© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Das artesische Gebiet von Honolulu.

Von Harold S. Palmer, Universität Hawaii, Honolulu, Hawaii.

Geologische Geschichte

Die Insel Oahu, auf der die Stadt Honolulu liegt, besteht aus zwei Gebirgen, die sich vom Nordwesten nach Südosten erstrecken. Das südwestliche Waianae-Gebirge ist das ältere und ist von Tälern tief durchgeschnitten, so daß im allgemeinen nur schmale, dazwischenliegende Rücken übriggeblieben sind. Das jüngere, nordöstliche Koolau-Gebirge erstreckt sich weiter nach Südost und hat auf der Leeseite seines östlichen Endes eine Küstenebene, die die Lage der Stadt (zirka 105.000 Einwohner, 1926) bildet.

Dem Aufbau des Waianae-Gebirges folgte eine Erosionsperiode ohne vulkanische Tätigkeit, und erst später ergossen sich die Basaltdecken des Koolau-Gebirges. Nach Schluß dieser zweiten Tätigkeit lag dieser Teil der Insel mindestens 1000 Fuß (300 m) höher über dem Meeresspiegel als heute. Die Ströme erodierten tiefe Täler in den Basaltkegel des Koolau-Gebirges. Dann trat eine Senkung des Landes ein, so daß endlich der Meeresspiegel zirka 40 Fuß (12 m) höher lag als jetzt. Nach der Senkung des Landes ist eine Ablagerungszeit eingetreten, während der ein dreieckiges Prisma von Schlamm, Sand, Kalk, Tuff und Aschen auf den versenkten Böschungen der Insel abgelagert wurde. Das jüngste Ereignis war eine Hebung des Landes (bzw. Sinken des Meeres) bis zur heutigen Lage. Durch diese Bewegung wurde die obere Fläche des Prismas, der 2 bis 3 km breite Baugrund der Stadt, trockengelegt. Seitdem sind nur geringere Veränderungen zu erwähnen, da die Ebene von einem Korallenriff vor der Brandung geschützt ist. Ablagerungen von Trümmern aus dem Koolau-Gebirge haben die Ebene noch etwas erhöht.

Der ehemalige höhere Stand des Honolulu-Gebietes ist dadurch bewiesen, daß die heutigen Täler unterirdische Verlängerungen besitzen, wie durch die Protokolle der Tiefbohrungen

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

festgestellt wurde. Die stark gekrümmten Höhenlinien in Abbildung 1 wurden von der topographischen Karte abgepaust, und

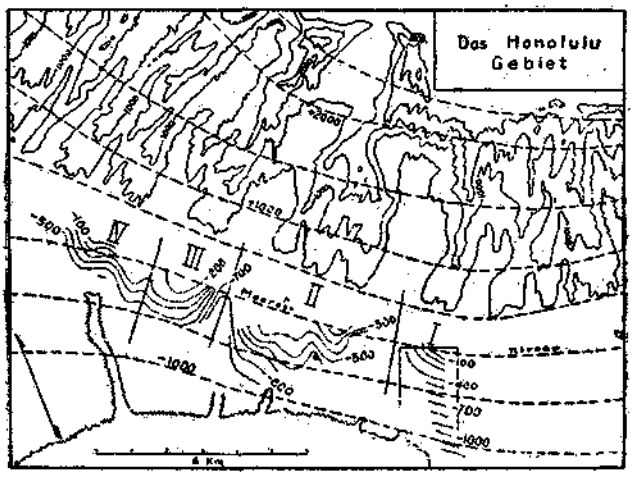

Abb. 1. Topographische Skizze des Honolulu-Gebietes.
Ununterbrochene Linien = gewöhnliche Höhenlinien des gegenwärtigen Geländes
Strichlierte Linien = wieder hergestellte Höhenlinien des Urgeländes.
Punktierte Linien = Tiefenlinien im verschütteten Gelände.
Zickzack-Linie = der gegenwärtigen Riffensaum.

haben einen Abstand von 500 Fuß (150 m). Mit der Küste, die als Zickzacklinie eingetragen ist, geben sie eine Darstellung der Hauptzüge des heutigen Geländes. Die wenig gekrümmten, sritchlierten Linien wurden als Tangente zu den Vorsprüngen der oben beschriebenen Linien eingetragen, und geben annähernd eine Darstellung des Urgeländes dieses Teiles des Koolau-Gebirges zur Zeit des Abschlusses der vulkanischen Tätigkeit. Sie wurden auch in Abständen von 500 Fuß (150 m) eingetragen. Die punktierten Linien sind unterirdische Niveaulinien, und zwar Tiefenlinien mit einem Abstand von 100 Fuß (30 m). Die Tiefe der Berührungsfläche der Sedimente über den Basalten ist an zirka 50 Stellen durch die Brunnenprotokolle genau bekannt. Sie ist verhältnismäßig genau bekannt an weiteren 15 Stellen aus den Längen der Rohre, mit denen die Brunnen ausgestattet sind. Diese Tiefen und die Tiefenlinien wurden auf einer Karte verzeichnet. Glücklicherweise waren die verwendbaren Brunnen derart verteilt, daß die Unternehmung gelungen ist, obwohl die Zahl der Brunnen nur eine geringe war. Es ist selbstverständlich, daß die Karte keine genaue Darstellung der Einzelheiten

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

des Kontaktes bietet; jedoch gibt sie einen Beweis für die unterirdische Verlängerung der Täler und für ihre Zuschüttung durch Sedimente.

Der ehemalige höhere Stand des Meeresspiegels im Honolulu-Gebiete ist durch zahlreiche und ausgedehnte Überreste von Korallenriffen bewiesen, die eine Höhe von 36 Fuß (11 m) erreichen.

Hydrologische Eigenschaften der Gesteine.

Nach einer Schätzung, die auf 39 Brunnenprotokollen beruht, besteht das Prisma der Sedimentgesteine aus 50% Schlamm, 8% Sand und Kies, 2% vulkanische Produkte und 40% Kalk. Der Sand, der Kies und die vulkanischen Produkte sind im allgemeinen durchlässig. Der Kalk ist zum Teil undurchlässig, aber er enthält sehr durchlässige Linsen und Spalten, die viel Wasser aufzunehmen vermögen. Der Schlamm ist sehr undurchlässig, und da er den größten Teil des Prismas bildet und die Schichten und Linsen der anderen, durchlässigen Gesteinsarten mehr oder minder vollständig umhüllt, einschließt und isoliert, hat er die Wirkung aus der Gesamtheit des Sedimentprismas einen undurchlässigen, wasserstauenden Körper zu bilden.

Ich bin der Meinung, daß die Basalte im Liegenden ausschließlich Ergußbasalte sind. Wenn auch daneben intrusive oder pyroklastische Gesteine vorkommen, so spielen sie doch nur eine unbeträchtliche Rolle. Die Ergußbasalte haben viele, große Hohlräume, die miteinander gut verbunden sind und die eine außerordentliche große Durchlässigkeit verursachen. Zu den unwirksamen Poren, d. h. Poren, die nicht fähig sind, Wasser zu führen, zählt man die isolierten Gasblasen und die mikroskopischen Lücken zwischen den Kristall- und Glaskörnern.

Es gibt mehrere Typen von Hohlräumen, die wirksam sind, d. h. fähig, Wasser zu führen. Rundliche oder verlängerte Blasen werden von freiwerdendem Gas während der Erstarrung der Lava gebildet. Durch die Bewegung wird die Lava derart geknetet, daß Verbindungen zwischen den Gasblasen entstehen. Schlackenartige Lücken entstehen dadurch, daß die teilweise oder ganz erstarrte Kruste eines Lavastromes, durch die Bewegungen des zähflüssigen, doch beweglichen Inneren, zer-

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

brochen wird und in eine Menge von kleineren oder größeren, rauhen, eckigen Lavablöcke zerbröckelt. Zwischen den Blöcken bleiben viele große und kleine Hohlräume, die in Verbindung miteinander stehen und viel Wasser führen können. Wenn ein Lavastrom sich vorwärts bewegt, erstarrt der Saum so rasch, daß er nur hie und da in vollständige Berührung mit dem früheren Boden kommen kann. Auf diese Weise entstehen sehr poröse Zonen zwischen Lavadecken, die für das Grundwasser und die Grundwasserzirkulation sehr wichtig sind. Wo eine starke Kruste über einem Lavastrom erstarrt und die flüssige Lava später aus dem Innern abfließt, entsteht ein Lavatunnel. Sie sind oft hunderte von Metern lang, und haben einige Zentimeter bis einige Meter im Durchmesser. Wenn ein Lavastrom zu fließen aufhört, hat er immer noch eine hohe Temperatur und während der folgenden Abkühlung zieht sich die Lava zusammen, mit der Wirkung, daß Abkühlungsspalten entstehen. Andere Spalten, die man als exokinetische Spalten bezeichnen kann, folgen auf mechanische Störungen, durch Erdbeben, Einsturz, Rutschung, Zusammenbruch usw. Ich schätze, daß die Summe der wirksamen Hohlräume (Gasblasen, Schlacken- und Ablagerungsspalten, Lavatunnels, Abkühlungs- und exokinetische Spalten) zwischen 5 und 30 Prozent des Gesamtvolumens der Basalte im Honolulu-Gebiet schwankt, aber es wäre unmöglich, sie genau zu bestimmen. Ein sehr außergewöhnliches Basaltstück, das ich im Laboratorium untersuchte, hatte eine Porosität von 70 Prozent.

Kurz gesagt, gibt es im Honolulu-Gebiet zwei Gesteinskörper, die für hydrologische Zwecke zu unterscheiden sind. Unten liegen die höchst durchlässigen Basalte, oben die verhältnismäßig undurchlässigen Sedimente der Küstenebene. Landeinwärts von der Küstenebene erstrecken sich die Basalte bis zur Wasserscheide und noch weiter zur Nordostküste der Insel. Das Koolau-Gebirge bildet das Nährgebiet des artesischen Systems von Honolulu.

Das Grundwasser in ozeanischen Inseln von einfacher Struktur.

Um die Grundwasserverhältnisse im Honolulu-Gebiet zu erklären, wird es zweckmäßig sein, einen Umstand zu betrach-

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

ten, der die meisten Grundwassergebiete nicht betrifft, und zwar die Wirkung des hydrostatischen Druckes des Salzwassers des Ozeans, mit seinem spezifischen Gewichte von zirka 1.025. Das spezifische Gewicht von 1.025 ist gleich $^{41}/_{40}$ oder $1^{1}/_{40}$, das heißt, daß das Salzwasser um die Hawaiischen Inseln ein Vierzigstel schwerer als Süßwasser ist und bei gleicher Tiefe einen um ein Vierzigstel größeren Druck verursacht.

Zunächst stellen wir uns eine symmetrische Insel vor, die aus gleichmäßig durchlässigen Gesteinen besteht und auf die kein Regen fällt. Es ist selbstverständlich, daß es ohne Regen keinen süßen Grundwasserkörper auf einer solchen Insel geben kann. Nach geraumer Zeit würde Salzwasser vom Meer hineindringen und all die zugänglichen Poren unter dem Meeresniveau erfüllen. Die Poren, die über dem Meeresniveau liegen, bleiben mit Luft gefüllt. (Für unsere Zwecke können wir die Wirkungen der Kapillarität vernachlässigen.) Solch eine Insel ist in Abbildung 2 A diagrammatisch dargestellt.

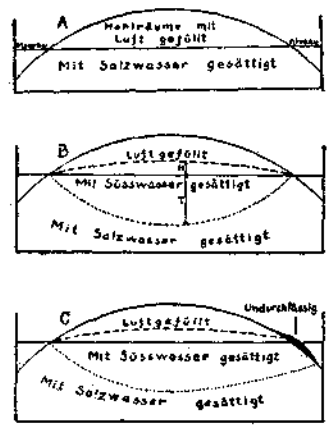

Abb. 2. Das Vorkommen von Grundwasser in imaginären Inseln.
A. Eine regenfreie, durchlässige, homogene Insel.
B. Eine regenreiche, durchlässige, homogene Insel.
C. Eine regenreiche, durchlässige Insel mit einer undurchlässigen Decke auf einer Seite.

Stellen wir uns nun vor, daß die Insel mehr oder minder regenreich, statt regenfrei sei. Dann wird ein Teil des Regenwassers in den Boden hineinsickern und durch die Gesteine hinabsinken und einen linsenförmigen, süßen Grund-

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

wasserkörper bilden, der wegen seines geringeren spezifischen Gewichtes auf dem Salzwasser schwimmt, wie in Abbildung 2 B dargestellt ist. Daß ein unterirdischer Süßwasserkörper auf Salzwasser schwimmt, ist in mehreren Gegenden in Hawaii und anderswo unzweifelhaft festgestellt. Der linsenförmige Süßwasserkörper wird eine stärkere Krümmung der oberen Fläche haben, wenn die Gesteine weniger durchlässig sind oder wenn die Insel regenreicher ist. Die Neigung dieser Fläche ist abhängig von dem Verhältnis zwischen der Zufuhr von Regenwasser und der Abfuhr durch Sickerung nach unten und nach den Küsten.

Die untere Fläche kann als die Grenze zwischen Süß- und Salzwasser bezeichnet werden. Ihre Krümmung ist viel stärker als die der oberen Fläche, und zwar so, daß die Tiefe (T in Abbildung 2 B) der Grenze unter dem Meeresniveau, die Höhe (H) des Grundwasserspiegels über dem Meeresniveau, und das spezifische Gewicht (G) des Salzwassers die folgenden Verhältnisse haben:

$$H : T = (G - 1) : 1 = G - 1$$

Diese Gleichung ist leicht abzuleiten aus den Gleichungen für das Prinzip von Ghyjbens und Herzberg. (Siehe K. Keilhack, Lehrbuch der Grundwasser- und Quellenkunde, S. 152, 1912.) Da das Meerwasser um die Hawaiischen Inseln ein spezifisches Gewicht von zirka $1^1/_{40}$ hat, ist $G - 1 = {}^1/_{40}$, dann ist $H : T = 1 : 40$ und $T = 40\ H$, in Worten, die Grenze zwischen Süß- und Salzwasser an jeder beliebigen Stelle liegt 40mal so tief wie die Höhe des Grundwasserspiegels. Dieser theoretische Schluß ist mehrmals durch Untersuchungen in Hawaii und anderwärts bestärkt und bewiesen worden.

Da, wie angegeben wurde, die Insel ziemlich regenreich ist und deshalb von Zeit zu Zeit Zusätze zum Süßwasserkörper erhält, ist es selbstverständlich, daß sie auch Verluste an Süßwasser erleiden muß. Auf einer vollständig homogenen Insel werden die Verluste hauptsächlich oder ausschließlich durch Quellen in der unmittelbaren Nähe des Strandes stattfinden. Wenn die Gesteine heterogen sind, können die Verluste anderswo eintreten. Nur geringere Mengen des Süßwassers werden durch Diffusion in das Salzwasser oder durch Verdunstung in die Luft verloren gehen.

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Drittens, stellen wir uns vor, daß der freilich imaginären Insel auf der einen Seite ein undurchlässiger Gesteinskörper angefügt ist, wie in Abbildung 2 C. Der undurchlässige Körper wird die Bewegung des Süßwassers gegen den Strand und den Verlust durch Strandquellen verhindern. Das Wasser wird so gestaut, daß der Grundwasserspiegel steigt. Gleichzeitig muß die Grenze zwischen Süß- und Salzwasser sinken, und zwar um das Vierzigfache, wenn das hydrostatische Gleichgewicht bewahrt werden soll. Dieser Vorgang wird entweder solange andauern, bis der Grundwasserspiegel die obere Kante des undurchlässigen Körpers erreicht und neue Quellen in dieser Höhe bildet oder bis die Grenze zwischen Süß- und Salzwasser die untere Kante erreicht und das Süßwasser in das Meerwasser abfließt. Welche von diesen zwei Verlustmöglichkeiten eintreten wird, hängt davon ab, ob die Tiefe der unteren Kante des undurchlässigen Körpers größer oder kleiner ist als die vierzigfache Höhe seiner oberen Kante über dem Meeresniveau. Der Rand des Süßwasserkörpers ist nicht scharfrandig, sondern wird durch die Unterfläche des undurchlässigen Körpers abgeschrägt.

Grundwasserverhältnisse im Honolulu-Gebiet.

Das undurchlässige Sedimentprisma, auf dessen oberer Fläche Honolulu liegt, ist ein derartiger wasserstauender Körper, und ist in Abbildung 3 diagrammatisch dargestellt. Die Küsten-

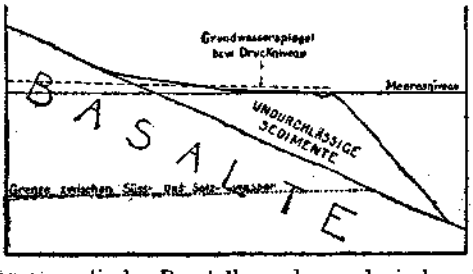

Abb. 3. Diagrammatische Darstellung des geologischen Baues vom Honolulu-Gebiete.

ebene, die obere Fläche des Prismas, steigt vom Strande her zunächst nur langsam an, so daß ein großer Teil der Stadt nicht höher als 25 Fuß (8 m) über dem Meeresniveau gelegen ist. Später steigt sie etwas rascher an und erreicht im allgemeinen eine Höhe von 40 bis 80 Fuß (12 bis 24 m). Die innere Grenze

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

ist nur hie und da sichtbar, da sie durch künstliche Veränderungen des Terrains und unter einer ausgedehnten Schichte vulkanischer Asche verborgen ist. Zungenförmige Ausläufer der Ebene erstrecken sich noch höher hinauf in die Täler. Die untermeerische Kante des Prismas liegt mindestens 1600 Fuß (490 m) unter dem Meeresniveau. Das Prisma hatte die Wirkung, das seewärts fließende unterirdische Süßwasser zurückzustauen, so daß (1880) der Grundwasserspiegel eine Höhe von 42 Fuß (12.8 m) landeinwärts von Honolulu erreichte. Infolgedessen stand jeder Punkt des Grundwasserkörpers unter einem hydrostatischen Druck, der abhing von dem Höhenunterschied zwischen dem betreffenden Punkt und dem Niveau von 42 Fuß über dem Meeresspiegel. Mit anderen Worten, der Druck war derartig, daß das Wasser bis zu einer Höhe von 42 Fuß gestiegen wäre, wenn eine Bahn existiert hätte. Die artesischen Brunnen lieferten solche Bahnen.

Bevor die ersten Brunnen gebohrt waren, entrann ein kleiner Teil des Grundwassers durch Quellen über die innere Kante des Prismas und das geschieht auch noch gegenwärtig. Ein zweiter kleiner Teil rann und rinnt immer noch durch die das Prisma durchsetzende Spalten. Ich bin der Meinung, daß damals der größere Teil des Süßwassers unter der unteren Kante des Prismas in das Meerwasser abgeflossen ist, daß aber dieser Abfluß jetzt durch den Abfluß aus artesischen Brunnen ersetzt wird, obwohl diese Ansicht selbstverständlich nicht zu beweisen ist.

Die Höhe des Grundwasserspiegels und die Tiefe der Grenze zwischen Süß- und Salzwasser im Honolulu-Gebiet sind gemeinsam abhängig von dem Verhältnis zwischen 1. dem Gewinn an Wasser durch einsickernden Regen und 2. den Verlusten durch Brunnen und oberflächliche und untermeerische Quellen. Die obere Fläche des Süßwasserkörpers ist zweigeteilt: der abgeschrägte, der See zugewendete Teil dieser Fläche ist geneigt und liegt unmittelbar an der unteren Fläche des stauenden, undurchlässigen Prismas. Der sich landeinwärts erstreckende Teil ist ein freier Grundwasserspiegel; er ist fast wagrecht, weil die wasserführenden Basalte höchst durchlässig sind, und er steigt und sinkt mit den Schwankungen des Verhältnisses zwischen Wassergewinn und Verlust. Die Tiefe der Grenze zwischen Süß- und Salzwasser schwankt gleichzeitig aber immer mit dem vierzigfachen Betrag.

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Wenn man an einem bestimmten Ort in einen Brunnen durch das undurchlässige Prisma in die durchlässigen, wasserführenden Basalte niederbohrt, eröffnet man eine neue Abflußbahn; das Wasser steigt in dem Bohrloch und strebt danach, die Höhe des Grundwasserspiegels zu erreichen. Ob der Brunnen von selbst fließen wird oder ob er gepumpt werden muß, hängt davon ab, ob der Ort über oder unter dem benachbarten Teil des Grundwasserspiegels gelegen ist. Genauer kann man sagen, es hängt davon ab, ob der Ort niedriger oder höher liegt als die Verlängerung des fast wagrechten Grundwasserspiegels. Mehrere Brunnen in Honolulu liefern, ohne daß man sie pumpt, 2,500.000 U. S. Gallons (10.000 m^3) in 24 Stunden. Die Brunnen sind 150 bis 1150 Fuß (45 bis 350 m) tief, und haben 4 bis 12 Zoll (10 bis 30 cm) im Durchmesser. Die tieferen Brunnen sind jene, die näher dem Strand oder näher den Achsen der unterirdischen Täler gelegen sind. Die Brunnen erstrecken sich 14 bis 340 Fuß (4 bis 105 m) in die wasserführenden Basalte hinein und sind mit 90 bis 900 Fuß (27 bis 270 m) Rohr ausgestattet, um den Einsturz der weichen, brüchigen Sedimentgesteine zu vermeiden.

Durchschnittlich ist die Gesamtniederschlagsmenge auf dem betreffenden Einsickerungs- oder Nährgebiet zirka 170,000.000 U. S. Gallons (650.000 m^3) in 24 Stunden. Man hat berechnet, daß die obere Grenze des unschädlichen Verbrauches von artesischem Wasser im Honolulu-Gebiet cirka 42,000.000 U. S. Gallons (160.000 cm^3) in 24 Stunden beträgt, d. h. cirka ein Viertel der Niederschlagsmenge auf dem Nährgebiet. Seit Jahrzehnten hat man im Durchschnitt 50,000.000 U. S. Gallons (190.000 m^3) entnommen. Die Wirkung dieser 25%igen Überentnahme über die schädliche Grenze ist eine starke Senkung des Grundwasserspiegels.

Die isopiestischen Bezirke.

Die drei geraden Linien auf der Karte (Abbildung 1) teilen das artesische Gebiet von Honolulu in vier Bezirke (nummeriert von Osten nach Westen), die sich dadurch unterscheiden, daß in sämtlichen Brunnen jedes Bezirkes das Wasser durch den artesischen Druck bis auf ein bestimmtes Niveau emporgetrieben wird. (In dem Falle, daß der Brunnen ein oder mehrere Lecke hat, steigt das Wasser nicht so hoch.) Die bestimmten Niveaus

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

in den vier isopiezischen (iso = gleich, piezo = Druck) Bezirken sind verschieden. Innerhalb der Bezirke haben sich die Niveaus mit der Zeit verändert, wie die folgende Tabelle zeigt:

Veränderungen der Druckniveaus der isopiezischen Bezirke.
(Höhen ausgedrückt in Fuß über dem Meeresniveau. 1 m = 3·28 Fuß.)

Bezirk	Ca. 1881	Dez. 1916	Aug. 1926	Gesamtsumme des Sinkens
I.	35	25	18·55	16·45 ±
II.	42	30	23·75	18·25 ±
III.	!	31	24·00 (?)	?
IV.	37	29	23·46	13·54 ±

Die Senkung war in den Bezirken I und II am stärksten gewesen, da die Entnahme in diesen Bezirken am größten war. Tatsächlich hat Bezirk IV um 1920, einen tieferen Stand gehabt als jetzt. Seitdem ist eine kleine Erhöhung eingetreten, die darauf zurückzuführen ist, daß in den letzten Jahren viel weniger Reis angebaut worden ist, der einen riesigen Wasserverbrauch erfordert. Der abnehmende Wasserverbrauch hat die Bilanz verschoben und günstiger gestaltet, so daß das Druckniveau ein wenig gestiegen ist. Die Grenze zwischen Bezirk III und IV ist weniger deutlich als die anderen Grenzen.

Die Schwankungen des Druckniveaus in einem Brunnen in dem Bezirk II für die Periode 1910 bis einschließlich 1917 sind im unteren Teil von Abbildung 4 durch die Kurve, die auf wöchentlichen Beobachtungen beruht, dargestellt. In dem oberen Teil des Diagramms ist die Kurve als eine punktierte Linie wieder eingetragen, um einen Vergleich mit den Niederschlagsmengen zu ermöglichen. Die senkrechten Streifen einschließlich der schräg schraffierten und der nicht schraffierten Teile, zeigen die monatlichen Niederschlagsmengen in einem Regenmesser in demselben Gebiet für dieselbe Periode. Der durchschnittliche Niederschlag in den acht Jahren war 2.35 Zoll (59.6 mm) pro Monat. In 28 von den 96 Monaten gab es überschüssigen Regen, wie die schräg schraffierten Streifen veranschaulichen. Die schwarzen Flächen zeigen die Monate mit geringerer als der

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

durchschnittlichen Regenmenge. Wir können die folgenden Sätze ableiten: 1. Jedes Maximum des Druckniveaus folgt nach einem Regenüberschuß; 2. jedes Minimum des Druckniveaus folgt nach einer regenarmen Zeit, und 3. jeder Regenüberschuß verursacht entweder ein Maximum oder eine Krümmung der Druckniveaukurve nach oben.

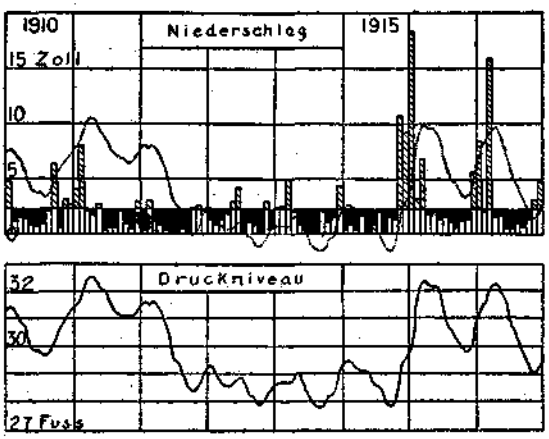

Abb 4. Schwankungen des Druckniveaus in einem artesischen Brunnen und Schwankungen des Niederschlages in einem benachbarten Regenmesser.

Der Grundwasserspiegel, bzw. das Druckniveau schwankt mit dem Niederschlag und mit dem Wasserverbrauch, d. h. mit anderen Worten mit der Bilanz zwischen Gewinn oder Zufluß und Verlust oder Abfluß des Grundwasserkörpers.

Die Ursache und Erklärung der ungleichen Drucke in den vier isopiestischen Bezirken hängt von dem Zustand der unterirdischen Verlängerungen der Täler ab (siehe Abbildung 1). Die Täler sind mit undurchlässigem Schlamm usw. gefüllt und bilden eine Art von verkehrten, am Kopf stehenden Dämmen. Sie trennen die unterirdischen Verlängerungen der Rücken voneinander, so daß die Rücken die isopiestischen Bezirke bilden. Die Bewegung des Grundwassers von einem unterirdischen Rücken, bzw. isopiestischen Bezirk zu dem benachbarten ist behindert, so daß Ungleichheiten des artesischen Druckes sich nur langsam oder nur unvollständig ausgleichen können. Die Ungleichheiten des Druckes hängen von dem ungleichen Gewinn durch Einsickerung von Regenwasser und von dem ungleichen Ver-

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

lust durch Quellen und Brunnen ab. Wie die Karte zeigt, ist das zugeschüttete, unterirdische Tal zwischen den isopiestischen Bezirken III und IV viel seichter und enger als die anderen unterirdischen Täler und bildet deshalb einen viel weniger wirkungsvollen Damm. Auf diese Weise sind die unklaren Grenzen und der geringere Druckunterschied zwischen den Bezirken III und IV zu erklären. Der einförmige Druck innerhalb eines bestimmten Bezirkes ist durch die vollkommen unbehinderte Beweglichkeit des Grundwassers in den durchlässigen Basalten zu erklären.

Im Jahre 1920 waren cirka 10,000.000 U. S. Gallons (38.000 m^3) pro Tag durch Lecke in den verrosteten Rohren aus mehreren der älteren Brunnen ganz verloren gegangen. Dieser ganz unnötige Verlust ist gegenwärtig durch kostspielige Erneuerung der Rohre oder durch Zustopfen mit Beton bis auf weniger als 2,000.000 U. S. Gallons (7400 m^3) pro Tag vermindert worden und wird in der allernächsten Zukunft noch weiter vermindert werden. Lecke in den Rohren verraten sich dadurch, daß der Grundwasserspiegel, bzw. das artesische Druckniveau sich sofort senkt und niedriger bleibt als in den benachbarten, leckfreien Brunnen.

Chlorgefahr im Wasser des artesischen Gebietes von Honolulu.

In der Verwaltung jedes artesischen Gebietes gibt es eine ernste Gefahr, und zwar die, daß durch Gier und Unwissenheit mehr Wasser dem artesischen Grundwasserkörper entnommen wird, als durch Einsickerung wieder ersetzt wird. Dann sinkt das Druckniveau; viele oder vielleicht alle Brunnen hören auf zu fließen und müssen gepumpt werden. Der Gesamtertrag der Brunnen reicht nicht aus und es entsteht Wassermangel. Oder es kann geschehen, daß das Wasserniveau so tief sinkt, daß es sich nicht mehr lohnt, das Wasser zu pumpen. Daß diese Gefahr Honolulu schon droht, ist durch das Sinken des Druckniveaus bewiesen. Doch ist Honolulu noch von einer bedeutenderen Gefahr bedroht, nämlich von der Möglichkeit, bzw. Wahrscheinlichkeit, daß Salzwasser in unerträglichen Mengen vom Meer in die süßwasserführenden Basalte eindringen wird, wie es schon in einigen der tiefsten Brunnen der Fall gewesen ist. Andere Brunnen zeigen eine Zunahme des Chlorgehaltes, die

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

aber glücklicherweise gering und unschädlich ist. Das Wasser von einem bestimmten Brunnen muß, um trinkbar zu sein, mit besserem Wasser gemischt werden.

Wie oben erwähnt, ist jede Höhenschwankung des Druckniveaus von einer vierzigmal größeren Schwankung der Grenze zwischen Süß- und Salzwasser begleitet. Im Jahre 1916 zum Beispiel schwankte das Druckniveau zirka um 2.5 Fuß (75 cm), was einer gleichzeitigen Schwankung der Süß-Salzgrenze von 100 Fuß (30 m) entspricht. Jedes Mal, wenn die Grenze höher steigt, dringt Salzwasser in eine Zone, die früher nur Süßwasser enthielt. Wenn die Grenze wieder nach unten verschoben ist, bleibt doch etwas Salzwasser in sackförmigen Hohlräumen zurück. Das Salzwasser diffundiert und macht das Süßwasser etwas brakisch. Durch Wiederholung dieses Vorganges wird die Grenze immer weniger scharf und der untere Teil des Süßwasserkörpers wird immer mehr brakisch. Theoretisch betrachtet, würde die Grenze so dünn sein, wie eine geometrische Fläche, wenn sie keine Höhenschwankungen erfahren hätte und wenn die Diffusion keine Wirkung ausüben würde. Tatsächlich ist die Grenze nicht eine Fläche, sondern eine Übergangszone. Diese verbrakende Wirkung war zuerst auf rein theoretischer Basis vermutet, später, im Jahre 1926, wurde sie durch Untersuchungen an zwei Brunnen auf der Insel Oahu außerhalb Honolulu experimentell festgestellt. Einer der beiden Brunnen befand sich in einer Gegend, in der man nie stark gepumpt hatte, so daß die Schwankungen des Druckniveaus und die Salz-Süßgrenze nur klein gewesen waren. Wasserproben zeigten eine Verbesserung des Chlorgehalts von 730 bis nur 125 mg Chlor pro Liter, nachdem man 24 Fuß (7 m) mit Beton zugestopft hatte. Der zweite Brunnen, der im nächsten Paragraph weiter besprochen werden wird, befindet sich in einer Gegend, in der man während den Trockenzeiten der Sommer sehr viel Wasser für Reis- und Zuckerrohrberieselung gepumpt hatte, aber fast nichts in den regenreichen Wintern. Im Sommer also, wird viel Wasser entnommen, aber nur wenig Wasser wird durch Einsickerung zugeführt, und infolgedessen steigt die Süß-Salzgrenze ziemlich hoch. Im Winter wird dagegen nur wenig Wasser entnommen, aber es legt sich viel einsickerndes Regenwasser an den Grundwasserkörper, und die Süßwassergrenze wird stark nach unten verschoben. Die dadurch bewirkten Höhenschwankun-

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

gen sind größer als die des ersten Falles, mit der Wirkung, daß Süß- und Salzwasser einander inniger durchdringen und an der Grenze eine breitere Mischungszone entsteht. Im Falle des zweiten Brunnens wurden 164 Fuß (50 m) Beton als Stopfmaterial eingeführt, aber der Chlorgehalt verbesserte sich weniger, nämlich nur um 408 bis 780 mg Chlor pro Liter. Der erste Brunnen zeigt eine durchschnittliche Abnahme des Chlorgehaltes von 26 mg Chlor pro Liter für jeden Fuß von Beton; der zweite Brunnen nur 1.75 mg Chlor pro Liter für jeden Fuß.

Die Erfahrungen im zweiten Falle waren vollständiger als die im ersten. Der Brunnen ist zirka eine Viertelmeile (400 m) vom Strand des Pearl Harbors entfernt und war ursprünglich 600 Fuß (183 m) tief, mit den untersten 200 Fuß (61 m) in den wasserführenden Basalten. Die oberen 400 Fuß (122 m) der Bohrung hatten undurchlässigen Schlamm durchteuft und waren mit einem Eisenrohr abgedichtet. Im Laufe der Zeit hatte sich der Brunnen mit 30 Fuß (9 m) Schlamm bis auf eine Tiefe von 580 Fuß (177 m) gefüllt. Das Wasser enthielt 695 mg Chlor pro Liter. Der Brunnen wurde neuerdings bis zur ursprünglichen Tiefe ausgeräumt, dann siebenmal mit Beton aufgefüllt und bis zu einer Tiefe von nur 436 Fuß (133 m) verstopft. Dann blieben nur 36 Fuß (11 m) in den wasserführenden Basalten. Jedesmal hat man mehrere Tage gewartet, so daß der Beton hart und fest werden konnte, und erst dann hat man die Wasserproben für die Messungen entnommen. Es wurde jedesmal mindestens sechs Stunden lang gepumpt, um eine einwandfreie Wasserprobe zu bekommen. Das Sinken des Wassers im Brunnen während und wegen des Pumpens war auch gleichzeitig gemessen worden. Die folgende Tabelle gibt die Resultate. (Siehe nebenstehende Seite.)

Wenn man die erste Kolonne der Tabelle mit der dritten Kolonne vergleicht, ist die Verbesserung der Qualität des Wassers ganz auffällig. Die betreffenden Werte sind in Abbildung 5 graphisch dargestellt. Das Verhältnis zwischen der Tiefe (T) und dem Chlorgehalt (C) ist ziemlich genau ausgedrückt in die Gleichung

$$C = 2.26\ T - 580.$$

Die dicke Linie in der Abbildung entspricht dieser Gleichung und die Werte stimmen im allgemeinen. Die dünne Linie zeigt die Reihe der Beobachtungen im Laufe der Zeit. Bevor man

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Erfahrungen beim Zustopfen von einem Brunnen.

Tiefe	Erstreckung in den wasserführenden Basalten	Chlorgehalt	Bemerkungen	Sinken des Wasserspiegels bei gleichmäßigen Pumpen
Fuß	Fuß	mg pro 1		Fuß
580	180	695	Zu Anfang der Untersuchungen	1·0
600	200	780	Nach Ausbaggerung bis zur ursprünglichen Tiefe	1·0
570	170	766	30 Fuß zugestopft	1·6
561	161	695	39 » »	—
538	138	635	62 » »	2·0
498	98	543	102 » »	3·0
470	70	505	130 » »	3·2
462	62	457	138 » »	—
436	36	408	164 » »	6·2

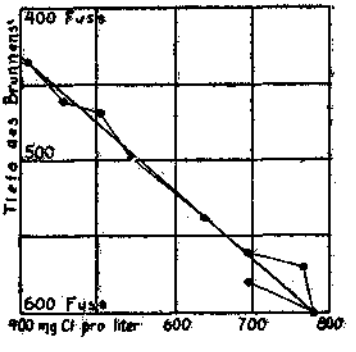

Abb. 5. Graphische Darstellung des Verhältnisses zwischen der Tiefe eines Brunnens und dem Chlorgehalt des gelieferten Wassers. Durch Zustopfen mit Beton wurde der Chlorgehalt vermindert.

diese Arbeit unternommen hatte, lieferte der Brunnen Wasser, welches zu salzig für Berieselungszwecke war. Nachher lieferte er brauchbares Wasser.

Der Nachteil dieser Untersuchung war, daß die Ergiebigkeit des Brunnens stark vermindert wurde. Tatsächlich war die vorhandene Pumpe viel zu klein, um die äußerste Ergiebigkeit des Brunnens direkt zu messen. Die Ergiebigkeit wurde nur mittel-

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

bar untersucht, und zwar durch das Sinken des Wasserspiegels während und durch das Pumpen, das in jedem Falle ungefähr denselben Betrag ergab. Es ist zu bedauern, daß dieser Betrag nicht gemessen wurde. Es ist ein wohlbekanntes Prinzip, daß, wenn man einen Brunnen pumpt, der Wasserspiegel sinkt, und zwar in direkter Proportion zur Wasserentnahme. Das Verhältnis ist fast mathematisch genau, bis das Maximum, bzw. der Grenzwert der Ergiebigkeit des betreffenden Brunnens erreicht ist. Dieses Gesetz beruht auf der Annahme, daß der Wasserspiegel in dem Becken, welches das Wasser des Brunnen liefert, unverändert bleibt. Da der Brunnen in diesem Falle mit Beton zugestopft war, wurden die wasserliefernde Oberfläche und die Ergiebigkeit gleichzeitig vermindert. Die Verminderung der Ergiebigkeit ist dadurch bewiesen, daß bei gleichbleibender Wasserentnahme die Absenkung des Wasserspiegels zunahm, wie man aus der zweiten und letzten Kolonne der Tabelle sehen kann. Diese Werte sind in Abbildung 6 eingetragen und durch eine dünne

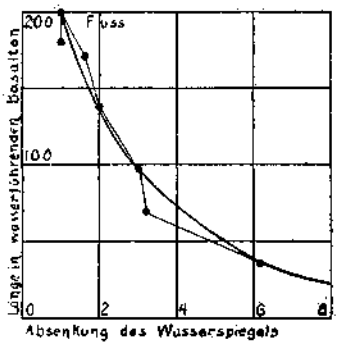

Abb. 6. Graphische Darstellung des Verhältnisses zwischen der Größe der wasserliefernden Oberfläche innerhalb eines Brunnens und des Sinkens des Wasserspiegels unter gleicher Wasserentnahme. Durch Zustopfen mit Beton war das Sinken gesteigert, und die Ergiebigkeit des Brunnens vermindert.

Linie verbunden. Eine gerade Linie ist nicht durch die Mehrzahl dieser Punkte zu ziehen. Die Punkte passen besser zu einer hyperbelähnlichen Figur, etwa so wie jene, die als eine starke Linie eingezeichnet wurde. Es ist mir nicht gelungen, eine passende Gleichung für diese Kurve zu finden.

Der Nachteil der verringerten Ergiebigkeit ist in diesem Falle von geringerer Bedeutung, als der Vorteil der verbesserten

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Qualität, da eine mäßige Menge von brauchbarem Wasser wenigstens einen mäßigen Wert besitzt, während unbrauchbares Wasser wertlos ist.

Die erwähnte Verbrakung ist ein beschränkter Fall des Versalzungsvorganges, der schon einige der tieferen Brunnen im Honolulu-Gebiete verdorben hat. Die Grenze zwischen Süß- und Salzwasser im isopiestischen Bezirke II war ursprünglich zirka 1700 Fuß (500 m) unter dem Meeresniveau. Sie liegt aber gegenwärtig nur in zirka 1000 Fuß (300 m). Im isopiestischen Bezirke I war die Grenze früher zirka 1400 Fuß (425 m), sie liegt aber jetzt nur zirka 750 Fuß (230 m) unter dem Meeresniveau. Die folgende Tabelle gibt die Tiefen (ausgedrückt in Fuß) und die neuesten Chlorgehalte (mg Chlor pro Liter) der Brunnen im isopiestischen Bezirke I an.

Tiefe und Chlorgehalt der Brunnen im isopiestischen Bezirke I.

Tiefe	Chlor	Tiefe	Chlor	Tiefe	Chlor
260	55	400 ?	95	520	425
270	55	407	34	573 ?	171
300	34	500 ?	37	600 ?	247
300 ?	39	500 ?	46	720	11.000
345 +	54	500 ?	72	800 +	8.000
400 ?	49	500 ?	154	860 ?	7.400

Die Tabelle, die nach der Tiefe der Brunnen angeordnet ist, deutet eine Abhängigkeit des Chlorgehaltes von der Tiefe an, es läßt sich aber kein genaues mathematisches Verhältnis daraus ableiten. Die Proben sind leider nicht gleichzeitig und in einem Zeitraume von zwei bis drei Jahren entnommen worden, sonst wäre das Verhältnis regelmäßiger. Es kann sein, daß die Unregelmäßigkeiten zum Teil auf Schäden in den Rohren zurückzuführen sind. Die geographische Verteilung des Chlors ist aus dem Kärtchen (Abb. 7) ersichtlich. Die Lage des Kärtchens, das in einem größeren Maßstab gezeichnet ist, ist von dem kleinen Rechteck auf der ersten Karte (Abbildung 1) gegeben. Das Kärtchen zeigt die östliche Seite einer unterirdischen Talverlängerung. Die Brunnen, die näher dem Meere liegen, sind tiefer als die weiter

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

von dem Strande entfernten Brunnen, und die westlicheren Brunnen sind tiefer als die östlicheren, weil sie näher der unterirdischen Talsohle gelegen sind. Zunehmende Tiefe und zunehmender Chlorgehalt stehen in Beziehung zueinander.

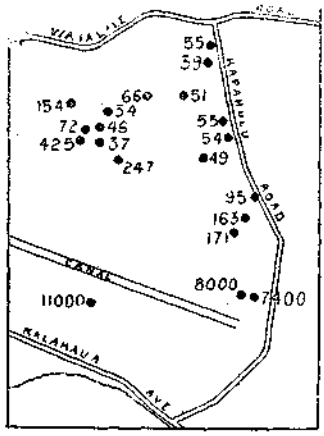

Abb. 7. Geographische Verteilung von Chlor (mg Chlor pro Liter im isopiezischen Bezirke I.

Die Aussicht für die Zukunft.

Bis 1925 hatten die Behörden nichts weiteres für die Verwahrung des artesischen Wassers getan, als absichtliche und unnötige Verschwendung zu verbieten. Die betreffenden Gesetze waren nur teilweise befolgt worden. Weitere Gesetze (1925) ermöglichen die Beschlagnahme von Brunnen, die leck geworden sind, oder zu fordern, daß jeder schadhafte Brunnen von dem Besitzer repariert oder verstopft werde. Es wurde die „Honolulu Sewer and Water-Commission" eingesetzt und verpflichtet, unter anderem die Wasserversorgung der Stadt zu studieren und einen vollkommenen Plan für die Zukunft vorzubereiten. Im Sommer 1926 schrieb ich für die „Commission" einen langen geologischen Bericht über das artesische Wasser, welcher von der technischen Seite durch einen Ingenieur ergänzt wurde. Die „Commission" hat schon mehrere quantitative Untersuchungen unternommen, die von höchstem Wert sein werden. Gegenwärtig liegt ein Ansuchen unter den Bürgern von Honolulu vor, daß die Abteufung von neuen Brunnen verboten werde, und daß endlich, mit wenigen

© Österreichische
Geologische Gesellschaft/Austria; download unter www.geol-ges.at/ und www.biologiezentrum.at

Ausnahmen, alle Privatbrunnen im Honolulu-Gebiete von dem Staatsgebiet Hawaii beschlagnahmt werden. Wenn die Angelegenheit auf diese strenge Weise behandelt wird, können wir erwarten, daß der kostbare Schatz des artesischen Wassers den zukünftigen Generationen bewahrt bleiben wird.

Wien, im April 1927.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Austrian Journal of Earth Sciences

Jahr/Year: 1926

Band/Volume: 19

Autor(en)/Author(s): Palmer Harold S.

Artikel/Article: Das artesische Gebiet von Honolulu. 18-36