Zeitschrift: Wasser- und Energiewirtschaft = Cours d'eau et énergie
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 41 (1949)
Heft: 1

Artikel: Berechnung der Geschiebefracht
Autor: Schoklitsch, Armin
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-920857

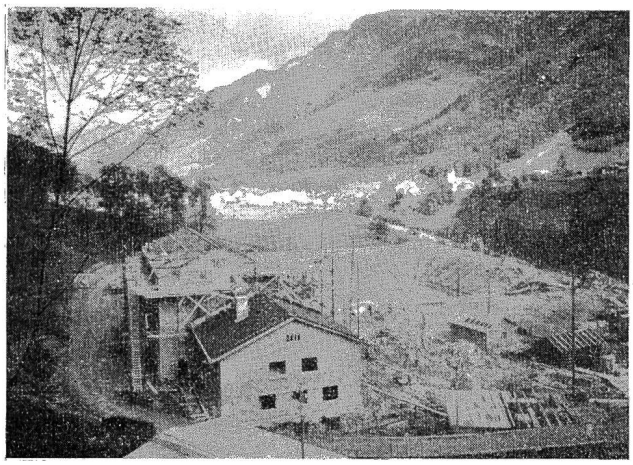
Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern.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

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

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

Download PDF: 01.07.2025

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



Das Fätschbachwerk bei Linthal:
Zentrale und unteres Ausgleichsbecken im Bau.
(Siehe Artikel in nächster Nummer von Ing. A. Sonderegger.)

Berechnung der Geschiebefracht

Von Dr. techn. Dr. ing. h. c. *Armin Schoklitsch, Tucumán* (Argentinien)

Bei der Berechnung des Geschiebetriebes kommt es vor allem darauf an, den Grenzzustand im Fluss festzulegen, bei dessen Überschreitung das Geschiebe in Bewegung gerät; das kann durch Angabe der dem betreffenden Geschiebe zukommenden Grenzschleppspannung S_0 oder des Grenzdurchflusses Q_0 geschehen.

Über die Grenzschleppspannung S_0 ist noch wenig Sicheres bekannt. Schwierigkeiten bereitet vor allem, dass es nur für Geschiebe einheitlicher Körnung und gleicher Form eine Grenzschleppspannung gibt, und dass die Charakterisierung der Geschiebegrösse durch die Angabe einer einzigen Abmessung nur sehr ungenau und roh ist. Nur bei gleich grossen Kugeln ist überdies jene Schleppspannung, bei der ein Stück in Bewegung gerät, annähernd gleich jener, bei der es aus der Bewegung wieder zur Ruhe kommt. Bei allen anderen Geschiebeformen ist die Schleppspannung, die ein Geschiebestück in Bewegung setzt, wesentlich grösser als jene, bei der es wieder zur Ruhe kommt. Der Unterschied ist um so grösser, je verschiedener die drei Hauptabmessungen der Geschiebestücke sind.

Die bisher bekanntgewordenen Ergebnisse von Grenzschleppspannungsmessungen S_0 für den Beginn der Bewegung ziemlich einheitlicher Geschiebe sind in Abb. 1 aufgetragen. Es ergibt sich, dass die seinerzeit von *H. Krey* aufgestellte Beziehung

$$S_0 = 0{,}076\,(\gamma_s - \gamma)\,d \;\; [\mathrm{kg/m^2}] \qquad (1)$$

(γ_s = Wichte des Gesteins der Geschiebe, γ = Wichte des Wassers, beide in [kg/m³], d = Geschiebegrösse in Metern)

für Geschiebegrössen über $d = 0{,}006$ [m] gut zutrifft.

Die Auftragung der Messungsergebnisse mit Geschiebegrössen $d < 0{,}006$ [m] zeigt einen überraschenden Verlauf. Im Korngrössenbereich zwischen 0,0001 und 0,003 [m] scheint die Beziehung

$$S_0 = 0{,}000285\,(\gamma_s - \gamma)\,d^{1/3} \; [\mathrm{kg/m^2}] \qquad (2)$$

zu gelten. Im Bereiche der Korngrössen von 0,003 bis 0,006 [m] geben die beiden Gleichungen (1) und (2) nur die Grenzen an, zwischen denen die gemessenen Grenzschleppspannungen liegen. Der Grund für diesen eigenartigen Verlauf der Beziehung zwischen der Grenzschleppspannung und der Geschiebegrösse ist aber vorläufig noch gänzlich unbekannt.

In der technischen Anwendung ist es zweckmässiger, den Beginn der Geschiebebewegung durch die Angabe des Grenzdurchflusses zu charakterisieren, also jenes Durchflusses, der das Geschiebe eben in Bewegung setzt. Be-

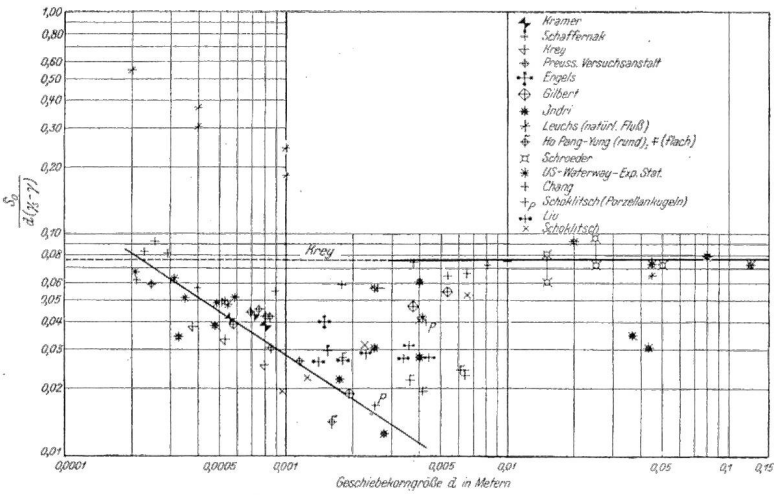


Abb. 1 Beobachtete Grenzschleppspannungen.

zeichnet J das Gefälle der Energielinie, d die Korngrösse in Metern, γ_s die Wichte des Gesteins der Geschiebe in [kg/m³], γ jene des Wassers in [kg/m³], so beträgt der Grenzdurchfluss über den Breitenmeter des Gerinnes nach *E. Meyer-Peter*

$$q_0 = 0{,}0592 \frac{d^{3/2}}{J^{3/2}} \; [\mathrm{m^2/s}] \tag{3}$$

nach *M. Favre*

$$q_0 = 0{,}0002967 \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)^{5/3} \left(\frac{d}{J}\right)^{3/2} [\mathrm{m^2/s}] \tag{4}$$

und für die Gesteinswichte $\gamma_s = 2650$ [kg/m³]

$$q_0 = 0{,}06834 \left(\frac{d}{J}\right)^{3/2} [\mathrm{m^2/s}] \tag{5}$$

Bei Korngemischen wird in die beiden Formeln als massgebende Korngrösse d jene eingesetzt, die das Korngemisch so teilt, dass 35 [%] des Gewichtes feiner sind.

Für den Grenzdurchfluss q_0 lässt sich auch leicht eine Formel aus jener für die Grenzschleppspannung (1) ableiten. Bezeichnet H die Wassertiefe in Metern und n die Rauhigkeit des Bettes, so gilt für den Grenzdurchfluss über den Breitenmeter des Bettes

$$q_0 = \frac{1}{n} J^{1/2} H^{5/3} \; [\mathrm{m^2/s}] \tag{6}$$

Aus der Gleichung (1) folgt, weil auch $S_0 = \gamma J H$ gilt,

$$H = 0{,}076 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \frac{d}{J} \tag{7}$$

und in die Gleichung (6) eingesetzt erhält man

$$q_0 = \frac{d}{n} J^{1/2} \left(0{,}076 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \frac{d}{J}\right)^{5/3} = \frac{0{,}01363}{n\, J^{7/6}} \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)^{5/3} d^{5/3} \tag{8}$$

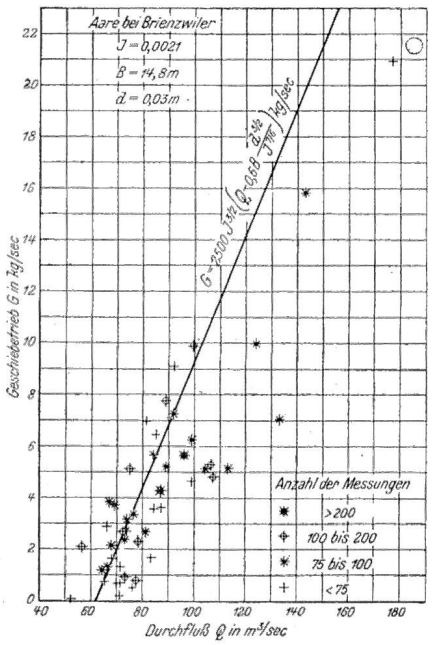


Abb. 2 Geschiebetrieb in der Aare bei Brienzwiler. (Nach Eidg. Amt für Wasserwirtschaft.)

Für die Rauhigkeit n kann bei der Geschiebegrösse d [m] gesetzt werden

$$n = 0{,}0525 \; d^{1/6} \tag{9}$$

so dass schliesslich für den Grenzdurchfluss

$$q_0 = \frac{0{,}01363}{0{,}0525\, d^{1/6} J^{7/6}} \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)^{5/3} d^{5/3} = 0{,}26 \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)^{5/3} \frac{d^{3/2}}{J^{7/6}} \tag{10}$$

folgt. Für die meist vorliegende Wichte des Gesteins der Geschiebe $\gamma_s = 2650$ [kg/m³] vereinfacht sich die Gleichung zu

$$q_0 = 0{,}6 \frac{d^{3/2}}{J^{7/6}} \; [\mathrm{m^2/s}] \tag{11}$$

Bei Korngemischen wird in die Gleichung (11) als Kornabmessung d jene eingesetzt, die das Gemisch so teilt, dass 40 [%] des Gewichtes der Körner feiner sind. Bei Korngemischen kommt dem errechneten Grenzdurchfluss q_0 nur die Bedeutung einer Rechnungshilfsgrösse zu, denn bei Korngemischen kann von einem Grenzdurchfluss eigentlich nicht gesprochen werden. Der feinste Sand läuft ja nahezu das ganze Jahr hindurch zwischen den gröberen Geschieben. Bei steigenden Durchflüssen geraten dann immer gröbere Körner in Bewegung, bis endlich das ganze Gemisch läuft.

Die Geschiebemenge, die innerhalb einer Sekunde durch einen Gerinnequerschnitt wandert, wird als Geschiebetrieb bezeichnet und gewöhnlich in [kg/s], seltener in [rm/s] angegeben. Der auf einen Breitenmeter des Gerinnes bezogene Geschiebetrieb wird spezifischer Geschiebetrieb genannt.

Zur Umrechnung von Geschiebegewicht auf Geschieberaummass muss das Porenverhältnis p bekannt sein, mit dem sich Geschiebe ablagern; gewöhnlich liegt p zwischen 0,25 und 0,35. Bei einer Wichte γ_s des Geschiebegesteins wiegt ein Raummeter [rm] Geschiebe $(1-p)\gamma_s$ [kg/rm].

Der Geschiebetrieb ist eine Funktion des Durchflusses q [m²/s], des Gefälles J und der Geschiebegrösse d [m]. Im Laufe der Zeit sind für den Geschiebetrieb

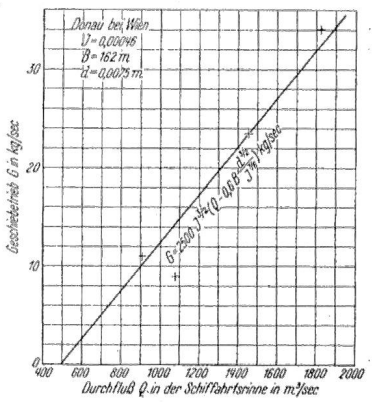


Abb. 3 Geschiebetrieb in der Donau bei Wien.

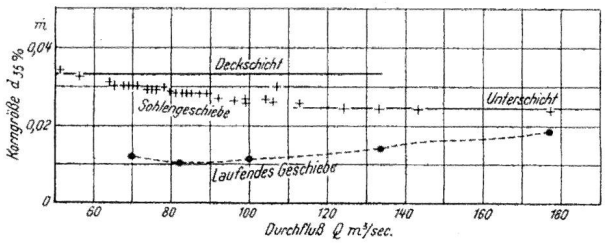


Abb. 4 Korngrösse $d_{35\,\%}$ im Geschiebe der Aare bei Brienzwiler. (Nach Eidg. Amt für Wasserwirtschaft.)

zahlreiche Formeln aufgestellt worden, von denen einige, dargestellt für den spezifischen Geschiebetrieb, angeführt seien; in diesen Formeln bezeichnet H die Wassertiefe in [m], γ die Wichte des Wassers in [kg/m³], n die Bettrauhigkeit, S die Schleppspannung in [kg/m²], g den spezifischen Geschiebetrieb in [kg/s], c Erfahrungsbeiwerte und der Index $_0$ bezeichnet Grössen im Grenzzustand des Beginnes der Geschiebebewegung. Die folgenden Formeln sind nach dem Jahre ihrer Aufstellung gereiht:

P. Du Boys (1879):

$$g = c\,S\,(S - S_0) = c\,\gamma^2\,n^{6/5}\,J^{7/5}\,q^{3/5}\,(q^{3/5} - q_0^{3/5}) \qquad (12)$$

G. K. Gilbert (1914):

$$g = \frac{c}{d^{0,58}}\,J^{1,59}\,q^{1,02} - c_1 \qquad (13)$$

H. Nakayama (1923):

$$g = \frac{c}{d^{1/2}}\,S\,(S - S_0) = \frac{c\,n^{6/5}}{d^{1/2}}\,J^{7/5}\,q^{3/5}\,(q^{3/5} - q_0^{3/5}) \qquad (14)$$

C. H. McDougal (1934):

$$g = c\,J^{1,35\,\ldots\,2,0}\,(q - q_0) \qquad (15)$$

A. Schoklitsch (1934):

$$g = \frac{7000}{d^{1/2}}\,J^{3/2}\,(q - q_0) \qquad (16)$$

E. Meyer-Peter (1934):

$$g = c\,J^{3/2}\,(q^{2/3} - q_0^{2/3})^{3/2} \qquad (17)$$

U. S. Waterway Experiment Station (1935):

$$g = \frac{1}{c\,n}\,J^{1,5\,\ldots\,1,8}\,(H - H_0)^{1,5\,\ldots\,1,8} \qquad (18)$$

und mit den Exponenten $^5/_3 = 1,667$

$$g = \frac{1}{c}\,J^{7/6}\,(q^{3/5} - q_0^{3/5})^{5/2} \qquad (19)$$

$$c = 0,00046 \text{ bis } 0,0011$$

H. J. Casey (1935):

für einheitliches Korn: $g = 0,367\,J^{1/8}\,(q - q_0)$ (20)

für gemischtes Korn: $g = 0,233\,J\,(q - q_0)$ (21)

A. Schoklitsch (1943):

$$g = 2500\,J^{3/2}\,(q - q_0) \qquad (22)$$

Die letzte Formel (22) ist vom Verfasser auf Grund älterer Messungen in Versuchsgerinnen und auf Grund von Geschiebetriebmessungen mittels Geschiebefangkästen in Flüssen aufgestellt worden. Der Grenzdurchfluss wird aus der Gleichung (11) berechnet. Der Geschiebetrieb im ganzen Bett von der Breite B [m] beträgt beim Durchfluss Q

$$G = 2500\,J^{3/2}\left(Q - 0,6\,B\,\frac{d^{3/2}}{J^{7/6}}\right)\,[\text{kg/s}] \qquad (23)$$

d bedeutet die Grösse des massgebenden Geschiebes in Metern, die das Gemisch so teilt, dass 40 [%] des Gemischgewichtes kleiner ist, und B ist die Breite des Bettes in Metern, in dem Geschiebetrieb möglich ist. Die beiden Abb. 2 und 3 zeigen die Übereinstimmung der Gleichung mit Messungen in der Aare und in der Donau in Wien.

Die Messungen des Amtes für Wasserwirtschaft haben auch die Richtigkeit der von Prof. Dr. Meyer-Peter aufgestellten Formel aus dem Jahre 1934[1] nachgewiesen.

Es hat vorläufig gar keinen Sinn, komplizierte Formeln aufstellen zu wollen, weil die Messungsergebnisse ausserordentlich stark streuen; worauf diese Streuung zurückzuführen ist, ist noch nicht aufgeklärt. Fest steht, dass sich das Flussgeschiebe in Wolken bewegt; es läuft also nicht ein gleichmässiger Geschiebestrom über das Bett. In der Deckschicht der Flußsohle ist viel feines Korn herausgespült, und es bildet sich fast stets die sogenannte Sohlenauspflasterung. Bei Beginn der Geschiebebewegung gerät nun diese Deckschicht vorerst noch nicht in Bewegung und es läuft nur feineres Korn aus der Deckschicht und solches, das an leichtabspülbaren Stellen des Bettes oder der Ufer abgetragen wird. Erst wenn die Deckschicht aufgerissen ist, beginnt das dem Querschnitt eigentüm-

[1] *E. Meyer-Peter, H. Favre, A. Einstein,* Neuere Versuchsresultate über den Geschiebetrieb, Schweiz. Bauzeitung, 1934, S. 147—150.

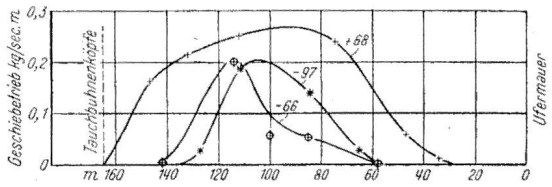


Abb. 5 Verteilung des Geschiebetriebes in der Donau bei Wien.

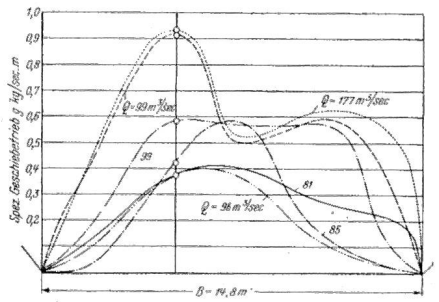


Abb. 6 Verteilung des Geschiebetriebes in der Aare bei Brienzwiler. (Nach Eidg. Amt für Wasserwirtschaft.)

liche Gemisch, das in der Unterschicht liegt, zu wandern. Recht anschaulich zeigen dies die Auftragungen in der Abb. 4. Solange die Deckschicht nicht aufgerissen ist, kann auch mangels genügender Zufuhr der tatsächliche Geschiebetrieb kleiner sein als er sein würde, wenn das strömende Wasser mit der Unterschicht in Berührung stünde.

Änderungen des Korngemisches bei verschieden hohen Durchflüssen können nicht vorhergesehen, sie können nur bei der Nachrechnung von Messungen festgestellt werden. Wenn für einen Flussquerschnitt der Geschiebetrieb zu berechnen ist, bleibt vorläufig nichts anderes übrig, als die Kornmischung der Unterschicht als massgebend anzusehen. Ebenso bleibt nichts anderes übrig, als anzunehmen, dass der Geschiebetrieb plötzlich bei dem dem massgebenden Korn der Unterschicht entsprechenden Grenzdurchfluss beginne.

Weiter muss angenommen werden, dass Geschiebetrieb über der ganzen Sohle erfolgt, über der überhaupt Geschiebe wandern kann. Tatsächlich erfolgt, wie Messungen in der Tiroler Ache bei Baumgarten, in der Donau bei Wien und in der Aare bei Brienzwiler ergeben haben, der Geschiebetrieb nur über einem Streifen der Sohle, der um so breiter wird, je grösser die Durchflüsse sind. Innerhalb dieser Streifen ist, wie ein Blick in die Auftragungen der Abb. 5 und 6 lehrt, der Geschiebetrieb auch nicht gleichmässig verteilt. Aus den Messungen in der Aare bei Brienzwiler ist festgestellt worden, dass es möglich ist, aus dem Geschiebetrieb an einer bestimmten Stelle des Querschnittes auf den Geschiebetrieb im ganzen Querschnitt zu schliessen.

Die Geschiebemenge, die innerhalb eines längeren Zeitabschnittes durch einen Querschnitt läuft, wird als Geschiebefracht bezeichnet und auf diesen Zeitabschnitt bezogen; so spricht man von einer Monatsgeschiebefracht, von einer Jahresgeschiebefracht und von der mittleren Jahresgeschiebefracht einer längeren Reihe von Jahren.

Zur Ermittlung der Geschiebefracht ist die Kenntnis der Ganglinie der Durchflüsse für den ins Auge gefassten Zeitabschnitt erforderlich. Mit der Gleichung (22) für den Geschiebetrieb beträgt die Geschiebefracht

$$g = 2500\, J^{3/2}\, \Sigma (Q - B\, q_0) \qquad (24)$$

und die schraffierte Fläche in Abb. 7 stellt jene Wassermenge $\Sigma (Q - Bq_0)$ dar, die Geschiebe bewegt.

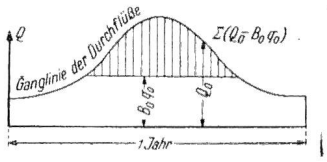


Abb. 7 Der die Geschiebe bewegende Teil der Durchflüsse.

Wünschelrute und Pendel in der modernen Wasserbeschaffung

Von *Emanuel Riggenbach,* Basel

Die Erschliessung von Grundwasser für Trink- und Industriewasserversorgung stellte von jeher ein heikles Problem dar, zu dessen absolut sicherer Lösung auch heute noch kein Mittel gefunden werden konnte. Gemeinden und Private haben gar oft schon durch kostspielige Bohrungen grosse Summen eingebüsst, und so ist die Frage nach der Brauchbarkeit von Wünschelrute und Pendel bei der Suche nach Wasser volkswirtschaftlich von grosser Bedeutung.

Hokuspokus oder eine unbekannte Kraft?

Wünschelrute und Pendel sind keine Schöpfungen des 20. Jahrhunderts. Die Kenntnis dieser Geräte geht weit zurück ins Mittelalter, ja man will sogar auf alten chinesischen Bildern aus dem 2. Jahrhundert vorchristlicher Zeit wünschelrutentragende Männer erkennen. In China wurde früher kein Haus gebaut, bevor die «Erdwahrsager» sich nach den «Dämonen der Tiefe» umgesehen hatten. Ihr Vorhandensein erkannten sie in den Ausschlägen oder Schwingungen der Ruten oder Pendel. Im 11. Jahrhundert war die Wünschelrutengängerei ein Erwerbszweig. Man suchte nach Erzen, vergrabenen Schätzen, geheimen Wasserläufen und Quellen. Mehr und mehr ist aber diese «unsichere Kunst», wie sie der berühmte Arzt Theophrastus Paracelsus vor mehr als 400 Jahren bezeichnete, nur noch für die Auffindung von Wasser angewandt worden.

Die klassische Form der Wünschelrute ist ein gegabelter Zweig in der Länge von 20 bis 50 cm. Dieser wird mit beiden Händen an den Enden der Gabelung gefasst und die Spitze waagrecht nach vorn oder nach unten gehalten. Das sogenannte siderische Pendel kam um 1700 in den nordischen Ländern auf. Es besteht aus einem eiförmigen Metallgehäuse, das an einer Kette hängt, oder aber aus einer Taschenuhr an einem Faden oder an einer Kette.

Es gibt nun Personen, bei denen beim Überschreiten unterirdischer Wasseradern eine nervöse Erregung eintritt, die sich der Wünschelrute oder dem Pendel mitteilt, so dass starke Ausschläge und Schwingungen sichtbar werden. Sie verwenden also diese Instrumente als Fühlhebel, der die sogenannten Reizzonen, die ihr Körper empfindet, registriert. Ob es sich dabei um magnetische,