Zeitschrift: Veröffentlichungen des Geobotanischen Institutes Rübel in Zürich

Herausgeber: Geobotanisches Institut Rübel (Zürich)

Band: 19 (1942)

Artikel: Die pollenanalytische Untersuchung der Gletscherbewegung mit besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse am Grossen Aletschgletscher (Wallis, Schweiz) und Ergänzungen vom Gepatschferner (Ötztalergruppe, Tirol)

Autor: Vareschi, Volkmar

Kapitel: I: Allgemeiner Teil

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-307510

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 17.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

I. Allgemeiner Teil.

A. Die Gletscherbewegung und ihre Theorie.

1. Theorie der Gletscherbewegung vor Finsterwalder.

Die einfache Tatsache, daß ein Gletscher sich bewegt, wird längst als bekannt und keines Erstaunens wert hingenommen. Sobald man aber ein kleines Stück Eis eben dieses Gletschers in der Hand hält und auf seine physikalischen Eigenschaften hin untersucht und findet, daß es sich um einen spröden, starren Körper handelt, dessen «Fließen» nicht ohne weiteres denkbar ist, stößt man auf das Fremdartige, Paradoxe, das im Fließen des Gletschers gegeben ist. Der begreifliche Wunsch, die Gletscherbewegung näher zu untersuchen und sie schließlich zu erklären, hat nun zu zahlreichen Arbeiten Anlaß gegeben, die, solange überhaupt Gletscherkunde getrieben wird, dem Geheimnis der Gletscherbewegung irgendwie auf die Spur zu kommen versuchen. Schon die erste halbwegs wissenschaftliche Beschreibung der Gletscher, die Sebastian Münster in seiner Cosmographia (1544) gibt, enthält in dem Hinweis «ist auch sein eigenschaft, daß er sich selbst purgieret, bis er rein wird wie ein cristal» eine Andeutung, die mit der Eisbewegung in Zusammenhang steht, da ein «Purgieren», das allein auf Schmelzung beruht, ja nicht laufend andauern könnte, ohne den Nachschub von oben. Viel klarer erkennt zwei Jahrhunderte später I. G. Altmann in seinem Buch «Versuch einer historischen und physischen Beschreibung Der Helvetischen Eisberge» (1753) die Gletscherbewegung: «... wann die großen Eistafeln von der Fläche des Eismeers zwischen den Bergen hinausgetrieben werden (dadurch dann der an dem Berge liegende und gleichsam hangende Gletscher von obenher gedrücket wird) und auf diese Weise geschieht es, daß durch dieses große von oben herkommende Gewicht der ganze Gletscher weiter gegen das Tal hinunter geschoben wird.» Hier ist neben der Beschreibung von Gletschervorstoß, Gletscherbewegung und Struktur (Eistafeln = Firnschichten?) auch bereits eine Ursache dieser Bewegung in der Schwerkraft erwähnt.

Heim zählt in seiner Gletscherkunde (1885) im Zeitraum zwischen 1705 und 1882 etwa 47 Forscher auf, die sich alle mit dem

Problem der Gletscherbewegung auseinandersetzten. Es handelt sich in allen Fällen um Theorien, die auf Beobachtungen in der Natur und physikalischen Überlegungen beruhen, nicht aber um eine Methode, die, systematisch angewandt, über die Theorie hinaus zu beweisbaren Tatsachen geführt hätte. Inzwischen ist die Zahl der Gletscherbewegungstheorien nach Holl (1931) auf 80 (!) angewachsen.

Etwa 20 verschiedene Hauptursachen geben diese Forscher für die Gletscherbewegung an. Meist wird eine einzige als alleingültig angesehen und alle andern abschätzig beurteilt. Heim selbst sagt, indem er alle Theorien überschauend durchgeht: «Der Verfasser ist weit davon entfernt, irgendeiner der bisher besprochenen Gletschertheorien die Palme reichen zu wollen. Eine durchgreifende Gletscherbewegungstheorie hat noch niemand zu geben vermocht.» Und ich glaube beim Überblicken der neueren Literatur sagen zu können, daß wir grundsätzlich noch nicht über den Stand der Dinge vor 55 Jahren hinaus sind. Immerhin ist inzwischen der Kreis jener Theorien, die nach dem heutigen Stand der Forschung noch Beachtung und Nachprüfung verdienen, schon beträchtlich geringer geworden. Niemand wird heute noch ernstlich an J. J. Scheuchzers Ansicht, daß das in den Sprüngen des Eises gefrierende Wasser durch Volumvergrößerung das Fließen verursacht, beipflichten. Solche und ähnlich leicht widerlegbare Theorien (z. B. von T. Charpentier 1830, Biselx 1830, J. Charpentier 1841), welche sich alle auf die Ausdehnung des Wassers beim Gefrieren stützen, können vernachlässigt werden.

In einer zweiten Gruppe von Theorien wird die treibende Kraft in der Neubildung von Eis gesucht, genauer: In dem allmählichen Wachstum des Gletscherkorns (Hugi 1843, Beaumont 1842, Bertin 1866, Grad 1867, Forel 1882). Von diesen Autoren kommt nur Forels sogenannte thermische Theorie heute noch in Betracht. Ihr wesentlicher Inhalt ist folgender: Im Gebiet der Gletscherzunge tauchen die größten Gletscherkörner auf, im Firngebiet die kleinsten. Gletscherkörner sind also Kristalle, die mit fortschreitendem Zutalgleiten des Gletschers wachsen. Wie kommt nun der Zuwachs des Einzelkorns zustande? Heim (1885) glaubt durch die Verschmelzung benachbarter Körner, Hagenbach (1888), daß große Körner kleinere in ihr Wachstum einbeziehen,

Forel, daß an die ursprünglich kleinen Körner sich gefrierendes Schmelzwasser, das durch das Haarspaltennetz zu ihnen dringt, anlagert und so ihr Wachstum bewirkt. Dieses Eindringen und Anlagern des Schmelzwassers wird durch eine Reihe scharfsinniger Überlegungen zu einer Theorie der Gletscherbewegung verwertet. An dieser Theorie fesselt uns weniger das «Warum?». sondern das «Wie?» Die später zu erörternden pollenanalytischen Ergebnisse geben ja auch keine Ursachen der Eisbewegung an, sondern zunächst nur die Art und Weise derselben. Die schließlich anzustellenden Gegenüberstellungen der verschiedenen Theorien mit dem pollenanalytischen Befund beziehen sich also auf das «Wie» der Gletscherbewegung. Die Forelsche Thermotheorie setzt voraus, daß das Kornwachstum im ganzen Gletscher. also auch in seinen untersten bzw. innersten Teilen durch Infiltration von Wasser (jährlich von der Eisoberfläche her etwa eine Schicht von 4,5 m Wasser) erfolgt. Zu den bekannten physikalischen Einwänden ist hier nicht Stellung zu nehmen, Heim (1885) führt diese Theorie dadurch ad absurdum, daß er nachweist, daß, wenn wirklich aus jedem kleinen Gletscherkorn des Aletsch eines von der Größe würde, wie sie an der Zunge vorkommen, dann keine Erscheinung der Abschmelzung mehr hinreichen würde, um das Anschwellen der Zunge zu einem bergeüberflutenden Monstrum zu verhindern. Als vollkommen überholt möchte ich jedoch die Forelschen Ideen auch heute noch nicht hinstellen und gelegentlich auf einzelne seiner Gedanken zurückkommen.

In den bisher erwähnten Theorien gibt die Schwerkraft nur die Richtung der Bewegung an. In den folgenden ist sie die Ursache derselben.

Unter diesen Theorien ist für uns besonders die von Thomson (1849) interessant. Er nimmt Verflüssigung des Eises durch hohen Druck an. Der Vorgang ist nach der Wiedergabe Heims (1885) ungefähr so zu denken: In gewissen Teilen des Gletschers wird der talwärts drängende Druck durch das eigene Gewicht sehr groß. Dabei wird hier und dort Eis verflüssigt. Das so entstandene Wasser fließt in benachbarte Hohlräume, Haarspalten u. a. m. Die bei der Verflüssigung gebundene Wärme hat jedoch das Wasser bereits auf etwas unter 0° abgekühlt, so daß es an seinem neuen Ort, dem Druck entronnen, sofort wieder gefriert.

An den Partien, wo das Wasser ausgeflossen ist, rückt nun entweder Wasser von benachbarten Hochdruckstellen nach, oder das Eis gleitet ohne Verflüssigung als fester Körper dorthin. Durch Wiederholung und Hand in Hand laufen dieser Prozesse kommt es zu der Fähigkeit des Gletschers, sich als Ganzes dem Bett anzupassen, die Form stets zu ändern und vorwärtszufließen. Heim und Tyndall bringen nun die Blaublätterstruktur mit diesen stellenweisen Schmelzerscheinungen in Beziehung. Sie seien nichts anderes als Zeugen einer schichtweisen Verflüssigung des Eises. Bei der Verflüssigung wird die Luft ausgetrieben; das vorher weißliche Eis erscheint jetzt blau. Dabei geht stets Volumen verloren, stets wird das Eis dichter, stets fließt ein Teil des Schmelzwassers ab. Die Verflüssigung durch Druck geschieht in Schichtzonen, die senkrecht zur Druckrichtung liegen. Voraussetzung für die Gültigkeit der Thomsonschen Theorie ist, daß der Gletscher sich in keinem seiner bewegten Teile bedeutend von der Schmelztemperatur entfernt. Ein nach dieser wie nach den vorher erwähnten Theorien bewegter Gletscher wird die bei der Firnbildung entstandene Lagebeziehung der Eisteile stark geändert haben, ja nach einer kurzen Dauer der Fließbewegung wird von der ursprünglichen Lagerung nichts mehr übrig sein.

Eine große Gruppe von Theorien schiebt dem Eis selbst die Fließfähigkeit als «dickflüssige Masse» zu. Als erster hat Bordier (1750) die Plastizität des Eises erwähnt und schon 1841 gelingt es der intuitiven Schau des Bischofs Rendu, den Gletscher als dickflüssige Masse aufzufassen und so einige seiner Erscheinungen (Blaublätter, Regelation, Geschwindigkeitsänderung vom Rande gegen die Mitte zu u. a.) faßbar zu machen. Zu den Vorläufern der heute noch geltenden Theorien dieser Gruppe gehört auch Schlagintweit (1857) und Forbes (1843) Experimentell haben über die Plastizität des Eises besonders Pfaff (1875), Steenstrup (1882) und McGee (1881) gearbeitet. Ihre Versuche zeigen, daß Eisstäbe und -platten sich bruchlos biegen können, wenn die Temperatur nahe an 0° ist und etwas Druck angewendet wird. Mehr jedoch zeigen sie nicht. Wir haben es ja im Gletscher mit gewaltigen zusammenhängenden Eismassen zu tun, die Biegsamkeit eines Kupferdrahtes darf nicht auf die Plastizität eines Kupferwürfels von 1 m Seitenlänge Schlüsse zulassen. Für uns ist wieder nicht dieses ursächliche Problem

wichtig, sondern die Frage: Welches Bewegungsbild ergibt ein plastisch bewegter Gletscher? Dieses Bewegungsbild hat am eindringlichsten S. Finsterwalder auf geometrischer Grundlage darzustellen versucht, indem er die Gesetze der stationären Strömung von Flüssigkeiten auf die Gletscherbewegung übertrug und so ohne theoretische Voraussetzungen über die physikalischen Eigenschaften des Eises, über den Gletscher als Ganzes eine Reihe sehr einleuchtender Tatsachen ans Licht brachte, die viele Phänomene der Gletscher, die bisher schwer faßbar waren, erklären konnten.

Da der pollenanalytische Befund an verschiedenen Gletschern gerade zu dieser Theorie sehr deutliche Beziehungen aufweist, ist es nötig, sie an Hand der Originalarbeit wenigstens in großen Zügen zu besprechen.

2. Die Finsterwaldersche Stromlinientheorie.

In seiner berühmten Arbeit «Der Vernagtferner, seine Geschichte und seine Vermessung» (1897) sucht S. Finsterwalder einen neuen Gesichtspunkt, der die vielen Erfahrungen, die er und andere damals bereits über die Gletscher gesammelt hatten, einheitlich zu überschauen gestattet. Er kehrt dabei den bisherigen Theorien, die von den physikalischen Eigenschaften des Eises ausgehen, den Rücken und versucht, auf geometrischer Grundlage die Gletscherbewegung konstruktiv zu erfassen. Zunächst ein scheinbar einseitig orientiertes Denkexperiment, das seine Berechtigung jedoch dadurch gewinnt, daß es in der Natur eine verblüffend weitgehende Bestätigung findet.

Gegenstand dieser Konstruktionen ist ein Gletscher, der stationär und stetig strömt. Stationäre Strömungen zeichnen sich dadurch aus, daß ihre Geschwindigkeiten sich in verschiedenen Zeiten nicht ändern. Sommer und Winter, Tag und Nacht, Druckschwankungen u. a. m. haben also keine Geschwindigkeitsänderungen zur Folge. Stetig ist eine Strömung dann, wenn örtliche Geschwindigkeitsverschiedenheiten allmählich ineinander übergehen. Benachbarte Punkte haben also auch ähnliche Geschwindigkeiten. Der Übergang zur andern Geschwindigkeit eines entfernten Punktes ist durch kleinste Schritte allmählich eingeleitet.

Bei einer solchen stationären und stetigen Strömung beschreibt jedes Teilchen des Gletschers im Laufe der Zeit eine Stromlinie.

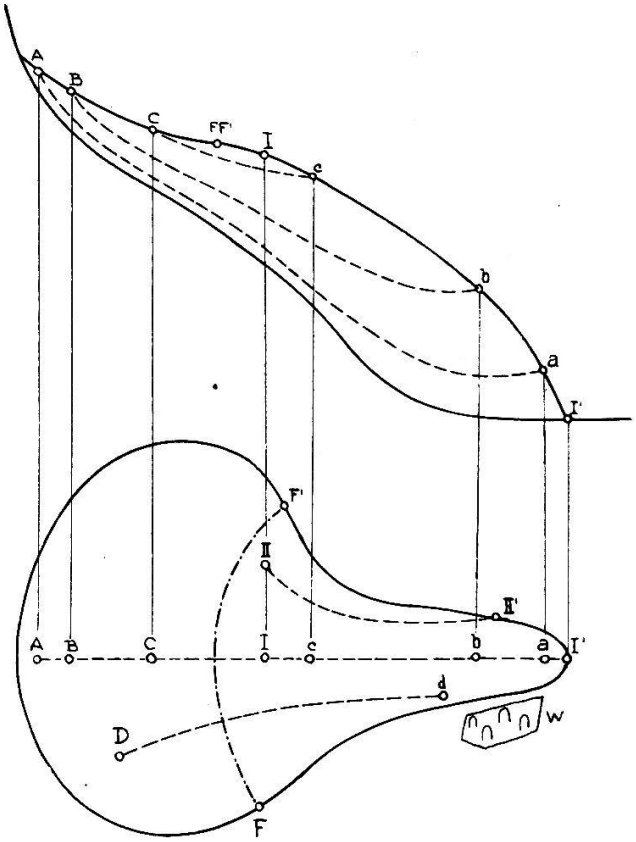

Abb. 1. Längsschnitt und Grundriß eines stationär und stetig strömenden Gletschers mit der Firnlinie FF', mit Stromlinien Aa, Bb, Cc und mit Bewegungslinien I I', II II' (nach Finsterwalder, verändert). W ein angenommener Waldfleck (s. S. 128).

Solche Stromlinien sind in Abb. 1 im Gletscherlängsschnitt und im Grundriß dargestellt. Die Linie FF' deutet die Firngrenze, also die Grenzzone zwischen Akkumulations- und Ablationsgebiet an. Ein Schneeteilchen, das bei A auf die Gletscheroberfläche fällt und eingeschneit wird, gerät im Zuwachsgebiet immer tiefer unter die Gletscheroberfläche und wird gleichzeitig in Richtung der Gletscherbewegung gegen die Firnlinie hin und und unter ihr hindurch ins Abschmelzgebiet befördert. Dort nähert es sich wieder der Oberfläche und gleichzeitig dem Gletscherende, bis es schließlich bei a wieder ans Tageslicht kommt und der Abschmelzung verfällt. Ein anderes Teilchen, das bei B auf den Gletscher auffällt, gelangt rascher unter die Firnlinie, wird weniger tief eingeschneit und kommt weiter oben als a, nämlich bei b wieder ans Licht. Noch kürzer ist der Weg eines Teilchens von C bis c. Während natürlich Teilchen, die unter der Firngrenze auf den Gletscher fallen, nur vorübergehend eingeschneit und in die Bewe-

gung einbezogen werden, also keine Stromlinien beschreiben können. Der Verlauf der Stromlinien ist stets so, daß im Firngebiet übereinander auf der Gletscherfläche liegende Punkte, z. B. A B C im Firnabschmelzgebiet mit den entsprechenden Punkten c b a korrespondieren. Diese Umkehrung der Reihenfolge der Punkte ist ein untrügliches Kennzeichen der Gletscherbewegung im Sinne Finsterwalders und wir werden bei der Besprechung der pollenanalytischen Befunde noch auf diese Erscheinung zurückkommen.

Neben den Stromlinien sind auch noch die sogenannten Bewegungslinien konstruktiv faßbar. Eine Bewegungslinie umfaßt die Gesamtheit aller Punkte, die ein Stein, der unterhalb der Firnlinie auf die Gletscheroberfläche gelegt wird, im Laufe seiner Wanderung bis zum Zungenende einnimmt. Solche Bewegungslinien wären also z. B. die Linie I—I' und II—II'. Schließlich kann man den Gletscher noch durch Linien gleichen Auf- bzw. Abtrags in Zonen einteilen.

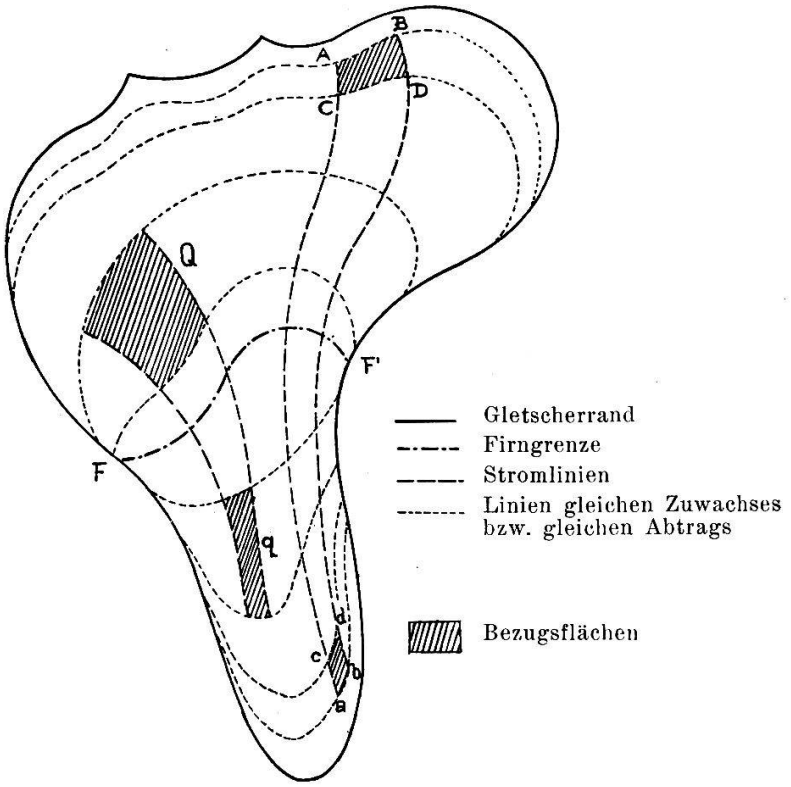

Abb. 2. Grundriß eines stationär und stetig strömenden Gletschers mit Firnlinie FF', mit Stromlinien, mit Linien gleichen Zuwachses und gleichen Abtrags und mit den entsprechenden Bezugsflächen ABCD, cdab, und Q q (nach Finsterwalder etwas abgeändert).

Man kann nun, wie Abb. 2 zeigt, einen Bezirk von bestimmter Ergiebigkeit der Akkumulation, z. B. die Fläche ABCD durch Strom- bzw. Bewegungslinien mit dem entsprechenden Bezirk gleicher Ergiebigkeit der Ablation verbinden und so jede beliebige Fläche im Zuwachsgebiet einer andern im Abschmelzgebiet zuordnen. Dabei sind die Begrenzungslinien der Flächen AB und CD Teilstücke von Linien gleichen Auftrags, cd und ab Teilstücke von Linien gleichen Abtrags. AC und BD sind auf die Gletscheroberfläche projizierte Stromlinien, ca und db ebenfalls, nur sind letztere gleichzeitig Bewegungslinien.

Die Fläche ABCD wandert also buchstäblich durch den Gletscher, dreht sich dabei um die Firnlinie in dem Sinne, daß beim Auftauchen die im Firnfeld geographisch nach unten zu gelegene Begrenzungslinie CD im Abschmelzgebiet nach oben zu liegen kommt. Genau wie vorhin für einzelne Punkte gilt auch für Flächen die Umkehrrelation. Gleichzeitig tritt bei Flächen noch die charakteristische Deformierung der Bezugsflächen auf, die sich konstruktiv aus dem Verlauf der begrenzenden Linien von selbst ergibt. In Abb.2 ist auch noch ein zweites Flächenpaar, Q—q, das näher der Firnlinie liegt, eingezeichnet, es zeigt noch stärkere Formunterschiede der Bezugsflächen wie die Flächen ABCD—cdab.

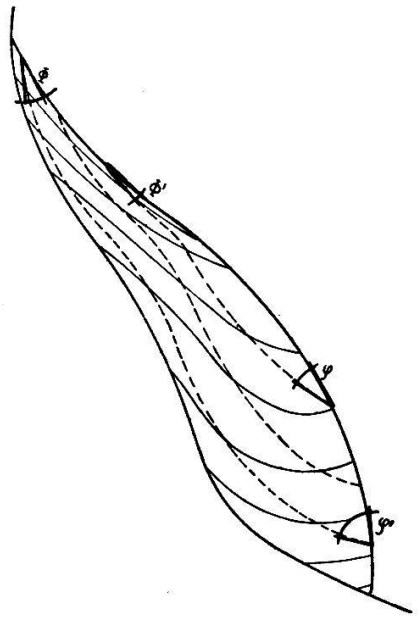

Abb. 3. Längsschnitt durch einen stationär und stetig bewegten Gletscher mit Stromlinien (strichliert) und Schichtgrenzen (ausgezogen) nach Finsterwalder).

Von den zahlreichen Folgerungen, die sich aus Finsterwalders Annahmen ergeben, interessiert uns besonders noch die Verlagerung der ursprünglichen Schichtflächen im Gletscher und ihre Beziehungen zu den besprochenen Liniensystemen, wie sie aus Abb. 3 hervorgehen. Die Stromlinien sind strichliert, die Schichtgrenzen ausgezogen eingezeichnet. Es bestehen folgende Beziehungen: Der Winkel, unter dem die Stromlinien im Firngebiet in den Gletscher einfallen, wird um so kleiner, je näher wir der Firnlinie kommen, weil nach unten zu die Akkumulation abnimmt, die Bewegung aber zunimmt. Es ist daher z. B. $\sphericalangle \Phi > \sphericalangle \Phi'$.

Dieser Größenunterschied erhält sich dem Sinne nach bei der Wanderung der Oberflächenschicht durch den Gletscher, so daß nach der bekannten Umkehrrelation dieser Winkel um so größer ist, je mehr sich die Stromlinien dem Gletscherende nähern. Neben diesem deformierten Winkel zwischen Stromlinie und ursprünglicher Oberfläche wird nun für das Austreten der Schichtflächen noch der Winkel unter dem die Stromlinien selbst austreten, wirksam. Auch dieser Winkel z. B. φ, φ' wird gegen das Gletscherende zu größer ($\varphi' > \varphi$). Die Schichtflächen treten also unter Winkeln aus, die gleich der Summe beider sind. Mit andern Worten, die Schichtflächen richten sich gegen Ende des Gletschers zu auf. Berücksichtigt man nun auch noch die Geschwindigkeitsänderungen im Längsverlauf des Gletschers und die Geschwindigkeitsverminderung von der Mitte gegen den Rand zu, so ergibt sich ein klares Bild, wie die ursprünglichen Schichtflächen aussehen müssen, wenn sie im Abschmelzgebiet wieder an die Oberfläche kommen. Die Geschwindigkeitsverschiedenheiten ergeben eine Art Löffelform, die gegen das Gletscherende zu immer steiler aufgerichtet erscheint.

Eine Fülle von Erscheinungen an Gletschern schien mit dieser Theorie Finsterwalders plötzlich klar durchschaubar zu sein. Aber neben vorbehaltloser Anerkennung erscheinen (schon anläßlich der Nachmessungen am Vernagtferner) anfänglich vereinzelt, später mehr und mehr Beobachtungen, welche «in gewissen Fällen ein Gleiten des Eises über darunter befindliche Schichten» (Blümke und Heß, 1897) annehmen, und damit im Gletscher sprunghafte Geschwindigkeitsänderungen vermuten, welche mit der als stetig angenommenen Bewegungsart der Stromlinientheo-

rie in Widerspruch stehen. Die weitere Geschichte der Erkenntnis der Gletscherbewegung von Finsterwalder bis heute ist im wesentlichen die Auseinandersetzung darüber, inwiefern solche sprunghafte Änderungen vorkommen, und ob sie so beherrschend sind, daß der Stromlinientheorie überhaupt jede Gültigkeit abgesprochen werden muß. Der Wortführer dieser neuesten Theorien ist H. Philipp.

3. Die Philippsche Scherungstheorie.

Im Jahre 1914 tritt Philipp zum erstenmal mit ganz neuen Anschauungen über den Bewegungsmechanismus der Gletscher hervor. 1920 erscheint seine Hauptarbeit: «Geologische Untersuchungen über den Mechanismus der Gletscherbewegung und die Entstehung der Gletschertextur», der später in kleineren Beiträgen neues Material hinzugefügt wird. Im folgenden fasse ich seine Beobachtungen und Folgerungen kurz zusammen.

Unabhängig von den Spalten, treten auf allen Gletschern «Gletscherrisse» auf. Sie werden als das Ausstreichende feiner, die Eismasse weithin durchziehender Trennungsflächen aufgefaßt. Ihre Ränder sind dicht aneinandergepreßt oder klaffen um 1—2 cm, meist ist der Zwischenraum so groß, daß man eine Messerklinge einpressen kann.

Hierzu ist zu bemerken: Ich habe diese «Risse» unzählige Male beobachtet, bin aber zu der Anschauung gelangt, daß es sich dabei meist nicht um Trennungsflächen, Risse, nach Heim (1885) Verschiebungsfugen usw. handle, sondern eben nur um Eisflächen bzw. sehr dünne Eisschichten von einer Textur, die sie von der Umgebung abheben. Durch verschiedene Schmelzbarkeit dieser Eislamellen kommt es zu einem oberflächlichen Klaffen, das nicht dazu verleiten darf, die beiden Eismassen, so wie sie auf beiden Seiten der Lamelle an der Gletscheroberfläche auftauchen, als aneinander verschiebbar zu betrachten.

Wiederholt wird erwähnt, daß diese Risse besonders schön am Grunde der Gletscher, «in den untersten 20 m» und an ihrem Rande beobachtet wurden. Meist folgen sie der Bänderung oder schneiden sie unter spitzem Winkel. Ihre Lagerung im Gletscherbett ist annähernd trogförmig. Der Abstand der einzelnen mehr oder weniger parallelen Risse voneinander beträgt ziemlich gleichmäßig $^1/_2$ bis 2 m. Die Risse durchziehen nicht den ganzen Glet-

scher, sondern zerfallen in Teilstücke, die, durch Verwerfungen voneinander geschieden, sinngemäß einander fortsetzen. Dabei bleibt der einzelne Riß, wie mehrere einander fortsetzende Teilstücke, im allgemeinen in der Trogform. Übereinanderliegende Risse ergeben das Bild ineinandergeschachtelter Tröge (Abb. 4).

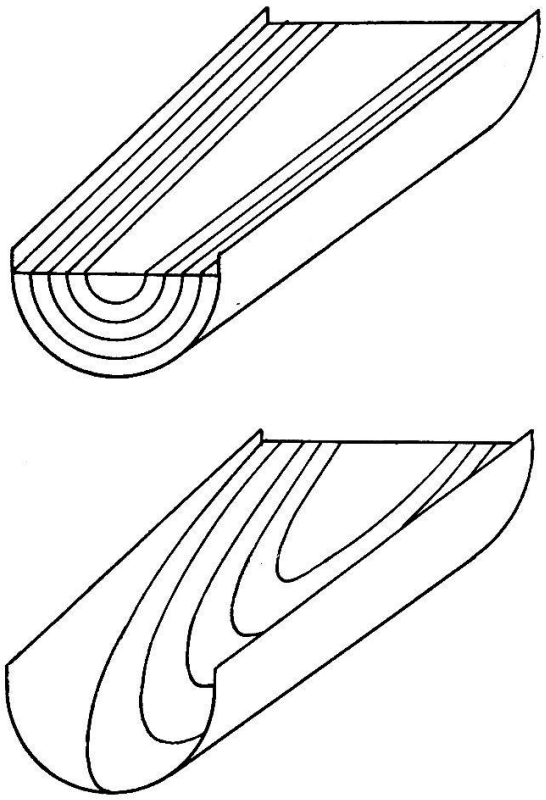

Abb. 4. Trogform der Gletscherrisse, oben in einem Gletscher ohne Abschmelzung dargestellt, unten durch Abschmelzung angeschnitten (nach Philipp).

Da die Abschmelzungsfläche den Gletschertrog schräg schneidet, so müssen die Risse auf der untern Gletscherzunge in abwärts geschwungenem Bogen verlaufen, die dann das Bild ergeben, das in der untern Figur der Abb. 4 angedeutet ist.

An solchen Rissen wurden Verwerfungen der nächstliegenden Texturen beobachtet, die ursprünglich quer zu ihnen verlaufen waren, so daß nun also diese Risse als Scherungsrisse gedeutet werden. Es ändert sich also an diesen Rissen die Bewegung des Gletschers nicht allmählich, wie es durch die zahlreichen Erfahrungen der Steinreihen (von Heim angegeben und von Heß, Blümke usw. oft ausgeführt) für die

Gletscheroberfläche im Großen nachgewiesen wurde, sondern sprunghaft.

Philipp führt dann weiter aus, daß diese Scherungsflächen mit der Bändertextur annähernd kongruent verlaufen. Die Bändertextur selbst sei nichts anderes als eine durch Vernarbung von Abscherungsflächen entstandene Differenzierung. Da nun bei Querschnittsänderungen des Gletscherbettes sich auch die Trogform der Risse ändern muß, müssen Abscherungsflächen von verschieden stark gehöhlter Konkavform entstehen. Fließt zum Beispiel der Gletscher durch eine Verengung des Bettes, so sind die neuen Scherungströge stärker gekrümmt als die durch die Bänderung dokumentierten älteren Scherungsflächen aus dem flacheren Bettabschnitt, diese müssen sich also mit jenen kreuzen und so entstehen die schon von Agassiz (1847) beobachteten, sich durchkreuzenden Systeme von Bänderungsgruppen.

Philipp stellt uns weiter in den Scherungsrissen die Hauptträger der Wasserzirkulation im Gletscher vor. Damit stellt er sich in Gegensatz zu vielen anderen Autoren, die einen die ganze Gletschermasse im Kleinen durchdringenden Wasseraustausch nicht beobachtet haben, sondern nur die gelegentliche Durchströmung in größeren Kanälen und Schächten (Ponoren).

Noch weiter entfernt sich Philipp von der bisherigen Betrachtungsweise in seinen Ausführungen über den Firnschnee. Heim (1885) spricht die allgemein geltende Ansicht über die Bedeutung der Firnschichtung wie folgt aus: «Wir erkennen überall auf den ersten Blick ganz deutlich die Schichtung, wie sie den einzelnen Schneefällen und Lawinen einerseits, den zwischenliegenden Schmelzperioden und Staubfällen andererseits entspricht.» Nach Philipp sind auch diese Firnschichten lediglich die durch Scherungsflächen voneinander getrennten, für sich schichtweise beweglichen Firnteile. Die wechselnde Folge von schmutzreichem und schmutzarmem Firn sei eine Täuschung, bei den Schmutzgrenzen handle es sich eben nicht um alte Ablationsflächen, sondern um von außen an den Firnrissen angesammelten Staub. Firnschichtung ist also kein Ausdruck verschiedener Witterungsperioden oder gar von Jahreszeiten, sondern Ausdruck der Bewegung von Firnschichten.

Nach Messungen, die Philipp mit Hafferl am Unteraargletscher ausführte, braucht das Maximum der Gletscherbewe-

gung nicht, wie durch die bisherigen Messungen erschienen sei, an der Oberfläche der Gletscher zu sein, sondern könne auch tiefer liegen.

Philipp setzt also Scherungsbewegungen größten Ausmaßes für alle Teile des Gletschers vom Firn bis zur Zunge voraus. Es handelt sich vor allem um ein Verschieben der höheren Lagen über die tieferen, um ein Überkragen der oberen Schichten. Den Hauptanteil der Bewegung ergibt nicht die Translation, auch nicht die Regelation, sondern das Übereinandergleiten in sich fest zusammenhängender Gletscherteile. Zwischen diesen Teilen ändert sich die Geschwindigkeit der Gletscherbewegung sprunghaft. Damit stellt sich Philipp in scharfen Gegensatz zur Bewegungstheorie fast aller andern Autoren, vor allem aber auch zu derjenigen Theorie, die bis jetzt durch zahlreiche Übereinstimmungen zwischen ihren Bedingungen und den Beobachtungen und Messungen an Ort und Stelle, am meisten Wahrscheinlichkeit für sich buchen konnte, zur Finsterwalderschen Theorie. In der Diskussion setzt sich Philipp zwar sehr eingehend mit der Ansicht Crammers (1907) auseinander, nach der die Firnschichtung durch stets intensivere Faltung allmählich in Blätterung übergehe, vermeidet aber die Auseinandersetzung mit der Finsterwalderschen Theorie. Gerade diesen Punkt aber werden wir später noch zu berühren haben.

Ich glaube, es sind schon so viel theoretische Erörterungen um das Gletscherphänomen geführt worden, daß ein wahres Bild desselben auf diesem Wege kaum mehr zu erreichen ist. Damit erkläre ich mir auch, daß die neuen und umwälzenden Gedanken und Folgerungen Philipps nur in ein paar recht matten Entgegnungen zu widerlegen versucht wurden. Es ist höchste Zeit, hier endlich den Schritt von der Spekulation, die von den wenigen Erfahrungen ausgeht, die auf der Gletscheroberfläche möglich sind, zur Empirie machen. Die Erfahrungen, auf denen unsere empirische Arbeit beruhen soll, müssen auch in die Tiefe des Gletschereises hinabreichen, dessen Aufbau sich uns durch ein mikroskopisch kleines Leitfossil, den darin eingelagerten Blütenstaub stratigraphisch gliedert. Die Methode, die diese neuen Einsichten ermöglicht, ist die Pollenanalyse.

B. Die Pollenanalyse als neue glaziologische Methode.

4. Der Pollenregen.

Schnee, Regen und Hagel sind nicht die einzigen Arten von Niederschlägen, die auf die weiten Firnfelder der Gletscher herabfallen, sie sind nur die wichtigsten und auffälligsten Erscheinungsformen. Daneben und mit ihnen sinkt auch ein fast pausenloser Regen von Staub auf den Firn. Es handelt sich hiebei um beträchtliche Mengen. Jenny (1926) fand beispielsweise im Val Cuoza einen jährlichen Staubniederschlag von ± 15 000 kg pro Hektar. Dieser Staub ist zur Hauptsache der Detritus der umgebenden, durch keinen Eismantel vor der Verwitterung geschützten Felsberge; daneben enthält er Meteorstaub und organogene Partikelchen. Unter diesen ist auch der Blütenstaub, der Pollen vieler windblütiger Pflanzen mit gelegentlich beigemischten Pollen von Insektenblütlern. Dieser Pollen ist in bestimmten Grenzen auf seine Herkunft hin bestimmbar, und ist außerordentlich widerstandsfähig gegen äußere Einwirkungen.

Die verschiedenen Höhenstufen der Alpen sind nun in ganz verschiedener Weise an der quantitativen und qualitativen Zusammensetzung des Pollenregens aus den Pollen verschiedener Arten beteiligt. Das Firnfeld selbst liegt in der Nivalstufe. Das Pflanzenleben dieser Stufe ist so reduziert, daß es sich im Pollenregen nicht mehr dokumentieren kann. Höchstens könnte ein Reichtum an mauerförmigen und parallel-mehrzelligen Askosporen, der im Pollenregen mancher Firngebiete nachgewiesen werden kann, auf die besonders im Urgebirge mächtig entwickelte Flechtenflora zurückgehen. Die alpine Stufe kann schon viel mehr Pollen liefern. Weiden, Mähder, Wildheuplanken und gelegentlich Streuewiesen tragen einen großen Bestand windblütiger Gramineen und Cyperaceen. Die alpine Ericaceenheide besteht zwar fast durchwegs aus insektenblütigen Pflanzen, trotzdem wird ihr Pollen, wie später gezeigt wird, regelmäßig auch durch den Wind verbreitet. Es kommen hier folgende Arten, deren Pollen zum Teil durch die Untersuchungen Overbecks (1934) unterscheidbar gemacht wurde, in Betracht: Vaccinium Myrtillus, V. Vitis idaea, V. uliginosum, Calluna vulgaris, Empetrum nigrum, Rhododendron ferrugineum. Die stärksten Pollenlieferanten dieser Zone

sind unzweifelhaft Legföhre, Pinus montana-prostrata und Alpenerle, Alnus viridis. Im ganzen darf aber die Pollenproduktion in ihrer Massenwirkung nicht überschätzt werden. Die Ungunst des Klimas oberhalb der Baumgrenze setzt die Pollenfertilität herab; viele Blütenstände (besonders die von Umbelliferen und Gräsern) werden vor dem Ausstäuben des Pollens durch Beweidung vernichtet. Von Lüdi und Vareschi (1936) wurde die Pollenproduktion dieser Stufe durch Beobachtungen und Messungen für das Davoser Hochtal eingehend besprochen: «Hier ist das Blühen nicht nur absolut genommen sehr viel schwächer (als in der subalpinen Stufe), sondern auch viel ausgeglichener ... schließlich wirkt auch die Beweidung des weitaus größten Teils der alpinen Rasenflächen mit ihrer gleichmäßig andauernden, aber extensiven Nutzung auf ein geschwächtes ... Blühen der Gräser und anderer Weidepflanzen hin ... die Kurve (der absoluten niedergeschlagenen Pollenmengen) vom Weißfluhjoch (2670 m) ... ist ganz allgemein durch niedrige Werte charakterisiert.»

Die subalpine Stufe läßt sich in zwei Höhengürtel unterteilen: Den Nadelwaldgürtel und darüber den Gürtel der Kampfzone, das Gebiet zwischen Wald- und Baumgrenze. In letzterer Zone spielt neben Fichte, Lärche, Alpenerle und Latsche vor allem die Zirbe, Pinus cembra, eine Rolle. Im ersteren ist die Fichte der unbedingt herrschende Waldbaum. Die Birke kommt vereinzelt vor, ihr Mengenverhältnis zu den andern Holzarten bleibt von da ab nach unten zu an vielen Stellen der Alpen ungefähr konstant. Auch hier sind durch eingesprengte Rodungen große Gramineen- und Cyperaceenpollenmengen zu erwarten.

In der montanen Stufe hat in kontinentalen Gebieten der Zentralalpen die Waldföhre in riesigen Beständen oft weithin die Vorherrschaft im Wald. Ihre Pollenproduktion ist außerordentlich stark. In ozeanischeren Gebieten kommt Weißtanne und Buche vor. Fast stets sind hier Fichten, Haseln, Grau- und Schwarzerlen, oft auch Eiche, Linde, Ulme und Kastanie anzutreffen. In diese Stufe fällt auch die Hauptverbreitung der gedüngten Mähwiesen und Kornfelder, die große Pollenmassen zur Ausstreuung bringen. Die Pollenproduktion ist sowohl durch klimatische Vorteile erhöht, als auch durch die erst meist nach dem Blühen erfolgende Mahd begünstigt. Diese Fettwiesen liefern auch manche Arten insektenblütiger Pollen gelegentlich oder

mehr oder weniger regelmäßig dem Wind aus. Insbesondere sind es folgende Gattungen und Familien, die gelegentlich als Bestandteile des Pollenregens noch wichtig sind: Liliaceen, Polygonum, Charyophyllaceae, Umbelliferae, Campanulaceae, Compositae.

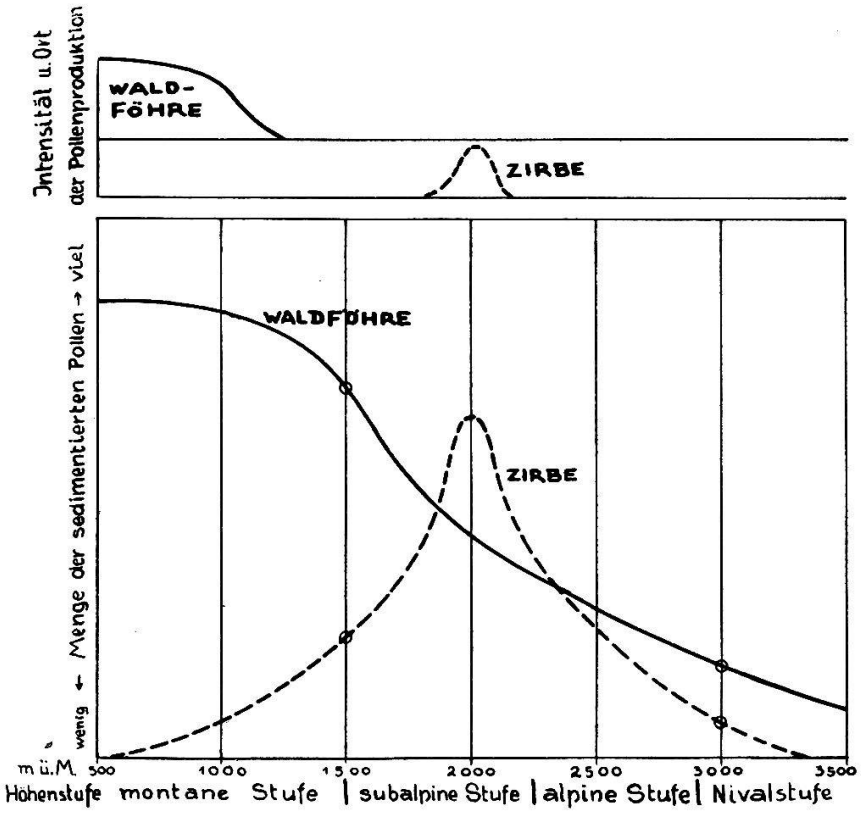

Abb. 5. Verhältnis zwischen der räumlichen Verteilung der Pollensender einerseits und dem dadurch bedingten Pollenregen anderseits. Die bezeichneten Kurven zeigen, daß ein prozentuales Verhältnis des Pollenniederschlages der tieferen Lagen in den Hochlagen neuerdings auftreten kann.

Welchen Anteil werden nun die einzelnen Holzarten und die Gramineen in den einzelnen Stufen am Pollenregen haben, der im Gebiet des Firnfeldes niedergeht? Um diese Frage einigermaßen sicher beantworten zu können, wurde im Gebiet des Oberbergtales (Hochstubai) in verschiedener Meereshöhe durch zwei Jahre hindurch der Pollenregen in Schalen aufgefangen und die Pollenzahlen bestimmt. Bezüglich der dort gefundenen Werte sei auf die Originalarbeit verwiesen (V a r e s c h i, 1940). Hier soll durch die Abbildung 5 an Hand zweier Holzarten gezeigt werden, wie sich die Verteilung der Pollensender und ihre verschieden starke Pollenproduktion auf den Pollenregen auswirkt. Die Abbildung

soll nur allgemeine, größenordnungsmäßige Werte bringen, die Kurven beruhen auf den eigenen Erfahrungen im Oberbergtal und und auf den von W. Schmidt berechneten, von Firbas (1934) veröffentlichten analogen Diagrammen.

Die Abszisse zeigt die Meereshöhen bzw. Höhenstufen. Die Ordinate gibt schätzungsweise im oberen Teil der Abbildung die Verbreitung und die Pollenproduktion der zwei Holzarten, im unteren den ihr entsprechenden Pollenniederschlag wieder. Zunächst die Waldföhre. Die weite Verbreitung und die starke Pollenproduktion bedingt einen nur langsamen Abfall der Niederschlagskurve mit der Entfernung. Die Zirbe dagegen, die lokal eng beschränkt vorkommt und in der Pollenproduktion gegenüber der Waldföhre zurücksteht, kann zwar lokal auf kurze Entfernung hin den Pollenregen entscheidend beherrschen; der Abfall der Kurve ist jedoch so stark, daß eine Überschneidung der Kurven erfolgen muß. So kommt es, daß z. B. das Pollenniederschlagsverhältnis von Waldföhre zu Zirbe bei 1500 m und bei 3000 m gleich groß ist, nämlich 3 : 1. Es kann also bei der großen Entfernung des Firnfeldes vom Entstehungsort der Pollen in großer Meereshöhe ein Pollenniederschlag aufgefangen werden, der ein Waldbild vortäuscht, das eigentlich einer tieferen Höhenstufe entsprechen würde. Tatsächlich wurden diese Verhältnisse bei den Pollenauffangschalen im Oberbergtal einwandfrei festgestellt. Dort entsprach der montanen Stufe im Silltal ein starker Waldföhrenbewuchs mit etwas Haseln und vereinzelten Ulmen, Eichen und Linden, der subalpinen Stufe Fichtenwald, dem Kampfgürtel vor allem Zirbenwald. Während in den Pollenschalen aus der subalpinen Stufe der Anteil der Zirbe am Pollenregen deutlich wurde, die Laubhölzer dagegen fast völlig zurücktraten, war in der Nivalstufe die qualitative Zusammensetzung viel mehr an das Waldbild der montanen Stufe gebunden, als an das rein entfernungsmäßig näherliegende Waldbild der subalpinen Stufe.

Firbas hat bereits mehrfach (1926, 1934) auf diese Verhältnisse aufmerksam gemacht. In meiner ersten vorläufigen Mitteilung «Pollenanalysen aus Gletschereis» (1935) wurde festgestellt, daß «ein in geringer Meereshöhe liegender Bezirk durch seine Pollenstreuung das Gesamtbild (des Pollenniederschlags im Bereich des Gletschers) einseitig verzerrt.» Diese Bemerkung möchte ich im Rahmen der oben angedeuteten und auch von Firbas

(1934), Auer (1927) und Lüdi (1932) festgestellten Gesetzmäßigkeit verstanden wissen. K. Bertsch folgert in seinem Buch «Der deutsche Wald im Wechsel der Zeiten» (1935) aus meinen Feststellungen im Aletschgebiet: «Damit ist das Glanzstück pollenanalytischer Klimadeutung in seiner Beweiskraft entwertet, und wir fassen jene Befunde nur noch als gleichsinnige Erscheinungen auf, die nur dann überzeugen können, wenn sie durch das Vorkommen fossiler Hölzer oder Früchte gestützt sind.» Ich bin überzeugt, daß dieser Schluß zu weit gegriffen ist. Der verzerrende Faktor bei der Weitflugauslese ist ja die große Entfernung zwischen Wald und Niederschlagsort, die bei Gletschern Ausmaße annimmt, die bei den üblichen Analysen aus Mooren nur ganz ausnahmsweise in Frage kommen. Gewöhnlich dürfen wir ja die Entfernung zwischen dem die Zusammensetzung des Pollenregens bestimmenden Wald und dem als Auffangfläche dienenden Moor nur auf Bruchteile jener Entfernungen einschätzen. Dazu kommt der später zu besprechende Einfluß des Windes und der im Falle der Gletscher verschiedenen Meereshöhe von Pollensender und Pollenauffangfläche. Nur unter ganz besonderen Umständen, bei Untersuchungen von hochgelegenen Mooren und vielleicht bei Aspekten, die aus der Einwanderungszeit von neuen Holzarten stammen, ist die Möglichkeit einer solchen Verzerrung gegeben. In allen anderen Fällen bleibt das «Glanzstück pollenanalytischer Klimadeutung» unangetastet. Für die Einschätzung des Pollenregens auf Gletschern sind diese Umstände jedoch stets in Betracht zu ziehen, und zwar wird die auslesende Wirkung des Weitfluges umso deutlicher, je weiter das Firnfeld von der Waldvegetation entfernt ist.

Eine andere Möglichkeit, daß der Pollenregen im Gletschergebiet quantitativ andere Werte ergibt, als nach den vorhandenen Holzartenmengen erwartet werden könnte, ist die, daß zwar eine Holzart in verschiedenen Höhenstufen gleichmäßig vorkommt, ihre Pollenproduktion jedoch mit der Meereshöhe infolge Einwirkung des Höhenklimas oder dem Auftauchen anderer Rassen abnimmt. Die Prozentkurve des Anteils der Birkenpollen am Gesamtpollen, die im Oberbergtal erzielt wurde, war durch folgende Werte mit steigender Meereshöhe bestimmt:
1000 m 13 %, 1262 m 4 %, 1580 m 3 %, 2147 m 3 %, 3173 m 1 %.

Die entsprechenden Mengenverhältnisse der Birke entsprachen nicht diesen Zahlen. Die Birke war im ganzen Gebiet von 1000 m bis 2000 m ungefähr in gleicher Menge vorgefunden worden, der starke Birkenpollenniederschlag bei 1000 m muß also mit verschiedener Pollenfertilität erklärt werden.

5. Pollentransport durch Wind.

Unmittelbar oder auf Umwegen kann jede beliebige Windrichtung zu einem Pollentransport ins Gletschergebiet führen. Es lassen sich jedoch in den Alpen bestimmte Luftströmungen als besonders wichtig für die Pollenverfrachtung feststellen. Es handelt sich dabei weniger um die allgemeinen Windrichtungen im großen, als vielmehr um Lokalwinde. So darf insbesondere die Wirkung des Westwindes, die in kleineren Gebirgen Mitteleuropas, wie z. B. in der Tatra (Sokolowski, 1928) noch unbedingt vorherrschend ist, in den zentralen Hochalpen nicht überschätzt werden. Hier sind es neben dem Föhn die regelmäßigen Berg- und Talwinde, die für den Transport der Pollenmassen aus den Vegetations- in die Gletschergebiete in erster Linie in Frage kommen. Dazu kommt noch der Luftaustausch in senkrechter Richtung, sei es der als Reibungsturbulenz, sei es der durch thermische Differenzen erzeugte (vgl. Rempe, 1937).

Die Frage, wie der Blütenstaub im Luftraum verteilt ist, ist mehrfach durch Blütenstaubzählungen von Proben, die bei Flugzeugaufstiegen in verschiedenen Höhen exponiert wurden, geprüft worden. Insbesondere Rempe (1937) hat so großes Material gesammelt, daß wir uns darüber eine weitgehend gesicherte Vorstellung machen können. In geringer Höhe über der Vegetation (Wald) selbst sind selbstverständlich auch große Pollenmassen zu finden. Jedoch liegt das Maximum erst in einer Höhe zwischen 50 und 500 m über dem Boden (siehe auch Schepegrell, 1929, Wigand, 1919). Zwischen 500 und 1000 m nimmt die Pollendichte langsam, zwischen 1000 und 1500 m rasch ab. Bei Tage, insbesondere bei Schönwetter, ist die Abnahme nach oben allmählich, bei höherer Windgeschwindigkeit und bei einer Wetterlage mit Stratusdecken rasch. Die Tendenz des Absinkens auf den Boden ist bei Nacht am stärksten.

Die Größe der Pollen ist sehr wechselnd (zwischen 20 und 120 μ), ebenso haben sie eine verschiedene Oberflächenentwick-

lung, verschiedenes Gewicht und, im Zusammenhang damit, eine verschiedene Sinkgeschwindigkeit. Aus den Erfahrungen fast aller Autoren, die sich mit dem Einfluß dieser Differenzen befaßten, geht jedoch hervor, daß nur bei windstillen Zeiten, während der Nacht manchmal eine Auslese nach diesen Differenzen festgestellt werden kann. Und auch da dürfte es sich nur um die extremsten Fälle, etwa um ein rascheres Absinken von Fichte (Sinkgeschwindigkeit nach Knoll [1932] 8,7 cm/sek) und Buche (5,5 cm/sek) als von Erle (1,7 cm/sek) und Birke (2,4 cm/sek) handeln. Die starke Unterrepräsentation der Fichte gegenüber der Erle in meinen Pollenproben aus dem Gebiet des Alpeinerferners (l. c.) darf jedoch nicht mit der verschiedenen Sinkgeschwindigkeit der beiden Pollenarten erklärt werden. Sie ist vielmehr auf verschieden starke Pollenproduktion der beiden Holzarten zurückzuführen. Wären die Sinkgeschwindigkeiten für die Weitflugauslese der beiden Pollen verantwortlich, dann müßte auch der Gramineenpollen in großer Meereshöhe wegen seiner geringen Sinkgeschwindigkeit überrepräsentiert sein, was nicht der Fall ist.

Der Tal- und Bergwind wird also, wenn er mit Pollen durchsetzte Luftmassen zum Austausch bringt, von vornherein auf die oben angedeutete Schichtung der Pollendichte stoßen. Seine Wirkung kann am besten im Gebiet des Rhonetals, dem klassischen Beispiel eines Alpenlängstales mit regelmäßigem Talwind, beobachtet werden. Wir beschäftigen uns aber nicht mit dem Rhonetal selbst, sondern mit jenem nach Norden führenden Zweigtal der Massa, das uns ins Gebiet des Großen Aletschgletschers, das wir später immer wieder als Untersuchungsobjekt heranziehen werden, führt.

Um die Talwinde, die für den Pollentransport auf den Aletschgletscher in Betracht kommen, zu untersuchen, wurden an schönen Augusttagen des Jahres 1933 17 Pilotballonaufstiege mit dem Theodoliten verfolgt und die Flugbahnen später berechnet (Vareschi, 1935). In die Abb. 6 sind die Resultate von vier charakteristischen Flügen eingezeichnet. Ebenso ist links unten die graphische Darstellung der Windhäufigkeit im Rhonetal selbst angezeigt. Der Talwind (SW-Wind) herrscht über alle anderen Windrichtungen vor. Aus den vier Flugbahnen ergibt sich folgendes: Ganz gleichgültig, welcher Wind in großer Höhe (über 1000 m) herrscht (Westwind an den drei untern Stationen, Nord-

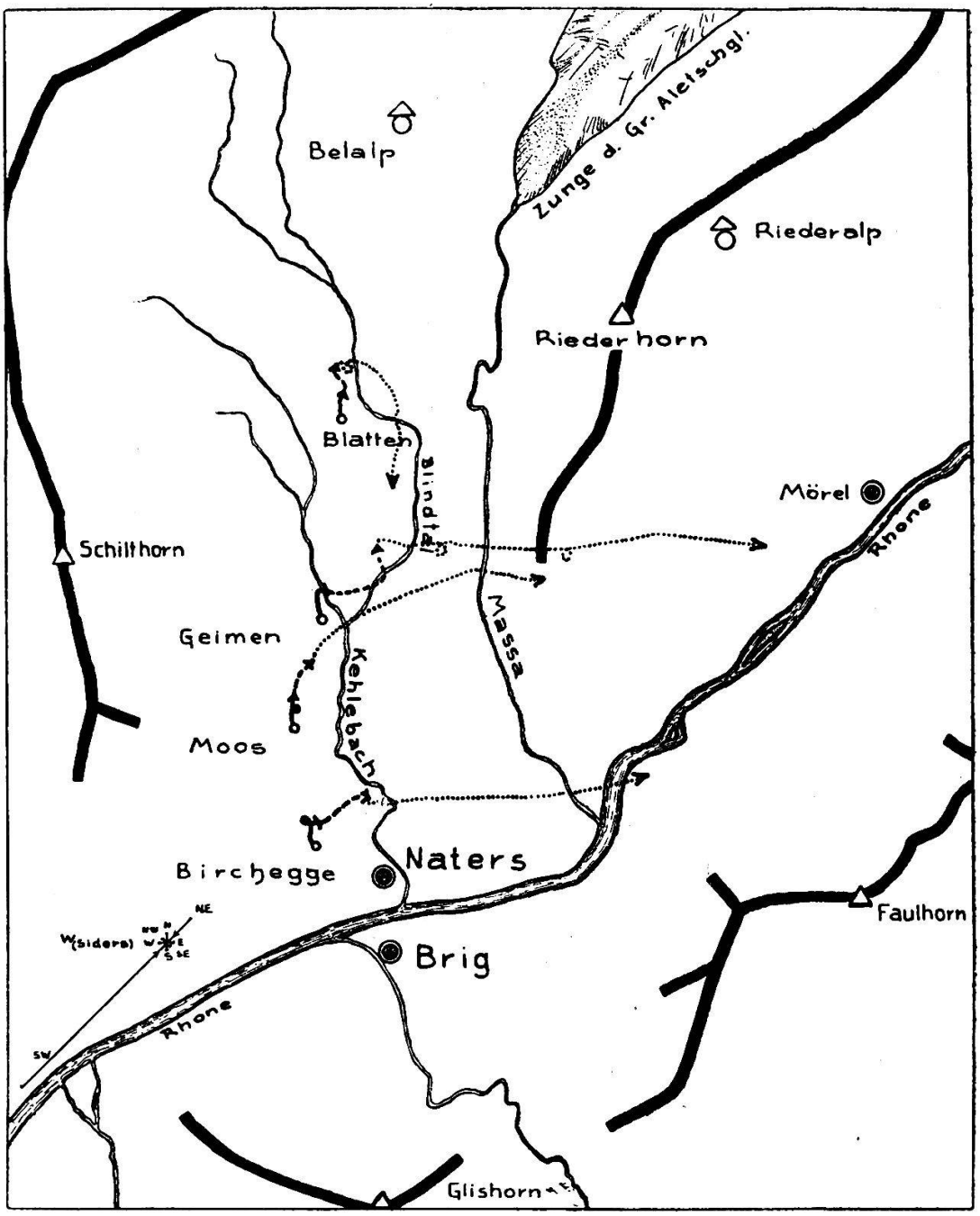

Abb. 6. Kartenskizze des Massatales. W = Graphische Darstellung der Windhäufigkeit im Rhonetal bei Siders. Für vier Orte des Massatales ist je eine charakteristische Ballonbahn eingetragen: 0—500 m über dem Boden = ausgezogene Linie. 500—1000 m über dem Boden = strichlierte Linie, darüber hinaus ist die Ballonbahn punktiert. 1 : 83 000.

wind bei Blatten), in der Zone unterhalb 500 m über dem Talboden ist stets der Talwind (hier eine Abzweigung des Rhonetalwindes Massa-aufwärts) führend. Zwischen 500 und 1000 m ist er ebenfalls noch spürbar, er kämpft z. B. bei Geimen mit

wechselndem Erfolg mit dem allgemein herrschenden Westwind, oder setzt sich noch bis über 1000 m hin gegen ihn durch (Moos). Für uns ist die Feststellung wesentlich: selbst in einer so unbedeutenden Talfurche, wie sie die Massa in die Südosthänge des großen Rhonetales legt, beherrscht der Talwind gerade in jenen Höhen über dem Boden die Luftströmungen, in denen nach den Feststellungen von Rempe u. a. die größte Pollendichte herrscht. Es werden hier also sicherlich große Pollenmengen auf dem kürzesten Weg aus den tiefsten Talfurchen auf die Gletscher transportiert.

Zu dieser räumlichen Übereinstimmung von Windeinwirkung und Pollendichte kommt noch eine zeitliche. Die Häufigkeit und Heftigkeit des Talwindes nimmt vom März an rasch zu und ist bereits im April so stark wie im Sommer. Das Maximum fällt in den Frühsommer. Der Talwind beginnt in den frühen Vormittagsstunden und erreicht zwischen 15 und 16 Uhr sein Maximum, nämlich durchschnittlich 25 Stundenkilometer. Wird er durch die allgemeine Windlage gefördert, so sind viel größere Geschwindigkeiten möglich (Billwiller, 1914). Die Hauptblütezeiten der Bäume sind die Monate April bis Juli. Die stärkste Pollenabgabe an die Luft erfolgt an schönen Tagen am Vormittag und dauert bis gegen den frühen Nachmittag hin an. Dann also, wenn der Talwind am stärksten weht, ist auch die Pollenproduktion am stärksten.

Selbstverständlich ist die Wirkung des Talwindes nicht überall so stark wie im Rhonetal. Daß sie aber auch in anderen Gebieten sich im Pollenniederschlag dokumentiert, zeigt ein Blick auf die Pollenniederschlagsverhältnisse im Oberbergtal (Vareschi, 1940).

Diesem bei Tage auftretenden Talwind folgt nachts ein ungleich schwächerer Bergwind. Die geringeren Windgeschwindigkeiten und die Strahlungsbedingungen der Nacht (Defant, 1919) bedingen nun ein vermehrtes Absinken der unter Tag emporgetragenen Pollen (Rempe, 1937). Zweifellos führt auch dieser Umstand zu einer besondern Anreicherung des Pollenniederschlags in den großen Firngebieten, die als die Heimat der nächtlichen Fallwinde bezeichnet werden können.

6. Die Pollenaspekte.

Die Pollenproduktion ist an den jahreszeitlichen Aspektrhythmus der Vegetation gebunden. Ebenso der Pollenniederschlag, nur ist bei diesem die Bindung lockerer. Der Pollenregen folgt der Pollenproduktion sogleich, hört jedoch nicht gleichzeitig mit ihr auf; die Luft gibt die empfangenen Pollenmassen erst nach und nach wieder ab, wobei gelegentlich noch mitspielt, daß bereits sedimentierter Pollen wieder aufgewirbelt wird und später von neuem absinkt.

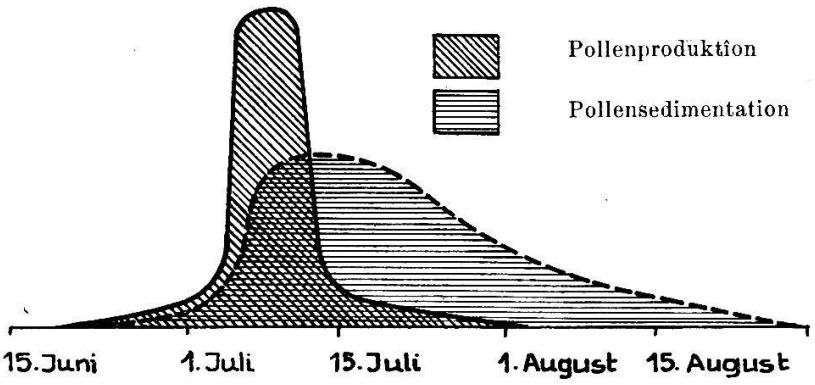

Abb. 7. Beziehung zwischen Pollenproduktion und Pollensedimentation der Linde in der Zeit zwischen dem Blühbeginn und dem Absinken der letzten Pollen (schematisch).

Das Blühen und der Pollenregen stehen miteinander in der Art in Beziehung, wie es Abb. 7 am Beispiel der Linde (für Innsbruck 1937) zeigt:

Beginn des Blühens: 20. Juni.
Allmähliche Zunahme des Blühens: 20. Juni bis 1. Juli.
Rasche Zunahme des Blühens: 2.—5. Juli.
Blühmaximum: 6.—11. Juli.
Rasche Abnahme des Blühens: 12.—15. Juli.
Allmähliches Abklingen des Blühens: 16. Juli bis 3. August.
Ende des Blühens: 3. August.

Fast gleichzeitig mit dem Beginn des Blühens wird der erste Pollen sedimentiert. Dann reichert sich die Luft mehr und mehr mit Pollen an, gibt ihn jedoch nur allmählich wieder ab. So kommt es, daß die Kurve des Pollenniederschlages ein viel flacheres Maximum aufweisen muß und die Pollenstreuung weit über den 3. August bis gegen Ende August hin anhält. Gelegentliche Nachzügler erscheinen natürlich oft erst viel später. Selbstverständlich wird dieser schematisch wiedergegebene Grund-

typus der Pollenproduktion und Pollensedimentation durch den Wechsel von Tag und Nacht, durch Witterungseinflüsse und durch die Windverhältnisse in gewissen Grenzen variiert. Der Abfall der Niederschlagskurve muß bei Pollen mit großer Sinkgeschwindigkeit etwas rascher erfolgen, als bei langsam absinkenden, die sich länger in der Luft halten können.

Abb. 8 bringt eine Übersicht der Blütezeit, der Pollenproduktion und der Pollensedimentation für die wichtigsten Pollenlieferanten während eines Jahres. Zur Zusammenstellung dieser Übersicht, der die Verhältnisse im Oberbergtal im Stubai zugrunde liegen, wurden neben dieser Arbeit zahlreiche Angaben in der Literatur mitberücksichtigt, so insbesondere die Beobachtungen von Lüdi und Vareschi (1936), Lüdi (1937), Rempe (1937), Bertsch (1935) und phänologische Literatur, besonders die Arbeiten von Ihne (1929 ff.), schließlich durch meine Erfahrungen an verschiedenen Gletschern.

Corylus: Blüht früh, das Blühen wird oft durch Fröste für kurze Zeit unterbrochen (Ihne, 1929), die Produktion ist reichlich, die Sedimentation geht, nachdem der erste Schub niedergeschlagen ist, nur sehr langsam zu Ende.

Alnus incana: Der zweite, große Pollenlieferant. Das Blühen setzt noch während des Haselgipfels ein, erreicht aber das Maximum deutlich später als Corylus. Die Pollenproduktion ist so reichlich, die Sedimentation so langsam, daß das ganze Jahr hindurch bis zum Einsetzen der nächsten Blütezeit Pollensedimentation nachgewiesen werden kann.

Salix: Die vielen Salixarten blühen zu verschiedenen Zeiten. Pollenanalytisch sind sie nicht zu trennen. Daher kommt es, daß wir für die ganze Gattung eine so große Blütezeit von Anfang März bis Ende September ansetzen müssen, wobei die Monate Juli und August durch die Blütezeit der Gletscherweiden hinzukamen. Die Sedimentation ist allmählich.

Ulmus: Die einzelne Ulme produziert bekanntlich sehr viel Pollen, bei der Spärlichkeit ihres Vorkommens ist jedoch ihre Gesamtproduktion nur gering. Immerhin ist sie als charakteristisch für die erste Blühperiode von Bedeutung.

Betula: Die Pollenproduktion nahm im Oberbergtal 1937 und 1938 mit steigender Meereshöhe deutlich ab. Deshalb das eindeutige Maximum am Beginn der Blütezeit und ein allmähliches Ab-

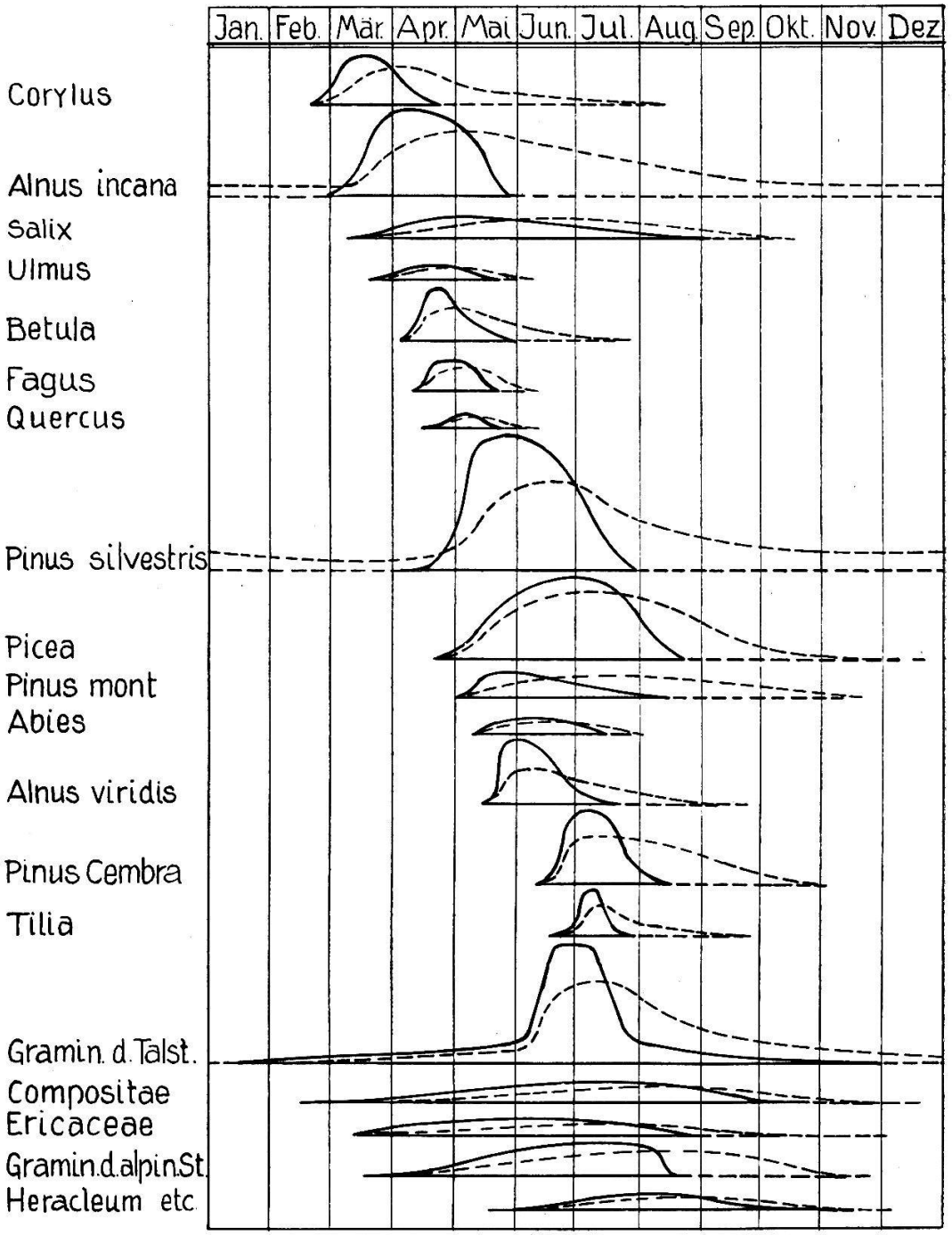

Abb. 8. Blütezeit, Pollenerzeugung (ausgezogene Kurven) und Pollensedimentation (gestrichelte Kurven) der wichtigsten Pollenproduzenten während eines Jahres.

klingen gegen Ende derselben. Die Gesamtproduktion ist viel geringer, die Sedimentation dagegen ebenso langsam abflauend wie bei Corylus.

Fagus: Dieser Pollen wurde im Oberbergtal nicht gefunden. Die Blütezeit ist kurz, die Sedimentation rasch. Ähnlich verhält sich die fast gleichzeitig blühende Eiche, die gelegentlich auffällig weithin verschleppt wird.

Pinus silvestris: Die Waldföhre ist der stärkste Pollenproduzent des Jahres. Ende April schon setzt ihr Blühen mit Macht ein, erreicht um Anfang Juni das Maximum und endet Mitte Juli. Die Sedimentation geht wegen der großen produzierten Masse und wohl auch wegen der geringen Sinkgeschwindigkeit das ganze Jahr hindurch vor sich.

Picea: Die Pollenproduktion des Einzelbaumes ist im Vergleich zur Föhre gering, die Massenausbreitung der Fichte in unseren Bergtälern sorgt jedoch immerhin für eine gewaltige Pollenproduktion, so daß gegen Ende Juli mehr Picea sedimentiert wird als Pinus. Die Sedimentation geht ziemlich rasch vor sich, doch kommen einzelne Nachzügler noch mitten im Winter zum Niederschlag.

Pinus montana: Da unsere Gletscher fast alle im Urgebirge liegen, ist die Massenwirkung der Latsche nicht hoch anzuschlagen. Der Pollen ist übrigens von Pinus silvestris schwer zu trennen.

Abies alba: Tritt im Pollenregen der Firnfelder sehr zurück. Sedimentiert rasch.

Alnus viridis: Der Beginn des Blühens fällt mit dem letzten Teil der Blütezeit von Alnus incana zusammen, das Maximum ist jedoch deutlich später. Die Pollen beider Arten sind nicht zu trennen, deshalb findet man bei manchen Beobachtern eine doppelgipfelige Alnuskurve im Jahresbild. Für diese Art, wie für die folgende gilt die Beobachtung eines sehr raschen, fast «explosiven» Aufblühens, und eines allmählichen Abflauens. Sinkgeschwindigkeit sehr gering.

Pinus cembra: Produktion und Blühverlauf ähnlich Alnus viridis, Maximum jedoch erst Anfang Juli. Sedimentation eher rasch wie bei Picea als ähnlich dem morphologisch so nahestehenden Pinus silvestris-Pollen verlaufend.

Tilia: Bei der Spärlichkeit der Lindenvorkommen in den Alpentälern ist dem Einzelbaum eine mächtige Pollenproduktion zuzuschreiben. Die Linde kennzeichnet die letzte Blühperiode der Holzgewächse. Ihre Sedimentation ist mittelschnell. Der Pollen ist

im Pollenregen der Firnfelder immer nur spärlich vertreten, *wenn* er jedoch gefunden wird, so ist er charakteristisch für den Monat Juli und August.

Ericaceae: Vom Blühen der Erica carnea über die Blütezeit der Vaccinien und Rhododendren bis zum Verblühen von Calluna ist es eine so lange Blütezeit, daß trotz an sich schwacher Produktion (unter Produktion ist hier natürlich nur der an die Luft abgegebene Pollen gemeint, der von Insekten verschleppte oder der in der Blüte verbliebene kommt für uns nicht in Betracht) bei langsamer Sedimentation Ericaceen bis in den Winter hinein gefunden werden. Ähnlich steht es auch mit den Kompositen.

Gramineen: Bei den Gramineen (und den im großen und ganzen sich ähnlich verhaltenden Cyperaceen) erfolgt das Blühen fast das ganze Jahr hindurch. Ende Juni oder Anfang Juli kommt jedoch jener gewaltige Pollenschub, der von den Heufieberkranken so gefürchtet ist und auch in den Niederschlagsmessungen der verschiedenen Autoren immer wieder erscheint. Das Abflauen des dieser Hauptmassenproduktion folgenden Niederschlagsmaximums erfolgt zunächst rasch, dann langsamer. Trotz der großen Massen ist die Luft sowohl zeitlich als räumlich bald wieder von ihnen gereinigt, so daß im Winter Gramineenpollen viel seltener sedimentiert werden, als etwa Erlen- oder Föhrenpollen. Einen ganz andern Verlauf hat die entsprechende Kurve für die Gramineen der alpinen Stufe (über die Begründung vgl. Lüdi und Vareschi, 1936).

Umbelliferen: Während schon seit Mai Umbelliferenpollen in geringen Mengen sedimentiert wurden, erfolgt nun als letzter unterscheidbarer Blühaspekt der Vegetationsperiode das Massenblühen der Umbelliferen (Heracleum sphondylium, Daucus carota, Pastinaca sativa usw.), das sich im Pollenniederschlag deutlich auswirkt.

Bei pollenanalytischen Arbeiten mit waldgeschichtlicher Problemstellung pflegt man die Pollenmengen nur relativ anzugeben. Auch in unseren Diagrammen kehrt diese Darstellungsweise neben der Angabe der absoluten Zahlenwerte wieder. Es ist deshalb wichtig, sich eine Vorstellung davon zu machen, wie der Pollenniederschlag im Laufe des Jahres sich im prozentuellen Bild bei gleichzeitiger Überschneidung der Pollenvorkommen ändert. Abb. 9 gibt einen solchen approximativen Entwurf für die Anteile von

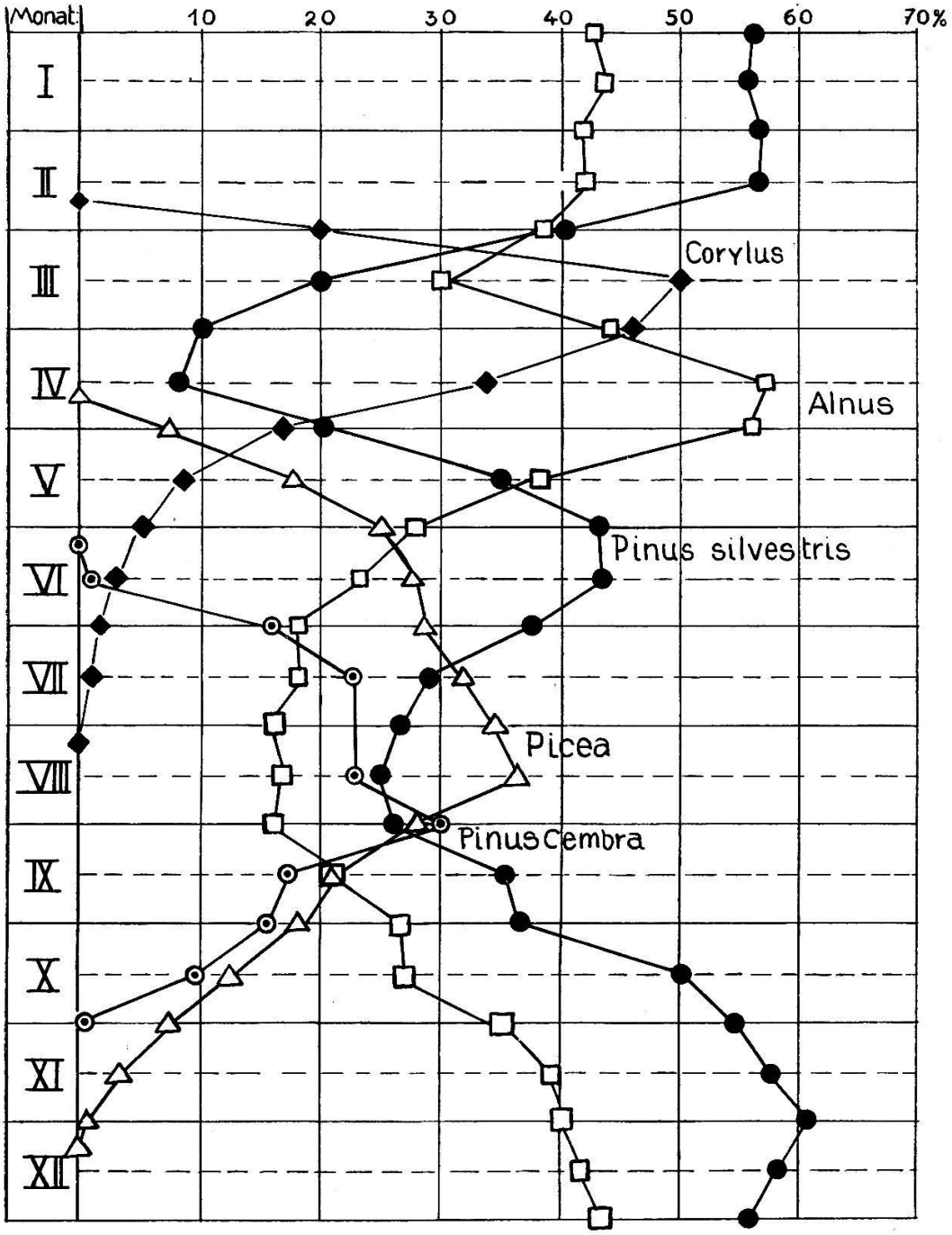

Abb. 9. Prozentualer Anteil der fünf wichtigsten Holzarten am Pollenniederschlag während eines Jahres. (Signaturen in Anlehnung an die waldgeschichtlichen Diagramme).

Pinus silvestris, Picea, Alnus, Corylus und Pinus cembra wieder. Im Winter beherrschen Pinus silvestris und Alnus in wenigen Restpollen das Bild. Mit dem Aufblühen der Hasel verschwinden diese fast ganz, drängen aber mit Beginn ihrer eigenen Blütezeit die Hasel wieder zurück. So folgen nacheinander Corylus-, Alnus-

und Pinus silvestris-Maximum. Das letztere wird durch den Zustrom aus den aufblühenden Fichten und später Zirben rasch wieder herabgedrückt, die Pinuspollenprozente nehmen aber im Lauf des Herbstes, je mehr die an Menge viel kleineren Pollenmassen der übrigen Arten abnehmen, wieder zu, während die absolute Zahl der sedimentierten Pollen immer mehr abnimmt.

In den vorläufigen Veröffentlichungen habe ich nur wenige «Pollenjahreszeiten» unterschieden. Das nunmehr vorliegende Material gestattet jedoch genauere Angaben. Während bisher nur Herbst-Winter, Vorfrühling, Frühling, Vorsommer, Sommer und Spätsommer unterschieden wurde, sollen hier, wo es möglich ist, die Aspektphasen durch die betreffenden Monatsnamen genauer angedeutet werden. Es muß jedoch dabei immer beachtet werden, daß es sich bei den angegebenen Zeitabschnitten nicht um Kalenderphasen, sondern um Bezeichnungen für Blühzeiten handelt. Wird also beispielsweise aus bestimmten Pollenvorkommen (z. B. Tilia, Pinus cembra) auf «Sommer» oder «Juli» geschlossen, so bedeutet das nicht, daß die Sedimentation der Pollen im Kalendersommer oder im Monat Juli stattfand, sondern nur, daß sie aus der Blühzeit, die in normalen Jahren in den Monat Juli zu fallen pflegt, stammen. Ist dieser Blühzeit-Juli auch einige Wochen später oder früher, das schadet für unsere Zwecke nichts, denn dann verschiebt sich ja auch der nächtsfrühere Aspekt (Picea, Pinus) und der nächste (Umbelliferen) um annähernd denselben Betrag. Die relative Lage der Blühzeiten im Jahresablauf bleibt konstant, und auf sie kommt es uns an, wenn wir Eisstücke auf ihren Pollengehalt prüfen.

7. Anwendung der Pollenanalyse in der Glaziologie.

Die Erfahrungen der Pollenanalyse von Torfen dürfen nicht ohne weiteres auf die Eisanalyse angewandt werden. Schon bei der Probenentnahme muß die übliche Arbeitsweise aufgegeben werden. Man benützt keinen Bohrer, sondern die zahlreichen Aufschlüsse der Gletscher. Neben Proben von der Eisoberfläche kommen solche von Spaltenwänden (Abb. 10), Staffelbrüchen (Abb. 11), Randklüften aus zugänglichen Teilen der Gletschersohle und schließlich aus eigens gegrabenen Schächten zur Verarbeitung.

Bei der Probenentnahme wird zunächst der betreffende Punkt der Gletscheroberfläche genau topographisch fixiert. Dann werden alle in der Nähe des zu untersuchenden Punktes entwickelten Gletschertexturen notiert und schließlich das oberflächliche Eis

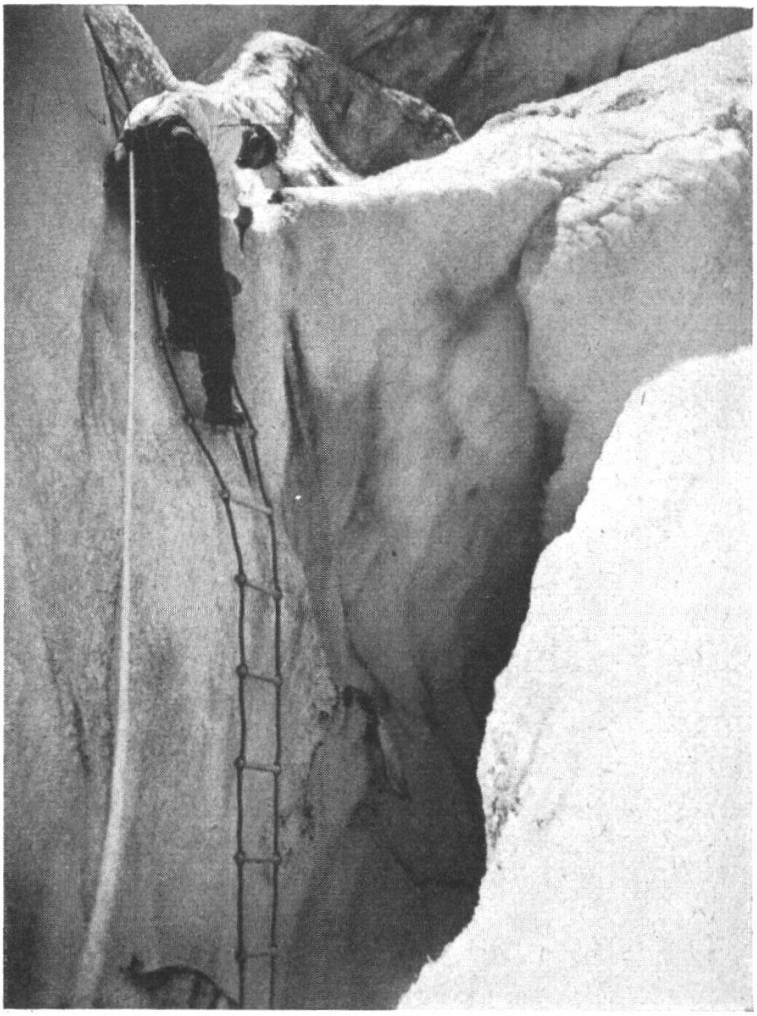

Abb. 10. Probenentnahme aus einer Spalte. Mittels Strickleitern kann man oft sehr tief in den Gletscher eindringen. Statt mit dem Pickel wird in engen Spalten das Eis mit dem Messer losgehauen.
Gepatschgletscher, Zungengebiet, 2150 m.

bis auf eine Tiefe von 10—20 cm abgetragen. Wie an Hand einiger methodischer Prüfungen festgestellt wurde, dringen Blütenpollen durch das Haarspaltennetz nicht in die tieferen Schichten des Gletschers ein. Es gibt jedoch Fälle, wo durch starke Bestrahlung der Gletscherkornverband brüchig gelockert ist, dann können Pollen ziemlich tief eindringen. Dieser an sich seltene

Fall ist aber bei sorgfältiger Prüfung zu erkennen und derartiges Eis wird dann nicht zur Bearbeitung verwendet.

Jede entnommene Probe soll nur Eis von durch und durch gleicher Beschaffenheit enthalten. Es muß deshalb darauf geach-

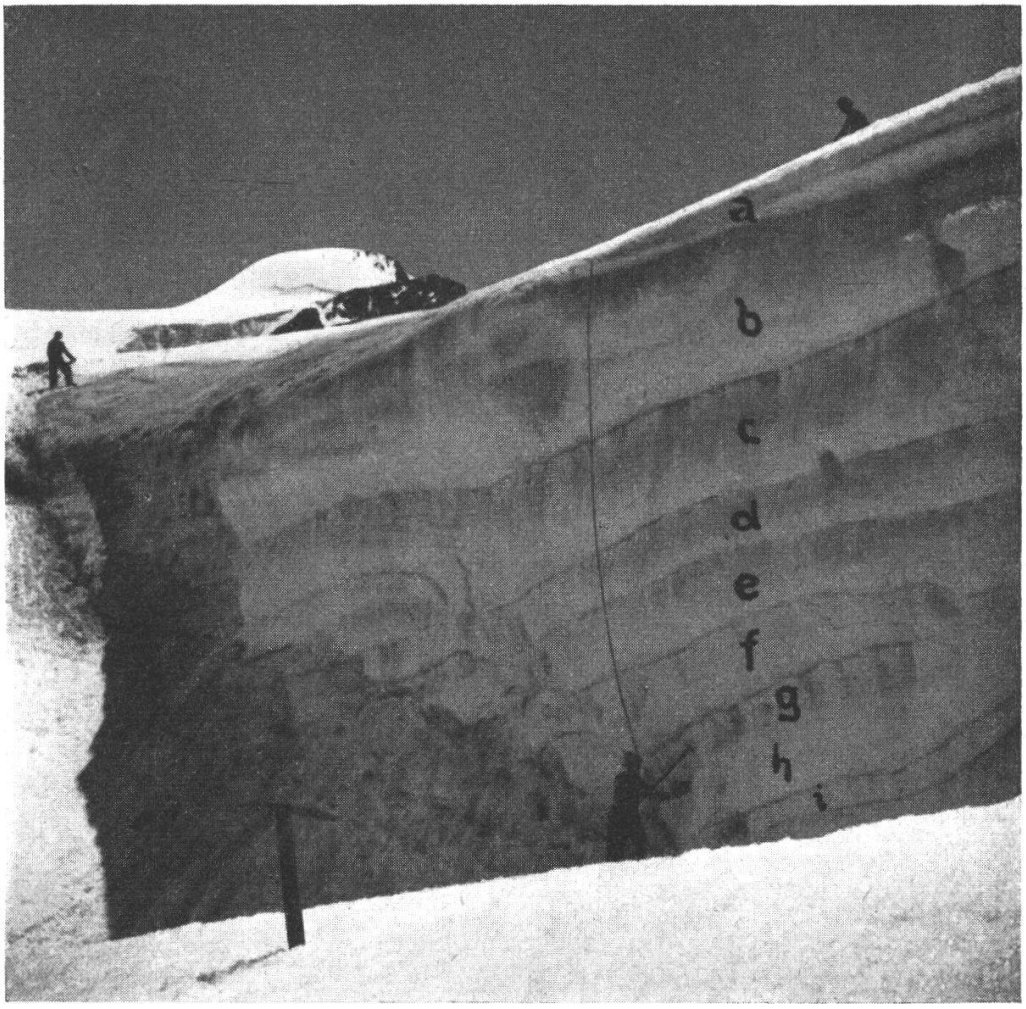

Abb. 11. Staffelbruch im Firnfeld des Gepatschgletschers (3080 m) mit Angabe der Stellen, von denen Eisproben entnommen wurden. Diese Proben (a—i) ergaben Aspekte aus 6 Jahren, deren Firnzuwachs damit ermittelt war.

tet werden, daß keine Änderung der Farbe und vor allem keine Änderung der Kornstruktur innerhalb der Probe auftritt. Nur dann besteht die Wahrscheinlichkeit, daß alle Teile der Probe gleich alt sind, d. h. aus derselben Witterungsperiode stammen. Ungleichmäßigkeiten in der Verteilung der Verunreinigungen, Abstufung in der Bänderung, andersfarbige Einschlüsse sind zu vermeiden. Aber mit all diesen Vorsichtsmaßregeln kann nicht mehr erreicht werden, als die Wahrscheinlichkeit, daß die Probe

wirklich in allen ihren Teilen gleichzeitig entstanden und gleichmäßig verändert worden ist. Die Sicherheit über die Homogenität gibt erst die Pollenanalyse. Da stellt sich dann manche scheinbar reine Probe als Mischeis heraus: statt der Pollen einer bestimmten Jahreszeit findet sich ein Zufallsgemisch.

Bei jeder Probenentnahme wird notiert:

Ort, Beschreibung der Umgebung der Probe, Schichthöhe, Beimischungen, Farbe, Korngröße. Die Eisstücke werden in Weithalsflaschen gefüllt. Es werden für jede Probe mindestens 2 dm^3 Eis (im Mittel etwa 4 dm^3, niemals mehr als 10 dm^3) entnommen. Die Form der ausgehackten Grube richtet sich nach der Gletschertextur. Bei schmalbänderiger Struktur folgt sie dieser, bei homogenem Eis wird ein mehr kubisches Eisstück entnommen. In den Flaschen, die einen guten Patentverschluß haben müssen, können nun die Proben bis zum nächsten Standquartier getragen werden. Dort werden sie auf dem Primuskocher geschmolzen. Dabei muß jedes Gefäß, das verwendet wird, peinlich sauber gehalten sein. Neben absolut pollenfreiem Quellwasser kann auch das eigene Schmelzwasser eines Teils der Probe zuvor als Putzwasser verwendet werden. Nun wird das Schmelzwasser in einer großen Handzentrifuge von ca. 1/2 l Fassungsraum zentrifugiert. Bei 2500 Umdrehungen pro Minute genügt es, wenn die Zentrifuge eine Minute lang läuft. Der Bodensatz wird dann in kleine Fläschchen oder in Stoffbehälter gefüllt und so kann man dann den Staubinhalt von vielen hundert Litern Eiswasser bequem im Rucksack zu Tal tragen. Falls im Laboratorium nicht bald an die weitere Verarbeitung der Proben geschritten werden kann, muß man durch ein paar Tropfen eines Konservierungsmittels einer Verpilzung vorbeugen.

In Ermangelung einer Zentrifuge können die Proben auch bis auf wenige Kubikzentimeter eingedampft werden. Das schadet den Pollen nichts, ist aber sehr zeitraubend und unrationell. Anläßlich der Lauge Koch-Expedition nach Grönland wurden durch den Geologen der Expedition, Herrn Dr. E. Stauber aus dem King-Oskar-Fjord Proben entnommen. Dabei wurde, da eine Zentrifuge nicht zur Hand war und für das stundenlange Abdampfen die Zeit fehlte, folgendes Verfahren angewandt: Die Proben wurden gleich nach dem Schmelzen durch einen aschefreien Filter (Bender u. Hobein, Rundfilter SS 589, 7 cm Durchmesser) gegossen, der Filter samt Rückstand getrocknet und in verschlossenem Fläschchen aufbewahrt. Diese Methode eignet sich auch für die Alpen, die Bearbeitung im Laboratorium wird dadurch jedoch wesentlich umständlicher, weil zweimal mit aller Sorgfalt azetolysiert (siehe S. 43) werden muß, um die Zellulose der Filter aufzulösen, ohne die Zellulose der Pollenexine (Pollinin) zu zerstören.

Im Laboratorium stellt man nun fest, wieviel und welcher Art der Staubgehalt der Probe ist. Proben mit viel Kalziumkarbonat erhalten folgende Vorbehandlung: Kochen mit 10 %iger Salzsäure (3 Minuten), Zentrifugieren, Aufschütteln mit Wasser (dest.), Zentrifugieren. Proben mit sehr viel Silikaten werden im Platintiegel unter Zusatz von 1/2 bis 1 cm^3 Flußsäure (40 %ig) und einigen Tropfen konzentrierter Salzsäure 1—2 Minuten vorsichtig gekocht. Dann wird zentrifugiert, in 80 %iger Salzsäure aufgekocht und wieder zentrifugiert. Die Salzsäurebehandlung und das nachfolgende Zentrifugieren ist so lange zu wiederholen, bis die Probe nicht mehr schleimig aussieht. Zuletzt wird sie noch mit Wasser zentrifugiert und dann entweder der nachfolgenden Behandlung unterzogen oder auch nach Zusatz von etwas Glyzerin gleich untersucht.

Proben, die nicht durch ein Übermaß von anorganischen Staubmassen

verschlammt sind, werden direkt der Azetolyse (ungefähr nach der Erdtmanschen Methode 1936) unterzogen. Die Probe wird im Trockenschrank bei 110° getrocknet und mit einer Mischung (frisch hergestellt) von 9 Volumteilen Essigsäureanhydrid und 1 Volumteil konzentrierter Schwefelsäure versetzt. Man verwendet am besten Zentrifugierröhrchen von 10 cm³ Inhalt, so daß auf die nur Bruchteile eines Kubikzentimeters ausfüllenden Staubreste fast 10 cm³ der Mischung geschüttet werden. Dann kommen — man macht am besten 8 Proben gleichzeitig — die gefüllten und numerierten Röhrchen in ein Wasserbad, wo sie von etwa 60° auf 96° erhitzt werden. Es kommt also das Wasser nicht zum Kochen, sondern nur nahe an den Siedepunkt heran. Während der Erhitzung der Proben werden sie ein- bis zweimal umgerührt. Ich verwende dazu Platin- oder Kupferdraht, der nach jedesmaligem Gebrauch vor Eintauchen in eine andere Probe ausgeglüht wird. Überhaupt müssen wir bei unseren Gletscherproben wesentlich vorsichtiger wegen Verunreinigungen sein, als man dies bei Torfproben nötig hat. Während bei Torfproben nur prozentuelle Zahlen verwendet werden, die durch einige zufällig hinzugekommene Pollen oft gar nicht verändert werden, ist für uns oft gerade die Feststellung absoluter Pollenfreiheit in einer Probe wesentlich, diese aber ist nur bei vollkommen «pollensterilem» Vorgehen feststellbar. Nun werden die Zentrifugierröhrchen außen getrocknet und in die Zentrifuge gesetzt. Bei 3000 Umdrehungen genügt eine halbe Minute. Nach dem Zentrifugieren gießt man die Flüssigkeit ab, füllt 10 cm³ Wasser nach, schüttelt kräftig, entfernt den eventuell dabei entstehenden Schaum mit einigen Tropfen Azeton und zentrifugiert von neuem. Dann wird das Röhrchen mit 5 cm³ einer Mischung von Glyzerin und Wasser (1 : 1) gefüllt und von neuem zentrifugiert. Beim Ausschütten der Flüssigkeit läßt man dann etwa ebensoviel Flüssigkeit über dem Rückstand stehen, als dieser selbst Raum einnimmt. Dann wird stark geschüttelt, so daß der Rückstand sich von der Wand abgelöst hat und als dichte Suspension im Glycerin-Wassergemisch aufgeschlemmt erscheint, und schließlich füllt man die Suspension in einen Stoffbehälter, in dem dann die Probe jahrelang bis zur Untersuchung haltbar bleibt.

Werden die oben erwähnten Filter mit verarbeitet, so muß zweimal azetolysiert werden. Ein Vorgang, bei dem sich alle Filterreste auflösen und der doch den Pollen, wie durch Versuche festgestellt wurde, keinerlei Schaden zufügt.

Nun kann erst zur eigentlichen Pollenanalyse geschritten werden. Mit einer feinen Meßpipette wird jeder Tropfen, der untersucht werden soll, in Kubikmillimetern gemessen. Die Anzahl der waagrechten Zeilen, die bei einer bestimmten Vergrößerung und Deckgläschengröße abgesucht werden kann, wird festgestellt. Es waren bei Okular 4 und Objektiv 6 (Zeiß) und einer Deckglashöhe von 24 mm 40 Zeilen. Es wird nun jede dritte Zeile ausgezählt, zwei Zeilen dazwischen bleiben unbearbeitet, damit nicht bei kleinen Bewegungen unter dem Deckglas Pollen zweimal gezählt werden können. Bei der Berechnung kann dann der untersuchte Teil der Probe auf die ganze in der Pipette gemessene Flüssigkeitsmenge und aus mehreren solchen Zählungen schließlich auf das Gesamtvolumen der Probe bezogen werden. Man erhält schließlich, da ja auch die Menge des bei der Schmelzung gewonnenen Eiswassers notiert wurde, den absoluten Pollengehalt für 1 l Eiswasser, und damit auch mit genügender Genauigkeit für 1 dm³ Eis.

In einigen Zeilen wird nun der gesamte Staub gezählt, um einen Einblick in die in ihm überhaupt feststellbaren Partikel zu erhalten. Faser-, Blatt- und sonstige Zellen, Holzzellen, Rindenzellen, Algen, Chitinteile von Insekten und alle irgendwie deutbaren Gewebefetzen werden gezählt und die Mengen an organischem und anorganischem Detritus in großen Umrissen geschätzt. Dann werden beim übrigen Präparat nur mehr die Pollen und Farnsporen notiert. Dabei werden folgende Pollensorten unterschie-

den: Abies alba, Picea excelsa, Pinus cf. silvestris, Pinus cf. montana, Pinus cf. cembra, Fagus silvatica, Fraxinus, Acer, Carpinus Betulus, Quercus, Hippophaë, Castanea sativa, Alnus, Betula, Corylus, Salix, Ulmus und Tilia. Dann von Nichtholzarten: Gramineen, Cyperaceen, Liliaceen, Charyophyllaceen, Epilobium, Umbelliferen, Ericacee (unter ihnen Calluna cf., Erica carnea cf., Rhododendron cf., übrige Ericaceen cf.), Rubiaceentyp, Campanulaceentyp, Compositen, übrige Pollen (hier alle übrigen als Pollen erkennbaren Zellen mit Ausnahme der Lärchenpollen, die ganz außer Betracht fallen, da sie meist nicht mehr erhalten und oft kaum mehr erkenntlich sind). Von Sporen werden Polypodiaceensporen mit Angabe, ob die Exine erhalten ist oder nicht und Lycopodiumsporen gezählt, und die fast stets sehr zahlreichen Moos-, Pilz- und Flechtensporen werden größenordnungsmäßig geschätzt.

Als Beispiel einer Staubanalyse, die außer den Pollen auch die übrigen Einschlüsse berücksichtigt und daher einen Einblick in die im Gletschereis auftretenden «Mikrosubfossilien» gibt, seien hier zu der in Tabelle II (S. 126) angegebenen Pollenmenge der Probe Nr. 39 die Analysenresultate angezeigt. Bezogen auf 1 dm^3 Eis waren enthalten:

Baumpollen	245
Gramineenpollen	18
Übrige Pollen	13
Farnsporen (Polypod.-typ)	4
Moossporen (und morphologisch ähnliche Sporen)	55
Pilz- und Flechtensporen	14
Hyphen	11
Tracheen	2
Tracheiden	126
Holzfaserzellen	178
Holzgewebeteile	14
Reste von Algenzellen	2
Tierische Zysten	23
Andere tierische Reste (Chitin usw.)	19
Diatomeen	5
Nicht verholzte Gewebeteile	5
Pflanzenhaare	2
Organische Reste, unkenntlich,	ca. 200

Über die Unterscheidung der schwer zu trennenden verschiedenen Pinusarten hat Hörmann (1929) gearbeitet. Neben den dort angegebenen Merkmalen benützte ich auch oft noch die Farbe der Pollen als Hinweis. Pinus cembra war bei einfacher Azetolysebehandlung fast stets noch braun, während Pinus silvestris und montana bereits ausgebleicht waren. Zur Bestimmung nach anatomischen Merkmalen kam stets noch die durch die Größenmessungen, die variationsstatistisch ausgewertet wurden. Es ist dabei zu beachten, daß die Kurven der drei Arten alle etwas höher liegen als bei Hörmann, da durch die Erdtman-Behandlung der Pollen etwas größer wird als bei der von Hörmann angewandten Behandlung. Für die Unterscheidung der Ericaceenpollen benützte ich zum Teil die von Overbeck (1934) angegebenen Merkmale, zum Teil (für Erica carnea, Rhododendron) waren eigene Voruntersuchungen, über die an anderer Stelle noch berichtet werden soll, nötig.

Die Resultate der Analyse werden nun in sogenannten Eispollendiagrammen dargestellt. Bei Oberflächenproben zeigt das Diagramm eine Art Karte eines Teiles der Gletscheroberfläche in der möglichst genau alle erkennbaren Texturen usw. eingetragen sind, bei senkrechten Profilen gibt die Textureigentümlichkeiten

ein Profilband wieder. Das Profilband (vgl. Abb. 20, S. 59) trägt links eine Meterskala, aus der die absoluten Größenverhältnisse, insbesondere die Schichthöhen, zu entnehmen sind. Die einzelnen, mit bloßem Auge trennbaren Schichten sind durch kleine Buchstaben bezeichnet, und je nach dem Eismaterial, aus dem sie bestehen, im Profilband graphisch unterschieden. Korngröße, inhomogene Zonen, Verunreinigungen usw. sind dargestellt. Ort und Form der Probe, die entnommen wurde, ist als schwarzer Fleck in das Profilband jeweils eingezeichnet. Dann folgen die Nummern der Proben und schließlich die Darstellung des pollenanalytischen Befunds. Durch einen stark ausgezogenen Kreis wird eine Fläche umschrieben, die proportional der gefundenen Baumpollenmenge (Zahl der Baumpollen in dm^3 Eis) ist. Als Vergleichsmaß dient die im Profil rechts unten eingezeichnete Kreisfläche, die genau 100 Pollen entspricht. Daneben ist die absolute Pollenmenge auch noch durch die betreffende Zahl zugefügt. Die relativen Zahlen der einzelnen Holzarten müssen neben diesen absoluten Werten ebenfalls vom Diagramm ablesbar sein. Der fein umrandete, mit den Signaturen ausgefüllte Kreis gibt diesen prozentualen Anteil der Holzarten an der Zusammensetzung des Spektrums. Die Signaturen sind so gewählt, daß frühblühende Holzarten hellere Flächensignaturen erhalten als spätblühende. Dadurch ist oft der jahreszeitliche Charakter schon beim ersten Überblick ablesbar. Daneben stehen noch Anmerkungen über Nichtbaumpollen (in absoluten Mengenangaben) und schließlich ein Urteil über die Jahreszeit, auf die das Aspektbild hindeutet. Durch ausgezogene Pfeile werden pollenanalytisch sichergestellte Jahresgrenzen, durch strichlierte Pfeile unsichere Jahresgrenzen eingetragen. Bei abgekürzter Darstellung werden oft nur die verschiedenen Jahreszeiten durch die Signatur der betreffenden Leitpollen angedeutet. Es bedeutet dann: Weiß: Herbst bis Winter. Punktierte Fläche: Frühling. Karierte Fläche: Sommer. Wiederum bedeuten (vgl. S. 39) auch diese Jahreszeiten keine Kalender-, sondern Pollenaspektzeiten.

An Hand solcher Diagramme wird ein Einblick in den Aufbau der Eismassen aus Eisteilen mit verschiedenen Pollenaspekten gewährleistet. Der Leser kann sich selbst ein Urteil darüber bilden und die Schlüsse, die auf Grund der Diagramme gezogen werden, selbst an Hand der Originaldaten überprüfen.