

Das Phänomen der Meermühlen von Argostolion

Eine hydraulisch-physikalische Betrachtung

VON THEODOR GLANZ (Graz)

Seit den dreißiger Jahren des 19. Jahrhunderts ist das Phänomen der „Meeresschwinden von Argostolion“ bekannt. Damit bezeichnet man die eigenartige Erscheinung, daß auf der griechischen Insel Kephallinia in der nach der Stadt Argostolion benannten Halbinsel (infolge des stets niedriger als der Meeresspiegel liegenden Grundwasserstandes) Meerwasser in die Felsklüfte verschwindet. Der einstige englische Steuereinnahmer Stevens hat diese Erscheinung 1834 zum Ausbau einer Getreidemühle herangezogen. Er baute einen Verbindungskanal vom Meer zu den Schwinden, und das nun einströmende Meerwasser betrieb ein unterschlächtiges Wasserrad. In der einschlägigen internationalen Literatur wird daher das Phänomen unter der Bezeichnung „Meermühlen von Argostolion“ behandelt.

Da aber Wasser vom Meeresniveau theoretisch keine Arbeit mehr leisten kann, ist es verständlich, daß sich die Wissenschaft seit über hundert Jahren um die Lösung dieses Naturrätsels bemüht. Die gesamte kinetische und potentielle Energie, die das Wasser zum Zeitpunkt des Niederschlages besaß, ist mit Erreichen des Meeresspiegels in Wärme umgesetzt. Betrachtet man den Meeresspiegel als Potentialfläche, so kann man auch sagen, daß der Meeresspiegel bezüglich des Gravitationsfeldes der Erde eine Fläche geringsten Potentials darstellt. Eine Fläche noch kleineren Potentials kann nur durch Energieaufwand hergestellt und aufrecht erhalten werden.

Die physikalischen Gesetze können auch hier nicht außer Kraft gesetzt sein, und es ist eine reizvolle Aufgabe, diese einmalige Erscheinung mit den Erkenntnissen der physikalisch-hydraulischen Gesetze zu deuten. Im Verborgenen eines umfangreichen Karstsystems spielen sich Vorgänge ab, die zur Folge haben, daß in den Meeresschwinden — trotz dauernden Zuflusses aus dem Meer — der Wasserspiegel (jahreszeitlich schwankend) etwa 75 bis 135 cm nied-

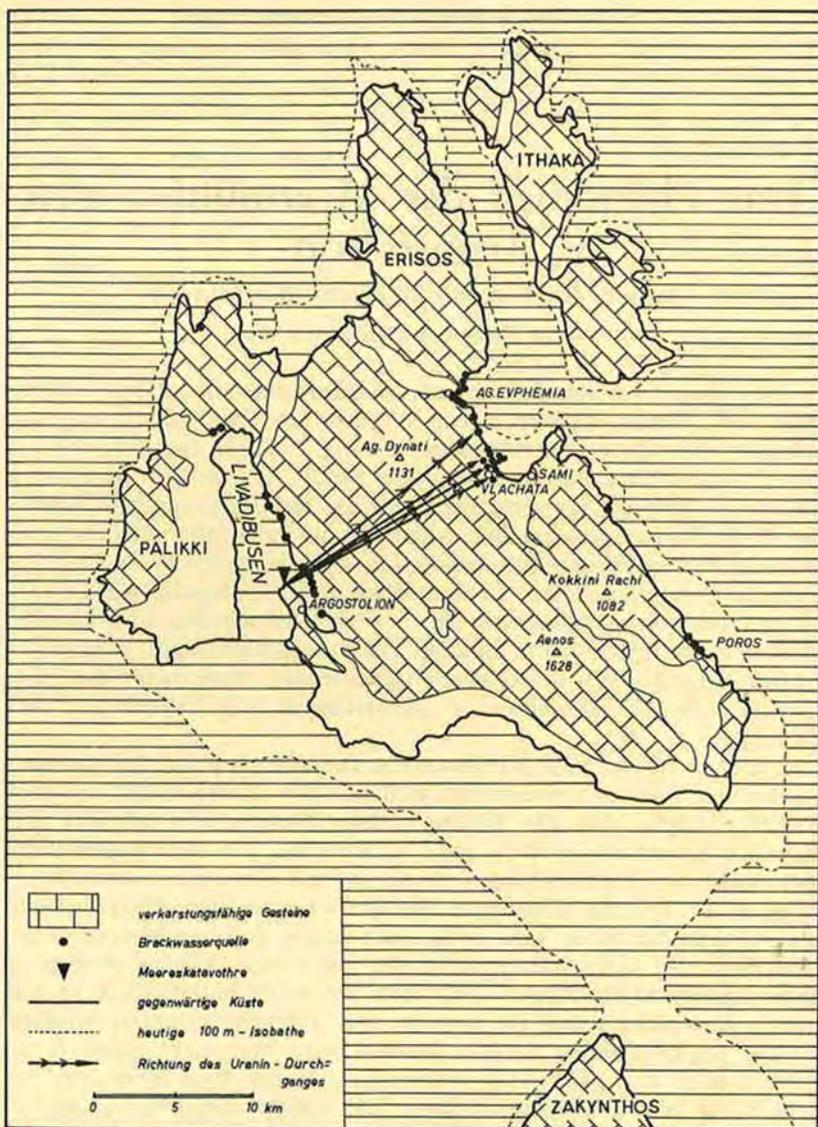


Abb. 1: Die Inseln Kephallinia und Ithaka. Die Pfeile markieren das Ergebnis des 1963 von V. MAURIN und J. ZÖTL durchgeführten Färbversuches an den Meerwasserschwinden bei Argostolion auf Kephallinia.

riger als der Meeresspiegel liegt. Es muß also ein Mechanismus wirksam sein, der dem Grundwassersystem dauernd Energie zuführt.

Kephallinia ist mit 750 km² die größte der Jonischen Inseln. Dem wenig gegliederten Hauptmassiv sind im Norden und Westen zwei große Halbinseln angegliedert, die der Insel ihre eigenartige Gestalt geben. Was den geologischen Aufbau betrifft, so dominieren im Hauptmassiv und auf der nördlichen Halbinsel Erisos die überaus verkarstungsfähigen Kreidekalke, während im Osten der Halbinsel Palikki und unter dem Livadibusen wasserstauende Tertiärsedimente liegen.

Im Westen des Hauptmassivs ragt die eingangs genannte kleine Halbinsel von Argostolion in den Livadibusen hinein. An der Ostseite der Insel liegt die Hauptstadt, die der Halbinsel den Namen gab. Hier, an der Nordspitze, befinden sich auch die Meermühlen, die Gegenstand dieser Betrachtung sind (Abb. 1 und 2).



Abb. 2: Eine der Meerwasserschwinden an der Nordspitze der Halbinsel von Argostolion. Im Vordergrund die Schwinde. Der Zu-
lauf des Meerwassers erfolgt durch einen Kanal und betreibt dort ein für touristische Zwecke montiertes Wasserrad. Im Hintergrund das aus Kreidekalken aufgebaute Hauptmassiv der Insel Kephallinia. Blickrichtung gegen Ostnordost.

Eine hydrogeologische Aufnahme der ganzen Insel durch V. MAURIN und J. ZÖTL [1, 15] in den Jahren 1959 und 1961 zeigte, daß eine Ballung der Quellaustritte einerseits in der Bucht von Argostolion und andererseits in der von Sami vorliegt. Während bei Argostolion Süßwasserquellen austreten, die auch der Wasserversorgung der Stadt dienen, liegen im Raum von Sami mächtige Brackwasserquellen; es handelt sich um den weitaus größten Quellhorizont der Insel überhaupt [1].

K. W. M. WIEBEL, dessen Arbeit [2] 1874 erschien, hat mit bewunderungswürdiger Sorgfalt alle Beobachtungen gesammelt, um zu einer Erklärung des Phänomens zu gelangen. Die bis dahin bekannten Theorien unterzog er einer sehr genauen Überprüfung und kam dem Kern der Frage überraschend nahe. Es wird noch später darauf eingegangen, zunächst seien hier kurz die wichtigsten Erklärungsversuche genannt:

C. BROWN (1835) ist der Ansicht, daß der Meeresspiegel der Bucht von Argostolion höher liege als der des Livadibusens [3].

H. E. STRICKLAND (1835) baut eine komplizierte Theorie unter Zuhilfenahme von vulkanischen Herden auf. Er nimmt eine Verdampfung des Wassers in diesen an. Das Kondensat tritt in großer Ferne in Form von heißen Quellen zutage [4].

J. DAVY (1836) bringt die Meeresschwinden mit einer alten Erdbebentheorie in Zusammenhang, nach der das Quellen und Schwinden des Tons und Mergels bei Wasseraufnahme und Wasserabgabe Ursache der Erdbeben sei. Das Wasser der Meeresschwinden wird für diese Vorgänge verbraucht [5].

J. PÜCKLER (1841) glaubt an eine Verbindung zu einem Meer mit niedrigerem Wasserspiegel [6].

A. MOUSSON (1858) zieht die häufigen Westwinde mit ihrer Stauwirkung zur Erklärung heran. Diese heben den Meeresspiegel im Westen der Insel, das Wasser strömt unterirdisch nach der Ostseite weg. Derartige Kanäle unter den Gebirgsketten hält er aber für unwahrscheinlich und vermag auch die Stetigkeit der Erscheinung, die auch bei Windstille nicht aufhört, nicht zu deuten. Er versucht dann weiters, die Wärme tieferer Schichten zur Erklärung heranzuziehen. Kaltes Wasser sinkt in große Tiefen ab, wird erwärmt und steigt in anderen Gängen infolge des geringeren spezifischen Gewichtes wieder auf [7].

F. UNGER (1862) greift die letzte Theorie von A. MOUSSON auf und bringt erstmals die Brackwasserquellen von Sami in Zusammenhang mit der Erscheinung der Meermühlen. Diese Quellen

müßten aber wärmer als das eingezogene Meerwasser sein, was nicht den von ihm selbst beobachteten Temperaturen entspricht. Die Brackwasserquellen sind stets um einige Grade kälter (!) als das Meerwasser bei Argostolion. Auch er versucht die Kapillarwirkung heranzuziehen [8] wie D. T. ANSTED.

- D. T. ANSTED (1863) nimmt einen ausgedehnten Höhlenzug im Untergrund an. Das Gestein saugt das Wasser kapillar auf und bringt es an der Oberfläche zur Verdunstung [9].
- F. FOUQUE (1867) nimmt submarine Brackwasserquellen im Livadi-busen an. Die geringere Dichte des Brackwassers bewirkt die Spiegelabsenkung in den Schwinden [10].
- K. W. M. WIEBEL (1874) zieht erstmals die kinetische Energie von Quellsträngen zur Erklärung des Phänomens heran. Nach Schilderung der Versuche von VENTURI, FEILITSCH und MAGNUS bringt er eine Abhandlung über den Satz von BERNOULLI und bespricht die Wasserstrahlpumpen von THOMSON und NAGEL. Im Abschnitt V, Seite 147, schreibt er die größte Wahrscheinlichkeit der „Saugwirkung von Quellströmen“ zu. Er faßt die Katakothren (= Schwinden) als Standrohre auf, die in Quellsträngen an Stellen geringen Druckes münden. Er bringt die ergiebigen, brackigen Quellen der Bucht von Sami mit den Meeresswinden in Zusammenhang, da die brackigen Quellen in der Bucht von Argostolion zu geringe Schüttungen aufweisen [2].
- O. LEHMANN (1932) greift zwar WIEBEL heftig an, übernimmt aber im wesentlichen dessen physikalische Deutung. Er verbessert die Systemskizze WIEBEL's durch Hervorhebung der für den Saugvorgang notwendigen Einengung. In seiner Abhandlung findet sich kein Hinweis auf einen etwaigen Zusammenhang mit den Brackwasserquellen von Sami [11].
- S. MARKETOS (1963) nimmt eine Verbindung zu einer Einengungsstelle eines gegen Westen abfließenden Süßwasserquellstranges an [12].

Zu den von K. W. M. WIEBEL beschriebenen Beobachtungen, auf die sich alle Erklärungsversuche gründen, trat erst 1963 eine hinzu, die von ausschlaggebender Bedeutung ist. Nachdem die 1959 und 1961 vorgenommene genaue hydrogeologische Aufnahme von V. MAURIN und J. ZÖTL einen ausgezeichneten Überblick über die Situierung der Wasseraustritte, aber noch keine Erklärung des Phänomens gebracht hatte, entschlossen sich die beiden genannten Autoren zu einem großangelegten Färbeversuch.

Am 26. Februar 1963 wurden in die Meeresschwinden von Argostolion 160 kg Uranin A. P. (Hersteller E. Merck, Darmstadt) eingebracht. Dieser speziell für die Verfolgung unterirdischer Wässer hergestellte intensive Farbstoff ist unter U.V.-Licht noch in einer Verdünnung von 10^{-10} nachweisbar. Mit der genannten Farbmenge, deren Kosten vom Österreichischen Forschungsrat getragen wurden, konnten somit 1,6 Milliarden m^3 Wasser gefärbt werden! Die später nachgewiesene Konzentration war allerdings wesentlich höher ($2 \cdot 10^{-9}$).

Nach 14 Tagen wurde der Farbstoff in den großen Brackwasserquellen in der Bucht von Sami nachgewiesen! Das Wasser durchfließt also das gesamte Hauptmassiv und tritt im Osten der Insel im großen Brackwasserhorizont wieder aus (Abb. 1). Der Weg des Wassers beträgt rund 15 km Luftlinie. Bemerkenswert ist, daß alle anderen Beobachtungspunkte im Livadibusen und rund um die Insel farbstoffnegativ blieben.

Dieses zunächst überraschende Ergebnis findet seine hydrogeologische Erklärung im geologischen Aufbau und in der Entwicklungsgeschichte der Insel. Während der Glazialzeiten war durch die gewaltigen Eismassen der Spiegel der Weltmeere abgesenkt. Im Würm, das vor etwa 12.000 Jahren endete, betrug die Absenkung im Mittelmeer etwa 100 m. Betrachtet man die heutige 100-m-Isobathe (vgl. Abb. 1), so zeigt sich, daß während der Würmeiszeit Kephallinia und Zakynthos einen zusammenhängenden Komplex bildeten. In der Bucht von Sami ist die Küste steil, und die 100-m-Tiefenlinie reicht knapp an die heutige Ostküste heran.

Der Livadibusen hingegen, mit heute einer maximalen Meerestiefe von 28 m, war damals Land und stellte eine flache Mulde in etwa 70 m über dem damaligen Meeresspiegel dar. Auf ihrem wasserundurchlässigen Untergrund (Tertiär) entwickelten sich Gerinne, die einen unterirdischen Abfluß durch das verkarstungsfähige Hauptmassiv zur tiefliegenden Küste in der Bucht von Sami fanden. Die Wasserscheide war also nicht durch den orographischen Höhenzug, sondern durch den geologischen Aufbau gegeben. Derartige Verhältnisse sind keinesfalls ungewöhnlich, sie finden sich in zahlreichen Beispielen auch heute etwa in den Karstgebieten Jugoslawiens.

Nach dem Ende der Würmeiszeit und dem damit verbundenen Wiederanstieg des Meeresspiegels füllten sich die tiefliegenden Süßwasserwege mit Meeresswasser. Die im Hauptmassiv versickernden Niederschlagswässer fließen aber auch heute noch infolge des generellen Einfallens der Kreidekalkbänke in erster Linie nach Osten

ab. Die Wasserscheide hat sich gegenüber den Eiszeitverhältnissen nur wenig verlagert.

Diese erdgeschichtliche Entwicklung erfuhr eine interessante Bestätigung durch die Untersuchung von Stalaktiten aus einem heute unterseeischen Hohlraum im Osten der Insel. 1961 konnten von den Wänden dieser Höhle hängende Stalaktiten aus Tiefen von 3 bzw. 26 m unter dem Meeresspiegel geborgen werden. Eine C_{14} -Bestimmung am Zweiten Physikalischen Institut der Universität Heidelberg (Dr. K. MÜNNICH) ergab das Alter dieser Tropfsteine: Der aus 3 m Tiefe stammende Stalaktit ist ca. 16.000, jener aus 26 m Tiefe ca. 20.000 Jahre alt.

Der schon von K. W. M. WIEBEL 1874 angenommene Zusammenhang der Meeresswinden von Argostolion mit den Brackwasserquellen in der Bucht von Sami hat sich somit als richtig erwiesen. Nun war zu prüfen, ob auch seine physikalisch-hydraulische Erklärung zutrifft. Ohne Zweifel hat er mit der Heranziehung von kinetischer Energie von Quellsträngen recht, denn nur diese kommen als stetige Energiespender für einen Förderstrom solchen Ausmaßes in Frage. Er schildert alle hydrodynamischen Möglichkeiten, die für die Erklärung herangezogen werden können, und schreibt die größte Wahrscheinlichkeit der „Saugwirkung von Quellströmen“ zu (1874, S. 147).

Danach wird die Spiegelabsenkung in den Meeresswinden dadurch erklärt, daß diese über Karstschläuche mit Stellen geringen Wanddruckes von Quellsträngen (Einengungen) in Verbindung stehen. Den abgesenkten Wasserspiegel der Meeresswinden faßt er also, modern ausgedrückt, als Piezometerstand an einer Venturidüse auf. K. W. M. WIEBEL weist darauf hin, daß die gemessene Fördermenge von rund $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$ die Annahme mehrerer solcher Saugstellen erforderlich macht.

Nimmt man aber eine Vielzahl solcher Piezometeranschlüsse an, dann müßte ein unwahrscheinlicher Zufall es gefügt haben, daß diese stets an Verengungen der Quellstränge sitzen. Nur ein einziger Anschluß an eine Höhle mit geringer Strömungsgeschwindigkeit müßte den Effekt von mehreren Saugstellen zunichte machen. Jede Saugstelle müßte, außer am Piezometeranschluß selbst, allseitig dicht sein. Der Zutritt von atmosphärischer Luft oder von Grundwasser müßte die Wirkung empfindlich beeinträchtigen. Es ist nicht leicht, sich in einem Karstsystem eine Vielzahl so beschaffener Saugstellen vorzustellen.

Auch in Anbetracht der langen Wegstrecke und der Begrenztheit des möglichen entstehenden Unterdruckes, dem das Reibungsfälle über einen Weg mit 15 km Luftlinie gegenübersteht, verliert

die Theorie an Beweiskraft. Bei bestausgeführten Venturidüsen kann der Unterdruck den atmosphärischen Druck minus Lösungsdruck der gelösten Gase, minus Dampfdruck des Wassers, minus Reibungshöhe im durchströmten Piezometerrohr, also günstigstenfalls bei geringer Förderung 9 m betragen (!).

Demgegenüber besitzt die Anwendung des Prinzips eines Ejektors wesentlich größere Wahrscheinlichkeit. Ejektoranlagen werden seit langem in der Pumpentechnik wegen ihrer Wartungsfreiheit und Robustheit verwendet. Für verschmutzte, sandhaltige Wässer erfährt dieses Prinzip bevorzugte Anwendung (z. B. Auspumpen von Baugruben, Schächten, Kanal- und Tunnelbauten). Im Bereich der 1. und 2. Wiener Hochquellenleitung dienen mehrere Ejektoren zur Hebung von Quell- und Grundwasser, deren Horizonte tiefer als der Sammelkanal liegen. Hochliegende Quellen liefern das erforderliche Triebwasser [13, 14].

K. W. M. WIEBEL hat zwar Ejektorapparate von FEILITSCH (S. 132 f.) und (bei freiem Spiegel) VENTURI (S. 132 f.) beschrieben, jedoch schien es ihm anscheinend zu gewagt, die dort dargestellten Apparaturen in die Natur eines Karstsystems umzusetzen.

Der geologische Aufbau der Insel mit dem gleichgerichteten Einfallen der Kreidekalkbänke nach Osten zwingt geradezu zu der Annahme, daß auch die Quellstränge im Gebirgsmassiv diese Richtung einnehmen. Wenn das aber zutrifft, dann muß jeder hinzutretende Quellstrang seine kinetische Energie an das Meerwasser des in der Eiszeit entstandenen Grundschauches abgeben, also eine Ejektorwirkung ausüben. Vor seiner Einmündung wird die Drucklinie abgesenkt und in Fließrichtung erhöht. Dabei ist es gleichgültig, ob der Quellstrang schräg von oben oder seitlich in den Grundgang stößt. Maßgebend ist nur die Geschwindigkeit und Richtung, mit der das Wasser hineinschießt, also der mitgebrachte Impuls, genauer gesagt: Die Impulskomponente in Richtung des Grundschauches.

In Karstsystemen sind Quellaustritte von großer Ergiebigkeit und mit hohen Geschwindigkeiten keine Seltenheit, und hochgelegene Höhlen sichern mit ihrer Speicherwirkung die Stetigkeit des Abflusses. Auf Kephallinia ist die Forderung nach einem solchen speichernden Höhlensystem sicher erfüllt.

Während, wie oben ausgeführt, eine Vervielfachung der Saugwirkung von Engstellen nicht leicht vorstellbar ist, bedeutet es überhaupt keine Schwierigkeit, anzunehmen, daß eine Vielzahl von Quellsträngen in der geschilderten Art als Ejektoren wirken. Das physikalische System paßt geradezu in das geologische hinein.

Die angeführte Stoßwirkung ist vom atmosphärischen Druck

unabhängig und beliebig oft addierbar. Die Ejektorstellen müssen nicht dicht sein und sind sogar bei freiem Spiegel denkbar. Der für die unterirdische Meerwasserströmung über den festgestellten Weg erforderliche Druckhöhenunterschied kann nur durch eine Vervielfachung von Impulsaufnahmen erklärt werden, die sich in Abschnitten abspielen, die man den einzelnen Quellzuläufen zuordnen kann. Jede Ejektorstelle bewirkt eine Absenkung der Drucklinie vorher und eine Erhöhung in Fließrichtung.

K. W. M. WIEBEL schildert (Seite 128) die Schwankungen des Wasserspiegels der Klüfte. Daraus läßt sich entnehmen, daß der Spiegelanstieg des Meeres bei Flut mit $1\frac{1}{2}$ Stunden Verspätung in den Katavothren ankommt. Diese Angabe beruht auf wiederholten Messungen und verdient ganz besondere Beachtung. Sie weist nämlich bereits darauf hin, daß die Ausmündung des Wassers keinesfalls auf der nahen Westseite der Insel liegen kann.

Faßt man die angegebene Zeit als die Laufdauer der Schwallwelle im Karstsystem auf und nimmt man für ihre Geschwindigkeit 3 m/s an, so erhält man: 1,5 Std. = 90×60 s

$$L = 90 \times 60 \times 3 = 16.200 \text{ m} = 16,2 \text{ km}$$

Die Geschwindigkeit von 3 m/s für die Schwallwelle entspricht einer Gerinnetiefe von ~ 1 m; $v = \sqrt{gt} \approx \sqrt{10} \approx 3 \text{ m/s}$ v.

Der Färbeversuch ergab einen Wasserweg von 15 km Luftlinie [15]!

Um aber mit einer Schwallwelle rechnen zu können, muß angenommen werden, daß im Grundsystem große Strecken mit freier Spiegeloberfläche zurückgelegt werden. Diese Voraussetzung entspricht eher der Theorie, daß Ejektoren wirksam sind, denn diese arbeiten auch in offenen Gerinnen. Die Vorversuche für den Bau des nachfolgend besprochenen Modells wurden nur in offenen Gerinnen getätigt.

Das geschilderte Ejektorprinzip wurde vom Verfasser 1963 zum Bau eines Modells herangezogen (Abb. 3). Das Modell stellt einen schematischen, überhöhten WSW—ENE-Schnitt durch die Insel in der Luftlinie des festgestellten Wasserweges dar. Das Inselmassiv mit dem während der Eiszeiten entstandenen Karstsystem ist zwischen zwei Glasplatten schematisch wiedergegeben. Das submarine Höhlensystem ist durch eine ausgenommene Röhre mit Beginn bei den Meeresswinden und einem vertikal verzweigten Ende in der Bucht von Sami dargestellt. Das über dem Meeresspiegel liegende Karstsystem folgt mit seinen Quellsträngen der Hauptrichtung des Fallens der Kreidekalkbänke. Ein solcher Quellstrang wurde durch ein Glasrohr dargestellt, dessen oberes Ende aus dem Modell herausragt und dessen unteres Ende, im Querschnitt

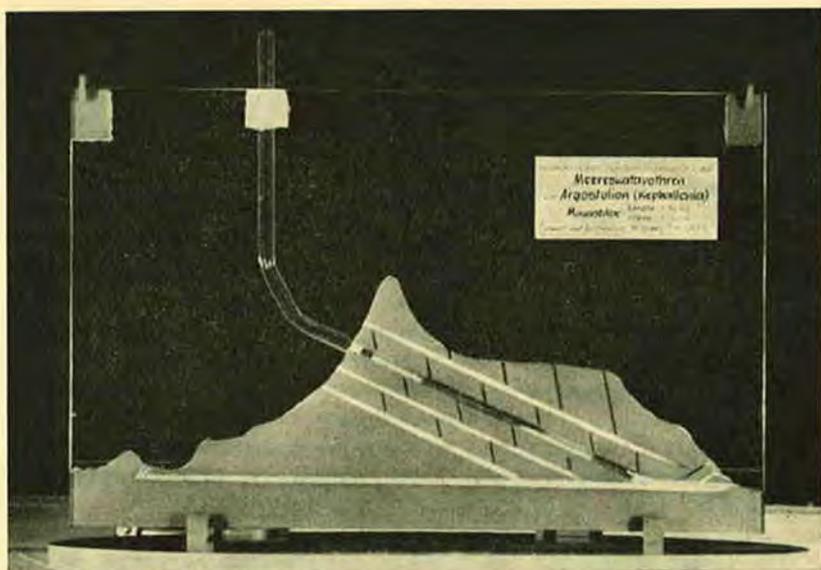


Abb. 3: *Hydraulisches Demonstrationsmodell der „Meermühlen von Argostoli“, gebaut vom Verfasser.*

verjüngt, in die submarine Röhre mündet. Wird nun die Wanne des Modells bis zum „Meeresspiegel“ mit Wasser gefüllt, so stellt sich überall der gleiche Wasserspiegel ein. Läßt man durch das Glasrohr Wasser einströmen, so senkt sich der Wasserspiegel in den Meereswinden. Durch ein in die Glaswand eingebautes Loch strömt Wasser aus der Wanne zu, und beim Auslauf strömt aus allen Verzweigungen, also oberhalb des „Meeresspiegels“, auf seiner Höhe und unterhalb („submarin“), Wasser aus. Um den Vorgang deutlich sichtbar zu machen, kann man im Modell einen Farbtropfen in die Nähe der Anbohrung bringen. Das gefärbte Wasser wird sogleich eingezogen und verläßt darauf, durch das Triebwasser verdünnt, das Modell (Abb. 4).

Würden im Modell mehrere Quellstränge (also Glasröhren) eingebaut sein, müßte sich eine gesteigerte Wirkung ergeben. Es wurde darauf verzichtet, denn das Modell würde nur an Deutlichkeit und Übersichtlichkeit verlieren. Ein Zweitstück dieses Modells für das Institut für Geologie und Untergrundforschung in Athen hat der Verfasser 1964 gebaut. Die Modellversuche wurden am Institut für Hydraulik, Landwirtschaftlichen Wasserbau und Siedlungswasser-

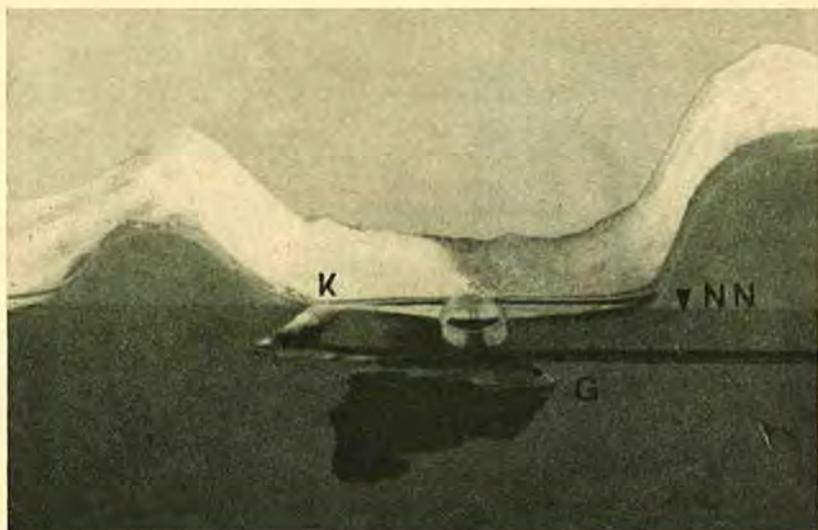


Abb. 4: Detailaufnahme am Modell im Betrieb, linke Modellseite. Einzug des Farbstoffes in die Bohrung der vorderen Glasplatte unter der Einwirkung der Spiegelabsenkung am Beginn des Grundschauches. Der Farbtropfen wurde etwa 2 cm vor der Anbohrung eingebracht. NN = „Meeresspiegel“, K = „Katavothre“ (Schwinde), G = „Grundschauch“.

bau (Vorstand: o. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. E. P. NEMECEK) an der Technischen Hochschule in Graz durchgeführt.

Zusammenhänge hydraulischer Art stellt man zweckmäßig durch Energielinien und Drucklinien dar. Dipl.-Ing. H. BERGMANN und der Verfasser zeichneten, ähnlich schematisierend wie das Modell, die genannten Linien (Abb. 5).

Der beiderseits vom Meeresspiegel eingestaute Karstschauch ist als gerade Röhre dargestellt, die im Livadibusen beginnt, die Bucht von Argostolion und die gesamte Insel mit leichtem Gefälle unterquert und in der Bucht von Sami endet. Das Süßwassersystem ist als Behälter schematisiert, dessen Wasser sich mit der Geschwindigkeit v_1 in den erstgenannten Karstschauch ergießt. Energielinie und Drucklinie haben stets den Höhenunterschied vom Betrage $\frac{v_1^2}{2g}$. Im absteigenden Stück ist dieser Betrag kleiner, da die Röhre mit größerem Querschnitt gezeichnet ist. Der Deutlichkeit halber ist das letzte Stück mit der Geschwindigkeit v_1 übermäßig lang gezeichnet worden, um auf diese Weise den Verlauf der Drucklinie an der Ejektorstelle zeigen zu können. Der abgegebene Impuls

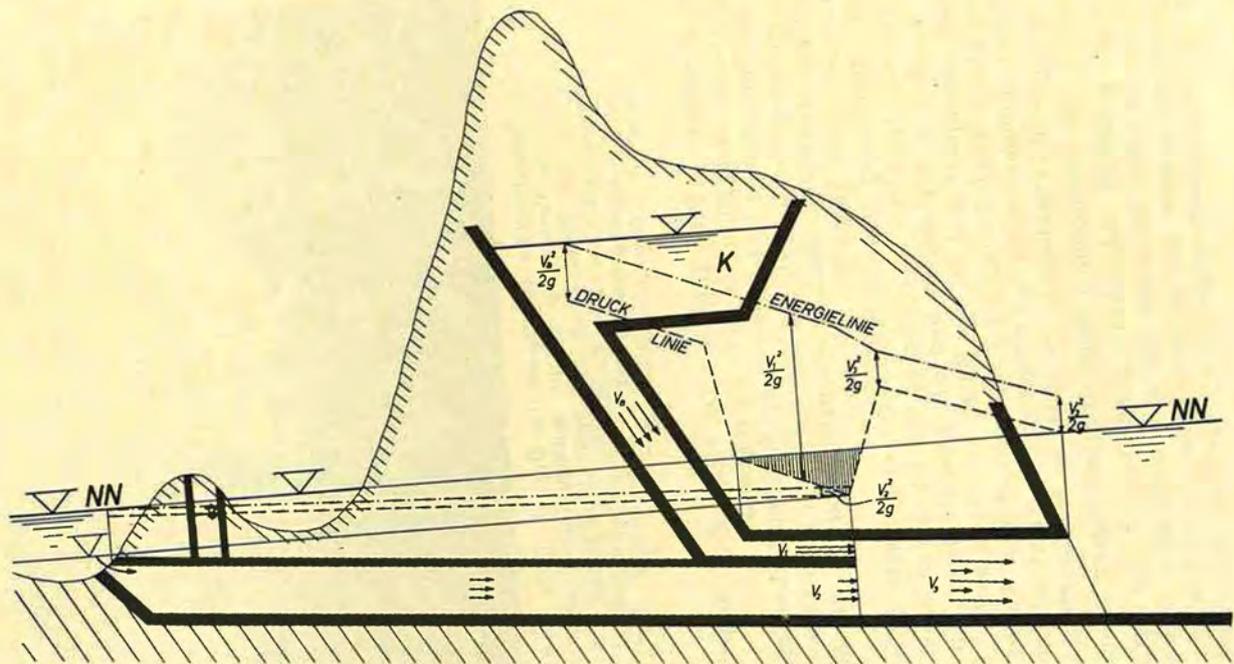


Abb. 5: Stark überhöhtes Schema der Energie- und Drucklinien im Karstwassersystem der Insel Kephallinia nach H. BERGMANN und Th. GLANZ.

versetzt das Meerwasser in Bewegung mit der Geschwindigkeit v_2 . An der Ejektorstelle haben die Drucklinien beider Systeme die gleiche Höhe. In der Übertragungszone steigt die Drucklinie so hoch an, bis sie nur noch den Abstand $\frac{v_2^2}{2g}$ von der Energielinie des Süßwassersystems hat.

Das Brackwasser tritt mit der Geschwindigkeit v_3 unter dem Meeresspiegel aus. Da die Drucklinie vor dem submarinen Austritt höher als der Meeresspiegel liegt, ergeben alle hier anschließenden Karstschläuche Brackwasserquellen, sofern ihre Öffnung am Land niedriger als die Drucklinie liegt. Es ist selbstverständlich, daß die Ergiebigkeit der Brackwasserquellen um so größer sein wird, je kleiner die submarinen Ausgänge sind.

Die gleiche Aussage gilt analog für den Zulauf im Livadibusen, die Spiegellage der Meeresschwinden und ihr Schluckvermögen. Je enger der submarine Zulauf ist, desto tiefer wird der Wasserspiegel an der Stelle der Meeresschwinden und im gesamten Grundschlauch liegen. Die tiefstmögliche Lage ist durch die geodätische Höhenlage der Drucklinie an den Ejektorstellen gegeben. Für das hydraulische System ist es belanglos, an welcher Stelle des westlichen Ufers das Meerwasser einströmt und ob es in Meereshöhe, darüber oder darunter, nun mit Süßwasser vermischt, als Brackwasser auströmt.

Zu der schematischen Darstellung der Ejektorstelle ist noch folgendes zu sagen: Der einschießende Strahl wurde mit der Richtung des Grundschlauches dargestellt. Im Karstsystem wird aber der Druckwasserstrahl stets unter einem Winkel α den Grundschlauch erreichen. Wirksam ist dann nur die gleichgerichtete Komponente des Impulses, also $I \times \cos \alpha$.

Für eine einigermaßen exakte mathematische Behandlung des Problems reichen die vorhandenen Meßergebnisse leider nicht aus. In dieser Hinsicht wäre noch vieles zu unternehmen. Eine Berechnung von H. BERGMANN mit Annahmen, die mit den Beobachtungen in Einklang stehen, ergab für die Brackwasserquellen ein wahrscheinliches Mischungsverhältnis von 8—10 Teilen Süßwasser auf einen Teil Meerwasser, was mit den Konzentrationsmessungen gut übereinstimmt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die geschilderte Theorie ganz zwanglos die Meeresschwinden von Argostolion sowie die Brackwasserquellen in der Bucht von Sami zu erklären vermag. Die Wirkung der einzelnen Ejektoren kann man sich vielfältig und mit unterschiedlichem Wirkungsgrad vorstellen, je nach Ausbildung der Karstschläuche und ihren örtlichen geometrischen Bedingungen. Wesentlich ist, daß sich die Wirkung längs des Grundsystems addiert. Dagegen ist nicht leicht vorstellbar, daß die mit

Meerwasser gefüllten Karstgänge ausgerechnet immer an Verengungsstellen der Süßwasserschläuche anschließen, die obendrein noch dicht sein müssen. Mit einer einzigen Saugstelle, die zufällig die Bedingungen erfüllen könnte, kann aber nicht der Einzug von rund $1,7 \text{ m}^3/\text{s}$ (siehe vorher) erklärt werden. Die oben angeführte Schwallwellenbetrachtung setzt über große Strecken Freispiegelabfluß voraus. Genauere Messungen wären gerade in dieser Hinsicht von großem Interesse. In Anbetracht der Länge des Karstsystems ist aber diese Tatsache bedeutungsvoll, da beim Freispiegelabfluß weniger Energie verzehrt wird als bei Vollauf (Wandrauhigkeit und Welligkeit für beide Fälle gleich angenommen). Eine genauere Untersuchung in Hinsicht auf die Spiegellagen der Meeresschwinden in Abhängigkeit der Durchflüsse und die Erstellung von Ganglinien bei gleichzeitiger Beobachtung der Niederschläge und Schüttung der Brackwasserquellen wäre für die Bestätigung der Theorie von Vorteil.

Abschließend sei hervorgehoben, daß diese Erklärung des Phänomens der „Meermühlen von Argostolion“ das Ergebnis eines harmonischen Zusammenspiels von hydrogeologischer Feldarbeit und ingenieurmäßiger Hydraulik ist.

Literatur

- [1] MAURIN, V. & J. ZÖTL: Karsthydrologische Aufnahmen auf Kephallenia (Jonische Inseln). Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, 1960/1, Graz 1960.
- [2] WIEBEL, K. W. M.: Die Insel Kephallenia und die Meermühlen von Argostoli. Hamburg 1874.
- [3] BROWN, C.: Lt. Lawrence and Mr. Stevens on the streams of sea-water, which flow into the land in Cephalonia. Quart. Journ. Geol. Soc. 2, London 1835.
- [4] STRICKLAND, H. E.: On currents of sea-water flowing into the land near Argostoli in the Island of Cephalonia. Quart. Journ. Geol. Soc., 2, London 1835.
- [5] DAVY, J.: On a curious phenomenon observed in the Island of Cefalonia, and on the proximate cause of Earthquakes in the Jonian Islands. Edinb. New. Philos. Journ., 20, Edinburgh 1836.
- [6] PÜCKLER-MUSKAU: Südöstlicher Bildersaal. 3. Teil, München 1841.
- [7] MOUSSON, A.: Ein Besuch auf Corfu und Cefalonia im September 1858. Zürich 1858.
- [8] UNGER, F.: Wissenschaftliche Ergebnisse einer Reise in Griechenland und in den Jonischen Inseln. Wien 1862.
- [9] ANSTED, D. T.: On some Curiosities of Physical Geography in the Jonian Islands. Rep. of the Brit. Assoc., Newcastle 1863.
- [10] FOUQUE, F.: Rapport sur les tremblements de terre de Céphalonie et de Mételin en 1867. Ardices des missions scientifiques et littéraires, publié sous les ausp. du ministère de l'instruction publique, 4, Paris 1867.

- [11] LEHMANN, O.: Die Hydrographie des Karstes. *Enz. d. Erdkunde*, 6 b, Leipzig—Wien 1932.
- [12] MARKETOS, S.: Das Süßwasser der Insel Kephallinia und das Phänomen der Meermühlen von Argostolion. *Ionios Echo*, 2/3, Athen 1963.
- [13] STEINWENDER, A.: Über Düsen, Wasserstrahlpumpen und Heber. *Österr. Wasserwirtschaft*, 2, Wien 1950.
- [14] STEINWENDER, A.: Die Bedeutung der Wasserstrahl-Wasserpumpe im Betrieb der Wiener Wasserwerke. *Der Aufbau*, 10, Wien 1955.
- [15] MAURIN, V. & J. ZÖTL: Karsthydrologische Untersuchung auf Kephallenia (Jonische Inseln). *Österr. Hochschulzeitung* v. 15. Juni 1963. Wien 1963.

Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Ing. THEODOR GLANZ, Technische Hochschule Graz
Institut für Hydraulik,
Landwirtschaftlichen Wasserbau und Siedlungswasserbau
8010 Graz, Stremayrgasse 10 (Österreich).