

Beiträge zur Geologie der Schweiz - Geotechnische Serie - Hydrologie

4. Lieferung

Herausgegeben von der Geotechnischen Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft
gemeinsam mit dem ehem. Institut für Gewässerkunde der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich

ZUM WASSERHAUSHALT DES SCHWEIZER HOCHGEBIRGES

I. BAND

I. Teil

ALLGEMEINES

Dritte Abteilung.

- 6. Kapitel. Boden und Vegetation im Wasserhaushalt des Hochgebirges.
- 7. Kapitel. Die Bedeutung des Schneetransportes durch den Wind (Windverfrachtung) im Wasserhaushalt des Schweizer Hochgebirges.
- 8. Kapitel. Die Bedeutung der Nebel-, Tau- und Reifbildungen im Wasserhaushalt des Hochgebirges.

Von

O. Lütschg-Loetscher †

Mitarbeiter Rudolf Bohner

Mit einem Beitrag von Hans Burger

Mit 4 Tafeln, 4 Figuren und 15 Tabellen

In Kommission bei Kümmerly & Frey, Geographischer Verlag, Bern

Zürich 1949

Druck von Aschmann & Scheller AG. / Buchdruckerei „zur Froschau“ / Zürich

Bisher erschienene Teilabschnitte des Werkes von O. Lütischg-Loetscher:

„Zum Wasserhaushalt des Schweizer Hochgebirges“

(Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, Hydrologie, Lieferung 4)

I. Band, I. Teil, Erste Abteilung (Mitarbeiter Rudolf Bohner)

1. Kapitel: Ueber den heutigen Stand der Niederschlagsforschung im Schweizer Hochgebirge.
2. Kapitel: Ueber den gegenwärtigen Stand der Abflußforschung im Schweizer Hochgebirge.
3. Kapitel: Die Zusammenhänge zwischen Niederschlag und Abfluß im allgemeinen.

I. Band, I. Teil, Zweite Abteilung

4. Kapitel: Die Bedeutung und Bewertung der Vorratsänderungen im Wasserhaushalt der Gletscher im Schweizer Hochgebirge.
5. Kapitel: Beobachtungen über das Verhalten des vorstoßenden Oberen Grindelwaldgletschers im Berner Oberland.

II. Band, III. Teil (Mitarbeiter Rudolf Bohner und Walter Dietz)

Zur Hydrologie der Landschaft Davos. Forschungsgebiet Nr. 7.

III. Band (F. Gyax)

Niederschlag und Abfluß im Einzugsgebiet der Magliasina. Forschungsgebiet Nr. 16.

In den *Denkschriften der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft* sind erschienen

Band LXXVI, Abh. 2:

Ueber die Verdunstungsgröße freier Wasserflächen im Schweizer Hochgebirge.

Band LXXVII, Abh. 2:

Beitrag zur Kenntnis des Wärmehaushaltes der obersten Bodenschicht der Schweizer Alpen.

Vorwort der Geotechnischen Kommission

Im Jahre 1944 erschienen die ersten Teilabschnitte des großen Werkes «Zum Wasserhaushalt des Schweizer Hochgebirges» von Ing. Dr. h. c. O. Lütischg-Loetscher in der Serie «Hydrologie» der Geotechnischen Kommission. Seit 1927 stand sie mit Dr. Lütischg, dem Begründer und unermüdlichen Förderer der Hochgebirgshydrologie der Schweizer Alpen, in Beziehungen. Der «Wasserhaushalt» verdankt seine Entstehung aber zum weitaus größten Teil der Initiative und Schaffenskraft des Autors selbst. Die Geotechnische Kommission rechnet es sich zur hohen Ehre an, daß sie das Werk in ihrer Serie «Hydrologie» einreihen konnte. Als Dr. Lütischg im Juli 1947 mitten aus voller Tätigkeit starb, war erst ein kleiner Teil des Werkes vollendet. Ueber die Lebensarbeit von Dr. Lütischg gibt der Nachruf in den Verhandlungen 1947 der Schweiz. Naturf. Gesellschaft im einzelnen Aufschluß.

Von Dr. Lütischg war als erster Band des «Wasserhaushaltes» ein *allgemeiner Teil* mit ursprünglich 15 Kapiteln, ein *spezieller Teil* (II. Band) mit der Darlegung der Hydrologie von einzelnen Spezialforschungsgebieten (im ganzen 16), ferner noch ein Band mit den *Schlußfolgerungen* vorgesehen. Ueber Entstehungsgeschichte und Zielsetzung des Werkes orientiert ausführlich die Einleitung des Autors im zuerst erschienenen Teilabschnitt von Band II über die Hydrologie der Landschaft Davos. Außerdem sind publiziert in der Serie Hydrologie die Kapitel 1—5 des I. Bandes. Zwei in sich abgeschlossene allgemeine Kapitel sind in den Denkschriften der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft veröffentlicht worden. Bei seinem Tode waren fünf weitere Kapitel des allgemeinen Teils im Druck oder nahezu druckbereit; es sind dies die drei kürzeren in dieser Teillieferung erscheinenden Kapitel 6 bis 8 (Mitarbeiter R. Bohner), dann zwei sehr umfangreiche Kapitel: «Zur Hydrologie, Chemie und Geologie der winterlichen Gletscherabflüsse der Schweizer Alpen» (Mitarbeiter R. Bohner, Dr. Paul Huber, Dr. H. Huber, Dr. F. de Quervain) und: «Beitrag zur Gewässer- und Klimakunde des Oberengadins» (Mitarbeiter R. Bohner und Th. Hauck). Die Manuskripte über die einzelnen Forschungsgebiete erwiesen sich als sehr verschieden weit fortgeschritten, jedenfalls nicht als publikationsbereit.

Zur Weiterführung der Herausgabe beriet sich der Präsident der Geotechnischen Kommission mit dem Sohne des Autors, Herrn Dr. R. Lütischg, als Vertreter der Familie des Verstorbenen. Beide Teile trafen sich im Wunsche nach Fortsetzung der

IV

Veröffentlichung der vollendet vorliegenden Abschnitte, in gleicher Weise wie bisher in der Serie Hydrologie. Die Kommission stimmte in der Sitzung vom 20. Dezember 1947 diesem Vorschlag sehr gerne zu, unter der Voraussetzung, daß ihr die Erlangung der nötigen Mittel gelingen werde. In großzügiger Weise bot die Familie ihre Mitwirkung an. Ein Gesuch bei der «Stiftung Schweizerische Landesausstellung 1939 für Kunst und Forschung» fand Gehör. Dank diesen Zuwendungen, einem bereits von der «Stiftung Joachim de Giacomi» dem Autor zugesicherten Beitrag und der Mitarbeit der Kommission ist die Herausgabe der fertig vorliegenden Kapitel des allgemeinen Teiles gesichert. Die Geotechnische Kommission freut sich sehr, daß nun ein wesentlicher Teil des Lebenswerkes ihres hochgeschätzten Mitarbeiters der Allgemeinheit, so wie er vom Autor entworfen und ausgearbeitet wurde, in gleicher Ausstattung zugänglich gemacht werden kann. Sie dankt allen beteiligten Stellen herzlich für ihre Mitwirkung.

Die Redaktions- und Korrekturarbeiten erfolgten durch den Unterzeichneten unter Mitwirkung von Fräulein V. Jenny, unterstützt durch Herrn Rudolf Bohner und durch Herrn Dr. R. Lütschg. Die umfangreichen Kapitel 9 und 10 werden Einzelbände bilden, mit ihrem Druck ist begonnen worden.

Zürich, im Oktober 1949.

Für die Geotechnische Kommission:

Der Präsident: Prof. Dr. *F. de Quervain*.

Der Aktuar: Dr. *P. Esenwein*.

Vorwort

«Der Einzelforscher muß einsehen, daß er nur Streckenarbeiter ist, der früher oder später auf der Strecke liegen bleiben wird. Aber das Bewußtsein, wenn auch noch so wenig am Bau des Weges zu besserer Erkenntnis gearbeitet zu haben, befriedigt ihn, ist ihm genügend, ist sein Optimismus, sein Idealismus, sein Trost.»

Hans Straßer.

In den letzten Monaten seines Lebens hat der Verfasser, von einer inneren Unruhe erfaßt, wie wenn ihm ahnte, daß seine Zeit nur noch kurz bemessen sei, fieberhaft, oft bis in alle Nacht hinein, an der Drucklegung der vorliegenden Kapitel 6—8 und an der Vollendung der Manuskripte der beiden letzten Kapitel 9 und 10 des Allgemeinen Teils des «Wasserhaushalts» gearbeitet. Am Vorabend seiner Abreise zu einem kurzen Erholungsaufenthalt in Glion gab er dem Unterzeichneten gegenüber seiner Freude und Befriedigung Ausdruck, daß nun auch Kapitel 10 «Beitrag zur Gewässer- und Klimakunde des Ober-Engadins», welches ihm besonders am Herzen lag, nahezu druckbereit sei.

Als am 22. Juli 1947 der rastlose Forscher von einer gütigen Hand unvermittelt abberufen wurde, stand die Familie vor einem großen wissenschaftlichen Nachlaß, vor einem unvollendeten Werk und einer Fülle teils verarbeiteten, teils unverarbeiteten Materials. Der Verstorbene hatte keine Gelegenheit gehabt, seinen Angehörigen noch die nötigen Aufklärungen zu geben und seine Wünsche zu äußern.

Getragen vom Wunsche, die druckreifen Kapitel des «Wasserhaushalts» wenn irgend möglich noch der Publikation zuzuführen, wandte sich der Unterzeichnete namens der Familie an den damaligen Präsidenten der Geotechnischen Kommission, Herrn Prof. Dr. P. Niggli, um Rat und Unterstützung, die ihm sofort in vollem Umfange zugesagt und effektiv in weitestgehendem Maße zuteil wurde. Dank dem persönlichen Einsatz von Herrn Prof. Dr. P. Niggli für das Werk des Verstorbenen, konnten die nötigen finanziellen Mittel für die Drucklegung der publikationsreifen Kapitel des Allgemeinen Teils beschafft werden. Für das dem Autor damit über das Grab hinaus entgegengebrachte selbstlose und freundschaftlich-kollegiale Wohlwollen und Verständnis möchte ich Herrn Prof. Dr. P. Niggli und den übrigen Herren der Geotechnischen Kommission im Namen des verstorbenen Autors und seiner Familie den wärmsten Dank aussprechen.

Zu besonderem Dank verpflichtet sind wir auch dem früheren Aktuar und heutigen Präsidenten der Geotechnischen Kommission, Herrn Prof. Dr. F. de Quervain, der dem Unterzeichneten bei der Sichtung des umfangreichen Materials in liebenswürdiger und fachkundiger Weise behilflich war und die zeitraubenden Redaktions- und Korrekturarbeiten auf sich nahm.

Herr Techniker Rudolf Bohner hat in seiner Eigenschaft als langjähriger bewährter Mitarbeiter des Verstorbenen dem Unterzeichneten bei der Durchsicht des wissenschaftlichen Nachlasses in selbstloser Weise wertvollste Dienste geleistet und sich jederzeit in aufopfernder Weise zur Verfügung gestellt, wofür ihm auch an dieser Stelle herzlich gedankt sei.

Schließlich möchte ich allen jenen Institutionen und Personen, welche die Veröffentlichung des druckreifen Teiles des wissenschaftlichen Nachlasses von Dr. O. Lütschg durch ihre verständnisvolle Unterstützung und Mitarbeit ermöglicht haben, im Namen des Verstorbenen und seiner Familie den aufrichtigsten Dank aussprechen.

Es sei noch beigefügt, daß den vorliegenden Kapiteln die letzte Uebearbeitung fehlt, welcher der Verstorbene seine Manuskripte anlässlich der Drucklegung zu unterwerfen pflegte.

Basel, im Oktober 1949.

Im Namen der Familie:

Rolf Lütschg.

Inhaltsverzeichnis.

I. TEIL.

Allgemeines.

Dritte Abteilung.

6. KAPITEL.

Boden und Vegetation im Wasserhaushalt des Hochgebirges.

Mit einem Beitrag von *Hans Burger*: «Die Vegetation, der Boden und der Wasserhaushalt in der obersten Bodenschicht des Einzugsgebietes der Baye de Montreux».

I. <i>Boden und Vegetation</i>	104
A. Allgemeines	104
B. Boden, Bodenprofil, Bodenhorizonte	106
C. Vegetation	107
D. Wasserdurchlässigkeit und -Aufnahmefähigkeit des Bodens	109
E. Unbeständigkeit des Bodenwassers in Zustand und Bewegung	113
F. Karstgebiete	115
G. Bodenfrost	115
H. Denudation	116
I. Wasserdurchlässigkeit von Böden	117
II. <i>Zusammenhang zwischen Niederschlag, Vegetation, Boden, Versickerung und Verdunstung</i>	119
A. Das meteorologische Observatorium «Drachenkopf», Eberswalde	119
B. Wasserverbrauch der Pflanzen	124
C. Saugkraft der Alpen- und Ebenenpflanzen	127
D. Die Reaktion der Pflanzen auf den Uebergang von Dunkelheit zu Licht	128
E. Schluß	131
Die Vegetation, der Boden und der Wasserhaushalt in der obersten Bodenschicht des Einzugsgebietes der Baye de Montreux. (Von H. Burger.)	
Einleitung	132
A. Die Vegetation	132
1. Die Wälder	133
2. Das Freiland	133

VIII

B. Der Boden	134
1. Die Bodentypen und Bodenarten	134
2. Die Struktur der Böden	134
3. Die Durchlässigkeit der Böden	135
4. Der Bodenwasservorrat	136
C. Einfluß der Veränderung der Vegetation auf den Wasserhaushalt in der obern Bodenschicht	137
1. Ausschluß der Nutzung bei einer zeitweilig beweideten Magerwiese	138
2. Ueberführung eines Waldes in Weide	140
D. Zusammenfassung	142
Literaturverzeichnis	143

7. KAPITEL.

Die Bedeutung des Schneetransportes durch den Wind (Windverfrachtung) im Wasserhaushalt des Schweizer Hochgebirges.

A. Allgemeines	145
Hierzu Tafel 1.	
B. Spezielles: Schneetransport auf dem Col de Jaman, 1512 m ü. M.	148
1. Windverhältnisse	148
2. Erforschung des Verhaltens der Winterschneedecke auf dem Col de Jaman	149
3. Ergebnisse	151
4. Ungefähre Berechnung des Schneetransportes auf dem Col de Jaman im Winter 1934/35	154

8. KAPITEL.

Die Bedeutung der Nebel-, Tau- und Reifbildungen im Wasserhaushalt des Hochgebirges.

Die horizontalen Niederschläge und ihre Wasserwerte	161
A. Allgemeines	161
B. Nebelbildung	162
C. Taubildung	164
D. Reifbildung	167
1. Eigentümlichkeiten von Rauhreifbildungen am Totalisator auf dem Säntisgipfel, 2504 m ü. M.	168
2. Rauhreifmessungen an einer Lärche und einer Arve bei St. Moritz-Bad (Bestimmung des Wasserwertes)	170
Hierzu Tafeln 2, 3 und 4.	

6. KAPITEL.

Boden und Vegetation im Wasserhaushalt des Hochgebirges.¹⁾

**Zusammenhang zwischen Niederschlag, Vegetation, Boden,
Versickerung und Verdunstung.**

Mit einem Beitrag von *Hans Burger*: «Die Vegetation, der Boden und der Wasserhaushalt in der obersten Bodenschicht des Einzugsgebietes der Baye de Montreux».

Einleitung. — Eine Aufgabe von Bedeutung auf dem Gebiete der Wasserhaushalterforschung der Alpen, deren Lösung auch der Gebirgshydrologe näherzutreten verpflichtet ist, weil er ihr zur Zeit oft hilflos gegenübersteht, besteht in der Abklärung der Lebensvorgänge des Wassers im Boden, sowie in und auf der Vegetation. Dabei drängt sich eine Reihe von Fragen auf: Woher kommt das Wasser? Wohin gelangt es? Wieviel kann der Boden von der ihm zugeführten Wassermenge als Senkwasser, als Kapillarwasser usw. zurückhalten? Wieviel Wasser vermag die Vegetation dem Boden zu entziehen? Ist der pflanzliche Wasserverbrauch groß? Wieviel und wie lange vermag die Vegetation Wasser zu binden (Retentionsvermögen)? Macht die pflanzliche Transpiration einen wesentlichen Teil der Gesamtverdunstung aus? Gelangt der Einfluß stark bewaldeter Gebiete in den mittleren Jahresverdunstungswerten zum Ausdruck? Wieviel Wasser geht durch die Oberflächenverdunstung des Bodens direkt in die Atmosphäre über? Geht auf unterirdischem Wege ein Teil des Sickerwassers verloren? Wie gestalten sich diese Vorgänge im Laufe des Jahres? Wieviel Wasser ist zu bestimmten Zeitpunkten im Boden vorhanden? Wie geht die Wasserbewegung im Boden vor sich und wie gestaltet sich die Verteilung des Bodenwassers im Laufe des Jahres? Welche Rolle fällt dem Windeinfluß zu? — Es sind dies Fragen, deren Beantwortung, auf das Hochgebirge bezogen, keineswegs leicht fällt.

Die Abklärung solcher Naturvorgänge ist heute — mehr denn je — eine dringende Notwendigkeit, da bei wasserwirtschaftlichen Unternehmungen dem Hydrologen immer wieder Fragen vorgelegt werden, die nach dem Stand unseres heutigen Wissens nur unbefriedigend beantwortet werden können. Zahlenmäßige Untersuchungen über den Wasserhaushalt des Bodens und der Vegetation, unter möglichst natürlichen Verhältnissen, sollten deshalb auch für das Hochgebirge angestrebt und vor allem in den Aufgabenkreis der Landesanstalten für Gewässerkunde einbezogen werden. Ihre Bewältigung fordert vor allem engste Zusammenarbeit des Hydrologen mit den Vertretern der Botanik und der Forstwissenschaft.

¹⁾ Ueber das weite Gebiet der Pflanzen- und Bodenkunde kann hier nur das Wichtigste angedeutet werden.

Aber noch andere Gründe sprechen für eine Intensivierung solcher Untersuchungen, was folgende Ueberlegung eindrucksvoll zeigt: Die geographische Bedeutung des Abflusses und der Landesverdunstung kann nur mit der Klarlegung der oben angedeuteten Vorgänge ins richtige Licht gestellt werden. Wohl fällt für die Wasserwirtschaft vor allem dem abfließenden Teil des Niederschlages das Hauptgewicht zu, und es ist deshalb auch verständlich, wenn die Wasserwirtschaft mit Vorliebe das Verhältnis des Abflusses zum Niederschlag¹⁾ als maßgebend für seine Untersuchungen betrachtet und damit eine Art Nutzeffekt zum Ausdruck bringt, der die Größe des verwendeten Niederschlages darstellen soll. Aber was *nicht* abfließt, d. h. die *Landesverdunstung*, übernimmt eine nicht minder wichtige Funktion, geht doch das verdunstete Wasser zu einem nicht geringen Teil durch die Kulturpflanzen hindurch und erfüllt damit einen Zweck, der für die Ernährung und Versorgung des Menschen hinter dem rein wasserwirtschaftlichen in keiner Weise zurücksteht. Es darf sich also in der Wasserwirtschaft, allgemein volkswirtschaftlich betrachtet, nicht darum handeln, den Abfluß auf Kosten der Verdunstung möglichst zu steigern, sondern es muß auch in diesen Fragen ein Ausgleich zwischen den beiden Größen angestrebt werden. Um solche Ausgleiche vollziehen zu können, bedarf es natürlich einwandfreier Grundlagen.

I. Boden und Vegetation.

A. Allgemeines.

Das Problem des Wasserhaushaltes im Boden — ich habe schon das Wichtigste angedeutet — ist überaus vielgestaltig und verwickelt. Dies rührt vor allem daher, weil der Boden als solcher (physikalisch und chemisch gesehen), wie auch seine, buntem Wechsel unterworfenen Oberflächengestalt und Pflanzendecke, was Beschaffenheit, Form und Art anbetrifft, eine geradezu beispiellose Mannigfaltigkeit aufweisen.

In jedem sich selbst überlassenen Gebiet nimmt die Vegetation eine von der Beschaffenheit des Bodens und vom Klima abhängige Dichte an, die so lange erhalten bleibt, als sich jene Faktoren nicht ändern.

Als weitere Faktoren kommen hinzu: die Art der Niederschläge und das Wechselspiel der meteorologischen Bedingungen überhaupt. Die Niederschläge treten in einzelnen Gebieten in ungleichem Maße und mit sehr verschiedener Intensität auf.

Analog verhält es sich mit dem Wind. Ueber seine Bedeutung soll an dieser Stelle nur folgendes hervorgehoben sein. Es ist nicht der Wind an sich, der die Verdunstung erhöht, sondern der durch ihn verursachte Austausch des Gehaltes der Luft an Feuchtigkeit. Niedrige Pflanzen verdunsten meist weniger als solche, die weiter in die Luft hinaufragen. Natürlich sind auch in diesem Fragenkomplex viele Kombinationen möglich. Aehnlich verhalten sich die übrigen klimatischen Elemente.

Wichtig, ja oft ausschlaggebend für die Lösung bestimmter Fragen ist die Kenntnis der Entwicklungsstufe der Bodenwasser-Bewegung; von erheblicher Bedeutung ist ferner die Kenntnis der vorkommenden Schneebedeckung in Beziehung auf ihre Masse und ihre Lagerdauer.

¹⁾ Vergleiche meine Ausführungen über dieses Verhältnis in Band I, I. Teil, Allgemeines, Erste Abteilung, Kap. 3, S. 44 und 45.

Im Hochgebirge, wo den vegetationsfreien Flächen höhere Bedeutung zukommt, übernimmt der Wind gemeinsam mit dem Regen die Verfrachtung des Verwitterungsmaterials. Von der Intensität der Niederschläge, der Windstärke, dem Bestand an Vegetation, den Temperaturschwankungen, den Feuchtigkeitsverhältnissen usw. hängt der Grad der Ausräumung (Denudation) des betreffenden Gebietes ab, der wiederum an die geologische Beschaffenheit des Bodens und sogar an die petrographische Individualität der Gesteine gebunden ist. Wie vielgestaltig und veränderlich ist alles!

Diese Mannigfaltigkeit des Bodens wird noch dadurch erhöht, daß die Aenderungen des Bodenwassergehaltes, in der Regel, mit wesentlichen Verschiebungen in der Lagerung der Bodenschichten und -teile verbunden sind.

Ein Boden braucht geraume Zeit, ehe er eine einigermaßen stabile Lagerung annimmt, denn der Wassergehalt der Bodenprobe stellt in der Regel ein wesentliches Bestimmungselement für deren physikalischen Zustand dar. Es ist deshalb auch unbedingt notwendig, bei Bodenuntersuchungen im Hochgebirge eine wirklich voll definierte Ausgangslage abzuwarten.

Heute wissen wir, daß auf die meteorologischen und hydrologischen Verhältnisse auf und innerhalb der Erdoberfläche, der Boden nicht nur dadurch eine oft ausschlaggebende Rolle spielt, daß an seiner Oberfläche den Energieströmen der Sonne andere Wege gewiesen werden, daß er Wärme aufspeichert und wieder abgibt, oder daß er Wasser aufnimmt und wenigstens teilweise in anderer Form wieder verliert, sondern, daß er in mehr oder weniger größeren Mengen Luft enthält, der nicht nur beim Einsickerungsprozeß eine Rolle zukommt, sondern die auch für das Wurzelwachstum vieler Pflanzen, für das Gedeihen der wichtigsten Bodenbakterien unumgänglich notwendig ist. Maßgebend wirkt aber nicht der ganze Luftgehalt, sondern nur jener Teil davon, der fortwährend verbraucht und regeneriert wird und somit mit der Atmosphäre in direkter Verbindung steht (Bodenatmung).¹⁾ Durch solche Vorgänge werden Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Boden ausgelöst, deren Bedeutung auch in hydrologischer Beziehung nicht unterschätzt werden darf (Landesverdunstung).

Bei allen diesen Fragen dürfen die künstlichen Eingriffe der Menschen und der Tierwelt in den Wasserhaushalt des Bodens nicht vernachlässigt werden, denn je mehr sich unsere Wasserwirtschaft ausbreitet, desto verwickelter gestalten sich die Zusammenhänge.

Berücksichtigen wir noch den allerdings bescheidenen Teil des Bodenwassers, der zur Oxydation von Mineralien verbraucht wird, dann kann man sich an Hand der vorstehenden kurzen Ausführungen ein Bild darüber machen, wie ungenügend die Abklärung all dieser Zusammenhänge bis heute noch ist.

Man unterscheidet, je nach physikalischer und chemischer Beschaffenheit, eine Unzahl verschiedenartiger Böden. Auf ihre Entstehung, ihre Eigenschaften und ihren Einfluß auf die Vegetation darf hier nicht näher eingetreten werden.²⁾ Dagegen ist

¹⁾ Vgl. die wertvollen Versuche von *Schmidt Wilhelm* und *Lehmann Paul*: Versuche zur Bodenatmung. Lehrkanzel für Meteorologie und Klimatologie a. d. Hochschule f. Bodenkunde in Wien. Sitz. 12. Dezember 1929, Wien 1929.

²⁾ Wer sich über dieses Thema, das im besondern *schweizerische Verhältnisse* berücksichtigt, kurz und bündig unterrichten will, dem sei die Schrift von Prof. Dr. *H. Pallmann*: «Der Boden — Seine Entstehung und seine Eigenschaften», veröffentlicht im «Schweizer Bauer» 1932, bestens empfohlen.

für unsere Untersuchungen die Kenntnis der *Bodentypen*, namentlich die des Schweizer Hochgebirges, trotz ihrer Jugendlichkeit und Unausgereiftheit, deshalb von besonderem Wert, weil sie für die in unsern Forschungsgebieten herrschenden klimatischen Verhältnisse immer charakteristisch sind, und der Einfluß der Vegetation durch Einwirkung auf das Lokalklima darin zum Ausdruck kommt. Ein weiteres Merkmal unserer Böden ist die Abhängigkeit von der geologischen Unterlage. Diese *Bodenarten* sind lediglich gewisse *Abarten* ein und desselben Bodentypus. So unterscheiden wir sandige, kiesige, tonige, lehmige und humose Bodenarten, je nach Körnung der Bodenbestandteile und ihrem Humusgehalt. Diese Bodenarten sind demnach nur gewisse Ortsvarianten des Bodentyps (*H. Pallmann*).¹⁾

B. Boden, Bodenprofil, Bodenhorizonte.

In Anlehnung an *H. Pallmann* bezeichnet man als *Boden* die oberste Verwitterungsschicht der Erdrinde, die fähig ist, Pflanzen zu tragen und zu ernähren. Die ganze Schicht, die das unveränderte Muttergestein überlagert, wird als Boden im weitesten Sinne des Wortes bezeichnet. Diese, durch dunklere Färbung gekennzeichnete Schicht, ist der Wurzelort der Pflanzen; aus ihr schöpfen sie ihre Nährstoffe und das zum Gedeihen notwendige Wasser.

Das *Bodenprofil* erstreckt sich von der *geologischen unverwitterten Unterlage* (Muttergestein des Bodens) *bis zur obersten Erdschicht*. Sind innerhalb des Profils gewisse Schichten durch bestimmte Stoffanreicherungen oder Auswaschungen besonders erkennbar, so bezeichnet man diese als *Bodenhorizonte*. Gemäß internationaler Uebereinkunft werden die verschiedenen Auswaschungshorizonte mit dem großen Buchstaben A, die Anreicherungshorizonte mit B und das unveränderte Muttergestein mit C bezeichnet (A-, B- und C-Horizont).

Die bestimmte Anordnung der verschiedenen, durch ihren Chemismus unterschiedlichen Horizonte dient als Charakteristikum des einzelnen *Bodentyps*. Der *aride* Bodentyp zeigt von oben nach unten die typische Anordnung B — A — C. Der Anreicherungshorizont liegt an der Oberfläche des Profils.

Der *humide* Bodentyp dagegen weist die Profillfolge A — B — C auf, mit der Auslaugeschicht A oben, und der gegen die Tiefe zu verlagerten Anreicherungsschicht B.

Das Klima des Schweizer Hochgebirges ist, von vereinzelt kleinen Steppen-gebieten abgesehen, vorherrschend feucht. Die Niederschläge haben, besonders im Gebirge, starkes Uebergewicht gegenüber der Verdunstung; die ausgleichende Wasserströmung in der Bodenschicht ist von der Erdoberfläche gegen den Untergrund gerichtet. Der Großteil der Schweizer Böden gehört daher dem humiden Typus an, in hohem Maße die des Schweizer Hochgebirges.

Auf die Braunerdeböden des Schweizer Mittellandes trete ich hier nicht näher ein; ich begnüge mich damit, wiederum nach *H. Pallmann*, einige charakteristische Merkmale der Böden *unseres Alpengebietes* zu nennen.

Bei den Böden der *sauren Silikatgesteine* fällt vor allem der gesteigerte Auslaageeffekt auf, der in der Ausbleichung der Schicht unter der dicken Rohhumuslage im subalpinen Wald

¹⁾ Nach dem Zerteilungsgrad unterscheidet man: Blöcke (über 25 cm Durchmesser), Grobschutt (25—2 cm), Kies (20—2 mm), Grobsand (2—0,2 mm), Feinsand (200—20 μ), Schluff (20—2 μ). (*Rübel Eduard*: Geobotanische Untersuchungsmethoden. Berlin 1922, S. 99—109.)

zum Ausdruck gelangt. Die Andeutung einer Ausbleichung wird bestätigt durch die Erscheinung eines deutlich rostfarbenen Anreicherungs-horizontes, der sich unmittelbar an die Bleichschicht anschließt. Das Vorhandensein von hochsaurem Humus bewirkt das rasche Auslaugen der Mineralschichten und den Abfluß aller leichtlöslichen Nährstoffe nach dem Untergrund. Die anspruchsvolleren Pflanzengattungen meiden daher mit zunehmender Höhenlage solche Böden und es bleiben nur noch die säureunempfindlichen Nadelholzbestände zurück.

Schreiten wir noch höher den Hang hinauf bis zu den Arven und Lärchen der *obern subalpinen Stufe* (um 1700—2300 m), so ist infolge der noch ausgesprochenen Humidität dieser Zone der Auslaugungsprozeß noch wirksamer gediehen. Hell leuchtet das Grau dieser verarmten Bleicherdeschicht unter der mächtigen schwarzbraunen Rohhumuslage hervor. Dies ist die Zone, in der die schönen reifen *Eisenpodsole* zu finden sind.

Ueber der Waldgrenze, schon 200—300 m darüber, verschwinden diese reifen Eisenpodsole und das ganze Profil erscheint homogen, gleichfarbig und stark humos. Auf dieser Höhe (2500 bis 2700 m) sind wir bei einer Zone angelangt, deren ungünstige Temperaturverhältnisse (Extrem- und Mittelwerte) den chemischen Zersetzungsprozeß der Mineralien hemmen. Die in den Humus eingebetteten Gesteinbröckel bleiben in ihrer chemischen Struktur fast unverändert. In dieser Region sind wir bei den sog. *Humussilikatböden*, dem Alpenhumus, angelangt.

Noch höher gelangen wir in die Region, wo allein die physikalische Verwitterung den Fels bearbeitet; wo Blockhalden und Geröllböden am Gipfelhang kleben. Nur wenige, in ihren Ansprüchen bescheidene Pionierpflanzen erfreuen unser Auge. Der kahle Fels, so wie er erschaffen wurde, steht vor uns und zeigt uns das Anfangsstadium der ganzen Bodenbildung (*H. Pallmann*).

Ganz anders verhalten sich die *Böden der Kalkalpen*. Hier steht dem verwitterten Gestein ein großer Vorrat an Kalk zur Verfügung. Dieses, im Wasser leicht alkalisch reagierende Gestein verhütet schon von Anfang an die Versauerung der Verwitterungsprodukte. In gut gekrümeltem Zustande bildet sich der Humus. Als mild und neutral, fördert er die Auslaugung der gelösten und dispergierten Stoffe *nicht*, sondern saugt die ins Bodenwasser gelangenden Nährstoffe unverändert in sich auf.

Diesen Bodentyp in den Kalkgebieten der Alpen nennt man *Humuskarbonatböden*. Humusreiche Böden mit freiem Kalk gehören diesem Typus an. Rundliche Krümel von ansehnlicher Größe deuten sichtlich auf die Milde der Humusstoffe hin. Eisen- und Aluminiumsalze sind aus dem Profil nicht abgewandert, sondern in der gut gekrümelten Erde zurückbehalten worden.

Durch reichliche Niederschläge in einzelnen Gegenden des Hochgebirges sind, natürlich, im Laufe der Zeit die obersten Bodenschichten leicht *entkalkt* worden. Dieser Prozeß setzt sich fort. In ganz feuchten Lagen begegnet man schon heute Profilen, die zum Braunerdetypus gehören.

Was nun die Böden auf *Flysch und Bündnerschiefer* betrifft (solchen kommt namentlich in unsern *Hinterrhein-Forschungsgebieten* [2 bis 6] vermehrte Bedeutung zu), berichtet *H. Pallmann* darüber folgendes:

«Die Humuskarbonatböden sind im Hochgebirge lediglich auf die massigen Kalksedimente beschränkt. Der oft schieferige Flysch und auch der ihm ähnliche Bündnerschiefer geben nur in seltenen Fällen, in ihrer kalkreichsten Variante, Anlaß zu dieser Bodenbildung. In ihrer gewöhnlichen Ausbildung sind sie offenbar zu kalkarm; sie verwittern, ähnlich der kalkhaltigen Molasse, zu Braunerde. Infolge ihres Kalkgehaltes findet sich auf diesen Schiefen selten fortgeschrittene Podsolierung. Selbst in Höhenlagen, wo auf Urgesteinen schon die farbenfreudigsten Eisenpodsole gefunden werden, haben sich auf diesen schieferigen und kalkhaltigen Sedimenten erst ganz schwach podsolierte Typen ausgebildet.»

C. Vegetation.

Gegenüber dem Mittel- und Tiefland nehmen *Vegetationsart und Vegetationszeit* des Hochgebirges eine besondere Stellung ein. Hierüber folgendes:

Mit zunehmender Höhenlage einer Gebirgslandschaft nimmt, in der Regel, nicht nur die Fläche der *Vegetationsdecke*, sondern auch die Dauer der Vegetationsperiode

ab. Die schneefreie Zeit (Aperzeit) als Mittelwert 16jähriger Beobachtung, dauert nach C. Schroeter ¹⁾

bei 600 m ü. M.	vom 27. Februar	bis 4. Dezember,	also 9 Monate,
» 1000 » » »	» 30. März	» 29. November,	» 8 »
» 1500 » » »	» 2. Mai	» 10. November,	gut 6 »
» 1800 » » »	» 28. Mai	» 27. Oktober,	» 5 »
» 2400 » » »	» 12. Juli	» 1. Oktober,	also nur noch 2½ Monate,

wobei, natürlich, die Schwankungen der verschiedenen Jahrgänge sehr bedeutend sein können. ²⁾

Die Pflanzenwelt jedes einzelnen Gebietes ist mitunter sehr verschiedenartig, was durch ungleiche Saugkraft, Tiefgang und Dichte des Wurzelwerkes bedingt ist. Bestimmend für den Wassergehalt eines Bodens innerhalb einer Vegetationsperiode sind die klimatischen Jahresverhältnisse und die Art der Vegetation, welche letztere ihrerseits von der Tiefe des Bodenprofils und der Bodenart abhängig ist. In welchem Maße die Höheninsolation die Bodenfläche austrocknet, ist an der besondern Einstellung der Alpenpflanzen gegen diese Einwirkung leicht zu erkennen. Tonangebend ist das Walten der *Niederschläge* und der *Winde*, die in jeder Hochgebirgslandschaft eine stark ausgeprägte Eigenart besitzen. Diese Eigenarten können nur durch Sonderstudien in einwandfreier Weise erkannt und erfaßt werden. Unsere Forschungsergebnisse zeigen, um nur ein Beispiel zu nennen, recht deutlich, daß die Niederschlagsarmut eines Tales, selbst auf alpinen Höhen, ihre höchste Steigerung erfahren kann (Visper Täler). Mit wachsender Temperaturdifferenz zwischen Höhenzonen und erwärmten Talbecken im Sommer, muß auch die Niederschlagsmenge in den letzteren entsprechend geringer werden. Dies gilt nicht nur für Talbecken allein, sondern auch für die durch intensive Höheninsolation ebenfalls bis weit hinauf stark erwärmte Alpenregion.

Die Schnee-, Firn- und Eismassen unserer Alpen zeugen wohl am klarsten für die Tatsache, daß die Temperatur mit zunehmender Höhenlage sinkt und das Klima kälter und rauher wird. Auch Erscheinungen der organischen Welt, besonders im Pflanzenreich, bestätigen dies, nur vollzieht sich die Aenderung im Pflanzenkleid nicht so augenfällig, wie im Kontrast des Grüns der Vegetationszone zum Weiß der Schnee- und Gletscherfelder des Hochgebirges. Die Vegetation steht aber auch im Zusammenhang mit der Bodenart und damit auch mit der Wasserdurchlässigkeit (Porosität) der Bodenoberfläche. Einer Abnahme der bewachsenen Bodenfläche bei zunehmender Höhenlage entspricht im Hochgebirge, in der Regel, ein Flächenzuwachs des Fels- und Schuttareals, usw.

Die Erforschung des Einflusses der Vegetation auf den Wasserhaushalt einer Hochgebirgslandschaft ³⁾ steckt, wegen der ungewöhnlichen Vielseitigkeit dieses

¹⁾ Schroeter C.: Das Pflanzenleben der Alpen, S. 89. Zürich 1926.

²⁾ Die Schwankungen der verschiedenen Jahrgänge sind mitunter sehr groß. Der längste in den 16 Jahren vorgekommene Alpensommer übertraf das Mittel an der Sonnenseite bei 1600 m Höhe um 3 Monate; bei 3000 m — noch um 1 Monat; der kürzeste blieb 1—1½ Monate hinter dem Mittel zurück. Für die Schattenseite sind die Schwankungen weit geringer. Sie betragen nur etwa 3 Wochen in beiden Richtungen (C. Schroeter).

³⁾ Die Bedeutung der der Vegetation zufallenden Rolle im Wasserhaushalt eines Flußgebietes geht z. B. aus der Tatsache hervor, daß in Trockenperioden der erhöhte Verbrauch von Wasser für die Laubbildung der Pflanzen im Frühjahr sogar die Senkung des Wasserstandes von Gewässern zu beschleunigen vermag. (Geological Survey Water-Supply, ed. U.S.A., Departement of the Interior, c) Paper 680: Droughts of 1930—1934, 1936, p. 16.)

Problems, erst in ihren Anfängen. Eine klare Lösung dieser, für so manche Fachwissenschaft wichtigen Frage, kann nur auf dem Wege engster Kollaboration einer Reihe von Einzeldisziplinen erreicht werden. Die zeitgemäße Gewässerkunde vermag ohne engste Fühlungnahme mit Fachgelehrten der Botanik, der Bodenkunde usw. nicht mehr ersprießlich zu gedeihen. Es gehört deshalb zu den vornehmsten Aufgaben unserer Hochschulen, dafür besorgt zu sein, daß der Sinn für Solidarität unter einzelnen Fachgelehrten weitgehend gepflegt werde, wie dies beispielsweise an der *Berner Hochschule* durch gemeinsame Behandlung und Diskussion bestimmter Probleme der Fall ist.

D. Wasser-Durchlässigkeit und -Aufnahmefähigkeit des Bodens.

Das Bestreben der modernen Gewässerkunde ist darauf gerichtet, den Wasservorrat des Bodens (Wasserhaltevermögen) für bestimmte Zeitpunkte zahlenmäßig zu erfassen (vgl. Bd. II, III. Teil, Kap. 7, I., S. 435 u. ff.). Vom Einfluß der Vegetationsdecke ganz abgesehen, steht die Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens in enger Beziehung zu der Durchlässigkeit seiner Oberfläche¹⁾, der Dicke und Struktur (Bau, Schichtung) seiner Verwitterungsschicht, der Schutt- und Trümmerlager über dem Muttergestein und schließlich zu der Durchlässigkeit und dem Zustand der Felsunterlage (Schichtung, Spaltung, Verwerfung) selbst. Die große Verschiedenheit in der Art der Wasserführung des Bodens und der Gesteine, die unbegrenzte Zahl der Möglichkeiten für die Lagerung der wasserführenden Gesteine, die Karstentwässerung usw. schaffen eine Vielfalt von Variationen, die wohl im Gebirge ihren Höhepunkt erreichen dürfte.

Die Wasserdurchlässigkeit der obersten Bodenschicht ändert sich aber nicht nur mit der Bodenart, sondern auch je nach der Art der Bodennutzung und -kultur, sowie der Vegetation und dem Alter ihres Bestehens, wie folgende Untersuchungen von Prof. Dr. *Hans Burger* eindrucksvoll zeigen²⁾:

	Einsickerungszeit für 100 mm Niederschlag
1. <i>Flyschboden</i> in der Teufimatt, Kt. Luzern.	
a) Unter dichten Erlengebüschen	12 Min. 27 Sek.
b) Typische Weide zwischen den Erlen	8 Std. 30 Min. 00 Sek.
2. <i>Grundmoräne</i> auf dem Zuger Berg.	
a) 40jährige Aufforstung auf entwässertem Ried	16 Min. 01 Sek.
b) Noch nicht entwässertes Ried	10 Std. 00 Min. 00 Sek.
3. <i>Molasse</i> auf dem Zuger Berg.	
a) 80jähriger Fichtenbestand	9 Min. 01 Sek.
b) Rebrütiweide	2 Std. 16 Min. 22 Sek.
4. <i>Bündnerschiefer</i> am Piz Mundaun.	
a) 50jährige Aufforstung auf ehemaliger Weide	8 Min. 57 Sek.
b) Typische Großviehweide	2 Std. 03 Min. 15 Sek.
5. <i>Urgestein</i> im Meleratal, Tessin.	
a) 10—20jährige Aufforstungen	11 Min. 51 Sek.
b) Großviehweide	34 Min. 34 Sek.

Ueber die Durchlässigkeit von Böden gibt der Beitrag zu diesem Kapitel von Prof. Dr. *H. Burger*, S. 132 u. ff., weitere Auskunft.

¹⁾ Wobei namentlich der Berührungszone zwischen Bodenfläche und Luft Bedeutung zukommt.

²⁾ *Burger Hans*: Boden, Vegetation und Verdunstung. Gerlands Beiträge zur Geophysik, Bd. 50, Heft 2/3, 1937, S. 140. Leipzig 1937.

Die Wasserdurchlässigkeit eines Bodens steht außerdem mit seinem Austrocknungsgrad (Rißbildungen, entstanden durch direkte Verdunstung oder Transpiration von Pflanzen) im Zusammenhang, namentlich wenn solcher feinkörnig, lehmig oder tonig ist. Undurchlässiger Boden kann auf diese Weise durchlässig werden. Die Durchlässigkeit schwankt mit dem Wechsel der Jahreszeiten. Sie ist im trockenen Sommer eine andere als im harten Winter, wenn der Boden gefroren, aper, oder mit Schnee bedeckt ist. Für die Weiterleitung von Wasser sind Rißbildungen nur sofern von Bedeutung, als sie zusammenhängende Adern zu bilden vermögen. Ist dies nicht der Fall, dann erhöht sich nur das Speicherungsvermögen des Bodens; solches wird durch Bildung von Wurm- und Wurzelröhren noch unterstützt.¹⁾

Eine weitere, bedeutungsvolle Frage im Wasserhaushalt eines Flußgebietes betrifft das *Benetzungswasser* an den Oberflächen der verschiedenen Vegetationstypen. Je mehr Wasser an den Oberflächen der Pflanzen zurückbehalten wird, desto weniger davon gelangt auf und in den Boden. Beim Wald hat man diesen Niederschlagsverlust für den Boden, je nach Holz- und Bestandesart, zu etwa 10–50 % der Niederschlagsmenge im Freien gemessen.

Obwohl nicht bestritten werden kann, daß dichter Wald die Niederschläge, wenigstens anfänglich, teilweise vom Boden abhält, glaube ich doch nicht, daß diesem Umstand stärkere Beeinflussung der *mittleren* Landesverdunstungswerte für eine längere Reihe von Jahren zugeschrieben werden kann, wie dies oft angenommen wird. Das vom Laub- und Nadeldach des Waldes abfließende Regenwasser erleidet sicherlich nur geringen Verlust durch Verdunstung, denn der Wald schützt das Naß vor Sonnenbestrahlung, hemmt den Luftaustausch und begünstigt die Versickerung. Auch in diesem Fall vollzieht sich, aufs Ganze bezogen, ein Ausgleich größeren Formates. Ueberhaupt, muß man sich davor hüten, einen zu großen Teil des Wasserverlustes auf Rechnung der Wälder und der Pflanzenwelt im allgemeinen zu setzen. In kleinern Zeiträumen und in besondern Fällen vermag sich zuweilen ein Ausgleich der die Verdunstung fördernden und hemmenden Faktoren nicht zu vollziehen. Die von mir hier vertretene Anschauung findet, wie wir später sehen werden, ihre Bestätigung durch die Hauptergebnisse unserer Untersuchungen über Niederschlag, Abfluß und Verdunstung. Diese Ergebnisse zeigen in unmißverständlicher Weise, daß dem Pflanzenkleid wohl eine bestimmte Bedeutung zukommt, daß jedoch der Faktor *Temperatur* für das Maß der Verdunstung ausschlaggebend ist. Bei kürzern Untersuchungsperioden unter anomalen Verhältnissen vermögen sich mitunter andere Effekte einzustellen.²⁾

Ueber die Verbrauchsmenge an Benetzungswasser für landwirtschaftliche Kulturen ist noch fast nichts bekannt. Sicher ist nur, daß auch für solche Vegetationstypen der Verlust an Wasser erhebliche Beträge erreichen kann.³⁾ Für Hochge-

¹⁾ *Johansson Simon*: Die Grundwasserbewegung in den Tonböden. VI. Baltische Konferenz, August 1938, Berlin 1938, und *Hugentobler W.*: Bericht d. Kommission f. Abdichtungen des Schweiz. Wasserwirtschaftsverbandes. Verb.-Schr. Nr. 15, Zürich 1927.

²⁾ So nehmen z. B. unter nicht seltenen Verhältnissen gewisse Pflanzenarten bei Windstille und intensiver Sonnenstrahlung Temperaturen an, die weit über der Lufttemperatur liegen, und zuweilen zu großen Transpirationswerten führen.

³⁾ *Burger Hans*: Boden, Vegetation und Verdunstung. Gerlands Beiträge zur Geophysik, Bd. 50, Heft 2/3, 1937, S. 140. Leipzig 1937.

birglandschaften kommt solchen Verlusten nur untergeordnete Bedeutung zu, weil der Flächenraum solcher Kulturen wesentlich kleiner ist, dagegen darf der Verlust der Vegetationsstufe über der geschlossenen Waldgrenze nicht unterschätzt werden; ich denke dabei an die relativ weiten, von Kräutern und Zwergsträuchern dicht bewachsenen Flächen der alpinen Höhenstufe.

Wichtig ist, daß jede Vegetation und insbesondere der Wald, den Oberflächenabfluß verlangsamt und damit die Einsickerung begünstigt. Bestockter Boden weist größere Bodenlockerheit auf und vermag deshalb mehr Wasser aufzunehmen. Dadurch wird ein Teil des Wassers gebunden, ein anderer Teil tropft ab und ein dritter — verdunstet.¹⁾ Die Verdunstung wird, gleichen Anreiz und gleiches Gefälle vorausgesetzt, für undurchlässigen Boden, in der Regel, größer sein als für durchlässigen.

Seit einer Reihe von Jahren wird nun in der Schweiz, namentlich an der *Forstlichen Versuchsanstalt in Zürich*, an Hand von Bodenuntersuchungen berechnet, welche Niederschlagsmenge die oberste Bodenschicht von 1 m Dicke, dank ihrem Wasserhaltevermögen, zurückzuhalten und so dem Abfluß zu entziehen vermag.²⁾

Bei normalen Bodenverhältnissen ist die oberste Schicht von 1 m Tiefe, nach langjährigen Untersuchungen von *Hans Burger*, fähig, *rund 400 mm Niederschlag* als Kapillar- und Haftwasser zu binden, die der unmittelbaren und der Transpirationsverdunstung zur Verfügung stehen. Bei stark humosen Niedermoorböden kann die Wasserkapazität der 1 m dicken Bodenschicht auf 600—700 mm ansteigen, in Hochmoorböden — sogar bis über 800 mm, während sie bei Kies- und Geröllböden auch *unter 200 mm* hinabsinken kann.

Nach *Engler* können bei hohem Wassergehalt die Wald- und Freilandböden immer noch 6—10 % Raumanteile Wasser bis zur Sättigung aufnehmen. Demgemäß müssen nach Trockenzeiten die zur Sättigung des Bodens erforderlichen Wassermengen ganz beträchtlich sein — etwa 40 % vom Raume. Bei gleicher Bodenbeschaffenheit währt, vergleichsweise, die zum Eindringen von Wasser in den Boden benötigte Zeit für Weideböden etwa 50mal länger, als für Waldböden. Dies ist einerseits auf verminderten Oberflächenabfluß und Begünstigung von Sickerwasserbildung der Weideböden, und andererseits — auf stärkere Auflockerung des Waldbodens mit seinen unzähligen, von lebenden und abgestorbenen Wurzeln herrührenden Hohlräumen zurückzuführen. Wieder andere Verhältnisse treten ein, wenn wir die Zonen über der Waldgrenze in Berücksichtigung ziehen.

In der Schweiz, mit ihrem Reichtum an Niederschlägen und zumeist guter Verteilung derselben, sinkt der Wasservorrat des Bodens, von einigen kleineren steppenähnlichen Gebieten abgesehen, selten unter die Hälfte seiner Wasserkapazität; auch

¹⁾ Auf die vieldiskutierte Frage der Waldeinwirkung auf den Abfluß trete ich hier nicht näher ein. Dagegen möchte ich doch an dieser Stelle an einem kleinen, aber typischen, miterlebten Beispiel zeigen, welche Bedeutung der Vegetation im Wasserhaushalt eines kleineren Sees zufallen kann: Die lästigen Ueberschwemmungen des «Egelmoos» bei Bern konnten durch Anpflanzung von Erlen vollständig beseitigt werden.

²⁾ Hierbei muß zwischen den Begriffen *Wasserhaltevermögen* und *Wasservorrat* wohl unterschieden werden, daß «*Wasserhaltevermögen*» die Bezeichnung für einen Höchstwert ist, der nur für eine bestimmte Bodenschicht gilt, während «*Wasservorrat*» sich auf die erfahrungsgemäß eintretenden Schwankungen des ganzen Untergrundes bezieht. — Das Haftwasser verteilt sich bei tiefgründigen Böden auf größere Räume, als nur auf die oberste 1-m-Schicht.

ist der Verwitterungsboden nur ausnahmsweise so tiefgründig, daß ein ganzer Jahresniederschlag aufgespeichert werden könnte.¹⁾

All diese Angaben über die Bindung von Wasser in der obersten Bodenschicht von 1 m Tiefe haben natürlich für die Aufstellung der Wasserbilanz unserer Hochgebirgslandschaften beschränkten Wert, denn sie stellen eben nur teilweise den Wasservorrat im Sinne von Betriebskapital dar. Wenn wir auch in unsern Forschungsgebieten, in der Regel, von zusammenhängenden, weiten Grundwasserspiegeln nur in beschränktem Maße reden dürfen, sind doch größere Hohlräume, Röhren, Gänge, Quellädern, eigentliche Höhlensysteme u. dgl. nichtkapillarer Art vorhanden, deren Wasservorkommnisse bis zu einem gewissen Grad die Rolle des permanenten Grundwassers zu übernehmen vermögen. Verschiedene Kombinationen sind zweifellos möglich. Die Bestimmung der Wasservorräte (Senkwasser) im Boden verursacht bei der Aufstellung der Bilanz von Niederschlag, Abfluß und Verdunstung, fast immer eine gewisse Unsicherheit, die Unbehagen schafft. Dieses Unbehagen wirkt namentlich dann recht entmutigend, wenn der Forscher mit seinem Forschungsgebiet nicht eng genug verwachsen ist. Im Verein mit Quellstudien, mit Hilfe des geoelektrischen Sondierverfahrens zur Bestimmung von unterirdischen Wasserräumen, oder durch Anwendung des seismographischen Reflexionsverfahrens zur Bestimmung der Topographie der Felssohle²⁾, durch Lotungen und Ultraschallwellen, Funkmutung usw.³⁾ dürfte es mit der Zeit doch möglich werden (ich setze bestimmte Bodenuntersuchungen in den Naturlaboratorien voraus)⁴⁾, den Bodenwasservorrat derart genau zu bestimmen, daß er zahlenmäßig in die Wasserbilanz eingesetzt werden kann.⁵⁾ An Wegen, die zum Ziel führen, fehlt es nicht; die Schwierigkeiten, die zu überwinden sind, sind mehr *finanzieller* Natur.

¹⁾ *Burger Hans*: Boden, Vegetation und Verdunstung. Gerlands Beiträge zur Geophysik, Bd. 50, Heft 2/3, 1937. Leipzig 1937.

²⁾ Vgl. *Jost Wilhelm*: Die seismischen Eisdickenmessungen am Rhonegletscher 1931. Denkschriften d. Schweiz. Naturforschenden Gesellschaft, Bd. LXXI, Abh. 2. Zürich 1936.

Kreis Alfred: Ergebnisse der seismischen Eisdickenmessungen auf dem Unteraargletscher. Verhandlungen d. Schweiz. Naturforschenden Gesellschaft, 121. Jahresversammlung, Basel 1941, S. 99/100.

³⁾ *Fisch W.*: Die Anwendung geoelektrischer Sondierverfahren in der Bautechnik. Schweiz. Bauzeitung, Bd. 115, Nr. 21 vom 25. Mai 1940.

Stenzel H.: Akustische Lotmethoden. Werft, Reederei, Hafen 1926, Heft 5/6.

Münger O.: Baugrunduntersuchung durch geoelektrische Profilsondierung. Schweiz. Bauzeitung, Bd. 114, Nr. 13, vom 23. Sept. 1939.

Maurer H.: Echolotung bei geneigtem und stark bewegtem Bodenprofil. Ann. d. Hydr. 54., 1925, S. 336—340.

Sondage par ultra-sons. Conseil Intern. de Recherches. Sect. d'Océanogr. Bull. n° 11, p. 66—67.

Rust Hans Heinr.: Mehrfache Reflexionen beim Echoloten auf weichem Grund. Die Naturwissenschaften, 23. Jahrg. 1935, S. 387.

Stoche Theodor: Erkundungen über Art und Schichtung des Meeresbodens mit Hilfe von Hochfrequenz-Echolotungen. Die Naturwissenschaften, 23. Jahrg. 1935, S. 383.

Fritsch V.: Ergebnisse kosm. Physik 4 (1939), S. 219, Grundzüge der Funkgeologie (1939).

⁴⁾ Auch der Bakterienflora der Böden fällt Gewicht zu, denn sie vermag die Böden in ihrer physikalischen (namentlich was ihre Durchlässigkeit betrifft), chemischen und biologischen Beschaffenheit zu beeinflussen. Vgl. *Düggeli M.*: Studien über die Bakterienflora alpiner Böden. Festschrift Carl Schröter. Veröffentlichung des Geobotanischen Institutes Rübel, Zürich, 3. Heft, S. 204—224, Zürich 1925, und *Düggeli M.*: Studien über den Einfluß von Rohhumus auf die Bakterienflora der Böden. Festschrift Hans Schinz, Beiblatt Nr. 15 zur Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, LXXIII (1929).

⁵⁾ Auf das überschlägige Rechenverfahren von *Karl Fischer* zur Behandlung der Frage, in welchem Maße der Winterabfluß nicht nur von der Niederschlagsmenge des betreffenden Winters, sondern auch von der des vorhergehenden Sommers abhängt, sowie auf die Ganglinie des Abflusses bei Trockenwetter (Trockenwetterlinie) darf hier umfangshalber nicht eingetreten werden. (Vgl. *Karl Fischer*: Ziele und Wege der Untersuchungen über den Wasserhaushalt. Mitteil. d. Reichsverb. d. Deutschen Wasserwirtsch. E. V., usw. 1936, Berlin-Halensee, Nr. 40, S. 72 f. u. 102 f.)

Trotz allem kommt den *Burgerschen* Wasserwerten der obersten 1-m-Schicht im Wasserhaushalt der Natur große Wichtigkeit zu. Sie zeigen das ungleich große Wasserspeichungsvermögen unserer Böden und seine vielseitige Bedeutung für den Wasserhaushalt der Flußgebiete; sie sind, wenigstens teilweise, ein wertvoller Beleg zur Rechtfertigung der weiten Schwankungsgrenzen für die Jahresdifferenz zwischen Niederschlags- und Abflußmenge; sie machen es verständlich, daß mit zunehmender Ausdehnung eines Forschungsgebietes ein wachsender Ausgleich jener Faktoren stattfinden muß, welche die Landesverdunstung in positivem und in negativem Sinne beeinflussen. Wenn wir die behandelten Fragen noch im besondern auf das *Hochgebirge* beziehen, so ist, wie ich bereits früher hervorgehoben habe, vor allem darauf hinzuweisen, daß sowohl der prozentische Anteil der Vegetationsdecke an der Gesamtläche, als auch die Dauer der Vegetationsperiode desto kleiner, bzw. kürzer werden, je höher das Gebiet liegt. Der Wald löst sich bei zunehmender Höhe allmählich auf und an seine Stelle tritt der eigentliche Kampfgürtel, der den Uebergang zur alpinen und nivalen Region bildet. Die stolzen Fichten-, Lärchen-, Arvenbestände werden immer spärlicher und bescheidener; ihre Wurzeln aber stecken fest im Boden. Wacholder, Weiden, Alpenrose usw. kriechen mit ihren Stämmen und Zweigen nur noch dem Boden entlang. Die Kräuter schmiegen sich immer enger dem Boden an und bilden oft weite Teppiche von geringer Dicke. — Die Vegetation wird immer spärlicher. — Es sind dies Faktoren, die für die Beurteilung des Wasserhaushaltes im Hochgebirge von großer Bedeutung sind.

Mit zunehmender Höhe ändert sich aber auch der Bodentyp. Immer mehr tritt der Gletscher in den Vordergrund und fordert seinen Raum.

E. Unbeständigkeit des Bodenwassers in Zustand und Bewegung.

Hand in Hand mit diesen Aenderungen vollziehen sich auch in Erscheinungsform und Bewegung des Bodenwassers Wandlungen, die von Ort zu Ort und von Gebiet zu Gebiet verschiedenen Charakter annehmen. Dieses vieldiskutierte und heikle Thema kann hier nur kurz gestreift werden. Vor allem muß daran erinnert werden, daß die verschiedenen, auf die Wasserbewegung im Boden wirkenden Kräfte von Stelle zu Stelle wechseln. In Betracht fallen namentlich die Temperaturschwankungen des Bodens, die bei den porenfüllenden Luft- und Wassermengen, je nach den Witterungsverhältnissen, recht komplizierte Wandlungen auslösen können. Diese Vorgänge werden im Winter durch die Schneedecke meist unterbunden. Unter der Schneedecke behält die Bodenoberfläche die ihr eigene Wasserdurchlässigkeit bei, vorausgesetzt, daß sie vor dem Einschneien nicht gefroren war. Die von Wasserdampf gesättigte wärmere Grundluft füllt die zwischen Schneedecke und Grundwasseroberfläche vorhandenen Poren und Hohlräume des Bodens aus. Ein Teil der Dampfwärme wird zum Schmelzen der untersten Bodenberührungsschicht der Schneedecke verbraucht; es ist somit ein fortwährendes, mäßiges Eindringen von Wasser in den Boden möglich, während die ruhende Pflanzenwelt von den vermehrten Untergrundwasservorräten nur sehr spärlich zehrt. Es ist daher verständlich, daß die Temperatur der Berührungszone von Bodenoberfläche und Schneedecke, in der Regel — um 0° schwankt.¹⁾ Wenn im Frühjahr, mit dem Eintritt der

¹⁾ Vgl. Beitrag zur Kenntnis des Wärmehaushaltes der obersten Bodenschicht der Schweizer Alpen. Denkschrift der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft, LXXVII, Zürich 1947.

eigentlichen Wärmeperiode, die Bäche und Flüsse erst einige Tage später merklich anzuschwellen beginnen, so ist diese Verspätung nicht nur der großen Wasseraufnahmekapazität der Schneemassen allein, sondern auch einer ebensolchen des Bodens selbst zuzuschreiben (Freiwerden von Hohlräumen während der Zeit der Schneebedeckung). Mit der Dicke der Schneelage über noch ungefrorenem Boden und der Dauer der Schneebedeckungsperiode wächst die Zahl der zur Aufnahme von Schmelzwasser freiwerdenden Hohlräume des Bodens. Umgekehrt — bleibt in schneefreien, strengen Wintern die Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens weit unter dem Mittelmaß zurück. Mit dem Grad der Wasserkapazität des Bodens steht aber auch das Maß der Hochwassergefahr der Schneeschmelze in direktem Zusammenhang.¹⁾

Die zu einem bestimmten Zeitpunkt herrschenden Verhältnisse im Wasserhaushalt des Bodens sind das Produkt einer ganzen Reihe von Kräfteeinflüssen, deren Größe von Fall zu Fall ermittelt werden muß.

Bestimmend für den Grad des Bodenwassergehaltes innerhalb der Vegetationsperiode sind bekanntlich die klimatischen Verhältnisse des Jahres, die Art der Vegetation und die Tiefgründigkeit des Bodens. Es sind dies alles Faktoren, die zweifellos mit zunehmender Höhenlage des Gebietes auf Abnahme der Landesverdunstung hinweisen. Bei schwächerer Bewachsung steigert sich das Abflußvermögen der Niederschläge direkt, oder indirekt in Form von Schmelzwasser.²⁾ Amerikanische Untersuchungen haben deutlich gezeigt, daß das Abflußvermögen mit zunehmender Kahtheit des Bodens — stark anwächst. Das Abflußvermögen eines gänzlich kahlen Bodens kann das eines dicht bewachsenen um ein Vielfaches übertreffen.

Bei der Auswirkung der Niederschläge kommt es aber nicht nur auf ihre Verteilung und Intensität und auf die Vegetation an, sondern auch auf Gestalt (Relief, Grundrißform) und Ausdehnung der Landschaft.

Mit steigender Höhe nimmt, in der Regel, die Reliefenergie des Gebietes, sowie die Dauer der Schneebedeckung des Bodens zu, während die Größe der bewachsenen Fläche und die Dauer der Vegetationsperiode abnehmen; es sind dies Faktoren, die die Landesverdunstung beeinträchtigen. Demgegenüber wirkt sich der mit zunehmender Höhe sinkende atmosphärische Druck, sowie der erhöhte Strahlungseinfluß der Sonne — fördernd auf diese aus. Die Frage, ob die Zunahme der Niederschläge mit steigender Höhe, auch bei gleichbleibender Reliefenergie den Grad der Verdunstung fördert, kann heute noch nicht eindeutig beantwortet werden. Dagegen steht fest, daß neben den klimatisch-meteorologischen Faktoren auch die Bewachsung des Bodens und die Reliefenergie entscheidenden Anteil am Wasserhaushalt nehmen.

In physikalischer Beziehung ist wohl dem Porenvolumen der Böden die größte Bedeutung zuzumessen. Je größer das Porenvolumen, desto kleiner ist, in der Regel, der prozentische Anteil des Niederschlages am Oberflächenabfluß.

¹⁾ Für den kapillaren Zustand (der gänzlichen Füllung der Bodenhohlräume mit Wasser) gilt das Darcysche Gesetz, wonach Abhängigkeit besteht zwischen Druckhöhenunterschied, Filterlänge und Bodenbeiwert.

Vgl. meine Ausführungen über den Föhn und seine Bedeutung für den Wasserhaushalt des Hochgebirges in Band II, III. Teil — Forschungsgebiet Nr. 7 — Davosersee, Kap. 3, III., B. 1. d, S. 44—46.

²⁾ Sofern das Gebiet nicht reich an Schutthalden u. dgl. ist.

Das Maß der Auswirkung jedes einzelnen Faktors ist von Fall zu Fall sehr verschieden. Das Endprodukt vermag bald verstärkend, bald abschwächend auf die Verdunstung einzuwirken.

Auch der Chemismus des Grundgesteins und des Bodens, sowie die Biologie des letztern, rufen wichtige Veränderungen im Wasserhaushalt eines Flußgebietes hervor. Die bodenkundliche Forschung der letzten Jahre zeigt mehr und mehr, welche enge Beziehungen zwischen diesen Eigenschaften des Bodens bestehen.¹⁾

Eine sehr wichtige, manchmal sogar entscheidende Rolle, fällt der Zusammensetzung und Lagerung der geschichteten Massengesteine — der Struktur des Bodens — zu. Durch sie kann ein sonst undurchlässiger Boden stark durchlässigen Charakter annehmen, ein nach geologischen Charakterzügen geschlossenes Gebiet — an Wasserverlusten gebrechen.

F. Karstgebiete.

Besonders eigenartig vollzieht sich der Kreislauf des Wassers in Karstlandschaften.²⁾ Ihre Entwässerung erfolgt vorwiegend auf unterirdischem Wege. Sie kommen in Gebieten vor, deren Boden reiche Vorkommnisse an Karbonatgesteinen (Kalk, Dolomit, Gips) aufweist oder aus kalkreichen Mergeln besteht. Dabei kommt den Dolinen im Karst eine besondere Bedeutung für den Abfluß zu. Das Wasser der Niederschläge im reinen Karst (ich denke dabei an unser Forschungsgebiet *Melchsee-Frutt* [9]) vermag an der Oberfläche, der «Regenschlucktrichter» wegen, nur sehr kurze Wege zurückzulegen. Es entzieht sich größtenteils der Verdunstung; damit wird das Abflußvermögen gesteigert.

In gewissem Sinne mit der Karsterscheinung verwandt ist das Gletscherphänomen. Auch in Gletschergebieten gibt es, wenn nicht unterirdische, so doch subglaziale Abflüsse von zweifellos nicht minder großer Bedeutung.³⁾

Karst- und Gletscherlandschaften nehmen, hydrologisch beurteilt, eine stark ausgeprägte Sonderstellung ein.

G. Bodenfrost.

Wichtig für den Wasserhaushalt eines Flußgebietes ist auch der Bodenfrost und seine Wirkung auf den Abfluß. Diese ist zu bekannt, als daß ich näher darauf einzutreten brauche. Allgemein festgehalten sei hier nur die Tatsache, daß der Boden in vegetationsfreiem Gelände viel leichter und schneller einfriert als bewachsener Boden.

Angesichts der komplizierten Wechselwirkungen ist es keine leichte Aufgabe, die Beziehungen zwischen den verschiedenen Bodeneigenschaften und ihren Auswirkungen auf den Niederschlagsabfluß unmittelbar, und die Landesverdunstung indirekt, zahlenmäßig auszudrücken. Die Schwierigkeit solcher Untersuchungen liegt oft in dem Umstand, daß ein einziger heftiger Niederschlag die Entwicklungsgeschichte des Wasservorrates im Boden vollständig abubrechen vermag. Auf die Atmosphäre bezogen sind daher Mittelwerte brauchbarer, als für Untersuchungen

¹⁾ Vgl. *Kuron H.*: Die Gefahren der Bodenerosion und ihre Bekämpfung. Mitteil. d. Reichsverb. d. Deutschen Wasserwirtsch. E. V., Nr. 45, 1938, Berlin-Steglitz 1938.

²⁾ Vgl. *Lehmann O.*: Die Hydrologie des Karstes. Enzyklopädie der Erdkunde. Leipzig und Wien 1932.

³⁾ Vgl. *Lütschig O.*: Der Märjelsee, S. 168—210. Bern 1915.

über den Wasservorrat im Boden. Die Beziehungen zwischen meteorologischen Daten und dem Wasservorrat im Boden sind recht komplizierter Natur und harren zudem noch ihrer völligen Klärung. Auch in diesem Falle ist es ratsam, vom Kleinen ins Große zu arbeiten und sich vor dem Verallgemeinern zu hüten.

H. Denudation.

Schließlich bleibt mir noch übrig, obigen Ausführungen einige Worte über den Einfluß der Denudation auf den Abfluß anzuschließen. Bäche und Gletscher sind, wegen ihrer schleifenden Wirkung auf Boden und Gehänge, bei weitem die wichtigsten Faktoren bei der Ausgestaltung einer Hochgebirgslandschaft. Das Resultat ihrer Tätigkeit ist eine allmähliche Abtragung des Bodens, die *Denudation* genannt wird. Erosion und Denudation wachsen mit zunehmender Höhe; sie sind im Hochgebirge, wo die Unebenheit des Bodens ihr Höchstmaß erreicht, weit bedeutender als im Mittelgebirge. Im Hochgebirge ist, besonders in der Region zwischen der Vegetations- und der Schneegrenze, die Wirkung der mechanischen Verwitterung sehr bedeutend. Vor allem treibt der Spaltenfrost hier sein unheimliches Wesen. Da die Böschungen meist sehr steil sind, ereignen sich nicht selten Abstürze; auch die Ausspülung, die hier durch keinerlei Vegetation gehemmt ist, erreicht bei der Steilheit der Gehänge erhöhte Wirkung, was ebenfalls für Lawinen gilt. Die Gegenwirkung geht vor allem erst von der Pflanzendecke aus, die sich als schützende Hülle über den Boden ausbreitet. Sie hält den Boden mit ihrem Wurzelwerk zusammen und schützt ihn weitgehend vor dem Angriff des Wassers. Flächenmäßig wie die Ausspülung wirkt auf die Landoberfläche der Wind (Winderosion), dessen Wirkungsfeld räumlich noch unbeschränkter ist, da ihm keine bestimmten Bahnen, wie dem fließenden Wasser, zugewiesen sind. Wie die Ausspülung, so wird auch die Windwirkung durch die Vegetation gehemmt.¹⁾ Der Abtragungsprozeß gelangt, der Reliefenergie, der Bodenbeschaffenheit und der Bewachsung entsprechend, gewissermaßen zum Stillstand. Auf die Frage der Einwirkung der Abtragungsvorgänge auf die Gestalt des Bodens soll an dieser Stelle nicht näher eingetreten werden. Es genügt, hervorzuheben, daß die Zerstörung der natürlichen Vegetation in unsern Hochalpen durch Menschenhand schon oft zu Abrutschungen größeren Ausmaßes und zur Bildung von Rinnsalen geführt hat, so daß auf solche Weise schon große Flächen ehemaligen Weidebodens verwüstet oder schwer beschädigt worden sind.

Mit vermehrtem Niederschlag wachsen, naturgemäß, die Gefahren der Bodenerosion. Eine Steigerung der Bodenabtragung, verbunden mit Vegetationsschwund, begünstigt zumeist den Oberflächenabfluß der Niederschläge, verringert den Grad der Bodenlockerung und vermindert somit die Wasserkapazität des Bodens, was unter Umständen mit der Zeit zur Austrocknung des Bodens führen kann. Der ungehemmte und daher gesteigerte Oberflächenabfluß erhöht aber auch die Hochwassergefahr. Damit berühren wir von selbst das weite Gebiet der Geschiebeführung. Der Gewässerkundige muß dabei den ganzen Vorgang zu erfassen suchen; er wird nicht nur den Geschieben, die auf dem Boden gleiten, sondern auch den Schwebe-

¹⁾ Ueber die Menge und Beschaffenheit der vom Wind fortgetragenen und in die Niederschlags-sammler geratenen Verwitterungsmaterialien habe ich in meiner Arbeit: Zur Wasserwirtschaft des Kraftwerkes Wäggital, Siebnen 1930, S. 71 u. f., berichtet.

stoffen, die vom Wasser getragen werden und die, wie bekannt, auch in der Bodenfrage eine Rolle spielen, die nötige Aufmerksamkeit widmen.

Im Sinne unserer Betrachtungen über den Wasserhaushalt des Schweizer Hochgebirges liegt es nun, daß wir im folgenden nicht so sehr den Zustand, sondern vielmehr die Entwicklung, als Folge der durch die Jahreszeiten geschaffenen Zustände, zu beachten haben. In zeitlicher Beziehung erhält für unsere gewässerkundlichen Forschungen, wenigstens vorläufig, die Bestimmung der Vorratsänderungen auf Beginn des hydrographischen Jahres (1. Oktober oder 1. November) einen besondern Wert. In den Kapiteln, die den einzelnen Forschungsgebieten gewidmet sind, werden wir jeweils über die Art und Weise ihrer Erfassung berichten.

I. Wasserdurchlässigkeit von Böden.

Nach dem Grad ihrer Wasserdurchlässigkeit möchte ich die verschiedenen Bodenarten in drei Hauptkategorien einteilen:

1. undurchlässiger Boden ohne Wasserführung,
2. schwach bis mittelmäßig durchlässiger Boden mit beschränkter Wasserführung,
3. leichtdurchlässiger Boden mit reichlicher Wasserführung.

Eine engere Abgrenzung ist natürlich möglich.¹⁾ Die vorliegende Einteilung soll auch nur allgemein der Eigenart unserer Forschungsgebiete Rechnung tragen. Im übrigen schließe ich mich damit im großen ganzen der Systematik von *G. Troßbach* und *W. Wundt* an.²⁾

Für die Beurteilung der Wasserdurchlässigkeit eines Bodens ist vor allem die Beschaffenheit der Verwitterungsschicht über dem Muttergestein (Bodenzustand), und erst in zweiter Linie sind Zustand und Beschaffenheit der Felsunterlage (Gesteinsart, Struktur usw.) maßgebend. Letztere ist nur dann direkt ausschlaggebend, wenn die Deckschicht von geringer Dicke ist, oder wenn das Grundgestein Risse, Klüfte u. dgl. aufweist, die dem Sickerwasser einen raschen Abfluß gewähren. Wenn man die bisherigen Erkenntnisse über das kapillare Verhalten der Böden (Verhalten poröser Körper auf geophysikalische Vorgänge) auf seine eigenen Gebiete anzuwenden versucht, so stößt man Schritt für Schritt auf Hindernisse. Unregelmäßigkeiten, Widersinn usw., deren eindeutige Abklärung oft nicht recht gelingen will. Es liegt dies sicherlich nicht nur an der Unvollkommenheit der bisherigen Erkenntnisse, sondern vielmehr im Reichtum der Erscheinungen, im ungleichen Zusammenspiel der gleichen Faktoren, die diese Vorgänge in der freien Natur bedingen. Welch verschiedene Rollen vermag nur ein und dasselbe Wasserteilchen in kurzer Folge in unsern Hochgebirgsböden zu übernehmen! Welche Mannigfaltigkeit wohnt bei so verschiedenartiger Gestaltung des Landes dem Wurzelwerk der Alpenpflanzen inne!

Bevor ich auf die Wasserdurchlässigkeit der Böden eintrete, möchte ich zuerst einige Worte den Sickerströmungen in Kluftsystemen widmen. Dies um so mehr, als sich in unmißverständlicher Weise herausstellte, daß der Frage der Wasserdurchlässigkeit im Schweizer Hochgebirge, namentlich im Hinblick auf die Ergebnisse

¹⁾ So gibt es Böden, die trotz ihrem undurchlässigen Charakter, durch Bildung bleibender Risse, Klüfte u. dgl. — zu durchlässigen werden. In solchen vermögen sich zuweilen eigentliche Quellsysteme zu bilden. (Westhang der Verraux, Gebiet der Baye de Montreux.)

²⁾ *G. Troßbach* und *W. Wundt*: Die natürliche Vorratsbildung in unsern Flußgebieten. Archiv f. Wasserwirtsch. d. Reichsverb. d. Deutschen Wasserwirtsch. E. V. Nr. 52, Berlin 1940.

unserer eigenen Untersuchungen über den Wasserhaushalt einer Reihe von Hochgebirgslandschaften, eine wesentlich größere Bedeutung zufällt, als bisher angenommen wurde.

Als *wasserundurchlässig* dürfen wohl, wenn wir vorläufig von *Kluftsystemen* absehen, alle Silikatgesteine angenommen werden. Anders steht es mit den Gesteinen der Trias, des Malms, der Kreide usw. Sie sind im allgemeinen als *durchlässig* zu bezeichnen. Wieder andere Gesteine, wie die des Lias und des Doggers, dürfen als undurchlässig bezeichnet werden, wenn das Felsgestein nicht kleinere unzählige Spalten aufweist und sich nicht Zwischenlagen einschieben, die je nach ihrer Beschaffenheit, wasserdurchlässig oder wasserundurchlässig sind. In der Durchlässigkeitsfrage kommt ferner, wie bekannt, den Verlagerungen in den obern Gesteinsschichten und den Kontaktflächen der verschiedenen Gesteinsarten hohe Bedeutung zu.

Treten in absolut wasserundurchlässigen Gesteinen Kluftsysteme (Spalten, Löcher, Hohlräume usw.) auf, die sich gegen das Berginnere nicht schließen, sich also weiter durchziehen (Abzugskanäle), dann vermag das Wasser in die Hohlräume einzudringen. Es entstehen zuweilen Zirkulationsströmungen, wodurch dem einen Gebiet Wasser entzogen, dem andern zugeführt werden kann. Ihrer Gesteinsart nach wasserundurchlässige Gebiete können auf diesem Wege zu durchlässigen werden. Solchen Erscheinungen kommt, meiner festen Ueberzeugung nach, eine wesentlich größere Bedeutung zu, als oft angenommen wird. Unsere Untersuchungen über den Wasserhaushalt des Schweizer Hochgebirges sprechen hierüber eine deutliche Sprache. Es kann und darf nicht meine Aufgabe sein, dieser Frage näherzutreten, denn der Hydrologe kommt damit auf ein Gebiet, das zweifellos der *Geologie* angehört, das aber unbedingt einer weitem Aufklärung bedarf.¹⁾

Vom Gesichtspunkt der Schweizer Hochgebirgsverhältnisse aus betrachtet, sollen nun diese drei Stufen behandelt werden. Dabei muß einleitend hervorgehoben werden, daß der Grad der Wasserdurchlässigkeit des Bodens im Hochgebirge, bekanntlich, auf engstem Raume wechselt. Dies entspricht dem bunten Wechsel der natürlichen Verhältnisse in unserm Alpenlande. Welche schroffen Gegensätze bei solch verschiedenartiger Gestaltung, bei so ungleichen Gruppierungen! Dieser Mannigfaltigkeit wegen, kann die Klassifikation der Böden nach ihrer Wasserdurchlässigkeit in unsern Forschungsgebieten nur in breitem Rahmen möglich sein.

1. Undurchlässige Böden (ohne Wasserführung) sind solche, auf denen nach ergiebigem Regen und nach erfolgter Sättigung des Bodens, das Regenwasser

- a) über ebenen Flächen stehenbleibt,
- b) auf unebenem Boden, der Schwerkraft folgend, auf dem Wege des geringsten Widerstandes, mit der durch den Grad der Bodenneigung bedingten Geschwindigkeit, *ohne wesentlichen Verlust*, den tiefsten Stellen (Bodenvertiefungen) zustrebt.

¹⁾ Bei den Kartierungsarbeiten auf Blatt 372, Gegend von Schüpfheim (Luzern), die ganz auf die subalpine Molasse entfällt, gelang es *H. Fröhlicher*, Geologe in Olten, in der ausgedehnten Region der Napfnagelfluh, die durch ein bedeutendes Mergelband von den liegenden Nagelfluhmassen des Helvétien getrennt werden kann, *zahlreiche Brüche* nachzuweisen. Ohne an dieser Stelle näher auf das Vorkommen und die Art dieser Brüche einzutreten, möchte ich doch die Frage aufwerfen, ob die hohen Verdunstungswerte des *Sperbel-* und *Rappengrübens*, dem *Napfgebiet* zugehörig, nicht vielleicht auf Wasserverluste, hervorgerufen durch solche Bruchsysteme, zurückzuführen seien. (Vgl. Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles, 122^e Session annuelle, Sion 1942, p. 106, und *Engler A.*: Untersuchungen über den Einfluß des Waldes auf den Stand der Gewässer. Mittlg. d. Schw. Zentralanstalt f. d. forstl. Versuchswesen, XII. Bd., Zürich 1919.)

Solche Gebiete sind durch Sümpfe, Weiher, Tümpel usw. örtlich gekennzeichnet. Gebiete mit vorherrschend undurchlässigem Boden sind, in der Regel, quellenarm. Kommen aber solche vor, dann sind sie zumeist wasserarm. Nach starken Regenfällen schwellen die Bäche nur für kurze Zeit mächtig an, können aber in diesem Zustand stärkere Ueberschwemmungen verursachen.

2. **Wenig- bis mittelmäßig-durchlässige Böden** (mit beschränkter Wasserführung) sind solche Böden, die einen erheblichen Teil des Regenwassers in sich aufzunehmen vermögen, was auf größere Bodenlockerheit zurückzuführen ist. Die Einsickerung des Wassers geht relativ rasch vor sich. Der Quellhorizont liegt meist nicht sehr tief. Der Wasserreichtum der Quellen ist öfteren und großen Schwankungen unterworfen. Der Oberflächenabfluß ist relativ rasch und führt nach starken Regenfällen zu Hochwasserbildung. Die Wasseradern versiegen nie.

3. **Leicht-durchlässige Böden.** Diese schlucken beinahe das gesamte Regenwasser auf. Ihre Beschaffenheit (Sand, Kies, Grobschutt, Blöcke u. dgl.) ist sehr verschiedenartig, ihre Grundtiefe sehr ungleich. Viele Kombinationen sind möglich. Die zumeist lockerer Bodenart entspringenden Quellen führen in tiefgründigem Boden gut filtriertes Wasser in regelmäßiger Fülle. Handelt es sich um ausgesprochene Karstgebiete mit geringer und lockerer Schuttüberlagerung, dann ist die Quellwasserführung, dem Regime warmer Niederschläge entsprechend, sehr schwankend.

Gebiete mit vorwiegend sehr durchlässigen Böden besitzen, in der Regel, ausgeglichene Abflußverhältnisse. Hochwasser treten nach exzessiven Regenfällen oder nach starken und andauernden Landregen in milderer Gestalt auf, sofern der Boden nicht gefroren ist.

In gefrorenem Zustand verhalten sich diese Böden genau wie undurchlässige, mit allen ihren Nebenerscheinungen.

Eine Humusschicht auf durchlässigem Boden hemmt die Versickerung, während eine solche auf undurchlässigem Boden diesen Prozeß, im Gegenteil, fördert.

II. Zusammenhang zwischen Niederschlag, Vegetation, Boden, Versickerung und Verdunstung.

Diese Zusammenhänge sind recht komplizierter Natur und daher nicht leicht zu durchschauen. Von endgültigen Schlußfolgerungen sind wir, nach dem heutigen Stand der Wissenschaft — noch recht weit entfernt. Es fehlt vor allem an Ergebnissen langjähriger, systematischer Untersuchungen über das Ausmaß der Landesverdunstung für Gebiete mit ungleicher Vegetation, mannigfaltigen Bodenverhältnissen und verschiedenem Bodengefälle, sowie ungleichen Wasservorräten.¹⁾ Großen Schwierigkeiten begegnet namentlich die Trennung der Bodenverdunstung von der Transpiration, da man in den meisten Fällen nur beide zusammen messen kann. An der Klärung dieser Frage hat insbesondere die Gewässerkunde großes Interesse.

A. Das meteorologische Observatorium „Drachenkopf“, Eberswalde.

Einen hoffnungsvollen Weg zur Lösung dieses Fragenkomplexes haben *W. Söldan* und *W. Friedrich* in Berlin, *J. Bartels* in Eberswalde und neuerdings auch *H.*

¹⁾ Bei spätern Untersuchungen wird sich zweifellos eine Differenzierung ergeben in der Weise, daß die bewachsenen Böden eine höhere Verdunstung aufweisen als die un- oder wenig bewachsenen. Einen sekundären Einfluß — er gelangt bereits in unsern Ergebnissen zum Ausdruck — wird man bei vermehrten Untersuchungen feststellen können, wenn man die Gebiete in gefällsarme und gefällsreiche, in durchlässige und undurchlässige, ferner in Gebiete mit großer und kleiner Flußdichte usw. trennt.

Renqvist¹⁾ in Helsinki besprochen. Sie haben hierfür Lysimeteranlagen großen Formates geschaffen.

Auf dem *Meteorologischen Observatorium «Drachenkopf»* der *Forstlichen Hochschule* in Eberswalde ist seit August 1929 eine Verdunstungs-Meßanlage in Betrieb, die es ermöglicht, den obenerwähnten Zusammenhängen näherzutreten. Auf die Konstruktion dieser Meßanlage soll nur kurz eingegangen werden.²⁾

Es handelt sich hier um die Bestimmung des Wasserhaushaltes von drei dem lokalen Erdreich entnommenen Aushüben von feldspatreichen Sandblöcken in natürlicher Anordnung, von denen jeder seinen eigenen, einseitig offenen, eisernen Behälter (Tank) von 1 m² Querschnitt und 1,5 m Tiefe ausfüllt. Die Oberflächen der Füllungen sind möglichst natürlich gehalten, z. T. mit verschiedenen Gewächsen bepflanzt, oder auch kahl belassen worden.

Die drei Tanks sitzen in drei Schächten von entsprechender Tiefe, auf 3 m Entfernung voneinander im Erdboden versenkt, dergestalt, daß die Erdoberflächen ihres Inhalts mit der natürlichen, sie umgebenden Erdoberfläche auf gleicher Höhe liegen und von ihr nur durch die dünne eiserne Wandung des Tanks und einen schmalen Abstand von ca. 4 cm (Spielraum zwischen Tank- und Schachtwand) getrennt sind. Etwa 20 cm über jedem Tankboden ist je ein Sieb angebracht, das von einer ca. 10 cm hohen Kiesschicht überlagert wird. Das durch das Sieb gelangende Sickerwasser wird durch einen Hahn in ein Sammelgefäß abgelassen. Jeder Tank steht auf einer geeichten Schaltwaage, die Gewichtsabweichungen von 0,1 kg abzulesen gestattet. Die Oberflächen der Tankinhalte stellen drei Ausschnitte von je 1 m² aus je einer 3 × 4 = 12 m² großen Fläche mit gleichem Bewuchs dar. Von oben ist von der Anlage weiter nichts zu sehen, als das wenige Zentimeter breite Schutzblech um den Rand der Tanköffnung herum, eine Verschalung, die dazu dient, das Regenwasser vom Spielraum zwischen Schachtwand und Mantelfläche des Tanks abzuschirmen (Bartels).³⁾

Die Anlage funktioniert tadellos. Sie hat auf den Verfasser, der sie am 2. August 1938 besichtigte, einen vorzüglichen Eindruck gemacht.⁴⁾ Im Hochgebirge empfiehlt es sich, für die Lösung solcher Fragen *regelrechte Naturlaboratorien* in scharf abgegrenzten, kleinen Gebieten zu errichten, gibt es doch in unserem vielgestaltigen und an Erscheinungen so reichen Schweizer Hochgebirge eine Menge von charakteristischen Mulden, Tälchen, Schluchten usw., die sich hierzu ganz besonders eignen.

Wenn auch die Ergebnisse der Untersuchungen auf dem «Drachenkopf» in Eberswalde nur mit *großer Vorsicht* auf andere Gebiete, namentlich auf das Hochgebirge, übertragen werden dürfen, wirkt ihr Beispiel doch dermaßen instruktiv und wegleitend, daß sie in dieser Arbeit nicht übergangen werden dürfen. Es darf dies räumeshalber nur soweit geschehen, als es die hydrologische Zielsetzung erfordert. Ich lehne mich dabei strikte an die bereits erwähnten Arbeiten von *W. Friedrich*, *J. Bartels* und *W. Wundt*⁵⁾ an und begnüge mich mit der Wiedergabe und Erläuterung

¹⁾ Mündliche Mitteilung von Herrn Dr. *H. Renqvist*, Leiter des Finnländischen Hydrologischen Institutes, vom 13. April 1939.

²⁾ Hierüber siehe *Bartels J.*: Verdunstung, Bodenfeuchtigkeit und Sickerwasser unter natürlichen Verhältnissen. Zeitschr. f. Forst- u. Jagdwesen, April 1933, S. 204 u. ff., Berlin 1933.

Friedrich W.: Der gegenwärtige Stand der Verdunstungsmessungen. Assoc. Internat. d'Hydrol. Scientifique, Bull. n° 24.

Friedrich W.: Messungen der Verdunstung vom Erdboden. Sonderdruck aus «Deutsche Forschung». Aus der Arbeit der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft. Abgeschlossen im November 1932.

³⁾ Weitere Einzelheiten sind den Arbeiten von *W. Friedrich* und *J. Bartels* zu entnehmen.

⁴⁾ Es ist mir eine angenehme Pflicht, auch an dieser Stelle den Herren Dr. *W. Friedrich*, Prof. Dr. *J. Bartels* und Prof. Dr. *J. Schubert* für ihre Mühewaltung anlässlich meines Besuches verbindlichst zu danken.

⁵⁾ *Wundt W.*: Pflanzenbedeckung und Wasserkreislauf. Sonderdruck aus «Der Kulturtechniker», 42. Jahrg., Juli/Aug. 1939, Heft Nr. 7/8, Berlin 1939.

ihrer Zahlen (Tabellen 1, 2 und 3), die dem Leser vor allem einen tiefen Einblick in das Wesen dieser Zusammenhänge ermöglichen sollen.

In Tabelle 1 drückt *W. Wundt*, nach *W. Friedrich* und *J. Bartels*, für die Bodenflächen der Lysimeter die Jahressummen der Verdunstung aus, und zwar

- a) für vegetationslosen Boden (Sandboden) *ohne* Grundwasser,
- b) für Grasboden (Grünland) *ohne* Grundwasser,
- c) für Boden mit jungem Kiefernbestand *ohne* Grundwasser,
- d) für Grasboden *mit* Grundwasser.

Außer dem Niederschlag, der mit einem *Hellmannschen* Messer auf *Bodenhöhe*¹⁾ bestimmt wird, sind den Tabellen auch die Verdunstungswerte der *Wildschen* Waage für *Eberswalde* und *Les Avants* (Klammerwerte) angegliedert worden. Aus den Ergebnissen von *Les Avants* (983 m ü. M.) geht, im Vergleich mit *Eberswalde* (50 m ü. M.), die Abnahme der Verdunstung mit zunehmender Höhenlage deutlich hervor.

Eberswalde, 50 m ü. M.

Tabelle 1

	Einzeljahre								Zusammenfassende Mittel		
	1930	1931	1932	1933	1934	1935	1936	1937	1930/32	1934/35	1934/37
<i>Niederschlag</i>	720	750	550	552	491	697	—	—	673	594	—
<i>Verdunstung vom Boden ohne Vegetation und ohne Grundwasser</i>	140	199	194	—	—	—	—	—	178	—	—
<i>Verdunstung vom Grünland¹⁾ ohne Grundwasser</i>	322	405	371	405	282	381	347	337	366	332	337
<i>Verdunstung vom jungen Kiefernbestand ohne Grundwasser</i>	—	—	—	—	388	516	439	502	—	452	461
<i>Verdunstung vom Grünland mit Grundwasser</i>	—	—	—	—	864	736	625	599	—	800	706
<i>Wildsche Waage, in der Hütte, 1,3 m über dem Erdboden</i>	500	471	534	521	640 (447)	575 (402)	488 (354)	465 (409)	502	608	542 (403) ²⁾

¹⁾ Mit kurz gehaltenem Gras bewachsen.

²⁾ Die in () gesetzten Werte beziehen sich auf die Station *Les Avants* (983 m ü. M.), der Rochers de Naye-Gruppe zugehörig. Vgl. *Lütschg O.*: Ueber die Verdunstungsgröße freier Wasserflächen im Schweizer Hochgebirge. Denkschriften der Schweiz. Naturforsch. Gesellschaft, Bd. LXXVI, Abh. 2, Zürich 1946.

In Tabelle 2 gibt *W. Friedrich* Aufschluß über den jährlichen Gang der Verdunstung (Monatswerte in % der Jahressumme), wie sie in *Eberswalde* (a), in *München-Bogenhausen* (b), in *Göttingen* (c) und in *Berlin-Dahlem* (d) gemessen wurden.

Vor allem ist die gute Uebereinstimmung der prozentischen Werte in den Reihen 5 bis 8 bemerkenswert. Ich habe der Reihe 4 noch die Werte der *Wildschen* Schale der Stationen *Les Avants*, 983 m ü. M., Periode 1933/34 bis 1936/37, und *Emosson*, 1790 m ü. M., Periode 1929/30, angegliedert, um ordnungsmäßig zu zeigen, wie verschieden der durchschnittliche Gang der Verdunstung in nach Höhe und Lage ungleichen Gebieten ausfällt.

¹⁾ In *Eberswalde* betrug der Durchschnitt dreier Jahre, in 1 m Höhe: 622 mm, in 0 m Höhe: 673 mm, also 8,2 % mehr (vgl. *Schubert J.*, Zeitschr. f. Forst- u. Jagdwesen, 38, S. 728—735, 1906), in *Les Avants*, 983 m ü. M., betrug der Durchschnitt der drei hydrographischen Jahre 1937/38—1939/40, in 1,50 m Höhe: 1760 mm, in 0 m Höhe: 1823 mm, also 3,6 % mehr; in *Pré du Commun*, ca. 1400 m ü. M., im Mittelwert der Monate Juni/Oktobre der Jahre 1939 und 1940, in 1,50 m Höhe: 1125 mm, in 0 m Höhe 1163 mm, also 3,4 % mehr.

**Der durchschnittliche jährliche Gang der Verdunstung ausgedrückt in Hundertstel
der Jahressumme.**

Eberswalde, 50 m ü. M., 1934—1937.

Tabelle 2

Monat	1.	2.	3.	4.			5.	6.	7.	8.
	Kiefern	Grünland ohne Grund- wasser	Grünland mit hohem Grund- wasser	Wildsehe Waage			Friedrich (a)	Mayr (b)	Koehne (c)	Baumann (d)
				Eberswalde 50 m ü. M. 1934—1937	Les Avants (e) 983 m ü. M.	Emosson (f) 1790 m ü. M.	Mittelwerte			
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Nov.	3,0	1,9	1,5	2,6	5,1	11,5	2	1	1	1
Dez.	2,0	0,7	0,7	1,7	4,5	9,0	1	1	1	0
Jan.	2,0	1,3	1,2	2,6	5,0	5,7	1	1	1	1
Febr.	2,9	1,7	1,5	3,5	4,9	5,2	2	2	1	2
März	5,3	4,6	2,5	5,2	7,7	5,7	5	5	5	6
April	10,2	11,2	6,1	9,4	8,3	3,0	8	8	8	8
Mai	15,7	18,5	15,6	14,0	11,2	4,8	16	18	19	14
Juni	13,4	11,6	21,5	17,2	12,2	5,4	17	17	23	19
Juli	13,1	14,4	20,9	17,3	14,0	6,9	17	19	20	22
Aug.	14,6	16,4	14,6	11,6	10,9	14,8	15	16	11	14
Sept.	11,1	12,5	9,9	9,6	9,7	12,7	11	9	6	7
Okt.	6,7	5,2	4,0	5,3	6,5	15,3	5	3	4	6
Winter	25,4	21,4	13,5	25,0	35,5	40,1	19	18	17	18
Sommer	74,6	78,6	86,5	75,0	64,5	59,9	81	82	83	82
Jahr	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100	100	100

(a) = Mittelwert aus 1934—1937, und zwar

$$M = \frac{1 + 2 + 2 \times 3}{4}$$
 (Lysimeter Eberswalde).
 (b) = Durchschnitt 1918—1934 (München-Bogenhausen).
 (c) = Koehne, Grundwasserkunde 1928, S. 27; Seelhorst, Lysimetermessungen, 1904-1905, Göttingen.
 (d) = Landwirtschaftliche Bestellungsfolge, Durchschnitt, 1935-1936, Deutsche Wasserwirtschaft, 1937, S. 186 (Berlin-Dahlem).
 (e) = Ergebnisse der Station Les Avants, 983 m ü. M., 1933/34—1936/37.
 (f) = Ergebnisse der Station Emosson, 1790 m ü. M., 1929/30.

Aus Tabelle 1 geht bei den Mittelwerten der Jahre 1930/32 hervor, daß die Verdunstung des mit Gras bedeckten Bodens (366 mm) gegenüber dem vegetationslosen Boden *ohne* Grundwasser (178 mm), etwas mehr als den *doppelten* Wert erreicht. Eine weitere Steigerung von 124 mm (Mittelwerte 1934/37) tritt ein für Boden mit jungem Kiefernbestand. Weitaus die größte Verdunstung beansprucht aber Grasboden mit einem Grundwasserspiegel von 40—50 cm unter Flur: die Verdunstung steigt von 337 mm (Grasboden *ohne* Grundwasser; Mittelwerte 1934/37) auf 706 mm, also auf mehr als den doppelten Betrag.

Weiter geht hervor, daß die Ganglinie des Grundwassers nicht allein durch den Niederschlag, sondern auch durch das benachbarte Gewässersystem berührt wird.

Bedeutungsvoll für das Verständnis des Wasserhaushaltes im Boden und überhaupt für die ganze Landesverdunstungsfrage sind ferner die Ergebnisse der Untersuchungen *Bartels* über die jahreszeitliche Schwankung der Bodenfeuchtigkeit unter *nacktem* und *mit Vegetation bedecktem Boden*. Der starke Gegensatz zwischen beiden gelangt kraftvoll zum Ausdruck: die jahreszeitliche Schwankung der Boden-

feuchtigkeit fehlt unter nacktem Boden fast ganz, während sie unter Rasen, namentlich im Sommer, sehr entwickelt ist. Nackter Boden verdunstet also auch im Sommer wenig; was verdunstet, stammt im wesentlichen aus den unmittelbar nach dem Regen auf den Böden stehengebliebenen Wassermengen.

Ganz allgemein darf festgehalten werden, daß der Verdunstungsprozeß, der sich in einer Landschaft abspielt, als folgerichtige Reihe von physikalischen Prozessen in der Atmosphäre, auf dem Erdboden und teils innerhalb der Erdoberfläche, einen überaus komplizierten Naturvorgang darstellt, wobei der Pflanzendecke nur *eine*, dafür aber wichtige Rolle zufällt.

Vor allem fallen die großen Schwankungen in den Verdunstungswerten auf, die von den einzelnen, verschiedenen Bedingungen ausgesetzten Lysimetern geliefert werden. Zu denken gibt namentlich der große Wert von 706 mm für den Grasboden mit Grundwasser, und zwar um so mehr, als nach den Untersuchungen von *H. Keller* und *K. Fischer* die mittlere Landesverdunstung dieser Gegend nur einen Betrag von etwa 450 mm erreicht. Auch die korrespondierenden Werte des Niederschlages und der *Wüldschens* Waage in Eberswalde ergeben wesentlich kleinere Werte (vgl. Tabellenwerte 1).

Diese großen Differenzen gelangen in den Mittelwerten der Verdunstung größerer Landschaften deshalb nicht zum Ausdruck, weil sich, wie *W. Friedrich*¹⁾ richtig bemerkt, niedrige Werte aus Gegenden mit tiefliegendem Grundwasser mit hohen Werten aus andern Orten in der Regel zu einem Mittelwert ausgleichen. Damit schließt er sich auch der Meinung *Fischers* und des *Verfassers* an, daß die *Mittelwerte* der Landesverdunstung für Flußgebiete Mitteleuropas nur deshalb den Charakter einer Halbinvariante anzunehmen vermögen, weil sich in der Regel in der Natur selber ein Ausgleich *großen Stils* vollzieht (vgl. meine Ausführungen in Kap. 3, S. 53).

Nach den vorliegenden Lysimeterbeobachtungen steht fest, daß in trockenen Jahren die Vegetation auf etwa vorhandene Grundwasservorräte greift, sie aber in feuchten Jahren gar nicht oder nur in bescheidenem Maße beansprucht. Die Extreme des Niederschlages spiegeln sich also in der Verdunstung durch die Pflanzenwelt, der regulierenden Wirkung des Grundwassers und gewisser Pflanzenarten wegen, nur in abgeschwächtem Maße wider. Die Untersuchungen bestätigen auch aufs neue, daß die Verdunstung einer Landoberfläche sogar die einer freien Wasseroberfläche zu übertreffen vermag (vgl. *W. Wundt*²⁾). Es braucht nicht besonders hervorgehoben zu werden, daß die Ergebnisse auf dem «Drachenkopf» auch für die Aufstellung der Bilanz des Wasserhaushaltes einer Hochgebirgslandschaft von großem Werte sind, denn es gibt auch in hohen Lagen Bezirke, deren Verhältnisse denjenigen der Umgebung von Berlin (zu der Eberswalde gehört) ähnlich sind. Ich denke dabei an allmählich abfallende Flußtäler, wie die Landschaft Davos, die Melchseealp usw., wo sicherlich die Vegetation aus dem Grund- und Haftwasser des Bodens viel Feuchtigkeit aufnimmt und wieder an die Luft zurückgibt. Unter allen Umständen muß in Zukunft, auch für das Gebirge, dem Einfluß der Höhenlage des Grundwasserspiegels

¹⁾ *Friedrich W.*: Messungen der Verdunstung vom Erdboden. Sonderdruck aus «Deutsche Forschung». Aus der Arbeit der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft. Abgeschlossen im November 1932.

²⁾ *Wundt W.*: Das Bild des Wasserkreislaufs auf Grund früherer und neuer Forschungen. Mitteil. d. Reichsverbandes d. Deutschen Wasserwirtschaft E. V., Berlin-Steglitz, Nr. 44, 1938.

auf das Maß der Transpiration womöglich in vermehrtem Maße nachgegangen und Rechnung getragen werden.¹⁾

Ich komme noch kurz auf die Werte der Tabelle 2 zurück. Auffallend erscheint mir dabei die relative Übereinstimmung der Hundertstels-Monatswerte von *Friedrich* mit den Werten der *Wilds*chen Waage (Spalten 6 und 7), die, allerdings, in den Summenwerten für Winter und Sommer, aus natürlichen Gründen, nicht mehr so ausgeprägt in Erscheinung treten. Ich bin ein Freund der *Wilds*chen Waage und möchte sie bei keiner Untersuchung missen, sie hat mir zum bessern Verständnis des Verdunstungsvorganges bei freien Wasserflächen manchen wertvollen Dienst geleistet. Wir bringen unsere Schalen stets in gutventilierten, meteorologischen Hütten von *genau gleicher Konstruktion und Größe* unter und haben damit gute Erfahrungen gemacht. Ueber unsere Vergleichsversuche, ausgeführt mit dieser Schale in freier, wie geschützter Lage und auf ungleichen Höhen, orientiert meine Arbeit «Ueber die Verdunstungsgröße freier Wasserflächen im Schweizer Hochgebirge».²⁾ Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen deutlich, wie notwendig es ist, für solche Vergleichsversuche meteorologische Hütten von einheitlicher Konstruktion zu verwenden.

B. Wasserverbrauch der Pflanzen.

Die Pflanzenwelt spielt im Wasserhaushalt eines Flußgebietes bekanntlich eine bedeutende Rolle. Der Wasserverbrauch der Vegetation zur Herstellung und Erhaltung ihrer Substanz, sowie zur Abwicklung ihres Lebensvorganges, steht namentlich mit der Beschaffenheit des Bodens und dem Klima im Zusammenhang. Er ist im Sommer sehr groß, im Winter sehr klein; bei Tag bedeutender als bei Nacht.

Mit zunehmender Höhenlage und Vergletscherung eines Gebietes und folglich abnehmender Vegetationsfläche und Vegetationszeit (zunehmende Dauer der Pflanzenruhe) sinkt in der Regel auch die Verbrauchsmenge von Wasser, so daß für das Hochgebirge keine so erheblichen Werte zu erwarten sind.³⁾

Die Wasserbewegung durch die Pflanze hindurch darf als ein einheitlicher Vorgang, als eine Folge der mindestens zeitweise bestehenden Potenzialdifferenz zwischen dem mehr oder weniger vollkommen gesättigten *Boden* und der freien *Luft* mit ihrem meist bedeutenden Sättigungsdefizit betrachtet werden. Zwischen Boden und Luft schiebt sich die Pflanze ein. Sie liefert nicht selbst, oder nur in einem bescheidenen Maße die zur Wasserbewegung notwendige Energie, sie benutzt vielmehr die bestehende Spannungsdifferenz und veranlaßt das Wasser nur dadurch, daß sie ihm günstige Bewegungsmöglichkeiten schafft, den Weg durch ihr Gewebe zu nehmen (*Gradmann*).

Es ist klar und bedarf keiner weitem Begründung, daß der Entstehung und dem Wachstum der Pflanzen ein Anreicherungsverfahren zugrunde liegen muß, wobei nicht vergessen werden darf, daß es eine ganze Reihe von Vorgängen gibt, die An-

¹⁾ Im Gebirge kommt, der Vielgestaltigkeit seiner Oberfläche wegen, dem Grundwasser im Wasserhaushalt einer Landschaft eine ganz andere Bedeutung zu als im Tieflande.

²⁾ Denkschriften der Schweiz. Naturforschenden Gesellschaft, Bd. LXXVI, Abh. 2, Zürich 1946.

³⁾ Im langen Hochgebirgswinter liegt die Vegetationsdecke wohlgeborgen unter der schützenden Schneehülle. Auch aus diesem Grunde dürfte dem Wasserverbrauch der Pflanzen eine geringere Bedeutung zufallen.

reicherungen hervorrufen. Es ist nicht ausgeschlossen, daß unter dem Zufluß gelöster Stoffe und der Verdunstung an der Oberfläche eines kapillaren Mediums die Gebilde der Pflanzenwelt in ihrer Entstehung ursächlich bedingt sind. Jedenfalls kommt der Pflanzenwelt als Verbindungsglied zwischen Boden und Luft auch in hydrologischer Beziehung große Bedeutung zu. Daß bei diesem Vorgang auch der Boden- und Luftchemie eine Rolle zufällt, versteht sich von selbst.

Bei der Betrachtung dieser Vorgänge kommt man unwillkürlich auf die Frage, welche Bedeutung denn eigentlich der *Transpiration* zufällt. Hierüber folgendes:

Im Bereich unseres Hochgebirgsklimas entfällt der Prozeß der Transpiration fast ausschließlich auf die Sommerszeit. Es wird daher der Gang des jährlichen Verlustes in der Wasserbilanz um so eher von der Vegetationsdecke beeinflusst, je ausgedehnter und dichter diese ist und je markanter die Zeit der Pflanzenruhe hervortritt. Wie groß dieser Einfluß ist, läßt sich nur sehr schwer ermitteln. Dazu braucht es Grundlagen und Belege allererster Güte, die zu liefern nur eigens dazu geschaffene Versuchsanstalten und Naturlaboratorien imstande sind. Mangels dieser nötigen Unterlagen wird der Einfluß der Pflanzendecke meistens mit dem im gleichen Sinne wirkenden Einfluß des Bodens summarisch behandelt.

In unsern Untersuchungen über Niederschlag, Abfluß und Verdunstung ist die pflanzliche Transpiration in die Verdunstung einbezogen. Auf dieses Thema soll hier nicht näher eingetreten werden, es genügt daran zu erinnern, daß die Lösung dieses Problems Untersuchungen verlangt, die sich nicht nur auf einzelne Individuen und Pflanzenarten beschränken, sondern die Forschung muß auch den Wasserhaushalt größerer Gebiete mit verschiedenartigem Pflanzenbewuchs zum Gegenstand ihrer Untersuchung machen. Was bis anhin auf dem Versuchswege zur Klarstellung des vorliegenden Fragenkomplexes geleistet wurde, darüber geben die folgenden Ausführungen wenigstens einige Anhaltspunkte.

Es ist höchstes Erfordernis, daß sich auch der Hydrologe mit den Lebensvorgängen der Pflanzenwelt, wenigstens den wasserhaushaltbestimmenden, eingehender beschäftigt. Es liegt im Wesen der Hydrologie, daß sie schon zur Durchführung einer orientierenden Analyse ihrer Forschungsgebiete auf Hilfe und Mitarbeit anderer naturwissenschaftlicher Fakultäten angewiesen ist. Nur durch Niederreißen dieser Schranken, durch die sich die Gewässerkunde mit einer geradezu sträflichen Hartnäckigkeit von den ihr nahe verwandten wissenschaftlichen Gebieten abzuschließen versucht, läßt neue und freiere Ausblicke in weitere Fernen aufkommen.

Eine Zusammenstellung früherer Untersuchungen über den Wasserverbrauch der Pflanzen hat *P. Vageler*¹⁾ herausgegeben. Meist wird festgestellt, wieviel Gramm Wasser notwendig sind, um 1 g Trockensubstanz hervorzubringen. Im Klima Mitteleuropas untersucht man, welche Stoffmenge mit der auf 1 km² entfallenden Niederschlagsmenge produziert werden kann. Zu diesem Zweck bestimmt man die Durchschnittserzeugung der einzelnen Gewächse (Gesamtertrag geteilt durch die Anbaufläche), d. h. die Menge Trockensubstanz pro km². Diese Zahl, multipliziert mit der für die Gewichtseinheit erforderlichen Wassermenge, gibt den *Transpirationsbetrag*, also jene Menge, die bei der betreffenden Pflanze auf die Flächeneinheit verbraucht oder ausgeatmet wird. Die geringe Menge Feuchtigkeit, die zum Aufbau der Pflanze selbst

¹⁾ *Vageler P.*: Der Kationen- und Wasserhaushalt des Mineralbodens. Berlin 1932.

dient, ist darin eingeschlossen, da sie beim Verdorren der Pflanze selbst der Verdunstung anheimfällt.¹⁾

Im Anschluß an die Arbeiten von *P. Vageler, Schoenefeldt* und *Allen*²⁾ veröffentlicht *W. Wundt* für die wichtigsten Kulturgewächse, nach Flächen und Erträgen des Jahres 1932, folgende Tabelle.

Tabelle 3

Pflanzenart	1 Fläche (km ²)	2 Gesamt- ertrag (10 ⁶ kg)	3 (= 2 : 1) Erzeugung pro km ² (10 ⁶ kg)	4 Liter Wasser pro kg Trockensubstanz	5 (= 3 × 4) Transpirationshöhe in mm pro Vegetationsperiode
Grasflächen (einschließl. Weiden)	81 550	31 710	0,389	471—699	184—272 Mittel 228
Kleegewächse	20 620	9 950	0,482	403—514	194—248 Mittel 221
Roggen, Weizen, Gerste	82 970	37 860—44 400	0,456—0,535	289—520	132—278 Mittel 205
Mais und Hafer	36 510	15 410—17 820	0,432—0,488	142—315	60—154 Mittel 107
Hackfrüchte (Kartoffeln, Rüben)	42 590	22 930—23 890	0,539—0,561	298—314	162—176 Mittel 169
Laubwald	36 000	9 620	0,268	600	161 *)
Nadelwald	90 000	21 420	0,238	700	167 *)

*) Die Werte für den Wald beruhen nur auf einer äußerst vagen Schätzung. Infolge der sommerlich hohen Oberflächenverdunstung im ganzen, darf wohl mit einer Laubverdunstung von *mindestens 200 mm* gerechnet werden. Das „Geological Survey Water-Supply, ed. U. S. A., Department of the Interior“³⁾ gelangt nach eigenen Untersuchungen zu folgenden Ausatmungs-Normalwerten pro Saison: Gras, Halm- und sonstige Feldfrüchte 229 mm, Laubbäume 204—305 mm, immergrüne Bäume 102 mm, niedrige Bäume und Buschwerk 153 mm.

Im Mittelwert ergibt sich also für die Transpiration ein Wasserbedarf von rund 200 mm, wobei zu bemerken ist, daß die Schwankungen recht erheblich sind (vgl. Tab. 3). Die Werte der Spalt 5 in Tabelle 3 stellen nur jene Wassermenge dar, die durch die Pflanze hindurchgeht, ohne die, die an ihrer Oberfläche verdunstet; die geringe Transpiration im Winter ist darin nicht mitenthalten.

Auch die vorliegenden Ausführungen über die Transpiration weisen untrüglich darauf hin, daß mit zunehmender Höhenlage die Landesverdunstung, in der Regel, abnehmen muß.

Die überaus verdankenswerten Forschungsarbeiten auf dem «*Drachenkopf*» in *Eberswalde*, deren Kontinuität sichergestellt ist, sind geeignet, noch viel Licht auf diese schwer lösbaren Probleme zu werfen. Leider stehen die erzielten Ergebnisse erst am Anfang einer langen Reihe von Beobachtungen und berechtigen deshalb noch nicht zu weitgehenden allgemeinen Schlußfolgerungen. Sie zeigen immerhin eindrucksvoll, welche Bedeutung der Kenntnis der Vorgänge in der Pflanzenwelt für das Verstehen des Wesens der Landesverdunstung zukommt.

¹⁾ *Wundt W.*: Pflanzenbedeckung und Wasserkreislauf. Der Kulturtechniker, 42. Jahrg., Juli/August 1939, Heft Nr. 7/8, S. 195—206, Berlin 1939.

²⁾ *Schoenefeldt O.* und *Allen F.*: Die Bedeutung von Technik und Bodenkunde für die deutsche Wasserwirtschaft. Angewandte Chemie, 48, 1935.

³⁾ Paper 772: Rainfall and run-off in USA., 1936.

Paper 771: Floods in USA., 1936.

Paper 680: Droughts of 1930—1934, 1936.

Für das Hochgebirge dürfte, nach vorliegenden Tabellenwerten gefühlsmäßig beurteilt, vielleicht mit einem Transpirationsbetrag von 80—120 mm gerechnet werden. Es wäre dies immerhin noch ein respektabler Teil des gesamten Jahresniederschlages, der für die Lebensvorgänge der Vegetationsdecke notwendig ist.

C. Saugkraft der Alpen- und Ebenenpflanzen.

Wichtig für unsere Untersuchungen sind die Ergebnisse von Versuchen, die Prof. G. Senn in Basel (280 m ü. M.) und auf Muottas Muraigl im Engadin (2450 m ü. M.) mit bewurzelten Individuen von Alpen- und Ebenenpflanzen unternommen hat.¹⁾ Sie zeigen, daß die Menge des transpirierten Wassers bei *Saxifraga aizoon* (Immergrüner Steinbrech), *Alchemilla vulgaris* ssp. *coriacea* var. *straminea* (Taumantel) und *Sempervivum montanum* (Hauswurz), auf den Tag und die Stunde gemessen, geringer ist, als für Ebenenindividuen von *Hieracium pilosella* (Behaartes Habichtskraut). Nur bei Temperaturen unter 0° transpiriert *Alchemilla* stärker als *Hieracium*. Andere untersuchte Alpenpflanzen, wie *Ranunculus glacialis*, *Primula integrifolia*, *Soldanella pusilla*, *Arnica montana*, *Homogyne alpina*, *Chrysanthemum alpinum*, *Hieracium pilosella* (alpiner Provenienz) und *Bellis perennis* (alpiner Provenienz) zeigen bei niedriger Temperatur (unter +6° C) und bei starker Sonnenstrahlung (über 20° C aktinometrischer Differenz) stärkere Transpiration als die Vergleichspflanze *Hieracium pilosella* aus der Ebene. Letztere ist dagegen den Alpenpflanzen überlegen, wenn die Temperatur höher, die Sonnenstrahlung aber schwächer ist. Bei mittleren Lufttemperaturen und Strahlungsverhältnissen fördern, je nach Spezies abwechselnd, sowohl stärkere Sonnenstrahlung (*Ranunculus*) als auch höhere Lufttemperatur (*Bellis alpin*) die Transpiration der Alpenpflanzen.

Die wenigen bisher unternommenen Versuche über die Saugkraft von Alpen- und Talpflanzen haben ergeben, daß alpine Individuen von *Hieracium pilosella* und *Bellis perennis* dem Boden mehr Wasser zu entziehen vermögen als Individuen aus der Ebene. Trotzdem können von den untersuchten Alpenpflanzen nur *Saxifraga*, *Alchemilla* und *Sempervivum* als schwach transpirierende Xerophyten (Trockenheitspflanzen) bezeichnet werden, während die übrigen Mesophyten sind, die, entsprechend ihrer zeitweilig sehr starken Transpiration, dem Boden relativ größere Mengen Wasser zu entziehen vermögen.

Obigen vorläufigen Ausführungen von Prof. Senn füge ich noch die wichtige Schlußfolgerung von Prof. Senn bei, die ich seiner brieflichen Mitteilung vom 23. November 1942 verdanke, wonach «die äußern Einflüsse auf die Intensität der Transpiration von auffallend geringer Wirkung sind, gegenüber der einmaligen Wirkung des Ueberganges von Dunkelheit zu Licht bei Sonnenaufgang».

Die Untersuchungen von Prof. Senn lassen also erkennen, daß die Stundenwerte der Transpiration zu den gleichzeitig festgestellten Außenfaktoren *Temperatur*, *Feuchtigkeit*, *Strahlung* und *Wind* nicht in deutlichen Beziehungen stehen. Es erhob sich deshalb die Frage, wie die Transpiration unter weniger komplexen Bedingungen verlaufe, als sie in der freien Natur vorhanden sind.

¹⁾ Senn G.: Die Transpiration einiger Alpen- und Ebenenpflanzen. Verhandlg. der Schweiz. Naturforschenden Gesellsch., Bern 1922. II. Teil, S. 235—236.

D. Die Reaktion der Pflanzen auf den Uebergang von Dunkelheit zu Licht.

*Josef Lachenmeier*¹⁾ führte im *Basler Botanischen Institut* unter Führung von Prof. *Senn* solche Untersuchungen durch. Ziel: Feststellung der Reaktionen, die auf *einmaligen* Uebergang von Dunkelheit zu Licht zurückzuführen sind. Die Ergebnisse solcher Untersuchungen lassen alsdann erkennen, welche Reaktionen, die am natürlichen Standort beobachtet werden, durch den Uebergang von Dunkelheit zu Licht und welche etwa durch andere Einflüsse ausgelöst werden. *Lachenmeier* hat auch dafür gesorgt, daß die Pflanzen sowohl während der dem eigentlichen Versuch vorausgehenden Dunkelperiode, als auch nach der plötzlich einsetzenden Belichtung, unter besten und möglichst konstanten Bedingungen gehalten wurden, so daß der Einfluß allein des Uebergangs von Dunkelheit zu Licht möglichst getrennt beobachtet werden konnte. Wichtig für die Hydrologie ist nun, daß *Lachenmeier* sowohl über die von der Pflanze durch Transpiration bedingte *Abgabe* von Wasser orientiert sein wollte, als gleichzeitig auch über die Aufnahme von Wasser durch die Wurzeln. Dadurch erhält die ganze Studie ein gewässerkundliches Gepräge: sie weist auf den Weg hin, der in der Verdunstungsfrage zum Ziele führt, zugleich unterstreicht sie den Wert von Laboratoriumsversuchen.

Abgabe und Aufnahme von Wasser wurden stündlich gemessen. Als Versuchspflanzen wurden zu den Transpirationmessungen *Veronica Beccabunga* und *Hieracium Pilosella* verwendet. Beide Pflanzen wachsen mit Vorliebe an sonnigen Standorten. Während sich aber *Hieracium* an trockenen Plätzen findet, wuchert *Veronica* meist in niedrigem Wasser, in offenen Gräben und Bächen. Zu den Versuchen über die Absorption (Aufsaugen) von Wasser wurde als zweite Sumpfpflanze auch *Myosotis palustris* verwendet.

Das von *Lachenmeier* verwendete *Potometer* besteht aus einem mit Wasser gefüllten Gefäß, in dessen obere Oeffnung die zu untersuchende Pflanze und ein Thermometer eingedichtet werden. Mit diesem Gefäß kommuniziert eine seitlich angebrachte, graduierte Kapillarröhre, an welcher die Wasseraufnahme durch die Pflanze abgelesen werden kann.

Ergebnisse.

1. *Bei Messung der Transpiration allein* ergab sich für intakte Pflanzen — bei konstanter Temperatur und Luftfeuchtigkeit —, die nach einer vorausgehenden Dunkelperiode einer konstanten Lichtintensität ausgesetzt wurden, folgendes:
 - a) Der Verlauf der Transpiration ist unter den genannten Bedingungen für *Veronica Beccabunga* und *Hieracium Pilosella* *grundsätzlich verschieden*.
 - b) Bei plötzlich einsetzender und konstant bleibender Belichtung steigt die Transpiration von *Veronica Beccabunga* während mehrerer (3—5) Stunden langsam bis zu einem Höchstbetrag an, auf dem sie sich dann längere Zeit (bis zu 13 Stunden) konstant erhält.
 - c) Unter den gleichen Bedingungen schnellt die Transpiration von *Hieracium* in *einer* Stunde auf ein Maximum und fällt dann unter mehrmaligem Schwanken langsam ab.
2. *Bei der Messung von Transpiration und Absorption zugleich* ergaben sich für *Veronica Beccabunga* und *Myosotis palustris* folgende Verhältnisse:
 - a) Die Wasseraufnahme ist vor allem im Dunkeln, aber auch bei Belichtung, größer als die Transpiration.

¹⁾ *Lachenmeier Josef*: Transpiration und Wasserabsorption intakter Pflanzen nach vorausgegangener Verdunkelung bei Konstanz der Lichtintensität und der übrigen Außenfaktoren, Sonderabdr. aus den Jahrbüchern für wissenschaftl. Botanik 1932. Bd. LXXVI, Heft 5, Leipzig 1932.

b) Bei plötzlich einsetzender Belichtung steigt die Transpiration in der ersten Stunde viel rascher an als die Wasseraufnahme, so daß die Transpiration überwiegt. Im Verlauf der nächsten Stunden übersteigt die Absorption allmählich wieder die Transpiration.

3. Bei Vertauschung des Wurzelsubstrats (Nährboden) der Bodenpflanze *Hieracium Pilosella* mit dem der Sumpfpflanze *Veronica Beccabunga* konnten folgende Tatsachen festgestellt werden:

a) Wird *Veronica Beccabunga* in relativ trockenem Boden (20 % Wassergehalt), *Hieracium Pilosella* dagegen in flüssigem Substrat (Knopscher Nährlösung) kultiviert und untersucht, so bleibt der Anstieg der Transpirationskurven zum Maximum unverändert, d. h., er zieht sich bei *Veronica* über mehrere Stunden hin, bei *Hieracium* ist er steil und dauert nur eine Stunde.

b) Nach Erreichung des Maximums aber zeigt *Veronica Beccabunga*, wie sonst *Hieracium*, einen Abfall seiner Transpirationskurve, und *Hieracium*, wie sonst *Veronica Beccabunga*, ein konstantes Verharren auf der gleichen Höhe. Die erste Phase, vor Erreichung des Maximums, bleibt somit durch Aenderung des Substrats unbeeinflußt, während für die zweite Phase, nach Erreichung des Maximums, zwischen beiden Pflanzen eine reziproke Divergenz eintritt.

Zur weitem Charakterisierung des Wasserhaushaltes der Pflanzenwelt verwendete *Lachenmeier* den von *Vesque*¹⁾ eingeführten Quotienten $\frac{\text{Transpiration}}{\text{Absorption}}$ ²⁾. Dabei gelangte er zu folgenden, für das Verständnis des Wesens der Verdunstung von Gebirgslandschaften wertvollen Ergebnissen: Je nach der Größe dieses Transpirationsquotienten über, gleich oder unter 1, besteht Unterbilanz, Bilanzgleichgewicht oder Ueberbilanz. Wenn eine Pflanze sich an einem Standort soll halten können, muß sie imstande sein, auf längere Zeiträume Ueberbilanz zu erzwingen, wenigstens für die Zeit, die sie zum Wachstum braucht. Diese Feststellung ist so selbstverständlich, daß sie eines Beweises nicht bedarf; denn das Wasser, das einen beträchtlichen Anteil am Frischgewicht hat, muß doch einmal aufgenommen worden sein, ohne daß es sogleich wieder abgegeben wurde. Die verschiedenen Lebensperioden kann man rein schematisch nach dem Transpirationsquotienten charakterisieren:

Ueberbilanz (auf längere Dauer) während der Periode des Wachstums und starker CO₂-Assimilation;

Gleichgewicht der Bilanz = Periode relativer Stabilität nach Abschluß des Hauptwachstums;

Unterbilanz = Periode des inaktiven Lebens oder des Absterbens.

Ueber weitere Ergebnisse sei auf die Schrift von *Josef Lachenmeier* selbst hingewiesen.

Die Ergebnisse von Prof. *G. Senn* und Dr. *J. Lachenmeier* sind für das Verständnis des Transpirations- und Absorptionsverlaufes der Alpenpflanzen und damit auch für das Verstehen des Wesens der Landesverdunstung von so großem Wert, daß ich mich verpflichtet fühlte, hier darauf einzutreten. Prof. *G. Senn* vermutet, daß die Ergebnisse *J. Lachenmeiers* nur auf niedere Pflanzenarten, nicht aber auf Sträucher, Bäume, Waldungen u. dgl. übertragen werden dürfen.

Wie wir gesehen haben, stützen sich diese Erfolge teils auf Untersuchungen in der Natur selbst, teils auf Laboratoriumsversuche. Nach meinem Dafürhalten können

¹⁾ *Vesque*: L'absorption comparée directement à la transpiration. Annales des Sciences nat., Bot., tome VI, p. 212, 1878.

²⁾ *Montfort*: Die Wasserbilanz in Nährlösung, Salzlösung und Hochmoorwasser. Zeitschrift f. Botanik, 14, 1922, S. 97.

auf letztere *Art nur Relativwerte*, nicht aber Resultate gewonnen werden, deren Größen ohne weiteres auf die Vorgänge in der Natur übertragen werden dürfen. Aber auch die Ergebnisse von Untersuchungen nur einzelner pflanzlicher Individuen in der Natur selbst, dürfen, sobald es sich um die Klarstellung der Frage des Bodens und der Vegetation im Wasserhaushalt des Hochgebirges handelt, nicht verallgemeinert werden. Die Forschung muß erst größere, bewachsene und unbewachsene Areale (Wald, Wiesen, Weiden usw.) zum Gegenstand der Untersuchung machen, um zu Resultaten zu gelangen, die wirklich den in der Natur sich abspielenden Vorgängen entsprechen. Wohl der erfolgreichste Weg dürfte sein, vom Kleinen ins Große zu gehen: erst Klärung bestimmter Fragen mittels Experimenten in Laboratorien, dann Versuche in freier Natur.

Ebenfalls wegleitend für dieselbe Frage sind die Untersuchungen von Dr. *E. Heß*, eidg. Forstinspektor in Bern.¹⁾ Dieser erfahrene Forstgelehrte hat den Nachweis erbracht, daß die Verbreitung und das Wachstum gewisser Nadelhölzer, wie z. B. der Lärche, nicht mit der Niederschlagsmenge (die Lärche gedeiht bei mittleren Jahresniederschlägen zwischen 600 und 2000 mm) und der Exposition (man findet sie in Nord- wie in Südlagen in bester Entwicklung) im Einklang stehen, sondern, daß ihr Gedeihen namentlich vom Feuchtigkeitsgehalt der Luft abzuhängen scheint. Daß dabei auch der Nebelhäufigkeit, wie der Anzahl klarer Tage, eine Rolle zufällt, bedarf wohl keiner nähern Erläuterung.

Es steht heute fest, daß die Pflanzenwelt bei bestimmter Temperatur und Feuchtigkeit nur eine gewisse Menge Wasser aus dem Boden aufzunehmen vermag; ein Teil davon fällt der Transpiration anheim. Diese Mengen gehen mit dem Herabsinken der Temperatur naturgemäß zurück, die Transpiration wird, zweifellos, kleiner. Solche Vorgänge tragen zum Stillstand des Baumwachses bei. Trotz reichlichen Wasservorräten verkümmern Bäume und Sträucher und nehmen Zwergformen an; die Vegetation wird immer spärlicher. Das Walten der Naturgesetze kommt bei zunehmender Höhe immer krasser zum Ausdruck.

Hydrologisch bedeutsam ist ferner das ungleiche Wasserspeicherungsvermögen gewisser Nadelhölzer. Arten mit hohen Splinten²⁾ vermögen viel Wasser aufzunehmen, weisen also ein großes Retentionsvermögen auf. In den Nässeperioden wird nach Möglichkeit Wasser aufgespeichert, während der Trockenzeit — wieder äußerst sparsam abgegeben. Daß bei der Abgabe an die Luft pro Zeiteinheit (z. B. auf den Tag) die Transpiration nur in geringerm Maße beteiligt ist, glaube ich annehmen zu dürfen.³⁾ Von den Forstgelehrten wird der große Splint gewisser Nadelhölzer (wie z. B. der grauen Föhre), die also viel Wasser aufzuspeichern vermögen, als Anpassung an trockene Standorte gedeutet.

¹⁾ *Heß E.*: Die Waldungen des Kantons Wallis. Société Helvétique des Sciences nat., 122^e Session annuelle, Sion 1942; und

Heß E.: Die autochthonen Föhrenrassen des Wallis. Schweiz. Zeitschr. f. d. Forstwesen, Nr. 1, Jahrg. 1942.

Heß E.: Etude sur la répartition du mélèze en Suisse. Beiheft zur Zeitschr. d. Schweiz. Forstvereins Nr. 20/1942, Bern 1942.

²⁾ Aeußeres Holz, das noch lebende Zellen enthält, im Gegensatz zum Kernholz mit toten Zellen.

³⁾ Dabei kommt natürlich den meteorologischen Verhältnissen im Zeitraum zwischen Wasseraufnahme und -abgabe große Bedeutung zu.

Aus vorstehenden kurzen Ausführungen darf wohl der Schluß gezogen werden, daß, wie der Boden, so auch die Pflanzenwelt, einen ausgleichenden Einfluß auf den Wasserabfluß auszuüben vermag.

Auch der Pflanzenwelt wohnt im Wasserhaushalt des Hochgebirges eine unermessliche Mannigfaltigkeit inne, die wiederum ein Grund mehr dafür sein dürfte, daß die Landesverdunstung im langjährigen Mittelwert einen halbinvarianten Charakter erhält und mit zunehmender Höhe auch leicht abnimmt.

Ich möchte schon an dieser Stelle, und zwar mit allem Nachdruck, darauf hinweisen, daß die Bedeutung des Wasserverbrauches durch die Pflanzenwelt für die Beziehung zwischen Niederschlag und Abfluß in der Regel überschätzt wird. Sicher verbrauchen die Pflanzen Wasser. Daß diesem Umstand aber, wohlverstanden auf langjährige Mittelwerte bezogen, kein außergewöhnliches Gewicht zufällt, dafür sind, wie wir später sehen werden, die Hauptergebnisse unserer Untersuchungen überzeugende Belege.

E. Schluß.

Mit vorstehendem habe ich einige wenige Fragen der Beziehungen zwischen Niederschlag, Vegetation, Boden, Versickerung und Verdunstung berührt, um dem Leser einen Einblick in das Zusammenwirken der natürlichen Kräfte zu ermöglichen, die den Wasserhaushalt des Bodens bestimmen. Man ersieht aus alledem, daß das Problem «Boden und Vegetation» im Wasserhaushalt des Hochgebirges durch diese Versuche erst angeschnitten und noch in keiner Weise gelöst ist.

Wenn es mir gelungen ist, zu zeigen, wie mannigfaltig sich diese Zusammenhänge zu gestalten vermögen, welcher Reichtum an Erscheinungen in diesen Zusammenhängen liegt, wieviel noch fehlt, bis Klarheit in diese Materie gebracht ist und wie notwendig es ist, daß sich auch die *Gewässerkunde* mit solchen Problemen beschäftigt, dann haben die obigen kurzen Ausführungen ihren Zweck erfüllt.

Die Vegetation, der Boden und der Wasserhaushalt in der obersten Bodenschicht des Einzugsgebietes der Baye de Montreux.

(Verfaßt 1939.)

Von Hans Burger.

Einleitung.

Herr Dr. *O. Lütshg* hat die Forstliche Versuchsanstalt ersucht, als Beitrag zur Abklärung des Wasserhaushaltes des Einzugsgebietes der Baye de Montreux zu versuchen, alljährlich auf Ende September die Wasserspeicherung des Bodens festzustellen. Es war dagegen nicht unsere Aufgabe, Vegetationsstudien und allgemeine Bodenuntersuchungen auszuführen. Der Einfluß der Verwitterungsbodenschicht auf den Wasserhaushalt läßt sich aber nicht darstellen ohne eine allgemeine Berücksichtigung der vorhandenen Bodentypen und Bodenarten und der Vegetation des Einzugsgebietes.

Wir haben Herrn Dr. *O. Lütshg* schon vor Beginn unserer Untersuchungen auf die Schwierigkeiten des Auftrages aufmerksam gemacht und hoffen, daß unsere Ergebnisse keine allzu große Enttäuschung bereiten werden.

Die meisten Erhebungen, auf die sich die folgenden Ausführungen stützen, sind nach vielfachen Beratungen mit dem Verfasser durch den Kanzlisten *E. Casparis* unserer Anstalt durchgeführt worden, dem für Mühe und Gewissenhaftigkeit der beste Dank ausgesprochen sei.

A. Die Vegetation.

Da die neuen Uebersichtspläne noch nicht vorliegen, haben wir durch Planimetrierung der topographischen Karte 1 : 25 000 folgende Uebersichtszahlen erhalten:

Verteilung von Wald und Freiland.

Tabelle 4

Einzugsgebiet	Vor der Aufforstung			Auf- forstung	Nach der Aufforstung		
	Gesamt- fläche	Frei- land	Wald		Frei- land	Wald	Wald- zunahme
	ha	%	%	ha	%	%	%
Les Pontets bis Brücke .	225	44	56	0	44	56	0
Les Verraux bis Jor . .	145	88	12	128	0	100	88
Les Pontets u. Les Verraux	370	62	38	128	27	73	35
Pont Bridel	690	55	45	181	29	71	26
Gorges du Chauderon .	1380	57	43	181	44	56	13

Das ganze Einzugsgebiet bis zur untersten Linnigraphenstation in den Gorges du Chauderon besitzt demnach eine Fläche von 13,8 km², wovon 43 % mit Wald bedeckt sind, 57 % aber mit Weiden, Wiesen und wenig Ackerland. Die heutige Verteilung der Kulturarten, die in den einzelnen Teilgebieten sehr verschieden ist (beträgt doch im Chessy-Les Pontets-Gebiet der Waldanteil 56 %, in den Verraux bis Jor dagegen nur 12 %), ist fast ausschließlich durch den Menschen bedingt.

1. Die Wälder.

Ohne die Tätigkeit der Menschen wäre das ganze Einzugsgebiet überall bis an die Wasserscheiden hinauf mit Wäldern bedeckt, mit vorwiegend Laubholzwäldern im untern Teil, mit Laubholz-Tannen-Fichtenwäldern in mittlern Höhenlagen und ausgedehnten reinen Fichtenbeständen in den obersten Lagen. Die da und dort vorkommenden Erlen-Weidenbuschbestände spielen keine bedeutende Rolle.

Im allgemeinen sind immer die steileren Grabeneinhänge und die flachgründigen Böden noch bewaldet, die ebeneren Rücken, die meistens zugleich auf Moränenunterlage liegen, aber für landwirtschaftliche Zwecke gerodet worden. Eine Ausnahme von dieser allgemeinen Regel machen wahrscheinlich die sehr steilen obern Hänge von der Dent de Merdasson bis zum Cape au Moine. Einzelbäume, Baumgruppen und Waldzungen deuten heute noch darauf hin, daß auch diese Hänge in der Vorzeit einmal weitgehend oder ganz bewaldet gewesen sind. Vielleicht wurde durch zu intensive Beweidung der Wald verlichtet und nachträglich durch Lawinen zerstört. Vielleicht haben auch unvorsichtige Holzschläge zum gleichen Ergebnis geführt. Möglicherweise sind auch kleine Flächen unterhalb der Felsen des Cape au Moine, des Corbex, der Crête des Verraux und der Dent de Jaman schon ursprünglich durch kleinere Schneerutsche und Lawinen waldfrei gehalten worden.

Ein schönes Beispiel eines durch Weidebetrieb verlichteten und später durch Lawinen durchbrochenen und zerrissenen Waldes zeigen die Gebiete Les Lanches westlich der Dent de Jaman. Typischen, aufgelösten Weidewald findet man hauptsächlich auf der Alp Soladier, aber auch an andern Orten.

Der Wald, der z. T. im Besitz von Privaten ist, z. T. den Gemeinden Châtelard und Les Planches gehört, ist nicht überall gleichwertig. Während geschlossene Wälder in tiefer und mittlerer Höhenlage und besonders auf Moränenböden gesund aussehen und sich leicht verjüngen, bietet die Verjüngung der reinen Fichtenbestände der Hochlagen, z. B. auf dem Höhenzug vom Plan du Pelet bis zum Molard, erhebliche Schwierigkeiten, weil sich zufolge des stark humiden Klimas und des vorhandenen sauren Fichtenhumus der Boden verschlechterte.

Die Wirkung des Waldes auf Oberflächenabfluß und Versickerung der Niederschläge ist sehr verschieden, je nach dem Bodenzustand, der bedingt ist durch Ortsklima und geologische Unterlage, durch die Waldweide und die Waldbehandlung. Eine Gesundung der Waldverhältnisse und insbesondere des Bodens kann erfolgen durch die zukünftige Begünstigung und Vermehrung der Laubhölzer von der Buche bis zu den sogenannten Hilfsholzarten.

2. Das Freiland.

Das landwirtschaftlich benutzte Gebiet wird vorwiegend beweidet; eine beachtenswerte Fläche nehmen noch die Fett- und Magerwiesen ein, während von Ackerbau kaum gesprochen werden kann. Besondere Erwähnung verdienen die großen, kahlen, sehr steilen Flächen der Verraux vom Col de Jaman bis zum Cape au Moine, die nur teilweise beweidet, in der Hauptsache aber bis 1930 als Magerwiesen benutzt worden sind.

Der Einfluß des landwirtschaftlich benutzten Gebietes auf den Wasserhaushalt des Oberbodens ist sehr verschieden, je nachdem es sich um stark bestoßene Weide, um Magerwiesen,

Fettwiesen oder um Ackerland handelt. Wir werden später darauf zurückkommen, auch auf Bodenveränderungen, die sich infolge Vegetationswechsels innerhalb verhältnismäßig kurzer Zeit vollzogen haben.

B. Der Boden.

Unsere Ausführungen müssen sich hier auf eine ganz kurze Darstellung der Bodentypen und Bodenarten beschränken, während die Ergebnisse der Untersuchungen der physikalischen Eigenschaften der Böden etwas ausführlicher auseinandergesetzt werden.

1. Die Bodentypen und Bodenarten.

Die Bodenbildung ist bekanntlich bedingt in erster Linie durch das Klima, dann durch die geologische Unterlage, die Bodengestalt und die Vegetation.

Die Böden des Einzugsgebietes der Baye de Montreux sind im untern Teil und bis gegen 12—1300 m Meereshöhe hinauf *Braunerden*. Die Grenze der beginnenden Auslaugung der obern Bodenschichten, also der Podsolierung, liegt bald höher, bald etwas tiefer, je nachdem verhältnismäßig saure Moränen oder Kalk die Unterlage bilden und je nach der Holzartenzusammensetzung. Der Freilandboden ist immer weniger podsoliert als der Waldboden, weil das Klima unter Waldbestand bei tieferer Temperatur und höherer Luftfeuchtigkeit immer humider ist als im Freiland.

Von etwa 1400 m Meereshöhe an nimmt die Degradation des Bodens rasch zu. Auf den Gräten und namentlich unter reinen Fichtenbeständen findet man ausgesprochene *Podsole*, mit Bleicherdeschichten von 10—20 cm, wie sie schon *Heß* beschrieben hat. Auf das Vorkommen von *Humuskarbonatboden* usw. kann hier nicht weiter eingetreten werden.

Bei der Frage der Gründigkeit der Böden muß man jedenfalls auseinanderhalten, ob man dabei an den Pflanzenwuchs oder an die Wasserbewegung im Boden denkt; so können z. B. die mächtigen Moränenlager, die unterhalb der Brücke von Jor den größten Teil der Fläche einnehmen, hydrologisch tiefgründige Wasserspeicher sein, vom forstlichen oder landwirtschaftlichen Standpunkt aus aber doch teilweise flach- bis mittelgründig wirken, weil der verwitterte Boden oft schon in 50—60 cm Tiefe in das unverwitterte Moränenmaterial übergeht.

Die Böden auf Dogger und Malm sind meistens eher flachgründig und ermöglichen infolgedessen nur geringe Wasserspeicherung, sofern nicht mächtige Schutthalden, wie an vielen Orten in unserm Gebiet, die untern Teile der Steilhänge bedecken.

Zu rundlicheren und sanfteren Formen als Dogger und Malm verwittert der Lias. Die Gründigkeit des verwitterten Bodens ist aber auch hier, wie bei Dogger und Malm, stark bedingt durch die Steilheit des Gebietes.

Die Böden auf den Kalken und auf den Moränen sind mittelschwer, sie neigen nur ausnahmsweise zufolge großen Schluff- und Tongehaltes zur Verdichtung. Im Gegenteil! Wie wir später sehen werden, enthalten fast alle Böden reichlich Sand und Steine und sind deshalb von Natur aus eher durchlässige Böden, verglichen etwa mit den sehr schwer durchlässigen Böden auf Grundmoränen, auf Flysch, polygener Nagelfluh usw.

2. Die Struktur der Böden.

Um die Struktur- und Wasserführungsverhältnisse des Bodens möglichst naturgetreu erfassen zu können, haben wir mittels 1 l fassenden, 10 cm hohen Stahlzylindern Proben des gewachsenen Bodens herausgeschnitten und diese auf Raumgewicht, Bodenskelett, Feinerde, Wassergehalt, Wasserkapazität und spezifisches Gewicht untersucht.

Es sind in den fünf Herbstn von 1934 bis 1938 genau 500 Literproben gewachsenen Bodens entnommen worden, also pro Jahr 100 Proben aus Bodentiefen von 0—10 cm, 20—30 cm, 50—60 cm und 90—100 cm. Die Zusammenfassung aller Untersuchungen ergibt folgendes:

Struktur von Wald- und Freilandböden.

Tabelle 5

Vegetation und Bodentiefe	Anzahl Proben	Trockengewicht eines Liters Boden	Volumen der festen Bodenteile				Porenraum	Wasserkapazität	Luftkapazität	Spez. Gewicht
			Total	Fein-erde	Steine	Wurzeln				
cm	Stück	g	cm ³	%	%	%	%	%	%	
Freiland										
0—10	110	847	334	90,4	8,4	1,2	66,6	60,4	6,2	2,54
20—30	79	1092	414	83,8	15,9	0,3	58,6	53,3	5,3	2,64
50—60	67	1219	457	83,4	16,6	0,0	54,3	50,7	3,6	2,67
90—100	46	1292	481	78,8	21,2	0,0	51,9	49,4	2,5	2,69
Wald										
0—10	77	861	337	79,2	19,3	1,5	66,3	52,7	13,6	2,55
20—30	67	1104	420	79,3	20,0	0,7	58,0	49,1	8,9	2,63
50—60	37	1233	461	77,4	22,4	0,2	53,9	48,2	5,7	2,68
90—100	17	1282	478	76,8	23,2	0,0	52,2	48,8	3,4	2,68

Die mit der Bodentiefe abnehmende Anzahl Proben zeigt uns, daß z. B. im Freiland in der Tiefe 20—30 cm nur in 79 von 110 Probelöchern noch eine Literprobe gewachsenen Bodens herausgeschnitten werden konnte, während in 31 Fällen entweder schon der Fels anstehend war oder Gehängeschutt, oder grobes, steiniges Moränenmaterial usw. Wir müssen später bei den Versuchen zur Berechnung der Wasserreserven im Boden darauf zurückkommen.

Man erkennt aus dieser Zusammenstellung, wie sowohl im Wald- als im Freilandboden das Trockengewicht eines Liters gewachsenen Bodens und sein entsprechendes absolutes Volumen mit der Bodentiefe rasch zu-, der Porenraum, die Wasserkapazität und die Luftkapazität aber abnehmen. Man darf festhalten, daß der Porenraum, der für die Wasserspeicherung und die Wasserleitung in Frage kommt, von den obersten 10 cm des Bodens bis in eine Tiefe von 100 cm von rund 66 % auf 52 % sinkt.

Der Unterschied der Eigenschaften zwischen Wald- und Freilandböden gelangt in diesen Mittelwerten nicht so scharf zum Ausdruck, weil bei den Waldböden auch die teilweise noch beweideten Gebüschbestände eingeschlossen sind und andererseits bei den Freilandböden die Mager- und Fettwiesenböden gegenüber den Weideböden etwas stark zur Geltung kommen. Die Waldböden sind auch etwas steinreicher als die Freilandböden, wodurch gewisse Unterschiede im Raumgewicht, im Porenraum usw. ausgeglichen worden sind.

Eindrucksvoll erscheint der Unterschied der Luftkapazität zwischen Wald- und Freilandboden, insbesondere in der obersten Bodenschicht, aber in bescheidener Größe bis 1 m Bodentiefe. Es müssen also im Waldboden mehr größere, nicht kapillar wirkende Hohlräume vorhanden sein, die rasche Ein- und Durchsickerung der Niederschläge begünstigen und zu Zeiten, da nach Landregen und Schneeschmelzen die Böden kapillar mit Wasser gesättigt sind, noch bis zur Oberfläche des Bodens vorübergehend mit Wasser gefüllt werden können.

3. Die Durchlässigkeit der Böden.

Wenn auch in einem Einzugsgebiet mächtige Bodenwasserspeicher vorhanden sein mögen, fällt für den Wasserhaushalt noch sehr in Betracht, ob die oberste Bodenschicht das Niederschlagswasser leicht aufnimmt und den Speichern zuleitet oder als Oberflächenwasser rasch den Bächen zuführt.

Um diese Frage etwas abzuklären, haben wir mittels sehr zahlreicher Versuche festgestellt, wie lange es bei Böden mit verschiedener Vegetation dauert, bis 100 mm Niederschlag in die oberste Bodenschicht eingesickert sind. In großen Mittelwerten ausgedrückt ergab sich:

bei <i>Weideböden</i>	sickern 100 mm Niederschlag ein in : 1 h 08' 33"
bei <i>Magerwiesen</i>	» 100 » » » » : 19' 45"
bei <i>Fettwiesen</i>	» 100 » » » » : 10' 35"
bei <i>Waldböden</i>	» 100 » » » » : 4' 59"

Beim Weideboden dauert es also mehr als eine Stunde, bis 100 mm Niederschlag eingesickert sind, bei der Magerwiese eine 3mal, bei der Fettwiese eine 5mal und beim Waldboden sogar eine 12mal kürzere Zeit. Auf Waldböden ist also sicher weniger Oberflächenabfluß zu erwarten als bei Weideböden, was wir später für Spezialfälle noch direkt beweisen werden.

4. Der Bodenwasservorrat.

Es ist bekannt, daß die Nachhaltigkeit des Abflusses in Quellen, Bächen und Flüssen stark bedingt ist durch die Wasserspeicherungsmöglichkeit im Vegetationsboden, in Kies- und Schuttlagern usw. der Einzugsgebiete.

Nach der geologischen Karte von *Gagnébin* ist reichlich die Hälfte des Einzugsgebietes mit Gehängeschutt und Moränenmaterial überdeckt, wobei die Moränenlager örtlich 50 m Mächtigkeit übersteigen können. Große Wasserspeicher sind also unzweifelhaft vorhanden, aber es dürfte auch dem Geologen schwerfallen, den Inhalt von allem Material, das über dem geschlossenen Fels liegt, auch nur auf 1 Million Kubikmeter genau zu schätzen. Und sollte dies auch gelingen, so fehlen immer noch Angaben über die Struktur dieses Materials, über seine Korngrößenzusammensetzung, den Porenraum, die Wasserkapazität und Luftkapazität. Es wäre auch unmöglich, selbst wenn die nötigen Mittel zur Verfügung stünden, den wirklichen Wassergehalt je auf Ende des hydrologischen Jahres innert kurzer Frist zu bestimmen.

Wir haben deshalb zum vornherein nur den Versuch unternommen, den Wasservorrat des obersten Meters des Bodens zu Ende einiger hydrologischer Jahre zu bestimmen. Aber auch dieser beschränkte Plan bot noch eine Reihe von Schwierigkeiten. Auf einer kleinen Fläche des Einzugsgebietes tritt der Fels kahl zutage, es ist also gar kein Boden vorhanden. Wie aus der Tabelle 5, Seite 135, zu entnehmen ist, gelang es schon in 20—30 cm, namentlich aber in 50—60 cm und 90—100 cm häufig nicht mehr, mit unsern nur 1 l fassenden Zylindern gewachsene Bodenproben herauszuschneiden, weil der Boden entweder zu steinig war oder anstehender Fels vorlag. In der Tiefe 90—100 cm konnten z. B. im Freiland nur noch in 42 % der Löcher, im Waldboden sogar nur in 22 % der Löcher noch Proben entnommen werden.

Will man nun den Wasservorrat der obersten Bodenschicht von 1 m Dicke berechnen, so muß überall da, wo wegen steinigem Bodens oder wegen anstehenden Felsens eine Probe ausgefallen ist, entsprechend der Probellochbeschreibung eine Korrektur am Wasservorrat angebracht werden. Beachtet man weiter, daß wir uns jeden Herbst auf die Untersuchung von 37 Probellochern beschränken mußten, daß also jedes Probelloch den Vertreter von 37 ha darstellt, so lassen sich die ziemlich gleichartigen Ergebnisse der Wasserkapazität der verschiedenen Untersuchungen nur dadurch erklären, daß wir die Probellocher immer ungefähr am gleichen Ort geöffnet haben. Vergleiche die nachfolgende Zusammenstellung.

Mittlere Wasserkapazität und mittlerer Wassergehalt der obersten, 1 m dicken Schicht von Wald- und Freilandböden.

Tabelle 6

Vegetation	Wasserkapazität Wassergehalt	1934	1935	1936	1937	1938	Mittel
		%	%	%	%	%	%
Wald . . . 5,9 km ²	Wasserkapazität .	40,7	40,0	40,5	40,0	39,9	40,2
Freiland . . . 7,9 km ²	«	42,8	41,4	42,4	41,2	41,8	41,8
Wald	Wassergehalt . .	34,9	34,5	35,2	34,7	33,8	34,7
Freiland	«	38,2	37,2	39,2	38,3	38,0	38,2
Wald	Sättigungsdefizit .	5,8	5,5	5,3	5,3	6,1	5,5
Freiland	«	4,6	4,2	3,2	2,9	3,8	3,6

Nennt man das durch Kapillarität und Adhäsion im Boden gebundene Wasser Kapillar- und Haftwasser im Gegensatz zu dem in die Tiefe absinkenden Senkwasser, so stellt die Wasserkapazität in Volumenprozenten die maximal mögliche Speicherung von Kapillar- und Haftwasser dar, der Wassergehalt aber den wirklich vorhandenen Vorrat je Ende September.

Die Zusammenstellung zeigt uns, daß die Kapillar- und Haftwasserspeicherungsmöglichkeit des obersten Meters des Waldbodens 40 % seines Volumens, oder entsprechend 400 mm Niederschlag beträgt, die des weniger steinigen Freilandbodens aber 42 % oder 420 mm. Der oberste Meter des ganzen Einzugsgebietes mit 5,9 km² Wald und 7,9 km² Freiland kann also 5 674 000 m³ Kapillar- und Haftwasser speichern.

Der wirkliche Wasservorrat betrug im Mittel der fünf Jahre 35 % im Waldboden und 38 % im Freilandboden oder pro Einzugsgebiet 5 065 000 m³. Der Unterschied zwischen der Kapillar- und Haftwasserspeicherungsmöglichkeit und dem wirklichen Vorrat betrug im Mittel 609 000 m³ oder 44 mm Niederschlag.

Theoretisch hätte die Wasserkapazität im Laufe der Jahre entweder gleich bleiben oder zufolge Veränderung der Vegetation gleichsinnig zu- oder abnehmen sollen. Die hier vorkommenden Schwankungen zeigen aber wahrscheinlich nur den Fehler der Untersuchungsmethode. Sehr auffallend ist dagegen, daß auch der wirkliche Wasservorrat auf Ende September der Jahre 1934 bis 1938 sehr wenig schwankte.

Der geringe Unterschied des Wasservorrates läßt sich erklären durch die sehr reichlich fallenden und gut verteilten Niederschläge und die Ende September schon stark herabgesetzte Evaporation und Transpiration, die ja allein in stande sind, den Kapillar- und Haftwasservorrat zu verändern, und endlich sei nochmals erwähnt, daß unsern Wasservorratsbestimmungen bei den obwaltenden Umständen eine gewisse Grenze der Genauigkeit gesetzt ist, insbesondere, weil es auch selten gelang, alle 37 Probelöcher zu untersuchen, ohne daß ein Niederschlag dazwischen gekommen wäre.

Immerhin lassen unsere guten Näherungswerte erkennen, daß schon der oberste Meter des Bodens unseres Einzugsgebietes rund 400 mm Kapillar- und Haftwasser speichern kann und daß wahrscheinlich im Vegetationsboden, im Gehängeschutt und namentlich in den mächtigen Moränenlagern angenähert ein ganzer Jahresniederschlag an Kapillar- und Haftwasser gebunden sein kann.

Neben den sehr zahlreichen feinen Hohlräumen, die Haftwasser binden können, besteht ein Teil des Porenraumes des Bodens aus größeren Poren, Röhren usw., die nicht mehr kapillar wirksam, normalerweise mit Luft erfüllt sind und bei Niederschlägen oder Schneeschmelzen das Senkwasser in die Tiefe leiten. Diese bodenkundlich als *Luftkapazität* bezeichneten größeren Porenräume können aber vorübergehend auch als Speicher in Frage kommen und hier macht sich nun plötzlich in der ganzen Wasserspeicherungsfrage die Vegetation geltend.

Da die Luftkapazität im Mittel des obersten Meters im Waldboden rund 7 % oder 70 mm Niederschlag beträgt, im Freilandboden nur rund 4 % oder 40 mm, so könnte diese Speicherung in unserm Einzugsgebiet vorübergehend bei der heutigen Vegetationsverteilung (5,9 km² Wald und 7,9 km² Freiland) immerhin 730 000 m³ betragen. Bei der Ueberführung des Freilandgebietes in Wald könnte nach und nach die Luftkapazität des obersten Bodenmeters um 220—250 000 m³ gesteigert werden, was immerhin auf das ganze Einzugsgebiet verteilt 16—18 mm Niederschlag entspricht.

C. Einfluß der Veränderung der Vegetation auf den Wasserhaushalt in der obern Bodenschicht.

Nach diesen mehr allgemeinen Ausführungen wollen wir noch an zwei besondern Fällen prüfen, wie sich die Struktur und mit ihr der Wasserhaushalt der obersten, 1 m dicken Bodenschicht wandeln können mit der Veränderung der Vegetation.

1. Ausschluß der Nutzung bei einer zeitweilig beweideten Magerwiese.

Wie früher erwähnt, ist im Jahr 1930 die Nutzung auf den vorher teils beweideten, teils als Magerwiese gemähten Steilhängen der Verraux eingestellt worden, während der unmittelbar nördlich angrenzende Teil des gleichen Hanges der Alp Soladier wie stets stark beweidet worden ist. Wir haben im Herbst 1936, namentlich aber 1937 Untersuchungen angestellt, um festzustellen, ob diese verschiedene Benutzungsweise und der Nutzungsausschluß sich nachweisen lassen.

Struktur der beweideten und der sieben Jahre unbenutzten Böden.

Tabelle 7

Ort	Bodentiefe	Trockengewicht eines Liters Boden	Volumen der festen Bodenteile				Porenraum	Wasserkapazität	Luftkapazität
			Total	Fein-erde	Steine	Wurzeln			
	cm	g	cm ³	%	%	%	%	%	
Soladier beweidete Alp	0—10	872	343	93,6	5,5	0,9	65,7	60,9	4,8
	20—30	1023	385	92,7	7,0	0,3	61,5	57,0	4,5
	50—60	1157	426	88,3	11,7	—	57,4	54,9	2,5
Verraux unbenutzt seit sieben Jahren	0—10	750	296	93,6	4,7	1,7	70,4	61,6	8,8
	20—30	1028	391	81,3	18,2	0,5	60,9	55,5	5,4
	50—60	1194	443	86,9	13,1	—	55,7	52,9	2,8

Man erkennt aus der beigegebenen Zusammenstellung, daß erst in der obersten Bodenschicht sich sicher nachweisbare Unterschiede ergeben haben. Das Raumgewicht der obersten Bodenschicht ist zufolge des 7jährigen Nutzungsausschlusses gesunken, der Porenraum und die Luftkapazität entsprechend gestiegen. Die Bodenoberfläche ist also nach dem Nutzungsausschluß aufgeschlossener und für Niederschlagswasser aufnahmefähiger geworden.

Zum gleichen Ergebnis führten auch die je 13 ausgeführten Sickerversuche. 100 mm Niederschlag sickerten in den Boden ein in:

<i>Soladier</i> , beweidete Alp	1 h 54'
<i>Verraux</i> , seit sieben Jahren unbenutzt	12'

Der Niederschlag sickert also in die seit sieben Jahren geschonten Böden der Verraux 9- bis 10mal rascher ein als in die stark beweideten Böden der Alp Soladier. Es wird lehrreich sein, hier eine neue Prüfung der Verhältnisse vorzunehmen, wenn die forstlichen Pflanzungen sich zu schließen beginnen.

Es wurde aber auch auf einfache Art untersucht, wie sich bei Gefällen von 45—50 % bei diesen beiden Vegetationstypen der Oberflächenabfluß gestaltet.

Verfahren: Ein Quadratmeterrahmen wird auf die ausgewählte Stelle gelegt. In der Hangneigung wird links und rechts ein Blech derart in den Boden eingedrückt, daß ein seitliches Ausweichen des Niederschlagswassers ausgeschlossen ist. 50 cm unterhalb des Quadratmeterrahmens wird ein Bodenanschnitt geöffnet, um ein Sammelgefäß und eine Art Dachrinne einbauen zu können. Die Dachrinne wird 2—3 cm unter der Oberfläche des Profils in den Mineralboden so tief eingepreßt, daß jeglicher Oberflächenabfluß des künstlichen Regens, der im Mittel 1 m Weg zurücklegen muß, aufgefangen werden kann. Der Regen von 10 mm Höhe wird mit der Gießkanne möglichst gleichmäßig innert der Zeit von 5 Minuten auf dem Quadratmeter Boden ausgegossen. Dann werden 5 Minuten Pause eingeschaltet zur Vornahme der nötigen Beobachtungen und Messungen, dann wieder in 5 Minuten 10 mm Niederschlag gegeben, neue Pause usw., bis nach Verlauf von 50 Minuten ein Niederschlag von 50 mm gegeben worden ist.

Die Versuche zeigen folgendes: Vom Weideboden, der im Herbst 1936 schon vor dem künstlichen Regen beinahe mit Wasser gesättigt war, flossen schon von den ersten 10 mm

Oberflächenabfluß bei beweideten und bei sieben Jahre geschonten Böden.

Tabelle 8

Ort der Untersuchung	Neigung des Bodens ‰	Künst- licher Regen mm	Oberflächenabfluß		
			beginnt nach Sekunden	Menge in l	in ‰ des Nieder- schlags
Soladier, beweidete Alp 1936, sofort nach der Schmelze eines Fröhschnees	46	10	45	4,7	47
		10	50	7,8	78
		10	30	8,1	81
		10	35	9,0	90
		10	30	9,4	94
Summe und Mittel	46	50	38"	39,0	78
1937, drei Tage nach dem letzten Niederschlag	50	10	40	3,4	34
		10	30	6,0	60
		10	35	6,1	61
		10	30	6,2	62
		10	30	6,2	62
Summe und Mittel	50	50	33"	27,9	60
Verraux, sieben Jahre unbenutzt 1936, sofort nach der Schmelze eines Fröhschnees	45	10	105	0,8	8
		10	90	0,8	8
		10	100	1,4	14
		10	90	1,5	15
		10	90	1,5	15
Summe und Mittel	45	50	95"	6,0	12
1937, drei Tage nach dem letzten Niederschlag	52	10	—	0	0
		10	—	0	0
		10	—	0	0
		10	—	0	0
		10	—	0	0
Summe und Mittel	52	50	—	0	0

Niederschlag 47 % oberflächlich ab, von den zweiten 10 mm schon 78 % und von den fünften 10 mm 94 %. Von 50 mm Niederschlag, der innerhalb 50 Minuten gegeben wurde, flossen also 39 mm oder 78 % oberflächlich ab. Beim sieben Jahre geschonten Boden sickerten vom gleichen Niederschlag 88 % ein und nur 12 % flossen über den auch hier gesättigten Boden.

Im Jahr 1937 wurde der Versuch drei Tage nach dem letzten bedeutenden Niederschlag wiederholt. Der typische Weideboden lieferte von 50 mm Niederschlag 60 % Oberflächenabfluß, während in den geschonten Verrauxböden alles einsickerte.

Wenn nun aber bei Weideböden der größte Teil der Niederschläge als Oberflächenwasser abfließt, in geschonten Wiesenböden, im Gebiet der Gebüsch und des Waldes aber fast vollständig in den Boden einsickert, so muß sich nachweisen lassen, daß in geschonten Böden eine größere Senkwasserbewegung vorhanden ist als bei den oberflächlich verschlossenen Weideböden.

Wir haben versucht, für diese Anschauungsweise einen Beweis zu erbringen, indem wir durch das Anbringen von zwei Dachrinnen die Möglichkeit schufen, einmal den Oberflächenabfluß zu messen und dazu den aus dem Bodenprofil austretenden Hangwasserstrom bis zur Tiefe von 80 cm.

Oberflächenabfluß und Wasserbewegung bis 80 cm Tiefe.

Tabelle 9

Zeitdauer der Versuche Minuten	Abflußsumme bei typischem Weideboden		Abflußsumme bei geschonter Grasvegetation	
	an der Oberfläche	in 80 cm Tiefe	an der Oberfläche	in 80 cm Tiefe
	1	1	1	1
3	1,0	0	0	0
5	3,5	0	0	0
10	10,0	0	0	0
15	17,0	feuchte Stelle	0,2	0
20	24,0	0	0,8	0,4
25	31,0	0	1,8	0,9
30	38,5	0	3,0	1,5
40	53,0	0	5,5	3,0
50	67,5	0	8,0	4,7
60	82,5	0	10,5	6,4
75	105,0	nasse Wand	13,4	8,9

Um in tiefen Bodenschichten den hangabwärts fließenden Wasserstrom wirklich beobachten zu können, mußten wir die Niederschlagsintensität derart verstärken, daß wir pro Minute 2 mm Niederschlag gaben, und zwar während 75 Minuten, also total 150 mm.

Beim typischen Weideboden sind von 150 mm im Verlaufe von 75 Minuten 105 mm oder 70 % oberflächlich abgeflossen, bei der sieben Jahre geschnittenen Wiese aber nur 13 mm oder 9 %. Im typischen Weideboden deutete wohl auch das Feuchtwerden des angeschnittenen Profils bis 80 cm eine Wasserbewegung parallel zur Hangneigung an, es erfolgte aber bis in 80 cm Tiefe kein meßbarer Ausfluß. Im Profil des unbenutzten Wiesenbodens beginnt aber der Hangwasserstrom schon nach 20 Minuten auszufließen und erreicht bis zum Ende des Versuches eine Menge von 9 l oder 6 % des Gesamtniederschlags.

2. Ueberführung eines Waldes in Weide.

In der Nähe von Plan du Pelet an der Westgrenze des Einzugsgebietes nordöstlich von Les Avants ist vor ungefähr 30 Jahren eine Fläche des dortigen Fichtenwaldes kahlgeschlagen und der Weide überlassen worden. Es ergab sich hier die Möglichkeit zu vergleichenden Untersuchungen alten Waldbodens, 30 Jahre beweideten Bodens und alten Weidebodens.

Struktur des Fichtenbodens, des 30 Jahre beweideten Bodens und des alten Weidebodens.

Tabelle 10

Benutzungsart des Bodens	Bodentiefe	Trockengewicht eines Liters Boden	Volumen der festen Bodenteile				Porenraum	Wasserkapazität	Luftkapazität
			Total	Fein-erde	Steine	Wurzeln			
	cm	g	cm ³	%	%	%	%	%	%
Fichtenwald . . .	0—10	935	368	68,2	30,7	1,1	63,2	49,0	14,2
	20—30	1160	445	84,5	15,1	0,4	55,5	47,2	8,3
	50—60	1213	457	85,8	14,0	0,2	54,3	48,2	6,1
30jährige Weide auf Fichtenboden	0—10	1165	457	59,1	40,5	0,4	54,3	45,1	9,2
	20—30	1282	492	64,2	35,6	0,2	50,8	43,3	7,5
	50—60	1268	481	75,5	24,3	0,2	51,9	45,2	6,7
Weide	0—10	1132	445	58,6	40,7	0,7	55,5	48,3	7,2
	20—30	1276	489	66,7	33,3	—	51,1	44,7	6,4
	50—60	1284	487	61,5	38,5	—	51,3	47,1	4,2

Wenn man insbesondere die Luftkapazität betrachtet, die für den Wasserhaushalt des Bodens von ausschlaggebender Bedeutung ist, so erkennt man, daß sie in der obersten Bodenschicht von 10 cm mit 14 % im Waldboden doppelt so groß ist als im Weideboden mit 7 %. Im Boden der vor 30 Jahren von Wald- in Weideboden umgewandelten Fläche ist die Luftkapazität in der entsprechenden Schicht von 14 % auf 9 % gesunken, aber immer noch nicht auf den Wert der Luftkapazität des alten Weidebodens, weil die nicht gerodeten Stöcke langsam zerfielen und den Boden noch etwas locker hielten.

Die gleichen Verhältnisse zeigen sich auch in 20—30 cm Tiefe; zwar ist die Luftkapazität in den 30 Jahren seit dem Kahlschlag von 8,3 % auf 7,5 % gefallen; sie ist aber immer noch höher als im alten Weideboden mit 6,4 %.

In der Tiefe 50—60 cm zeigt sich wohl noch ein scharfer Unterschied in der Luftkapazität zwischen dem alten Waldboden und dem alten Weideboden. Der Boden der Neuweide hat sich aber in dieser Tiefe nicht meßbar in seiner Struktur verändert.

Die wesentliche Verschiedenheit in der Luftkapazität der obersten Schicht des Bodens des Waldes, der neuen Weide und der alten Weide findet ihren hydrologischen Ausdruck in einem bedeutenden Unterschied der Durchlässigkeit für Niederschlagswasser, wie folgende Versuche zeigen.

100 mm Niederschlag sickern ein in:

1. *Waldboden* 3' 52"
2. *Neuweide*, vor 30 Jahren Schlag des Waldes 9' 48"
3. *Alter Weideboden* 26' 09".

Die Waldbodenoberfläche ist also rund 7mal durchlässiger als die des Weidebodens. Die Durchlässigkeit des Neuweidebodens liegt dazwischen.

Wir haben bei diesen drei Bodentypen aber auch den Oberflächenabfluß bei künstlicher Beregnung gemessen, mit folgendem Ergebnis:

Oberflächenabfluß bei Fichtenboden, 30 Jahre beweidetem Boden und altem Weideboden.

Tabelle 11

Ort der Untersuchung	Neigung des Bodens %	Künstlicher Regen mm	Oberflächenabfluß		
			beginnt nach Sekunden	Menge in l	in % des Niederschlags
Alter Fichtenwald	54	10	215	0,6	6
		10	120	1,2	12
		10	90	1,4	14
		10	80	1,3	13
		10	80	1,4	14
Summe und Mittel	54	50	117	5,9	12
30jährige Weide auf ehemaligem Fichtenwaldboden	55	10	225	0,4	4
		10	105	1,5	15
		10	80	2,2	22
		10	70	2,3	23
		10	65	2,5	25
Summe und Mittel	55	50	109	8,9	18
Alte Weide	57	10	100	1,6	16
		10	60	2,8	28
		10	50	3,8	38
		10	45	3,9	39
		10	50	4,0	40
Summe und Mittel	57	50	61	16,1	32

Die Untersuchung fand im Herbst 1936 statt, kurz nach der Schmelze eines 20 cm hohen Fröhschnees. Das Ergebnis unserer Sickerversuche wird durch diese Oberfläehenabflüsse bei künstlicher Beregnung bestätigt. Es geht beim Waldboden fast doppelt so lange bis das Oberfläehenwasser die gleiche Strecke durchlaufen hat, und der Oberfläehenabfluß ist beim alten Weideboden 2—3mal größer als beim Waldboden, während der entsprechende Wert für den vor 30 Jahren durch Schlagen des Waldes geschaffenen Weideboden dazwischen liegt.

Wenn der Unterschied in der Struktur und der Durchlässigkeit der obersten Bodenschicht zwischen Wald- und Weideboden hier nicht so auffallend in Erscheinung tritt und wenn sich die Umwandlung von Wald in Weide nicht so schädlich auswirkt wie an andern Orten, so ist das bedingt durch den verhältnismäßig grobkörnigen, sandigkiesigen Boden, der einer Strukturveränderung und einer oberfläehlichen Verhärtung durch den Weidebetrieb weniger unterworfen ist als ein schwerer, feinkörniger Boden. Es ist ferner zu bedenken, daß es sich um ziemlich schlechten Waldboden handelt und daß bei der Umwandlung von Wald in Weide die Stöcke nicht gerodet worden sind, sondern langsam vermoderten und dadurch eine rasche Verdichtung des neu geschaffenen Weidebodens verhinderten.

D. Zusammenfassung.

Wenn es uns auch nicht gelang, die Frage von Dr. *O. Lütschg* nach den am Ende verschiedener hydrologischer Jahre vorhandenen Bodenwasservorräten derart zu beantworten, daß sie zahlenmäßig in die jährliche Wasserbilanz eingesetzt werden könnten, konnten wir doch zeigen, daß im Einzugsgebiet der Baye de Montreux im obersten Meter des Bodens der Kapillar- und Haftwasservorrat auf Ende September verschiedener Jahre verhältnismäßig geringen Schwankungen unterworfen ist. Wir konnten auch die Größenordnung des möglichen, durch Kapillarität und Adhäsion gebundenen Gesamt-Bodenwasservorrates andeuten.

Darüber hinaus haben Untersuchungen der Bodenstruktur, der Durchlässigkeit der Bodenoberfläche, des Oberfläehenabflusses und der Wasserbewegung im Boden bewiesen, daß der Wasserabfluß der Baye de Montreux bedeutend beeinflusst werden muß durch die Vegetationsart und die Benutzungsart des Einzugsgebietes. Dabei darf mit großer Wahrscheinlichkeit angenommen werden, daß sich dieser Einfluß stärker geltend machen wird auf den Verlauf der einzelnen Abflüeherscheinungen als auf die Jahresbilanz aus Niederschlag, Abfluß und Verdunstung.

Vorstehenden Ausführungen und Schlußfolgerungen von Prof. Dr. *Hans Burger* möchte ich folgendes hinzufügen.

Aus allen bisherigen Versuchen und Unternehmungen geht eindeutig hervor, daß die zahlenmäßige Erfassung der Wasservorräte im Boden einer Gebirgslandschaft viel Mühe und Arbeit, viel Zeit und Geld erfordert. Der in vorliegender Arbeit behandelte Fragenkomplex über den Wasserhaushalt des Schweizer Hochgebirges legt aber Zeugnis ab, daß die hinreichend genaue Ermittlung von Rücklage und Aufbrauch früherer Rücklagen aus dem Niederschlag *möglich* ist. Heute stehen der Lösung dieses Kernproblems der Hochgebirgshydrologie, — *der Aufstellung der Wasserbilanz von Hochgebirgslandschaften für längere und kürzere Zeiträume*, keine unüberwindlichen Schwierigkeiten mehr im Wege. Dies gilt in ganz besonderem Maße

für das quellenreiche Forschungsgebiet der Baye de Montreux, für das ein Beobachtungs- und Meßmaterial erster Güte zur Verfügung steht.

Damit ist zweifellos für die weitere ersprießliche Entwicklung der Hochgebirgshydrologie viel gewonnen.

Literaturverzeichnis.

Für die ältere Literatur vergleiche man die früheren Publikationen des Verfassers.

- Bailey R. W., Forsling C. L. and Beecraft R. J.: «Floods and accelerated erosion in northern Utah.» U.S.A.Dep. of Agr. Miscell. Publ. No. 196, 1936.
- Bailey R. W.: «A new epicycle of erosion.» Journal of Forestry 1937.
- Baldwin H. J. and Brooks Ch. F.: «Forests and floods in New Hampshire.» New England Regional Planning Commission 1936.
- Bates C. G.: «The forest influence on streamflow under divergent conditions.» Journal of Forestry 1936.
- Bondin M.: «La réserve naturelle dans les hautes fagnes de Belgique.» Bull. de la Soc. Centr. Forestière de Belgique 1937.
- Burger H.: «Physikalische Eigenschaften von Wald- und Freilandböden. Mitteil. der Schweiz. Anstalt für das forstl. Versuchswesen. XIII. Bd., 1. Heft, 1922, XIV. Bd., 2. Heft, 1927, XV. Bd., 1. Heft, 1929, XVII. Bd., 2. Heft, 1932, und XX. Bd., 1. Heft, 1937. Mit ausführlichen Literaturangaben.
- Burger H.: «Der Wasserhaushalt im Sperbel- und Rappengraben.» Gleiche Mitteil. XVIII. Bd., 2. Heft, 1934. Mit ausführlichen Literaturangaben.
- Châtelain G.: «La forêt et le régime de l'eau à la Guadeloupe.» Rev. intern. du bois 1938.
- Coster J. Ch.: «Surficial run-off and erosion in Java.» Tectona 1938.
- Cradock G. W. and Kenneth Pearse C.: «Surface run-off and Erosion on granitic mountain soils of Idaho as influenced by range cover, soil disturbance, slope and precipitation intensity.» Circular No. 482, 1938, U.S.A.Dep. of Agr.
- de Haan J. H.: «Streamflow and Erosion in the Alps and on Java.» Tectona 1936.
- Düggeli M.: «Wie wirkt das öftere Betreten des Waldbodens auf einzelne physikalische und biologische Eigenschaften ein?» Schweiz. Zeitschr. f. Forstwesen 1937.
- Düggeli M.: «Der Einfluß des Betretens auf einzelne physikalische und biologische Eigenschaften der Wiesenböden.» Schweiz. landw. Monatshefte 1938.
- Engler A.: «Untersuchungen über den Einfluß des Waldes auf den Stand der Gewässer.» Mitteil. der Schweiz. Anstalt für das forstl. Versuchswesen. XII. Bd., 1919.
- Forsling C. L.: «Stabilizing streamflow as viewed by a Forester.» Journal of Forestry 1937.
- v. Greyerz H.: «Anmerkung der Redaktion über oberflächlich abfließende Wasser ob der Waldgrenze.» Schweiz. Zeitschr. f. Forstw. 1924, S. 261.
- Heß E.: «Le Sol et la Forêt.» Mitteil. der Schweiz. Anstalt für das forstl. Versuchswesen. XV. Bd., 1. Heft, 1929.
- Hofmann A.: «La sistemazione idraulica-forestale dei bacini montani.» La nuova agricoltura d'Italia 1936.
- Jjjasz L.: «Grundwasser und Baumvegetation.» Mitteil. der forstl. Versuchsanstalt Ungarns 1938.
- Kittredge J.: «The magnitude and regional distribution of water losses influenced by vegetation.» Journal of Forestry 1938.
- Lowdermilk W. C.: «Land use patterns in erosion and flood control.» Journal of Forestry 1937.
- Lütschg O.: «Rapport sur le but des recherches entreprises dans le bassin de la Baye de Montreux.» Mitteil. der Schweiz. Anstalt für das forstl. Versuchswesen. XIX. Bd., 1. Heft, 1935.
- MacLagan Gorri R.: «The economic importance of changes in plant cover.» Journ. of the Indian Bot. Soc. 1937.
- Meagher G. S.: «Forest cover retards snow melting.» Journal of Forestry 1938.
- Pearse C. K. and Wooley S. B.: «The Influence of Range Plant Cover on the Rate of Absorption of Surface Water by Soils.» Journal of Forestry 1936.
- Renner T. G.: «Conditions influencing erosion on the Boise River watershed.» U.S.A.Dep. of Agr. Techn. Bull. No. 528, 1936.
- Valek Z.: «Forschungs- und Beobachtungsergebnisse über den Einfluß von Kulturbeständen auf den Abfluß von Niederschlägen aus den Wildbachsammelgebieten der Kychova und Zdechovka in den Jahren 1928—1934.» Recueil de travaux des Instituts de recherches agronomiques de la République Tchecoslovaque 1935.

7. KAPITEL.

Die Bedeutung des Schneetransportes durch den Wind (Windverfrachtung) im Wasserhaushalt des Schweizer Hochgebirges.

Mitarbeiter: Rud. Bohner und Erw. Hoeck.

A. Allgemeines.

Bei ruhigem Wetter lagert sich der fallende Schnee auch im Hochgebirge, sowohl auf den Flachböden, wie auf den sanfteren Abhängen der Berge, in regelmäßigen Schichten. Wenn aber Stürme auftreten, so wird die Schneedecke umgelagert, und zwar überall da, wo ihr die Gestalt der Landschaft keinen Schutz gewährt. Dies ist vor allem oberhalb der Waldgrenze und des Kampfgürtels der Fall, wo die Kraft des Windes an der Erdoberfläche nicht mehr gebrochen werden kann.

Von besonders freiliegenden Feldern und Halden fegt anhaltender starker Wind den Schnee meist gänzlich weg, sofern nicht eine resistente Oberflächen-Schmelzkruste seine Verfrachtung zu verhindern trachtet. Ein klarer Zusammenhang zwischen Größe des Niederschlages und Schneehöhe, namentlich in freier Lage, besteht nicht. Im Werden und Vergehen einer Schneedecke offenbart sich das Wettergeschehen in allen Einzelheiten.

Es steht heute fest, daß der mechanischen Abtragung, dem Transport des Schnees durch Wind längs seiner Oberfläche (Schneedrift, Schneefegen, Schneeverfrachtung), im Wasserhaushalt des Schweizer Hochgebirges Bedeutung zukommt. Wie die Praxis lehrt, können Richtung und Stärke der niederschlagbringenden Winde auf die Ablagerung und Anhäufung des Schnees von weitgehendem Einfluß sein. Der erfahrene Gebirgsforscher weiß, daß vielerorts die größten Schneefelder und Gletscher nicht auf der vom Windanfall getroffenen Luvseite, sondern auf der Leeseite liegen. Auf der Luvseite, im kräftig ansteigenden, manchmal hochgetriebenen, feuchten Luftstrom scheidet sich zwar der Schnee in der Regel aus, er gelangt jedoch auf der Luvseite weniger leicht zur Ablagerung als auf der Leeseite, wo die Luftbewegung schwächer und in vielen Fällen auch die Ausbreitung der Gebirgsmassive größer ist. Natürlich kommen im Hochgebirge, seiner Gestalt entsprechend, örtlich wie regional auch andere Kombinationen vor. Schnee kann nur transportiert werden, wenn sich die Form des Geländes dazu eignet. Sind beispielsweise die Luvhänge sehr steil, so wird der Schnee im Bereich der Kammlinie meist zurückgewirbelt.

Die Wirkung von Wind und Sturm auf die Ablagerung von Schnee vollzieht sich in der Zeit des Niederschlags ebenso sehr wie in den niederschlagsfreien Perioden. Sie ist namentlich nach kurzen aber ergiebigen Schneefällen bei relativ niedrigen Temperaturen beträchtlich, weil in solchen Fällen in der Regel sich nur eine leichte Setzung des Schnees vollzieht, der Schnee also einem Windangriff nur geringen Widerstand zu leisten vermag. In einzelnen Fällen stellt sich ein Schneetransport großen Formats durch Wind aus höheren in tiefere Regionen ein. Die oft über-

raschenden Formänderungen der Firnfelder unserer Gletscher sind vor allem eine Folge solcher Schneeverfrachtungen durch Wind.

Pulvriger Schnee wird vielfach durch den Wind auf dem Wege der Umlagerung und des Transportes von der Luv- nach der Leeseite verfrachtet, und umgekehrt. Durch den Schneetransport werden also im besondern die Leeseiten der Täler des Hochgebirges mit zum Teil mächtigen Schneemassen gefüllt und überdeckt. Millionen von Tonnen Schnee können unter bestimmten Windverhältnissen dem einen Gebiet entzogen, dem andern zugeführt werden.¹⁾ Die Ernährung der Firngebiete einzelner Gletscher durch Schneedrifftwirkung kann bei besonders günstigen Geländebedingungen sogar zu lokalen Gletschervorstößen führen.

Eine bekannte Erscheinung, auf die ich schon wiederholt aufmerksam gemacht habe, ist ferner die fortschreitende Entladung der niederschlagbringenden Luftmassen im Verhältnis zu ihrem Vordringen in das Innere einer Gebirgslandschaft. Daraus folgt, daß mit abnehmendem Niederschlag die Bedeutung des Schneetransportes in der Regel ebenfalls abnimmt.

Auch der Einfluß des Schneetransportes auf die Höhenlage der Schneegrenze ist klar und braucht nicht näher begründet zu werden.

Allgemein beurteilt, ist zu betonen, daß dem Faktor «Schneetransport» im Wasserhaushalt des Schweizer Hochgebirges bisher zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt wurde.

Zahlenmäßige Untersuchungen in den Alpen über den Massentransport von Schnee (Größe von Abtrag und Auftrag) durch Schneefegen (Windverfrachtung) sind m. W. bis auf unsere eigenen Untersuchungen im Scheitelprofil des *Col de Jaman*, über die ich im zweiten Teil dieses Kapitels berichten werde, noch nicht ausgeführt worden. (Der Col de Jaman verbindet Vevey-Montreux-Les Avants mit Montbovon, la Gruyère und dem Pays d'Enhaut. Diese Messungen haben übrigens zu unserer Ueberraschung, wie wir später sehen werden, die Belanglosigkeit des Schneefegens für den Wasserhaushalt des *Baye de Montreux-Gebietes* erwiesen.)

Wie es zahlenmäßig in andern Bezirken der Alpen steht, darüber sind wir heute, soweit meine Kenntnisse reichen, nicht unterrichtet. Sicher ist nur, daß wir gegenwärtig — klimatisch betrachtet — in einer Periode erhöhter Aktivität der Atmosphäre leben. Dies muß die Windstärken im allgemeinen etwas steigern und in vermehrtem Maße Schneemassen auf die dem Winde abgewandten Seiten über die Kämme hinüberwerfen. Das stimmt auch mit unsern Beobachtungen überein.

Dagegen besitzen wir Untersuchungen und Messungen von *Axel Hamberg*, Stockholm, für die lappländischen Gebirge²⁾, von *A. Wegener* und *R. Holzapfel* für das grönländische Inlandeis.³⁾ Auf der «British Antarctic Expedition» wurde innerhalb

¹⁾ Auch der erfahrene Glaziologe *R. Streiff-Becker* berührt in seiner Schrift «Aus der Gletscherwelt» (Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich, LXXVII, 1932) dieses Phänomen. Der Glärnischgletscher, dem Tödi-Clariden-Gebiet zugehörig, fließt in der Richtung des Niederschlag bringenden Westwindes. Weststürme entführen nun, nach sorgfältigen Untersuchungen *Streiff-Beckers*, gewaltige Schneemengen über den östlichen Steilabbruch des Gletschers nach dem benachbarten Kalttäli.

²⁾ *Hamberg Axel*: Die Eigenschaften der Schneedecke in den lappländischen Gebirgen. Naturwissenschaftliche Untersuchungen des Sarekgebirges in Schwedisch-Lappland, Bd. I, Abt. III, Gletscherkunde, Lief. 1, Stockholm 1907.

³⁾ Wissenschaftliche Ergebnisse der Deutschen Grönland-Expedition *Alfred Wegener* 1929 und 1930/31.

Figur B von Tafel I ist um 180° zu drehen.

**Bildliche Betrachtung über die Bedeutung des Schneetransportes
in den Schweizer Alpen.**

Schneetreiben im Gebiet des Berninapasses.¹⁾

(Ca. 2300 m ü. M.)



(Phot. Zimmermann)



Fig. A.

Schneetreiben an einem Vorgipfel des Pizzo di Verona, von der Alp Grün aufgenommen; 28. Januar 1936; Temp.: -7° C; Wind: NO, ca. 30 m/sec; leicht bewölkt.

Fig. B.

Erosion eines durch vorherigen Süd Sturm gebildeten Schneesackes bei «Arlas» auf dem Berninapass; 27. März 1936, ca. 13 h; Temp.: $3,5^{\circ}$ C; Nordsturm, in starken Stößen wechselnde Windgeschwindigkeit von ca. 35 bis 45 m/sec; leicht bewölkt.



Fig. C.

Schneetreiben auf dem Berninapass bei «Arlas», mit Schneefahne am «Sasso Quadro»; 4. Januar 1936, ca. 14 h 30; Temp.: -6° C; Wind: NNO, ca. 20—25 m/sec; leicht bewölkt.

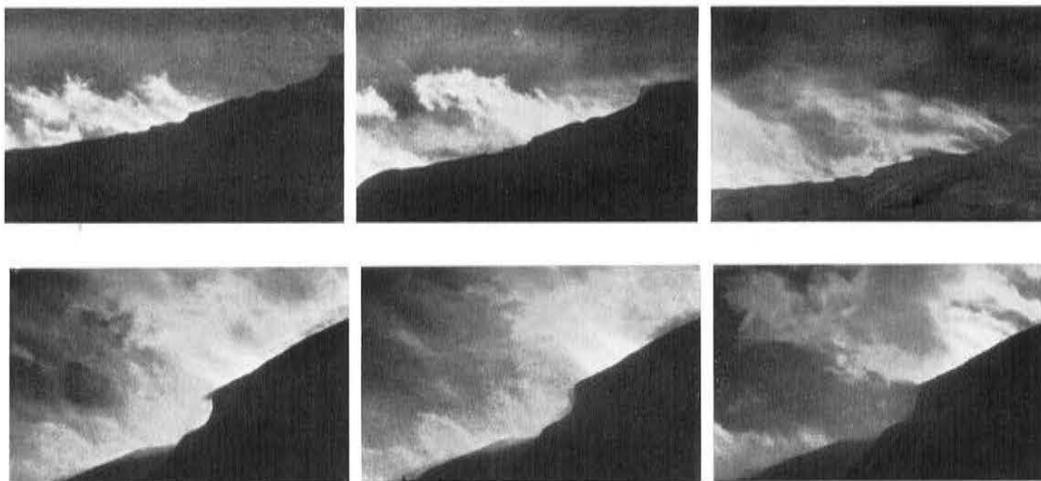


Fig. D.

Erosion eines durch vorherigen Süd Sturm gebildeten Schneesackes bei «Arlas» auf dem Berninapass. Gegenlicht der Schneefahne, Sogwalze von unten; 27. März 1936, ca. 13 h; Temp.: $3,5^{\circ}$ C; Nordsturm, in starken Stößen wechselnde Geschwindigkeit von ca. 35—45 m/sec; leicht bewölkt.

¹⁾ Die vorstehenden Bilder mit Text verdanke ich Herrn Direktor Zimmermann, Poschiavo.

Durch die Wirkung des Schneetreibens, des Schneetransportes, der Schnee-Erosion (Windkanäle), durch Anhäufung von Lawinenschnee, durch den Einfluß warmer Luftströmungen (schmelzende Wirkung), durch Sonnenstrahlung, durch Rückstrahlung, durch Bewegungsvorgänge, die mit der Gestalt des Untergrundes in Beziehung stehen, ergeben sich in unregelmäßiger Ausbildung *Linien gleicher Höhenänderung*, wie wir sie für die Aufstellung der Massenbilanz der Gletscher im obern Saastal (Monte-Rosa-Gruppe) konstruiert haben.¹⁾ Der unruhige Verlauf dieser Kurven spricht für sich; der Einfluß sämtlicher Faktoren, die die Gestalt solcher Gebilde bedingen, gelangt in diesen Karten in geradezu überwältigender Weise zum Ausdruck. Man sehe sich namentlich den Verlauf der Linien gleicher Höhenänderung im Bereiche der Firngebiete des Allalin- und Schwarzenberggletschers näher an, welche Formenfülle zeigt sich da! Eine nähere Beleuchtung der verschiedenen Gebilde ist überflüssig, denn die einzelnen Bilder sprechen deutlicher als vieler Worte Sinn.

B. Spezielles: Schneetransport auf Col de Jaman, 1512 m ü. M.

Geographisches. Im Osten wird das Baye de Montreux-Gebiet von einem Gratgebirge eingefafßt, das auf einer 3,5 km langen Strecke 1700 m Höhe erheblich überschreitet, und dessen Gipfel oft mehr als 1850 m übersteigen, im Cap au Moine sogar eine Höhe von 1944 m erreichen. Diese, im Gebiete eine dominierende Stellung einnehmende, zugleich der ganzen Berglandschaft einen scharf akzentuierten Charakter verleihende Kette, genannt Les Verraux, und ihre, durch den Col de Jaman (1512 m ü. M.) abgetrennte Fortsetzung, der Dent de Jaman (1875 m ü. M.) und der Dent de Merdasson (1868 m ü. M.), wird sowohl gegen Osten (Baye de Montreux-Gebiet) als auch gegen Westen (Quellgebiet der Sarine) durch steile Hänge flankiert.

Der Col de Jaman verbindet Vevey, Montreux und Les Avants mit Montbovon, mit der Gruyère und dem Pays d'Enhaut.

Auf der gegenüberliegenden westlichen Seite gibt es im Talgebiet der Baye de Montreux nur noch vereinzelte Kammscheitel als Erhebungen waldiger Rücken, die nur im *Motard*, 1755 m ü. M., 1600 m übersteigen, während im übrigen Teil die Höhen nicht über 1400 m bis 1550 m hinausgehen. Es hat dies zur Folge, daß das eigentliche Paßgebiet Jaman keinen, oder nur einen unbedeutenden Anteil an den lokalen Windentwicklungen nimmt.²⁾

1. Windverhältnisse.

Nach den soeben erwähnten Untersuchungen von Professor Dr. *Heinrich Gutersohn* über die lokalen Winde im Gebiete der Baye de Montreux, die er mit mir in gütiger Weise im Rahmen des Arbeitsprogrammes der Studien im Forschungsgebiete von Montreux mit Hilfe unseres reichen Beobachtungsmaterials durchführte, lassen sich die auf Col de Jaman herrschenden Winde auf einen Nenner

¹⁾ I. Band, I. Teil, Allgemeines, Kap. 4, Tafeln 5 und 6 nach Seite 70.

²⁾ Vgl. hierüber die Schrift von *Gutersohn H.*: Lokale Winde im Gebiete der Baye de Montreux, Viertel'schr. d. Naturf. Ges. in Zürich, LXXXIII (1938).

bringen. Kurz zusammengefaßt gelangt Prof. Dr. *H. Gutersohn* zu folgenden Schlußfolgerungen¹⁾:

1. Col de Jaman liegt wohl 400—500 m tiefer als die höchsten Punkte der Bergumrahmung des Gebietes der Baye de Montreux. Trotzdem hat die Station keinen oder nur sehr wenig Anteil an den lokalen Windentwicklungen im Gebiet der Baye de Montreux. Sie liegt hierfür bereits zu hoch, ragt also in die obern Schichten unseres Luftraumes, wo vor allem die *allgemeinen* Luftversetzungen der Troposphäre wirksam werden.

2. Bei schönem Wetter (Hochdrucklage), das in Les Pontets, Béviaux, Jor und allen tiefer gelegenen Stationen die sauber durchgebildeten Tag- und Nachtbrisen zur Folge hat, ist auf Col de Jaman Windstille.

3. Bei allen übrigen Wetterlagen hat Col de Jaman den Gradientwind der höhern Luftschichten. Dieser wird nun allerdings durch die Kette von Verraux—Dent de Jaman in die Paßlücke kanalisiert, d. h. in WSW—ENE-Richtung abgelenkt. So gibt es in Wirklichkeit auf dieser Station ausschließlich westliche oder östliche Winde. Sie sind relativ stark, wenn die Achse des Passes mit der Richtung des Gradientwindes korrespondiert, also namentlich bei SW-Wind. Dagegen werden nördliche Winde außer ihrer Ablenkung sehr stark durch die Verraux-Kette abgeschwächt, so daß zeitweise sogar Windstille eintreten kann.

4. Sehr wirksam ist auch der Föhn, weniger durch eine besondere Stärke, als durch Zuführung sehr trockener Luft. Auch er wird aus der süd-nördlichen mehr in die west-östliche, eventuell in die umgekehrte Richtung modifiziert.

Vollständigkeitshalber füge ich vorstehenden Schlußfolgerungen noch eine Tabelle von Professor *Gutersohn* bei, die uns über die Windverhältnisse im Baye de Montreux-Gebiet ein anschauliches Bild liefert.

2. Erforschung des Verhaltens der Winterschneedecke auf dem Col de Jaman.

Allgemeines.

Die Studien über das Verhalten der Winterschneedecke auf Col de Jaman bilden, in Verbindung mit den Schnee- und Lawinenforschungen im Baye de Montreux-Gebiet, einen Bestandteil des Arbeitsprogrammes der im Jahre 1931 durch die *Eidg. Inspektion für Forstwesen* und die *Eidg. Technische Hochschule* ins Leben gerufenen *Schweizerischen Schnee- und Lawinenforschungskommission*. Hier trete ich auf die Untersuchungen auf Col de Jaman ein, soweit es die Schneehöhen und den Schneetransport dieses Passes betrifft.

Ueber die Niederschlagsverhältnisse im Baye de Montreux-Gebiet geben die Zusammenstellungen Tableau No. 15 und No. 15a im Tabellenwerk des I. Bandes, I. Teil, Allgemeines, Erste Abteilung, Anhang, einen klaren Einblick.

Installationen.

Zur Aufstellung gelangte eine meteorologische Hütte mit normaler Ausrüstung (Thermo-Hygrograph, Thermometer und Hygrometer), sowie 15 Schneepegel im Sattelprofil des Passes längs einer Strecke von 417 m (301 m westlich und 116 m östlich des Kulminationspunktes), vgl. Figur 1.

¹⁾ Briefliche Mitteilungen vom 3. November 1940.

Winde im Gebiete des Baye de Montreux.

Tabelle 12

Station:	Schönwetter — Ruhige Wetterlage Brisen	Nebel, Wolken, Schwache Gradientwinde	Starke Abkühlung, ohne Gradientwind Auch Kaltluft- einbruch (Bise)	SW-Regenwind:		Föhn:	
				Gradient < 2,8	Gradient > 2,8	Zyklonalföhn (vaudaire)	Anti- zyklonalföhn
Sonzier und Caux . . .	Tagbrise: Beginn 3 Std. nach Sonnenaufgang, SSW-NNE, Nachtbrise: Beginn mit Son- nenuntergang, Stärke 1 bis 4 m/sec, je nach Jahres- und Tageszeit.	Windstille, hie und da schwache Winde von unentschiedener Richtung.	Kontinuierlicher Hangabwind, Tag und Nacht, bis 5 m/sec.	Andauernder NE (rückläufige Strömung), 3 m/sec. Lüfter- wärmung durch Absteigen.	Andauernder SW, direkte Strömung, 3 m/sec-Sturm.	Bei schwachem Gradientwind kontinuierlicher N-NW, bis 3 m/sec (rückläufig. Str.). Direkter Föhn aus SE selten.	Gewöhnliche Schönwetter- brisen wehen. Föhn steigt nicht ab (Unterschicht der Kaltluft).
Les Avants .	Beginn 4 Std. nach Sonnen- aufgang; mit Sonnenunter- gang bedeutend schwächer als in Sonzier infolge Mulden- lage der Station.	do.	do., bis 3 m/sec.	Unentschiedene Richtung.	SW, schwach — sehr stark.	Föhn schwach. Winde unent- schiedener Rich- tung.	do.
Jor	Tagbrise beginnt erst um Mit- tag, Nachtbrise mit Sonnen- untergang. Beide Brisen in Richtung der Talachse, stär- ker als in Sonzier.	do. Leichte Win- de in beiden Richtungen der Talachse.	Anhaltend tal- auswärts, bis 6 m/sec.	Unentschieden.	SW	Föhn selten.	Windstill.
Col de Jaman	Nur Gradientwinde. Richtung durch das Relief der Paß- lücke modifiziert (NE-SW).	Gradientwind.	Windstille oder Gradientwind.	SW-Gradient- wind.	SW	Direkter Föhn aus SE.	Warmluft senk- recht absteigend.
Les Pontets, Béviaux . .	3- Std. nach Sonnenaufgang beginnen Hangaufwinde, mit Sonnenuntergang Hangab- winde. Beide etwas schwä- cher als in Sonzier.	Wie Sonzier.	Wie Jor, ca. 3 m/sec.	Unentschieden.	SSW	Föhn häufiger als in Les Avants.	Übergangsbiet zwischen Brisen und Antizyklonal- föhn.

Meßapparate.

Für die Ermittlung der Schneehöhen und Schneedichten wurden ein Meßrohr von 1 m Länge und 90 cm² Fläche, aufschließbar, zwei Schneedichte-Zylinder von 0,5 und 1 dm³ Inhalt, sowie eine Präzisionsschneewaage verwendet.

Für die Erfassung der Windstärken stand ein transportables Anemometer (System Fueß) zur Verfügung.

Der schwierige, oft gefährvolle Beobachtungsdienst lag in den bewährten Händen von *Ami Parisod*, Förster der Gemeinde Montreux-Les Planches.

Lage und Gestalt des Paßgeländes.

Ueber die Lage und Gestalt des Col de Jaman und den Standort des Schnee-profils (A—B) und der Pegel gibt die Situation Figur 1 Auskunft. Ein Längs-schnitt des Profils ist den Figuren 2 und 3 beigegeben worden.

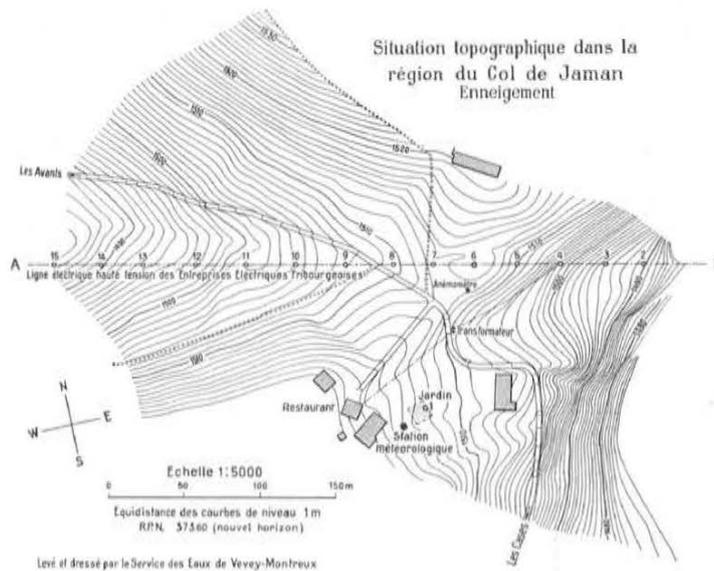


Fig. 1.

3. Ergebnisse.

In den Diagrammen der Figur 2 sind *a* die Ergebnisse der Schneehöhenmessungen an den Pegeln Nr. 2 bis Nr. 15 im Sattelprofil des Col de Jaman im Verlauf der Winter 1934/35 bis 1938/39 und *b* das Profil selbst graphisch dargestellt.

Figur 3, mit den zugehörigen Niederschlagshöhen von *Jor* und *Les Cases*, den Minima und Maxima der Lufttemperaturen von *Jor*, ermöglicht einen tieferen Einblick in das Werden und Vergehen der Schneedecke im Winter 1934/35.

Sie geben in ihrer Gesamtheit ein instruktives Bild der Schneeverhältnisse und des Schneetransportes auf Col de Jaman.

Col de Jaman
Observations nivométriques
exécutées pendant les hivers 1934/35 jusqu'à 1938/39

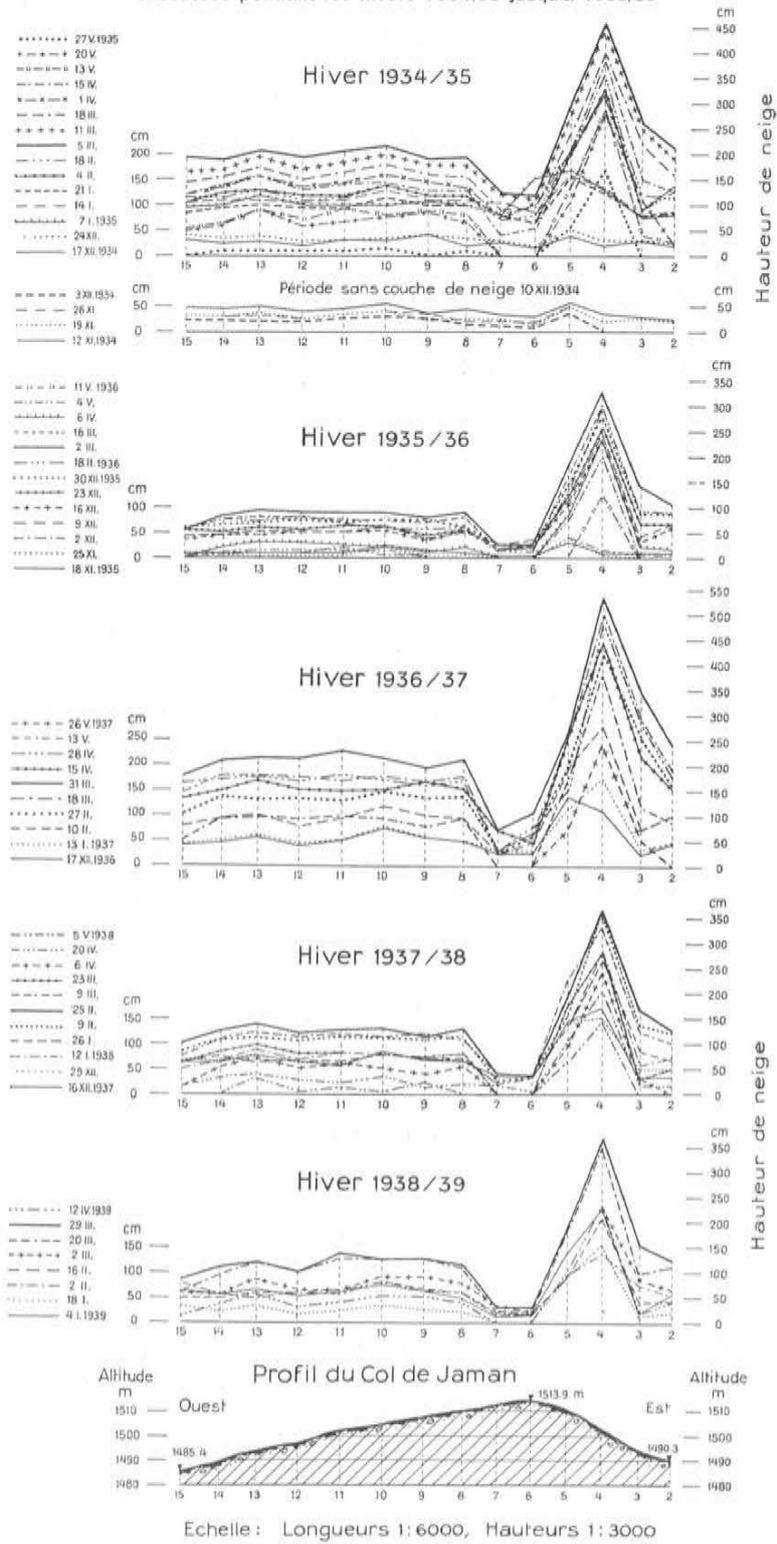


Fig. 2.

Schneehöhen auf dem Col de Jaman

1514 m ü. M., Winter 1934/35

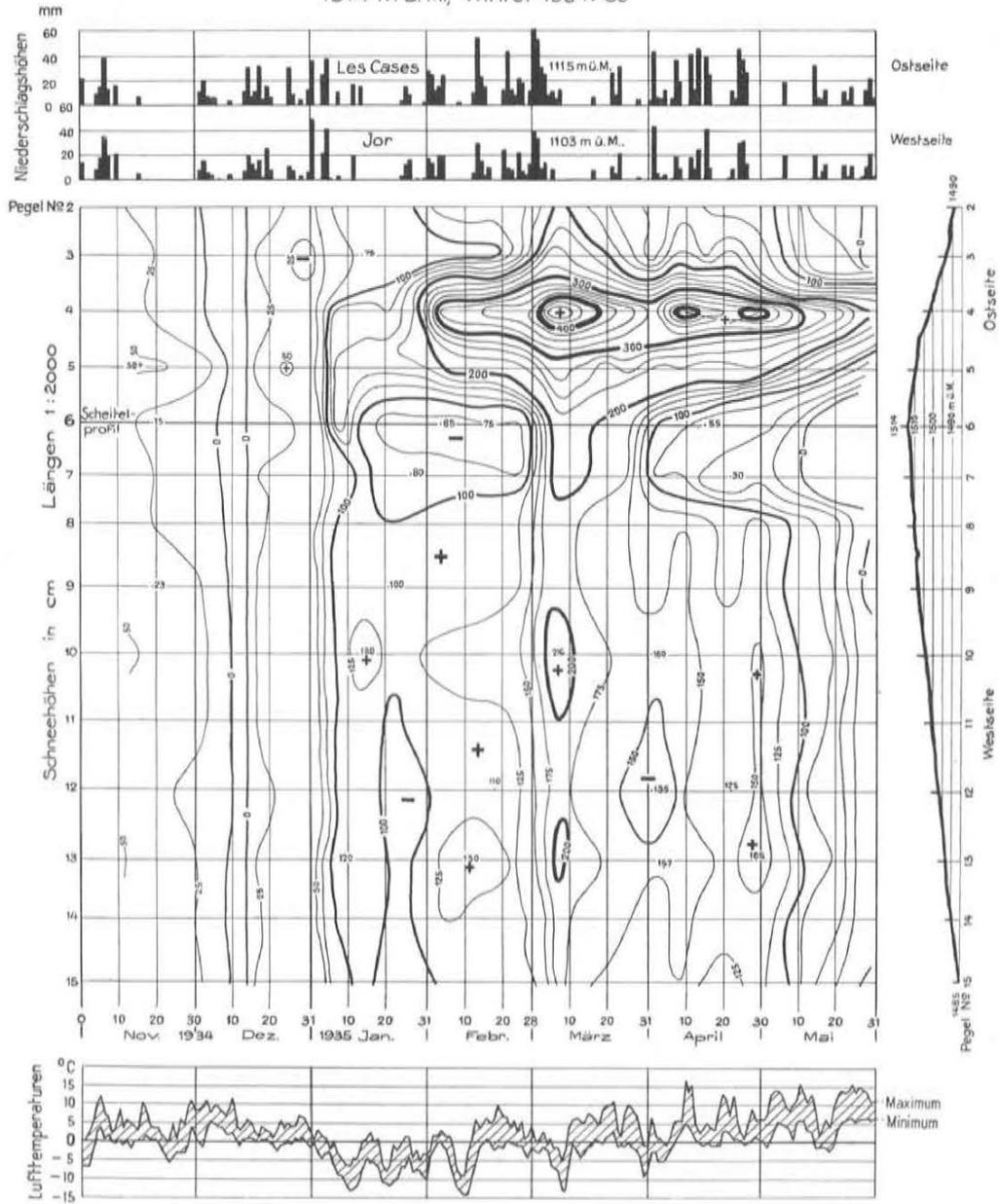


Fig. 3.

4. Ungefähre Berechnung des Schneetransportes auf dem Col de Jaman im Winter 1934/35.

Es bedeuten:	Westseite	Ostseite
Volumen des Niederschlages pro m Breite zu Beginn der Untersuchungsperiode	n_w	n_o
Abnahme dieses Volumens durch Setzung während der Untersuchungsperiode	s_w	s_o
Volumen, die während der Untersuchung der Luvseite innerhalb der Meßstrecke entzogen, oder der Leeseite durch den Wind zugeführt wird	t_w	t_o
Fremdes Material, das der Luvseite außerhalb der Meßstrecke durch den Wind entzogen wird und sich auf der Leeseite innerhalb der Meßstrecke niederschlägt	F_w	F_o
Volumen, das sich auf der Leeseite innerhalb der Meßstrecke niederschlägt	T_w	T_o
Volumen am Ende der Untersuchung	v_w	v_o

Voraussetzungen für die Berechnung:

1. Es werden einzelne Schönwetterperioden betrachtet, in denen sich kein, oder wenigstens nur sehr wenig Niederschlag einstellte. Das Volumen zu Beginn der Untersuchungsperiode n , das durch Auftragen der Schneeprofile und deren Planimetrierung bestimmt werden kann, ist dann folgenden Veränderungen unterworfen: a) der Setzung s , b) dem Windtransport innerhalb der Meßstrecke t und c) der Zufuhr von Schnee durch den Wind von außerhalb der Meßstrecke (Fremdmaterial), der sich auf der Leeseite innerhalb der Meßstrecke niederschlägt. Das Endvolumen des Schnees innerhalb der Meßstrecke kann ebenfalls durch Auftragen der Profile und deren Planimetrierung bestimmt werden.

2. Für die Setzung wird angenommen, daß sie auf der Ost- und Westseite proportional der Schneetiefe erfolgt und im übrigen eine Funktion der Temperatur ist. Die letztere wird auf der Ost- und Westseite gleich vorausgesetzt, so daß also die Setzungen auf den beiden Seiten direkt proportional den Niederschlägen sind. Sofern ihre Größe nicht aus den Profilen n und v genügend sicher bestimmt werden kann, muß sie geschätzt werden.

3. Für ein durch den Wind transportiertes Schneevolumen wird vorausgesetzt, daß es vor und nach dem Transport gleich groß bleibt.

4. Für die Zufuhr von Fremdmaterial von außerhalb der Meßstrecke wird angenommen, daß alles der Strecke zugeführte Material sich auf der Leeseite ansammelt, und zwar innerhalb der Meßstrecke. Material, das über die Meßstrecke hinausgeschleppt wird, kann nicht bestimmt werden, kann aber auch in der Regel vernachlässigt werden.

Gemäß diesen Voraussetzungen ist:

$t_o = + t_w$ Transport innerhalb der Meßstrecke. Bei Westwind kann t_w , bei Ostwind t_o nicht positiv werden, sofern der Wind, resp. der Transport während der Untersuchungsperiode nicht die Richtung gewechselt hat.

$T_w = 0$ für Westwind, da auf der Westseite keine Ablagerung stattfindet.

$T_o = 0$ für Ostwind.

$F_w = 0$ für Ostwind und

$F_o = 0$ für Westwind.

Ferner ist $T_o = t_o + F_w = t_w + F_w$ und ebenso $T_w = t_o + F_o$.

Die erste Formel gilt für Westwind, d. h. Ablagerung auf der Ostseite, die zweite Formel für Ostwind und Ablagerung im Westen.

Allgemein ist:

$n - s$ = Volumen, das sich am Ende der Untersuchungsperiode einstellen würde, wenn kein Transport auftritt. Die Differenz dieses Volumens gegenüber dem tatsächlich gemessenen Volumen v ist also der Transport. Es ist also

$$v - (n - s) = T.$$

Für Westwind gilt also $t_w = v_w - (n_w - s_w)$ t_w wird ohne Windwechsel negativ.

$$T_o = v_o - (n_o - s_o) \quad \text{Ablagerung im Osten.}$$

Für Ostwind sind die Indizes zu vertauschen.

Setzt man noch $s_o = p n_o$ und $s_w = p n_w$, da die Setzung proportional den Niederschlägen ist, so ergeben sich die allgemeinen Berechnungsformeln:

Für *Westwind* $t_w = v_w - n_w (1 - p)$ und $T_o = v_o - n_o (1 - p)$.

Für Ostwind sind die Indizes zu vertauschen.

Für reinen Westwind während der Untersuchungsperiode wird t_w negativ, da der Transport innerhalb der Meßstrecke nicht gegen den Wind erfolgen kann und für das Fremdmaterial angenommen wurde, daß es sich auf der Leeseite niederschlägt. Es muß also:

v_w kleiner oder gleich sein $n_w (1 - p)$, woraus für den Setzungsfaktor p folgt:

$$p \leq 1 - \frac{v_w}{n_w}$$

Diese Gleichung gibt einen Anhaltspunkt für die maximale Größe der Setzung, sofern der Transport während der Beobachtungsperiode nicht die Richtung wechselte.

Mit diesen Grundlagen ergeben sich folgende Werte für den Transport:

1. Periode 22.—25. Dezember. 4 Tage. Westwind.

$$n_w = 45,9 \text{ m}^3 \qquad n_o = 19,7 \text{ m}^3$$

$$v_w = 44,3 \text{ m}^3 \qquad v_o = 20,5 \text{ m}^3$$

$$\text{Daraus ist } p_{max} = 1 - \frac{44,3}{45,9} = 0,035 = 3,5 \%$$

Da der Niederschlag der Vortage bei relativ hohen Temperaturen fiel, ist dieser Wert nicht unmöglich. Berechnet man die Extremwerte für $p = 3,5 \%$ und $p = 0$, so ergibt sich

$$\begin{aligned} T_{max} &= 20,5 - 0,965 \cdot 19,7 = 1,5 \text{ m}^3 & t_w &= 0 \\ T_{min} &= 20,5 - 19,7 = 0,8 \text{ m}^3 & t_w &= 44,3 - 45,9 = -1,6 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

2. *Periode 9.—11. Januar. 3 Tage. Ostwind.*

$$\begin{aligned} n_w &= 156,8 \text{ m}^3 & n_o &= 67,0 \text{ m}^3 \\ v_w &= 174,2 \text{ m}^3 & v_o &= 69,7 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Sowohl auf der West- als auf der Ostseite hat die Schneemasse zugenommen. Der Transport hat also während der Beobachtungszeit die Richtung gewechselt. Die Setzung muß geschätzt werden. Die Temperatur war während der Beobachtungszeit tief, -5 bis -10° , ebenso vor der Beobachtungsperiode. Am 8. Januar fiel wenig Niederschlag (hauptsächlich auf der Ostseite) bei tiefer Temperatur. Die vorhergehenden zwei Tage waren niederschlagsfrei. Der Altschnee hatte sich also mindestens schon drei Tage gesetzt, die Neuschneemasse war gering, so daß die Gesamtsetzung nicht groß sein kann. Aus dem Pegelverlauf ist anzunehmen, daß zu Beginn der Schönwetterperiode der Ostwind einsetzte (siehe Verlauf der Pegel 7 und 10, wo die Schneehöhe zu Beginn der Untersuchungsperiode stieg) und den auf der Ostseite gefallenen Pulverschnee nach der Westseite transportierte. Nachher scheint der Wind gedreht zu haben. Aus dem Verlauf der Schneehöhe bei Pegel 15 ist zu schließen, daß die Ablagerung des Schnees auf der Westseite nicht allein innerhalb der Meßstrecke erfolgte, sondern sich darüber hinaus erstreckte. Die Schneemasse außerhalb der Meßstrecke kann nicht berechnet werden.

Für $p = 0$ wird:

$$\begin{aligned} t_o &= v_o - n_o = 2,7 \text{ m}^3 \\ T_w \text{ min} &= v_w - n_w = 17,4 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Rechnet man mit einer weiteren Setzung des Schnees von 10% innerhalb der drei Tage, so erhält man:

Für $p = 0,1$:

$$\begin{aligned} t_o &= 69,7 - 0,9 \cdot 67,0 = 9,4 \text{ m}^3 \\ T_w \text{ max} &= 174,2 - 0,9 \cdot 156,8 = 33,1 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Das würde bedeuten, daß der Strecke $42,5 \text{ m}^3$ Fremdmaterial aus Osten zugeführt wurde, von denen $9,4 \text{ m}^3$ nach ihrer Ablagerung im Westen wieder zurücktransportiert wurden.

3. *Periode 15.—24. Januar. 10 Tage. Westwind.*

$$\begin{aligned} n_w &= 167,5 \text{ m}^3 & n_o &= 67,0 \text{ m}^3 \\ v_w &= 146,1 \text{ m}^3 & v_o &= 69,7 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$p_{max} = 1 - \frac{146,1}{167,5} = 1 - 0,873 = 12,7 \%$$

Der letzte Niederschlag auf der Westseite fiel am 12. Januar bei tiefer Temperatur. Dieser Neuschnee hat sich bis zum Beginn der Untersuchungsperiode mindestens zwei Tage gesetzt, bei Temperaturen, die zwischen -10° und 0° schwanken. Während der Untersuchungsperiode war die Temperatur dauernd unter 0° . Die oben berechnete maximale Setzung ist daher in Anbetracht der langen Untersuchungsperiode eher zu klein.

Man unterteilt die Periode besser in zwei Einzelperioden.

4. *Periode 15.—20. Januar. 6 Tage. Westwind.*

$$\begin{aligned} n_w &= 167,5 \text{ m}^3 & n_o &= 67,0 \text{ m}^3 \\ v_w &= 152,8 \text{ m}^3 & v_o &= 65,7 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$p_{max} = 1 - \frac{152,8}{167,5} = 1 - 0,912 = 8,8 \%$$

Auch dieser Wert für p_{max} scheint etwas klein zu sein.

Für $p = 10 \%$ ist:

$$\begin{aligned} t_w &= 152,8 - 0,9 \cdot 167,5 = 2,0 \text{ m}^3 \\ T_o \text{ max} &= 65,7 - 0,9 \cdot 67 = 5,4 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

5. *Periode vom 21.—24. Januar. 4 Tage. Westwind.*

$$\begin{aligned} n_w &= 152,8 \text{ m}^3 & n_o &= 65,7 \text{ m}^3 \\ v_w &= 146,1 \text{ m}^3 & v_o &= 69,7 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$p_{max} = 1 - \frac{146,1}{152,8} = 1 - 0,956 = 4,4 \%$$

Dieser Wert ist plausibel, denn der Schnee hatte vor der Beobachtungsperiode mindestens 6—8 Tage Zeit, um sich zu setzen.

Es ergibt sich mit dieser Setzung:

$$\begin{aligned} t_w &= 146,1 - 0,956 \cdot 152,8 = 0 \\ T_o \text{ max} &= 69,7 - 0,956 \cdot 65,7 = 6,8 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

6. *Periode 28.—31. Januar. 4 Tage. Westwind.*

$$\begin{aligned} n_w &= 152,8 \text{ m}^3 & n_o &= 76,4 \text{ m}^3 \\ v_w &= 162,1 \text{ m}^3 & v_o &= 88,5 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Auf beiden Seiten hat das Schneevolumen zugenommen. Die Setzung muß geschätzt werden. Vom 25.—27. Januar fiel total etwa 35 mm Niederschlag bei großer Kälte. Der Altschnee ist mindestens 14 Tage gesetzt. Nimmt man an, daß sich der Neuschnee in den 4 Tagen der Beobachtungsperiode um 50 % gesetzt hat und vernachlässigt die Setzung des Altschnees, rechnet man ferner mit einer mittleren Neuschneehöhe von 15 cm (nach den Profilen eher weniger) und einer mittleren Gesamtschneehöhe von 1,10 m, so beträgt die mittlere Setzung

$$\frac{7,5}{110} = 6,8 \%. \text{ Damit ist:}$$

$$t_w = 162,1 - 0,932 \cdot 152,8 = 19,8 \text{ m}^3$$

$$T_o \text{ max} = 88,5 - 0,932 \cdot 76,4 = 17,3 \text{ m}^3$$

Für $p = 0$ wäre $t_w = 9,3 \text{ m}^3$ und $T_o \text{ min} = 12,1 \text{ m}^3$

7. Periode 6.—8. Februar. 3 Tage. Westwind.

$$\begin{aligned} n_w &= 172,9 \text{ m}^3 & n_o &= 104,5 \text{ m}^3 \\ v_w &= 172,9 \text{ m}^3 & v_o &= 109,9 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

p_{\max} wird hier = 0. Der Transport hat also auch hier die Richtung gewechselt.

Mit $p = 0$ wird

$$t_w = 0 \text{ und } T_{\min} = 109,9 - 104,5 = 5,4 \text{ m}^3$$

Schätzt man $p = 10\%$, so erhält man:

$$t_w = 172,9 - 0,9 \cdot 172,9 = 17,3 \text{ m}^3$$

$$T_{o \max} = 109,9 - 0,9 \cdot 104,5 = 15,9 \text{ m}^3$$

8. Periode 9.—16. März. 8 Tage. Windrichtung nicht ersichtlich.

$$\begin{aligned} n_w &= 301,5 \text{ m}^3 & n_o &= 175,5 \text{ m}^3 \\ v_w &= 266,7 \text{ m}^3 & v_o &= 156,8 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Für Westwind ist

$$p_{\max} = 1 - \frac{266,7}{301,5} = 1 - 0,885 = 11,5\%$$

$$t_w = 0 \text{ und } T_{o \max} = 156,8 - 0,885 \cdot 175,5 = 1,5 \text{ m}^3$$

Für Ostwind würde:

$$p_{\max} = 1 - \frac{156,8}{175,5} = 1 - 0,893 = 10,7\%$$

$$t_o = 0 \text{ und } T_{w \max} = 266,7 - 0,893 \cdot 301,5 = -2,7 \text{ m}^3$$

Der negative Wert ist nicht möglich, denn das würde bedeuten, daß bei Ostwind die Schneemasse im Osten konstant bleiben und im Westen abnehmen müßte. Es ist also mit Westwind und $T_{o \max} = 1,5 \text{ m}^3$ zu rechnen.

In Tabelle 13 sind die berechneten Werte übersichtlich vereinigt.

Schluß.

Stellen wir für die Berechnung des gesamten Schneetransportes im Bereiche dieser Paßlandschaft eine mittlere Breite von rund 500 m in Rechnung, so wurden im Winter 1934/35 dem Baye de Montreux-Gebiet durch den Wind über den Col de Jaman, von Luv nach Lee, total $500 \times 83,0 = 41\,500 \text{ m}^3$ Schnee entzogen. Dieser Schneemasse entspricht ein Wasserwert von ungefähr $20\,750 \text{ m}^3$. Bezogen auf das ganze Einzugsgebiet der Baye de Montreux (Station: Les Gorges du Chauderon, $E = 13,8 \text{ km}^2$), stellt diese Wassermasse eine mittlere Niederschlagshöhe von $\frac{20\,750}{13,8 \cdot 10^6} = 1,4 \text{ mm}$ dar, mit andern Worten:

Der Wasserverlust, den das Untersuchungsgebiet von Montreux im Winter 1934/35 durch den Schneetransport über den Col de Jaman erlitten hat, darf als sehr bescheiden bezeichnet werden.¹⁾

¹⁾ Ihm kommt im Wasserhaushalt des Gebietes für den vorliegenden Fall nur untergeordnete Bedeutung zu.

Schneetransport auf dem Col de Jaman (1514 m ü. M.) im Winter 1934/35.

(Transport pro 1 m Breite.)

Tabelle 13

D a t u m		Dauer Tage	Transport pro Tag in m ³	Gesamttransport in m ³		Bemerkungen
Monat	Tag			West-Ost	Ost-West	
Dezember	22.	4	0,4	1,6	—	
"	25.					
Dezember	26.	14	0,4*	5,6	—	
Januar	8.					
"	9.	3	— 5,8	—	17,4	
"	11.					
"	12.	3	0,9*	2,7	—	
"	14.					
"	15.	6	0,9	5,4	—	
"	20.					
"	21.	4	1,7	6,8	—	
"	24.					
"	25.	3	1,7*	5,1	—	
"	27.					
"	28.	4	4,3	17,2	—	
"	31.					
Februar	1.	5	5,3*	26,5	—	
"	5.					
"	6.	3	5,3	15,9	—	
"	8.					
"	9.	4	1,8*	7,2	—	
"	12.					
"	13.	24	0,2*	4,8	—	
März	8.					
"	9.	8	0,2	1,6	—	
"	16.					
				100,4	17,4	* Geschätzte Werte

Totaler Schneetransport West—Ost = 100,4 — 17,4 = 83,0 m³ pro 1 m Breite.

8. KAPITEL.

Die Bedeutung der Nebel-, Tau- und Reifbildungen im Wasserhaushalt des Hochgebirges.

(Die horizontalen Niederschläge und ihre Wasserwerte.)

A. Allgemeines.

Einen weitem Faktor, der bei der Aufstellung der Wasserbilanz ein gewichtiges Wort mitzureden hat, bilden die Sublimationsprodukte der untersten, erdgebundenen Luftschichten, die *in flüssiger Form — als Nebel und Tau*, und *in fester Form — als Reif* in Erscheinung treten.

Bei raschem Sinken der Temperatur, wie dies z. B. nach Sonnenuntergang beobachtet werden kann, vermag die sich abkühlende warme Luft ihren Gehalt an Wasserdampf, wegen Herabsinkens der Sättigungsgrenze, nicht mehr zu binden. Sie scheidet den Ueberschuß aus. Diese Kondensate setzen sich vorwiegend an Gegenständen ab, die dank ihrer größeren Wärmeleitfähigkeit, schneller abgekühlt werden als die sie umgebende Luft, wobei wiederum solche Gegenstände bevorzugt werden, die durch Ausragen in die Luft weitverzweigte Unebenheiten und somit auch größere Berührungs- und Auffangflächen bilden, wie dies z. B. bei der Vegetationsdecke der Fall ist.

Praktisch brauchbare Verfahren zur Messung solcher Niederschläge gibt es bis heute nur wenige. Allein schon wertvoll sind genaue Beobachtungen über ihr örtliches Auftreten (Lage und Flächenausdehnung) und ihre Dauer. Auftreten, Dauer und Ausdehnung stehen mit dem Relief und mit den örtlichen klimatischen Verhältnissen, den Kleinklimaten des Gebietes, in enger Verbindung; sie sind deshalb meist an bestimmte Orte gebunden und in ihrer hydrologischen Bedeutung, d. h. in ihrer quantitativen Auswirkung auf den Wasserhaushalt, von Gebiet zu Gebiet recht verschieden. Es kommt deshalb diesem Phänomen in der Regel nur lokale Bedeutung zu. Diese Art von Niederschlägen führt in Gegenden mit geringen Sommerniederschlägen, für die Wasserversorgung der natürlichen Vegetation und der Kulturpflanzen zu einem beachtenswerten Ausgleich. Nebel-, Tau- und Reifbildungen werden durch unsere Niederschlagsmesser meist nicht erfaßt und doch gehören sie der Gruppe der Niederschläge an, die die Gesamtwassereinnahme des Bodens im Wasserhaushalt eines Flußgebietes ausmacht.

Die bisher für unsere Untersuchungen über den Wasserhaushalt im Schweizer Hochgebirge in Rechnung gestellten Niederschlagswerte sind also um den Betrag dieser ungemessenen Horizontalniederschläge geringer, deshalb sind auch die Differenzgrößen aus Niederschlag und Abfluß für langjährige Mittelwerte der Landesverdunstung etwas zu klein. Ueber die Größe dieser horizontalen Niederschläge, die, wie bereits oben hervorgehoben, von Gebiet zu Gebiet stark wechselt und nur durch Sonderstudien und Messungen in jedem einzelnen Territorium bestimmt werden kann,

sind wir noch im unklaren.¹⁾ Ihre genaue Kenntnis ist nicht nur für die Ermittlung der Landesverdunstung von großem Wert, sondern sie gibt auch Anhaltspunkte über die Bedeutung dieser Erscheinung für die Quellbildung.²⁾

Es würde zu weit führen, in dieser Arbeit auch auf die Gefahren und Schadenereignisse, die durch Reifbildungen in verschiedenen Gegenden und in verschiedenem Ausmaße auftreten, näher einzutreten. Im Hochgebirge ändern sich diese von Höhenstufe zu Höhenstufe, je nach der klimatischen Eigenart jedes einzelnen Bezirkes einer Landschaft.

B. Nebelbildung.

Nebel besteht aus feinsten Wassertröpfchen von etwa 0,02 mm Durchmesser, die sich schwebend in der Luft erhalten können, da ihre Fallgeschwindigkeit wegen des Luftwiderstandes eine sehr geringe ist; sobald diese Wassertröpfchen aber auf Widerstände stoßen, vereinigen sie sich zu großen Tropfen und gleiten natürlich ab. Aus ihrer bisher horizontalen Bewegung wird eine vertikale. *Süring* nennt solche Niederschläge, im Gegensatz zu Regen und Schnee, *horizontale Niederschläge*. Auch der Rauhreif (Duftanhang) gehört in diese Kategorie, obschon er sich, seiner Entstehung nach, grundsätzlich vom Tau unterscheidet. Im Hochgebirge, wo der Nebel bekanntlich alle Richtungen einzunehmen pflegt, kann von horizontalen Niederschlägen nur in beschränktem Maße gesprochen werden.

Ruhender, dichter Nebel kann bis 5 g Wasser pro m³ enthalten, so daß zur Gewinnung von 1 mm Niederschlag alle Wassertröpfchen aus einer 200 m hohen Nebelschicht abgefangen werden müßten.³⁾

Daß die einem Wald zukommende Niederschlagsmenge durch Nebel erhöht werden kann, ist längst bekannt und beobachtet worden. Ebenso wissen wir, daß das Maß dieser Art Niederschläge von Ort zu Ort, je nach der Lage des Waldbestandes, der Größe und Dichte der Kronen, sowie der Dauer, Dichte und Bewegung des Nebels, großen Schwankungen unterworfen ist. Man braucht ja nur bei Nebel und Wind durch ein Waldgebiet zu wandern, um solche örtliche Unterschiede lebendig vor Augen geführt zu bekommen.

Bei der Suche nach einem brauchbaren Meßgerät zur Messung des Nebeltaues, Nebelreißens, der Nebeltraufe, macht Prof. Dr. *Alt*, Dresden, den Vorschlag, hierfür Glas- oder Aluminiumstäbe zu verwenden. Nebeltröpfchen, die auf solche Stäbesysteme stoßen, werden, den Stäben entlang gleitend, in einem darunter befindlichen Auffanggerät gesammelt. Die ersten Versuchsergebnisse mit derartigen Meßgeräten ließen den allgemeinen Schluß zu, daß an Nebeltagen an besondern Stellen im Wald der Niederschlag reichlicher ausfallen kann als in offenem Gelände des gleichen Gebietes.⁴⁾

¹⁾ Vgl. *Hellmann G.*: System der Hydrometeore, Abhandl. des Preuß. Meteorol. Instit., Bd. 5, Nr. 2, Berlin 1915, und

Fischer K.: Niederschlag, Abfluß und Verdunstung des Weserquellgebietes. Jahrb. f. d. Gewässerkunde Norddeutschlands, Besond. Mitteilg. Bd. 4, Nr. 3, Berlin 1925.

²⁾ Vgl. *Linke F.*: Niederschlagsmessungen unter Bäumen. Meteorolog. Zeitschr. 1916, S. 140—141 und 1921, S. 277.

³⁾ *Hann J.*: Meteorol. Zeitschrift 1916, S. 549.

⁴⁾ *Rübner K.*: Der Nebelniederschlag im Wald und seine Messung. Tharandter Forstliches Jahrbuch, Bd. 83, Berlin 1932, S. 121—149.

Eine eigentliche Beobachtungsstation wurde von *K. Rubner* beim *Forsthaus Kriegswald im Erzgebirge*, 745 m ü. M., erstellt und in den Zeiträumen 1928/29 bis und mit 1931 und 1932 bis und mit 1934 in Betrieb gehalten. Sie besteht aus drei Einzelanlagen. In geringer Entfernung vom Nordrand eines etwa 100jährigen Fichtenbestandes inmitten einer ältern Fichtenkultur ist ein Nebelmeßgerät mit zwei kleinen Regennessern aufgestellt; im 100jährigen Fichtenbestand selbst befindet sich ein zweites Nebelmeßgerät, um das herum vier große Regennesser mit einer Auffangfläche von je 0,5 m² gruppiert sind; endlich steht, südöstlich des vorgenannten und ungefähr 250 m von ihm entfernt, in einem Pflanzgarten unmittelbar neben dem Forsthaus ein dritter Nebelmesser.

Das Nebelmeßgerät besteht aus einem gewöhnlichen Regennesser mit 500 cm² Auffangfläche, über dem 56 konzentrisch angeordnete, etwa 1 m lange Aluminiumstäbe so befestigt sind, daß sie sich gegenseitig nicht berühren und mit ihrem freien Ende in das Meßgerät hineinragen. Ein steiles Dach, so weit vorgezogen, daß ein seitliches Hineinwehen von Regen nicht möglich ist, schützt die Anlage vor Regen und Schnee. Die Ablesung erfolgt, wie beim Regennesser, in mm Niederschlag pro 1 m² Auffangfläche. Beginn und Ende der Beobachtungsperioden sind natürlich durch die Witterung bedingt, wobei die Winterzeit, wegen der Schnee- und Eisverhältnisse, für die Beobachtung nicht in Betracht fällt. Dadurch entziehen sich allerdings die nebelreichsten Monate der Messung.

Der Leitgedanke der Vergleichsversuche war, den horizontalen Nebelniederschlag innerhalb und außerhalb des Waldes zu verfolgen, seine Größen festzustellen und miteinander zu vergleichen.¹⁾

Zusammenfassend gelangt *Rubner* auf Grund sechsjähriger Nebelmeßbeobachtungen im *Erzgebirge* zu folgenden Ergebnissen.

1. Das Nebelmeßgerät hat sich bewährt.
2. Die in der Vegetationszeit (Mai bis und mit September) auf den Waldboden gelangenden Nebelniederschläge sind zahlenmäßig sehr gering und betragen auf den Quadratmeter vertikale Auffangfläche höchstensfalls 1—2 mm; höhere Nebelniederschläge können im April sowie im Oktober und November erfolgen.
3. Diese geringen Meßergebnisse gewinnen aber doch eine gewisse Bedeutung, da, je nach dem Baumbestand, die vertikale Auffangfläche bis zum 20-, ja selbst 28fachen steigen kann; dagegen ist andererseits zu bedenken, daß nur ein geringer Prozentsatz des feinen Nebelniederschlages auf den Waldboden gelangt, im Durchschnitt schätzungsweise 10 %.
4. Große Bedeutung hat aber der horizontale Niederschlag durch seine Verbindung mit dem vertikalen. Jener benetzt die Nadeln und Blätter und läßt dann auch schwachen Regen leichter auf den Waldboden gelangen, als dies ohne Nebelniederschlag der Fall wäre. An besonders Stellen im Bestand kann dann der Gesamtniederschlag denjenigen des Freilandes wesentlich, bis 30, 40, ja selbst 50 % übersteigen.
5. Im Winterhalbjahr können die Nebelniederschläge dem Waldboden hohe, ja vielleicht sehr hohe Wassermengen zuführen, die für seine Wasserwirtschaft Bedeutung haben dürften.²⁾

In der Schweiz sind m. W. solche oder verwandte Untersuchungen bis heute nicht ausgeführt worden. Sie bilden aber einen Bestandteil des in Aussicht genommenen Arbeitsprogrammes der kommenden Jahre.

¹⁾ Vgl. *Rubner K.*: Der Nebelniederschlag im Wald und seine Messung. Tharandter Forstl. Jahrbuch, Bd. 86, Berlin 1935, S. 330—342.

²⁾ Bisher konnte *Rubner* im Winter wegen des meist herrschenden Frost- und Schneewetters mit dem Nebelmeßgerät nur gelegentliche Beobachtungen ausführen. Seine bei der *Talsperre Carlseid im Westerbirge in 900 m Höhe* vorgenommenen Messungen ergaben für die erste Dezemberhälfte 1934 sehr hohe Waldniederschläge.

C. Taubildung.

Die *Taubildung* wird namentlich durch starke Wärmeausstrahlung in klaren Nächten, sowie durch solche Faktoren begünstigt, die die absolute, und zugleich auch die relative Feuchtigkeit erhöhen. Sie kann in günstigen Fällen (an schattigen Orten) schon vor Sonnenuntergang beginnen und bis Sonnenaufgang dauern. Baumblätter und Gras gehören zu den besten Wärmestrahler, sie kühlen bei Nacht am stärksten unter die Lufttemperatur ab, nach *Hann* bis zu 6–8 °, und betauen sich am stärksten. Es entstehen erst kleinere, dann immer größere Tropfen, die schließlich, wie bekannt, in ihrem Gesamtausmaß Wassermengen ergeben, deren Größe im Wasserhaushalt eines Flußgebietes nicht mehr vernachlässigt werden darf.

Neben dem meßbaren Tauniederschlag entsteht noch ein innerer Tauniederschlag im Boden durch Aufnahme und Verdichtung von Wasserdampf aus der Luft in der nachts abgekühlten, obersten Bodenschicht.

Eine dritte Art von Tauniederschlag bildet sich durch Aufsteigen der Bodenluft aus den unteren, wärmeren Bodenschichten in die abgekühlten Oberschichten.¹⁾ Ein weiterer Kondensationsvorgang vollzieht sich aus den Pflanzen.

Wohl das einfachste Verfahren, und vielleicht das genaueste, ist das von *Par-chinger*, das darin besteht, zur Zeit der Taubildung Fließpapier auf den Boden zu legen und auf dem Wege der Gewichtsbestimmung die Taumenge zu erfassen.²⁾

Wichtig für die Aufstellung der Wasserbilanz ist, daß der bei der Taubildung ausgeschiedene Wasserdampf, teils aus der Feuchtigkeit der untern Luftschichten, teils direkt aus dem Boden, somit aus *gemessenem und ungemessenem* Niederschlag stammt, und daß ein Teil des Taus von der Vegetation wieder aufgenommen wird.³⁾ Dies ist namentlich dann der Fall, wenn der Boden wenig Wasser enthält.

Ueber die Wassermengen, die bei Taufall in *Eberswalde* bei Berlin, 50 m ü. M., auf den Boden gelangen, gibt uns *J. Bartels* wertvolle Auskunft. Sie sind im Vergleich zum normalen Niederschlag gering. Nur an Nebeltagen ergibt sich negative Verdunstung für die Nacht; im Durchschnitt erreichte die Zunahme aber nicht einmal 0,1 mm. Auch in Einzelfällen geht der Betrag des Taus nicht über 0,3 mm

¹⁾ Der Vorgang im ackerbebauten Land ist kurz folgender. Direkt an der Erdoberfläche ist die Erwärmung unter dem Einfluß der Sonne und die Abkühlung unter dem Einfluß nächtlicher Ausstrahlung der anstehenden Luftschichten so groß, daß bei diesem Tagesgang der Temperatur gegen Morgen (im Herbst auch schon am Abend) der Sättigungspunkt dicht am Boden erreicht und überschritten wird, wodurch sich die Erdoberfläche beschlägt. Im Boden drin muß es eine Zone geben, wo die kapillaren Luft-räume konstant feuchtigkeitsgesättigt sind; die obersten Bodenschichten sind aber zur Zeit der Taubildung nur stundenweise geschwängert. Das «wissen» auch die Regenwürmer, die nach *Darwin* tagsüber ihre Kanäle sorgfältig verstopfen, um offenbar Wasserverluste ihres Wirkungsfeldes zu verringern.

²⁾ Vgl. *Visser S. W.*: Ein neuer Tauregistrierapparat. *Meteorolog. Zeitschr.*, Bd. 51, 1934, S. 388–390. Ueber weitere Meßverfahren sei auf die hier angeführten Literaturnachweise hingewiesen.

³⁾ Durch sinnreiche Versuche gelang es *Erhard Hiltner*⁴⁾ nachzuweisen, daß die Blätter der von ihm untersuchten Pflanzen imstande sind, Tauwasser aufzunehmen. Es handelt sich also nicht mehr um die bloße Taumenge in Millimeter als Niederschlagsersatz, sondern um eine tiefgreifende physiologische Wirkung des Taus im Wasserhaushalt der Pflanze. Ab 1931 wurden von *Rudolf Fleischmann*⁵⁾ fünf Jahre lang an der agrarmeteorologischen Station *Kompolt* am Nordrand der Großen Ungarischen Tiefebene mittels einer *Hiltnerschen* Tauwaage Messungen ausgeführt, auf die raumeshalber nur hingewiesen werden kann.

⁴⁾ *Hiltner E.*: Der Tau und seine Bedeutung für den Pflanzenbau. *Wissenschaftliches Archiv für Landwirtschaft*, Band 3, Heft 1, Berlin 1930.

⁵⁾ *Steiner Ludwig* und *Fleischmann Rudolf*: Taumessungen in *Kompolt* am nördlichen Rande der Großen Ungarischen Tiefebene. *Reichsanstalt für Meteorologie und Erdmagnetismus*, Band XII, Budapest 1936.

hinaus. Nur bei «nässendem Nebel» setzt sich bis zu 1 mm Wasser am Boden ab; die großen Tropfen fallen aber so schnell aus, daß man in diesem Fall eher von eigentlichem Niederschlag als von Tau sprechen kann.

Wenn man die Verdunstung in Taunächten vergleicht mit der durchschnittlichen Verdunstung in allen heitern Sommernächten, so kann man sich die Wirkung des Taufalls so vorstellen, daß er die durchschnittliche nächtliche Verdunstung von 0,3 mm aufhebt.¹⁾

Wenn nun *Wollny* die Jahreshöchstmenge des aus der Luftfeuchtigkeit stammenden Niederschlages für *München* (520 m ü. M.) auf 30 mm²⁾, im Einzelfall auf 0,1—0,2 mm im Tag schätzt, und wir ganz willkürlich dafür die Hälfte in Rechnung stellen, so zeigt diese Größe deutlich genug, daß sie im Vergleich mit den von unsern normalen Niederschlagsapparaten erfaßten Niederschlägen nur einen bescheidenen Teil ausmacht. 15 mm, gegenüber einer normalen Niederschlagsmenge sagen wir von 1500 mm, sind genau 1 %. Auf die Landesverdunstung übertragen, ergibt sich allerdings ein anderes Bild. Setzen wir für die Landesverdunstung eine mittlere Größe von 300 mm ein, so ergibt sich daraus ein Wert von 5 %. Das ist nun eine Größe, die vom modernen Standpunkt der Gewässerkunde betrachtet, nicht mehr außer acht gelassen werden darf. Diese kurze Ueberlegung zeigt deutlich genug, wie empfindlich die Landesverdunstung, hervorgegangen aus dem Unterschied zwischen Niederschlag und Abfluß, auf solche Faktoren reagiert.

Vom 26. Juli bis zum 1. August 1922 haben wir auf der Hopschenwiese, westlich des *Simplonpasses* (2025 m), mit Hilfe von kreisrunden Glasschalen (Durchmesser = 290,5 mm, Höhe = 80 mm, Fläche = 676,2 cm²), in Verbindung mit unsern Verdunstungsmessungen am Hopschensee³⁾ einige sorgfältige Taumessungen⁴⁾ ausgeführt, die folgende Ergebnisse zeitigten:

25./26. Juli 1922	= 0,10 mm	30./31. Juli 1922	= 0,13 mm
26./27. «	* = 0,05 mm	31. Juli/1. Aug. «	= 0,08 mm.
29./30. «	« = 0,10 mm		

Dürfen auch diese relativ erheblichen Kondensationsbeträge in keiner Weise verallgemeinert werden, so machen sie doch ersichtlich, daß dem Tau im Wasserhaushalt des Hochgebirges eine gewisse Rolle zufällt. Das nämliche geht eindeutig auch aus dem pflanzenfreundlichen Einfluß des Taues hervor. Die Messungen, so bescheiden ihre Zahl auch ist, zeigen klar, wie frühere Schätzungen sehr oft zu hoch bewertet wurden.

Bemerkenswert ist ferner, daß sich Tau auch in unsern Meßgefäßen niederschlägt. Ein Teil davon wird gemessen, ein anderer Teil fällt der Verdunstung an-

¹⁾ *Bartels J.*: Verdunstung, Bodenfeuchtigkeit und Sickerwasser unter natürlichen Verhältnissen. Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen, April 1933, S. 217, Berlin 1933.

²⁾ Für *Oberitalien* ergaben sich etwa 45 mm, während sie für die Tropen in einer Nacht mit reichlicher Taubildung an der Loangoküste (Teil der Westküste Niederguineas) auf 3 mm geschätzt wurde.

Wollny E.: Untersuchungen über die Bildung und die Menge des Taues. Forschungen auf dem Gebiete der Agrikultur-Physik. Band XV, S. 111—151, Heidelberg.

³⁾ *Maurer J. und Lütshg O.*: Einige Ergebnisse über die Verdunstungsgröße freier Wasserflächen im schweizerischen Hochgebirge. Annalen der Schweiz. Meteorol. Zentralanstalt 1923, 60. Jahrg., Zürich 1924.

⁴⁾ Ich verzichte an dieser Stelle auf Angaben über Temperatur, Feuchtigkeit usw.

heim. Unsere Versuche im Saastal und auf dem Simplonpaß bestätigen dies einwandfrei. Durch systematische, andauernde und gleichlaufende Versuche mit geeigneten Gefäßen und Lysimetern sollte es möglich werden, der zahlenmäßigen Trennung der effektiven Taumengen aus Boden und aus Luft beizukommen.

Welche Bedeutung dem Tau in bestimmten Klimaten zukommt, geht recht deutlich aus den sogenannten *Himmels- oder Tauteichen* hervor, die sich auf den Hügeln der Kreideformation Englands seit undenklichen Zeiten vorfinden und wahrscheinlich jungsteinzeitlichen, manchmal auch künstlichen Ursprungs sind. Es sind kleine, flache Teiche, die stets Wasser enthalten, obwohl sie keinen Zufluß besitzen. Solche Teiche können künstlich angelegt werden; auf trockenen, wasserlosen Höhen sind sie oft von großem Nutzen. Sie enthalten selbst in trockensten, heißen Sommern stets Wasser, das sich nach Entnahme selbsttätig immer wieder ergänzt, selbst wenn Brunnen und Wasserläufe vollständig versiegt sind.

Das Wasser stammt aus der Luft. Es ist Kondensationswasser. Je niedriger die Temperatur der Teichfläche gegenüber der der umgebenden Luft geworden ist, um so mehr Tau setzt sich ab. Die Temperaturerniedrigung bei den Tauteichen wird durch Strahlung gegen den Weltraum in klaren Nächten erzeugt, wodurch sich eine so große Taumenge bilden kann, daß sich der kreisförmige Behälter von rund 10 m Durchmesser und 1 m Tiefe mit Wasser füllt.

Lehrreich ist nun, wie solche Tauteiche hergestellt werden; es soll noch heute eine Gruppe herumziehender Fachleute geben, die sich mit der Anlage solcher Teiche beschäftigen.

Vorerst wird die Teichschale durch Aushebung des Grundes geschaffen, dann wird die Sohle durch sorgfältiges dichtes Belegen mit Stroh vom Untergrund isoliert. Auf diese Strohunterlage kommt eine Abdichtung von feuchtem, sehr gut durchgeknetetem plastischem Lehm, worüber eine dichte Schicht Steine folgt. Es muß dafür Sorge getragen werden, daß die Lehmschicht das Stroh vollständig bis weit über den Rand hinaus deckt, damit keinesfalls Wasser ins Stroh dringen kann, d. h. seine Isolationsfähigkeit aufheben würde. Die Strohschicht isoliert die obere Lehmschicht gegen die Bodenwärme. In klaren Nächten kühlt sich nun die obere Lehmschicht bis unter den Taupunkt ab, ohne daß vom Boden Ersatzwärme einströmen kann. Der kondensierte Wasserdampf füllt nun den Teich stets wieder mit Wasser an.¹⁾

Wie wir gesehen haben, kommen im Gebirge zu den gemessenen Niederschlagsmengen außer starker Taubildung noch erhebliche Wasserdampfvverdichtungen bei Berührung bewegter, dampfesättigter Luft mit festen Gegenständen, vor allem mit Pflanzen. Der Pflanzenwuchs wirkt aber auch als Nebelfang. Die Wassermengen, die sich hierbei ergeben, werden unter natürlichen Verhältnissen meist nicht so groß sein, wie sie bei künstlichen Versuchsanordnungen gefunden worden sind; unberücksichtigt werden sie aber auf die Dauer nicht bleiben können. Die Gewässerkunde würde sonst im Hinblick auf nebelreiche Gebiete immer häufiger auf Fälle stoßen, in denen der Abfluß größer ist als der Niederschlag.

Mit zunehmender Höhenlage nimmt natürlich die Wirkung des Pflanzenwuchses als Nebelfang ab. Die Vegetation wird immer spärlicher, die Vegetationszeit eine kürzere. Die Arten des Mittellandes treten allmählich zurück, der Laubwald bleibt hinter uns, bald auch der Nadelwald, eine Art und auch eine Pflanzengesellschaft nach der andern verschwindet. Erst betreten wir den Strauch- und Mattengürtel, dann die alpine Region und gelangen weiter aufwärtssteigend in die nivale Zone: die ausgesprochene Hochgebirgsnatur, charakterisiert durch eine rasche Abnahme des Pflanzenlebens nach Größe, Fläche, Masse und Vegetationsdauer mit der ihr eigenen Felsenflora, nimmt uns auf.

¹⁾ Aus dem Nachlaß von Prof. Claude du Bois-Raymond, Neue Zürcher Zeitung, 15. Dez. 1926, Blatt 5, Mittagsausgabe Nr. 2057, Technik Nr. 31. (Umschau, Heft Nr. 47.)

In welchem Maße dieser Wechsel in den Pflanzenarten und Pflanzengesellschaften auf die Verdunstung des Hochgebirges einzuwirken vermag, läßt sich zahlenmäßig nicht leicht bestimmen. Wie oben hervorgehoben, erfaßt die gewöhnliche Messung des Niederschlages die Kondensationsprodukte nicht, die unmittelbar an der Erdoberfläche und ihrem Pflanzenkleid erfolgen. Es ist deshalb nicht ausgeschlossen, daß gewisse Abweichungen der Landesverdunstungswerte vom Durchschnittsverhalten, hervorgegangen aus der Differenz zwischen Niederschlag und Abfluß, namentlich wenn sie Mittelgebirgs- und Hochgebirgslandschaften betreffen, von ungleichen Kondensationsgrößen solcher Art herkommen.

D. Reifbildung.

*Rauhreifbildungen*¹⁾ treten im Hochgebirge vorwiegend in Gegenden auf, wo sich bei Frostwetter Nebelwolken oder wärmere, feuchte Luftmassen in Bewegung befinden.²⁾ Durch den Anprall des Nebels auf unter dem Gefrierpunkt abgekühlte Gegenstände setzen sich die verdichteten Tröpfchen an der Windseite von Sträuchern, Bäumen, Zäunen usw. in Form von Eisblättchen oder auch von kristallinen Häufchen als Rauhreif (Duft) an und lassen eine trübe, neblige Winterlandschaft binnen wenigen Stunden in zartestem Weiß erglänzen. Je länger die Abkühlung andauert, um so stärker werden die Eisgebilde.

Eine weitere Erscheinung, bei der sich Luft abkühlt und ihren Wasserdampf verdichtet, ist, wie bereits bei der Taubildung hervorgehoben, die Wärmeausstrahlung in klaren Nächten. Sinkt die Temperatur der untern Luftschichten und der Erdoberfläche unter den Gefrierpunkt, so entsteht statt des flüssigen Taus fester Reif; es setzt sich ein Reifkügelchen ans andere an. Auf den Schneeflächen³⁾ scheidet der in der Atmosphäre vorhandene Ueberschuß an Wasserdampf feine Kristalle aus. Dieser kristallinische Rauhreifansatz stellt sich im Gebirge naturgemäß häufig ein, in vergletscherten Gebieten auch im Sommer. In der Aufstellung der Wasserbilanz von Flußgebieten muß der Rauhreif auf Schnee, Firn und Gletscher als Zuwachs, als Einnahme gebucht werden. Die kristallinen Rauhreifansätze sind oft für die Art der Schneeschichtenbildung von entscheidendem Einfluß. Sie bilden in ihrer Gesamtheit eine rauhe, unebene Angriffsfläche, die beim nächsten Niederschlag dem Schnee mehr oder weniger festen Halt gewährt und den Grund einer neuen Schneeschicht bildet.

Manche Gegenden unserer Alpen leiden zuweilen Schaden an Rauhreifbildungen, namentlich dann, wenn zur Zeit der kalten Frühjahrsnächte die Last des Rauhreifs hoffnungsvolle Bestände niederbricht, oder wenn durch Loslösung der an steilen

¹⁾ C. Kaßner unterscheidet den kristallinischen *Rauhreif* (Fiedern oder Plättchen), dann den aus unterkühlten Tröpfchen und Sublimation in kegel- oder kugelförmigen Zapfen gebildeten *Rauhrost* und das klare oder undurchsichtige, nicht kristallinische *) *Rauhreis*, aus erstarrten Wassertröpfchen ähnlich dem Glatteis entstanden. Im Gegensatz zu dem auf waagerechter Fläche sich bildenden Reif entstehen die Rauhformen an der Windseite von senkrechten Flächen (C. Kaßner: Wolken und Niederschläge, Berlin 1926).

*) Auch die kugeligen Formen bilden Federn und Säulchen (d. Verf.).

²⁾ Auf die *Glatteisregen*, die in gewissem Sinne diesem Abschnitt zugehören und die im Hochgebirge, wenn auch nicht oft, so doch in Erscheinung treten und entsprechend ihrer Entstehungsart von den Niederschlagsmessern erfaßt oder nicht erfaßt werden, soll hier, der Vollständigkeit wegen, nur hingewiesen sein. Zweifellos kommt ihnen im Wasserhaushalt des Hochgebirges nur in vereinzelt Fällen Bedeutung zu (vgl. Lehrbuch der Meteorologie von Hann, 4. Aufl., 1926, S. 269, und Lehmann Otto: Glatteisregen. Schweiz. Zeitschr. für Forstwesen, Nr. 1, Jahrg. 1940).

³⁾ Ueber Eisblumenbildungen auf den Oberflächen der Eisdecken der Oberengadiner Seen wird im 3. Teil des 1. Bandes berichtet.

Talgehängen festgefrorenen Rauhrostmassen (meist bei Temperaturanstieg) Lawinen entstehen und zu Tal stürzen. Solche Schadenereignisse treten natürlich in den einzelnen Bezirken in sehr verschiedenem Ausmaße auf.

Auf die Entstehung von «Haareis», «Eisbalken», «Eisnadeln», «Kammeis» auf Boden, Torf, Mauerwerk, Erdklümpchen, Gesteinstrümmern, an Pflanzenstümpfen, an Baumstämmen und abgefallenen Zweigen, ferner auf die Bildung von Höhleneis, sowie auf das Phänomen des Glatteisregens usw., für deren Bildung wohl hauptsächlich das Vorhandensein eines mit Wasser gesättigten Kapillarsystems angenommen werden darf, kann hier nicht eingetreten werden.¹⁾ Dagegen verdienen die Kristallbildungen auf Eisflächen von Seen um so eher eine besondere Würdigung, als es uns gelungen ist, hierüber einige präzise Messungen zur zahlenmäßigen Bestimmung ihres Wasserwertes durchzuführen.

Im 3. Teil des 1. Bandes: «Die Eis- und Schneeverhältnisse auf den Oberengadiner Seen, insbesondere auf dem St. Moritzer See», werden wir diesen Gebilden nähertreten.

1. Eigentümlichkeiten von Rauhreifbildungen am Totalisator auf dem Säntisgipfel in 2504 m ü. M.

Zum besonders lästigen Störenfried für die Niederschlagsmessung wird unter gewissen Umständen der *Rauhreif*. In besondern Lagen vermag er die Auffangfläche der Sammler teilweise oder vollständig zu verstopfen.

Hierüber folgendes Beispiel:

Zustand
am 11. März 1939



Photo
E. Hostettler

Fig. 4.

Rauhreifbildungen im März 1939 am Totalisator auf dem Säntisgipfel, 2504 m ü. M.

Witterungsvorgang:

5. März 1939. Starker Wind aus W-SWS. Schneefall. Temp. um -4° C. Gegen Abend steigende Temp. Eisbildung. Nebel.

6. März. Sehr starker Wind aus W. Dichter Nebel. Nebelregen mit Eisnadeln. Temp. -1 bis -2° . Eisbildung. Gegen Abend Schneefall. Auffangfläche des Totalisators am Abend noch Eigröße.

7. März. Starker Weststurm, bis 110 St/km. Dichter Nebel. Schnee- und Eisnadeln. Starke Eisbildung. Temp. um -3° . Gegen Abend sinkende Temp. bis -11° mit starkem Schneefall. Mittags Auffangfläche des Totalisators geschlossen.

¹⁾ Vgl. hierüber: *Schulze Karl*: Ueber die Entstehung der Eis- und Salz-Ausblühungen. Meteorol. Zeitschr., Bd. 54, Heft 11, Nov. 1937, S. 423–426.

8. März. Starker Westwind mit kräftigem Schneetreiben. Temp. -11° bis -14° . Dichter Nebel.

9. März. Starker Westwind. Dichter Nebel und Schneefall. Temp. um -14° .

10. März. Schwacher Wind aus NW. Nebel und starker Schneefall. Temp. um -12° .

11. März. Schwacher Nordwind. Nebel mit kurzen Aufhellungen. Zeitweise Schneefall.

Jeden Abend starke Elmsfeuer.

Niederschlagshöhen. 5. März 1939 = 4,2 mm; 6. März = 16,8 mm; 7. März = 64,5 mm; 8. März = 44,2 mm; 9. März = 14,7 mm; 10. März = 22,7 mm; 11. März = 29,8 mm.

Die Eiskappe der Totalisatorenöffnung unter der Schneehaube bestand aus blankem Wassereis von etwa 8 cm Dicke. Ohne mechanische Reinigung würde ein solcher Verschluß einige Wochen anhalten. (E. Hostettler.)

Rauhreif und Eisbildungen treten aber nicht nur am Totalisator auf dem Säntis, sondern auch an andern freien Objekten dieses selbständigen Bergmassivs bei jeder Schlechtwetterperiode von September bis Mai auf. Der stärkste Ansatz vollzieht sich jedoch von Oktober bis März bei feuchtem Nebel, Schneefall, starkem Wind und Temperaturen von -1 bis -8° . Wenn diese Faktoren zusammentreffen, dann vermögen oft Rauhreif- und Eisbildung unglaubliche Dimensionen anzunehmen. Bei solchem Wetter ist der Säntiswärter genötigt, morgens und abends die Auffangfläche des Totalisators von den Rauhreifansätzen zu befreien, ansonst sie sich innerhalb von ein bis zwei Tagen völlig schließen würde.¹⁾ Der sich bei stürmischem Wind ansetzende Rauhreif ist sehr hart und vermag sich bei tiefbleibender Temperatur wochenlang zu erhalten.

Um sich ein Bild von der Stärke solcher Gebilde im Säntisgebiet zu machen, sei nachstehendes wiedergegeben. Die Starkstromleitung der Säntisbahn besteht aus 12 mm starken Stahldrahtseilen. Bei starkem Rauhreif wachsen diese Seile zuweilen innerhalb 2—3 Tagen zu 20—25 cm dicken Walzen an, was wegen Ueberlastung in der Regel zu Kabelbrüchen führt.

Aus vorstehenden Ausführungen muß der Schluß gezogen werden, daß an Totalisatoren, aufgestellt in klimatisch mit dem Säntisgebiet verwandten Gegenden, ähnliche Vorgänge möglich sind, d. h., daß große Schneefälle, eingeleitet durch vorangehende, meist ein- bis mehrtägige Stürme bei dichtem Nebel und Temperaturen von -2 bis -10° , nur zum Teil in den Niederschlagssammler gelangen; sie zeigen ferner, daß dem Rauhreif in bestimmten Bezirken, hydrologisch beurteilt, große Bedeutung zukommt. Es ist deshalb notwendig, vom Bau von Niederschlagsstationen in Gegenden mit Rauhreifbildungen²⁾ nach Möglichkeit abzusehen. Wo sich solche über weite Flächen ausdehnen, erfordert der Beobachtungsdienst eine besonders sorgfältige Wartung und Beaufsichtigung der Meßgeräte.

In unsern Forschungsgebieten konnte eine teilweise oder gar vollständige Verstopfung der Auffangfläche durch Rauhreif bis heute nicht festgestellt werden. Der Rauhreif bildet überhaupt in sämtlichen in Untersuchung gezogenen Gebieten keinen beträchtlichen Anteil des festen Niederschlages.

¹⁾ Bericht vom 15. September 1937 von Säntiswart E. Hostettler an den Verfasser.

²⁾ Reifbildungen in großem Ausmaße sind vor allem ein Phänomen von Berggipfeln und Bergkämmen in besonderer Lage und Höhe.

2. Rauhreifmessungen an einer Lärche und einer Arve in St. Moritz-Bad.

(Bestimmung des Wasserwertes.)

Aufgabe. Der Wasserwert des Rauhreifes an einer Lärche und einer Arve soll bestimmt werden.

Lage der Bäume: Sie stehen in freier Lage des Talgrundes von St. Moritz-Bad, ungefähr 500 m taleinwärts vom Kurhaus, und ungefähr 200 m landeinwärts vom rechten Innufer, 30 m voneinander entfernt. Sie liegen auf gleicher Höhe, wenig über dem Niveau des St. Moritzer Sees und stehen somit ungefähr unter den gleichen Bedingungen.

Zeitpunkt: Die Messungen erfolgten am 22. und 23. Dezember 1942 durch die Organe des Elektrizitätswerkes der Gemeinde St. Moritz unter der Leitung von Direktor *Th. Hauck*.

Die erste Messung fand am 22. Dezember statt, nach 2—3 Tage dauerndem kaltem Wetter und starkem Nebel während der Nacht, der tagsüber jeweilen von 10—17 Uhr wieder verschwand. Die günstige Witterung hielt genau 24 Stunden an, so daß eine zweite Messung an beiden Bäumen ausgeführt werden konnte.

Meteorologische Verhältnisse: Hierüber geben Aufzeichnungen des Thermohygrographen der Beobachtungsstation am See bei der Punt da Piz Auskunft. Die Station liegt etwa 1,5 km östlich der beiden Bäume (talabwärts) und weist daher leicht veränderte Verhältnisse auf.

Vorgang der Messung: Große schwarze Tücher wurden unter die Bäume gelegt und diese astweise mit einer Latte gehörig abgeschüttelt, hierauf der Rauhreif sorgfältig in Kessel abgefüllt und in milder Temperatur zum Schmelzen gebracht.

Ergebnisse: Tabellen 14 und 15 geben sowohl über die Größenverhältnisse der Lärche und der Arve als auch über die Ergebnisse der Messungen, ausgedrückt in kg Gewicht und mm Niederschlag, Auskunft.

Rauhreifmessungen an Lärche.

Die Oberfläche, auf welche der Rauhreif geschüttelt wurde, betrug 12,5664 m².

Tabelle 14

Datum	Wasserwert des abgeschüttelten Rauhreifes	mm Wasser/Oberfläche
22. Dezember 1942	6,5 kg	0,52 mm
23. " 1942	4,15 "	0,33 "
14. " 1943	43,7 "	3,5 "

Rauhreifmessungen an Arve.

Die Oberfläche, auf welche der Rauhreif geschüttelt wurde, betrug 7,0686 m².

Tabelle 15

Datum	Wasserwert des abgeschüttelten Rauhreifes	mm Wasser/Oberfläche
22. Dezember 1942	4,3 kg	0,51 mm
23. " 1942	1,62 "	0,23 "
14. " 1943	16,6 "	2,3 "

Die Ergebnisse zeigen, daß die Lärche einen wesentlich stärkeren Reifansatz aufweist als die Arve. Teilweise erklärt sich dies aus der verschiedenen Größe der Bäume, dann aber auch aus der geringeren Verästelung der Arve. Auch der ungleiche Aufbau der Nadelbüschel, sowie die verschiedene Struktur der Rinde dürften dabei eine Rolle spielen.

Für unsere Zwecke ergibt sich aus diesen Messungen neuerdings die wichtige Tatsache, daß dem Rauhreif im Wasserhaushalt des Oberengadins untergeordnete Bedeutung zufällt, auch wenn zugegeben werden muß, daß es sich bei den vorliegenden Messungen nicht um starke Reifansätze handelte. Diese Folgerung wird noch durch die Tatsache unterstützt, daß das raumgreifende Auftreten solcher Gebilde im Oberengadin als sehr bescheiden bezeichnet werden muß.

Rauhreifbildungen an Bäumen im Oberengadin.

(Bestimmung der Wasserwerte.)



Fig. 2.

Photo A. Pedretti.

Lärche am Inn bei Samaden.



22. Dezember 1944.

Fig. 3.

Photo A. Steiner.

Arve in St. Moritz-Bad bei der «Villa l'En».
Zustand vor dem Schütteln.



Fig. 4.

Photo A. Pedretti.

Lärche und Arve
in der Innschlucht bei St. Moritz.



Fig. 5.

Photo A. Steiner.

Arvenzweig
in der Nähe des Bootshauses am St. Moritzer See.

Rauhreifbildungen an Bäumen im Oberengadin.

(Bestimmung der Wasserwerte.)

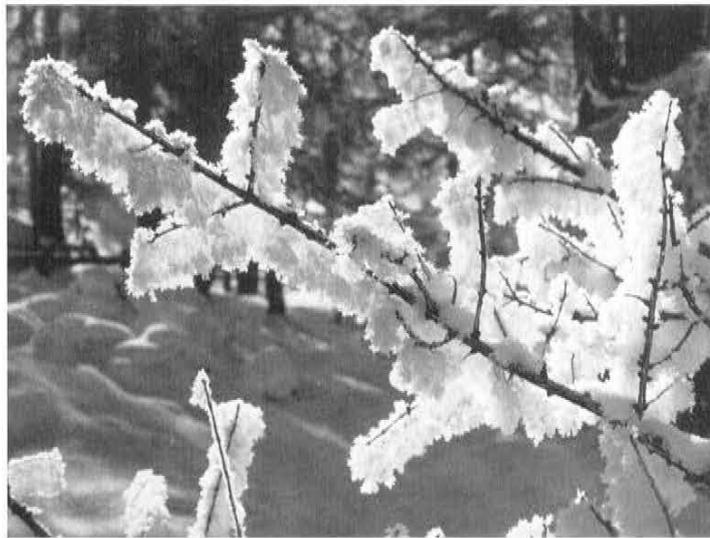


Photo A. Steiner.

Fig. 6.

Lärchenzweig

bei Punt da Piz am Inn beim Ausfluß des St. Moritzer Sees.



Photo A. Steiner.

Fig. 7.

Junge Bergföhren
bei Maloja.



Photo A. Steiner.

Fig. 8.

Kleine Bergbirke
am St. Moritzer See beim Bootshaus
nächst dem Ovel da la resgia.

