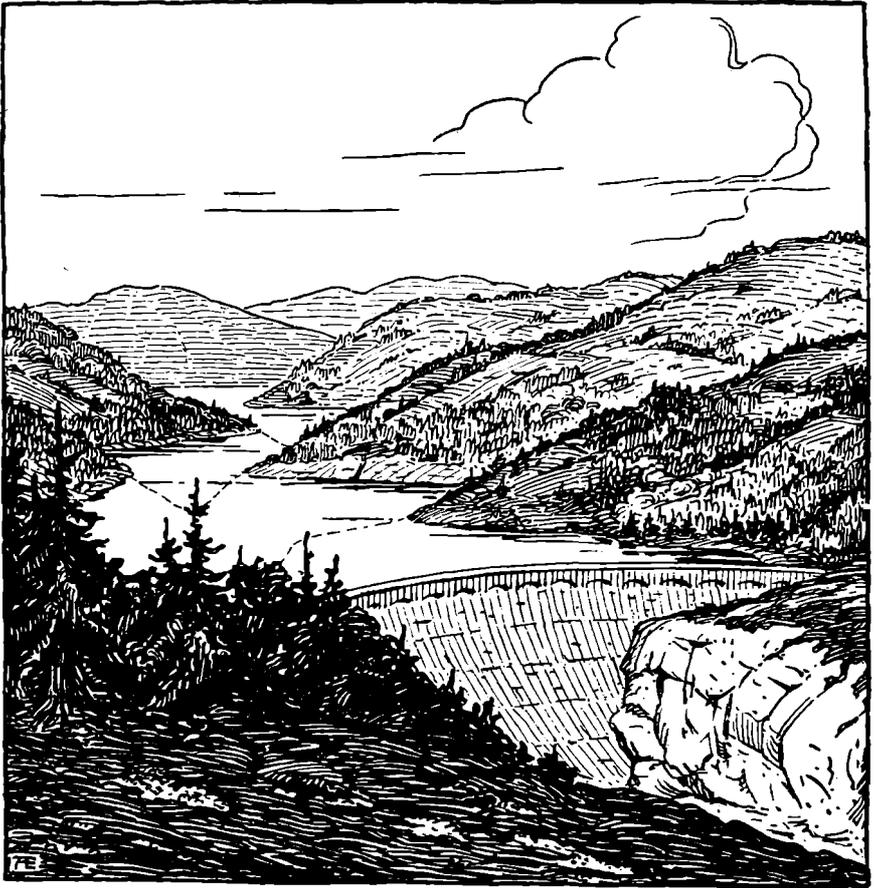


Kunst und Literatur.

Vor kurzer Zeit erschien im Verlage von »Leykam«, Graz, eine kurzgefaßte Erläuterung des „**Gesetzes der Wasserbewegung im Gebirge**“ von Hofrat Dr. Alex. Tornquist, o. ö. Professor der Geologie an der Technischen Hochschule in Graz. Diese Schrift, die sich in erster Linie mit der geologischen Grundlage für die technische Auswanderung der Wasserkräfte im Allgemeinen befaßt, bietet für Fachleute eine Fülle von Momenten, die der Ausnützung der Wasserkräfte ihre Arbeit widmen. Die Probleme, die hier Prof. Tornquist aufrollt, sind — wie er schon in der Vorrede erläutert — zum Großteil auf Grund eigener Anschauung erläutert. Die Schrift bietet trotz ihrer Kürze in jedem der Kapitel viel neues und wertvolles; durch einfache Skizzen wird der Anschauung vollkommen Genüge getan. Besonders dankbar muß man Herrn Prof. Tornquist für das letzte Kapitel seiner Schrift sein: Wasserkraft und Naturanlagen, Heimatschutz. Wohltuend berührt es, daß der Autor der Schönheit der Landschaft gedenkt und es nach Möglichkeit vermieden wissen will, das schöne Landschaftsbild durch die Bauwerke von Kraftanlagen zu zerreißen. Hier findet man wichtige Fingerzeige, die es ermöglichen sollen, selbst bei großangelegten Stauwerken, das harmonische Landschaftsbild nicht zu stören. Vortrefflich wirkt die erste Abbildung der Talsperre in der oberen Teigtisch, wo durch die Staumauer und den dadurch entstandenen See die Schönheit der Landschaft sogar gehoben wird. — Es wäre nur wünschenswert, wenn man gerade bei uns in Steiermark recht bald und häufig Gelegenheit hätte, Tornquist's Schrift in die Tat umzusetzen, dem Lande zum Nutzen und uns zur Ehre.

Ing. Mayer.



Talsperre in der oberen Teigitsch (Koralpengebiet bei Graz) für das Kraftwerk Edelschrott, projektiert von der Steirischen Wasserkraft- und Elektrizitäts-A.-G. Mittels einer 80 m hohen Staumauer wird das Gesamtgefäll eines 4 km langem Talstückes in einem künstlichen Stausee akkumuliert. Das durch den Aufstau des 4 km langen und 30,000.000 m³ Wasser enthaltenden Stausees ertrunkene Talrelief ist durch die gestrichelten Linien angedeutet. (Von der Steirischen Wasserkraft- und Elektrizitäts-Gesellschaft in Graz zur Verfügung gestellt.)

Das Gesetz der Wasserbewegung im Gebirge.

Die geologische Grundlage
für die technische Auswertung
der Wasserkräfte

Von
Hofrat Dr. Alexander Tornquist
o. ö. Professor der Geologie
an der Technischen Hochschule in Graz

1 9 2 2

„L e y k a m“-V e r l a g i n G r a z

Die fortschreitende Ausnützung der Kräfte, welche im Flußnetz unserer Gebirge lebendig sind, läßt es von praktischem Interesse erscheinen, die theoretischen Grundlagen, auf welche hier technisch aufgebaut wird, zu beherrschen. Die Grundlage, welcher sich die Hydrologie und in jedem einzelnen Fall die technische Ausführung von Großwasserkraftanlagen bedienen muß, ist wesentlich eine geologische. Die folgenden Darlegungen sind nicht etwa in dem Sinne als theoretisch anzusehen, daß sie lediglich durch Überlegungen am Schreibtisch entstanden sind, vielmehr sind die Probleme fast durchwegs auf Grund von Beobachtungen im Gebirge erkannt und der Lösung näher gebracht worden. Als theoretisch haben sie aber zu gelten, da die zahlenmäßige Ermittlung größtenteils noch aussteht und ihre volle praktische Auswertung das Sammeln weiterer Erfahrungen voraussetzt, für welches zugleich die Anregung gegeben wird.

Einleitung.

- I. Der Kreislauf des Wassers (die Wassermenge).
 - II. Das Flußsystem (die Großwasserkraftwerke).
 - III. Das Flußbett (Grundwasser und Baugrund).
 - IV. Die Karseen (Speicherwerke).
- Schlußwort.
- V. Wasserkraftwerke und Naturschutz.

I.

Der Kreislauf des Wassers.

Die zu gewinnende lebendige Kraft unserer Flüsse ist eine Äußerung des Kreislaufes, welchen unermüdlich ein absolut bedeutender Teil unserer Hydrosphäre auf der Erdoberfläche und in den unteren Regionen der Atmosphäre ausführt: von der Verdunstung vor allem an der Oberfläche der Ozeane durch die auf die Erdoberfläche fallenden Niederschläge (Meteorwässer) bis zur Rückkehr durch unsere Flußnetze in das Meer.

Die Energie, welche diesen Kreislauf treibt, stammt von der Sonne, sie besteht aus der unserer Erde ständig zufießenden Wärme. Die Energie der Sonnenwärme erreicht an der oberen Grenze der Erdatmosphäre pro Tag und cm^2 720 g/Kal., etwa die Hälfte dieser Wärme wird beim Durchtritt durch die Erdatmosphäre bis zur Oberfläche der Erd feste absorbiert. Die andere Hälfte kommt auf der Erdoberfläche, d. h. an der Grenze der Atmosphäre mit dem Meere und den Kontinenten, auf einer relativ sehr dünnen Sphäre zur Auswirkung und löst hier aus diesem Grunde so bedeutende Wirkungen aus wie an keinem anderen Ort. Es sind bisher nur tastende Versuche gemacht worden, die auf die Erdoberfläche treffende Wärme direkt in technisch brauchbare Kräfte umzusetzen. Ein Abfangen der Sonnenstrahlen durch riesige Hohlspiegel unter gleichzeitiger Konzentrierung der Kraft auf einen kleinen Raum, von dem aus die Umsetzung in technisch verwertbare Energie möglich erscheint, führte bisher noch nicht zu brauchbaren Resultaten. Dagegen sehen wir in unserer derzeit größten Energiequelle, in unseren Stein- und Braunkohlenablagerungen sowie in den Erdöl- und Erdgasvorkommen die direkte Aufspeicherung der Sonnenenergie — allerdings vergangener Erdzeiten — durch die unter dem Einfluß der Sonnenwärme vollzogenen biologischen Prozesse.

Diesen Energiequellen gegenüber stellen die im Kreislauf des Wassers frei werdenden Kräfte indirekte Quellen zur Ausnützung der Sonnenenergie dar.

Aus diesen Mittelzahlen lassen sich die in einem ebensöhlig vermessenen Entwässerungsgebiet unserer nördlichen Alpen fallenden Niederschläge annähernd berechnen.

Von der errechneten Niederschlagsmenge verdunstet aber ein großer Teil sehr bald wieder, ein anderer Teil dringt in den Boden ein, während es nur einem Bruchteil der Niederschläge beschieden ist, das vorhandene Flußnetz zu speisen. Auch auf den Vorgang der Verdunstung wirkt die Vegetationsdecke und besonders der Wald stark konservierend ein, besonders in den regenreichen, größeren Höhen unserer Gebirge. Der Wald behindert den die Verdunstung intensiver fördernden Wind und vor allem seine Streudecke saugt die fallende Feuchtigkeit wie ein Schwamm intensiv auf. Im Durchschnitt dürfte die Verdunstung sich in folgenden Zahlen ausdrücken:

Höhenregion	Vom Niederschlag verdunstet	
	im freien Gelände	im bewaldeten Gelände
0—400 m	55%	32%
400—700 „	30%	18%

Nach einem starken vorübergehenden Regenfall bilden die aus dem Walde auch dann noch austretenden Nebel, wenn der kahle Felsabhang schon längst wieder trocken ist, eine gute Anschauung dieser Verhältnisse.

Besonders der Hochgebirgswald fördert demnach die Ergiebigkeit der eintretenden Niederschläge als solche und trägt außerdem in bedeutendem Maße dazu bei, daß die fallenden Niederschläge auch der Erdoberfläche und damit dem weiteren Kreislauf des Wassers erhalten bleiben. Sein Vorhandensein ist aber ferner auch noch von größtem Einfluß auf diejenige Wassermenge, welche der Erdoberfläche selbst entzogen wird, in den Boden dringt und dort das vorhandene Grundwasser speist.

Die Förderung der Bodenfeuchtigkeit und die dadurch erzielte Erhöhung des Grundwasserspiegels durch die Waldbestände im Hochgebirge ist eine allgemein bekannte Tatsache. In vielen Teilen des Hochgebirges, im durchlässigen Gestein, wird durch Kahlschlägerung eine spätere Wiederaufforstung äußerst schwierig und ein weiteres Gebiet bodentrocken. Der Wald erhöht im Hochgebirge demnach überall die Bodenfeuchtigkeit, andererseits werden Teile der römischen Campagna durch Aufforstung entsumpft, ihnen wird durch Aufforstung Bodenfeuchtigkeit entzogen. Dieser Widerspruch löst sich durch die folgende Überlegung. Die Vegetation führt dem Boden stets in erhöhtem Maße Teile des Niederschlagswassers zu, aber andererseits entzieht sie ihm aber auch durch ihre Wurzeln Wasser. Es kann nun in niederschlagsarmen Gebieten der Fall sein, daß Bäume, die zudem noch starken Wasserbedarf haben (Eucalyptus), dem Boden mehr Wasser ent-

ziehen, als die Menge an Wasser beträgt, welche aus den geringen Niederschlägen im Übermaß durch die Vegetation dem Boden erhalten wird. In niederschlagsreichen Gebieten, wie im Hochgebirge, kann das niemals der Fall sein, weil dort der dem Boden unter der Einwirkung der Baumvegetation im Übermaß zukommende Wasserbetrag stets ein Vielfaches des vom Wald benötigten Wurzelwassers ausmacht.

Die Menge des in den Boden eindringenden Wassers ist jedenfalls außerordentlich wechselnd. Ein Moos- oder ein weicher Grasboden, eine dichte Waldstreudecke saugen die Niederschläge intensiv und schnell auf und geben sie dann langsam an den Boden ab. Mehr wie im mit dichter Vegetationsdecke bedeckten Gelände ist die im Boden verschwindende Wassermenge im freien Gelände vom Böschungswinkel und von der Gesteinsbeschaffenheit der oberen Bodenschichten abhängig. Besonders der in unseren größeren Ebenen und tertiären Hügelländern deckenartig verbreitete poröse Lehm fördert das Eindringen des Wassers in die Tiefe ungemein. Auch die stets klüftigen Kalk- und Granitgebirgstelle leiten das Wasser leicht in die Tiefe im Gegensatz zu Schiefergebieten oder Hügelgelände mit tertiären Tonböden. Ein in der Praxis vollkommen undurchlässiges Gestein gibt es nicht, im übrigen ist die Feststellung der Wasserdurchlässigkeit der Gesteine und Böden ein sehr schwieriges Kapitel, da die Korngröße des Gesteins, die Lagerungsweise der Körner, der Gehalt an Kolloiden, die Wasserkapazität und die Klüftigkeit von Einfluß sind. Es ist ferner die Wasserfassungskapazität von der Wasserdurchleitungskapazität zu trennen. Die Sickerwassermengen in den Gesteinen wachsen außerdem im gleichen Gestein nicht nur prozentuell, sondern steigend bei zunehmender Niederschlagsmenge unter dem Druck und der stärkeren Flußbewegung des Wassers. Unter diesen Gesichtspunkten sind die folgenden Zahlen zu beurteilen.

Ort	Bodenart	Mit oder ohne Vegetation	Regenfall	Sickerwasser in % des Regenfalles		
				Sommer	Winter	Jahr
Görlitz	Lehm	ohne	652 mm	45·6	29·9	41·0
Görlitz	sandiger Lehm	ohne	652 „	42·4	37·7	40·5
Moholz	Lehm	mit	739 „	36·0	92·0	58·7

Wir gehen nicht sehr fehl, wenn wir berechnen, daß die Sickerwässer in vegetationslosem Boden bei Lehm, Kalk-, Granit-, Porphyr- und Basaltfelsen auf durchschnittlich 40 % des Regenfalles und bei schwer durchlässigem Boden auf 15 % anzusetzen sind. Im Mittel dürften auf den peripheren Kontinentalflächen zirka 30 % der Niederschläge in den Boden als Sickerwässer verschwinden und dem Grundwasser zufließen.

Wir sehen dann, daß von den rund

100.000 km^3 Wasser der gesamten Niederschläge auf den für die Gewinnung der Wasserkräfte in Betracht kommenden Festlandsflächen 30 % sofort wieder verdunsten und 30 % als Sickerwässer verschwinden, so daß 40 %, das sind:

40.000 km^3 Wasser jährlich den Flußsystemen zugeführt werden.

Wir werden später sehen, daß allerdings wiederum nur ein bestimmter Teil dieser jährlichen Wassermenge im oberirdisch fließenden Flußsystem erscheint und somit der Ausnützung der Flußenergie zur Verfügung steht, während ein kleiner anderer Teil in dem Schotterbett der Flüsse unterirdisch fließt.

40.000 km^3 Wasser pro Jahr entsprechen 1,266.000 m^3 Wasser pro Sekunde. Da nun die mittlere Meereshöhe der peripheren, das heißt der mit einem Abfluß zum Meere versehenen Kontinentalteile auf 300 m geschätzt werden kann, so würde diese Wasserbewegung in allen Flußsystemen im Bereich der peripheren Teile der Erde etwa 3800 Millionen PS* oder ca. 3000 Millionen KW entsprechen. Tatsächlich technisch gewinnbar kann mit Rücksicht auf die vorhandenen großen Tiefen nur ein Zehntel, also 380.000.000 PS oder 300.000.000 KW angesprochen werden.

In dem bei Österreich verbliebenen Teil der Steiermark mit rund 16.500 km^2 Bodenfläche und 950 mm jährlicher Niederschlagsmenge, von der 40 % im Flußsystem erscheint, fließen jährlich 6000 Millionen m^3 oder pro Sekunde 200 m^3 Wasser ab. Diese ergeben bei der durchschnittlichen Erhebung des Landes von 600 m über den Vorländern 1.200.000 PS, von denen in diesem ausgesprochenen Gebirgsland etwa ein Drittel, also 400.000 PS technisch gewinnbar erscheinen. Das entspricht 315.000 KW.

Nunmehr ist es aber zunächst von Bedeutung festzustellen, welche Teile unserer Flußsysteme zur Gewinnung der Energie in Betracht kommen.

Die vorstehende Betrachtung liefert aber die notwendige Grundlage für eine Anzahl später zu besprechender Probleme zur Erfassung der Wasserkräfte, welche sich in einzelnen Fällen mit größtem Vorteil auch auf die Grundwasserverhältnisse und damit auf die Beurteilung der auftretenden Sickerwassermengen zu beziehen haben.

* Die in PS ausgedrückte Kraft des fließenden Wassers berechnet sich aus der Formel $PS = 10 \times Q \times H$; die KW aus der Formel $KW = \frac{1000 \times Q \times H \times 0,75}{102}$, wobei Q die in m^3 ausgedrückte fließende Wassermenge in der Sekunde und H das durchschnittliche Gefälle des Landes, das heißt die mittlere Erhebung des Landes über der Erosionsbasis (s. S. 24) bedeutet.

II.

Das Flußsystem.

Das oberflächlich abfließende Wasser bildet sich selbsttätig das Flußsystem aus. Jung gebildete Flußsysteme zeigen einfache Verzweigungen, eine geringe Ausdehnung vor der Mündung, alte Flußsysteme weisen eine feinste Verästelung in unzählige Nebenflüsse und Quellbäche auf und erstrecken sich überall bis an die Grenze der Wasserscheiden gegen die benachbarten Systeme. Diese Flußsysteme von weit vorgeschrittener Ausbildung sind von den benachbarten im Hochgebirge durch schmale, hohe Berggrate getrennt, die wenig vorgeschrittenen sind von den benachbarten durch breite Bergmassive oder Plateaus geschieden. Die Ausbildung eines jungen Flußsystems in ein reifes geht durch den Vorgang der Regression vor sich, das heißt, die drei zu unterscheidenden großen Flußstücke, der Unterlauf mit seinem geringen Gefäll, der Mittellauf von durchschnittlich mittlerem Gefäll und der Oberlauf mit dem stärksten Gefäll bis in das Quell- oder Sammelgebiet, verschieben sich dauernd talaufwärts. Die obersten Erosionsrinnen der Quellflüsse greifen dauernd weiter gegen die Wasserscheide vor, bis sie diese selbst erreicht haben, der obere Teil des Mittellaufes okkupiert die unteren Teile des Oberlaufes und der obere Teil des Unterlaufes greift in die unteren Teile des Mittellaufes langsam vor, so wie es das untenstehende Schema zeigt.

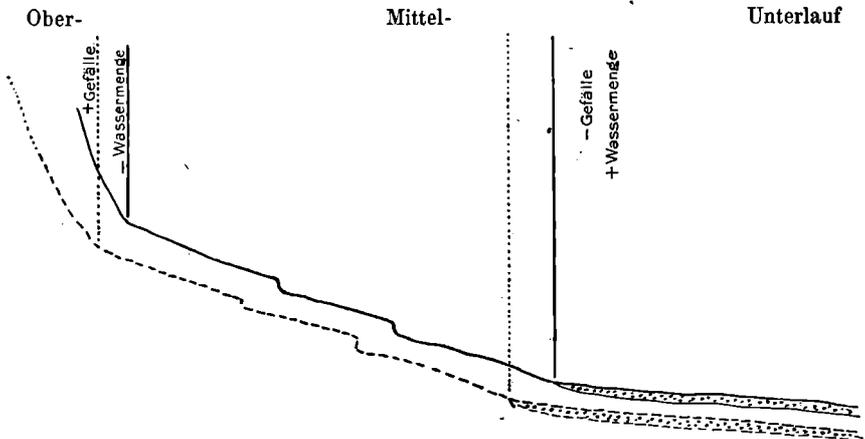


Fig. 1. Die ausgezogene Linie stellt das Profil des älteren, die punktierte Linie des jüngeren Flußlaufes dar, die Rückverlegung des Unter-, Mittel- und Oberlaufes und der Gefällstufen im Laufe der Zeit zeigend.

Die technische Ausnützung des Wassergefälls eines Flusses hat an jenen Stellen zu erfolgen, wo das größte Gefäll des Flusses mit der größten Menge des fließenden Wassers zur Verfügung steht. Der Oberlauf eines jeden der Quellflüsse enthält eine zu geringe dauernd fließende Wassermenge, der Unterlauf ein zu geringes Gefäll. Für die Dauer- ausnützung kommt daher der Mittellauf der Flüsse in Betracht, der Oberlauf liefert nur zeitweise unter bestimmten, später zu besprechenden Bedingungen Wasser für die sogenannte „Spitzenversorgung“.

Der Mittellauf kommt umso eher für die Ausnützung der Wasserkraft in Betracht, je wechselnder in ihm das Gefäll ist. Der lange Mittellauf unserer Flüsse passiert überall eine so große Anzahl verschiedenartiger Gesteine, welche der erodierenden Wirkung des Wassers außerordentlich verschiedenen Widerstand entgegensetzen und ferner eine so große Anzahl von durch die Verschiebung der einzelnen Teile des Untergrundes, besonders des Hochgebirges, entstandener tektonischer Linien und Zonen (Verwerfungen und Faltenzügen), daß er zum Glück für den in diesem Fall angestrebten Zweck in keinem Fall durchwegs eine einfache Gefällslinie aufweist, wie sie das schematische Profil I zeigt. Unsere großen Ströme, wie der Rhein und die Donau, weisen in ihrem Mittellauf in bunter Reihenfolge Talstücke von außerordentlicher Verschiedenheit auf. Beide Ströme durchmessen in mehrfachem Wechsel mehr oder weniger ausgedehnte Ebenen und dann wieder enge Erosionsdurchbrüche. Dieser Wechsel ist darauf zurückzuführen, daß der heutige Strom eine Aneinanderreihung von Talstücken darstellt, welche ein sehr verschiedenes Alter besitzen. Es kehren in dem jungen Talstücke die Merkmale des jungen Oberlaufes, das stärkere Gefäll, wieder, während sich in den alten Talstücken bereits Erscheinungen, welche im allgemeinen für den Unterlauf bezeichnend sind, wie die Bildung vieler Flußarme und Altwässer, einstellen. Die einzelnen Talstücke gehörten ursprünglich anderen Strömen an und sind dann erst später zu dem heutigen Stromlauf zusammengefügt worden. Flußverlegungen in größtem Ausmaß sind vor allem beim Rhein nachzuweisen. Noch im Pliozän, am Ende der Tertiärzeit, floß der aus der Westschweiz kommende Rhein von Basel aus durch die Burgundische Pforte in die Saône und dann in die Rhone, um sein Wasser dem Mittelmeer zuzuführen. Bei Basel mündete, aus dem Norden kommend, ein bedeutender Nebenfluß ein. Dieser besaß im Rheinischen Schiefergebirge, zwischen Koblenz und Mainz, einen Oberlauf und durchfloß die heutige mittelhheinische Ebene zwischen Mainz und Basel, von Norden nach Süden, also in umgekehrter Richtung als es heute der Rhein tut. Zahlreiche Nebenflüsse aus dem Schwarzwald und aus den Vogesen verstärkten die Wasserführung aus Tälern, welche heute noch durch ihre gegen Süd gerichtete Konvergenz diesen alten südlichen Rheinlauf erkennen lassen. In dieser tertiären Anlage besaß der mächtige Rheinstrom bis nach Marseille ein stark ausgeglichenes Talsystem. Am Ende der Tertiärzeit muß die Verlegung des Mittellaufes eingetreten sein.

Der Rhein wandte sich durch den jüngsten Aufstieg des Juragebirges unter der Burgundischen Pforte von Basel aus gegen Norden. In der Pfalz entstand eine diluviale Anstauung und schließlich erfolgte der Durchbruch in den Talzug seines einstigen Nebenflusses zwischen Bingen und Boppard.

Dieses Talstück stellt ein reines Erosionstal dar, welches nicht etwa durch eine Bruchlinie vorgezeichnet ist. An der Bildung seines Flußbettes arbeitet der Rhein hier auch heute noch. Aus diesem jugendlichen Talstück haben die Flußschiffahrt behindernde Stromschnellen (Mäuseturm bei Bingen) und aufragende Felsköpfe teilweise erst künstlich beseitigt werden müssen. Ein noch jüngerer und weniger ausgearbeitetes Talstück des Rheins ist die an hervorragenden Wasserfällen reiche Strecke Stein—Schaffhausen—Rheinfelden.

Alle unsere großen Flüsse durchfließen Talstücke, welche von verschiedenem Alter sind und lassen daher Flußverlegungen erkennen. Als Beispiel sei noch die Drau genannt. Das breite Drautal in Kärnten ist gleich dem großen nordalpinen Längstal (Inn—Salzach—Ennstal) von hohem Alter, das Vorkommen von alttertiärem Nummulitenkalk in seinem System läßt es als eine Anlage der mittleren Kreidezeit (vogosausch) erscheinen. Außerordentlich mächtige, sarmatische und pontische Ablagerungen (Konglomerate) der Sattnitz, südlich Klagenfurt—Grafenstein, von mindestens 600 m Mächtigkeit treten neben sandigen und tonigen Sedimenten und Kohlenflözen in großer Verbreitung auf. Der alte Oberlauf dieses bedeutenden Flusses war das Gailtal, westlich Villach. An dieses alte Talstück hat sich aber erst in der jüngsten Tertiärzeit das Talstück Unterdrauburg—Marburg angeschlossen, in welchem die Drau, ebenso wie der Rhein unterhalb Bingen, ihr Bett heute im festen Felsen erodiert und die Talfurche heute erst ausbildet. Der alte Draufluß überschritt von Lavamünd aus den Radpaß und muß durch das Saggautal nördlich Arnfels nach Leibnitz zu geflossen sein. Hier ist der Grund der Flußverlegung in einer starken, jungen Auffaltung des Remschniggzuges und seines nördlichen Vorlandes zu suchen. Wir kennen die alten Drauschotter östlich Leibnitz aus der sarmatischen Zeit in dem Hügelland zwischen Gnas—St. Peter und Straß—Mureck—Radkersburg. Die Gesteine der Tauern und Karawanken, auch Nummulitenkalke, sind in diesen alten Drauschottern, welche weit nördlich des Laufes der heutigen Mur angetroffen werden, enthalten.

Dies ungleiche Alter der einzelnen Talstücke unserer Flüsse im Mittellauf ist mehr noch als die ungleiche Widerständigkeit der Gesteine im Flußbett die Ursache von großem Wechsel im Gefällsverhältnis im Mittellauf dieser Ströme. Und die Talstücke und die in ihnen vorhandenen Flußstrecken, welche jüngster Ausarbeitung sind, zeigen bei unverminderter Wasserführung dann bedeutende Gefällstufen, welche in erster Linie für die Gewinnung der Wasserkräfte geeignet sind.

Auch bei der Enns beobachten wir ähnliches und zugleich auch hier sind die Projekte zum Ausbau der Großwasserkräfte so ausgearbeitet, daß sich die Energieentnahme an die jungen Talstücke anschließt.

Der Ausbau von Großwasserkraften erfolgt daher aus theoretischen Gründen schon am zweckmäßigsten im Mittellauf unserer Flüsse und im Anschluß an die in diesem auftretenden jungen Talstücke.

Anders der Ausbau kleinerer Wasserkraftentnahme-Anlagen im Bereiche der Nebentäler. Die günstigste Gefällstufe, verbunden mit der größten Wassermenge, ist bei den Nebenflüssen der Alpen in der Regel am Talausgang, im Gebiete der Einmündung dieser in das Haupttal, gelegen.

Dieser Umstand ist auf die sogenannte „Übertiefung“ des Haupttales und auf die Ausbildung des Nebentales als „Hängetal“ basiert. Unter Hängetal versteht man die Erscheinung, daß der Talboden im Nebental durch einen Steilabfall, einen Gefällsbruch, von dem tief gelegenen Talboden des Haupttales getrennt ist und derart über den Talboden des Haupttales „hängt“. Es ist das eine häufig wiederkehrende Erscheinung bei unseren Alpentälern. In vielen Fällen, falls die Wasserführung des Nebenflusses eine starke ist und der Talausgang zugleich durch weiches Gestein gebildet wird, hat der Nebenfluß den früher bestandenen Gefällbruch heute bereits durch Tiefenerosion und Ausbildung einer tief eingeschnittenen Klamm im Gefäll einigermaßen wieder ausgeglichen. Auch in diesen Fällen ist gleichwohl der scharf ausgeprägte Geländebruch zwischen den beiden Talböden noch zu erkennen. In anderen Fällen ist die Einmündung des Nebentales durch Wasserfälle ausgezeichnet. Die Klammausbildung am Ausgang des Nebentales liefert schon einen Beweis dafür, daß die Ausbildung dieser Gefällstufe nicht auf das heutige Entwässerungsnetz zurückzuführen ist. Sie ist fast in allen Fällen während der diluvialen Vereisung der Alpen gebildet worden. Der in beiden Tälern fließende breite Eisstrom der diluvialen Vorzeit hat im Gegensatz zu der heutigen schmalen Flußader einen breiten, fast ebenen Talboden aus dem Gestein geschliffen. Die Tiefenerosion erfolgte im Haupttal, wo der Eisstrom eine bedeutendere Geschwindigkeit, vielleicht $\frac{1}{2}$ m pro Tag, erreichte, bedeutend ausgiebiger als im Nebental mit dem beschränkteren Nährgebiet für die bewegte Eismasse. Infolgedessen wurde das Haupttal trotz seiner größeren Breite erheblich schneller ausgetieft als das Nebental. Im letzten Stadium der Vereisung führte das Haupttal ferner auch noch während einer erheblich längeren Zeit Eis als das Nebental. Auf diese Weise wurde die stärkere Ausschleifung von der geringeren, im Nebental genau an der Grenze beider scharf abgegrenzt. Es ist allerdings leicht verständlich, daß trotz der morphologisch hervorragenden Eignung des Hängetales zur Ausnützung der Wasserkraft, dieses wegen der zu geringen Wasserführung für dauernde Wasserentnahme nicht als Ort des Ansatzes einer Großwasserkraftanlage in Frage kommen kann.

Beispiele für die Entnahme von geringerer Energie bieten aber zahlreiche Turbinenanlagen in unseren Ostalpen.

Die Nebentäler stellen ferner in erster Linie die Räume dar, in denen eine Ergänzung der im Haupttal gewonnenen Energie statthaben kann. Eine Ergänzung, welche sich auf bestimmte kurze Zeitintervalle im Jahre beschränkt und dann als „Spitzenversorgung“ auch für die Größe der im Haupttal gestellten Anlage von entscheidender Bedeutung ist. Wir kommen darauf erst im vierten Abschnitt zurück, da wir vorher die Grundwasserverhältnisse und daher das Flußbett als solches betrachten müssen.

III.

Das Flußbett.

Das in einem Entwässerungssystem abfließende Wasser wird nur in dem Falle ausschließlich im Bett der Flüsse, d. h. oberirdisch, befördert, wenn der Fluß im festen Gestein erodiert und dieses wasserundurchlässig ist. Als wasserundurchlässige Gesteine können nur die Tongesteine, Tone, Schiefertone und Tonschiefer, sowie die Phyllite angesprochen werden. Alle anderen Felsarten sind, auch soferne sie nicht porös sind, im Gebirge von Klüften durchsetzt, in denen eine Wasserbewegung unterhalb des Flußbettes im Sinne des Talgetälles stattfindet. Besonders klüftige Gesteine sind Granite, Gneise, Sandsteine, Kalksteine, Dolomit und Marmor. Bei den zuletzt genannten Karbonatgesteinen wird die primär durch Gebirgs- und Gesteinsdruck verursachte Kluftbildung noch durch Auslösung erweitert. — Im allgemeinen darf allerdings angenommen werden, daß die Klüftigkeit des Gesteines unter dem Flußbett primär eine geringere ist, ~~als~~ in den Bergen selbst. In besonderen Ausnahmefällen kann im Kalkgebirge allerdings eine Kluftauslösung in einem Maße erfolgen, daß der Oberflächenfluß sein Wasser zur Gänze verliert und an seiner Stelle ein Höhlenfluß im Innern des Gebirges (Karst) tritt.

Da wir schon auf jeder geologischen Übersichtskarte leicht feststellen können, daß jeder Fluß Talstücke besitzt, welche im wasserundurchlässigen, und andere Talstücke, welche im wasserdurchlässigen Gestein liegen, so wird ein Fluß in jedem Talstück sein Wasser in ständig wechselndem Verhältnis ober- und unterirdisch transportieren. Das unterirdisch fließende Wasser eines Flusses gehört dem Grundwasser an. An jenen Stellen, wo der Fluß aus wasserdurchlässigem Gestein in ein Gebiet, welches aus wasserundurchlässigem Gestein besteht, eintritt, muß ein Teil des in der Talrichtung fließenden Grundwassers wiederum in das Flußbett eintreten (unterirdische Quellen). Dasselbe kann auch an den Gefällstufen eintreten.

Eine größere praktische Bedeutung gewinnen diese Verhältnisse vor allem dort, wo nicht nur das dem Flußsystem ursprünglich angehörende Grundwasser in das Entwässerungsnetz eindringt, sondern wo

auch erhebliche Mengen von Wasser des gesamten Grundwasserreservoirs oberirdisch in das Entwässerungsnetz eindringen. Das ist nur in ausgiebigem Maße im Hochgebirge der Fall und wird im Kapitel IV bei Behandlung der Karseen besprochen werden.

Eine ausgiebige Führung des Abfließwassers als Grundwasser tritt dagegen in dem Mittel- und Unterlaufe der Flüsse dort ein, wo der Untergrund der Flüsse nicht aus festem Gestein, sondern aus stark durchlässigem Schotter besteht, durch dessen weite Hohlräume sehr erhebliche Wassermengen unterirdisch talabwärts fließen.

Vorarbeiten für Fundierungen von Hochbauten, Stauwerken und Bohrungen in Flußbetten haben das überraschende Ergebnis gehabt, daß unsere Alpenflüsse nicht nur im Alpenvorland, sondern auch in ihren großen Talzügen innerhalb des Gebirges, und zwar selbst durch jene Talstücke, welche Klammcharakter besitzen, in der Regel heute keineswegs den Felsen anschneiden, sondern ältere Felsschotter unter sich haben, so daß sie mit anderen Worten heute am Werke sind, ältere Ablagerungen des eigenen Flußsystems wieder auszuräumen. Sie erodieren nicht, sondern sie denudieren. Diese Tatsache besitzt eine große praktische Bedeutung für die Beurteilung der Festigkeit des Baugrundes im Flußgebiete und für die Berechnung des als Grundwasser bewegten Teiles des Flußwassers. Diese Tatsache erfordert aber auch eine ausführlichere Erklärung.

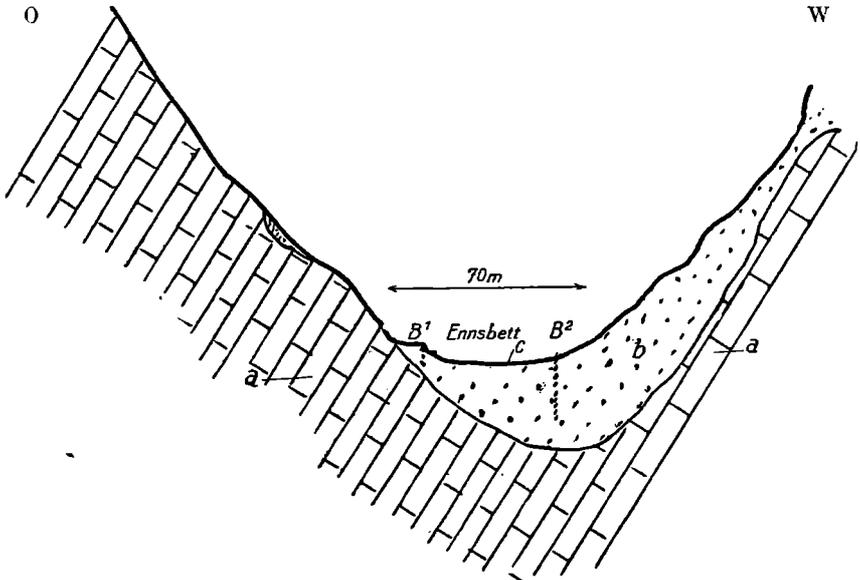


Fig. 2. Querprofil durch das Ennstal bei der Wandauerbrücke unterhalb Hieffau. *a* = gebankte Rhätkalke, *b* = Niederterrassenschotter aus der Abschmelzperiode der Würmvereisung, *c* = rezenter Flußschotter (auf der Ostseite des Flusses Gehängeschutt, *B*¹ = rechtsseitige, *B*² = linksseitige Bohrung.

Sogar in der langen, engen, von steilen Berglehnen eingefassten Ennsklamm zwischen Krumau bei Admont über Hieflau bis Landl im Gesäuse liegt der feste Felsen tief unter der heutigen Flußsohle und zwischen dieser und dem felsigen Untergrund ist eine ältere Flußschotterablagerung vorhanden. Das Gesäuse erscheint ganz zu unrecht als ein Talstück, in welchem die Enns zur Zeit im Begriff ist, sich in den Felsen einzuschneiden. An einer der engsten Stellen der Gesäuseklamm unterhalb Hieflau, dort, wo die Wandauer-Brücke mit der Reichsstraße die Enns übersetzt, sind zwecks Untersuchung des Baugrundes für die Brückenpfeiler der neuen Brücke im Jahre 1915 vier Bohrungen am Flußbett niedergebracht worden, von denen zwei randliche den festen Kalkfelsen bei 3·23 *m* und 4·90 *m* unter dem Mittelwasserstand der Enns antrafen (B' des vorstehenden Profils), während eine Bohrung am nördlichen Flußrand selbst in 20 *m* Tiefe nur Schotter durchteufte. Dabei beträgt die Breite der Ennsschlucht, welche zwischen den Steilabfällen der zirka 2000 *m* hohen Bergriesen des Tamischbachturmes und des Wandauer Kogels eingekeilt ist, im Talgrund nur 70 *m*. Ohne Zweifel reicht der Schotter aber noch erheblich tiefer als 20 *m* unter den Ennsspiegel. (Vergleiche vorstehendes Profil, Fig. 2.)

Dieser Befund steht keineswegs vereinzelt da; im engen Inntal zwischen Landeck und Prutz traf eine Bohrung bei der Pontatzbrücke in 18 *m* Tiefe noch keinen festen Fels. Unterhalb der Tauernbahnbrücke, am oberen Ende der Gasteiner Klamm bei Lend, gelangten über 5 *m* tiefe Bohrungen nicht aus dem Schotter heraus. Sogar in den Salzach-Öfen zwischen Golling und dem Paß Lueg war noch 11 *m* unter dem Wasserspiegel wider Erwarten kein fester Fels vorhanden. Am Saalachdurchbruch bei Reichenhall wurde fester Fels stellenweise erst bei einer Tiefe von 30 *m*, an anderen Stellen von 22 *m* unter der Flußsohle angetroffen. Auch im oberen Drautal wurden unter dem Mittelpfeiler der Karawankenbahnbrücke bei Hollenburg bei 6·2 *m* unter der Flußsohle diluviale Schotter noch nicht durchsunken.

In allen diesen Fällen, welch letztere von Singer im 65. Band der „Zeitschrift des österreichischen Ingenieur- und Architektenvereines“ im einzelnen näher beschrieben sind, während ich die Verhältnisse des Ennsbettes in den „Mitteilungen der geologischen Gesellschaft“, Wien 1915, eingehend beschrieben habe, ist durch Bohrungen der Nachweis erbracht, daß wenigstens unter 1000 *m* Meereshöhe in unseren größeren ostalpinen Talzügen kein fester Fels direkt unter der Flußsohle vorhanden ist, so daß überall bei der Ausführung von Fundierungen für Brückenpfeiler oder Sperranlagen im engeren Talprofil die allergrößte Vorsicht anzuraten ist. Es ist selbstverständlich, daß wenn schon in den engen Tal-schluchten ältere Schotter unter dem heutigen Flußbett vorhanden sind, ältere fluviatile Ablagerungen von viel bedeutenderem Ausmaße in breiten Talzügen vorhanden sein müssen. Die weiten Niedermoore des breiten Ennstales oberhalb des Gesäuses zwischen Krumau bei Admont und Öblarn, ferner die gleichen Bildungen im Paltental und anderwärts in

den breiten Talauen beweisen, daß hier zeitweise diluviale und alluviale Seenbildung platzgriff und daß in diesen Talstücken breite, tief greifende ältere Talerosionswannen vorliegen. Viele andere Talweiten entbehren allerdings der Torfbildung, so das Grazerfeld unterhalb Gösting, ferner das Leibnitzerfeld unterhalb Wildon, die Talweite St. Lorenzen bis St. Michael im oberen Murgebiet. Hier liegen inneralpine weit ausge dehnte Schotterdecken vor, welche durch ständige Mäandrierung des diluvialen Murflusses allmählich flächenförmig aufgeschüttet wurden. Es ist kein Zufall, daß die mit diluvialen Moorbildungen ausgefüllten Talwannen im Gebiet der zur Eiszeit (Diluvium) Gletscher führenden Talgebiete gelegen sind, während die lediglich mit Schotter angefüllten Talweiten im allgemeinen im Gebiet der auch zur Eiszeit nicht vergletscherten Talzüge auftreten. Es würde zu weit führen, hierauf an dieser Stelle näher einzugehen.

Alle Talstücke, welche unter der Flußsohle ältere Schotter aufweisen, führen erhebliche Wässer des Entwässerungssystems in diesen Schottern unterirdisch als fließendes Grundwasser talwärts. Bedeutende Wassermengen fließen aber durch die Schotteraufschüttungen der inneralpinen Talweiten. Diese im Untergrund der Flüsse talwärts gerichteten Wassermengen sind zwar als Grundwasser zu bezeichnen, sie gehören aber auch als solche dem Entwässerungssystem des betreffenden Flusses an.

Die Bedeutung der Schotter als Wasserstraße ist in erster Linie durch den stets vielfach höheren Querschnitt im Verhältnis zum Querschnitt des vorhandenen Stromquerschnittes gegeben. Andererseits findet die Wasserbewegung innerhalb der Schotter allerdings außerordentlich viel langsamer als im offenen Strome statt. Reibung und Adhäsion vermindern die Stromgeschwindigkeit auf einen kleinen Bruchteil der Wassergeschwindigkeit im Fluß. Zur Beurteilung der Faktoren, welche für diese Verhältnisse in Frage kommen, seien die folgenden Beispiele näher besprochen:

a) Beispiel in der Talschlucht der Enns bei Hieflau.

Der Querschnitt der Enns bei der Wandauer-Brücke beträgt $40\text{ m} \times 3\text{ m} = 120\text{ m}^2$.

Der Querschnitt des älteren Flußschotter unterhalb des mittleren Ennsspiegels ebendort $60\text{ m} \times 50\text{ m} = 3000\text{ m}^2$. Die vom Grundwasser durchflossenen Hohlräume des eng gepackten Schotter betragen durchschnittlich zirka 20% des Schotterquerschnittes, so daß im Schotter ein Wasserquerschnitt von 600 m^2 vorhanden ist.*

Die Geschwindigkeit der Wasserbewegung im Schotter kann auf $\frac{1}{250}$ derjenigen im oberirdischen Ennsfluß geschätzt werden. Daraus würde sich ergeben, daß 2% des in diesem Teil des Entwässerungssystems der Enns fließenden Wassers unter dem Bachbett durch den Schotter bewegt werden.

* Die Ableitung des Porenvolumens im Schotter und der Durchflußgeschwindigkeit in demselben würde hier zu weit führen. Es sei auf die Ausführungen in Tornquist, Geologie I. Leipzig. Wilh. Englmann, 1916, verwiesen.

b) Beispiel in der Talweite der Mur innerhalb des Grazerfeldes bei Graz.

Der Querschnitt der Mur bei Graz beträgt $120\text{ m} \times 5\text{ m} = 600\text{ m}^2$.

Der Querschnitt der unter dem Murbett gelegenen älteren Schotter beträgt $2000\text{ m} \times 100\text{ m} = 200.000\text{ m}^2$. Die dem Grundwasser im Schotter zur Verfügung stehenden Hohlräume machen 20% des Schotterprofils aus, besitzen daher einen Gesamtquerschnitt von 40.000 m^2 . Der Querschnitt des Wasserweges im Schotter ist daher fast 70mal so groß wie der des oberirdischen Flusses. Die Stromgeschwindigkeit darf im Schotter über dieses große Profil aber im Durchschnitt nur auf $\frac{1}{700}$ der Stromgeschwindigkeit der oberirdischen Mur geschätzt werden. Daraus würde sich ergeben, daß bei Graz annähernd 10% des in diesem Teil des Entwässerungssystems talabwärts geführten Wassers unterirdisch fließen.

Eine einfache Überlegung zeigt, daß die unterirdisch fließende Wassermenge tatsächlich im letzteren Fall eher eine größere sein wird, da sie um die zirka 30% der in der Talweite fallenden Niederschläge und um die an den beiderseits begleitenden Berghängen abfließenden Wasser vermehrt wird. Die unterirdisch fließende Wassermenge ist ferner im Vergleich zu dem Wasser im Flußbett sehr wenig abhängig von der Nieder- und Hochwassermenge des Flusses, welche auch in unseren Alpenflüssen um große Beträge schwanken. Der Wasserstand der Mur und naturgemäß in annähernd gleicher Relation auch der Stromquerschnitt schwankt in den folgenden Grenzen:

Die Mur führt bei Graz*

bei niedrigem Wasserstand	24 Sekunden-Kubikmeter Wasser
„ mittlerem „	137 „ „ „
„ höchstem „	1380 „ „ „

Die Drau führt bei Pettau

bei niedrigem Wasserstand	85 Sekunden-Kubikmeter Wasser
„ mittlerem „	355 „ „ „
„ höchstem „	2200 „ „ „

Noch größer sind die Schwankungen im Wasserstand jener Flüsse, welche aus einem klimatisch einheitlich berührten Entwässerungsgebiet stammen, so führte die Moldau unterhalb Prag

im Jahre 1904	11.5 Sekunden-Kubikmeter Wasser
bei Normalwasserstand	69 „ „ „
beim Hochwasser 1890	3970 „ „ „

Die Flußbreite schwankte dabei zwischen 57 m und 67 m.

* Die folgenden Zahlen verdanke ich meinem hochgeschätzten Kollegen Herrn Professor Ing. J. Paul in Graz.

Die Elbe führte bei Melnik in Böhmen nach ihrer Vereinigung mit der Moldau

als geringste Wassermenge im Jahre 1904	22 Sek.-Kubikm. Wasser
bei Normalwasser	114 " " "
„ Hochwasser	4700 " " "

In Anbetracht dieser starken Schwankung der Wasserführung der Mur, einer ähnlichen unserer anderen Alpenflüsse und einer noch viel größeren der europäischen Mittelgebirgsflüsse, spielt die unterirdisch fließende Wassermenge zur Zeit des Niederwassers eine bedeutend größere Rolle als in allen anderen Zeiten. Für diese kritische Zeit ist aber jede Wasserkraftanlage darauf angewiesen, alle vorhandenen Kraft-, d. h. Wasserreserven heranzuziehen und sie dienstbar zu machen.

Jede in ein Talstück eingebaute Stauanlage für das Oberflächen-Stromwasser wird zur Folge haben, daß ein mehr als normaler Teil des Oberflächenwassers in das Grundwasser übergeht. Man wird aber imstande sein, durch besonders tiefe Fundierung der Staumauer, und zwar möglichst bis auf den Felsenuntergrund, auch einen Teil des Grundwassers mit abzufangen. Dagegen sollte man bei Wasserentnahme aus dem Fluß durch eine Druckrohrleitung oder durch einen Felsstollen die Entnahmestelle möglichst tief, eventuell in einem besonderen, tief im Flußbett eingesenkten Bassin ansetzen.

Die praktisch wichtige und geologisch interessante Erscheinung des Vorhandenseins von älterem Flußschotter unter dem heutigen Flußbett in unseren großen Talzügen erfordert noch eine Erklärung. Sie ist eine Erscheinung, welche nur bis zu einer Meereshöhe von 1000 m vorkommt. Mit Ausnahme der in einem früheren Kapitel besprochenen jungen Talstücke, so des Draulaufes zwischen Unterdrauburg und Marburg, können wir ihre Gültigkeit daran feststellen, daß wir heute nirgends Felsrippen aus dem Flußbett aufragen sehen. Erst in dem Quellaufe im Hochgebirge, und zwar über 1400 m Meereshöhe im Haupttal, in den Nebentälern aber schon in geringerer Höhe und in jungen Bachrissen schon wenig über dem Niveau des Talbodens des Haupttales tritt der felsige Untergrund im Wasser hervor.

Die Erscheinung des tiefreichenden Schotters im Haupttal beweist zunächst, daß dieses zu einer früheren Zeit bereits tiefer ausgetieft gewesen ist als heute und daß auf diese Zeit eine Verschüttung des Tales erfolgt ist, welche hoch über die heute vorhandene hinaufgereicht hat. Beides, die stärkere Tiefenerosion und die Verschüttung, setzen diametral voneinander verschiedene Verhältnisse der Talbildung voraus. Beide gipfeln in außerordentlich verschiedenen Klimaverhältnissen, welche sich regional in dem Gebiet herausgebildet hatten und welche aufeinander gefolgt sind.

Ob eine Tiefenerosion oder ob eine Verschüttung eines bestehenden Talgebietes erfolgt, hängt von zwei Faktoren ab, einerseits von der Menge des im Talssystem fließenden Wassers und andererseits von der sogenannten Erosionsbasis des betreffenden Talstückes.

immer Talbildungen zu erklären es ist möglich.

Der starke Wechsel in der Wasserführung erfolgte in den einzelnen Phasen der diluvialen Eiszeit. Zur Zeit der Eisausbreitung in den Alpen wurden die atmosphärischen Niederschläge im größten Ausmaß in der anwachsenden Eisdecke aufgespeichert. Der Schmelzabfluß war ein geringer. Die Talsysteme erhielten wenig Wasser und die durch dieses Wasser mechanisch fortgeführten Sand- und Geröllmassen kamen daher im Talsystem bald zur Ablagerung, und zwar der Hauptsache nach bevor sie das alpine Vorland erreicht hatten. Es trat eine Ausfüllung oder Verschüttung der Gerinne ein. Als dann aber die Eisdecke wiederum abschmolz, wurde das im Gletscher akkumulierte Wasser, die aufgespeicherten Niederschläge von Jahrtausenden, plötzlich frei und die Talsysteme wurden von gewaltigen Wassermengen durchheilt. Zunächst enthielten diese Wassermengen noch riesige Mengen von Gesteinsmaterial der Endmoräne, die zunächst eine noch vermehrte Verschüttung erzeugten, dann kam aber lange Zeit hindurch mächtiges geschiebearmes Wasser, welches sich tief in das angehäuften Schottermaterial einfräß und schließlich bis auf den Felsen vordrang. Die Haupt-Tiefenerosion in unseren Flußsystemen muß daher im mittleren und letzten Abschnitt des Rückganges der Hauptvereisung innerhalb der Alpen und in dem Mittelgebirge erfolgt sein: Die Hauptvereisung war im letzten Abschnitt des mittleren Diluviums erfolgt. Die Haupt-Tiefenerosion unserer Alpentäler erfolgte daher zur Zeit der mittleren Eiszeit des Diluviums. Es folgten dieser Zeit noch zwei Eisausbreitungen von geringerer Ausdehnung und diese trafen für unsere großen Haupttäler insofern andere Verhältnisse an, als nunmehr auch die Erosionsbasis innerhalb der Gebirgstäler erheblich höher gelegt war. Zur Zeit der Hauptausträumung der Haupttäler in der Mitte der diluvialen Eiszeit ist das ausgeräumte Schottermaterial größtenteils im Alpenvorland, in kleinerem Maße auch in den inneralpinen Talweiten ausgebreitet worden. Es bildeten sich besonders im Vorland weite Schotterfelder, deren Niveau langsam mit der Aufschüttung anstieg. Die Höhe, bis zu welcher der Schotter aber im Vorland angehäuften worden war, bildete für das alpine Haupttal die Erosionsbasis, wenn wir unter Erosionsbasis die Höhenlage des Vorlandes verstehen, unter welcher eine Tiefenerosion oder Tiefendenudation im oberhalb gelegenen Talstücke unmöglich ist. Der geschilderte Vorgang um die Mitte der Eiszeit hatte zur Folge, daß die zweimal später erfolgten geringeren Eisausbreitungen in der zweiten Hälfte der Eiszeit wohl wiederum, und zwar leichtere Verschüttungen, nicht aber beim Abschmelzen eine gleiche Eintiefung des Tales zur Folge haben konnten wie zur mittleren Eiszeit. Diese Vorgänge übten im großen Erscheinungen aus, welche im Sinne der eingangs beschriebenen Regression der Flüsse zu deuten sind. (Fig. 1.) Jede Verschüttung ist die Verlegung eines Vorganges, welcher sich genau genommen nur im Vorland abspielen sollte, in das talaufwärts folgende Alpentäl. Heute kann eine neuerliche Eintiefung des Flusses in die älteren Schotter nur in dem Maße erfolgen, als sich die Wiedertieferlegung des Flusses in den Schotterfeldern des Vorlandes vollzieht. Dieser Vorgang muß

also langsam erfolgen. Wir sehen diesen Vorgang aus diesem Grunde daher heute noch mitten im Geschehen, trotzdem so lange Zeiten seit der stärksten Erosion in dem Felsuntergrund der Haupttäler verfließen sind. Beweise dafür, daß eine Tieferlegung der Erosionsbasis und der Flußbetten in großen Talzügen der Alpen erfolgt, können allerdings mit Sicherheit aus der überall festzustellenden Unterwaschung und allgemein zu beobachtenden Freilegung der Sockelpartien und Fundamente unserer alten Brücken erblickt werden. Es hat den Anschein, daß dieser Vorgang in Zeiten größerer Wasserkatastrophen, welche erfahrungsgemäß mit einer etwa 40 bis 42jährigen Periodizität eintreten, sich in ganz besonders verstärktem Ausmaß vollzieht, daß durch solche nur wenige Tage anhaltenden Hochwässer eine Denudation erzielt wird, gegen welche die normale weit zurücksteht. Das wird verständlich, wenn wir die auf der Seite 22 gegebenen Zahlen betrachten, welche zudem nur normale, zur Beobachtung gelangte Hochwasserstände berücksichtigen.

Die praktischen Folgerungen aus diesen Feststellungen beziehen sich vor allem auf die Beurteilung der Standhaftigkeit des Baugrundes für Talsperren und Fundamentierungsarbeiten von Brückenpfeilern im Talgebiet. In allen Talstücken unserer größeren Alpentäler, und zwar abwärts von einer Meereshöhe von etwa 1200 m, auch in engen Talschluchten darf fester, „gewachsener“ Fels nicht in geringer Tiefe erwartet werden. Davon machen nur jene Talstücke eine Ausnahme, welche alle Anzeichen einer jungen Flußverlegung zeigen. Bei als Auftragungen des Untergrundes im Bachbett erscheinenden Felsstücken muß durch die Beobachtung des Gesteins und seiner mit benachbarten Felsen übereinstimmenden Schichtung oder Schieferung, falls diese überhaupt erkennbar ist, genauestens festgestellt werden, ob es sich nicht um lose, große Blöcke handelt, welche von Bergstürzen aus der Nähe stammen. Stets sollten mehrere Vertikalbohrungen im Talprofil ausgeführt werden und sind fachgemäße Untersuchungen der Umgebung und der Bohrproben dringend anzuraten.

Junge Verbiegungen, enge trockene Täler
werden von T. gar nicht bemerkt,
denn wenn eine Staumauer nicht zu sehr
frühzeitig kommt, dürfte kaum ein
Befestigung bedürfen.

IV.

Die Karseen. (Spitzenversorgung.)

Die Wechselbeziehung des Oberflächen- zum Grundwasser kommt in besonders krasser Weise bei den Karseen zum Ausdruck. Diese in hoch gelegenen Talschlüssen eingesenkten Becken sind für viele Projekte von Wasserkraftwerken als Spitzenwerke in Vorschlag gekommen. In den Karseen findet eine natürliche Ansammlung von Wasser hoch droben im Oberlauf des Flußsystems, meist unmittelbar im Quellgebiet selbst, statt. Wir haben diese Gebiete als solche besonders großen Gefälles, aber geringer zusetzender Wassermengen früher charakterisiert. Die Entleerung der Seen während einer kurzen Zeitspanne, während einiger Wochen, kann aber während dieser kurzen Zeit wenigstens eine außerordentlich gesteigerte Wassermenge zur Verfügung stellen, welche durch das vorhandene starke Gefäll eine zeitweise sehr beträchtliche Kraftreserve darstellt.

Die Einkalkulierung von Spitzenwerken in die Projekte des Ausbaues von Großwasserkraftwerken besitzt eine große prinzipielle Bedeutung. Die Rentabilität des projektierten Werkes steigt erheblich mit der Größe der der Ausnützung zugrunde gelegten Wasserkraft, abgesehen von örtlichen Faktoren, welche nach beiden Richtungen von Einfluß sein können. Im Mittellauf des Flusses wird für die Ausnützung der vorhandenen Wasserkraft im allgemeinen die jährliche mittlere Wassermenge als Grundlage genommen. Demzufolge kann ein solches Werk bei Niederwasserstand in den Spätsommermonaten und zeitweise im Winter nicht aus dem Fluß voll ausgenützt werden. Nur wenn zu diesen Zeiten eine Reservekraft besteht, ist dies der Fall. Als eine solche sind die Spitzenwerke gedacht. Sind mehrere derartige Spitzenkraftwerke vorhanden, so kann die Kalkulation für die zu erzielende Kraft sogar über die bei mittlerem Wasserstand im Hauptwerk zu erzielende Kraft hinausgebracht werden.

Im Hauptwerk kann durch Wasserstau nur in gewissen Grenzen, höchstens bis zum Mittelwasser, ein Ausgleich geschaffen werden und die Spitzenwerke, stets ausgesprochene Speicherwerke, besitzen daher eine besondere Bedeutung.

Die natürlichen Wasseransammlungen, hoch im Gebirge gelegene Seen, vor allem die Karseen sind es, welche alle Merkmale brauchbarer Spitzenversorgung besitzen.

Die Karseen sind ausgesprochene Bildungen hoch gelegener Gebirgsteile. Sie sind meist nach drei Seiten in steile Berghänge eingesenkte Talkessel, welche nach der vierten Seite, dem Talausgang zugekehrt, durch eine niedrige Felsschwelle begrenzt sind. In vielen Fällen ist diese Felsschwelle von Endmoräne bedeckt.

Der Karsee kommt zustande, wenn die letzterwähnte Felsschwelle oder auch die Endmoräne noch über ihr wasserundurchlässig ist. Das Phänomen der Karbildung ist in den oberen Talschlüssen sehr verbreitet, das Bestehen des Karsees in diesem Kessel aber immerhin nur ein Ausnahmefall. In den meisten Fällen hat der Abfluß des Sees sich schon so tief in die Felsschwelle eingemagt, daß der ursprünglich vorhandene See abgeflossen ist, in anderen Fällen, besonders im Kalkgebirge, haben sich die Abflüsse des ursprünglichen Sees unterirdische Wege im Felsriegel gelöst. Sobald eine Abflußrinne im Felsriegel über Tag gebildet worden ist, bietet es allermeist keine erhebliche Schwierigkeit, diese zu verbauen und den Karsee auf diesem Wege wieder zu sammeln. Auch wird in der Praxis meist ein Vorteil darin zu finden sein, einen vorhandenen Karsee durch die Errichtung einer Stauwand auf ein höheres als das gegenwärtige Niveau zu bringen und auf diese Weise die Bedeutung desselben als Speicherwerk wesentlich zu erhöhen.

Der Karkessel mit oder ohne Karsee ist eine Bildung der hohen Vereisung des Gebirges zur Diluvialzeit. So wie sich das Quellgebiet in unvereistem Gebirge gegen die Wasserscheide in immer feinere Wasseradern auflöst, so ist der Karkessel das natürliche obere Talende eines Gebirgsgletscherbodens. Seine kesselförmige Einsenkung ist durch den auf ein kleines Gebiet konzentrierten Druck des steil von drei hohen Bergflanken herabstoßenden Firneises durch „Auskolkung“ durch das Eis entstanden. Genau genommen ist es allerdings das weiche Eis als solches nicht gewesen, welches den Kessel ausgestoßen hat, sondern die zahlreichen kleinen und großen Felsblöcke, welche als Grundmoräne von den Felswänden losgelöst, am Boden des Eises fest eingefroren waren.

Das Vorhandensein einer Anzahl von Karseen übereinander im gleichen Hochtal zeigt uns daher die Reste mehrerer zeitlich von einander getrennter oberer Gletscherenden der Eiszeit an. Karbildungen in unseren Mittelgebirgen, wie in den Vogesen, im Schwarzwald, in den Sudeten, sind aber stets als Beweise diluvialer Vergletscherung dieser Gebirge anzusehen.

Der natürliche oder künstlich wieder aufgestaute Karsee erscheint meist mit kleiner Wasserfläche, welche eine nur beschränkte Kraftausnutzung zu gestatten scheint und von Wasserbautechnikern aus dem Grunde vielfach recht gering eingeschätzt wird.

Eine genaue geologische Analyse seiner Wasserführung ergibt aber in vielen Fällen ein erheblich anderes Resultat. Das Wasser des Karsees erscheint nur auf den ersten Anblick als die Ansammlung des Niederschlagswassers über seiner eigenen Fläche und über die der ihm zugekehrten Berghänge, eine Überlegung und die Beobachtung an ihm selbst ergibt aber, daß in den meisten Fällen ein enger Zusammenhang des im Karsee enthaltenen Wassers mit dem Grundwasser im ganzen Gebirgsstock, und zwar bis weit über das Gebiet besteht, aus welchem dem See Oberflächen- und Niederschlagswasser zukommt. Die Verbindung mit dem Grundwasser ist besonders in Gebirgstteilen, welche

aus klüftigem Gestein, ~~Granit~~, Gneis oder aus ~~Kalk~~ oder gar Sandstein oder Quarziten bestehen, eine sehr ausgiebige. Sie läßt sich daran deutlich erkennen, daß derartige Seen Grundquellen haben, aus denen das Wasser dauernd aus dem Boden des Sees in diesen hinein aufsteigt. Beispiele für solche Seen sind in Steiermark der obere Bösenstein in den Rottenmanner Tauern und die meisten Karseen der Schladminger Tauern. Nur in Tonschiefer- oder Phyllitgebieten können reine Sammelseen vorhanden sein. Grundwasserseen wie die genannten steirischen sind ferner viele in Südtirol und in Kärnten-Salzburg.

Um den Begriff der Grundwasserseen klar zu erkennen, müssen wir von der Tatsache ausgehen, daß in jedem Gebirgsmassiv ebenso wie unter jeder Ebene ein Grundwasserspiegel besteht. Unter dem Gipfel eines Berges wird der Grundwasserspiegel natürlich in größerer Tiefe unter der Tagesoberfläche gelegen sein als unter den Bergflanken, und je tiefer wir am Berggehänge hinabsteigen, umso seichter ist der Grundwasserspiegel gelegen. Im Talboden, welcher zwischen zwei Berg Rücken eingesenkt ist, tritt der Grundwasserspiegel in geringster Tiefe auf und es kann auch der Fall eintreten, daß der Grundwasserspiegel am Talrand das Oberflächenprofil schneidet, dann treten auf der Schnittlinie Quellen als Austritt des Grundwassers auf.

Der Grundwasserspiegel erscheint daher in einem Geländedurchschnitt (Profil oder Saigerriß) als eine Linie, welche wohl das Oberflächenrelief des betreffenden Gebirgsstückes mitmacht, aber nur in stark verminderter, ausgeglichener Gestalt. Bei den Karseen, welche von steilen, hohen Felswänden abgeschlossen sind, sehen wir, daß sie in das Gebirge so tief eingesenkt sind, daß ihr Wasser schon in das Grundwasser hineinragt, so daß wir das in ihnen enthaltene Wasser am besten als über Tage befindliches Grundwasser ansprechen können, so daß die Benennung „Grundwasserseen“ gut gewählt erscheint. Das nachstehende Profil erläutert diese Verhältnisse am besten.

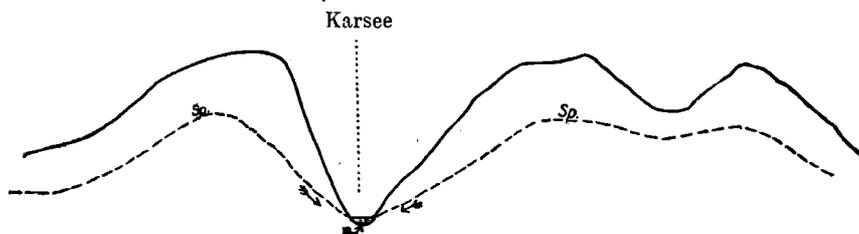


Fig. 3. Querprofil durch ein Gebirgsstück mit einem Karsee, den Zusammenhang des Grundwassers mit dem Wasserinhalt des Karsees und die Speisung des letzteren durch das weit ausgedehnte Grundwasserreservoir darstellend. *Sp.* = Grundwasserspiegel.

Was wird nun geschehen, wenn dem See künstlich zur Wasserkraftgewinnung entweder mittels Heberrohrs oder mittels eines durch den Felsriegel getriebenen Wasserstollens Wasser entzogen wird? Je mehr Wasser wir dem See entziehen, mit umso größerer Gewalt wird Wasser

aus dem weiten Grundwassergebiet in ihn aufs neue einströmen. Die vorerwähnten Bodenquellen werden zu großen, mächtigen Wasserquellen und Wasserwirbeln, und falls wir den Wasserspiegel eines solchen Sees sehr erheblich auf diese Weise zu erniedrigen suchen, so werden die Bodenquellen sich als Fontänen erheben.

Daraus ergibt sich der praktisch sehr wichtige Schluß, daß dem Karsee, welcher inmitten eines aus klüftigem Gestein gelegenen Gebirges gelegen ist, eine Wassermenge entzogen werden kann, welche ein sehr vielfaches, in vielen Fällen bis fünfzigfaches beträgt, als er normal enthält.

Der richtig gewählte Karsee stellt demnach eine ganz ausgezeichnete Speicheranlage für die Spitzenversorgung dar, welche niemals auch nur annähernd durch hie und da wohl geplante Anlagen von künstlich in den Felsen gesprengten Wasserbassins auf Bergrücken erreicht werden kann.

Wohl aber kann der gleiche Vorteil durch Talsperren in steilwandigen Nebentälern oder derart auf Aufstau von tiefer gelegenen Talseen (Leopoldsteinersee bei Eisenerz), wenn auch in wohl erheblich geringerem Ausmaß, erzielt werden. Jeder Aufstau eines Talsees wird das Steigen des Grundwasserspiegels im benachbarten Gebirgsstück zur Folge haben, so daß mit dem Wasserspiegel des Sees zugleich auch der Grundwasserspiegel in weiter Umgebung aufgestaut wird. Bei der Wasserentnahme steht dann außer dem Seewasser auch der Betrag des aufgestauten Grundwassers zur Verfügung, welcher ein vielfaches des sichtbaren Seewassers ausmachen kann. Jedoch spielen hier die örtlichen Verhältnisse eine große Rolle.

Wir haben im vorstehenden auf Grund der geologischen Tatsachen eine theoretische Unterlage für die Anlagen zur Ausnützung der natürlichen Wasserkräfte zusammengestellt. Theoretisch sind die Grundlagen nicht in der Richtung, als daß ihr Bestehen in Zweifel gestellt werden könnte, sondern nur insofern, als ihre zahlenmäßige Ermittlung noch aussteht. Immer wieder muß darauf hingewiesen werden, daß bei technischen Anlagen, welche sich wie diese so direkt auf die naturwissenschaftliche, in diesem Fall geologische Grundlage stützen, die Erforschung auch seitens der großen Unternehmungen nach jeder Richtung hin durch Vorarbeiten oder bei bereits bestehenden Anlagen zum Nutzen späterer Neuanlagen durch dauernde genaue Oberflächen-, Grund- und Niederschlagswasser-Messungen gefördert werden sollte. Vor allem sollte auch im fertigen Stadium eines Großwasserkraftwerkes enge Fühlung mit Geologen bestehen bleiben. Es werden sich dabei sicher noch viele andere nützliche Gesichtspunkte ergeben, welche bisher unbekannt geblieben sind.

V.

Wasserkraftanlagen und Natur- und Heimatschutz.

Der Großausbau der Wasserkräfte hat in den Alpenländern eine lebhaftere Befürchtung der um die Bewahrung der Natur und des schönen Heimatsbildes besorgten Kreise ausgelöst. Es seien hiezu einige Worte gesagt.

Gefährdet können zunächst einzelne Naturobjekte erscheinen, soweit sie selbst von hohem naturwissenschaftlichen Wert sind und ihre Erhaltung entweder im Interesse der naturwissenschaftlichen Erforschung oder als instruktive Einzelercheinungen für die direkte Volksbildung von hohem Wert oder Nutzen sind. Soweit es sich also um „Naturdenkmale“ handelt. Derartige Fälle werden nur vereinzelt vorkommen. Es kann sich dabei um die Zerstörung von Standorten sehr seltener Pflanzenarten oder instruktiver Felsformen, natürlicher Aufschlüsse von in der weiteren Umgebung nicht sichtbaren Gesteinsarten oder gefalteten oder verworfenen Schichtfolgen handeln. Ohne Zweifel kann in diesen vereinzelt Fällen mit gutem Recht im allgemein kulturellen Interesse gefordert werden, daß die Projekte der Anlagen auf die Erhaltung dieser Objekte nach äußerster Möglichkeit Rücksicht nehmen. Mehr kann aber bei der eminenten volkswirtschaftlichen Bedeutung solcher Anlagen nicht gefordert werden. Wichtiger ist, daß die Neuaufdeckungen im Gestein durch Sprengungen, Tunnelanlagen oder Bodenabtragungen der wissenschaftlichen Bearbeitung zugänglich gemacht werden, ehe sie durch Verbauung wieder dauernd unsichtbar werden. Auch sind Funde von Versteinerungen, Mineralien oder von frischen Gesteinen, welche bei Fels- oder Erdarbeiten zu Tage kommen, den betreffenden Fachstellen, am besten den im Lande bestehenden Naturschutzfachstellen, sofort bekanntzugeben. Im allgemeinen besteht eine größere Wahrscheinlichkeit, daß durch die ausgeführten technischen Arbeiten der Wissenschaft auf diese Weise mehr genützt als geschadet wird. Eine ständige Föhlung der technischen Leitung des Unternehmens mit der Naturschutzfachstelle ist daher sehr wünschenswert, und zwar von dem Zeitpunkt der Ausarbeitung der Projekte bis zum Schluß des Ausbaues.

Eine wesentlich andere Frage ist die Gefährdung des Landschaftsbildes, und zwar sowohl des natürlichen Landschaftsbildes als auch des ästhetischen. Was die Beurteilung der Beeinflussung der natürlichen Landschaft betrifft, so unterliegt es keinem Zweifel, daß unserer alpinen Landschaft durch die Großwasserkraftanlagen ein völlig neues Element eingefügt wird. Ganz abgesehen von den verschiedenen Typen unserer alpinen Landschaft, der glazialen Hochgebirgs- und der glazialen Tallandschaft, oder der wesentlich oder, wie es für eine weite Talstrecke der Mur gilt, ausschließlich unter fluviatiler Entstehung fallenden Landschaft, möchte ich in der alpinen Landschaft den harmonisch abgestimmten, ausgeglichenen Landschaftstyp von dem wilden, durch schroffe Gegensätze und gigantische Felsabstürze, wilde Geröllhalden und schäumende Wildbäche ausgezeichneten Landschaftstyp unterscheiden, welcher nicht harmonisch ruhig abgestimmt erscheint, sondern in seiner überwältigenden Großartigkeit und Kraftäußerung eher beunruhigend als beruhigend wirkt. Im ersteren sind die Naturkräfte bereits zum großen Teil ausgeglichen, eine schöne Vegetation zieht sich über die Höhen, nur einzelne Felsschroffen harren noch der Erledigung durch die Verwitterung. Die Besiedlung und teilweise auch der bestehende Feldbau verstärken die Ruhe und die Harmonie des Bildes.

Die Wasserkraftanlagen sind Sinnbilder der Naturkraft, welche ebenso zur Natur als solche gehört wie alle ihre übrigen Eigenschaften. In das wilde Hochgebirge gestellt, erscheinen sie als Teil der hier schon natürlich wirkenden Kräfte, nicht so in der meist ruhig wirkenden Landschaft der größeren Talzüge. Hier stellen sie ein neues Element dar, ein Sinnbild der Naturkraft, welche hier nicht als wesentliches Element von Natur aus vorhanden ist. Hier setzt demnach die Diskussion ein.

Gegen die Errichtung von Hochbauten im Naturbild ist prinzipiell niemals ein Einwand erhoben worden, denn wir brachen nur die auf den Höhen stehenden alten Burgen, Schlösser und Ruinen, die in den Tälern stehenden alten Eisenhämmer, Schmelzöfen zu betrachten, sie sind längst als besonders geschätzte Elemente des heimatlichen Landschaftsbildes in das allgemeine Empfinden übergeführt, trotzdem der Eisenhammer mit einem schnellen und scharfen Schlag die natürliche Stille manches Alpentaales zerstört hat, trotzdem alle diese Bauten ebenfalls nicht aus idealen Gründen errichtet worden sind, die Eisenhämmer ebenso wie die modernen Wasserkraftanlagen zu wirtschaftlichen Zwecken, die Burgen zur Verteidigung, wenn nicht zur Sicherstellung von Raub. Der Unterschied der modernen Anlage ist aber der, daß er zunächst, vielleicht in den ersten zehn Jahren, alle Merkmale des Neuentstandenen, neu eingefügten im Naturbilde zeigt. Dann nimmt sich die Natur selbst der Bauten an. Die Vegetation umspielt und umschmeichelt die zunächst kahle Betonmauer. Generationen von Moosen und Flechten, welche selbst auf sterilem Quarzfelsen sich ansiedeln, finden in der Betonmauer ergiebige Nahrung und die Folge ist die gleichmäßige Tönung des Werkes, der

Mauern, der Dächer mit der umgebenden Natur. Schöne, zum Bauwerk in ihrer Höhe passende Baumformen entstehen in der Umgebung. So wie die Wunden, welche dem natürlichen Landschaftsbilde in Form von häßlich wirkenden Steinbrüchen zeitweilig geschlagen werden, allmählig wieder von der Natur selbst aufgenommen zum Naturbild zurückkehren, so wird es mit neu erstellten Hochbauten der Wasserkraftwerke sein, wie es mit den Burgen der Vorzeit und den Eisenhammerwerken der jüngsten Vergangenheit schon der Fall ist.

Eine Bedingung ist aber an jedes Bauwerk inmitten der Natur zu stellen, welche sowohl von den Burgen der Vergangenheit als auch von den vorerwähnten älteren Industrieanlagen meist erfüllt wird, daß ihre Ausführung der Umgebung angepaßt wird. Und da ist vor allem zu verlangen, daß sie möglichst wenig aufdringlich erscheint, daß sie weder protzenhaft ausgeführt wird, noch auch in einem Stil, welcher der umgebenden Natur völlig fremd ist. Unsere Zeit ist der Erfüllung dieser Bedingungen nicht sehr zugeneigt und daran knüpfen sich vor allem die Befürchtungen aller Heimatsfreunde. Sie fordern eine Bauart, welche erstens völlig abweicht von der städtischen, eine Bauart, welche in organischer Verbindung zu der Umgebung tritt und es der Natur ermöglicht, sie auf die geschilderte Art und Weise harmonisch in sich aufzunehmen, und zwar so, daß das Landschaftsbild die Hauptsache bleibt. Zweitens ist zu fordern, daß dasjenige Element, welches in dem Wasserkraftwerk verkörpert wird, die Naturkraft, als solche auch äußerlich zur Erscheinung kommt. Die erste Bedingung des Unaufdringlichen ist umso schwerer zu erfüllen, je größer das Bauwerk als solches ist; in alpiner Umgebung erscheint es aber in keinem Fall als übertrieben groß, wohl aber sind die einzelnen Teile einer Großwasserkraftanlage in Bezug auf ihre harmonische Wirkung wesentlich verschieden einzuschätzen. Der Stausee kann die Landschaft als solche direkt verschönern (Titelbild). Sobald sich an seinem Gestade die natürliche Ufervegetation angesiedelt hat, kann er zu einem Landschaftselement, besonders innerhalb eines Talzuges, werden, welches den Naturseen in wenigem nachsteht. Auch der Ausbau der Mundlöcher von Wassertunnels sowie die Anlage von Staumauern sowie der Gebäude können zum Landschaftsbild in organischem Zusammenhang gebracht werden. Nur ein einziges Element, das Druckrohr, stellt in jedem Fall ein Objekt der störendsten Auswirkung dar und diesem ist daher eine besondere Obacht zu widmen. Ist seine Ausführung dringend geboten, so ist es möglichst so zu verlegen, daß es von wichtigen Stellen der Landschaft möglichst wenig sichtbar ist.

Im übrigen können wir annehmen, daß diejenigen Werke, welche auf Stil und Ausführung Rücksicht nehmen, schon nach wenigen Jahrzehnten im Empfinden der Menschen, ebenso wie die älteren Bauwerke schon heute, als Elemente des Heimatsbildes empfunden werden und von Seite des Naturfreundes als Sinnbild der Naturkraft.