 | 47.3 | 1.0 | 0.26 | 0.26 | 0.26 | 0.26 |
| DOLOMIT | 2.7 | 4.5 | 3.3 | 0.3 | 0.67 | 0.67 | | |
| QUARZ | 17.9 | 13.3 | 14.2 | 0.6 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.20 |
| MUSCOVIT | 4.9 | 0.6 | 0.1 | 2.3 | -0.13 | | | |
| MIKROKLIN | 12.3 | 0.0 | 2.1 | 0.5 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.17 |
| UNTERGRUND | 47.6 | 27.5 | 31.5 | 0.8 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | |
| ORGAN. MAT. | 0.6 | 0.6 | 0.4 | 0.2 | - | | | |
| D50 = 16.0 Mikrometer | | | | | gemittelt | 0.23 | 0.30 | 0.21 0.21 |

Tab. 45: Charakterisierung der Einzugsgebiete der Weissen Lutschine und der Sefinen Lutschine

| CHARAKTERISIERUNG DER EINZUGSGEBIETE | WEISSE LUETSCHINE | | SEFINEN LUETSCHINE | |
|---|------------------------------|----|------------------------------|----|
| MITTLERE HANGNEIGUNG | 21 ° | | 22 ° | |
| FLAECHEN Anteil an Gesamtfläche | 50.5 km ² 66 % | | 25.9 km ² 34 % | |
| SCHLAMMANTEIL | 25 % | | 75 % | |
| Schlammanteil / Flächenanteil (SF-Wert) | 0.4 | | 2.2 | |
| Schlammanteil / $\sqrt{\text{Fläche}}$ -Anteil (SWF-Wert) | 0.4 | | 1.8 | |
| FLAECHENMAESSIGER AUFBAU, Anteile an Teileinzugsgebiet (T), resp. Gesamteinzugsgebiet (G) | T | G | T | G |
| LOCKERGESTEINE | % | % | % | % |
| - grobkörnige Ablagerungen (Schutt) | 3 | 2 | 21 | 7 |
| - vorw. sandig-siltig-tonige Ablagerungen (Lehme, Moränen) | 4 | 3 | 5 | 2 |
| FESTGESTEINE | | | | |
| - Granite, meist stark verschiefert | 23 | 15 | 0.5 | >0 |
| - Gneise | 4 | 3 | 0 | 0 |
| - Serizit-Chlorit-Gneise bis -Schiefer | 4 | 3 | 0 | 0 |
| - Kalke, massig, mit mergeligen Zwischenlagen | 20 | 13 | 44 | 15 |
| - Dolomitgesteine | 3 | 2 | 0.5 | >0 |
| - Mergelschiefer | 1 | 1 | 25 | 8 |
| EIS UND FIRN | 38 | 25 | 4 | 1 |

Tab. 46: Komponenten des Schlammes von Gadmerwasser/Gentalwasser und Anteilbestimmung

| | GADMER-WASSER | GENTAL-WASSER | vereinigt | s | ANTEIL GADMERWASSER | | | |
|---------------------------------|--|---------------|-----------|-----------|---------------------|-------|-------|-------|
| | in Massen%, Relativwert für Untergrund | | | | | | | |
| CALCIT | 2.2 | 11.8 | 9.9 | 0.4 | 0.20 | 0.20 | 0.20 | 0.20 |
| DOLOMIT | 2.2 | 1.5 | 1.8 | 0.2 | 0.43 | 0.43 | | |
| QUARZ | 24.1 | 29.6 | 25.1 | 0.7 | 0.82 | 0.82 | 0.82 | 0.82 |
| MUSCOVIT | 31.0 | 13.2 | 9.0 | 1.8 | -0.23 | -0.23 | -0.23 | -0.23 |
| MIKROKLIN | 19.5 | 8.6 | 12.4 | 0.4 | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0.35 |
| UNTERGRUND | 62.1 | 58.3 | 60.8 | 1.2 | 0.66 | 0.66 | | |
| ORGAN. MAT. | 1.0 | 4.7 | 4.2 | 0.2 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | |
| D50 = 15.5/19.5/18.5 Mikrometer | | | | gemittelt | 0.34 | 0.34 | 0.26 | 0.29 |

lere Werte für Muscovit und Mikroklin. Erstaunlich ist der Quarzgehalt von knapp 30%, übertrifft er doch den Quarzgehalt im Schlamm des Gadmerwassers (vorw. kristalline Gesteine im Einzugsgebiet).

Schon im Einzugsgebiet der Kander und der Weissen Lutschine fiel auf, dass der Schlamm aus kristallinen Gebieten relativ wenig Quarz enthält. Offenbar mani-

festiert sich der natürlich vorhandene Quarzgehalt dieser Gesteine in einem anderen Korngrößenbereich (Abtransport in der Sandfraktion). Es ist aber auch darauf hinzuweisen, dass der Quarzgehalt in reifen detritischen Sedimentgesteinen (bspw. helvetische Siltsteine und Sandsteine) häufig höhere Werte annimmt als in kristallinen Gesteinen (vgl. Geotechnische Karte der Schweiz 1:200 000, QUERVAIND E et al. 1967).

5 UNTERSUCHUNG FOSSILER SCHLAMME AUS EINER BOHRUNG AM WALENSEE

5.1 Problemstellung

Im Gebiet Tiefenwinkel-Murg am Walensee wurden im Rahmen des Baus der Nationalstrasse N3 zahlreiche Bohrungen abgeteuft. Unter anderem erbohrte man ausgedehnte Siltvorkommen, die als Seesedimente (Seebodenlehme) gedeutet wurden. Der Umstand, dass diese Seebodenlehme bis 80 Meter über die Kote des heutigen Walensees reichen, erschwerte deren Interpretation. Die grundsätzliche Frage ist, ob es sich um Ablagerungen in einen kleinen randglazialen See handelt oder um Ablagerungen, die in einen grossen talfüllenden See eingebracht wurden. Eine ausgedehnte Darstellung der geologischen Verhältnisse findet sich in SCHINDLER et al. (1985).

5.2 Resultate der Schlammuntersuchungen

Aus der Bohrung Nr. 5 bei Tiefenwinkel (vgl. SCHINDLER et al. 1985) wurden aus verschiedenen Tie-

fen (15.5 m bis 29 m) 6 Schlammproben entnommen. Analog wurden aus den Flüssen Linth, Rhein, Seez und aus den Lokalbächen Murgbach, Rotbach und Merenbach rezente Schlammproben entnommen (siehe Fig. 56). Bei der Entnahme fiel auf, dass die Lokalbäche ein relativ schlammarmes Sediment führen.

Sowohl die 6 Proben aus der Bohrung als auch die 6 Proben aus den erwähnten Flüssen und Lokalbächen wurden anschliessend aufgearbeitet und die 7 Komponenten bestimmt, gemäss dem Verfahren, das für die rezenten Schlammuntersuchungen erarbeitet worden war (Kap. 2.3 und 2.6.1).

Auf Fig. 57 sind die erhaltenen Resultate zusammengefasst. Für jede Komponente erfolgt die Darstellung der D50-Werte der Probe auf der Horizontalachse gegen die Massenprozepte (resp. die Untergrundintensität) der jeweiligen Komponente auf der Vertikalachse. Erstaunlicherweise sind die Werte der Bohrproben

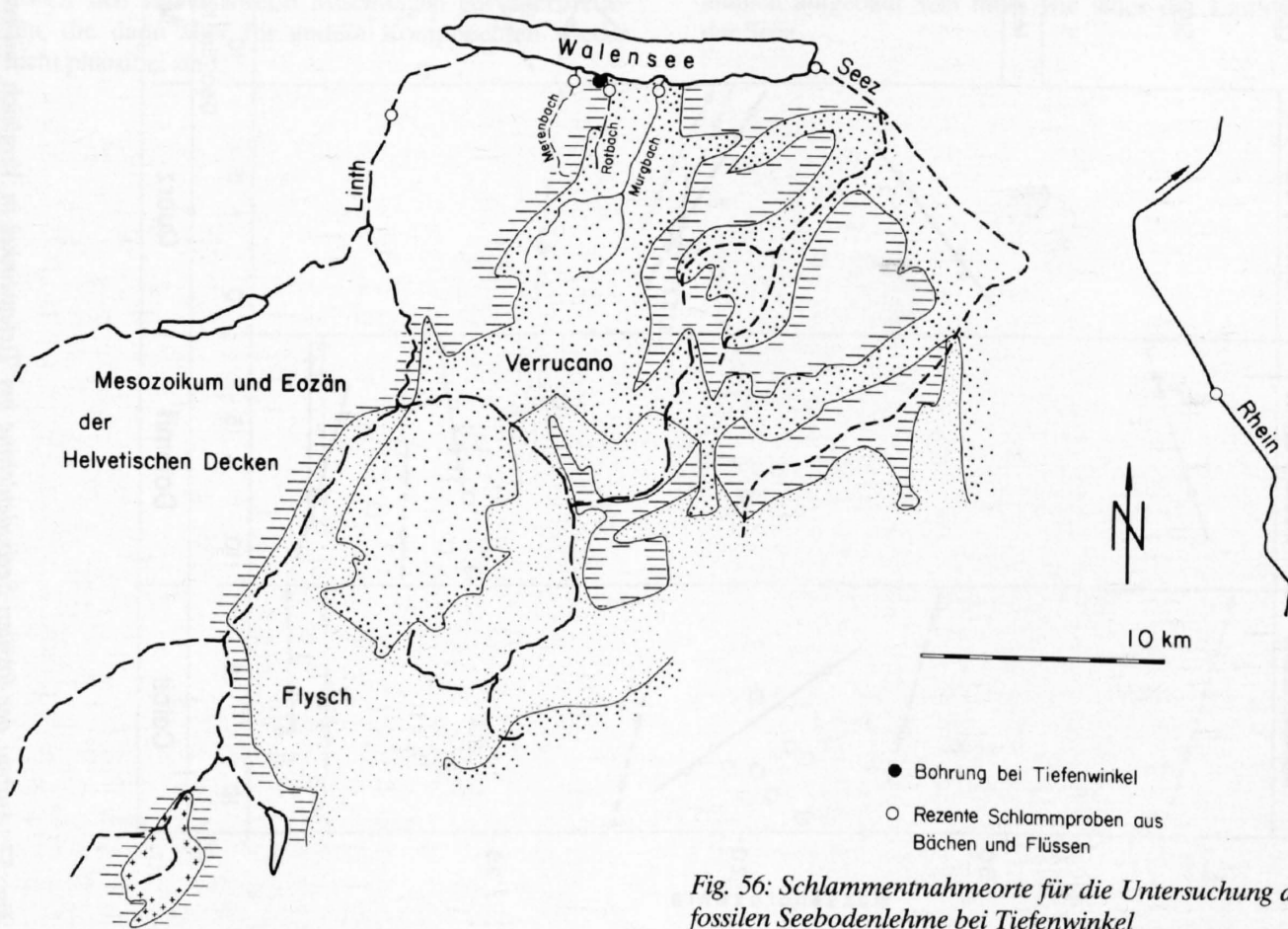


Fig. 56: Schlammmentnahmeorte für die Untersuchung der fossilen Seebodenlehme bei Tiefenwinkel

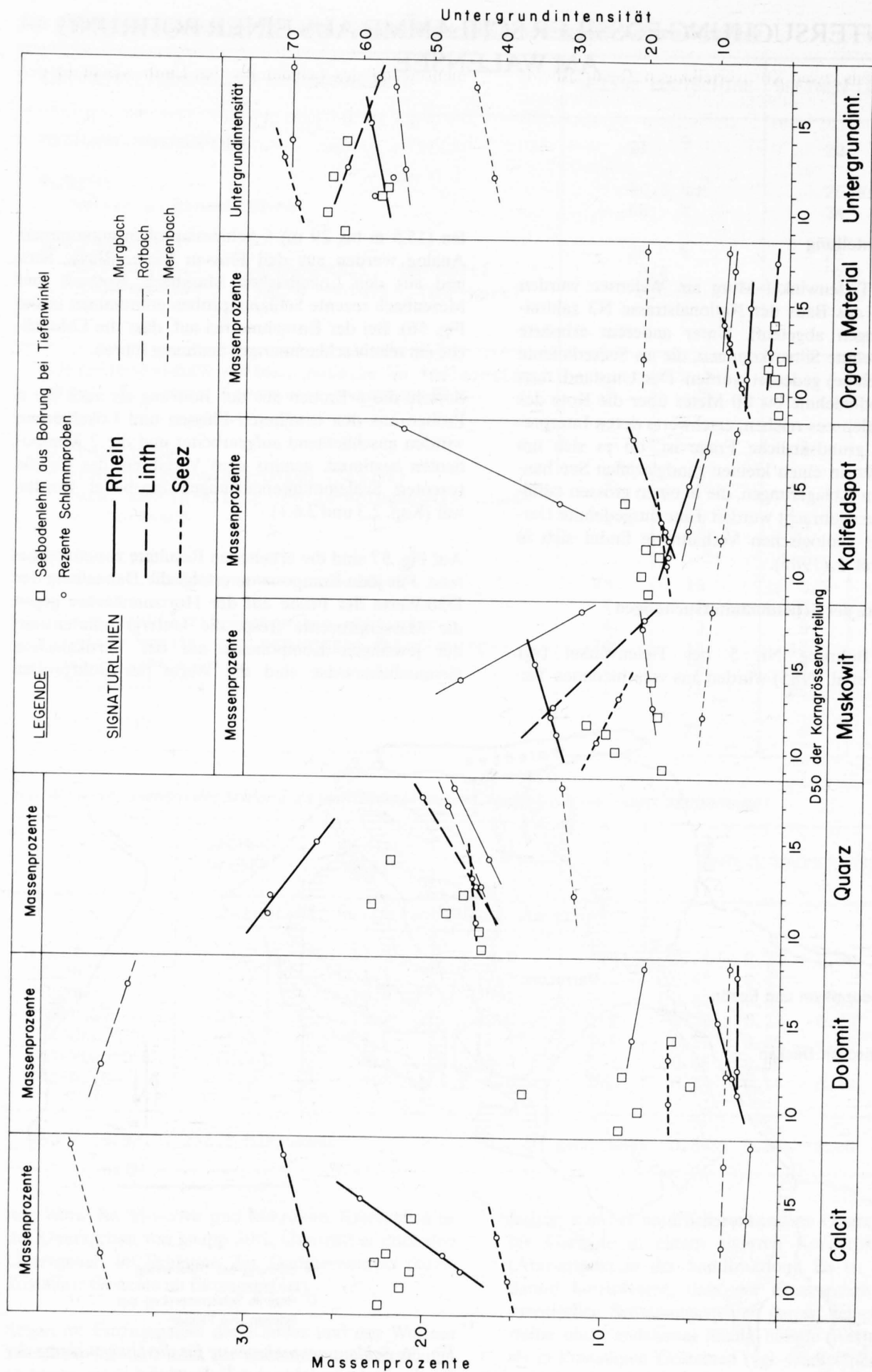


Fig. 57: Aufbau der fossilen Seebodenlehm bei Tiefenwinkel in Vergleich mit rezenten Schlamm aus Flüssen und Bächen

relativ eng gruppiert und zeigen keine grosse Streuung. Beim Schlamm der rezenten fliessenden Gewässer wurden jeweils zwei Kornverteilungen (beim Rheinschlamm drei Kornverteilungen) mit verschiedenen D50-Werten untersucht. Zur besseren Veranschaulichung sind die zwei (resp. drei) Punkte durch eine Signaturlinie verbunden.

Es ist naheliegend, die Seebodenlehme zuerst mit den rezenten Schlammern der Lokalbäche zu vergleichen. Die beprobte Bohrung liegt unweit des Rotbaches (Fig. 56), dessen Einzugsgebiet vorwiegend Verrucano, aber auch Mesozoikum der Helvetischen Decken umfasst. Die Zusammensetzung des Rotbachschlammes weicht aber sehr markant von jener der Seebodenlehme ab (Calcit, Dolomit !), deshalb können die Seebodenlehme nicht aus dem Einzugsgebiet des heutigen Rotbaches stammen. Der Murgbach als weiterer Lokalbach (Einzugsgebiet praktisch ausschliesslich Verrucano) zeigt sehr starke Abweichungen von den Seebodenlehmen, insbesondere im Calcitgehalt. Der Merenbach schliesslich (mit mesozoischen Gesteinen der Helvetischen Decken im Einzugsgebiet) zeigt in fast allen Komponenten grössere Abweichungen von der Zusammensetzung der Seebodenlehme. Da die Anlage des Bachnetzes zur Zeit der Entstehung der Seebodenlehme vom heutigen abweichende Gestalt haben konnte und weil die Seebodensedimente Mischungen mehrerer Lokalbäche darstellen könnten, liegt es nahe, auch mögliche Mischungen zu betrachten. Für einzelne Komponenten lassen sich versuchsweise Mischungen gut interpretieren, die dann aber für andere Komponenten wieder nicht plausibel sind.

Der Vergleich des Schlammes der grösseren Flüsse mit den Seebodensedimenten ergibt folgendes: Die Zusammensetzung des Schlammes der Linth weicht in den wichtigen Komponenten Calcit und Dolomit um einige Prozente ab. Im Falle der Seez liegt der Calcitgehalt um einige Prozente zu tief, die anderen Komponenten entsprechen aber ziemlich genau den Seebodensedimenten (mit Ausnahme der in diesem Vergleich «rezent-fossil» weniger aussagekräftigen Komponenten «organisches Material» und «Untergrundintensität»). Die Schlammzusammensetzung des Rheins schliesslich zeigt eine Abweichung im Quarzgehalt von einigen Prozenten. Die Seebodensedimente sind ähnlich, aber nicht identisch mit den rezenten Schlammern der in Frage kommenden grösseren Flüsse. Mittels einer Mischung von Schlammern dieser grossen Flüsse, insbesondere einer Mischung zwischen den Schlammern von Linth und Seez, liesse sich die Herkunft der Seebodensedimente aber erklären.

Zusammenfassend lassen sich folgende Aussagen machen:

Die *Seebodenlehme* aus der beprobten Bohrung lassen sich am ehesten mit einer *Kombination* von *Schlamm* aus *Linth* und *Seez* vergleichen. Die Lokalbäche nehmen keine dominierende Stellung ein. Dies würde bedeuten, dass diese Sedimente in einen grösseren See geschüttet worden sein müssen, und zwar durch einen Fluss (oder durch mehrere Flüsse bei anschliessender Durchmischung), dessen Einzugsgebiet geologisch ähnlich aufgebaut sein muss wie jenes der Linth und der Seez.

6 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND SYNTHESE

6.1 Folgerungen für Abtrag, Transport und Ablagerung von Feststoffen

6.1.1 Kurzdiskussion der qualitativen Zusammenhänge

Abtrag wird, sieht man von Abtrag durch intraterrestrische (Bsp. Vulkanausbrüche) und extraterrestrische Ursachen (Bsp. Meteoriteneinschläge) ab, im wesentlichen durch die Gravitationskraft (d.h. die potentielle Energie des Abtragsgutes) verursacht. Teilweise findet eine Unterstützung durch die Transportkraft eines Transportmediums (kinetische Energie) statt. Das weite Problemspektrum der Verwitterung, die mithilft, das Abtragsgut erst abtragbar zu machen, muss dabei speziell erwähnt werden.

Die Ablagerung erfolgt normalerweise auf einem tieferen topographischen Niveau. Da das Abtragsgut aber Energie vom Transportmedium übernimmt, kann die Ablagerung auch auf einem höheren Niveau stattfinden (Bsp. bei Abtrag durch Wind).

Die für die Gebietserniedrigung grundlegenden exogenen Zusammenhänge lassen sich wie folgt zusammenfassend formulieren:

Durch das Wechselspiel zwischen dem

Gebirgs-/Gesteinscharakter der Fest- und Lockergesteine an der Erdoberfläche und dem

Klima (Niederschlags- und Temperaturregime, Vergletscherung) entsteht oder verändert sich die

Landschaft, die charakterisiert ist durch das Relief und das Gewässernetz.

Die Landschaft wird heute zusätzlich durch die Tätigkeit des Menschen beeinflusst.

Wären die den Abtrag bestimmenden Faktoren konstant (d.h. isotropes Gestein, gleichbleibende meteorologische Verhältnisse), so würde sich eine Landschaft ausbilden, in der ein berechenbarer Abtrag stattfinden würde.

Da die meteorologischen Verhältnisse in der Natur einen steten Wechsel zeigen (Niederschläge!) und die Einzugsgebiete geologisch gesehen meist sehr inhomogen aufgebaut sind, schwankt der Abtrag in der Natur recht stark. In einem Einzugsgebiet, das durch ein grösseres Abtragsereignis einen Grossteil seines abtragsreifen Verwitterungsschuttes verloren hat, wird ein nach-

folgendes Hochwasserereignis von gleicher Intensität nicht denselben Abtrag leisten können wie das vorangegangene. Dies ist mitunter ein wesentlicher Grund, weshalb sich Abtragsereignisse nur unter grossen Schwierigkeiten vorausberechnen lassen.

Der Beschreibung der Landschaft als Produkt der Verflechtung zwischen Gestein und Klima und deren Veränderung durch Abtragsereignisse wird in der Literatur breiter Raum gewidmet. Die Erfassung und Beschreibung erfolgt dabei vorwiegend anhand morphologischer und genetischer Kriterien.

Auf eine detaillierte Besprechung und Diskussion der exogenen geologischen Vorgänge und deren Relation zu den geologischen Verhältnissen in einem Einzugsgebiet wird hier verzichtet. Als Beispiel hat JÄCKLI (1957) eine umfassende, abtragsorientierte Darstellung und Beschreibung der rezenten geologischen Vorgänge für das bündnerische Rheingebiet verfasst. Er diskutiert Verwitterung, Abtrag und Transport durch Massenbewegung und durch die verschiedenen möglichen Transportmedien. Er beleuchtet insbesondere auch die Genese der Lockergesteinsbildungen.

Schwieriger ist es allerdings, die Beziehung zwischen Gestein, Klima und Abtrag quantitativ zu erfassen. Die meisten publizierten Arbeiten beschränken sich in der Regel auf die Untersuchung eines Teilaspektes der angeschnittenen Problematik oder begnügen sich mit qualitativen Aussagen:

- So kommt JÄCKLI (1953) durch einen Vergleich zwischen den Ablagerungsraten des Rheins (Bodensee), der Maggia (Langensee), der Aare (Brienzersee) und der Linth (Walensee) zum Schluss, dass offensichtlich *geologische Faktoren* für die festgestellte höhere Ablagerungsrate des Rheins ausschlaggebend sein müssen, da die Einzugsgebiete von Maggia, Aare und Linth höhere Reliefenergie und grössere jährliche Niederschlagsmengen aufweisen.
- FÜGNER (1980) korreliert den Schwebstoffabtrag mit diversen *Geofaktoren* in einem Teileinzugsgebiet der Elbe in der DDR. Die erreichten Korrelationskoeffizienten der dargestellten Beispiele sind in der Mehrzahl der Fälle grösser als 0.7.
- Eine Synthese der Verknüpfung *Abtrag und Klima* wird versucht in den Arbeiten von FOURNIER (1960) und CORBEL (1964). CORBEL (1964) findet

u.a., dass der Abtrag im Gebirge weltweit etwa das 10-fache des Abtrages in den Ebenen beträgt. Eine eingehende Diskussion für das Gebiet der Dreisam führt NIPPES (1975) durch.

– Ein Beispiel für die Erhebung der *morphometrischen Kenngrößen* in Einzugsgebieten (äussere Form, mittlere Höhe, höchster und tiefster Punkt, mittlere Geländeneigung, Flussdichte, Morphologie der Flussläufe) liefert RANGE (1961), der die Einzugsgebiete der bayerischen Alpenflüsse untersucht hat.

Häufig wird versucht, Klima-Kenngrößen (Niederschläge), Abfluss und morphometrische Größen der Einzugsgebiete mit dem Abtrag mathematisch zu verknüpfen (siehe Kap. 6.5).

Mit dieser Dreiteilung lässt sich der Zusammenhang der möglichen Feststoffherde im Einzugsgebiet mit dem späteren Feststofftransport in den fließenden Gewässern (Geschiebe, Schwebstoffe) verbinden.

Die Abtragsbereitschaft erhöht sich durch Kornverfeinerung. Diese Verfeinerung geschieht primär durch spröde Deformation der Festgesteine und Verwitterung, sekundär durch mechanische Einwirkung auf das Transportgut (Abrieb von Komponenten, Zerschlagen von Komponenten). Als Produkte ergeben sich Bruchstücke aller Korngrößen und chemische Lösungs- und Umwandlungsprodukte (Tab. 48).

6.2 Gebietsabtrag im Grossbereich (Gesteinspakete)

6.2.1 Abhängigkeit von den geologisch-geotechnischen Verhältnissen

6.1.2 Einteilung des Abtragsgutes

Die Abtragsbereitschaft eines Fest- oder Lockergesteins hängt im wesentlichen von der Beschaffenheit und der Grösse der vorhandenen Komponenten ab. Von der Problematik der Abtragsbereitschaft und des Transportmechanismus her betrachtet wird hier deshalb versucht, den Abtrag (als Feststoffe) der Fest- und Lockergesteine in 3 Gruppen einzuteilen (Tab. 47):

- Gebietsabtrag im Grossbereich (Gesteinspakete)
- Gebietsabtrag im Grössenbereich der Kluftkörper
- Gebietsabtrag im Grössenbereich von Sand, Silt und Ton

Das Gebirge kann sich aufgrund endogener Vorgänge (bspw. Gebirgshebung, Vulkanismus) und exogener Abtragsprozesse (Gletschertätigkeit, z.T. heute auch durch Einwirkung des Menschen) dergestalt verändern, dass ganze Gebirgskörper in eine instabile Situation versetzt werden. Die Folge sind Massenbewegungen (Aktivierung oder Reaktivierung von Sackungen, Rutschungen, Bergstürzen). Für den Alpenraum spielt dieser Grossbereich des Abtrags eine wichtige Rolle. Die letzte Eiszeit hat das Gebiet des Alpenraumes und des schweizerischen Mittellandes geprägt. Der anschliessende Zeitraum mit dominierendem Abtrag durch das

Tab. 47: Grössenbereiche des Abtragsgutes

| Grössenbereich | Abtragsort | Abtragsmechanismus | Ablagerungsort | Aufnahme durch fließendes Gewässer |
|---|---|---|---|--|
| GG: Gebietsabtrag im Grossbereich (Gesteinspakete) | Felspakete, Lockergesteine auf Hängen | Bergsturz, Sackung, Rutschung, Fließen, Hakenwurf | Zwischendeponie auf Hängen und in Tälern | (Auswaschung: GS) |
| | | | angrenzend oder in fließendes Gewässer | als Geschiebe und Schwebstoff |
| GK: Gebietsabtrag im Grössenbereich der Kluftkörper | Felswände, Steilhänge, Steine aus Lockergesteinen | Steinschlag, Auswaschung | Zwischendeponie als Hangschutt | - |
| | | | angrenzend oder in fließendes Gewässer | vorwiegend als Geschiebe, je nach Gesteinstyp rasche Desintegration zu Schwebstoff |
| GS: Gebietsabtrag im Grössenbereich von Sand, Silt und Ton | Lockergesteine, verwitterte Festgesteine | Auswaschung, Abgrusung, Abrieb | Abtransport durch Wasser (evt. Zwischendeponie als Verwitterungsprodukte) | vorwiegend als Schwebstoff, aber auch als Bestandteil des Geschiebes |

Tab. 48: Kornverfeinerung durch Verwitterung und Transport

| | MECHANISCHE VERWITTERUNG (im weitern Sinne) | CHEMISCHE VERWITTERUNG | ZERKLEINERUNG WAHREND ABTRAG/TRANSPORT |
|-----------------------------------|---|---|--|
| UMSCHREIBUNG | Desintegration des Gesteins im Grossbereich, Vergr. der Angriffsfläche für die chem. Verwitterung | Zerstörung und Umwandl. der gesteinsaufb. Mineralien, Auflockerung des Kornverbandes | Mechanische Zerkleinerung durch Schlagen, Reiben und Mahlen |
| PRODUKTE | ganzes Kornspektrum (vorw. eckige Bruchstücke) | vorwiegend chem. Lösungs- und Umwandlungsprodukte, zudem Freisetzung von Sand, Silt und Ton | Gesteins- und Mineralbruchstücke |
| WESENTLICHE VORGAENGE (Beispiele) | <ul style="list-style-type: none">- Klüftung durch Druckentlastung- Spannungsrisse durch grosse Temp'schwankungen- Spaltenfrost- Salzsprengung | <ul style="list-style-type: none">- Karbonatisierung- Hydrolyse- chemische Lösung- Hydrierung- Basen-Austausch- Kationen-Austausch- Komplex-Bildungen- Oxidation | <ul style="list-style-type: none">- Abrieb der Komponenten im Geschiebe- unmittelbare Auswirkungen der Gravitationskraft (Bsp. Zertrümmerung bei Felssturz) |

Medium Wasser hat bis heute noch keinen Ausgleichszustand geschaffen. Dies zeigt sich an den vielen noch nicht verfüllten Seen und anderen Ablagerungsräumen im Alpenraum und im Alpenvorland. Weil sich noch kein neuer Gleichgewichtszustand nach dem Zurückweichen der Gletscher aus den Tälern eingestellt hat, findet heute noch viel Gebietsabtrag im Grossbereich statt, d.h. durch Massenbewegung.

Die Lithologie der bewegten Gesteinsmasse (Rutschung, Sackung, Bergsturz) kann sehr verschieden sein. Der Grund für die Massenbewegung kann zwar in der Lithologie mitbegründet sein (beispielsweise zum Kriechen neigende Gesteine), kann aber auch völlig unabhängig sein von der Lithologie der bewegten Gesteinsmasse (Gleithorizonte unter kompetenten Gesteinspaketen!).

In Bewegung befindliche Lockergesteinsmassen können je nach Lithologie als Schwebstoffquellen eine dominierende Stellung einnehmen. Dies ist insbesondere auch im Einzugsgebiet der Minster (siehe Kap. 3.3.1) der Fall, wo sandig-siltig-tonige Rutschmassen häufig sind, die teilweise direkt in den Vorfluter hineinrutschen und als Geschiebe, vor allem aber als Schwebstoff abgeführt werden. Die Neigung zu Rutschungen ist abhängig vom geologisch-geotechnischen Aufbau eines Einzugsgebietes (vgl. Fig. 26).

6.2.2 Kartographische Erfassung

Massenbewegungen werden allgemein mit jeder geologischen Kartierung erfasst. Allerdings wird dabei

meist nicht unterschieden, ob die Bewegung der Gesteinsmasse noch anhält oder bereits abgeklungen ist. Meistens fehlen auch Angaben über den petrographischen Charakter.

Geotechnische Kartierungen umfassen zusätzlich je nach Kartierungsziel Angaben über den petrographischen Aufbau der bewegten Gesteinsmassen. Als Beispiel kann die «Geotechnische Karte der Schweiz 1:200 000» erwähnt werden. Ein Beispiel einer lokalen Kartierung gibt JÄCKLI (1953) im Rahmen einer Veröffentlichung («Rutschungen und Bergstürze im Gebiet zwischen Lugnez und Stätzerhorn-Curvèr-Kette»).

Will man aber die Verknüpfung zwischen Gebietsabtrag und geologischen Verhältnissen kartographisch darstellen, so ist man gezwungen, das ausgewählte Gebiet problemorientiert zu kartieren. Dabei ist die Auswahl möglicher Kartierungskriterien nicht von vorneherein festgelegt.

- Eine detaillierte, abtragsorientierte Beschreibung von Massenbewegungen liefert BUNZA (1975) in seiner Veröffentlichung «Klassifizierung alpiner Massenbewegungen als Beitrag zur Wildbachkunde».
- Einen ähnlichen Problemkreis bearbeitet MOSER (1971) im mittleren Lesachtal (Kärnten). Er geht insbesondere auch auf die Gesteinseigenschaften und deren Anfälligkeit bezüglich Massenbewegung ein.

In der Kartierung der Schlammabtragsstellen im *Minster-Einzugsgebiet* (Karte liegt dieser Arbeit bei)

wurden aktive Lockergesteins-Rutschmassen erfasst, sofern der Fuss einer Rutschung an ein Gewässer grenzt, d.h. kontinuierlich weiter abgetragen wird.

6.2.3 Transport und Ablagerung

Die Ablagerungsräume der bewegten Fest- oder Lockergesteinsmassen sind im Alpenraum vorwiegend durch die Gletscheraktivität bereitgestellt worden. Die bewegten Gesteinsmassen werden zwischendeponiert als Lockergesteine auf Hängen und in Tälern, oft geraten sie aber auch in eine ungünstige Lage zum vorhandenen Gewässernetz. In diesem Falle wird das Material durch das fliessende Gewässer aufgenommen, sortiert und als Geschiebe oder als Schwebstoff (vgl. Tab. 48) abtransportiert.

6.3 Gebietsabtrag im Grössenbereich der Kluftkörper

6.3.1 Abhängigkeit von den geologisch-geotechnischen Verhältnissen

Die durch den Schnitt mehrerer Kluftsysteme erzeugten Gesteinskörper nennt man Kluftkörper. Den Durchtrennungsgrad eines Festgesteins mit Klüften bezeichnet man als Klüftigkeit. Die Klüftigkeit ist bestimmt durch die auf das Gestein wirkenden Kräfte und durch den Grad des spröden Verhaltens eines Gesteins gegen Beanspruchung. Kluftkörper können eine Grösse vom cm- bis in den hm-Bereich einnehmen. Normalerweise haben Sedimentgesteine eine höhere Klüftigkeit als Tiefengesteine, da sie im räumlichen Aufbau primär schon wegen der meist vorhandenen Schichtung inhomogener sind.

Im Einzugsgebiet der *Minster* (Kap. 3.3) ist der Abtrag im Grössenbereich der Kluftkörper vor allem in Teilgebieten mit Kalkgesteinen wichtig. Da diese Gebiete aber wegen der früheren Ausräumung durch Gletscher heute meist noch über freie Akkumulationsräume verfügen (bspw. Schutthalden an Flanken von U-Tälern), spielt die Geschiebeanlieferung aus den Kalkgebieten zum Sihlsee eine unbedeutende Rolle. Die Flyschgebiete im Einzugsbereich der *Minster* hingegen tragen einen grösseren Anteil bei. Dies ist einesteiils im Schichtaufbau des Flysch begründet, d.h. in der typischen Wechsellagerung zwischen tonig-siltigen Lagen (Abtrag als Schwebstoff) und kompetenten Sandsteinen (Abtrag als Geschiebe). Dieser geschichtete Aufbau ist auch verantwortlich für die häufigen Rutschungen in den Flyschgebieten. Die Verflechtung zwischen geologischer Einheit, Gewässernetz und Abtrag ist in den Flyschgebieten viel enger als in Kalkgebieten.

JÄCKLI (1948) untersucht den Geröllinhalt des Geschiebes im Hinterrhein und einiger Nebenflüsse an 11 Geröllzählstellen. Unter anderem weist er darauf hin, dass die Bestimmung des Abriebs anhand der grössten Gerölle sehr problematisch ist, da neues

Geschiebe aus Seitenbächen ähnliche Gerölle führt und Sortierungseffekte nach der Geröllgrösse beim Transport schwer abzuschätzen sind.

6.3.2 Kartographische Erfassung

Die kartographische Erfassung des Gebietsabtrages im Grössenbereich der Kluftkörper ist im Prinzip auf 2 Arten denkbar. Eine erste Möglichkeit ist die systematische Auskartierung der Grösse und des petrographischen Aufbaus der Kluftkörper, der Beschaffenheit der Kluftflächen (etc.). Zudem müsste der Kluftkörperbestand in den Lockergesteinen sinnvoll erfasst werden. Dies ergäbe eine Übersichtskartierung, die eventuell die langfristige Entwicklung des Abtrags zu beschreiben vermöchte, aber sehr schwierig zu realisieren wäre.

Eine zweite, praxisnähere Kartierungsmöglichkeit geht vom bestehenden Gewässernetz und dem von den Gewässern mitgeführten Geschiebe aus. Sie erfasst den Charakter des Geschiebes und untersucht die unmittelbar vorhandenen Geschiebequellen. Vorteile dieses Bearbeitungsprinzips sind die einfachere Erfassungsweise und die Tatsache, dass man in der Abfolge Verwitterung–Abtrag–Transport–Ablagerung bereits eine Stufe später einsteigt (Stufe Abtrag/Transport) und damit die auf die Geschiebebildung schwer einzuschätzenden klimatischen Faktoren indirekt bereits mitberücksichtigt werden.

6.3.3 Abtrag, Transport und Ablagerung

Der Abtrag der Kluftkörper findet vor allem aufgrund der Gravitation statt (Tab. 47). Akkumulationsort kann die Talflanke (Hangschutt) oder im Falle von Prallhängen und Schluchten auch das Bett fliessender Gewässer sein. Im zweiten Falle wird das Material direkt in das Geschiebe des Baches oder Flusses aufgenommen, sofern die Dimension der Kluftkörper dies zulässt. Weisen die Kluftkörper eine schlechte Kornverkitung auf, so werden sie innerhalb des Geschiebes sehr rasch zerkleinert und zerfallen in die Bestandteile (Sand, Silt, Ton). Oder die Kluftkörper behaupten sich als Geröll, wobei die weitere Zerkleinerung dann durch Abrieb vor sich geht. Die Ablagerung des Geschiebes erfolgt in Alluvialebenen oder im Deltabereich von Seen.

Hydromechanische Betrachtungen und mathematische Transportformeln finden sich beispielsweise bei MEYER-PETER & MÜLLER (1949), HARTUNG (1959) und ZELLER (1963).

6.4 Gebietsabtrag im Grössenbereich von Sand, Silt und Ton

6.4.1 Abhängigkeit von den geologisch-geotechnischen Verhältnissen

Der Gebietsabtrag im Grössenbereich von Sand, Silt

und Ton spielt eine sehr wichtige Rolle. Es werden dabei grosse Volumina abgetragen, transportiert und wieder abgelagert. Die Stauhaltungen im Mittel- und Unterlauf der Flüsse verlanden im wesentlichen auf Grund des Abtrags in diesem Korngrössenbereich.

Sand enthält zum Teil noch grosse Anteile an Gesteinsbruchstücken. Je feiner die Korngrösse aber wird, desto mehr verschwindet dieser Anteil an Gesteinsbruchstücken zugunsten von Mineralkörnern.

Man kann beobachten, dass der Schlamm aus verschiedenen Einzugsgebieten nicht nur im *mineralischen Aufbau* verschieden ist, sondern dass aus verschiedenen Einzugsgebieten auch charakteristisch verschiedene *Korngrössenverteilungen* geliefert werden. Das bedeutet, dass sich die Korngrösse des Ausgangsgesteins deutlich im abgeführten Schlamm abzeichnet.

In der *vorliegenden Arbeit* wird der Gebietsabtrag im Siltbereich speziell untersucht. Dabei werden geologisch-geotechnisch unterschiedlich aufgebaute Einzugsgebiete einander gegenübergestellt. Mittels einer neu entwickelten Methodik sind Aussagen möglich, wie hoch die Schlammanteile zweier sich vereinigender Einzugsgebiete sind. Dies geschieht durch eine Komponentenzerlegung des Schlammes der einzelnen Einzugsgebiete als auch des Mischschlammes nach der Vereinigung der beiden Einzugsgebiete. Die Resultate sind als einzelne Messungen zu interpretieren. Bei den Beispielen, wo Mehrfachmessungen zu verschiedenen Entnahmezeitpunkten durchgeführt wurden, ergaben sich aber ähnliche Resultate (Minster-Einzugsgebiet, Furtbach, Steinibach). Für jeweils zwei sich vereinigende Einzugsgebiete wurde der gelieferte Schlammanteil und der Flächenanteil in % ermittelt. Um die gegenseitige Charakterisierung der betrachteten Einzugsgebiete besser durchführen zu können, wurde der *SF-Wert* (Quotient Schlammanteil/Flächenanteil) eingeführt und für jedes der betrachteten Einzugsgebiete gebildet. Ein weiterer Kennwert, der *SWF-Wert*, beschreibt den Quotienten Schlammanteil/«Wurzel aus Flächenanteil». Der *SWF-Wert* ist von Bedeutung, wenn die Schwebstoffproben zu einem gewählten Zeitpunkt (vgl. Diskussion zu Fig. 18) direkt aus dem Wasser entnommen werden und die betrachteten Gebiete grosse Flächenunterschiede aufweisen. Er berücksichtigt, dass die Höchsthochwasser nicht proportional zur Einzugsgebietsgrösse anwachsen (vgl. VISCHER & HUBER 1978).

Es zeigen sich verschiedene Werte. Die *abtragsaktiveren Gebiete* erhielten im Mittel einen *SF-Wert* von 1.4. Zwei Teilgebiete des Minster-Einzugsgebietes erzielten sogar *SF-Werte* von 4.7 bis 6. Die *abtragsschwächeren Gebiete* erhielten im Mittel Werte von 0.4.

Für einige Einzugsgebiete wurden aus *Literaturangaben* die *Schwebstoffabtragsraten* bestimmt (Tab. 49). Die Einzugsgebiete der Landquart und der Melezza (bis

Palagnedra-Stausee, Einzugsgebiet vorwiegend in Italien) erreichten Werte bis um $600 \text{ m}^3/\text{km}^2 \times \text{a}$. Die meisten untersuchten Gebiete mit grossen Anteilen ihres Einzugsgebietes im Alpenraum ergaben aber $100\text{--}300 \text{ m}^3/\text{km}^2 \times \text{a}$. Flüsse im Mittelland zeigen lediglich Werte bis $100 \text{ m}^3/\text{km}^2 \times \text{a}$. Dieser Zusammenhang gilt aber nur im Grossen. Man kann daraus u.a. auch nicht folgern, dass eine Abhängigkeit zwischen der *Hangneigung* und dem Schwebstoffabtrag bestehe. Dieser Zusammenhang bestünde nur bei genau gleichem geologischem Aufbau der betrachteten Gebiete. Die Untersuchungen im Einzugsgebiet der Minster zeigten klar, dass nicht die steilsten Gebiete am meisten Schwebstoffe fördern, sondern eher die flacheren Gebiete. Alle quantitativen Angaben für ein Einzugsgebiet bedeuten den gemittelten Schlamm-Gebietsabtrag. Da der Abtrag über ein Gebiet aber kaum je homogen verteilt ist, sind die kleinräumigen Abträge aber noch extremer (grösser oder kleiner). Unter anderem muss auch die *Tiefenerosion* berücksichtigt werden. Nimmt man vereinfachend an, die Tiefenerosion wirke sich nur auf einem Streifen von 25 Metern beidseitig der Flüsse und Bäche aus, so ergeben sich für diese Streifen Abtragsintensitäten von 0.2 bis 7 mm/a für die in Kap. 6.5.4 aufgeführten Beispiele.

Der wichtigste Faktor für den Schlammabtrag ist zweifellos der *geologisch-petrographische Aufbau* des Einzugsgebietes. Die wesentliche Grundvoraussetzung ist, dass ein Gestein die Korngrösse enthält, deren Abtrag betrachtet wird. Abtrag von Schlamm verlangt Gesteine mit Teilchengrösse im Silt-/Tonbereich, und zwar dürfen die gesteinsaufbauenden Teilchen keine starke Verklüftung aufweisen. Wichtige Produzenten in dieser Kategorie sind die sandig-siltig-tonigen Lockergesteine. Auch gewisse Festgesteine (Tongesteine, mergelige Gesteine), die leicht desintegrieren können, da die Verklüftung der Bestandteile sehr schwach ist, müssen hier erwähnt werden. Häufig neigen diese Gesteinstypen zudem zu Massenbewegungen. Wenn die erwähnten Gesteine nicht durch eine Pflanzendecke geschützt sind, werden sie teilweise direkt in Form von kleinen Klüftkörpern, Sand, Silt und Ton abgeschwemmt. Der Abtransport durch fließendes Wasser geschieht anschliessend als Bestandteil des Geschiebes oder als Schwebstoff.

Im Einzugsgebiet der Minster als Beispiel nimmt die Abschwemmung im Grössenbereich von Sand, Silt und Ton eine wichtige Stellung ein, insbesondere auch in Verknüpfung mit Rutschmassen. Nebst diesem Beispiel konnten auch für andere Gebiete klare Abhängigkeiten zwischen dem Schlammabtrag und dem geologischen Aufbau des Einzugsgebietes formuliert werden (Bacino di Malvaglia, Sufnersee, Forggensee, Gross Lau, Steinibach etc.).

Eine wichtige Rolle für den Gebietsabtrag im allgemeinen, als auch für den Schlammabtrag im besonderen, spielen die *Gletscher*. Eindrücklich ist hier das Beispiel

des Sufnersees, wo ein bedeutender Teil des Schlammes offenbar aus Gebieten stammt, die primär nicht als die Hauptschlammlieferanten angesehen würden. Es handelt sich dabei um vergletscherte Gebiete mit Gneisen und Schiefern. Auch die Beispiele Gerenbach und Kander sind hier zu erwähnen.

Das *Relief*, in dieser Arbeit ausgedrückt durch die mittlere Hangneigung, ist in homogen aufgebauten Gebieten von wesentlicher Bedeutung. Im Alpenraum ist man aber auch bei der Betrachtung von kleinen Einzugsgebieten mit einer Vielfalt von Gesteinen konfrontiert. Leicht abtragbare Gesteinstypen flachen dabei besonders aus, wohingegen abtragsinaktive Gesteinstypen herauswittern. Es sind deshalb meist nicht die steilsten Gebiete, die den grössten Schlammabtrag verursachen. Dies zeigte sich auch klar im Einzugsgebiet der Minster, wo das Waagtal (mittl. Hangneigung 27.2 Grad) als sehr schlammabtragsschwach eingestuft werden muss (Schlammabtragsintensität kleiner als 0.02 mm/a), wohingegen die Einzugsgebiete des Heikenbachs und des Surbrunnenbachs (mittl. Hangneigung 16.3 resp. 17.0 Grad) als sehr schlammabtragsaktiv einzustufen sind (Schlammabtragsintensität um 1 mm/a).

Die Auswirkung des *Niederschlags* auf den Schlammabtrag wird in dieser Arbeit nicht direkt untersucht, obwohl dessen Bedeutung unbestritten ist. Die Untersuchungen setzen im kausalen Zusammenhang «Niederschlag – Anlage des Gewässernetzes – geologisch-geotechnischer Aufbau des Einzugsgebietes» erst auf der zweiten Stufe ein (Anlage des Gewässernetzes). Dabei ist die Bedeutung des Niederschlags schon berücksichtigt, da sich die Interaktion zwischen Niederschlag, Gestein und Abtrag in der Anlage des Gewässernetzes äussert, unter anderem auch in der Gewässernetzlänge pro km² (Flussdichte). Dieser Zusammenhang konnte im Einzugsgebiet der Minster festgestellt werden (Fig. 26). Es wird deshalb versucht, von der Flussdichte als Basisgrösse auszugehen und den Schlammabtrag in Abhängigkeit von der Flussdichte zu formulieren (vgl. auch Fig. 58).

6.4.2 Kartographische Erfassung

Auch hier ist die unmittelbare und praxisnahe Kartierungsmethode vorzuziehen, d.h. man kartiert die aktuelle Abtragssituation unter Berücksichtigung von erarbeiteten Kartierungskriterien vom Gewässernetz und von den beobachtbaren Abtragstellen aus betrachtet. Die andere Möglichkeit bestünde darin, dass man das Problem der Kartierung völlig von der Geologie her (d.h. beispielsweise Verkittung und Korngrösse der Gesteine als Kartierungskriterien) angehen würde. Dies ist schwieriger, aufwendiger und besitzt weniger Aussagekraft. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Kartierung der Schlammquellen für das Einzugsgebiet der Minster erstellt und detailliert ausgewertet. Parallel wurde aus Resultaten von vorgenommenen Schlammuntersuchungen eine Schlammabtragskarte konstruiert.

Die Daten beider Karten ergänzen sich zu einem Gesamtbild über den Abtrag im Grössenbereich von Sand, Silt und Ton im ausgewählten Gebiet. Für die Praxis ergibt sich die Lokalisierung der für die Verlandung des Sihlsees verantwortlichen Gebiete. In wissenschaftlicher Hinsicht liesse sich eine Extrapolation der Landschaftsentwicklung in die Zukunft ableiten.

6.4.3 Transport und Ablagerung

Der Transport von Sand, Silt und Ton findet vor allem als Schwebstoff statt. Die Ablagerung geschieht als Schlamm auf Schwemmebenen, in Flussaltläufen und in Seen. Sedimente dieser Korngrösse sind im wesentlichen für die Verlandung der Stauhaltungen im Mittel- und Unterlauf der Flüsse verantwortlich. Betrachtungen zur Hydraulik des Schwebstofftransports finden sich beispielsweise bei BAUER & BURZ (1968), HARTUNG (1959) und ZELLER (1963).

6.4.4 Fossile Schlamme

Eine quantitative Aufteilung fossiler Ablagerungen (Bsp. Geschiebe oder Schlamme aus der Eiszeit) auf mögliche Liefergebiete ist nur in sehr beschränktem Rahmen möglich. Dies hat seine Ursache im heute veränderten Gewässernetz, als auch in der veränderten Verteilung der an der Oberfläche vorhandenen Gesteine im möglichen Einzugsgebiet. Dazu kommen Probleme mit der quantitativen Erfassung der vorhandenen Abtragsprodukte.

Möglichkeiten für eine qualitative Untersuchung und Herkunftsbestimmung von fossilen Ablagerungen wie Schotter und Sande ergeben sich durch Geröllanalysen und Schwermineralbestimmungen.

In der vorliegenden Arbeit wurde eine qualitative Analyse von Schlammern aus einer Bohrung bei Tiefenwinkel durchgeführt. Dabei wurde die für diese Arbeit eingeführte Methode für die Untersuchung von aktuellen Schlammern angewendet. Die Erzielung eines aussagekräftigen Resultats war vor allem deshalb möglich, da sich die in Frage kommenden Schlammherkunftsgebiete in der Schlammlieferung deutlich voneinander unterscheiden.

6.5 Quantitative Angaben zum Gebietsabtrag

6.5.1 Allgemeines

Die in der Literatur zu findenden Angaben stützen sich in erster Linie auf Erhebung von abgelagerten Mengen. Dabei wird oft nicht zwischen Geschiebe und Schlamm unterschieden. In diesem Kapitel wird aber insbesondere die quantitative Erfassung des Schlammabtrages behandelt.

Für die Verlandung der natürlichen Seen und vieler Stauhaltungen spielt der Abtrag und die Ablagerung von Schlamm (Transport als Schwebstoff) die ausschlaggebende Rolle. Lediglich für kleinere Staubekken, vorab im Oberlauf der Bäche und Flüsse, spielt das Geschiebe die Hauptrolle.

Für die Erfassung des Abtrages (Wasser als Transportmedium) ist prinzipiell ein direktes oder ein indirektes Vorgehen möglich. Durch Messung der Feststoff- und Lösungsfracht an fliessenden Gewässern kann auf direktem Wege der Abtrag resp. die jeweilige *Abtragsrate* bestimmt werden. Meist ist dieses Vorgehen durch äussere Gründe verunmöglicht (Messschwierigkeiten, Zeit, Kosten).

Wird das Erosionsniveau eines Gebietes durch einen See gebildet, so kann die abgetragene Sedimentmenge indirekt aus dem Ablagerungsvolumen ermittelt werden (*Ablagerungsrate*). Dabei wird aber der Teil der Schwebstoff- und Lösungsfracht nicht erfasst, der den See passiert hat.

Die Schwebstoffbelastung wird durch Bestimmung der Trockenmasse der Schwebstoffe in einer bestimmten Wassermenge ermittelt. An grossen Wasserläufen werden die nötigen Wasserproben folgendermassen gewonnen: Mittels eines speziellen Entnahmegertes werden die Proben entweder kontinuierlich in einzelnen Vertikalprofilen über den Gewässerquerschnitt (Integrationsentnahme) oder nur an einer Stelle im Stromstrich entnommen (Oberflächenentnahme). Die Integrationsentnahme ist genauer, da die Schwebstoffkonzentration über den Gewässerquerschnitt nicht konstant verteilt ist (siehe beispielsweise BONNARD & BRUSCHIN 1970). Heute lassen sich auch Trübungsmessgeräte (fotoelektrische Funktionsweise) einsetzen, sofern für den Messort die nötigen Eichmessungen zur Verfügung stehen. Für kleinere Gewässer (Bergbäche) sind diese Geräte nicht geeignet.

Die Landeshydrologie führt an verschiedenen Flüssen Messungen der Schwebstoffbelastung und der Lösungskonzentration durch. Die Daten sind im Hydrologischen Jahrbuch der Schweiz publiziert (BUNDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ bspw. 1982).

Kapitel 3 und 4 vermittelten aktuogeologische Schlammuntersuchungen und Schlammherkunftsabklärungen in kleinen Einzugsgebieten. Leider können diese Herkunftsabklärungen in der Regel nicht an absoluten Mengenmessungen aufgehängt (geeicht) werden, da für die meisten Gebiete die nötigen Messungen fehlen.

6.5.2 Abtragsraten und Ablagerungsraten (Beispiele aus der Literatur)

Anschliessend seien hier einige wichtige Veröffentlichungen mit quantitativen Angaben (insbesondere Abtrag als Schwebstoff) erwähnt. Je nach Fragestellung

wurden jeweils die Geschiebe- und/oder die Schwebstofffrachten erfasst. Meistens fehlen aber Angaben über die Lösungsfrachten.

- OEXLE (1936) zeigt, dass die Schwebstoffführung der Donau in Bayern im wesentlichen beeinflusst wird durch die vom Alpenraum austretenden Flüsse. Er betont die enge Abhängigkeit der Schlammproduktion vom geologischen Aufbau der einzelnen betrachteten Gebiete und der Umbildungsbereitschaft der einzelnen Bäche und Flüsse. Die Schwebstoffabtragsraten der dargestellten Flusssysteme schwanken zwischen 45 und 358 m³/km²×a. Eine Zusammenstellung der grössten Schwebstoffkonzentrationen ergibt für die meisten der aufgeführten Flüsse Maximalwerte von mehreren kg/m³ (Extremwert Saalach gut 15.5 kg/m³ am 30. Oktober 1929).
- HARTUNG (1959) schreibt zum Vergleich, dass beispielsweise am Hoangho, Indus, Ganges, Colorado oder Rio Grande Schwebstoffkonzentrationen von 60 kg/m³ keine Seltenheit seien.
- VISINTINI (die Daten wurden übernommen und zusammengestellt von SCHOKLITSCH 1942) untersuchte unter anderem die Delta-Anlandungen in italienischen Seen und Stauweiern. Die errechneten spezifischen Ablagerungsraten ergeben tiefe Werte für Einzugsgebiete mit kristallinen Gesteinen (0–40 m³/km²×a, bedeutend höhere Werte in Gebieten mit Anteilen an Sedimentgesteinen). Ein Gebiet mit Serpentin erreicht eine spezifische Ablagerungsrate von 735 m³/km²×a. Hohe bis sehr hohe spezifische Ablagerungsraten werden für einige Einzugsgebiete in Sedimentgesteinen beschrieben (meist einige 100 m³/km²×a, im Extremfall aber bis gegen 2000 m³/km²×a).
- JÄCKLI (1958) konstruierte Abtragskurven für einige Einzugsgebiete in der Schweiz: Aare bis Brienzersee, Aare bis Bielersee, Baye de Montreux, Cassarate, Kander, Linth, Maggia, Rhein, Rhone, Tessin+Verzasca+Maggia.
- PONCANO et al. (1982) studieren den Zusammenhang zwischen Verlandung und charakteristischen Merkmalen des Einzugsgebietes an drei Stauseen im Süden von Brasilien.
- SOMMER (1980) und SOMMER & LAUFFER (1982) veröffentlichen Daten über die Geschiebe- und Schwebstoffführung und den Transport von gelösten Stoffen an einigen Gebirgsbächen und Gebirgsflüssen in Österreich. Die dargestellten quantitativen Werte für den Schwebstoffabtrag sind aus verschiedenen Quellen zusammengetragen und nach verschiedenen Methoden ermittelt worden. Der spezifische Geschiebeabtrag beträgt nur 10–70 m³/km²×a in den Zentralalpen (13 Bäche) und 329 m³/km²×a für einen Bach in den Nordtiroler Kalkalpen.

- PARTL (1976) betrachtet die Verlandung an 9 Gross- und Kurzzeitspeichern in Österreich.
 - Für die Schweiz finden sich Daten über Ablagerungsraten (Deltaufnahmen) resp. Abtragsraten bei MEYER-PETER (1938), Eidg. Amt für Wasserwirtschaft (1939a+b), JÄCKLI (1958), LAMBERT (1980) und VISCHER (1981). Auf die meisten der von diesen Autoren behandelten Gebiete wird in Kap. 6.5.4 eingetreten.
 - Das Eidgenössische Departement des Innern (BUNDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ) veröffentlicht im Hydrologischen Jahrbuch der Schweiz Daten über Schwebstofffrachten an verschiedenen Schweizer Flüssen (seit 1981; 1982: 15 Messstellen) und Daten über die Lösungsführung an einigen Schweizer Flüssen (ausführlich seit 1975; 1982: 13 Messstellen).
 - MATOUSEK (1985) schätzt die Abtragsintensität im Waldenburger Tal (Baselbieter Jura) zu etwa 0.1 mm/a, davon entfallen ca. 0.09 mm/a auf Abtrag durch Gesteinslösung. Die Arbeit enthält weitere Vergleichsdaten anderer Autoren.
 - SCHINDLER (1974) schätzt die Abtragsintensität rings um den Zürichsee für eine Zeitperiode nach dem Rückzug des Linthgletschers (ausgehendes Zürichstadium bis Bölling) auf ca. 1 mm/a. Dieser Wert wird aus den abgelagerten Schlamm-Kubaturen im Zürichsee abgeleitet.
 - LI & ERNI (1974) stellen für den Gesamtrhein bis zur Mündung einen Lösungsabtrag von 100–300 t/km²×a fest, der für alle untersuchten Teilgebiete des Rheins etwa diese Grösse haben soll (Welt-durchschnittswert ca. 1/10 – 1/3 dieses Wertes).
 - Den «Schwebstoffanfall» im Einzugsgebiet von 12 deutschen Flüssen (in Mittel- und Norddeutschland) beschreibt HINRICH (1979). Die Werte liegen zwischen 7 und 45 t/km²×a. Er weist nebenbei darauf hin, dass in der Bundesrepublik im Mittel schätzungsweise 10 t/km²×a Staub aus der Luft auf die Erde ausfallen. Deshalb und wegen der Schwebstoffe aus den Abwässern können über den eigentlichen Schwebstoffabtrag keine Angaben gemacht werden.
 - NIPPES (1971) fasst in einer Tabelle Angaben zum jährlichen Schwebstoffabtrag von 13 deutschen Flüssen (vorwiegend in Süddeutschland) zusammen. Er erhält 20 – 402 t/km²×a Abtrag.
 - FÜGNER (1975) bestimmt den Anteil der künstlich durch Abwässer in die Elbe eingetragenen Schwebstoffe für ein Teileinzugsgebiet der Elbe. Für das Jahr 1965 schlüsselt er die 7800 t Schwebstoffe in 3000 t natürlicher Herkunft und in 4800 t künstlicher Herkunft auf (Abwässer). Die Müglitz hat als Extrembeispiel 16mal mehr Schwebstoffe künstlicher Herkunft als natürlicher Herkunft.
 - Angaben über Schwebstoff-Abtragsraten italienischer Flüsse finden sich bei SCHOKLITSCH (1942). Dabei werden Spitzenwerte bis über 5000 m³/km²×a dokumentiert für Einzugsgebietsgrössen von über 1000 km², was eine «jährliche Abtragung des Einzugsgebietes» von bis über 5 mm ausmacht (die unterschiedliche Dichte zwischen den abgetragenen Schwebstoffvolumina und den im Einzugsgebiet anstehenden Gesteinen ist dabei nicht berücksichtigt).
 - Daten über den Gebietsabtrag in den Einzugsgebieten von 18 Flüssen Asiens und Nordamerikas finden sich in einer Abhandlung der NATIONS UNIES (1954). Die Werte liegen für die meisten Beispiele in ähnlichem Rahmen wie für die Flüsse der Alpen. Einen bedeutend höheren Gebietsabtrag zeigen einige Flüsse in China, so der Gelbe Fluss mit 1.0 mm/a (2640 t/km²×a, bei Chen-hsien, 715 184 km², 1934–1942), der King mit 2.7 mm/a (7190 t/km²×a, bei Tchan-tchia-chan, 56 930 km², 1932–1945), der Lo mit 2.65 mm/a (7070 t/km²×a, bei Tchouan-tou, 27 020 km², 1934–1945) und der Wei mit 2.2 mm/a (5800 t/km²×a, bei Wei-tchia-pao, 36 000 km², 1943–1945). Alle in der Publikation angegebenen Abtragsintensitäten wurden zum Vergleich umgerechnet auf eine Dichte der Gesteine im Einzugsgebiet von 2.7 g/cm³.
 - Die Stauraumverlandung in den Vereinigten Staaten ist ausführlich dokumentiert, bspw. in DENDY & CHAMPION (1969) und in SPRABERRY (1964).
 - SCHOKLITSCH (1950) gibt in vielen Beispielen Daten über Ablagerungsraten (Deltas) und spezifische Schwebabtragsraten. Interessant ist das Beispiel des Gibraltar-Stauweihers (Kalifornien), in dessen Einzugsgebiet innerhalb von zwölf Jahren die Pflanzendecke infolge Bränden auf 83% der Einzugsgebietsfläche zerstört wurde. Der Schwebgehalt des Zuflusses stieg dadurch auf ca. den 3-fachen Betrag an.
 - Viele Angaben über Verlandung von Stauräumen in Indien enthält die Arbeit von KHOSLA (1953).
 - Eine Zusammenstellung von Abtragsdaten in verschiedenen Klimabereichen liefert CORBEL (1964).
- Über *Bodenerosion* und den damit verknüpften Problembereich des anthropogen verursachten oder beschleunigten Abtrags existiert eine vielfältige Literatur, bspw. TOY (1977), KIRKBY & MORGAN (1980), INTERNATIONAL ASSOCIATION OF HYDROLOGICAL SCIENCES (1981), ZACHAR (1982).
- RULA et al. (1971) untersuchen den Erosionsschutz,

den die Vegetationsdecke zu leisten imstande ist, in den Einzugsgebieten der Flüsse Zuka und Ripa (Jugoslawien). Die Resultate zeigen, dass der Abtrag von Ackerböden denjenigen von Wald- und Weideböden um ein Vielfaches übertrifft. Die Untersuchungen wurden in Gebieten mit sehr grosser Hangneigung durchgeführt (30–55%).

- Einen erhöhten Abfluss und einen um ein Vielfaches gesteigerten Anteil an abgeschwemmtem Boden stellt auch THOMPSON für landwirtschaftlich genutzte Flächen in Südafrika fest (Probeflächen mit 3–4% Neigung). Diese und weitere Angaben finden sich zusammengestellt in GANSSEN (1968).
- KARL et al. (1969) stellen im bayerischen Alpenraum in 2 Testgebieten einen Zusammenhang zwischen Bewirtschaftung und Wasserhaushalt dar. In bewirtschafteten Gebieten ist die Versickerungszeit der Niederschläge bedeutend erhöht und der abtragsfördernde Oberflächenabfluss deshalb grösser. «Die erosionsaktive Fläche (ohne Blattanbrüche) hat sich in den vergangenen 150 Jahren auf das 3- bis 4.5-fache vergrössert.» Diese Arbeit enthält zudem eine sehr umfangreiche Literaturliste über den einschlägigen Problembereich.
- Bodenerosionsmessungen auf Ackerflächen werden in der Umgebung von Basel vom Geographischen Institut der Universität Basel durchgeführt, siehe LESER et al. (1981). Interessant scheint die Tatsache, dass eine hohe Niederschlagsintensität allein noch keine hohen Abfluss- und Abtragsraten verursacht. Grössere Schäden treten erst nach Erreichen einer bestimmten Niederschlagsmenge und -dauer ein. Für ein Testgebiet mit mächtiger Lössauflage ist eine Regenmenge von mehr als 10 mm und eine Regenintensität von mindestens 0.5 mm/min erforderlich, bis grössere Schäden auftreten.
- MEADE (1969) stellt in seiner Veröffentlichung «Errors in Using Modern Stream-Load-Data to Estimate Natural Rates of Denudation» fest, dass die Flüsse aus den Ostgebieten der USA, die gegen den Atlantik hin entwässern, heute wahrscheinlich 4- bis 5-mal mehr Sediment führen, als wenn die Landschaft vom Mensch unberührt geblieben wäre.
- Gemäss einer Tabelle von ROBINSON (in PETERSON et al. 1979) beträgt die Erosion auf Ackerflächen etwa den 5- bis 6-fachen Betrag des Abtrags in Waldgebieten. Dies gilt für die Vereinigten Staaten von Amerika. In PETERSON et al. (1979) wird die Problematik ausführlich diskutiert.

6.5.3 Schwebstoff-Abtragsformeln

Es erstaunt, dass sogar die grundlegende Frage, ob

eine Gesetzmässigkeit zwischen der Schwebstoffführung und dem Abfluss bestehe, in der Literatur ungeklärt ist. Hier zur Illustration nur 2 Beispiele:

SCHOKLITSCH (1950) vermerkt, dass zwischen dem «Schwebgehalt des Wassers und dem Durchfluss» als auch zwischen der jährlichen Schwebfracht und der Wasserfracht eines Flusses keine Beziehung bestehe.

Nach HINRICH (1974) sind die Schwebstofffrachten vom Abfluss abhängig, wenn man die Betrachtung über grössere Zeitabschnitte durchführt: «Für lange Zeitabschnitte wie hydrologische Jahre oder Halbjahre ergeben sich verhältnismässig gute Beziehungen zwischen Abflusssumme und Schwebstofffrachten.» Der Autor untersuchte das Einzugsgebiet der Ems, also ein grosses Flusssystem in einem Tiefland.

Wahrscheinlich trifft WESTRICH (1979) den Kern der Sache am ehesten, wenn er betont, dass meist kein Zusammenhang zwischen Abfluss und Schwebstofffracht gegeben ist, wenn der Schwebstoffanfall durch geologische, hydrologische und anthropogene Faktoren störend beeinflusst wird.

Die Formulierung oder Anwendung eigentlicher Schwebstoff-Abtragsformeln wurde von verschiedenen Autoren versucht. Im wesentlichen wird der Zusammenhang zwischen der Schwebstoffführung (S_s) oder der Schwebstoffbelastung (S_c) und der Wassermenge (Q) eines Gewässers zu formulieren versucht nach dem Ansatz

$$S_s = a \times Q^b$$

Die Parameter a und b werden entweder durch Messreihen bestimmt (Bsp. REMY-BERZENCOVICH 1960, PETERS-KÜMMERLY 1973), oder es wird versucht, a und b mit charakteristischen Abflusskennwerten und Gebietskennwerten zu verknüpfen (BOGARDI 1956, BRUSCHIN & BERNEY 1971). Ob mit diesem einfachen Ansatz eine zufriedenstellende Abhängigkeit formuliert werden kann, hängt vor allem von der Komplexität des betrachteten Einzugsgebietes ab (geologisch-geotechnische Verhältnisse, Morphologie, Schwebstoffangebot, Niederschlagsregime etc.). Auf jeden Fall ist Vorsicht geboten, wenn Erkenntnisse aus einem Gebiet in ein anderes übertragen werden sollen.

Eine andere Annäherung an das Problem versucht NIPPES (1975). Aus Untersuchungen an der Dreisam (Schwarzwald) schlägt er eine Modell-Berechnungsmethode für die Schwebstoffführung vor. Es geht dabei um eine beobachtete Relation zwischen Schwebstoffkonzentration und Abflussanschwellung bei Hochwasserereignissen.

In neuerer Zeit wurden vermehrt allgemeingültige und umfassende Abtragsformeln entwickelt. Dabei wird versucht, Zusammenhänge zwischen abtragsbeeinfluss-

senden Grössen wie Erosionsanfälligkeit, Niederschlagswerte, morphologische Kennwerte, Abflussverhältnisse, Bodenkennwerte (Plastizität, Kornanteil grösser als 1 mm), Anteil vegetationsbedeckt etc. mathematisch auszuformulieren. Siehe dazu FOURNIER (1960), FLAXMANN (1966) [gesamte Feststofffracht], FLEMING (1968), ZEMLJIC (1971), VANONI (1975) [Sedimentation Engineering, umfangreiche Abhandlung], SLAYMAKER (1977) [gute Übersicht], PETERSON et al. (1979) [Universal Soil Loss Equation: Past, Present, and Future], DOORNKAMP et al. (1982).

6.5.4 Zusammenstellung über den Schlammabtrag in einigen Einzugsgebieten der Schweiz

6.5.4.1 Erhebung der Daten

In den Untersuchungen zu dieser Arbeit wurde festgestellt, dass der Schlammabtrag stark vom geologisch-geotechnischen Aufbau eines Einzugsgebietes abhängt. In Kapitel 6.5.4 wird nun versucht, in einer Synthese Resultate mehrerer Einzugsgebiete der Schweiz kurz darzustellen und zu vergleichen.

Die Zusammenstellung der aus der Literatur entnommenen und ergänzten Daten erfolgt auf Tab. 49. Insgesamt sind 20 Referenzorte in Bach- und Flusssystemen aufgeführt, teilweise mehrere aus dem gleichen Flusssystem. Für folgende der aufgeführten Beispiele sind in EIDG. AMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (1939b) geologisch-petrographische Karten und fotografische Aufnahmen aus dem Einzugsgebiet veröffentlicht: Rhein, Aare bis Brienzersee, Linth, Ticino/Verzasca/Maggia.

In Tab. 49 sind folgende Abtragsdaten und Gebietskennwerte dargestellt:

- Die *Fläche* des schlamliefernden Einzugsgebietes. Die Werte sind dem Hydrologischen Jahrbuch der Schweiz (BUNDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ, diverse Jahrgänge) entnommen (ausser Einzugsgebiet der Seez). Die Einzugsgebiete grösserer Seen im Einzugsgebiet eines Referenzortes wurden von der Gesamtfläche subtrahiert, die Flächen der direkten Einzugsgebiete der Stauseen aber belassen.
- Die *mittlere Höhe* des Einzugsgebietes (Daten aus dem Hydrologischen Jahrbuch der Schweiz).
- Der Prozentanteil *vergletschertes Gebiet* (Daten aus dem Hydrologischen Jahrbuch). Es sind nur Einzugsgebiete mit geringem Gletscheranteil ausgewählt worden.
- Die *Länge des Gewässernetzes*. Darunter wird hier die Länge des Fluss- und Bachnetzes verstanden, das in den Landeskarten der Schweiz in blauer Farbe eingezeichnet ist, plus die Länge der trockenen Gerinne. Die Ausmessung der Flussläufe, Bachläufe und trockenen Gerinne erfolgte in topographi-

schen Karten 1 : 50 000. Zur Länge des Bachnetzes wurde die Länge der trockenen Gerinne hinzugezählt, da diese in Hochwasserfällen und bei der Schneeschmelze Wasser führen und damit einen Beitrag zum Schlammabtrag leisten.

- Das Verhältnis *Gewässernetzlänge/Einzugsgebietsfläche* (Dimension km/km²). Dabei sind in der Gewässernetzlänge wie erwähnt die trockenen Gerinne miteingeschlossen. In der Literatur verwendet man den Begriff «Flussdichte» für das Verhältnis «Gewässernetzlänge (wasserführend)» / Einzugsgebietsfläche.
- *Schwebstoffmessungen* an fliessenden Gewässern. Die Daten entstammen dem Hydrologischen Jahrbuch der Schweiz, wurden z.T. aber auch direkt von der Landeshydrologie zur Verfügung gestellt.
- *Deltavermessungen*. Diese umfassen nebst Schwebstoffen meist zusätzlich einen geringen Anteil Geschiebe. Dafür ist in der Regel der nicht im Delta abgelagerte Anteil der Schwebstoffe nicht berücksichtigt, d.h. jener Anteil, der im restlichen Seegebiet zur Ablagerung gelangte oder den See passierte.
- Die *Schlammabtragsrate*, errechnet für eine Gesteinsdichte von 2.7 g/cm³ im Einzugsgebiet. Diese Dichte entspricht jener von unverwittertem Festgestein. Das abgetragene Gestein (Lockergesteine, Verwitterungsschutt, Kulturerde etc.) hat zwar eine tiefere Trockendichte als 2.7 g/cm³, d.h. der Abtrag wäre damit grösser als aufgeführt. Für ein Gebiet, in dem die Festgesteine lediglich von einer Verwitterungsschicht bedeckt sind, die abgetragen, aber auch ständig erneuert wird, ist die Verwendung dieses Dichtewertes gerechtfertigt. Schwieriger liegt der Fall in den Gebieten, die alte mächtige Lockergesteinsmassen mit natürlicherweise geringeren Dichtewerten (meist um etwa 2.0 g/cm³) enthalten. Dies ist in der Schweiz häufig der Fall. Durch das generelle Verwenden einer Trockendichte von 2.7 g/cm³ wird der effektive Abtrag dann zu gering eingeschätzt. Die Schlammabtragsrate wird angegeben in bezug auf die Einzugsgebietsfläche als auch in bezug auf die Gewässernetzlänge (inkl. trockene Gerinne).

6.5.4.2 Beziehung zwischen dem Quotient «Bachnetz-länge/Einzugsgebietsfläche» und dem Schlammabtrag

Bei der Auswertung der Daten aus dem Einzugsgebiet der Minster wurde die Beobachtung gemacht, dass die Schlammförderung abhängig ist vom geologisch-geotechnischen Aufbau des Einzugsgebietes und auch von der Gewässernetzlänge pro km² (Fig. 26). Die Anlage des Gewässernetzes hängt in erster Linie vom petrographischen Charakter und der davon abhängenden Durchlässigkeit der vorhandenen Gesteine, der Hang-

Tab. 49: Schlammabtrag in einigen Einzugsgebieten in der Schweiz

| Einzugsgebiet, Messstelle | Fläche 1) | Mittl. Höhe des Einzugsgeb. be- zögl. Messst. 1) | Vergletscherung % | Bachnetzlänge (inkl. tr. Ger.) km | Bachnetzfläche/ Fläche km/km ² | Schwebstoff- messung t/a | Delta- vermessung (Ablag./rate) 2) | Schlamm- abtragsrate 3) | | Messperiode | Literatur- angabe |
|--|--------------|--|----------------------|---|---|--------------------------------|---|---|--|-------------|---------------------------------|
| | | | | | | | | m ³ /km ² a ρ in () | m ³ /km ² a ρ=2.7 | | |
| 1 AARE, Bielersee | 4) | 2633 | 601 | 0.2 | 3471 | 1.32 | 5) | 140 (1.8) | 93 | 70 | 1913-33 JAECKLI 1958, AW 1939 |
| 2 Stilli | 6) | 4614 | - | 0 | 5879 | 1.27 | | | 54 | 43 | 1964-82 Hydrol.Jb. 1982 |
| 3 BAYE DE MONTREUX, Léman | | 15 | 680 | 0 | 32 | 2.13 | | 123 (2.0) | 91 | 43 | 1949-56 JAECKLI 1958 |
| 4 CASSARATE, Lago di Lugano | | 73 | 699 | 0 | 231 | 3.16 | | 240 (2.0) | 178 | 56 | 1930-51 JAECKLI 1958 |
| 5 EMME, Wiler | | 940 | 402 | 0 | 1488 | 1.58 | | | 25 | 16 | 1979-82 Hydrol.Jb. 1982 |
| 6 GRANDE EAU, Aigle | | 132 | 1146 | 1.9 | 198 | 1.50 | | | 27 | 18 | 1966-74 Landeshydrologie 7) |
| 7 LANDQUART, Felsenbach | | 616 | 1229 | 1.5 | 974 | 1.58 | | | 567 | 359 | 1979-82 Hydrol.Jb. 1982 |
| 8 LINTH, Mollis | 8) | 518 | - | 6.3 | 871 | 1.68 | | | 79 | 47 | 1964-82 Hydrol.Jb. 1982 |
| 9a Walensee | 8) 9) | 554 | 1304 | 5.8 | 944 | 1.70 | | 227 (2.0) | 168 | 99 | 1910-31 JAECKLI 1958, AW 1939 |
| 9b Walensee | | | | | | | | 315 (2.0) | 233 | 137 | 1931-79 LAMBERT 1980 |
| 10 MELEZZA, Stausee Palagnedra | | 139 | (770) | - | 496 | 3.57 | 10) | 1400 (1.3) | 674 | 189 | 1953-78 VISCHER 1981 |
| 11 REUSS, Mühlaus | 11) | 653 | - | 0 | 1340 | 2.05 | | | 46 | 22 | 1977-82 Hydrol.Jb. 1982 |
| 12 RHEIN, Bad Ragaz | 12) | 4455 | 1440 | 2.5 | 6660 | 1.49 | | | 117 | 79 | 1964-82 Hydrol.Jb. 1982 |
| 13 Schmitter | 12) 13) | 6119 | 1393 | 2.0 | 9544 | 1.56 | | | 151 | 97 | 1966-82 Hydrol.Jb. 1982 |
| 14a Bodensee | 12) 13) 14) | 6961 | - | 1.7 | 11872 | 1.71 | | 513 (1.7) | 323 | 189 | 1921-31 AW 1939 |
| 14b Bodensee | | | | | | | | 425 (1.7) | 268 | 157 | 1921-51 JAECKLI 1958 |
| 14c Bodensee | | | | | | | | 470 (1.7) | 296 | 173 | 1969-79 VISCHER 1981 |
| 15 SEEZ, Walenstadt | | 198 | - | - | 440 | 2.22 | 15) | | 17 | 8 | 1971-75 Landeshydrologie 7) |
| 16 THUR, Bütschwil | | 303 | 545 | 0 | 579 | 1.91 | | | 26 | 14 | 1964-73 Landeshydrologie 7) |
| 17 Halden | | 1085 | 454 | 0 | 2075 | 1.91 | | | 80 | 42 | 1975-82 Hydrol.Jb. 1982 |
| 18 TICINO, Riazino | 16) | 1611 | 1440 | 1.1 | 2857 | 1.77 | | | 294 | 166 | 1979-82 Hydrol.Jb. 1982 |
| 19 MAGGIA, Lago Maggiore | 17) | 926 | 1328 | 0.9 | 2267 | 2.45 | | 262 (2.0) | 194 | 79 | 1932-53 VISCHER 1981 |
| 20 TICINO, VERZASCA und MAGGIA, Langensee | 16-18) | 2897 | - | - | 5892 | 2.03 | | 388 (2.0) | 287 | 141 | 1890-1932 JAECKLI 1958, AW 1939 |

- 1) Daten aus dem Hydrologischen Jahrbuch der Schweiz entnommen (BUNDESAMT FUER UMWELTSCHUTZ). Die Einzugsgebiete der grösseren natürlichen Seen sind subtrahiert.
- 2) Schwebstoffe und Geschiebe, in Klammer erfolgt die Abschätzung der Dichte der Sedimente (nach JAECKLI 1958). Für den Stausee Palagnedra nach Dichtebestimmungen an Proben aus Bohrungen (mitgeteilt von den Maggia-Werken).
- 3) Aus den Schwebstoffmessungen und den Deltavermessungen (Ablagerungsrate) errechnet für eine Dichte der Gesteine im Einzugsgebiet von ρ=2.7. Der im Delta vorhandene Anteil an Geschiebe ist eingeschlossen (ausser beim Stausee Palagnedra).
- 4) Angaben inklusive das Einzugsgebiet des Wohlensees (Stausee ab 1920), aber ohne Einzugsgebiet des Thunersees.
- 5) "nach ganz rohen und vorläufigen Erhebungen und Berechnungen" (AMT FUER WASSERWIRTSCHAFT 1939). Die Ablagerungen im Wohlensee sind eingeschlossen.
- 6) Ohne das Einzugsgebiet der natürlichen Seen und ohne das Einzugsgebiet des Sihlsees.
- 7) Werte der Schwebstoffmessungen zur Verfügung gestellt von Hr.Dr. Liskay, Landeshydrologie. Die Werte sind etwas zu klein (Oberflächenentnahmen)
- 8) Angaben inkl. das Einzugsgebiet des Stausees Limmern, ohne das Einzugsgebiet des Klöntalersees.
- 9) Angaben inkl. Einzugsgebiet von Flibach, V2 Muslenbach und V2 Filzbach
- 10) Auffangwirkungsgrad des Beckens 70%, Schwebstoffanteil 85-90% (VISCHER 1981). Der Wert ist entsprechend korrigiert. Dichte des trockenen Materials aus Bohrproben.
- 11) Ohne das Einzugsgebiet des Vierwaldstättersees.
- 12) Angaben inklusive das direkte Einzugsgebiet der Stauseen Curnera, Nalps, Sontga Maria, Zervreila, Sufers, Val di Lei, Marmorera, Davos, Mapragg
- 13) Angaben inklusive das direkte Einzugsgebiet der Stauseen Blons, Vermunt
- 14) Angaben inkl. das direkte Einzugsgebiet des Stausees Bolgenach
- 15) Siehe auch LAMBERT 1978: 6400 t/a
- 16) Angaben inkl. das direkte Einzugsgebiet der Stauseen San Bernardino, Luzzzone, Malvaglia, Ritom, Sella
- 17) Angaben inkl. das direkte Einzugsgebiet der Stauseen Palagnedra, Robiei, Zött, Sambuco
- 18) Angaben inkl. das direkte Einzugsgebiet des Stausees Verzasca

neigung (NEUENSCHWANDER 1944), der Vegetation und dem Niederschlagsregime ab. Man könnte etwas vereinfacht die Anlage des Gewässernetzes als eine Antwort der Natur auf die eben erwähnten Faktoren bezeichnen. Unter der *Flussdichte* wird in der Literatur der Quotient «wasserführendes Gewässernetz»/Einzugsgebietsgrösse verstanden. Die trockenen Gerinne sind in der Flussdichte also nicht berücksichtigt. Man findet aber nur wenige Arbeiten, die die Flussdichte untersuchen oder gar in Abtragsformeln einführen (FLAXMANN 1966, ZEMLJIC 1971).

Die Beziehung zwischen dem Quotienten «Gewässernetzlänge (inklusive trockene Gerinne)/Einzugsgebietsfläche» und der Schlammabtragsintensität ist auf Fig. 58 dargestellt. Zusätzlich zu den 23 Beispielen aus Tab. 49 sind je ein Wertepaar für das Einzugsgebiet des Sihlsees und das Einzugsgebiet der Minster eingesetzt worden. Für die Punkte in Fig. 58 wurde die Regressionsgerade errechnet. Die Stärke des Zusammenhanges der Wertepaare ist «mässig» (Korrelationskoeffizient $r = 0.354$). Mit einem Signifikanz-Test von r (mittels der t -Verteilung) erhält man eine Irrtumswahrscheinlichkeit zwischen 5 und 10% für die Aussage, dass ein linearer Zusammenhang zwischen x und y bestehe.

Für Fig. 58 sind folgende allgemeine, z.T. aber auch speziell einzelne Wertepaare betreffende *Einschränkungen* und *Bemerkungen* zu machen:

- Die Erfassung der Gewässernetzlänge hängt vom Massstab der betrachteten Kartenwerke ab (siehe auch RANGE 1961). Für die hier aufgeführten Beispiele wurde die Landeskarte der Schweiz 1 : 50 000 verwendet, teilweise auch Blätter des angrenzenden Auslandes im gleichen Massstab.
- Nach RANGE (1961) hängt die Grösse der Flussdichte stark vom Zeitpunkt der Kartenaufnahme ab (kartiert werden die zum Aufnahmezeitpunkt wasserführenden Gerinne!). Da in der vorliegenden Arbeit die trockenen Gerinne (Wasserführung nur bei Starkniederschlägen und während der Schneeschmelze) mitgezählt sind, schwächt sich dieses Argument ab. Neu erscheint aber das Problem der Ausscheidung der trockenen Gerinne beim Kartierungsprozess und beim Auswertungsprozess.
- Die Schlammabtragsintensität wurde für die Wertepaare in Fig. 58 auf zwei unterschiedliche Methoden ermittelt. Für die Punkte 1, 3, 4, 9a, 9b, 10, 14a, 14b, 14c, 19 und 20 wurde die Schlammabtragsintensität aufgrund von *Ablagerungsraten* errechnet. Alle anderen Wertepaare gehen auf *Schwebstoffdirektmessungen* an Wasserläufen zurück. Zwischen diesen zwei Gruppen fällt auf, dass sie in Fig. 58 gehäuft auftreten. Die aus Ablagerungsraten ermittelten Abtragsintensitäten sind meist deutlich höher, dies insbesondere auch für die Beispiele Linth und Rhein, für welche die Abtragsintensitäten sowohl

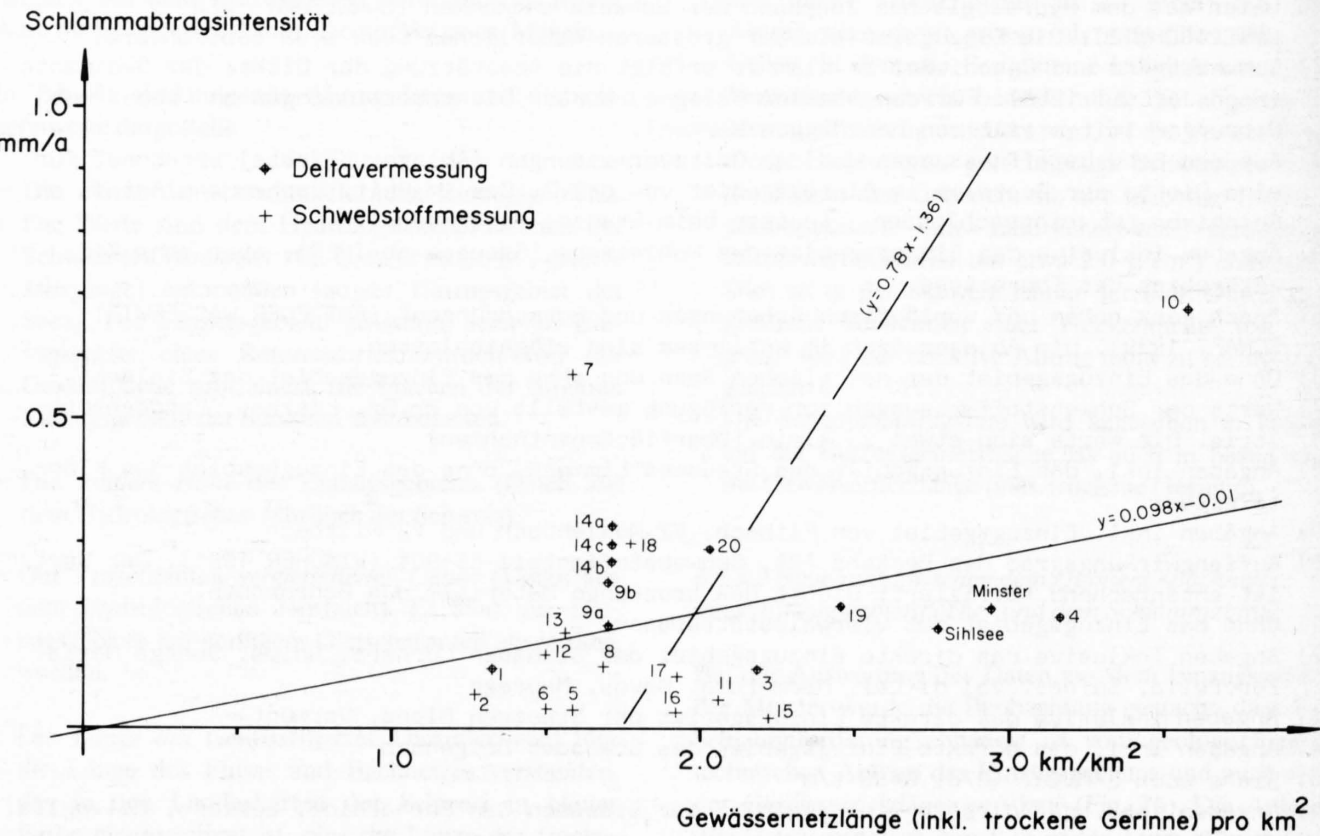


Fig. 58: Beziehung zwischen dem Quotient «Gewässernetzlänge (inkl. trockene Gerinne)/Einzugsgebietsfläche» und der Schlammabtragsintensität (Nummern gemäss Tab. 49)

aus Ablagerungsraten als auch aus Direktmessungen hergeleitet wurden. In der folgenden Zusammenfassung (6.5.4.3) wird diese Problematik weiter diskutiert.

- Eine Beziehung zwischen dem Wert Gewässernetzlänge/Einzugsgebietsgrösse und der Schlammproduktion kann nicht gewährleistet sein, wenn der Schlamm-Gebietsabtrag wesentlich durch *Gletscheraktivität* oder durch *Massenverlagerungen* zustande kommt (v.a. Rutschmassen, die kontinuierlich durch den Vorfluter abgetragen werden), oder wenn grossflächige Abschwemmung stattfindet. In Fig. 58 betrifft dies die Wertepaare 7 (Landquart, Rutschgebiete des Schraubachs) und 10 (Melezza, extreme Hochwasserereignisse). Einige Einzugsgebiete mit publizierten Schwebstofffrachten sind in Fig. 58 nicht berücksichtigt (d.h. die Gewässernetzlängen sind nicht ermittelt worden), da wesentliche Flächenanteile der Einzugsgebiete vergletschert sind.

6.5.4.3 Zusammenfassung der Resultate

Auf Tab. 49 sind Schlammabtragsraten abgeleitet worden. Als Ausgangsdaten wurden einerseits *Schwebstoffmessungen* an Flüssen, andererseits aber auch *Deltavermessungen* verwendet. Die Deltas enthalten nebst Schwebstoffen auch Anteile des Flussgeschiebes (v.a. Sand), hingegen ist aber der Anteil Schwebstoffe, der sich deltafern als Seebodensediment abgelagert hat, nicht enthalten.

Für die Beispiele *Rhein* und *Linth* sind die Abtragsraten sowohl aus Schwebstoffmessungen als auch aus Deltavermessungen abgeleitet worden. Es ergaben sich deutlich höhere Abtragsraten, wenn die Deltavermessungen als Basisdaten dienten. Die Punkte in Fig. 58 treten gehäuft in einer Gruppe Deltavermessungen (generell höhere Abtragsintensitäten) und einer Gruppe Schwebstoffmessungen (generell tiefere Abtragsintensitäten) auf. Deshalb zeigen vermutlich die Wertepaare in Fig. 58 nur eine «mässige» Stärke des Zusammenhanges ($r = 0.354$).

Gründe für die Tatsache, dass die Schwebstoffmessungen und die Deltavermessungen nicht dasselbe Resultat ergeben, sind vor allem folgende: Die *Schwebstoffmessungen* sind sehr fehlerbehaftet, da es sich nicht um kontinuierliche Messungen handelt (meist 2 Messungen pro Woche). Die Jahresfrachten müssen rechnerisch ermittelt werden. Gemäss Fig. 58 muss man vermuten, dass die Jahresschwebstofffrachten zu gering sind (Frachten bei Hochwasser?). Die aus den *Deltavermessungen* erhaltenen Abtragsintensitäten könnten ihrerseits etwas zu hoch sein, da für die Umrechnung relativ hohe Trockendichten für die Sedimente eingesetzt sind (die Werte wurden aus JÄCKLI 1958 übernommen). Im Sihlsee und im Bacino di Malvaglia wurden zum Vergleich im Mittel Trockendichten von ca. 0.9 g/cm^3

gemessen, allerdings nur für sehr oberflächennahe Seebodensedimente (nahe den Mündungen der Zuflüsse ergaben sich Werte bis 1.3 g/cm^3 , vgl. Fig. 20 und 35). Die Sedimente im Palagnedra-Stausee hatten eine Trockendichte von ca. 1.3 g/cm^3 (Mitteilung der Maggiawerke). Wie eingangs erwähnt, muss auch beachtet werden, dass die Schwebfracht der Flüsse nicht nur im Delta zur Ablagerung kommt und dass andererseits das Delta auch Geschiebeanteile umfasst.

Die *Schlammabtragsrate* ist am höchsten im Einzugsgebiet der *Landquart* und der *Melezza* (um $600 \text{ m}^3/\text{km}^2 \times \text{a}$). Bei der Landquart spielt der geologische Aufbau des Einzugsgebietes die wesentliche Rolle für die hohe Schwebstofffracht. Flysch und Bündnerschiefer bauen einen grossen Teil des Einzugsgebietes auf, mit stark geschieferten Kalken, Mergelschiefen und Sandsteinen (siehe auch Fig. 49). Ein Charakteristikum dieser Gesteine ist es, dass die kleinsten Gesteinskomponenten die Grösse von Sand, Silt und Ton aufweisen und im Gestein nur schlecht verkittet sind. Wesentlich ist aber auch der Umstand, dass Bündnerschiefer und Flysch zu Rutschungen neigen (beispielsweise die Bündnerschiefer im Einzugsgebiet des Schraubachs).

Das Einzugsgebiet der *Melezza* baut sich vorwiegend aus Gneisen, Schiefen und ultrabasischen Gesteinen auf. Ein Charakteristikum des Flusssandes der Melezza ist der hohe Glimmeranteil. Sehr erstaunlich ist die hohe Flussdichte (inkl. trockene Gerinne) im Einzugsgebiet der Melezza. Insbesondere die Länge der trockenen Gerinne ist sehr hoch und mitentscheidend für den hohen Abtrag. Über die Hochwasserkatastrophe im Einzugsgebiet der Melezza Anfang August 1978 und deren Auswirkungen geben ZELLER & RÖTHLISBERGER (1979), CONCA (1979) und MARTINI (1981) Auskunft.

Ein grösserer Teil der aufgeführten Flusssysteme liefert $100 - 300 \text{ m}^3/\text{km}^2 \times \text{a}$. Die meisten von ihnen entwässern grosse Gebiete und haben entscheidende Anteile ihres Einzugsgebietes im Alpenraum (Linth, Rhein, Ticino, Maggia, Ticino/Verzasca/Maggia). Bei allen ist die mittlere Höhe des Einzugsgebietes dementsprechend hoch, und einige Flächenprozent des Einzugsgebietes sind vergletschert. Entsprechend der geologischen Vielfalt der Alpen und wegen der Grösse der meisten dieser Flusssysteme umfassen diese grossen Einzugsgebiete auch verschiedenartige Gesteinstypen. Skizzen über den geologischen Aufbau des Rhein- und Linthgebietes finden sich beispielsweise in der Veröffentlichung über Deltaaufnahmen (AMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT 1939b).

Tiefe spezifische Schlammabtragsraten (weniger als $100 \text{ m}^3/\text{km}^2 \times \text{a}$) haben einige grössere Flusssysteme, deren Einzugsgebiete vorwiegend im Mittelland liegen (Aare, Emme, Reuss, Thur), aber auch die folgenden kleineren Systeme im Alpenraum: Baye de Montreux,

Grande Eau, Seez. Das Verhältnis «Gewässernetzlänge (inkl. trockene Gerinne)»/Einzugsgebietsfläche ist bei den aufgeführten Beispielen unterschiedlich. Ins Auge springt das Beispiel der Thur, wo sich die Schwebstoffabtragsrate bei gleichbleibendem Verhältnis «Gewässernetzlänge (inklusive trockene Gerinne)»/Einzugsgebietsfläche zwischen Bütschwil und Halden verdreifacht. Dies hängt sicher mit dem Zufluss der Sitter zusammen, die vorwiegend Gebiete in der Molasse entwässert.

Betrachtet man die Schlammfracht in bezug auf die Gewässernetzlänge (anstelle der Einzugsgebietsfläche, also in der Dimension $\text{m}^3/\text{km} \times a$), so erhält man grundsätzlich dasselbe Bild wie bei der Betrachtung bezogen auf die Einzugsgebietsfläche. Dies ist damit zu begründen, dass die meisten der betrachteten Einzugsgebiete ähnliche Werte «Gewässernetzlänge (inkl. trockene Gerinne)»/Einzugsgebietsgrösse aufweisen (1.2–2.2). Höhere Werte weisen aber vor allem die im südlichen Alpenraum liegenden Einzugsgebiete auf. Dies dürfte mit dem Niederschlagsregime in diesen Gegenden zusammenhängen.

Der Schlammabtrag ist in der Schweiz unter anderem wegen der dichten Vegetationsdecke, der vor allem im Alpenraum noch herrschenden Hebungstendenz (DIEBOLD & MÜLLER 1985) und der glazigen geprägten

Landschaft nicht homogen über die ganze Weite der Landschaft verteilt. Die errechneten Schlammabtragsraten (Tab. 49) stellen aber Mittelwerte über die ganze betrachtete Fläche dar, obwohl der wirkliche Abtrag sicher nicht gleichmässig über das jeweilige Einzugsgebiet stattfindet, sondern wahrscheinlich kausal eng mit dem Gewässernetz verknüpft ist. Reduziert man die Betrachtung des Schlammabtrages im Einzugsgebiet eines Flusses deshalb auf einen Streifen von insgesamt 50 Meter Breite entlang der Wasserläufe (inkl. trockene Gerinne), d.h. je 25 Meter auf jeder Seite des Gewässerlaufes, so ergeben sich für die betrachteten Streifen um ein Vielfaches erhöhte Abtragsraten. Die errechneten Werte schwanken zwischen $0.16 \text{ mm}/\text{km}^2 \times a$ (Seez) und $7 \text{ mm}/\text{km}^2 \times a$ (Landquart) für diesen nur 50 Meter breiten Streifen. Diese Betrachtungsweise ergibt einen Hinweis auf die mögliche *Tiefenerosion*, vermag aber lediglich die Grössenordnung aufzuzeigen. In der Natur schreitet die angenommene Tiefenerosion natürlich nicht ungehemmt voran. Zu Tage tretende tiefere geologische Einheiten behindern die weitere Tiefenerosion und geben eventuell zu Veränderung der Wasserläufe Anlass. Die Materialzulieferung in die Gewässer geschieht teilweise durch Massenbewegungen, deren Einzugsgebiet den angenommenen 50 Meter breiten Streifen bei weitem übertreffen kann, andererseits gibt es aber auch viele Bachabschnitte, in deren Uferbereichen kaum Abtrag stattfindet.

7 ANWENDUNG UND AUSBLICK

Die vorliegende Arbeit untersucht Sedimente im Korngrößenbereich der Silte. Mengenmässig spielt diese Sedimentgruppe weltweit eine sehr wichtige Rolle. Die Untersuchung stellt eine Ergänzung zu Arbeiten dar, die Aufbau und Herkunft feinerkörniger (Tone) oder gröberkörniger Sedimente (Sande und Kiese) qualitativ untersuchen. Zusätzlich wird aber versucht, den Schritt von der qualitativen zu einer vermehrt quantitativen Behandlung zu gehen. Zu diesem Zwecke wurde ein *Untersuchungsverfahren* erarbeitet, das u.a. moderne zur Verfügung stehende Hilfsmittel beansprucht (Röntgendiffraktometer, Computerauswertung). Dieses Verfahren lässt sich für relativ-quantitative Herkunftsbestimmungen von Schlamm anwenden. Sind Angaben über absolute Mengen bekannt, so können die relativ-quantitativen Werte geeicht werden.

Praktisch angewendet erlaubt das Untersuchungsverfahren rasche Aussagen über das Verhältnis der Schlammanlieferung zweier zusammenfliessender Bäche für eine gewünschte Korngrösse im Schlammbereich. Die für die Verlandung einer Stauhaltung verantwortlichen Teile eines Einzugsgebietes können derart eingeteilt und bestimmt werden. Eine Eichung der relativen Aussage ist aber nötig, wenn absolute Werte benötigt werden.

Das Ziel weiterer Untersuchungen müsste es sein, mittels moderner Untersuchungsmethoden ein Untersuchungskonzept für das ganze Kornspektrum zu entwickeln im Hinblick auf eine quantitative Behandlung des Gesamtabtrages.

Untersuchungen über den Abtrag (und hier insbesondere über den Schlammabtrag) sind prinzipiell auf drei Arten möglich:

- a) *Quantitative* Erfassung des Abtragsgutes in einem Querschnitt des Transportprofils oder quantitative Erfassung der akkumulierten Sedimentmengen an ihren Ablagerungsorten. In dieser Arbeit sind in Kapitel 6 zahlreiche quantitative Daten für den Schlammabtrag aufgearbeitet.
- b) *Relativ-quantitative Erfassung* durch genaue Beschreibung und Vergleich des abgetragenen Materials mit bekannten Ausgangsmaterialien. Es resultieren relative Aussagen, die durch quantitative Angaben geeicht werden müssen. In der vorliegenden Arbeit konnte das eingangs erwähnte erarbeitete Untersuchungsverfahren für den Schlammabtrag

angewendet werden. Es erfasst den Schlamm mittels sieben Komponenten und analysiert dessen Herkunft durch Vergleich mit Schlamm bekannter Herkunft. Es wird gezeigt, dass sich bei konsequenter Anwendung dieses Verfahrens Abtragskarten konstruieren lassen, die die aktuelle Abtragungssituation kleinräumlich beschreiben. Unter günstigen Verhältnissen lassen sich auch fossile Ablagerungen auf die Herkunft untersuchen. Ein mögliches Ziel könnte es sein, die Methodik auch für das Geschiebe anzuwenden.

- c) *Quantitativ-deskriptive Erfassung* mittels Feldkartierungen. Der Vorteil der Feldkartierung ist, dass das Untersuchungsgebiet als Ganzes bis zu sehr kleinen Gebietseinheiten erfasst werden kann. Es ist allerdings schwierig, spezifische Kartierungskriterien auszuwählen. Die anvisierte Korngrösse des Abtragmaterials ist frei wählbar, orientiert sich aber gezwungenermassen am Transportmechanismus (Schwebstoff, Geschiebe, Massentransport) und der betrachteten Problematik. In der vorliegenden Arbeit wurde eine Feldkartierung im Einzugsgebiet des Sihlsees ausgeführt und detailliert ausgewertet. Ihr Titel lautet: «Gewässersohlenqualifizierung und Kartierung der Schlammquellen im Einzugsgebiet der Minster».

Die unter a) bis c) diskutierten Abtragsuntersuchungen beschreiben im wesentlichen den *Ist-Zustand*.

Die Rekonstruktion des *War-Zustandes* (d.h. der fossilen Topographie) ist schwieriger, unter Miteinbezug von Resultaten aus fossilen Sedimenten aber eventuell möglich.

Für die Ermittlung des *Wird-Zustandes* kann man drei Stufen unterscheiden:

- a) Übersichtsanalyse mittels Vergleichsdaten aus der Literatur. Dadurch wird der äussere Rahmen für ein grösseres Teilgebiet abgesteckt.
- b) Detailanalyse der zukünftigen Entwicklung über eine kurze Zeitspanne. Feldkartierungen und Abtragskarte, wie sie in dieser Arbeit ausgeführt wurden, können hier als Grundlage benützt werden. Sie erlauben Aussagen über die kurzfristige Entwicklung. Feldkartierungen beschreiben den status quo und könnten als Vergleichsbasis für die Entwicklung der Abtragungssituation dienen, dies insbesondere auch im Zusammenhang mit den heute auftretenden Waldschäden.

c) Detailanalyse der zukünftigen Entwicklung über eine lange Zeitspanne. Hier muss zusätzlich die durch Abtragsvorgänge verursachte dynamische Veränderung eines Untersuchungsgebietes mitberücksichtigt

werden. Diese Veränderung umfasst die Verlagerung des Gewässernetzes durch die Abtragsereignisse und Folgeerscheinungen wie Massenbewegung und Freilegung leicht abtragbarer Gesteine.

LITERATURVERZEICHNIS

- AMMANN, M. (1981): Die Herkunft der feinkörnigen Sedimente in Stauräumen in Abhängigkeit der geologischen Verhältnisse im Einzugsgebiet. - Mitt. Versuchsanst. Wasserbau, Hydrol. u. Glaziol. 53, 41-48.
- BAUER, F. (1965): Der Geschiebehaushalt der bayerischen Donau im Wandel wasserbaulicher Massnahmen. - Die Wasserwirtsch. 55/4+5.
- BAUER, F. (1968): Die Verlandung in natürlichen Seen, Talsperren und Flusskraftwerkstrecken. - Festschr. Kongr. u. Ausst. Wasser Berlin 1968.
- BAUER, F. & BURZ, J. (1968): Der Einfluss der Feststoffführung alpiner Gewässer auf die Stauraumverlandung und Flussbetteintiefung. - Die Wasserwirtsch. 58/4, 114-121.
- BLOOM, A.L. (1976): Die Oberfläche der Erde. Geowissen kompakt. - Enke, Stuttgart.
- BOGARDI, J. (1956): Über die Zu- und Abnahme des Schwebstoffgehaltes in den Flüssen mit der Änderung des Abflusses. - Die Wasserwirtsch. 47/3, 59-66.
- BONNARD, D. & BRUSCHIN, J. (1970): Transports solides en suspension dans les rivières suisses. - Bulletin tech. Suisse romande 96/6, 91-96.
- BRUNE, G.M. (1953): Trap efficiency of reservoirs. - Trans. geophys. Union 34, 407-418.
- BRUSCHIN, J. & BERNEY, O. (1971): Transports solides en suspension dans les rivières suisses. - Bulletin tech. Suisse Romande 97/14, 337-343.
- BUNDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ (1982): Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz. - Eidg. Dep. des Innern, Bern.
- BUNDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (1982): Hochwasserschutz an Fliessgewässern, Wegleitung 1982. - Eidg. Verkehrs- u. Energiewirtschaftsdep., Bern.
- BUNZA, G. (1975): Gefahrenherde im Gebiet des Kalserbaches (Osttirol) und ihre Kartierung. - Int. Symp. Interpraevent 1975/1, 329-343.
- BURZ, J. (1958): Abgrenzung der Schwebstoff- und Sohlenfracht. - Die Wasserwirtsch. 48/14, 387-389.
- COLOMBI, C., GEES, R.A., HAEFELI, CH., KELLERHALS, P., SCHINDLER, C. & ZINGG, M.A. (1985): Exkursion der Schweizerischen Geologischen Gesellschaft vom 7./8. Oktober in den Kantonen Obwalden und Bern. - Eclogae geol. Helv. 78/1, 205-214.
- CONCA, A. (1979): L'alluvione del 7/8 agosto 1978. - Wasser, Energie, Luft 71/10, 202-206.
- CORBEL, J. (1964): L'érosion terrestre, étude quantitative. - Ann. Geogr. 73/398, 385-412.
- DENDY, F.E. & CHAMPION, A. (1969): Summary of Reservoir Sediment Deposition Surveys made in the United States through 1965. - Misc. Publ. 1143, U.S. Dept. Agric.
- DIEBOLD, P. & MÜLLER, W.H. (1985): Szenarien der geologischen Langzeitsicherheit: Risikoanalyse für ein Endlager für hochaktive Abfälle in der Nordschweiz. - Nagra Tech. Ber. 84-26 (NTB 84-26).
- DOORKAMP, J.C., BRUNSDEN, D., RUSSELL, J.R., KULASINGHE, A.N.S. & GOSSCHALK, E.M. (1982): A Geomorphological Approach to the Assessment of Reservoir Slope Stability and Sedimentation. - Quatorzième Congr. Grands Barrages, Rio de Janeiro 1982.
- EIDG. AMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (1939a): Untersuchungen in der Natur über Bettbildung, Geschiebe und Schwebstoffführung. - Mitt. Amt Wasserwirtsch. 33.
- EIDG. AMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (1939b): Deltaufnahmen des Eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft. - Mitt. Amt Wasserwirtsch. 34.
- FLAXMANN, E.M. (1966): Some Variables which influence rates of Reservoir Sedimentation in Western United States. - Int. Assoc. Sci. Hydr., Symp. Garda Oct. 1966.
- FLEMING, G. (1968): The Stanford Sediment Model 1: Translation. - Bull. Int. Assoc. Sci. Hydr. 12, 108-125.
- FOURNIER, F. (1960): Climat et érosion. - Presses Univ. de France, Paris.
- FÜGNER, D. (1975): Anthropogener Einfluss auf die Schwebstoffführung fliessender Gewässer. - Wasserwirtsch.-Wassertech. 25/1, 26-28.
- FÜGNER, D. (1980): Zur mathematisch-statistischen Analyse und zur regionalen Verallgemeinerung des Schwebstofftransports fliessender Gewässer. - Wasserwirtsch.-Wassertech. 30/7, 228-231.
- GANSSEN, R. (1968): Trockengebiete. (B.I.-Hochschultaschenbücher 354/354a*). - Bibliographisches Institut, Mannheim/Zürich.
- GESCHÄFTSLEITUNG DES KONSORTIUMS BLENIO WASSERKRAFTWERKE (1956): Der Ausbau der Wasserkräfte des Bleniotales. - Wasser- u. Energiewirtsch. 48/1, 1-14.
- GROSSE, B. (1955): Die Bodenerosion in Westdeutschland. Ergebnisse einiger Kartierungen, mit 5 Karten 1:25 000. - Mitt. Inst. Raumforsch. Bonn 11.
- GÜBELI-LITSCHER, O. (1948): Chemische Untersuchung von Mineralwässern. - Univ. Verlag Wagner, Innsbruck.
- HAHN, CH. (1969): Mineralogisch-sedimentpetrographische Untersuchungen an den Flussbettsanden im Einzugsbereich des Alpenrheins. - Eclogae geol. Helv. 62/1, 227-278.
- HAMPEL, R. (1965): Die Bedeutung der Hochlagenaufforstung für Wildbäche und Lawinen. - Die Wasserwirtsch. 55/10, 329-332.

- HANTKE, R. UND MITARBEITER (1967): Geologische Karte des Kantons Zürich und seiner Nachbargebiete. - 1:50 000. Vjschr. natf. Ges. Zürich 112/2.
- HARTUNG, F. (1959): Ursache und Verhütung der Stauraumverlandung bei Talsperren. - Die Wasserwirtsch. 49/1, 3-13.
- HEMPEL, L. (1951): Über die Messbarkeit von Boden-erosion. - Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk. 55.
- HEMPEL, L. (1968): Bodenerosion in Süddeutschland. Erläuterungen zu Karten von Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Rheinland-Pfalz und Saarland. Mit 26 Karten. Forschungen zur Deutschen Landeskunde 179. - Veröff. Zentrallausschuss Landeskd. u. Inst. Landeskd. 179.
- HINRICH, H. (1974): Schwebstoffgehalt, Gebietsniederschlag, Abfluss und Schwebstofffracht der Ems bei Rheine und Versen in den Jahren 1965 bis 1971. - Dtsch. gewässerkd. Mitt. 18/4, 85-95.
- HINRICH, H. (1979): Schwebstoffgehalt, Schwebstofffracht und «Schwebstoffspende» der Saar in den Jahren 1963-1977. - Die Wasserwirtsch. 69/4, 118-125.
- HJULSTRÖM, F. (1935): Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. - Bull. geol. Instn. Univ. Uppsala 25, 221-527.
- HÜRZELER, H. (1938): Baugrunduntersuchungen und erdbauliche Erfahrungen beim Bau des Etzelwerkes. - Wasser- u. Energiewirtsch. 30/(7/8).
- INTERNATIONAL ASSOCIATION OF HYDROLOGICAL SCIENCES (1981): Erosion and sediment. Transport measurement. - Proc. Florence Symp. Juni 1981.
- JACKY, W. (1936): Die Bauarbeiten am Etzelwerk. - Schweiz. Baumeisterztg. «Hoch- u. Tiefbau» 1936/(34-36).
- JÄCKLI, H. (1948): Geröllstudien am Hinterrhein. - Wasser-u. Energiewirtsch. 40/9.
- JÄCKLI, H. (1953): Geologische Eigentümlichkeiten der Geschiebeherde des bündnerischen Rheingebietes. - Wasser- u. Energiewirtsch. 45/(8,9), 189-197.
- JÄCKLI, H. (1957): Gegenwartsgeologie des bündnerischen Rheingebiets. - Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser. 36.
- JÄCKLI, H. (1958): Der rezente Abtrag der Alpen im Spiegel der Vorland-Sedimentation. - Eclogae geol. Helv. 51/2, 354-365.
- KARL, J., DANZ, W. & MANGELSDORF, J. (1969): Der Einfluss des Menschen auf die Erosion im Bergland. - Schriftenr. bayer. Landesst. Gewässerkd. 1.
- KHOSLA, A.N. (1953): Silting of Reservoirs. - Central Board Irrigation & Power, Publ. 51.
- KIENHOLZ, H. (1977): Kombinierte geomorphologische Gefahrenkarte 1:10 000 von Grindelwald mit einem Beitrag von Walter Schwarz. - Geographica bernensia G4.
- KIRKBY, M.J. & MORGAN, R.P.C. (1980): Soil Erosion. - John Wiley & Sons, Chichester/New York/Brisbane/Toronto.
- KRESSER, W. (1964): Gedanken zur Geschiebe- und Schwebstoffführung der Gewässer. - Österr. Wasserwirtsch. 16/(1/2), 6-11.
- LAMBERT, A. (1978): Eintrag, Transport und Ablagerung von Feststoffen im Walensee. - Eclogae geol. Helv. 71/1, 35-52.
- LAMBERT, A. (1980): Die Entwicklung des Linthdeltas im Walensee zwischen 1931 und 1979. - Eclogae geol. Helv. 73/3, 867-880.
- LAMBERT, A. (1985): Flüsse auf Tauchfahrt, Sedimenttransport durch submarine Trübestrome. - Neue Zürcher Ztg. 206/94, 67.
- LESER, H., SCHMIDT, R.-G. & SEILER, W. (1981): Bodenerosionsmessungen im Hochrheintal und Jura (Schweiz). - Peterm. geogr. Mitt. 81/2, 83-91.
- LI, Y.H. & ERNI, P.E. (1974): Erosionsgeschwindigkeit im Einzugsgebiet des Rheins (Faktorenanalyse und geochemische Massenbalance). - Vom Wasser 43.
- LICHTENHAHN, C. (1977): Flussbau (erweiterte Vorlesung). - Eidg. Tech. Hochschule Zürich, unveröffentlicht.
- MARTINI, O. (1981): Die Hochwasserkatastrophe 1978 am Ausgleichsbecken Palagnedra. - Mitt. Versuchsanst. Wasserbau, Hydrol. u. Glaziol. 53, 233-239.
- MATOUSEK, F. (1985): Hydrogeologie und Hydrogeochemie des Waldenburger Tales (Baselbieter Jura). - Diss. ETH-Zürich Nr.7829.
- MEADE, R.H. (1969): Errors in using modern streamload data to estimate natural rates of denudation. - Bull. geol. Soc. Amer. 80, 1265-1274.
- MEYER-PETER, E. (1938): Verlandung der Staubecken und Stauhaltungen von Kraftwerken. - Wasser- u. Energiewirtsch. 30/9-11.
- MEYER-PETER, E. & MÜLLER, R. (1949): Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebes. - Schweiz. Bauztg. 67/3, 29-32.
- MOHR, CH. (1979): Determination of soil organic matter by titration. - Väg-och vattenbyggaren 1979/(7/8), 19-21.
- MOSER, M. (1971): Zahl, Form, Vorgang und Ursache der Anbruchsbildung und ihre Beziehungen zum geologischen Untergrund im Bereich des mittleren Lesachtales (Kärnten). - Int. Symp. Interpretation 1971/1, 35-48.
- MOSER, M. (1973): Analyse der Anbruchsbildung bei den Hochwasserkatastrophen der Jahre 1965 und 1966 im mittleren Lesachtal (Kärnten). - Carinthia II 83, 179-234.
- MÜCKENHAUSEN, E. (1954): Die Bodenerosion durch Wasser in Deutschland im Vergleich zu anderen Ländern. - Wasser u. Boden in der Landschaftspfl. 1954.
- MÜLLER, G. (1964): Methoden der Sediment-Untersuchung. In: ENGELHARDT, W. von, FÜCHTBAUER, H. & MÜLLER, G. (1964-1973): Sediment-Petrologie, Bd.1. - Schweizerbart, Stuttgart.
- MÜLLER, G. (1966): Die Sedimentbildung im Bodensee. - Naturwissenschaften 53/10, 237-247.
- NATIONS UNIES (1954): Le problème de la sédimentation. - Nations Unies, Comm. écon. pour l'Asie et l'extrême-orient, New York.
- NEUENSCHWANDER, G. (1944): Morphometrische Begriffe. Eine kritische Übersicht auf Grund der Literatur. - Diss. Univ. Zürich.

- NICKEL, E. (1971): Grundwissen in Mineralogie, Teil I: Grundkursus. - Ott, Thun/München.
- NIPPES, K.R. (1971): Die Schwebstoffführung eines Schwarzwaldflusses, dargestellt am Beispiel der Dreisam. - Diss. Albert-Ludwigs-Univ. zu Freiburg i.Br.
- NIPPES, K.R. (1975): Neue Möglichkeiten zur Berechnung von Schwebstofffrachten in Gebirgsbächen. - Int. Symp. Interpraevent 1975/3.
- NYDEGGER, P. (1967): Untersuchungen über Feinstofftransport in Flüssen und Seen, über Entstehung von Trübungshorizonten und zuflussbedingten Strömungen im Brienzersee und einigen Vergleichsseen. - Beitr. Geol. Schweiz, Hydrol. 16.
- OEXLE, V. (1936): Die Schwebstoff- oder Schlammführung der geschiebeführenden Flüsse in Bayern. - Wasserkraft u. Wasserwirtsch. 31/11.
- PARTL, R. (1976): Auswirkungen einiger Umweltfaktoren auf Sperrenbauwerke und Speicher. Zahlenmäßige Analysen von Stauraumverlandungen. - Die Talsperren Österr., Österr. Beitr. 12. Talsperrenkongr. Mexico 1976.
- PETERS-KÜMMERLY, B.E. (1973): Untersuchungen über Zusammensetzung und Transport von Schwebstoffen in einigen Schweizer Flüssen. - Geographica helv. 28/3, 137-151.
- PETERSON, A.E., SWAN, J.B., STELLY, M., KRAL, D.M. & NAUSEEF, J.H. (1979): Universal Soil Loss Equation: Past, Present, and Future. - Soil Sci. Soc. Amer., Spec. Publ. 8.
- PETTJOHN, E.J. (1975): Sedimentary Rocks. Third edition. - Harper & Row, New York/Evanston/San Francisco/London.
- PIGNATTI, S. (1971): Erosionsstudien im Gebiet um Sauris in den italienischen Karnischen Alpen. - Schriftenr. Raumforsch. u. Raumpl. 11, 30-31.
- PONCANO, W.L., GIMENEZ, A.F., LEITE, C.A.G., CARLSTRON FILHO, C., PRANDINI, F.L. & DE MELO, M.S. (1982): Silting of Reservoirs in Southern Brazil - First Results and a Methodological Approach. - Comm. Int. Grands Barrages, 14ième Congr. Grands Barr. Rio de Janeiro 1982.
- QUERVAIN, F. DE & FREY, F. (1963, 1965, 1967): Geotechnische Karte der Schweiz 1:200 000, Erläuterungen zu Blätter Nr.2-4, 2. Aufl. - Kümmerly & Frey, Bern.
- QUERVAIN, F. DE & HOFMÄNNER, F. (1964): Geotechnische Karte der Schweiz 1:200 000, Erläuterung zu Blatt Nr.1, 2. Aufl. - Kümmerly & Frey, Bern.
- QUERVAIN, F. DE, FREY, D., HOFMÄNNER, F. & JENNY, V. (1963, 1965, 1967): Geotechnische Karte der Schweiz 1:200 000, Blätter Nr. 2-4, 2. Aufl. - Kümmerly & Frey, Bern.
- QUERVAIN, F. DE, HOFMÄNNER, F., JENNY, V. & KÖPEL, V. (1964): Geotechnische Karte der Schweiz 1:200 000, Blatt Nr.1, 2. Aufl. - Kümmerly & Frey, Bern.
- RANGE, W. (1961): Morphometrische Untersuchungen in den Einzugsgebieten der bayerischen Alpenflüsse. - Veröff. Arbeitsber. bayer. Landesst. Gewässerkd. München.
- REINECK, H.E. (1963): Der Kastengreifer. - Natur u. Museum 93/3, 102-108.
- REMY-BERZENCovich, E. (1960): Analyse des Feststofftriebes fließender Gewässer. - Schriftenr. Österr. Wasserwirtschaftsverb. 41.
- RULA, B., STEFANOVIC, P., CVETKOVIC, M. & KOVACEVIC, B. (1971): Die spezifischen Einflüsse des biologischen Schutzes auf die Oberflächenerosion des Bodens. - Int. Symp. Interpraevent 1971/2, 333-344.
- SCHINDLER, C. (1974): Zur Geologie des Zürichsees. Eclogae geol. Helv. 67/1, 163-196.
- SCHINDLER, C., FISCH, W., STREIF, F.P., AMMANN, B. & TOBOLSKI, K. (1985): Vorbelastete Seeablagerungen und Schieferkohlen südlich des Walensees. - Untersuchungen während des Baus der Nationalstrasse N3. - Eclogae geol. Helv. 78/1, 167-196.
- SCHOKLITSCH, A. (1942): Die Schweb- und Geschiebefracht italienischer Flüsse. - Wasserkraft u. Wasserwirtsch. 37/6, 135-139.
- SCHOKLITSCH, A. (1950): Handbuch des Wasserbaues (2.Aufl.). - Springer, Wien.
- SLAYMAKER, O. (1977): Estimation of sediment yield in temperate alpine environments. - Int. Assoc. Hydrol. Sci., Publ. 122.
- SOMMER, N. (1980): Untersuchungen über die Geschiebe- und Schwebstoffführung und den Transport von gelösten Stoffen in Gebirgsbächen. - Int. Symp. Interpraevent 1980/4, 69-94.
- SOMMER, N. & LAUFFER, H. (1982): Untersuchungen über den Feststofftransport in Gebirgsbächen der Ostalpen. - Die Talsperren Österr., Österr. Beitr. 14. Int. Talsperrenkongr. Rio de Janeiro 1982.
- SPRABERRY, U.A. (1964): Summary of reservoir sediment deposition surveys made in the US 1960. - Washington 1964.
- STEPANOV, J.N. (1966): Soil erosion in Turkmenia. - Soviet Soil Sci. 1966/1.
- STERN, R. (1971): Kartierung von Wildbächen im Lesachtal (Kärnten). - Sonderh. Carinthia II 28, 193-207.
- STINY, J. (1931): Die geologischen Grundlagen der Verbauung der Geschiebeherde in Gewässern. - Springer, Wien.
- STRELE, G. (1932): Geschiebequellen der Bäche und Flüsse. - Schweiz. Bauztg. 100/(18-19).
- TOY, T.J. (1977): Erosion: Research Techniques, Erodibility and Sediment Delivery. - Geo Abstracts Ltd. Norwich (England).
- VANONI, V.A. (1975): Sedimentation Engineering. - Amer. Soc. Civil Eng., New York.
- VEREINIGUNG SCHWEIZERISCHER STRASSENFACHMÄNNER (VSS) (1959): Klassifikation der Lockergesteine, Feldmethode nach USCS. Normblatt SNV 670 005. - Schweiz. Normenver. (SNV), Zürich.
- VISCHER, D. (1981): Verlandung von Flusstauhaltungen und Speicherseen. Einführung in das Thema. - Mitt. Versuchsanst. Wasserbau, Hydrol. u. Glaziol. 53, 9-25.
- VISCHER, D. & HUBER, A. (1978): Wasserbau. - Springer, Berlin/Heidelberg/New York.

- WESTRICH, B. (1979): Diskussionsbeitrag zum Aufsatz Helmut Hinrich: Schwebstoffgehalt, Schwebstofffracht und Schwebstoffspende der Saar in den Jahren 1963 bis 1977. - Die Wasserwirtsch. 69/10, 326.
- ZACHAR, D. (1982): Soil Erosion. - Dev. Soil Sci. 10. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam/Oxford/ New York.
- ZELLER, G. (1964): Morphologische Untersuchungen in den östlichen Seitentälern des Val Blenio. - Beitr. Geol. Schweiz, Hydrol. 13.
- ZELLER, J. (1963): Einführung in den Sedimenttransport offener Gerinne - Schweiz. Bauztg. 81/(34-36).
- ZELLER, J. & RÖTHLISBERGER, G. (1979): Unwetter-schäden in der Schweiz im Jahre 1978. - Wasser, Energie, Luft 71/(5/6), 103-108.
- ZELLER, J. & RÖTHLISBERGER, G. (1980): Unwetter-schäden in der Schweiz im Jahre 1979. - Wasser, Energie, Luft 72/4, 127-134
- ZEMLJIC, M. (1971): Calcul du débit solide - Evaluation de la végétation comme un des facteurs antiérosifs. - Int. Symp. Interpraevent 1971/2, 359-371.
- ZIEGLER, A. (1981): Verlandungen beim Etzelwerk. - Mitt. Versuchsanst. Wasserbau, Hydrol. u. Glaziol. 53, 215-222.

ANHANG

Beilage:

Feldkartierung: «Gewässersohlenqualifizierung und Kartierung der
Schlammquellen im Einzugsgebiet der Minster»

Gewässersohlenqualifizierung und Kartierung der Schlammquellen
im Einzugsgebiet der Minster

- S₁: Eintiefende Sohle im Lockergestein
- S₂: Eintiefende Sohle im Festgestein
- S₃: Sohle im Beharrungszustand, Verbauungsstrecke
- S₄: Auflandende Sohle und Umlagerungssohle
- U₁: Fuss von aktiven Rutschmassen
- U₂: Lockergestein mit geringer Schlammabtragsresistenz, ohne Vegetationsdecke
- U₃: Festgestein mit geringer Schlammabtragsresistenz, ohne Vegetationsdecke



Diese Karte zu M. Ammann: «Verlandung im Sihsee und Lokalisierung des Schlammabtrages im Einzugsgebiet der Minster mittels Kartierung und Schlammuntersuchung» erscheint gleichzeitig in «Beiträge zur Geologie der Schweiz, geotechnische Serie», Lieferung 78, Kümmerli & Frey AG, CH-3000 Bern, 1988, und in der Fachzeitschrift «wasser, energie, luft – eau, énergie, air» 81 (1989), Heft 1–3, CH-5401 Baden.