OVER HET ONTSTAAN DER RIVIERMEANDERS

DOOR

J. J. PANNEKOEK VAN RHEDEN

OVERDRUK UIT DE VERHANDELINGEN VAN HET GEOLOGISCH-MIJNBOUWKUNDIG GENOOTSCHAP VOOR NEDERLAND EN KOLONIËN. GEOLOGISCHE SERIE. — DEEL XIII. EERSTE STUK. BLADZ. 221—282.

'S-GRAVENHAGE. — N.V. BOEK- EN KUNSTDRUKKERIJ V/H. MOUTON & CO.

1941

OVER HET ONTSTAAN DER RIVIERMEANDERS

DOOR

J. J. PANNEKOEK VAN RHEDEN

INHOUD

pag.

INHOUD 221
KAARTEN EN LITERATUUR 222
VOORWOORD 226
INLEIDING 226
WATERBEWEGINGEN IN RIVIEREN 228
Lijn van maximale snelheid 230
Waterbeweging in rechte panden 233
„ „ bochten 235
Invloed van het verhang 240
EIGENSCHAPPEN DER MEANDERS 241
Horizontale vorm der meanders 241
Verlegging der askruisingen 242
Verhouding der bochten tot de totale lengte 243
Vorm der bochten 243
Verticale vorm der meanders 244
Wetten van FARGUE 245
Stroomafwaarts schuiven der meanders 246
MEANDERGORDEL 248
Verhouding der breedten van rivier en meandergordel 248
Samengedrukte meanders 254
Verband tusschen samendrukking en stroomafwaarts schuiven . . 255
Onderzoek van IMAMURA 256
OORZAAK VAN HET ONSTAAN DER MAENDERS 257
Waarin men de verklaring gezocht heeft 257
Invloed van zijrivieren 257
„ „ puinafzetting in de binnenbocht 258
„ „ overlading met puin 259
Ontwikkeling van reeds voorhanden bochten 261
Invloed van toevallige hindernissen 261
Rechte lijn als oervorm 262
Kunstmatig rechtgelegde rivierloopen 263
Rivieren in nauwe dalen 265
Invloed van niveau verschillen 265
Seiche-theorie van EXNER 265
Verklaringen baseerende op de theorie van HELMHOLTZ 267

Aan welke voorwaarden moet voor de vorming van meanders worden voldaan? 268
Recapitulatie der eigenschappen van typische meanders 268
In welk gedeelte van den stroomloop komen meanders voor? . . . 268
Bovenloop, Middenloop, Benedenloop 268
Zij- en diepte-erosie 271
Onregelmatigheid der meanderbochten 272
Ingezonken meanders 273
SAMENVATTING VAN WAT ER M.I. VOOR HET ONTSTAAN VAN MEANDERS NOODIG IS 276
VOORGESTELDE DEFINITIE VAN HET BEGRIP MEANDER 276
ENGLISH SUMMARY 276

KAARTEN EN LITERATUUR

Geologische Nomenclator, Geol.-Mijnb. Gen. enz. Redactie L. RUTTEN, 's-Gravenhage, 1929.

Handbuch der Ingenieurwissenschaften, Teil III, Wasserbau, Bd. 1, Die Gewässerkunde, 4te Aufl. Engelmann, Leipzig, 1911, Bearbeitet von J. F. BUBENDEY, P. GERHARDT, R. JASMUND.

Hydraulic Laboratory Practice, comprising a translation, revised to 1929, of Die Wasserbaulaboratorien Europas, published in 1926 by Verein Deutscher Ingenieure. Edited by JOHN R. FREEMAN, The American Society of Mechanical Engineers, 1929. Afgekort geciteerd als H.L.P.

Lower Mississippi River Delta, Geol. Bull. No. 8, Dept. Conserv. Louisiana geol. Survey. New Orleans, 1936. Seven reports of RICHARD JOEL RUSSELL and others.

Geologic Atlas of the United States, U.S. Geol. Survey, Washington.

Atlante dei Tipi Geografici, compilato da OLINTO MARINELLI, Publicato in occasione del giubileo dell Istituo Geografico Militare, in 78 Tavole con notazioni, Firence, 1922.

Rivierenkaart. 1 : 10 000, Topografische inrichting, 's-Gravenhage.

Karte des Deutschen Reiches, 1 : 100 000, Reichsamt für Landesaufname, Berlin.

Messtischblätter, 1 : 25 000, Reichsamt enz.

AHLMANN, HANS W:SON. — Beitrag zur Kenntnis der Transportmechanik des Geschiebes und der Laufentwicklung des reifen Flusses. Sveriges Geol. Undersökning. Ser. C. Årsbok 8, 1914, No. 3.

BASCHIN, O. — Ein geographisches Gestaltungsgesetz. Peterm. Mitt. 1918.

BJERKNES, V. — Ueber einen hydrodynamischen Fundamentalsatz und seine Anwendung u.s.w. Kongl. Svenska Vetenskaps - Akad. Handl. B. 31, No. 4 Stockholm, 1898.

BLACHE, JULES. — Le problème des méandres encaissés et les rivières Lorraines. Journal of Geomorphology, Vol. II, No. 3, 1939.

BLINK, H. — Nederland en zijne bewoners. Dl. I Amsterdam, 1892.

BLUE JR., F. L., HERBERT, J. K. and LANCEFIELD, R. L. — Flow around a river bend investigated. Civil Engineering, 1934.

BOILEAU, ... — Traité de la mesure des eaux courantes ou expériences, observations et méthodes concernant les lois des vitesses, etc. Paris, 1854.

BOUSSINESO, J. — Essai sur la théorie des eaux courantes. Mém. divers savants Acad. Sciences. Inst. nat. de France, Tome XXIII, No. 1, 1872.
CALLAWAY, C — On a cause of river curves. Geol. Mag. London, 1902.
CHAMBERLIN, TH. C. and SALISBURY, R. D. — Geology. 2d. Ed. 1905, Vol. I.
CHOLNOKY, J. VON. — Ueber die Lagenveränderungen des Tisza-betts. Abrégé Bull. Soc. Hongroise de Géogr. 1907.
CHRYSTAL, G. — On the hydrodynamical theory of seiches. Trans. Royal Soc. of Edinburgh, Vol. XLI, 1906.
CHURCH, IRVING. P. — Mechanics of Engineering. John Wiley & Sons, New York, 1904.
DARCY, H. et BAZIN, H. — Recherches hydrauliques, entreprises par H. DARCY, continuées par H. BAZIN. Paris, 1865.
DAVIS, W. M. — Physical Geography. Boston, 1898.
————————. — The geographical cycle. Royal Geogr. Soc. Vol. XIV. London, 1899.
————————. — The development of river meanders. Geolog. Mag. New Series, Dec. IV, Vol. X, 1903.
————————. — Meandering valleys and underfit rivers. Ann. Ass. Amer. Geogr. Vol. III, 1913.
DAVIS, W. M. und BRAUN, G. — Grundzüge der Physiographie. Teubner, Leipzig, 1911.
DAVIS, W. M. — (Deutsch bearbeitet von A. RÜHL) Die erklärende Beschreibung der Landformen. Teubner, Leipzig, 1912.
DION, ROGER. — Le Val de Loire. Arrault & Cie, Tours, 1934.
EINSTEIN, A. — Die Ursachen der Mäanderbildung der Flussläufe und des sogenannten Baerschen Gesetzes. Die Naturwissenschaften, Jrg. 14, Springer, Berlin, 1926.
ELLIS, T. S. — River curves around alluvial plains. Geol. Mag. Vol. X, 1903.
ESCHER, B. G. — Algemeene Geologie, 1940.
EXNER, FELIX M. — Zur Theorie der Flussmäander. Akad. Wiss. in Wien, Abt. IIa, Bd. 128 H. 1, 1919.
————————. — Dünenstudien auf der Kurischen Nehrung, mit einen Anhang: Ueber Flussmäander, u.s.w. Akad. Wiss. Wien, Abt. IIa, Bd. 137, 1928.
FARGUE, M. — Étude sur la corrélation entre la configuration du lit et la profondeur d'eau dans les rivières à fond mobile. Ann. ponts et Chaussées, Mém. et docum. Sér. 4me, Paris, 1868.
————————. — Note sur le tracé des rives de la Garonne. Ann. ponts et chauss. T. VII, Sér. 6me, 1884.
FENNEMAN, N. M. — Physiography of the St. Louis area. Ill. State Geol. Survey, Bull. 12, 1909.
FERGUSON, JAMES. — On recent changes in the delta of the Ganges. Quart. Journ. Geol. Soc. London, 1863.
FISHER, E. F. — Terraces of the West River, Brattleboro, Vermont. Proc. Boston soc. of Natur. Hist. Vol. XXXIII, Boston, 1906/07, pag. 9-42.
GEER, STEN DE. — Klarälfvens serpentinlopp och flodplan. Sveriges Geol. Unders. Årsbok 4 (1910) Ser. C. Stockholm, 1911.
GILBERT, G. K. — Report on the geology of the Henry Mountains, Washington, 1880.
————————. — The transportation of débris by running water. U. S Geol. Surv. Prof. Paper 86, 1914.
GOLDSTEIN, S. — On the stability of superposed streams of fluid of different densities. Proc. Royal Soc. London, Vol. CXXXII, 1931.
GRIGGS, ROBERT F. — The Buffalo River: an interesting meandering stream. Bull. Amer. Geogr. Soc. New York, Vol. XXXVIII, No. 12, 1906.

GUILLON, ... — Études sur la Loire de la Maine à Nantes, Atlas.
HAMBERG, AXEL. — Föredrag om Helmholtz vågteori tillämpad på olika fysiskt-geografiska företeelser. Voordracht gehouden 26 Maart 1908 te Uppsala in Naturv. Stud. Geol. Sektion.
HELMHOLTZ, H. VON. — Ueber atmosphärische Bewegungen. Sitz. Ber. K. Preuss. Akad. Wiss. Berlin. 1888, 1889, 1890.
HETTNER, ALFRED. — Die Arbeit des fliessenden Wassers. Georgr. Zeitschr. Jrg. XVI, 1910.
HJULSTRÖM, FILIP. — Das Transportvermögen der Flüsse und die Bestimmung des Erosionbetrages. Geogr. Ann. Sv. Sällsk. Antr. o. Geogr. Stockholm. Årg. XIV,H. 1-2, 1932.
————. — Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. Bull. Geol. Inst. Univ. Upsala. Vol. XXV, 1935.
HOL, JACOBA B. L. — Beiträge zur Hydrologie der Ardennen. Jahresber. Frankf. Ver. Geogr. u. Stat. Jrg. 79 u. 80, 1914—1916.
————. — De insnijdingsmeanders der Maas in de Fransche Ardennen. Verh. Geol. Mijnb. Gen. Geol. Ser. Dl. VI, 1922.
————. — Das Problem der Talmäander. Zeitschr. Geomorph. Bd. X, H. 4/5, 1938.
————. — Meanders, hun beteekenis en ontstaan. Tijdschr. K. Ned. Aardr. Gen. Dl. LVI, 1939.
HUMPHREYS, A. A. and ABBOT, H. L. — Report upon the Physics and Hydraulics of the Mississippi River. Prof. Pap. Eng. U.S.A. No. 13, 1861 and 1876.
IMAMURA, GAKURÔ. — Free meanders of rivers. Jap. Journ. of Geol. and Geogr. Vol. XII, 1935.
JEFFERSON, M. S. W. — Limiting width of meander belts. Nat. Geogr. Mag. Washington, Vol. XIII, 1902.
JEFFREYS, HAROLD. — On the transverse circulation in streams. Proc. Cambridge Philos. Soc. Vol. XXV, 1929.
JOHNSON, DOUGLAS. — Streams and their significance. Journ. of Geology. Vol. XL, 1932.
LEHMANN, OTTO. — Tal- und Flusswindungen und die Lehre vom geographischen Zyklus. Zeitschr. Ges. Erdk. Berlin, 1915.
LEIGHLY, JOHN B. — Toward a theory of the morphologic significance of turbulence in the flow of water in streams. Univ. Calif. Publ. Geogr. Vol. 6, 1932.
————. — Turbulence and the transportation of rock débris by streams. Geogr. Rev. Amer. Geogr. Soc. New York. Vol. XXIV, 1934.
————. — Meandering arroyos of the dry southwest. Geogr. Rev. Amer. Geogr. Soc. New York. Vol. XXVI, 1936.
LOMBARDINI, E. — Guida allo studio dell'idrologia fluviale e dell'idraulica pratica, Milano, 1870. (Geciteerd door MARINELLI.)
MARINELLI, OLINTO. — zie: Atlante dei Tipi Geografici.
MARTONNE, EMM. DE, — Traité de Géographie Physique. 3me édit. Paris, 1920.
MINNAERT, M. — De natuurkunde van 't vrije veld, III, 1940.
MOCKMORE, C. A. — Flow in bends of quarter-turn draft turbines. Civil Engin. 1934.
MÖLLER, M. — Ueber die transversale Bewegung des Wassers in Flüssen. Meteorologische Zeitschrift, Jhrg. 3, 1886, pag. 173.
MULLER, J. E. — Experimenten over het ontstaan van stroomribbels. Geol. en Mijnb. Jrg. 3, No. 1, 1941.

MUSSET, RENÉ. — Sur l'évolution des cours d'eau à méandres encaissés. Ann. Géogr. T. XXXVII, 1928.

O'BRIEN, MORROUGH P. — Review of the theory of turbulent flow and its relation to sedimenttransportation. Trans. Amer. Geophys. Un. Hydrol. 1933.

PENCK, A. — Morphologie der Erdoberfläche. Stuttgart, 1894.

PHILIPPSON, A. — Grundzüge der Allgemeinen Geographie. Bd. II, H. 2. Leipzig, 1924.

PRANDTL, L. — Flüssigkeitsbewegung. Handwörterbuch der Naturwissenschaften, 1913.

REHBOCK, THEODOR. — Abfluss, Bettbildung und Energiehaushalt der Wasserläufe. Peterm. Mitt. Jrg. 73, 1927.

RIES, H. and WATSON, THOMAS L. — Engineering Geology. New York, 1925.

ROSENHEAD, L. — Systems of double rows of line vortices in a channel of finite breadth where the axis of the row is parallel to the axis of the channel. Proc. Cambridge Philos. Soc. Vol. XXV, Cambridge, 1929.

RUBEY, W. W. — Equilibrium conditions in débris-laden streams. Trans. Amer. Geophys. Un. 14th ann. meet. 1933.

RUSSELL, I. C. — Rivers of North America. New York, 1909.

RUSSELL, RICHARD JOEL. — Louisiana stream patterns. Bull. Amer. Ass. Petr. Geol. Vol. 23, No. 8, 1939.

SALISBURY, R. D. and ATWOOD, W. W. — The interpretation of topographic maps. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 60, Washington. 1908.

SCHMIDT, WILHELM. — Der Massenaustausch in freier Luft und verwandte Erscheinungen. Probleme der kosmischen Physik. VII, Hamburg, 1925.

SCHOKLITSCH, ARMIN. — Ueber die Bewegung des Wassers in offenen Gerinnen. Schweizer. Bauzeit. 80, 1922.

STEARNS, P. — On the current-meter, together with a reason why the maximum velocity of water, flowing in open channels, is below the surface. Transact. Amer. Soc. of Civil Eng. Aug. 1883.

SUPAN, A. — Grundzüge der Physischen Erdkunde. 2te Aufl. 1896, 6te 1916.

TAYLOR, G. I. — Effect of variation in density on the stability of superposed streams of fluid. Proc. Royal Soc. London, Ser. A, Vol. CXXXII, 1931.

THOMSON, JAMES. — On the origin of winding of rivers in alluvial plains, with remarks on the flow of water round bends in pipes. Proc. R. Soc. London, Vol. XXV, 1876/77.

————. — On the flow of water in uniform régime in rivers and other open channels. Proc. R. Soc. London, Vol. XXVIII, 1878/79.

TOWER, W. S. — The development of cut-off meanders. Bull. Amer. Geogr. Soc. New York, Vol. XXXVI, 1904.

ULE, W. — Die Aufgabe geographischer Forschung an Flüssen. Abh. K. K. Geogr. Ges. Wien, Bd. 4 No. 4, 1902.

VACHER, ANTOINE. — Rivières à méandres encaissés et terrains à méandres. Ann. Géogr. T. XVIII, 1909.

VOGEL, HERBERT D. — Practical value of river model studies. Civil Engin. 1934.

VOGEL, HERBERT D. and THOMPSON, PAUL W. — Flow in river bends. Civil Engin. Vol. 3, No. 5, 1933.

VUJEVIĆ, PAUL. — Die Theiss, eine potamologische Studie. Geogr. Abh. herausgege. v. A. Penck, Bd. VII, H. 4, 1906.

VOORWOORD

Het hangt samen met den aard van het hier behandelde onderwerp, waarover veel geschreven is en veel meeningen geuit zijn, dat de strekking van mijn opstel veelal polemisch is. Vooral wanneer m.i. onjuiste voorstellingen of zulke, die tot misverstand aanleiding moeten geven, voorkomen in overigens uitstekende en terecht zeer gewaardeerde handboeken of opstellen, is het des te meer vereischt er duidelijk de aandacht op te vestigen, dat hier tusschen veel waardevols een dwaling schuilt, die behoort te verdwijnen. Om een concreet voorbeeld te noemen: Zooals bekend, ligt in eene rivier de maximale snelheid niet aan de oppervlakte, doch daar onder. HUMPHREYS en ABBOT bewezen door waarnemingen in de natuur, en DARCY en BAZIN alsmede BOILEAU door experimenten, dat dit feit n i e t te wijten is aan de wrijving tegen de lucht. BOUSSINESQ en JAMES THOMSON verklaarden de zaak theoretisch. Toch vermelden rond 50 jaar later twee bekende leerboeken de wrijving der atmospheer als d e oorzaak. Moet men zich er in dergelijke gevallen toe bepalen voorzichtig aan te duiden, dat dit „niet geheel juist" is, of is het noodig er met nadruk op te wijzen: dit is f o u t ? „Prejudices die hard." Men moet ze dus niet half, maar morsdood slaan.

Indien de lezer hier en daar den toon van mijn stukje scherp vindt, moge hij dus bedenken, dat het mij volstrekt niet te doen is geweest om een aanval op personen, die ik integendeel volkomen respecteer als oprechte zoekers naar de waarheid, net even bona fide als ik zelf. Natuurlijk zullen er onder mijn lezers zijn, die het hier en daar niet met mij eens zijn, doch ik hoop, dat eventueele polemiek dan moge bestaan in een collegiaal gemeenschappelijk zoeken naar de waarheid.

INLEIDING

Over de riviermeanders bestaat eene groote literatuur, maar toch is onze kennis omtrent dit onderwerp nog in vele opzichten gebrekkig.

Wij hebben eerst dan het gevoel een natuurverschijnsel te verstaan, als wij weten, welke krachten er op elk oogenblik aanwezig zijn, tot welk resultaat hunne werking voert en op welke wijze. Zoo is ons b.v. ten opzichte van de beweging der aarde om de zon niet genoeg te weten, dat deze plaats vindt in eene ellips en de grootte en excentriciteit dezer baan te kennen, maar wij vragen hoe op elk m o m e n t richting en grootte der snelheid zijn en welke krachten werkzaam zijn en hoe deze samenhangen met de beweging als geheel beschouwd. Wij willen de differentiaalvergelijking der beweging kennen en hoe daaruit de integraalfunctie ontstaat.

Van dit ideaal zijn wij bij de meanders nog ver verwijderd. Wel bezitten wij zeer vele uitvoerige beschrijvingen der waargenomen vormen, doch de verklaring van het ontstaan dezer vormen laat te wenschen over.

AHLMANN voelt dit bezwaar, als hij schrijft, pag. 1: „Wenn man auch einen grossen Fonds von Beobachtungsmaterial besitzt und es so zusammenzustellen vermag, dass man eine folgerichtige Entwicklungsreihe erhält, so bleibt diese letztere doch ein totes Schema, wenn man nicht die grundlegenden Ursachen oder die treibenden Kräfte und Formen in ihrer Entstehung, d.h. die aktuellen morphologischen Prozesse kent. DAVIS hat darum in seinem grosszügigen Lehrbuch „Die beschreibende Erklärung der Landformen (11) — AHLMANN geeft den titel hier onjuist op, in zijne literatuurlijst staat onder No. 11, de juiste: Die erklärende Beschreibung der Landformen, 1913 (lees 1912) — der Entwicklung der morphologischen Wissenschaft vielleicht ein wenig vorgegriffen, wenn er in seiner Darstellung der Zyklen von Formkomplexen oder dem Resultat von schon mehr oder weniger entwickelten Prozessen ausgeht, die erst studiert und kennen gelernt werden müssen."

Wat men over meanders in onze geologische en geografische leerboeken vindt, is op het punt van waterbeweging meest zeer beknopt en zelfs gedeeltelijk onjuist. Dit is wel grootendeels het gevolg van de geweldige gecompliceerdheid der beweging van vloeistoffen, die reeds GALLILEI de verzuchting ontlokte: „Trots den ongehoorden afstand der hemellichamen heb ik niet zóóveel moeilijkheden ondervonden bij het verklaren van hunne bewegingen, als in het onderzoek van de beweging van stroomend water, die plaats vindt vlak voor onze oogen."

Dr. RICHARD JOEL RUSSELL, professor of physical geography, University of New Orleans, La. schrijft (Lousiana Geol. Survey, Bull, No. 8, pag. 122): „DAVIS and practically all text-book writers in describing the process of meandering follow a conventional pattern more or less tied to the reference frame of the erosion cycle." en pag. 123: „Meandering is clearly not a two-dimensional process to be solved inductively on the basis of map, or pattern, evidence."

Mej. HOL (1939, pag. 164) schrijft — m.i. dan ook zeer terecht — „Het wil ons toeschijnen, dat de oplossing van dit probleem meer bij den waterbouwkundigen ingenieur dan bij den geograaf thuisbehoort, al zal ook de geograaf nuttige bouwsteenen kunnen aandragen door exact geografisch onderzoek."

Op hydraulisch gebied zijn in de laatste decenniën groote schreden voorwaarts gedaan, o.a. door de oprichting van waterbouwkundige laboratoria, waar, deels met behulp van modellen, de waterbeweging, het sedimenttransport, enz. bestudeerd wordt. Ook daar buiten verschenen vele onderzoekingen, deels theoretisch deels praktisch, over wervelstroomen, turbulentie, maximum snelheid van water, enz. enz.

Bij de opmerkingen, die ik hier onder over de waterbeweging maken ga, ben ik mij zeer goed bewust, dat ik geen hydraulisch ingenieur ben en niet

over voldoende wiskundige kennis beschik om de in de literatuur over dit onderwerp voorkomende meer ingewikkelde mathematische uiteenzettingen goed te volgen. Indien mijn stukje aanleiding zou zijn, dat een competenter persoon deze zaken grondiger behandelt, zal het mij verheugen daartoe aanleiding gegeven te hebben.

WATERBEWEGING IN RIVIEREN

Eene uitvoerige behandeling van de beweging van het water in rivieren vindt men bij HJULSTRÖM (1935), bij JASMUND en BUBENDEY in „Gewässerkunde" en in „Hydraulic Laboratory Practice", voorts bij AHLMANN, BASCHIN, BJERKNES, BOUSSINESQ, DE GEER, GILBERT (1914), GULDSTEIN, HJULSTRÖM (1932), JEFFREYS, LEHMANN, LEIGHLY (1932) en (1934), O'BRIEN, PRANDTL, REHBOCK, ROSENHEAD, RUBEY, WILHELM SCHMIDT, TAYLOR, JAMES THOMSON (1876/77) en (1878/79) enz. enz.

Water beweegt zich alleen dan laminair, d.w.z. in regelmatig over elkaar schuivende oneindig dunne laagjes, wanneer het met geringe snelheid door gladwandige, enge buizen of open kanalen van gelijkblijvende of zeer geleidelijk veranderend dwarsprofiel stroomt.

In natuurlijke waterloopen beweegt het water zich steeds turbulent, d.w.z. opgelost in een groot aantal wervels.

„Wie man sich die Turbulenz zustande gekommen zu denken hat, ist heute noch nicht ganz klar: die Versuche, auf rechnerischem Weg nachzuweisen, dass bei Ueberschreiten gewisser Bedingungen die Strömung in die turbulente umschlagen kann oder muss, haben noch zu keinem voll befriedigenden Ergebnis geführt. Sichergestellt ist aber wohl Folgendes: der G r u n d der Labilität liegt zwar in der strömenden Flüssigkeit selbst, der A n l a s s zum Umschlagen wird aber in der Regel durch Vorgänge an den Wandungen gegeben. Jede kleine Unregelmässigkeit löst Wirbelbildungen aus, die sich, wenn eben die Bedingungen dafür vorhanden sind, vergrössern und den Charakter der allgemeinen Strömung bedingen. So liess sich z.B. in glatten Rohren das Gleiten bei viel höheren Geschwindigkeiten noch erhalten als in rauhen; ferner weisen Beobachtungen in Flüssen darauf hin, dass sich zunächst an den einzelnen Hindernissen am Boden kleine Wirbel mit allgemein wagrechter Achse, Walzen bilden, die sich, von der Strömung mitgenommen, vom Boden ablösen, beim Aufsteigen anwachsen, wobei die grösseren die kleineren aufzehren. Sie zerfallen erst an der Oberfläche, wo sie als die flachen, aufquellenden Erhebungen auftreten, in denen die lebendige Kraft der Wirbel durch Arbeit gegen die Schwerkraft aufgebraucht wird." (WILHELM SCHMIDT, pag. 3).

In het bovenstaande citaat neemt SCHMIDT blijkbaar aan, dat de as dezer wervels, evenals die der „Walzen" aan den bodem vrijwel horizontaal ligt. Volgens andere onderzoekers zou echter aan de grensvlakken der vloeistof

de as der wervels loodrecht op het grensvlak moeten staan en dus aan de oppervlakte verticaal zijn.

Van af een brug kan men deze opstijgende stroomen goed waarnemen.

Mij schijnt het, dat gewoonlijk de richting der waterbeweging een vrij grooten hoek moet maken met de wateroppervlakte en de as dus tamelijk vlak moet liggen. Door de opwellende watermassa's doet de oppervlakte der rivier denken aan die van kokend water. Op de Mississippi worden deze opstijgende stroomen dan ook „boils" genoemd en zijn daar voor kleinere vaartuigen vaak gevaarlijk.

Op zeer groote schaal ziet men dergelijke wervels in de getijstroomen der zeestraten tusschen de Kleine Soenda Eilanden. Ebbe en vloed treden aan noord- en zuidzijde dezer eilanden niet gelijktijdig op, waardoor sterke getijstroomen veroorzaakt worden, wier snelheid in de meerdere km breede en enkele honderd meter diepe zeestraten zeer aanzienlijk kan worden. In straat Molo (tusschen het eiland Flores en Poeloe Rindja) loopt bij springvloed zelfs een stroom van 15 zeemijlen (bijna 28 km) per uur. Aan den noordoostelijken ingang van Straat Lintah, die de eilanden Poeloe Rindja en Poeloe Komodo scheidt, was ik in 1911 in de gelegenheid eene interessante waarneming te doen over deze „boils", door de bevolking „aroes" genoemd.

De grootste diepte bedraagt hier ca. 150 m, de zeebodem is blijkbaar zeer ongelijk, de diepte varieert van plaats tot plaats sterk, de bodem is rotsachtig. De getijstroom had reeds het maximum overschreden en was aan het afnemen. De snelheid kan niet meer dan enkele zeemijlen per uur bedragen hebben. Wij voeren even na zonsopgang van P. Rindja naar het N. in drie kleine inlandsche vaartuigen, op enkele tientallen meters van elkaar, naast elkaar zeilend. De talrijke aroes waren duidelijk te zien en in de diepte zag men de in het water zwevende noctiluccen rondwervelen. Op eenmaal bemerkte ik, dat de meest rechtsche boot, die iets bij de anderen vooruit was, zijdelings afdreef en voor de andere booten langs, op den linker vleugel gevoerd werd. Toen wij zelf over dezelfde plek, A, Fig 34 heenvoeren, gebeurde er echter niets bijzonders, wij behielden zonder moeite onzen zelfden rechten koers. Of men ter verklaring van het waargenomene eerder zou moeten denken aan een wervel met ongeveer horizontale as of aan een met verticale as, zou ik niet durven beslissen. Beide gevallen lijken mij mogelijk.

In natuurlijke waterloopen, waarin het water zich, zooals wij boven zagen, steeds turbulent beweegt, kan men twee wijzen van beweging onderscheiden. De beweging kan nl. zijn: s t r o o m e n d (bij geringe snelheid, dus in rivieren) of s c h i e t e n d (bij hooge snelheid, dus in bergstroomen en stortbeeken). Deze verdeeling in rivieren en bergstroomen is niet, zooals men zou kunnen meenen, een spraakgebruik, doch er bestaat een hydraulisch onderscheid. De wijze waarop het water reageert op in het bed aanwezige hindernissen, zich daar voor stuwt en er overheen schiet, is bij beide cate-

gorieën verschillend. De grond van dit verschil is hierin gelegen, dat in bergstroomen het water zich sneller beweegt, dan de voortplantingssnelheid van eene voortloopende golfbeweging en in rivieren langzamer. Deze voortplantingssnelheid van golven, U, hangt af van de diepte van het water en bedraagt : $U = \sqrt{}$ g.h., waarin g de versnelling der zwaartekracht is en h de gemiddelde diepte.

Voor de snelheid van het water van een stroom geldt de formule : $U = c \sqrt{}$ I.r. Hierin zijn c eene constante, die een maat is voor de gladheid der bedding, I het verhang en r de hydraulische radius. Dezen bepaalt men door de oppervlakte van het dwarsprofiel te deelen door den natten omtrek (de som van bodem en zijwanden). Stelt men nu de U in deze beide formules gelijk aan elkaar, dan vindt men $c^2.I.r = g.h$. Voor waterloopen, zooals ze in de natuur voorkomen, mag men bij benadering r en h gelijk stellen, dan wordt $I = g/c^2$. De constante c varieert van 80 (rivieren tusschen steenen muren) tot 30 (bed met veel keien). Nemen wij c = 50, dan wordt U = rond 0.004. BOUSSINESQ, die deze zaak uitvoerig mathematisch behandelt, legt, pag. 11, het verhang der „rivières" onder ca. 0.003 3, dat der „torrents" boven 0.003 9. REHBOCK legt de grens bij een verhang van 1/400 à 1/360; HJULSTRÖM (1935) noemt 0.004 à 0.005. Eene populaire behandeling vindt men bij MINNAERT, pag. 98.

Lijn van maximale snelheid.

In breede rivieren met onregelmatig dwarsprofiel kunnen meerdere lijnen van maximale snelheid voorkomen. In rechte segmenten met symmetrisch dwarsprofiel ligt de lijn der grootste snelheid in het symmetrievlak, doch in den regel op eenigen afstand onder de wateroppervlakte.

Dit feit wordt vaak, b.v. SUPAN (1916) pag. 517, PHILIPPSON, pag. 99, e.a. toegeschreven — doch, zooals wij zullen zien, ten onrechte — aan de wrijving tegen de lucht. JASMUND (Gewässerkunde, pag. 470) schrijft over deze vraag: „DARCY und BAZIN stellen ihn auf Grund ihrer Versuche vollständig in Abrede und ..... die Messungen an der Elbe haben einen merkbaren Einfluss auf die Geschwindigkeiten, selbst bei starkem Wind und Wellenschlag, nicht erkennen lassen." JAMES THOMSON (1878/79) pag. 116: „These investigators (HUMPHREYS and ABBOT) show further (at pages 285, 288 and 289 of their Report) that this phenomenon is not wholly or even mainly due to any frictional resistance applied by the superincumbent atmosphere to the forward flow of the surface of the water; because they found that even when the wind is blowing in the direction of the river current, and advancing at the same velocity as that current, so that the air lies on the surface of the water without relative motion, the phenomenon manifests itself almost in as great a degree as when the air is lying at rest relatively to the land; and found yet further that the phenomenon still manifests itself

even when the wind is blowing in the direction of the flow of the river much faster than the current, so that it blows the water surface forward instead of applying a resisting drag or backward force to the surface." en op pag. 117: „He (BOILEAU) deduces from his experiments conclusions (page 313) to the effect that in spite of varied disturbances produced by wind blowing over the water with varied intensity, yet there is manifested a very sensible tendency to a decrease of velocities of the water for approach towards the liquid surface; and that the maximum velocity is yet below the surface, even when the wind blows forward with the current, and has a velocity greater than that of the current."

SCHOKLITSCH schrijft (H.L.P. pag. 318): „The reason why the greatest velocity in an open channel does not occur at the surface, but at a point somewhat below, has not yet been discovered, although special experiments were undertaken to throw light upon this subject. The assumption was made that there were eddies created by some obstacle which diminished the velocity at the surface; if this assumption were true, it would follow that the point of maximum velocity in a vertical plane would be lowered from its original position in the water surface to some point below the surface, as soon as eddies were created upstream. The experiments were carried out as follows." Dit zijn de hieronder door LEIGHLY vermeldde proeven van SCHOKLITSCH, waarbij een van de wateroppervlakte tot den bodem reikende plank verticaal in den stroom werd geplaatst.

HAROLD JEFFREYS, MÖLLER en STEARNS zien de verklaring in de dubbelspiraal-vormige waterbeweging, die hieronder ter sprake zal komen. Ook GIBSON (1909) geciteerd door HJULSTRÖM (1935) pag. 263, geeft dezelfde verklaring. LEIGHLY (1932) schrijft, pag. 3: „To date, probably the best explanation was given long ago by JAMES THOMSON ..... Isolated observations bearing on the problem include: 1. GILBERTS note (1914) that the position of maximum velocity, which in his relatively deep laboratory trough with vertical sides was normally below the surface, was elevated with increasing roughness of bed and with increasing load (signifying in both instances increased consumption of energy within the body of the stream). 2. SCHOKLITSCH's observation that a post or other obstruction to the free movement of water in a stream causes a marked depression of the line of maximum velocity for some distance downstream from the obstruction. 3. The phenomenon illustrated in the velocity cross-sections figures 1a, 2a, and 3a, that the depression of the maximum velocity is the greater as the transverse slope of the sides of the channel is steeper. Where the form of the channel is that of a trough with vertical or upward converging sides, the distribution of velocity approaches that in a closed conduit, or pipe. It appears from these observations that the level of greatest velocity is the deeper as the channel walls become steeper, as the ratio of depth to width becomes greater, and

as the resistance of the bottom increases." (het schijnt mij, dat men in plaats van increases hier moet lezen decreases). The common elements among the observations enumerated above are that the depression of the line of maximum velocity is correlated with causes that produce eddies at the surface having vertical axes of rotation, and that the consumption of energy within the body of the stream elevates the thread of maximum velocity toward the surface."

Men ziet, dit alles heeft met wrijving aan de lucht niets te maken. Eene mathematische behandeling van dit probleem vindt men bij BOUSSINESQ, pag. 30 en 31. JAMES THOMSON (1878/79) pag. 122 e.v. geeft een soortgelijke maar niet mathematische en meer in algemeene termen gehouden uiteenzetting. Ook de verklaring van STEARNS sluit zich hierbij aan.

Men kan dit probleem m.i. aldus resumeeren: Op de waterdeeltjes in een waterloop werkt de stroomafwaarts gerichte componente, T, der zwaartekracht. Wanneer m de massa van het waterdeeltje is, g de versnelling der zwaartekracht en I het verhang, dan is T = m.g.sin I.

De door de wrijving over den bodem en langs de wanden van het kanaal op de strooming uitgeoefende tegenstand neemt met den verticalen afstand boven den bodem en den horizontalen afstand van de wanden af, doch niet rechtevenredig, maar eerst sneller, op grooteren afstand veel langzamer, zooals (geheel schematisch) voorgesteld is in Fig. 16 en 17. Diepte van den stroom en gladheid van den bodem (of wanden) hebben een soortgelijk effect, de wrijvingslijn heeft dan een vorm gelijkend op dien in Fig. 17; bij ondiep water of groote ruwheid van den bodem gelijkt de kromme meer op Fig. 16. De trekkracht, T, van het verhang, I, wordt in deze grafieken door een verticale lijn voorgesteld.

In stroomen, waar de breedte de diepte aanzienlijk overtreft, hebben wij practisch alleen te maken met den invloed van den bodem en de afname van de wrijving met de hoogte, dw/dz, (z is de verticale afstand boven den bodem, w is de tegenstand van de wrijving). Is nu de diepte aanzienlijk in verhouding tot de wrijving, dan heeft dus de wrijvingslijn een verloop als in Fig. 17.

Door de werveling die bij turbulente strooming, dus in rivieren, steeds plaats vindt, stijgen telkens waterdeeltjes uit diepere lagen op naar hoogere. Daarbij neemt niet alleen w, maar ook dw/dz steeds af. Daar T constant blijft, neemt de stroomafwaartsche snelheid van het waterdeeltje gedurende het opstijgen voortdurend toe. Ten gevolge van de wervelbeweging daalt echter het waterdeeltje van de oppervlakte na korten tijd weer naar beneden. Het komt daarbij in eene ruimte, waar weliswaar de wrijvingstegenstand weder voortdurend — al is het dan ook langzaam — toeneemt, maar deze wrijvingstegenstand toch nog minder groot is, dan de stroomafwaartsche trek, T. Het waterdeeltje neemt dus ook bij het dalen van de oppervlakte nog een

tijd lang in snelheid toe, tot eindelijk de wrijvingstegenstand gelijk wordt aan T. Dit is het punt der maximale snelheid. Op geringere hoogte boven den bodem der rivier overweegt de tegenstand en neemt de snelheid weer af.

Is de diepte van den stroom in verhouding tot de ruwheid van den bodem gering, dan heeft de wrijvingslijn een verloop als in Fig. 16. Een van de oppervlakte afdalend waterdeeltje wordt dus zeer spoedig weer geremd in zijn vaart en de lijn der maximale snelheid ligt nagenoeg aan de oppervlakte.

In kanalen met isometrische doorsnede, waar diepte en breedte niet veel verschillen, bestaat de totale tegenstand uit drie ongeveer gelijke componenten, twee door de wand- en één door de bodemwrijving veroorzaakt. Zoo ontstaat in het centrale gedeelte eene vrij groote ruimte, waar door stijging wel de invloed van den bodem vermindert, doch die van de wanden onveranderd blijft, zoodat de invloed van de stijging op den totalen tegenstand gering blijft. Het verloop der wrijvingslijn komt wederom overeen met dat van Fig. 17. De daling van de lijn der maximale snelheid ten gevolge van de wervelbeweging is dus in isometrische kanalen bijzonder sterk. Dat dit het geval moet zijn, ziet men overigens gemakkelijk in, wanneer men bedenkt, dat naarmate een kanaal meer en meer isometrisch van vorm wordt, het nadert tot den cylindervorm, waar de snelheid in het midden het grootste is.

Waterbeweging in rechte panden.

BLINK, pag. 199, vermeldt: „.... het verschijnsel, dat bij rijzend water de rivier over 't geheel aan den bovenkant geen plat vlak vormt, doch dat in den stroomdraad het water zich als het ware tot een zacht oploopenden kam verheft. Zoo kan o.a. de waterspiegel van de Mississippi in het midden soms 1 m hooger zijn dan aan de kanten." „... bij dalend water zal ... de lijn hol zijn, zoodat in dit geval de waterspiegel in het midden het laagst is."

Bij de Niagara rapids kan het hoogteverschil tusschen de lagere zijden en het midden tot 6 voet bedragen. PHILIPPSON, pag. 99, schrijft: „Bei starker Strömung liegt die Oberfläche am Stromstrich messbar höher als an den Ufern, der Fluss hat eine gewölbte Oberfläche."

Men zie ook JASMUND, pag. 238. Ook PENCK en MÖLLER (geciteerd door DE GEER, pag. 142) vermelden soortgelijke waarnemingen.

Het bovenvermelde verschijnsel wordt vaak in verband gebracht met het bestaan — in rechte rivierafdeelingen — van twee spiraalvormige wervels, één ter linker en één ter rechter zijde van het symmetrievlak. Deze zouden bij stijgend water in het midden der rivier naar boven komen en de bekende, door kleine vaartuigen gevreesde „boils" van de Mississippi vormen. (RIES and WATSON, Engineering Geology, pag. 269). Bij dalenden of gelijk blijvenden waterstand zou omgekeerd het water van de oevers der rivier naar het midden stroomen en daar neerdalen. De spiralen zouden dus dan in

omgekeerden zin wervelen. Men zie hierover HJULSTRÖM (1935) pag. 263. REHBOCK vindt het bestaan dezer spiraalbeweging moeilijk aan te toonen. MÖLLER (H.L.P. pag. 70) schrijft: „In 1882, I undertook float experiments in the River Ruhr, and found that in its channel spiral motion of the water was taking place, with very important attending effects. Each filament of water that approaches the bank U (zie mijn Fig. 37, eene copie van zijn Fig. 9) and becomes increasingly exposed there to the restraining influence of friction, suffers retardation, and hence requires greater cross section, whereas the conditions in the center of the stream are reversed, water filaments there being accelerated and requiring less cross section. Both actions lead to the production of a slight transverse drop in the water surface of a straight stream channel from A to its center line, and of the formation of spiral motion on either side." .... „As a result of the spiral motion described, there may be seen in a channel whose water is muddy, due to suspended clay particles (for example, in street gutters), a dark longitudinal streak, frequently near its central axis. This is made up of water which while at the surface experienced a settling out of the clay particles, and then, having drifted toward the middle, followed the spiral motion downward and formed a vertical zone or chasm of clear water which permits one to look down into the darker depths."

In zijn artikel in de Meteorologische Zeitschrift bespreekt MÖLLER een opstel van STEARNS en eigene waarnemingen. Hij publiceert daarin eene afbeelding (door mij weergegeven in mijn Fig. 33) die grootendeels overeenkomt met de afbeelding behoorende bij zijn reeds boven besproken beschouwingen (zie mijn Fig. 37), maar in één belangrijk punt afwijkt, nl. dat behalve aan de kanten nu ook in het midden eene verhooging van den waterspiegel geteekend is. Ook in dit artikel uit hij zich niet over de mogelijkheid van eene omkeering der bewegingsrichting van de beide spiraalwervels. Over de ligging van de „Stromstrich" schrijft hij, pag. 174: „Die Maximalgeschwindigkeit wird nicht immer an der Oberfläche selbst sich finden, sondern bei tiefen Flüssen bisweilen an einem Punkte 5 (vergleiche die Skizze) unter der Oberfläche; denn auf dem ganzen Wege von 2 bis 4, also auch noch bei dem Sinken unter die Oberfläche auf dem Wege von 3 bis 4, erfährt das Wasser-Element Beschleunigung seiner fliessenden Bewegung, da es dem Reibungs-Widerstande, welcher sich vorwiegend an den Uferböschungen und an der Sohle bemerkbar macht, entzogen ist und sich also dem Gefälle, der beschleunigenden Einwirkung der Schwerkraft, überlassen kann. Unterhalb Punkt 5, auf dem Wege von 4 nach 1, gewinnt schon wieder der störende Einfluss überhand, den das Wasser durch den Reibungs-Widerstand an der Sohle empfindet."

JEFFREYS geeft eene soortgelijke verklaring van het dalen der maximale snelheid onder de oppervlakte.

Zooals men ziet, bespreekt MÖLLER niet het omgekeerde geval, nl. dat de spiraalwervels in het midden der rivier opstijgen en langs de oevers afdalen en dat een dwarsprofiel niet hol maar bol is, zooals door BLINK en PHILLIPPSON vermeld wordt. Men is het over deze zaak blijkbaar nog volstrekt niet eens. Interessant is ook de vraag, welke beweging er zou moeten optreden in een kanaal, waarvan de diepte veel grooter is dan de breedte.

LEIGHLY heeft eene geheel andere opvatting van wat er plaats heeft, zie mijne aan zijn artikel ontleende Fig. 18. Volgens hem liggen er aan elken kant der in het midden van de rivier nabij de oppervlakte loopende stroomdraad van maximum snelheid zones van sterke turbulentie, waar dus de inwendige wervelende beweging zeer hevig is en die elk een maximum bezitten, dat op korten afstand boven den bodem ligt. Uit deze turbulente zones komt het opgewervelde sediment hetzij in het bereik van het snel stroomende midden der rivier en wordt meegevoerd, hetzij terzijde in een gebied van geringere turbulentie, waar het afgezet wordt. „All stream deposits are formed in areas that are lateral to some thread of maximum velocity and its flanking threads of maximum turbulence." LEIGHLY (1934), pag. 463.

Waterbeweging in bochten.

Wij komen nu tot de in verband met de vorming van meanders belangrijke vraag hoe de waterbeweging in bochten plaats heeft.

Uit directe waarneming blijkt, dat als eene rivier eene bocht beschrijft, aan de oppervlakte drijvende voorwerpen, zooals ijsschotsen of drijfhout, den concaven oever naderen en dat de stroomdraad niet langer in het midden blijft, doch zich eveneens naar den buitenkant verlegt. Eerst aan het einde van de bocht, waar de rivier weder een rechten loop aanneemt, keert de stroomdraad naar het midden terug.

Een en ander is het natuurlijke gevolg van de neiging van het water in de eenmaal voorhanden rechtlijnige beweging te volharden. Een tweede gevolg is, dat het water, naar mate het aan den buitenkant der bocht tegen den oever stuit, boven het gemiddelde niveau van het dwarsprofiel daar ter plaatse oploopt. De verwijdering van het water van den convexen oever in de binnenbocht, waardoor als het ware eene leege ruimte ontstaat, ondersteunt de scheefstelling van het oppervlak in dwarsche richting.

Voor het bedrag van de verhooging van den waterspiegel aan den concaven oever geeft GRASHOF (zie Gewässerkunde, pag. 239) de formule: $a = \frac{U^2}{g} \ln (1 + \frac{b}{R})$. Hierin beteekenen ln logarithmus naturalis, U de gemiddelde snelheid in het dwarsprofiel, g de versnelling der zwaartekracht, a de verhooging van den waterspiegel aan den buitenoever, R de kromtestraal van den binnenoever, b de breedte der rivier, zie ook fig. 20.

BLUE en zijn medewerkers vermelden voor a, het hoogteverschil tusschen concaven en convexen oever, de formule: $a = \frac{U^2 b}{g R}$ waarin: g = versnelling der zwaartekracht, U = de gemiddelde snelheid, b = de breedte, R = de kromtestraat van het m i d d e n der rivier.

LEIGHLY (1932) geeft eene soortgelijke formule. Volgens BLUE cum suis geeft deze formule steeds te lage waarden, daar de grootere snelheden in de buitenhelft door het gebruik van het gemiddelde der eerste machten niet voldoende gewicht in de schaal werpen. Men zou het gemiddelde der tweede machten moeten nemen. BLUE c.s. vervangen ze daarom door eene gecompliceerdere formule, die ik hier echter maar achterwege zal laten, ofschoon zij beter met de waarnemingen strookt.

De meening van VUJEVIĆ, pag. 23: „Ist bei einem Flusse das Gefälle gering, so wird die Zentrifugalkraft viel intensiver sein, die Kurven werden mehr und schneller vergrössert als dort, wo das Gefälle gross ist..." is in strijd met de leer der mechanica en de verklaring der door hem gedane waarnemingen over het stroomaf verschuiven der meanders moet in eene andere richting worden gezocht.

BOUSSINESQ schrijft, pag. 604/605: „En résumé, une courbure 1/R de l'axe d'un tuyau ou d'un canal cause par unité de longueur un surcroît de perte de charge ayant pour expression approchée, s'il s'agit d'un canal rectangulaire découvert d'une largeur „b" très-grande par rapport à la profondeur d'eau „h" : $0.0003 \frac{U^2}{h} \sqrt{\frac{b}{R}}$", waarin U de stroomsnelheid is.

Eene rivier ondervindt dus bij het doorloopen eener bocht des te meer tegenstand, hoe grooter hare snelheid is en naar mate zij breeder en ondieper is.

Het oploopen van het water tegen den concaven buitenoever verandert het verhang in de bocht. Wij leggen nu, eene uiteenzetting van LEIGHLY (1932) volgend, in de rivier een kromlijnig assenstelsel, zie Fig. 19. De oorsprong, O, ligt op de halve breedte daar, waar de kromming het sterkste is. De Y-as gaat van + y aan den buitenoever naar — y op den binnenoever. De X-as volgt de geometrische middellijn der rivier en heeft in de stroomrichting eene helling gelijk aan het gemiddelde verhang tusschen A-B en E-F. De stroom loopt van — x via O naar +x. Het dwarsprofiel is horizontaal bij A-B en E-F, de maximale scheefstelling ligt bij C-D. Langs den buitenoever is dus tusschen A en C het verhang minder dan het gemiddelde tusschen de profielen A-B en E-F. Tusschen C en E ligt het boven het gemiddelde en aan den binnenoever is het versterkt van B tot D en dan verminderd van D tot F. Tusschen A en C hebben wij dus twee factoren, die de erosie bevorderen: het naderen van den stroomdraad tot den oever, waardoor de steilheid van den gradient der snelheidsafname, dU/dy, bij het naderen

van den oever toeneemt, en grootere diepte van het water, maar één tegenwerkende : verminderd verhang. Eerst beneden het punt C, waar het verhang versterkt is, werken deze drie factoren samen en heeft dus de krachtigste aantasting van den buitenoever plaats. Aan den binnenoever bevorderen vertraagde stroom en verminderde diepte de sedimentatie, vooral tusschen D en F waar tevens het verhang gereduceerd is. LEIGHLY (1932) drukt het bovenvermelde aldus uit: „It is to the variations of slope within the several parts of the bend that one should look for an explanation of changes in the channel of a meandering stream.", waarmee ik accoord ga. Hij vervolgt dan echter (pag. 13): „The theory developed above, which may be briefly summarized in the statement that the maximum effect of a meandering stream in changing its bed is to be looked for where the radius of curvature is increasing, is..." Deze wijze de zaak uit te drukken lijkt mij niet gelukkig. Meetkundig is het waar, doch mechanisch is het moeilijk in te zien, dat de toename van den kromtestraal, waardoor de sterkste stroom zich langzamerhand meer en meer losmaakt van den oever en terugkeert tot de ligging in het midden van de rivier en dus op grooteren afstand van den buitenoever, nu juist zoo bijzonder destructief op deze oever zou inwerken.

In Fig. 19 is slechts een enkele rivierbocht geteekend. Wanneer men echter verdere bochten toevoegt, dan ziet men, dat in het algemeen de met het riviersegment CE correspondeerende, andere, rivierstukken benedenstrooms gelegen zijn van de met AC correspondeerende. Daar de terugsnijding der oevers van het type CE sneller plaats vindt, dan die der overige gedeelten, vergroot de rivier hare bochten en zal tevens het geheele rivierbed geleidelijk stroomafwaarts verschuiven.

Het bestaan der zoo juist besproken verhooging en vermindering van het verval in de vier quadranten van Fig. 19, die door de theorie verlangd worden, is onlangs door BLUE en zijne medewerkers door nauwkeurige waterpassing in het terrein aangetoond.

De beweging van het water in eene rivierbocht heeft men veelal opgevat als eene spiraal beweging. Tengevolge van de middelpuntvliedende kracht dringt het water naar den buitenoever. Deze kracht is omgekeerd evenredig met den kromtestraal, maar recht evenredig met de tweede macht der snelheid. In het algemeen zal dus de invloed van de snelheid overwegen. Voor elke verticale waterkolom is de kromtestraal constant, maar de snelheid in het hoogere gedeelte grooter, dan dichter bij den bodem. De naar den buitenkant gerichte drang zal dus het sterkste zijn in de bovenlagen. Men stelt zich dan voor, dat het water aan de oppervlakte naar den buitenkant stroomt, daar afdaalt, langs den bodem naar den binnenkant van de bocht gaat en langs den convexen oever weer aan de oppervlakte komt. Deze beweging gecombineerd met de stroomafwaartsche geeft eene spiraalvormige strooming. Zie BOUSSINESQ, pag. 612, REHBOCK, SUPAN (1896) pag. 376, SUPAN (1916)

pag. 518, EINSTEIN, pag. 223-224, MOCKMORE pag. 460, JAMES THOMSON (1876/77), DE GEER, pag. 168.

Andere auteurs zijn tot eene afwijkende opvatting gekomen. LEIGHLY (1932) pag. 10, uit twijfel aan het bestaan van deze spiraal-beweging, en schrijft: „The above analysis (nl. over de verplaatsing van sediment uit ruimten met sterker turbulentie naar rustiger gedeelten) suggests that the mere asymmetry of transverse profile may form the basis for a sideward shifting of channels on meander bends, and that the appeal to centrifugal action may be unnecessary". VOGEL and THOMPSON hebben een groot model (horizontale schaal 1/600, verticale 1/150) van een bocht van de Mississippi, dat in het U.S. Waterways Experiment Station gemaakt was voor een technisch onderzoek, gebruikt om de vraag of in rivierbochten spiraalbeweging van het water voorkomt te onderzoeken.

De oppervlaktestroom werd onderzocht met kleine drijvende boeien, de bodemstroom door het inspuiten van kleursel en met haverkorrels. Deze zinken naar beneden tot het zwaarste gedeelte van de korrel op den bodem rust, het lichtere uiteinde, de pluim, richt zich op. De korrel staat dus scheef in het water, waarbij het lichte boveneinde als een stroomvaan dient en de richting der waterbeweging aangeeft, zie Fig. 38. Het bleek nu dat: „Examining the paths of the surface floats, is is seen that they invariably swing in near the concave bank, exactly as is frequently noted in nature. It is to be further noted that the floats tend to drift to the regions of high surface velocities. In contrast to this distinct crossing of the surface floats, the paths of the bottom currents, as indicated by the dye, are seen to remain essentially parallel to each other and to the bank lines..... The oat grains were seen to drift across to the convex side of the bend. The movement was, in fact, not continuous or uniform, but was jumpy, rolling, and sporadic, exactly as the movement of sand on the bed is observed to occur. This is not surprising, since each movement is the result of the same forces, that is, the tractive effect of the flowing water and the impulses received from turbulence. The important point to be noted here is the direction of the currents, as indicated by the grains in their progress across the bed. Invariably these grains revealed a direction of flow parallel to the banks — exactly as shown by the dye.

„It can be further noted that the grains tended to move toward the regions of low velocity. From these two facts it appears logical to draw the conclusion that, although bed materials are moved bodily across the bed, still the bottom currents do not cross with them, but remain, rather parallel with the banks." Hij sluit zich dan aan bij de turbulentie-theorie van LEIGHLY (1932): „... and that the conception of Professor LEIGHLY may be nearer to the real truth than any other explanation yet offered for the apparently contradictory movement of bed currents and bed materials. Certain it is that

materials cross the stream course at a bend to built a bar, but if there is no definite flow of water in the same direction, helicoidal flow becomes a mere myth in spite of all theoretical considerations and assumptions to the contrary."

Het klinkt zeker vreemd, dat sediment, hetgeen zich immers niet actief door het water beweegt, als een visch, maar zuiver passief getransporteerd wordt, zich zijdelings zou kunnen verplaatsen zonder het bestaan van een waterstroom in die richting. Nu acht ik de afwezigheid der spiraalbeweging (mits niet te eng opgevat) door de proeven van VOGEL en THOMPSON nog niet voldoende bewezen, de zijdelingsche verplaatsing van sediment z o n d e r zijdelingsche waterbeweging acht ik echter wel mogelijk. Ik zou daaromtrent de volgende verklaring willen opperen: Laten wij het bestaan aannemen van turbulentie, dus van wervelende watermassa's. De richting hunner assen, waar omheen het water wervelt, laat ik hier geheel in het midden, doch, daar de snelste stroom (die in Fig. 29 links boven gedacht is) de wervels beïnvloedt, zal hunne hoeksnelheid van links naar rechts afnemen. Wij kunnen ze dus in Fig. 29, die een deel van de rechter helft van een dwarsprofiel voorstelt, z e e r schematisch voorstellen als A, B en C. Waarbij A sterker wervelt dan B, en B sterker dan C. Indien eene vloeistof, waarin deeltjes van hooger of lager specifiek gewicht dan dat der vloeistof gesuspendeerd zijn, aan de centrifugaalkracht onderworpen worden (b.v. melk in eene centrifuge machine) dan hoopt zich binnenin het lichtste, aan den buitenkant het zwaarste materiaal op. Langs de periferie van A, B en C neemt dus de turbiditeit toe en kan sediment door menging in andere wervels overgaan. Daarbij geeft A meer suspensulum af aan B dan terug ontvangen wordt, daar de concentratie hooger is in A dan in B. Zoo gaat er ook uit B meer slib naar C, dan er terug komt. Zandkorrels of fijn grint zouden zelfs direct uit den wervel A naar buiten tot in B geslingerd kunnen worden, en van B naar C en daar afgezet. Zoo zou sediment zich m.i. dwars op den stroom kunnen bewegen, zonder gelijk gerichte waterverplaatsing.

Het bovenvermelde onderzoek van VOGEL en THOMPSON heeft drie Amerikaansche genie officieren, BLUE, HERBERT en LANCEFIELD aanleiding gegeven als „graduate study" aan Iowa University eene contrôle te doen, doch nu niet aan een model, maar door meting in het veld aan de Iowa River. Zij onderzochten:

1 Superelevation of the water surface at the outside bank,
2 Presence of absence of spiral flow,
3 Longitudinal profile of the water surface at each bank,
4 Velocity distribution at various cross sections,
5 Movement of the bend.

In het verslag over hun onderzoek schreven zij: „On the bend under investigation, spiral flow was studied by means of a „deflectionometer". This

instrument consisted of a vane attached to the lower end of a steel shaft, which was free to rotate inside a pipe. At the top of the pipe a pointer attached to the shaft indicated the direction of the current on a graduated disc. As shown in Fig. 2 (mijn Fig. 32), spiral flow was definitely found, measurable differences in direction of flow at different depth being detected every time the instrument was used. Two different directions of spiral movement were noted. Another long bend upstream caused the top layers of the water to move toward the left bank, while the lower layers moved toward the right bank, forming a counterclockwise spiral at section 1, immediately upstream from the bend under investigation. At sections 3 and 4, a very definite clockwise spiral was found, the top filaments moving toward the right bank, while on the bottom there was a flow toward the left bank. The existence of these two spirals, although opposite in direction, is in entire agreement with the theory, since the bends generating them are also opposite in direction."

Men ziet, het door BLUE cum suis bereikte resultaat wijkt sterk af van de meening van VOGEL en THOMPSON, die spiraalbeweging verwerpen. Het zou zeker te wenschen zijn, dat deze vraag verder, liefst door experimenten met modellen — waarbij b.v. tegelijkertijd haverkorrels en een kleinen deflectionometer gebruikt werden — én door metingen in de natuur definitief uitgemaakt wordt. Men moet natuurlijk niet vergeten, dat tusschen twee bochten in een recht rivier segment een waterdeeltje tengevolge der wervels en „boils" in werkelijkheid een zeer kronkelende baan beschrijft. Toch zeggen wij dan, dat het water recht vooruit stroomt. Zoo zal ook de z.g. spiraalbeweging nog zeer vele wervels en krommingen insluiten en dus als het ware een compromis vormen tusschen de opvattingen van LEIGHLY, en VOGEL - THOMPSON eener- en die der aanhangers van de spiraalbeweging anderzijds.

Invloed van het verhang.

Men ontmoet vaak de meening, dat groot verhang de vorming van meanders verhindert, b.v. HOL (1938) pag. 170: „Die form der Mäander aber ist abhängig von der Kraft der Tiefenerosion. Ist diese gross, so wird sie den Weg zu begradigen streben. Sie unterschneidet die Innenseite der Mäanderbogen; . . ." Deze formuleering bergt het gevaar in zich der valsche voorstelling, dat de centrifugaalkracht (evenredig met de tweede macht der snelheid) bij geringe snelheid het water **wel** tegen den buitenoever zou slingeren, maar bij hooge snelheid **niet**! Mij dunkt de zaak zit zoo: Bij een groot verhang kan het geval zich voordoen, dat de rivier zelf uit bovenstrooms gelegen gedeelten groote hoeveelheden grof grint of zelfs rotsblokken meebrengt. Deze last kan ook door zijbeken aangevoerd worden. Het gevolg kan nu zijn, dat de stroom overladen wordt en verwildert. Er

vormt zich een complex van kommen en deze verbindende armen, of tenminste vele in de bedding verspreide grintbanken. De watermassa is niet meer één homogeen geheel, maar lost zich op in een aantal meer of minder zelfstandige loopen elk met zijn lijn van maximale snelheid. Die deelen van den stroom, welke aan de binnenbochten der rivier grenzen, hebben nu in het algemeen den kortsten weg en dus het grootste verhang. Daardoor kan het voorkomen, dat zij langzamerhand al het water van de rivier tot zich trekken en de rivier rechter gelegd wordt. Indien echter de rivier steeds in staat blijft haren last behoorlijk te vervoeren en haar bedding voldoende vrij te houden, dan zal het water een compact dwarsprofiel behouden met één lijn van maximale snelheid. De hydraulische radius is dan groot, de wrijving in verhouding tot de watermassa gering. De inertie wordt nu van beteekenis en doet het water in de eenmaal voorhanden richting voortgaan, anders gezegd: de centrifugaalkracht dwingt het water de buitenbochten te volgen. Er komt dus dan geen rechtlegging van den loop. In het eerste behandelde geval is de hydraulische radius klein, de wrijving groot, het water blijft niet meer ten gevolge van de verkregen vaart in dezelfde richting doorgaan, maar volgt telkens de richting van de momenteele versnelling der zwaartekracht. De oorzaak of er al dan niet rechtlegging plaats heeft, ligt dus niet in het verhang op zich zelf, maar in het geheele samenspel der verschillende factoren, en bovenal in de last.

R. J. RUSSELL (1939) schrijft, pag. 1201, over den invloed van het verhang: „The effect of an increased gradient on a flood-plain stream is typically that of increasing its load. This causes the channel to widen and shoal, leading to a braided pattern. Gentler gradients decrease the load of such streams and lead to meandering patterns. Unconsolidated or incoherent materials of bed and bank increase the load and braiding tendencies." Op pag. 1200 schrijft hij: „Available load appears to be the factor separating meandering from braided streams. A smaller load, in proportion to carrying capacity, at the moment, makes for meandering, a larger load, for braiding." Volgens de opvatting van RUSSELL, waarmee ik het geheel eens ben, houdt de vorming van meanders bij sterker verhang niet op door de grootere snelheid op zich zelf, maar door de meestal uit „unconsolidated or incoherent materials" opgenomen overgroote last. Blijft deze overlading achterwege — b.v. in een bedding van voldoende resistentie — dan zal dus de meandervorming wel doorgaan.

EIGENSCHAPPEN DER MEANDERS

Horizontale vorm der meanders.

Volledigheidshalve herinner ik hier aan eenige begrippen, die men bij de beschrijving der meanders gebruikt, vgl. Fig. 22. Een deel der hier gebruikte

termen kon ik ontleenen aan den Nomenclator van het Geol.-Mijnb. Gen.; voor de daarin niet genoemde begrippen heb ik getracht passende namen te vinden. Wij zien de reeks der door de rivier omsloten schiereilanden, de kronkelwaarden, die men in linker- en rechterwaard zou kunnen scheiden, naar gelang zij aan de linker of rechterzijde samenhangen met de rest der dalvlakte. De schiereilanden bezitten een meer of minder duidelijken kop en hals. Hunne lengte is gelijk aan de breedte van den meandergordel, m b. De as verdeelt den gordel in eene linker en rechter helft. De meanderstraal, de kromtestraal der bochten, R, neemt eerst af, bereikt normaler wijze het minimum, R m, op den grootsten afstand van de as, den top van de bocht en neemt dan weer toe, tot hij bij het kruisen van de as over een kleiner of grooter segment oneindig wordt en de rivier dus rechtuit loopt. Wij zien den buitenhoek der tangenten, die in grootte aan den kophoek, k h, gelijk is, en een maat is voor de ontwikkeling der bochten. In den regel worden de bochten gescheiden door rechte stukken, de beenen. Verder is l de lengte van het meanderinterval, dat gelijk is aan tweemaal den afstand van askruising tot askruising, waar de rivier telkens de as snijdt en voor korter of langer tijd recht loopt.

Verlegging der askruisingen.

Gewoonlijk neemt men aan, dat bij de ontwikkeling der meanderbogen de kruisingen, waar de rivier de as snijdt, ongeveer op hun plaats blijven, en in elk geval, dat bij het langzaam stroomafwaarts schuiven van het geheele systeem, de afstand van kruising tot kruising, ½l, gelijk blijft.

EXNER (1919) heeft hierover eene andere opvatting. Hij geeft de in Fig. 21 weergegeven voorstelling, waarbij dus de afstand ½l toeneemt, naarmate door de erosie de bochten verder uitgespoeld worden.

Zou men nu als uitgangspunt een aantal kleine bogen aannemen, waarbij b.v. ½l = 500 m was, dus op 10 km langs de as gemeten 20 bogen voorkwamen, dan zouden deze bogen in een later stadium aangegroeid zijn tot 1000 m. De 20 bogen zouden nu 20 km innemen en het einde zou in dezen tijd 10 km stroomafwaarts verschoven zijn. De verschuivingssnelheid zou stroomafwaarts steeds toenemen, hetgeen ongerijmd is. In de natuur zijn er echter ook nooit op één moment 20 kleine bogen, die alle gelijkmatig aangroeien. Er zijn steeds én groote, vérontwikkelde, én kleine pas beginnende bogen.

Kunstmatig recht gelegde rivieren trachten weer serpentinen te vormen, maar de verdere ontwikkeling dezer bochten is mij niet bekend. Hier zou dus, mits de rivier haar volle bewegingsvrijheid terug kreeg, het door EXNER bedoelde geval zich kunnen voordoen. Of men deze opvatting van EXNER experimenteel onderzocht heeft door proeven met een model, is mij onbekend.

Verhouding der bochten tot de totale lengte.

De verhouding tusschen de totale lengte eener rivier en de lengte der krommingen, die daar in voorkomen, varieert natuurlijk. Soms overwegen de rechte stukken, b.v. in de Seine bij Rouaan (zie DE MARTONNE, Fig. 194) en in nog hooger mate in de Conodoguinet Creek, een rechter zijriviertje van de Susquehanna (zie SALISBURY and ATWOOD, plate LXXVI). Meestal overwegen evenwel de krommingen. Zoo bestond vóór de groote correctie de Theiss, wanneer men alle segmenten, wier kromtestraal meer dan 4.5 km bedraagt, als recht beschouwt, over eene lengte van 1200 km van Mezö Vári tot de monding) voor 960 km uit bochten en voor 240 km uit rechte stukken (zie VUJEVIĆ, pag. 20).

Vorm der bochten.

Ten opzichte van den vorm der bochten moet ik op het volgende wijzen: bij meanderstudies worden de krommingen vaak geteekend en besproken, alsof het cirkelbogen zijn. Dan wordt echter aan het einde der bocht de kromtestraal plotseling oneindig of slaat zelfs van +R in —R over. De verhooging van het water aan den buitenoever zou dus momentaan moeten eindigen of in eene verlaging overslaan. In werkelijkheid zal de kromtestraal geleidelijk af en daarna weer toenemen. In een aantal door LEIGHLY (1936) pag. 278, onderzochte gevallen, nam — stroomafwaarts gaande — in den regel R eerst snel af tot het minimum, om daarna hetzij geleidelijk, hetzij eerst langzaam en dan snel weer toe te nemen. FARGUE (1868) bespeekt de vraag welken vorm men geven moet aan de bedding van eene gecorrigeerde rivier om zoo min mogelijk reparaties aan de oeverbevestigingen te hebben en schrijft, pag. 50, naar aanleiding hiervan o.a. „. . . quelques résultats généraux se dégagent de cette étude. Exclusion de la ligne droite et du cercle, nécessité des raccordements par osculation, propriétés de la courbe dont la courbure est proportionnelle à la longueur de l'arc, ce sont là des points qui pourront paraître intéressants. . ." Deze kromme, waarvoor hij den naam spirale volute gebruikt, wordt ook wel CORNU-spiraal of clothoïde genoemd. In 1884 gaat hij uit van een lemniscaat. LEIGHLY (1936) pag. 282, e.v., schijnt van oordeel te zijn, dat een groot deel der meanderbogen meer of minder den vorm vertoont eener logarithmische spiraal. Men zie hierover verder JASMUND, Gewässerkunde, pag. 174.

STEN DE GEER schrijft, pag. 178 (vertaling van mij): „Op de dalvlakte van de Osterdalsälv heeft men ook gelegenheid de vormen der groote bogen te bestudeeren. Zij zijn soms ovaal, maar naderen in den regel sterk tot de cirkelvorm." Hierbij moet men niet vergeten, dat het hier fragmenten betreft van verlaten krommingen, wier verband met de buigpunten door erosie verdwenen is. De waarnemingen van DE GEER constateeren dus alleen het feit,

dat de kromtestraal niet voortdurend afneemt tot een eng begrensd minimum, om dan dadelijk weer toe te nemen, doch dat de kromtestraal hier over een aanzienlijken afstand de minimale waarde blijft behouden.

MARINELLI wijst er op, dat doode rivierkronkels gewoonlijk grooter zijn dan de nog levende meanders, daar de dood, het door breken van de hals, in den regel pas intreedt, als de bochten de maximale grootte bereikt hebben.

Verticale vorm der meanders.

Wij beschouwen nu de verticale vormen. FARGUE (1868) pag. 41, schrijft hier over: „...on peut dire que la profondeur d'eau suit une loi générale de périodicité: elle croît à partir d'un point où elle est minima; ce point est le maigre; elle atteint une valeur maxima à un autre point qui est la mouille; et décroît ensuite jusqu'à un second maigre..." „En prenant pour points de division les principaux maigres, on partage la rivière en ... portions qu'on peut appeler biefs." FARGUE geeft dan, pag. 41, nog eene definitie: „Les courbes sont séparées les unes des autres par des points notables. Quand les courbures sont alternes, c'est-à-dire à concavité dirigée en sens opposés, ces points sont nommés points d'inflexion. Je leur donne le nom de points de surflexion dans le cas contraire, c'est-à-dire quand leurs concavités sont tournées vers la même rive."

Het blijkt nu verder, dat les maigres, de ondiepten, nabij de askruisingen voorkomen, les mouilles, de kolken, nabij de toppen der bochten, en dat de biefs, de bekkens, dus ongeveer samenvallen met het één enkelen kop omsluitende deel der rivier.

Twee opeenvolgende meanderbekkens worden gescheiden door een ondieper gedeelte, door een „pas". Wanneer tusschen de bochten een rechtloopend pand, een duidelijk „been" voorkomt, zoo ligt de pas hier in. Indien de stroomdraad zich geleidelijk uit den bovenstroomschen concaven oever losmaakt, een eind weegs het midden van de rivier volgt en dan weer geleidelijk den volgenden concaven oever opzoekt, blijft de diepte steeds tamelijk groot en ontstaat de — voor de scheepvaart — „goede pas". Zie Fig. 23. Maakt echter de stroomdraad zich plotseling uit de bovenstroomsche bocht los en zwaait dwars over de rivier naar de volgende bocht over, dan vormt zich een „slechte pas" (voor de scheepvaart, want het doorwaden gaat hier natuurlijk juist beter), zie Fig. 24. Eene andere variëteit is de plateauvormige pas, zie Fig. 25. Ook deze is voor de scheepvaart ongunstig. Men zie verder de uitvoerige beschrijving van JASMUND, pag. 176-181, aan wiens uiteenzetting in de Gewässerkunde mijn Fig. 23 tot 25 zijn ontleend.

In de stroomrichting gezien beweegt zich het water in alle drie gevallen aan den linker, bovenstroomschen, kant der Figuren 23, 24 en 25 als in Fig. 26, en aan den rechter kant als in Fig. 27. Tusschen deze twee in

stroomt het in Fig. 23 parallel aan de oevers stroomafwaarts. In Fig. 24 volgt het een achtvormigen loop, ongeveer als in Fig. 28 is afgebeeld.

Wetten van FARGUE.

Uit zijne onderzoekingen aan de Garonne kon FARGUE (1868) een aantal regels afleiden:

1) Loi de l'écart. La mouille et le maigre sont reportés en aval du sommet et du point d'inflexion. Behalve de boven, op pag. 237, reeds besproken oorzaken dezer verschuiving kan natuurlijk ook de omstandigheid meewerken, dat wanneer ook al op een bepaald punt de op het water werkende centrifugaalkracht een maximum bereikt, de daardoor in het water verwekte wervels etc. niet momentaan hunne grootste sterkte bereiken, maar een korten tijd daarna. Goede voorbeelden van deze benedenwaartsche verschuiving der grootste diepte vindt men ook op onze Rivierenkaart in 1 : 10 000. Om slechts enkele voorbeelden te noemen: voor de Maas de bladen 21, Grave; 22, Ravenstein; 23, Megen. Ook bij de Waal, Beneden Rijn en Geldersche IJssel is deze verschuiving duidelijk waar te nemen.

2) Loi de la mouille. La courbure du sommet détermine la profondeur de la mouille.

3) Dans l'intérêt de la profondeur tant maxima que moyenne, la courbe ne doit être ni trop courte ni trop développée. Deze eigenschap vindt hare verklaring in de met de natuur der waterbeweging samenhangende golvingen der strooming, die wij hieronder (pag. 267) zullen bespreken. Is de bocht al te lang, dan blijft de sterkste stroom niet aan den buitenoever, doch heeft de neiging voor eenigen tijd de binnenbocht te volgen en eerst daarna weer den buitenoever op te zoeken. Dergelijke abnormale kolken aan de binnenbocht kan men in lange krommingen van grooten radius in den Neder Rijn hier en daar waarnemen, b.v. tusschen Culenborg en Everdingen en in de groote bocht ten zuiden van de Grebbe. Ook de Maas in de buurt van Roermond schijnt dergelijke abnormale kolken te vormen. Dit verschijnsel is hier echter niet duidelijk.

4) Loi de l'angle. L'angle extérieur des tangentes extrêmes de la courbe divisé par la longueur, détermine la profondeur moyenne du bief.

5) Loi de la continuité. Le profil en long du thalweg ne représente de régularité qu'autant que la courbure varie d'une manière graduelle et successive. Tout changement brusque de courbure occasionne une diminution brusque de profondeur.

6) Loi de la pente du fond. Si la courbure varie d'une manière continue, l'inclinaison de la tangente à la courbe des courbures détermine la pente du fond du thalweg.

Stroomafwaarts schuiven der meanders.

TOWER schrijft, pag. 591: „... other things being equal, then, a steeper, and hence swifter, river should show the most lateral cutting and the greatest development of meanders. But this is not the case. Not only the fact of cutting, but also the place of cutting must be considered. The greater the velocity of a river, the longer will it take for any curve to cause maximum displacement of the current and the farther downstream from the beginning of the curve will maximum cutting occur. Hence the curves of a stream on a steep gradient will enlarge slowly, but will rapidly advance down valley." Deze uiteenzetting stelt m.i. de feiten op den kop. TOWER redeneert hier alsof de inertie van het water er naar streven zou den sterksten stroom het midden van de rivier te doen volgen, doch dat eene in den buitenoever zetelende, voor alle rivieren constante, kracht den stroom tegen den buitenoever tracht te trekken. Hoe grooter nu de snelheid van het de bocht instroomende water zou zijn, des te geringer i n v e r h o u d i n g de constante naar den oever trekkende kracht, des te kleiner wordt de deflectiehoek en des te langer duurt het tot de stroomdraad den buitenoever bereikt. In werkelijkheid is het juist andersom. Deze constante aantrekkende kracht bestaat niet. Hoe sneller het water stroomt, des te minder tijd behoeft het om van den eenen kant der rivier den overkant te bereiken, en met des te grooter geweld botst het tegen den concaven oever. Het geval komt overigens geheel overeen met hetgeen er geschiedt in eene turbine of Pelton wiel. Zie b.v. CHURCH, pag. 800: „Impulse of a yet of water on a fixed curved vane". De druk op de „vane", de schoep, in zijn Fig. 626 bereikt niet een maximum op eene van de snelheid afhankelijke plaats, doch is van den beginne af overal gelijk. Het bedrag van den op de schoep (vgl. den oever van eene rivier) uitgeoefenden druk per lengte-eenheid, $dP/ds = F.m \frac{U^2}{R}$ Hierin is F de dwarsdoorsnede van den stroom, m de massa per volume-eenheid, U de snelheid en R de kromtestraal.

In zijne studie over de Theiss schrijft VUJEVIĆ (1906) pag. 22: „Wir haben oben gesehen, dass sich die Mäander unter der Einwirkung der Zentrifugalkraft seitlich entwickeln, aber es stellt sich auch eine Wanderung der Krümmungen flussabwärts ein, welche dadurch hervorgerufen wird, dass die flussabwärts gekehrten Krümmungen in die Richtung des allgemeinen Gefälles fallen und deswegen mehr angegriffen werden als die flussaufwärts gelegenen." Dergelijke meeningen, namelijk, dat het water, wanneer de stroomrichting samenvalt met de „algemeene dalrichting", zich sneller zou bewegen of dat het tegen de stroomafwaarts gelegen oevers grooteren druk zou uitoefenen, treft men bij vele auteurs aan. Ook MARINELLI schrijft een dergelijken invloed toe aan „l'inclinazione generale del suolo."

Daar deze meening, ofschoon onjuist, op het eerste gezicht zoo plausibel

en van zelf sprekend schijnt, wil ik er hier uitvoeriger op ingaan. Dat van een bocht de tweede, stroomafwaarts gelegen, helft het sterkste door den stroom wordt aangetast, is een bekend feit. Wij weten dus, dat in Fig. 42 de oever bij B sterker wordt aangetast, dan bij A, ofschoon het water hier t e g e n de dalhelling in loopt. Wij hebben boven de oorzaak leeren kennen. De door VUJEVIĆ en anderen gegeven verklaring omtrent de „algemeene dalhelling" acht ik onjuist, waarvoor ik hieronder nog eenige bewijzen zal aanvoeren.

In alle deze redeneeringen schuilt m.i. de onbewuste voorstelling van een oorspronkelijk horizontaal terrein, waarin een rivierbed gegraven is, dat met water gevuld en daarna schuin gesteld wordt in de richting der „dalhelling" Nu hebben de in die dalhelling vallende richtingen werkelijk een verval en de dwarsche segmenten niet. Het water zal nu inderdaad niet overal even snel stroomen. Men heeft nu echter ook een trapvormig lengteprofiel, terwijl het lengteprofiel van een echte rivier in losse sedimenten, die meanders vormt, juist w e l vereffend is.

Stel ik maak een riviermodel, Fig. 44, van gelijk lange segmenten, gescheiden door vijvers, waarin het water weer tot rust komt en het sediment wordt opgevangen. Indien het verhang van den beginne niet overal gelijk is, dan werkt de erosie vereffenend tot in alle segmenten het zelfde verhang bestaat. Nu buig ik, z o n d e r h e t v e r h a n g t e v e r a n d e r e n, deze serie segmenten in verschillende vormen, zooals in Fig. 45 en 46. Men vrage zich zelf af of er nu grond bestaat, dat in bepaalde segmenten eene grootere stroomsnelheid heerscht, ofschoon het verhang het zelfde is gebleven, alleen omdat deze stukken een bepaald azimuth bezitten.

Men stelle zich verder eens voor, dat ik een model maak van het in Fig. 43 afgebeelde rivierstuk, waarin bij M water toevloeit uit een kraan en bij W het water over een stuwdam in de diepte valt. Er heeft dan tusschen Q en R sterker erosie plaats, dan tusschen P en Q. Nu laat ik dit model draaien om een verticale as. Zal dit op de erosie van invloed zijn? Wel neen, volstrekt niet! Het eenige, dat hier invloed heeft, is de grootte van het verhang en de hoek, waaronder het water den oever treft. Het azimuth, d.w.z. de hoek, dien de richting van den stroom maakt met de een of andere willekeurige richting, is volmaakt onverschillig.

Bovendien is bij vele rivieren het begrip algemeene dalhelling hoogst vaag. Al naar mate men grootere of kleinere panden samen neemt, varieert deze richting sterk. Hoe bepaalt de rivier dan, welke oevers zij wel en welke zij niet moet erodeeren?

Beschouwen wij verder eens het stuk BC in Fig. 31. Dan is als de rivier de vol geteekende lijn volgt, de algemeene dalrichting van S naar N. Vervangt men echter SA door EA, en CN door CW, zonder aan verhang enz. enz. van het gedeelte tusschen A en C ook maar het allerminste te veran-

deren, dan is de algemeene dalrichting nu E-W geworden. Nu zou BC tegen de algemeene dalhelling gericht zijn en dus nu slechts zwak door den stroom aangetast worden. De erosie tusschen B en C zou onafhankelijk worden van den lokalen toestand, maar afhankelijk van wat er vóór A geschied is en na C geschieden zal!

De erosiekracht van het water wordt echter op elk oogenblik slechts bepaald door de werking der momentaan aanwezige factoren: snelheid van den stroom en richting ten opzichte van de oevers en door de verdere momentaan werkende krachten. In welke hoofdrichting de rivier eenigen tijd te voren gestroomd heeft, of waarheen zij zich later wenden zal, is niet meer of nog niet van invloed.

MEANDERGORDEL

Verhouding der breedten van rivier en meandergordel.

Dat de breedte van dezen gordel eene functie is van de grootte der rivier, wordt algemeen toegegeven. Prof. B. G. ESCHER was zoo welwillend mij een blad te leenen uit den „Atlante dei Tipi Geografici", nl. Tavola 8, Meandri liberi e meandri incastrati, 1 : 25 000. Eene vereenvoudigde copie van de op dit blad voorkomende afbeeldingen geef ik in Fig. 1 tot 13. Ik voeg hier nog een voorbeeld van vrije meanders, de Kendel, en van ingezonken meanders, de Lieser, aan toe, resp. Fig. 14 en 15. Deze 15 afbeeldingen zijn alle geteekend op denzelfden maatstaf. Een voor alle geldige km-schaal vindt men op Fig. 1. Hier onder volgen nog enkele bijzonderheden over deze rivieren:

Vrije meanders:

Fig. 1) Po met de monding der Adda, dalvlakte ca. 40 m.b.z, oude, verlaten bochten en aanduiding van oeverwallen.

Fig. 2) Po, dalvlakte ca. 70 m.b.z, oude bochten in het afgebeelde stuk niet te zien, geen aanduiding van oeverwallen.

Fig. 3) Adda kort boven de monding in den Po, dalvlakte ca. 55 m.b.z, talrijke verlaten bochten, links en rechts terrassen, ca. 70 m.b.z.

Fig. 4) Oglio bij Canneto met monding van R. Chiese, dalvlakte ca. 30 m.b.z, één verlaten bocht.

Fig. 5) Tanaro, dalvlakte ca. 90 m.b.z, groote verlaten bochten, terras ca. 3 m boven dalvlakte.

Fig. 6) Tevere bij Deruta, S van Peruggia in Umbrië, dalvlakte ca. 160 m.b.z, heuvelland.

Fig. 7) Bacchiglione bij Padua, dalvlakte ca. 16 m.b.z.

Fig. 8) Corno bij Palmanova, S van Udine, hoogte der strandvlakte der Adriatische Zee ca. 5 m.b.z.

Fig. 9) Bardonezza, terreinhoogte ca. 80 m.b.z.

Fig. 14) Kendel, zijtak der Niers bij Gennep, hoogte van het terrein ca. 16 m.b.z, zeer regelmatige meanders.

Ingezonken meanders:

Fig. 10) Tanaro, heuvelland, rivier ca. 330-280 m.b.z, ongeveer 60 m hooger terrasresten.

Fig. 11) Trebbia, heuvelland, langs rivier smalle, onregelmatige dalvlakte ca. 340-275 m.b.z. De rivier is nog niet in staat geweest meer of minder regelmatige bogen te vormen.

Fig. 12) Orba, heuvelland, rivier diep ingesneden, tamelijk regelmatige bochten, rivierhoogte ca. 280 m.b.z.

Fig. 13) Crastesu, op Sardinië, plateaulandschap 200 à 250 m hoog, rivier ca. 150 m.b.z.

Fig. 15) Lieser, zijtak der Moezel, plateaulandschap ca. 300 à 400 m hoog, smalle, vaak ontbrekende, dalvlakte 300 tot 210 m.b.z., tamelijk regelmatige meanders.

Een beter bewijs van het bovenvermelde verband tusschen breedte van den meandergordel en de grootte der rivier, dan de afbeeldingen op Tavola 8 kan men zich wel niet wenschen. De vraag is nu maar, wat men onder de grootte eener rivier verstaan moet.

FERGUSSON brengt de grootte der bochten, die dus de breedte van den gordel bepaalt, in verband met de waterhoeveelheid en met het verhang. Op pag. 322 schrijft hij: „All rivers oscillate in curves, whose extent is directly proportionate to the quantity of water flowing through the rivers." en op pag. 323: „... it will .... be perceived that the extent or radius of the curves will be directly proportioned to the slope of the bed of the river." Dat wil dus zeggen, dat wanneer R de kromtestraal der bocht is, Q de waterhoeveelheid, I het verhang, en c1, c2 en c3 constanten, R = c1.Q en bovendien R = c2.I, maar dan moet Q = c3.I. Het verhang eener rivier kan echter zeer wel veranderen, al blijft de waterhoeveelheid gelijk. Verder zou volgens hem, wanneer b de breedte der rivier en l het meanderinterval is, en I het verhang, wij moeten hebben:

voor I gelijk 3 tot 6 inch/mile, ca 1/20 000 à 1/10 000 l = 4b
„ „ 6 „ 12 „ / „ , „ 1/10 000 à 1/ 5 000 „ = 6b
„ „ meer dan 12 „ / „ , „ meer dan 1/ 5 000 „ = 10 tot 12b

JEFFERSON geeft eene andere oplossing. Ik heb het artikel van JEFFERSON helaas in geen onzer Nederlandsche bibliotheken kunnen vinden, en gebruik dus voor de bespreking er van een referaat door DE GEER, pag. 124 e.v.

JEFFERSON geeft drie voorbeelden van de verhouding der watermassa, Q, en mb, de breedte van den meandergordel:

Matfield	Q = 17	m³/sec.	mb = 135 m
Oder	„ = 65.0	„	„ = 1 410 m
Mississippi	„ = 15 400	„	„ = 16 500 m

Met Q neemt ook mb toe, maar in veel langzamer verhouding. De vorm der functie is niet duidelijk. JEFFERSON ziet nu verder af van het zoeken naar een verband van mb met Q, of met de snelheid, U. Over blijven dan de diepte, h, en de breedte, b, der rivier, alsmede eventueele andere factoren. Hij meent grond te hebben voor de aanname, dat de invloed van de diepte der rivier op de breedte van den meandergordel gering is, en vervolgt dan (eenigszins vrij vertaald): „De breedte van een meandergordel berust er direct op, hoe scherp een rivier zich om een punt kan buigen, of korter gezegd, hoe langer de radius der bocht, des te breeder de gordel .... De moeite van zich te buigen neemt voor de rivier toe met hare breedte, alsmede voor een gedeelte met hare diepte. Een stuk touw, dun bindtouw en een riem bieden interessante analogiën. Een draad kan men eenvoudig dubbelbuigen, een touw minder scherp, een dikke kabel kan slechts gebogen worden in een wijde, open boog. De bezwaren liggen aan de binnenbocht. ... Wanneer er sprake is van ter zijde buigen, dan is eene toename van de breedte eene grootere belemmering voor het buigen, dan eene vergrooting van de dikte (van een riem) en dat naar de tweede macht van de vergrooting. Een dubbel zoo groote breedte is vier maal zoo hinderlijk als een verdubbeling van de diepte." Het schijnt mij toe, dat men hier moet lezen: derde macht van de breedte, in plaats van tweede macht. Is dit laatste wel juist, dan moet het niet zijn vier maal zoo hinderlijk, doch twee maal.

Naast de vergelijking met een touw of riem, die gebogen worden, zou men nog eerder eene vergelijking kunnen maken met een aan te leggen spoorweg. Daar hangt de lengte van den kromtestraal der baan in de bochten niet alleen af van de spoorwijdte, maar ook in hooge mate van de snelheid, waarmee gereden zal worden.

In de formule van BOUSSINESQ, zie mijn pag. 236, komt dan ook wel degelijk de stroomsnelheid voor.

Het moet dus bevreemden, dat de regel van JEFFERSON tamelijk goed uitkomt, ofschoon men zou verwachten, dat de breedte van den meandergordel eene functie is van een aantal factoren zooals breedte, diepte, snelheid, verhang, waterhoeveelheid, last, enz., en niet van de breedte alleen. Nu staan sommige dezer factoren met elkaar in verband: het verhang bepaalt de snelheid, de waterhoeveelheid is gelijk aan het product van breedte, diepte en snelheid, enz.

Wij passen nu op de door JEFFERSON meegedeelde gegevens omtrent Matfield, Oder en Mississippi zijn eigen regel toe.

Naam van rivier	breedte van meandergordel	breedte rivier	verhouding der breedten	verhouding 2de macht	verhouding Q/doorsnede
Matfield	135 m	7.5 m	1	1	1.7
Oder	1 410 „	78 „	10.4	108	0.6
Mississippi	16 500 „	916 „	122	14 700	1.05

De breedten worden dan: 7.5,78 en 916 m. Aannemende, dat de verhouding van diepte tot breedte in alle drie gevallen gelijk is, verhouden de arealen der doorsneden zich als de tweede machten, dus als 1 : 108 : 14 700. Wanneer wij de waterhoeveelheid, Q, deelen door deze getallen, verkrijgen wij de onderlinge verhouding der snelheden, nl. 1.7 : 0.6 : 1.05. Het blijkt ons, dat de snelheden van dezelfde orde van grootheid zijn, hetgeen overeenkomt met de waarneming. Meanders komen in het algemeen daar voor, waar de rivieren langzaam stroomen en dus — zeer ruw genomen — gelijke snelheid hebben. In deze omstandigheid ligt de grond, dat de regel van JEFFERSON zoo goed uitkomt, ofschoon hij alleen de breedte in aanmerking neemt.

DE GEER geeft eene grootendeels aan JEFFERSON ontleende tabel, die ik hier onder herhaal, vooral daar het werk van JEFFERSON voor Nederlandsche lezers niet zeer toegankelijk is. Hierin beteekent mb: breedte van den meandergordel, b: breedte der rivier, l: meanderinterval (zie mijn Fig. 22).

Rivier	mb	b	mb/b	mb/l	Plaats
Mississippi	16 500 m	850 m	19.4	3.2	Greenville
Matfield	135	9	15.0	2.6	Elmwood
Oder	1 410	73	19.3	2.2	Kosel
Oder	2 490	124	20.0	—	Breslau
Rijn	5 010	236	21.2	2.6	boven Speier
Rijn	6 870	375	18.3	3.5	boven Worms
Donau	7 500	417	18.0	4.0	Theresiopel
Theiss	5 580	208	27.0	2.5	Szolnok
Theiss	3 370	188	18.0	2.2	Szegedin
Seine	8 850	280	31.7	2.0	Parijs - zee
Seine	15 300	180	85.0	3.5	nabij Parijs
Klarälv, zooals nu	760	185	4.2	0.8	Pl.I (DE GEER)
Klarälv	3 280	182	18.0	2.5	„ „
vrij gedacht	2 940				
Osterdalälv	3 500	200	17.5	3.5	Mora

Ik voeg hier nog een tweede lijst aan toe: Fig. 1-13 zijn ontleend aan den Atlante dei Tipi Geografici. Van deze rekent de samensteller, MARINELLI, de Tanaro, Trebbia, Orba en Crastesu tot de meandri incastrati. Verder voegde

ik aan dit lijstje nog toe: de Kendel, een zijtak van de Niers nabij Gennep, die natuurlijk n i e t, en de Lieser, een linker zijtak van de Moesel, die w e l ingezonken is.

Fig. No	Rivier	mb	b	mb/b	mb/l
1	Po	6500 m	360 m	18.05	1.00
2	Po	2050	195	10.5	0.68
3	Adda	2300	135	17.0	1.59
4	Oglio	1420	98	14.6	1.00
5	Tanaro	2630	120	21.9	1.50
6	Tevere	1250	67	18.5	0.96
7	Bacchiglione	600	46	13.1	1.72
8	Corno	450	34	13.3	2.00
9	Bardonezza	250	13	20.0	1.67
10	Tanaro	1350	52	25.7	0.93
11	Trebbia	700	42	16.8	1.27
12	Orba	975	41	23.8	1.40
13	Crastesu	1250 ?	25	50 ?	1.32 ?
14	Kendel	2000	125 ?	16.0 ?	1.28
15	Lieser	475	13	38.0	1.05

Op Fig. 2 komt slechts een klein segment van den Po-loop voor. Indien het wat grooter was, zou allicht de meandergordel breeder blijken te zijn. Dit zou dan de zeer lage waarden van mb/b en mb/l verklaren. Opvallend is, dat bij Bacchiglione en Corno mb/b zeer laag, maar mb/l hoog is.

Van de kronkelingen der Trebbia in het afgebeelde segment (Fig. 11) zijn slechts een deel duidelijke meanders, de overige zou men m.i. eerder moeten beschouwen als bochten, zooals elke rivier in het gebergte ze vertoont. Dit zelfde geldt, dunkt mij, ook voor de Crastesu (Fig. 13), waar trouwens het afgebeelde segment wel heel klein is. Onder deze omstandigheden is het geen wonder, dat men abnormale hooge of lage waarden voor mb/b vindt.

Bij de Kendel heb ik natuurlijk niet de breedte van de huidige, verarmde, beek genomen, doch, bij gebrek aan beter, de breedte der dalvlakte. De waarde, 16, voor mb/b is dus allicht iets te laag.

Zooals men ziet, zijn de waarden van mb/l in deze lijst voor een deel aanzienlijk lager, dan die DE GEER vermeldt. Hoe dit verschil te verklaren is, weet ik niet.

Als gemiddelde waarde van mb/b van de door DE GEER vermelde en nog een aantal andere rivieren vond JEFFERSON 17.6, dus rond, 18, en voor mb/l vindt DE GEER 2.5. LOMBARDINI, geciteerd door MARINELLI in diens verklaring van Tavola 8, van den Atlante dei Tipi Geografici, vermeldt, dat bij de rivieren der Po-vlakte mb/b rond 20 bedraagt.

Niet alleen de breedte van den meandergordel, maar ook het meanderinterval is afhankelijk van de grootte der rivier en het is dus te verwachten, dat zij ook in eene bepaalde verhouding tot de breedte staat. Uit de gegevens van JEFFERSON: mb/b = 18, en DE GEER: mb/l = 2.5, kan men afleiden, dat gemiddeld l = 7 b.

De bochten der Seine nabij Parijs — mb/b gelijk 85 — staan op zich zelf. DE GEER denkt „dat zij ingesneden werden gedurende overstroomingen van de soort, als die, welke in 1910 Parijs teisterden". Men zou ze misschien ook kunnen opvatten als door de Seine om heuvels heen gemaakte omwegen.

Voorts schrijft DE GEER: „Voor de ingezonken meanders is mb/b groot, gemiddeld ongeveer 1 : 30." Voor zooverre ik bij het beperkte materiaal aan kaarten op groote schaal, dat mij ten dienste staat, na kon gaan, is bij ingezonken meanders mb/b inderdaad groot, ongeveer 1/25 à 1/40, gemiddeld 1/30. Men zie ook de waarden voor Tanaro, Trebbia, Orba, Crastesu en Lieser.

Ter verklaring zou ik op 4 punten willen wijzen: 1) Die gedeelten der rivierloopen, waar ingezonken meanders voorkomen, hebben in den regel een grooter verhang, dan het gebied der vrije meanders. Daar bij gelijke waterhoeveelheid het dwarsprofiel omgekeerd evenredig is aan de snelheid, is hier het dwarsprofiel en daarmee gewoonlijk ook de breedte geringer. 2) De relatief hoogere snelheid, die de stroom in ingezonken meanders nu nog bezit en gedurende het insnijden bezat, veroorzaakte een relatief grooten krommingsradius. 3) Bij vrije meanders zal gedurende hoogen waterstand een deel van het water de bedding verlaten en over de dalvlakte in de richting der dalhelling stroomen. Hierdoor wordt de hoeveelheid water in de bedding, die de grootte der kromming bepaalt, verminderd. Bij ingezonken meanders blijft al het water te zamen. 4) Bij vrije meanders wordt door dit uittredende water de hals doorgesneden en de meanderboog buiten gebruik gesteld, vóór deze de maximale grootte bereikt heeft. Bij ingezonken meanders worden de bochten eerst verlaten, als zij zoo groot zijn geworden, dat werkelijk onderlinge aansnijding plaats vindt.

Bij deze gelegenheid wil ik tevens hier nog even op eene eigenaardigheid wijzen, die naar mij schijnt, bij ingezonken meanders nog al eens voorkomt, nl. dat de rechte of bijna rechte stukken, de beenen, lang zijn. Men zie b.v. DE MARTONNE, Fig. 195, en in geringere mate Fig. 193 en 194; of HOL (1939) Foto 1 en 2, en Fig. 7, de loop van de Erft, en vergelijke deze met haar Fig. 1, of met andere afbeeldingen van vrije meanders.

Misschien ligt de verklaring hierin: Water, dat in eene rivierbocht den oever onder een zeer scherpen hoek treft, zal daar op nog een zwakken uitspoelenden invloed uitoefenen, indien de oever uit losse sedimenten opgebouwd is. Bestaat de oever echter uit rots, dan zal de invloed veel geringer zijn. Deze rotsoever wordt dan bijna alleen in het meest gebogen gedeelte

aangetast en terug gedrongen. Dit zou voeren tot het in de lengte uitrekken der meander bogen.

De Heer H. N. EATON, te Washington, was zoo welwillend mij te wijzen op een artikel van H. C. RIPLEY getiteld: „Relation of depth to curvature of channels", waarin eene formule voorkomt, die behalve de breedte der rivier ook de diepte in aanmerking neemt, of, juister gezegd, het product van breedte en gemiddelde diepte. Deze formule luidt:
$R = 40 \sqrt{\text{areaal van het dwarsprofiel}}$ „where R is the radius of curvature of the concave bank, for conditions of stability."

Voor eene rivier, wier breedte 20 maal de gemiddelde diepte bedraagt, geeft dit een radius van 9 maal, en dus een meandergordel van 18 maal de rivierbreedte.

Samengedrukte meanders.

Volgens JEFFERSON moet men verder een stroomloop, die eng samengeperst wordt door de dalwanden, „gehinderd", „in verlegenheid gebracht" of „door de dalwanden gebonden" noemen in plaats van alleen te spreken van onontwikkeld. ULE uit, volgens DE GEER (pag. 128), eene overeenkomstige meening. R. J. RUSSELL (1939) pag. 1206, spreekt van „inhibited meandering". DE GEER gebruikt (pag. 128) bij eene dergelijke rivier-ontwikkeling, waarvan de Klarälv een voorbeeld is, de uitdrukkingen „tilltryckt" of „stympadt", dus „samengedrukt" of „afgestompt".

In het op tafel 1 van DE GEER's studie afgebeelde deel van het Klarälvdal heeft de meandergordel, mb, eene breedte van gemiddeld 760 m; de rivier zelf van 182 m; het meander interval, l, bedraagt gemiddeld 1175 m. DE GEER tracht nu de breedte te berekenen, die een gordel van zich geheel vrij ontwikkelende meanders zou aannemen. Uit de verhouding mb/b = 18 vindt hij 18 × 182 m = 3280 m, en uit mb/l = 2.5 vindt hij 2.5 × 1175 m = 2940 m, als normale, vrije, breedte. Beide op verschillende wijze gevonden getallen stemmen goed overeen." Men zou hieruit kunnen opmaken, dat de Klarälv de neiging heeft eene 3000 m breede dalvlakte te vormen. Hare serpentinen zijn dus beperkt tot een vierde deel van hunne natuurlijke werkingssfeer." (DE GEER, pag. 129).

De Österdalsälv, eene rivier van dezelfde grootte als de Klarälv, doch die niet in een eng dal stroomt, heeft de volgende verhoudingen: mb/b = 17.5, mb/l = 3.5, hetgeen dus goed overeenstemt met de theoretische waarden 18 en 2.5. DE GEER (pag. 52) gebruikt voor deze niet vol ontwikkelde meanders den naam serpentinen in tegenstelling met de vrije meanders. Het onderscheid tusschen deze twee typen ligt er dan in, dat bij echte meanders het de kronkelwaarden omspannende riviersegment zich rondom den kop geleidelijk verwijdt en aan den hals samensnoert tot er doorbraak plaats heeft. Bij de serpentinen behouden de kronkelwaarden hun vorm. Een door-

braak van den hals heeft niet plaats. de hals is hier trouwens breeder, dan de kop.

Verband tusschen samendrukking en stroomafwaarts schuiven.

Deze samengedrukte meanders of serpentinen zijn ook daarom interessant omdat zij blijkbaar de oplossing geven van een verschijnsel, dat wel vermeld wordt, doch, voor zooverre mij bekend, niet of onjuist verklaard wordt, dat nl. de meanders des te sneller stroomafwaarts schuiven, naarmate het verhang grooter is.

Zoo schrijft TOWER, pag. 591: „In any given stream, then, the gentle turns and bends along the steeper initial course will, without much change of charakter, progress rapidly down valley. On the gentler slopes of the later stages, curves of more and more symmetrical form will be developed and their down valley migrations will diminish." De verklaring, die hij hier aan verbindt, heb ik reeds boven, pag. 246, besproken en weerlegd. Ook VUJEVIĆ, pag. 23, geeft eene soortgelijke uiteenzetting met soortgelijke verklaring.

De snelheid, waarmede eene rivier hare buitenoevers terugsnijdt, hangt, bij gelijk materiaal, af van de erosiekracht, welke de rivier op de oevers uitoefent, d.w.z. het aantal kilogrammeter per quadraatmeter en per tijdeenheid. Dit bedrag stijgt met de snelheid van den stroom. Nu zal eene rivier, die een aanzienlijk verhang heeft, in den regel nog geen zeer breed dal bezitten. Is daarentegen het dal eener rivier wijder dan de breedte van een gordel van „vrije" meanders, zoo heeft in den langen tijd, noodig voor deze verbreedingsarbeid, de rivier gewoonlijk een gering verhang verkregen. Deze laatste rivier kan ongehinderd hare meanders vergrooten, tot de normale gordelbreedte bereikt is. Dit zal echter over den geheelen omtrek langzaam plaats vinden, daar het verhang, en dus ook de stroomsnelheid gering is. De dalafwaartsche verschuiving is dus ook langzaam.

De eerste rivier, die snel stroomt, zal den oever sterker aantasten door de grootere stroomsnelheid. Zij zal dus den geheelen oever, voor zoo verre deze uit zacht materiaal bestaat, snel terug snijden en dus ook snel stroomafwaarts schuiven. Daar in het enge dal een deel der oevers door de resistente dalwanden gevormd wordt, verhindert de hardheid dezer oever segmenten en niet de snelheid van den stroom de verwijding van den meandergordel. Men vergelijke hierover de zeer interessante illustraties en uiteenzettingen van DE GEER, pag. 156 e.v., waarbij hij ook over de snelheid waarmede de serpentinen van de Klarälv verschuiven data meedeelt.

Het hier boven uiteengezette geeft ook de verklaring van de waarnemingen van TOWER, pag. 590: „From maturity of the river to old age, however, the meanders of any given part of the course are of successively different

qualities; for, as the river grows older, it develops meanders of smaller radius (ten gevolge van de geringe snelheid kan alleen bij kleinen krommingsstraal de buitenoever met voldoende kracht aangetast worden om meanderbogen te vormen; verder biedt de langzaam stroomende rivier geen sterken tegenstand meer tegen buiging, zie de formule van BOUSSINESQ, mijn pag. 236,) and larger arc (bij de geringe wrijving, die de rustig vloeiende rivier ondervindt, is de kinetische energie, ondanks de geringe snelheid in verhouding tot de zeer geringe invloed van de zwaartekracht — zeer gering verhang — groot. De meanders komen dus tot hun volle ontwikkeling). At the same time the rate of down-valley migration of the meanders steadily diminishes." (Aantasting der oevers gering, dus langzame verschuiving).

Ook in het volgende opzicht zijn deze afgestompte meanders interessant. Indien de dalvlakte eener rivier eene breedte bezit, die gelijk is aan, of grooter dan de voor deze rivier passende meandergordel, dan zal een meandertop, die de dalwand aansnijdt en tevens dalafwaarts schuift, daarbij eene smalle strook van de dalwand wegsnijden, (zie Fig. 39). Breekt nu de hals, h, door, dan wordt de bocht, b, verlaten. De erosie bij a wordt nu niet dadelijk voortgezet, al wordt ook verder stroomafwaarts de linkerwand weder aangetast. Er blijft dus bij a een spoor staan.

Bij samengedrukte meanders, die een verloop hebben als in Fig. 40 komt een doorbraak van een hals niet voor. Hier blijven dus bij het stroomafwaarts schuiven der meanders geen sporen staan, behalve eventueel als resultaat van ongelijke hardheid van het gesteente der dalwanden.

Onderzoek van IMAMURA.

IMAMURA onderzocht bij 46 rivieren, waarvan 35 in Japan, 7 in de Vereenigde Staten en 4 in Duitschland, de breedte der rivier, de breedte van den meandergordel en het verhang. Hij vat het resultaat van zijn onderzoek samen in het volgende summary:

1) The rate at which the meander belt enlarges as the result of decrease in the general gradient is more marked in large rivers than in small.
2) This tendency is most marked between group 1 (de kleinste rivieren) and the other groups.
3) The meander belt becomes almost constant if the rivers flow down a slope whose gradient is steeper than 0.5%. As a matter of fact, it is impossible to find rivers with widths of 50 meter or more that show a well developed meander on such a steep slope.
4) If a given gradient is too small, small rivers are unable to complete a perfect meander.
5) Large rivers, however, are able to develop perfect meanders even on a slope with a slight gradient, so that no exceptions are found.

6) The flow and the gradient determine the meander belt, although with some probable error. Civil engineers might find this principle useful.
7) Should the gradient be abnormally small, as in the cases of No. 35 and 38, we sometimes meet with strangely deformed meanders that were at one time very well developed. This, which is especially the case with small rivers, suggests recent negative crustal movement in the region traversed by the river.
8) In the case of real entrenched meanders, it is possible to find the general gradient of the former land surface over which the river was once freely meandering, only by measuring the present entrenched meander belt. This value often gives the gradient of a peneplain.

IMAMURA vermeldt deze 8 punten als resultaat van zijn onderzoek zonder zich uit te laten over de oorzaken. Ik wil nu trachten er eenige verklarende opmerkingen aan toe te voegen. Bij 1, 2, 4 en 5: Daar de waterhoeveelheid gelijk is aan doorsnede maal snelheid, zal bij vermindering van het verhang de doorsnede, dus in het algemeen de breedte toenemen en daarmee in samenhang ook de meandergordel. Bij grootere rivieren is de wrijving in verhouding tot de watermassa veel geringer, dan in kleine rivieren. Bij de eersten zal dus de vergrooting der bochten door de werking der centrifugaalkracht veel langer blijven doorgaan, dan bij de laatsten. Bij 3: Ik vermoed, dat men hier te doen heeft met de hier boven besproken inhibited meanders. Bij 6: Dit is het bekende verband tusschen de grootte der rivier en de breedte van den meandergordel. Bij 7: Behalve in het door IMAMURA vermelde geval, zou men deze groep gelijk kunnen stellen met groep 4. Bij 8: Wanneer de rivier haar insnijdingsarbeid geëindigd heeft, zal haar verhang gelijk zijn aan dat eener rivier op een peneplain.

OORZAAK VAN HET ONTSTAAN VAN MEANDERS

WAARIN MEN DE VERKLARING GEZOCHT HEEFT.

Een interessant referaat van de opvattingen van een aanzienlijk aantal onderzoekers omtrent de vraag hoe meanders ontstaan vindt men bij DE GEER (pag. 99 e.v.).

Invloed van zijrivieren.

CALLAWAY, pag. 450, en ELLIS, pag. 350, schrijven de zijrivieren een hoofdinvloed toe aan de vorming van serpentinen, doch zijn het over het hoe en waarom niet eens. DAVIS (1903) pag. 145, heeft deze opvatting weerlegd.

MARINELLI vermeldt eene waarneming van LOMBARDINI, nl. dat de rivieren der Po-vlakte slechts meanders bezitten kort boven en beneden de inmonding van zijrivieren, die troebeler (sedimentrijker) zijn dan zij zelven. Als

voorbeeld noemt hij de buurt van de monding der Trebbia in den Po, van de Serio in de Adda en van de Mella in de Oglio. Het door de zijrivieren meegebrachte puin, hetwelk de hoofdrivier niet wegvoeren kan, en het door de hoofdrivier aangevoerde sediment, dat neervalt ten gevolge van de door den delta der zijrivier veroorzaakte stuwing, worden door de hoofdrivier uitgespreid tot eene vlakte van geringe helling en geschikte textuur, waarin zij gemakkelijk meanderbogen kan vormen.

Invloed van puinafzetting in de binnenbocht.

FENNEMAN, pag. 36, zoekt de oorzaak in puinafzetting in de binnenbocht: „At any fortuitous curve or turn, the stream 's power is to some extent concentrated on the outer or convex side of the channel, leaving the water on the concave side with less than its average velocity. At such a time, if the average downcutting power of the stream be sufficiently small in proportion to its load, its power on the inner side of the curve becomes actually deficient, and deposition takes place in the channel against the inner bank. The effect of this is to narrow the stream, whose power is then still further concentrated against the outer bank. The shifting of the channel which is initiated in this way tends to make curves of somewhat uniform sharpness, their radii depending on the volume and power of the stream and the nature of its load. When well developed, such curves are meanders. It is to be observed that the conditions of meandering are not limited to aggrading streams, or even excluded from degrading streams. The one essential is that in going around a curve the distribution of power shall be such that the power on the inner side of the curve falls below what is necessary to carry the load; that is the load must be sufficiently near the stream 's capacity so that it shall be locally in excess in the relatively quiet water at the inside of a curve." Men vraagt zich af, waarom eene rivier den buitenoever n i e t, of slechts zwak, zou aantasten en terugsnijden, indien zij door de centrifugaalkracht tegen dezen oever gedrongen wordt, maar w e l, indien haar bedding door depositie aan de binnenzijde verengd is geworden. Ook het feit dat de kromtestralen der bochten blijkbaar eene functie zijn van de grootte der rivieren, vindt op deze wijze geen voldoende verklaring. Men ziet dit verder ook in door het onderstaande concrete voorbeeld: Nijmegen en Tiel liggen beide aan concave Waalbochten. Gesteld: deze concave bochten worden door de Waal op hinderlijke wijze aangevreten. Men graaft nu aan de overzijde eenige duizend m³ grint en zand weg. Is dan de last verholpen? Gebruikt de rivier de door den mensch verschafte ruimte als doorgang en vermindert dientengevolge de aantasting van den buitenoever? Neen! De stroom blijft tegen den buitenoever dringen, de ruimte aan de binnenbocht wordt door het water niet gebruikt om stroomafwaarts te vloeien.

Er vormt zich in het doode water zelfs een tegenstroom en geleidelijk slibt het gat weer dicht. De last in Nijmegen en Tiel blijft bestaan. Deze verklaring van het ontstaan van meanders is dus niet de juiste.

FISHER beschrijft, wat hij partition process noemt. Er vormt zich dan een sikkelvormige bank of eiland in de rivierbochten, zoo dat het water zoowel aan den concaven als aan den convexen kant doorstroomen kan. Dit beschouw ik als een begin van overlading. De strooming kan het grint van den concaven oever slechts over een geringen afstand zijdelings verschuiven, doch is niet sterk genoeg het naar de binnenbocht over te brengen of anders geheel weg te voeren, of wel de toevoer van grint gaat de kracht van den stroom te boven. Hier is de rivier dus op de grens van verwildering.

Invloed van overlading met puin.

GRIGGS heeft in een interessant artikel over den Buffalo River de oorzaak der meandervorming gezocht in overlading. Hij experimenteerde met een beek. Hij groef in vrijwel homogeenen zandgrond, die iets grint bevatte, ongeveer halfcirkelvormige bochten en leidde de beek daar doorheen. Werd nu een voortdurende stroom zand in de beek gebracht, dan begon deze de bochten te vergrooten. Werd er geen zand toegevoerd, dan bleef alles, zooals het was. Hij gaat nu voort: „This would seem to show beyond a doubt that a swift stream can be made to meander simply by giving it a heavy load to carry". Hij gaat dan verder: „But a stream can never build up a bar above its own level, or even quite up to that level, so that in the experiment, though the whole current was deflected against the farther bank as described, there was always a slight amount of water covering the top of the bar. In the streamlets experimented with, which were of nearly constant volume, a point was reached if the experiment was carried far enough, where the retardation of the current, by its increasingly crooked course and the slight difference in level between the upper and lower sides of the bar built out, gave sufficient head to the shallow water moving across it to pick up the recently-deposited sand and cut a new channel through it before the meander had been worked out to nearly so great a departure from the original course as is usual in a large river." GIRGGS neemt nu aan, dat het water tijdig weer zinkt, vóór de „bar" doorgesneden wordt en dat deze dan door plantengroei versterkt wordt. Men ziet alles aannamen pour le besoin de la cause. Zelfs al valt de rivier bij den eersten vloed snel genoeg onder het niveau van de zandpunt, dan wordt deze bij een volgend hoogwater toch doorgesneden en bezwijkt dan, tenzij elk volgende hoogwater lager is. Dit laatste zou alleen kunnen plaats vinden, indien het bed intusschen(dus bij laagwater) aanzienlijk verdiept was geworden, maar kan een overladen rivier dat bij laagwater doen? Volgens mijne opvatting bewijst dit experiment,

dat overlading geen meanders veroorzaakt, doch verdeeling in armen, d.w.z. verwildering.

De opvatting van R. J. RUSSELL over deze vraag is geheel in overeenstemming met de mijne. Hij schrijft (1939) pag. 1199 en 1200: „The two fundamental patterns of aggrading streams appear to be meandering and braiding. The former is characterized by channel simplicity, the latter by channel complexity. At most places along its course, a meandering stream occupies a single, simple channel.... At highest stage a braided stream simplifies its channel and temporarily assumes many meandering characteristics. At lowest stage a meandering stream may assume characteristics of braiding. Available load appears to be the factor separating meandering from braided streams. A smaller load, in proportion to carrying capacity, at the moment, makes for meandering, a larger load, for braiding." En op pag. 1201: „In general, aggrading streams flowing through flood plains composed chiefly of clay and fine silt are not easily overloaded and therefore tend to meander. Those flowing through sandy or gravelly flood plains are more readily overloaded and therefore tend to anastomose, or display the effects of braiding. Meandering streams ordinarily have deeper channels, with relatively steep slopes toward the banks and flat floors in cross section. Braiding streams have flatter and more irregular cross sections. This relationship between channel section, pattern, and bank materials has been discussed by LEIGHLY."

Ter controle maakt GRIGGS nu nog een ander experiment: „Besides these experiments observations were made upon streamlets lighty loaded with detritus. In such streams, though the force of the current was probably (dat moeten wij juist zeker weten!) strongest on the outside banks of the bends as assumed in the common explanation of meanders given above, there was still some force left to abrade the inside bank, causing a wearing away of the projecting point on the inside, which, if continued, soon furnishes the stream with a shorter course at a higher grade. This new channel diverts more and more of the current, so that in a little while the stream has abandoned its meander and is following the straighter course. Thus a stream is enabled to straighten its course if it be not so heavily loaded that it must deposit débris with small checks to the current. And we begin to see how it is that swift streams, being usually lightly laden, are „less easily turned aside and maintain straighter courses" than those which, by reason of their smaller velocities and soft bottoms, are apt to be heavily loaded." Daarnaast erkent hij toch ook den invloed van „the centrifugal force of the moving water. These two causes are complementary; each aiding the other...." Voor eene juiste beoordeeling van deze proef zouden wij ook breedte en diepte van de beek moeten weten. Voor de vorming van goede meanders moet al het water als één compacte stroom werken met een duidelijke stroomdraad, die naar den buitenkant van de bocht zwaait. Bij een kleine, waar-

schijnlijk in verhouding tot de breedte ondiepe stroom, waar dus de wrijving aan den bodem relatief sterk is, vormt zich niet één enkele hoofdstroomdraad, maar eene breede zone van ongeveer gelijke snelheid, eventueel eenige snelheids maxima. Onder deze omstandigheden heeft dus een kortere weg met sterker verhang gelegenheid een deel van het water en geleidelijk de geheele beek af te leiden. Bij experimenten op kleine schaal bestaat steeds gevaar, dat men geen vergelijkbare gevallen heeft. Men zie hierover VOGEL (1934). Leden van het Geologisch Mijnbouwkundig Genootschap zullen zich voor een deel ook de voordracht over dit onderwerp van DR L. U. DE SITTER herinneren, een paar jaar geleden te Leiden gehouden, alsmede hetgeen ter sprake is gekomen naar aanleiding van de proeven over gebergtevorming van DR PH. H. KUENEN.

Ook AHLMANN ziet in de last der rivieren de hoofdoorzaak voor het vormen van meanders. Hij schrijft, pag. 61: „... Andere Hypothesen sind vollständig metaphysisch, indem sie sagen, es liege in der „Natur des Flusses", sich zu krümmen, und damit Punctum." en later, pag. 64: „Der Serpentinlauf des Stromes in einem festen Fluss (d.w.z. een rivier, die ten gevolge van correctie tusschen sterke oeverkaden stroomt, danwel in een eng dal met parallelle rotswanden) ist somit durch den Materialtransport und dessen Mechanik bedingt und beinahe a priori bestimmt. Der Bogenlauf des freien Flusses beruht, wie vorher betont, auch auf der Transporttätigkeit des Stromes." Men zou m.i. juister kunnen zeggen: Die Anordung der Kiesbänke in einem festen Fluss ist somit durch die Wasserbewegung und deren Mechanik bedingt..., daar toch het grint volkomen passief door het water verplaatst wordt.

Ontwikkeling van reeds voorhanden bochten.

Een deel onzer geografische en geologische leerboeken gaat er van uit, dat er reeds bochten bestaan en beschrijft alleen de verdere ontwikkeling daarvan.

Invloed van toevallige hindernissen.

Anderen zien het uitgangspunt in toevallige hindernissen in het bed, die de rivier gemakkelijk ter zijde kunnen dwingen, indien het verhang gering is. CHAMBERLIN en SALISBURY schrijven, pag. 190: „A stream with an alluvial plain is likely to meander widely. In general terms this may be said to be the result of low velocity, which allows it to be easily turned aside." VACHER schrijft: „.... elles dessinent des méandres sous la pression du moindre obstacle". DAVIS (1898) pag. 243: „The slope down the valley is then so faint that the river easily turns aside from a direct course on its broadened flood plain, and in this way (whatever its original course) develops a system of serpentine curves or meanders....." Zeer expliciet

vindt men deze theorie der toevallige hindernissen bij MARINELLI. Ik geef hieronder eene meer of minder vrije vertaling: „Iemand zou zich kunnen voorstellen, dat de oorsprong van elke meander te zoeken is in eene toevallige bocht, die daarop het in werking treden der middelpuntvliedende kracht uitlokt, waardoor de bocht ruimer en regelmatiger wordt. Een kleine gebeurtenis, zooals de val van een graszode in een beekje kan in zijn zwakken stroom eene afwijking veroorzaken, de kiem van een meander; en omdat de kleine gebeurtenissen menigvuldig zijn in tijd en ruimte, zullen er met kleine tusschenruimten bochten voorkomen, en daarom zullen de meanders dicht bij elkaar ontstaan; zij zullen elkaar wederkeerig beletten zich te vergrooten, wanneer zij niet vernietigd worden door een welbekend proces..." (hij bedoelt hier schijnt het, het doorbreken van een meanderhals). „Omdat, daarentegen, de groote stroomen alleen uit hun baan gebracht worden door groote hindernissen, die minder vaak voorkomen, zullen in hen minder meanders gevormd worden en deze zullen verder van elkaar af ontstaan en dientengevolge grooter zijn."

Hij vindt deze verklaring blijkbaar toch niet zeer bevredigend en wijst er dan ook zelf op, dat hiermee niet verklaard wordt, waarom er bepaalde grenzen bestaan, waartusschen de kronkelingen plaats vinden (nl. de meandergordel) ook bij geïsoleerde meanderbochten. Hij zoekt dan eene algemeene verklaring van dit laatstgenoemde verschijnsel:

„Men moet evenwel aan eene meer algemeene oorzaak denken, die te vinden is in het feit, dat de omvang van elken meander op elk oogenblik de lijn van evenwicht vertegenwoordigt tusschen de kracht van erosie der rivier, opgewekt door de centrifugaalkracht, om in de bochten den straal voortdurend te vergrooten, en den tegenstand van den bodem. In eene homogene vlakte kan men, globaal genomen, de tegenstand als constant beschouwen, terwijl de erosiekracht der rivier met de vergrooting van den meander snel afneemt, door de verminderde snelheid, veroorzaakt door de toename van den weg, en vandaar door de vermindering van het verhang. Ook als men zich een waterloop denkt, welke zich ingraaft in fijn, los materiaal, waarbij men niet spreken kan van echte corrosie, maar alleen van transportkracht, is dezelfde redeneering geldig. Welnu, wat ook de oorzaak zij van de oorspronkelijke afwijking, de meander kan een groote bocht bereiken in een groote rivier, een kleine in een beekje waarbij hij snel de maximale grootte bereikt, die veroorloofd wordt door den tegenstand van den bodem."

Rechte lijn als oervorm.

Tot de schrijvers, die zich de vraag hoe de loop der rivieren geweest zou zijn, zonder het bestaan dezer toevallige hindernissen, wel stellen, behoort o.a. SUPAN (1916). Hij geeft, pag. 517, het volgende antwoord: „Wür-

den sich die Flüsse vom Ursprung bis zur Mündung auf glatten schiefen Ebenen bewegen, so wäre ihr Lauf völlig geradlinig. Aber diese Bedingung wird in der Natur nicht erfüllt. Mannigfache Hindernisse, oft unscheinbarer Art sind vorhanden, und da das fliessende Wasser stets den tiefsten Punkt aufsucht, so wird es häufig von seinem geraden Lauf abgelenkt und gezwungen, sich in schlangenartigen Windungen (Serpentinen oder Mäander ....) zu bewegen. Diese sind um so zahlreicher je geringer das Gefälle ist."

Dezelfde meening toegedaan zijn I. C. RUSSELL en J. FERGUSSON, pag. 322, „... if we could in like manner abstract all the natural conditions of surface or of soil, it (nl een rivier) would flow continuously in a straight line; but any obstruction ...." AHLMANN schrijft, pag. 49: „Das Wasser hat bei seinem Herabfliessen nach dem Meere das Streben, einen so geraden und gleichmässigen Flusslauf wie möglich zu bilden, weil es in einem solchen sein Ziel am schnellsten und leichtesten erreicht. Derselbe soll gerade sein, weil dies der kürzeste Weg zwischen zwei Orten ist, gleichmässig, d.h. mit konformen und mit dem Wasservolumen übereinstimmenden Quersektionen versehen, weil das Vorwärtsfliessen auf diese Weise am regelmässigsten und schnellsten vor sich geht." AHLMANN begaat hier de fout — waarin ook SUPAN, FERGUSSON, I. C. RUSSELL enz. vervallen zijn — vast te willen stellen welke wijze van voortbeweging voor water het natuurlijkste is, niet op grond van waarnemingen of hydraulica, maar zuiver geometrisch: linea recta brevissima, ergo .... Bij experimenten over de vorming van meanders is men eveneens veelvuldig uitgegaan van een recht kanaal als van den normalen loop.

Indien inderdaad het meanderen eener rivier het gevolg was van toevallige stoornissen en de rivier uit zich zelf eene rechte lijn zou volgen, dan zou volgens het principe: cessante causa cessit effectus, eene meanderende rivier een tracé moeten vertoonen als Fig. 30, waarin dus na elke stoornis geleidelijk de rechte loop weer wordt hervat. Anders zou men, met verwerping van boven vermeld principe moeten aannemen, dat ééne enkele hindernis in het geheele benedenstrooms gelegen deel der rivier bochten kan veroorzaken van ongeveer gelijke grootte. Nu is — hierover is men het vrijwel algemeen eens — de lengte van de kromtestraal der meanders afhankelijk van waterhoeveelheid, resp. breedte der rivieren, waarin zij voorkomen. Hierdoor rijzen de vragen: zijn de storingen steeds alle even groot, of is anders de afmeting der bochten onafhankelijk van de grootte der storingen; waarom doen de hindernissen zich telkens weer na gelijke afstanden voor; en waarom zijn deze afstanden blijkbaar functies van de grootte der rivier?

Kunstmatig rechtgelegde rivierloopen.

Naarmate men door waarnemingen, experimenten en wiskundige analyse een grondiger kennis verkregen heeft van de beweging van stroomend water

is men omtrent het ontstaan der meanders tot het inzicht gekomen, dat de oorzaak te zoeken is in de wijze, waarop stroomende vloeistoffen (en ook gassen) zich nu eenmaal bewegen moeten. Men heeft b.v. ingezien, dat beweging in een recht kanaal van regelmatige en gelijkblijvende doorsnede voor een waterloop slechts natuurlijk zou zijn bij laminaire beweging. De beweging van het water in onze beken en rivieren is echter nooit laminair, doch steeds turbulent, hetzij stroomend (rivieren), hetzij schietend (bergstroomen).

Zeer instructief is in dit verband een foto (zie MINNAERT, plaat V) ontleend aan VAUGHAN CORNISH, Waves of the Sea, pag. 303. Men ziet hierop een recht, ruim 7% hellend kanaal. Het ca. 7 cm diepe water stroomt n i e t „zoo regelmatig mogelijk", maar pulseerend in een reeks opeenvolgende golven. Ik heb zelf in een soortgelijk kanaal een geheel overeenkomstige waterbeweging kunnen waarnemen. Van groot gewicht voor het inzicht in de waterbeweging is behalve het klaarblijkelijke verband tusschen de grootte der rivier en de afmetingen der meanders, ook het feit, dat kunstmatig recht gelegde rivieren trachten weder een bochtigen loop aan te nemen, b.v. Donau, Rijn, Oise, Theiss, Indalsälv, zie DE GEER, pag. 103, en AHLMANN, pag. 45, voorts het gedrag van door sterke oeverbevestigingen in bedwang gehouden stroomen. Een goed voorbeeld hiervan levert de Boven Rijn tusschen Bazel en Lauterburg, een afstand van rond 200 km. Dit gekanaliseerde gedeelte bestaat uit rechte stukken, die door flauwe krommingen verbonden worden. De Rijn werpt zich nu beurtelings tegen den linker en rechter oever en spoelt daar diepe kolken uit, terwijl aan de overzijde grintbanken gevormd worden. De stroomdraad zwaait daarbij telkens van een linker kolk via het midden der rivier, waar de diepte geringer blijft, naar een rechter kolk, enz. enz. Dit geheele complex van kolken en banken schuift geleidelijk stroomafwaarts, waarbij de kolken en banken steeds aan den zelfden oever blijven grenzen en in de middenstrook der rivier slechts eene matige diepte voorkomt. De Rijn vormt hier dus in zijn bedding verticale golven en tracht deze ook in horizontale richting te vormen, doch slaagt daarin slechts gedeeltelijk ten gevolge van de sterkte der oeverbevestigingen.

De onderlinge afstand der banken blijft bij deze verschuivingen constant, zoolang de waterstand niet verandert. Bij toenemende stroomsterkte hebben de banken (en ook de kolken) de neiging korter te worden en dichter opeen te schuiven; bij afnemende stroomsterkte worden zij langer en schuiven uiteen. Het verdere over deze interessante zaak leze men na bij JASMUND (Gewässerkunde, pag. 349 e.v. met talrijke afbeeldingen), bij AHLMANN (pag. 33 e.v. en zijn Fig. 4 — door mij overgenomen in mijn Fig. 36 — en plaat 1), bij GUILLON, Études sur la Loire de la Maine à Nantes, atlas, of bij ROGER DION, pag. 219 e.v. met illustraties. Soortgelijke banksystemen zijn waargenomen in gedeelten van Waal, Merwede, Donau, Loire, Elbe, Oder, Drau, e.a.

Rivieren in nauwe dalen.

Groote overeenkomst met deze door den mensch kunstmatig in hunne ontwikkeling ingeëngde rivieren vertoont de Klarälv in Midden Zweden. Deze stroomt in een eng, vrijwel recht, tektonisch dal van ongeveer gelijk blijvende breedte, welks wanden bestaan uit resistente morainen of uit rots. De bodem der dalvlakte wordt gevormd door fijnkorrelige laatglaciale sedimenten. Ook hier werpt de rivier zich met kracht tegen de dalwanden en schuift met de kronkelwaarden samen stroomafwaarts. Voor meer bijzonderheden verwijs ik naar de uiterst interessante studie van DE GEER. Interessant is in dit verband ook de loop van den Missouri in de buurt van Prairie du Chien, Waukon Sheet, Iowa-Wisconsin, afgebeeld door SALISBURY and ATWOOD, Pl. LII. De rivier volgt telkens ongeveer een tiental km den wand van het ongeveer 3 km breede dal en werpt zich dan weer tegen den anderen dalwand. Het niet door den hoofdstroom ingenomen deel der dalvlakte is een netwerk van kleine waterloopen en meertjes. Een soortgelijk beeld vertoonen ook de Mississippi bij Bellevue, Folio 200, Galena-Elizabeth, Illinois-Iowa, en de Missouri bij Leavenworth, Folio 206, Leavenworth-Smithville, Missouri-Kansas, van de Geologic Atlas U.S.A.

Invloed van niveau verschillen.

R. J. RUSSELL (1939, pag. 1202) is blijkbaar van oordeel, dat een aanzienlijk niveau verschil bij hoog en laag water grooten invloed uitoefent op de ontwikkeling van meanders. Helaas laat hij zich niet duidelijk uit over het waardoor en hoe.

MARINELLI ziet blijkbaar in de afwisselende opeenhoopingen van puin gedurende de afwisselende stadiën van laag en hoog water de eerste aanleiding tot de vorming van bochten en daardoor tot het in werking treden der middelpuntvliedende kracht.

Seiche-theorie van EXNER.

Voor ik verder ga, behandel ik hier eerst eene origineele poging de meandervorming te verklaren als seiche-faenomeen. Deze is afkomstig van EXNER (1919). Hij wijst er op, dat: „Eine Kugel, die in einer flachgeneigten Rinne von halbkugeligen Querschnitt abwärts rollt, folgt nicht genau eine gerade Linie im tiefsten Teil, sondern läuft abwechselnd an eine der Seiten etwas hinauf. Sie pendelt unter dem herabrollen hin und her." ... „Die Distanz zweier Punckte grösster Elongation längs der Mittellinie der Rinne hängt offenbar von der Schwingungsdauer der Kugel und der Geschwindigkeit des Abrollens ab." ... „Wir wollen somit die Bewegungen des Wassers in den Windungen nach rechts und links von der mittleren Bewegungsrichtung als stehende schwingungen auffassen, die der mittleren Bewegung auf geneigter

Fläche überlagert sind, und prüfen, ob diese Vorstellung mit den Tatsachen im Einklang steht." Am concaven Ufer stehen, wie bei einer Seiche, die Wasserteilchen höher. Sie schwingen nun von A hinüber nach B, und nun nicht wieder nach A zurück, sondern weiter nach C, u.s.w. u.s.w. Die Zeit, Ts, der Seiche-bewegung AC ist gleich der Zeit, Tw, der Strömung von AC flussabwärts. Es sei die Geschwindigkeit des Wassers in der Richtung des mittleren Gefälles (stromab) U, so wird der Abstand AC = Tw. U, die Wellenlänge des Meanders. Die Schwingungsdauer quer zum Flusse lässt sich aus der Formel für die Seiches berechnen. Die Breite des Troges ist aber nicht gleich der Breite des Flusses, sondern von A nach B, gemessen senkrecht zum mittleren Gefälle, die Breite, mb, des Mäandergürtels. Die Flüsse sind seicht in Verhältniss zu ihrer Breite, b, und noch mehr in Verhältniss zur Breite des Mäandergürtels. Man soll also die Seicheformel für seichten Trog brauchen: $Ts = \frac{2\,mb}{\sqrt{gh}}$ worin h = die Wassertiefe und g = die Schwerebeschleunigung. Aus $Ts = Tw$ findet man: $U = \frac{AC}{2b}\sqrt{g.h}$ worin U die Wassergeschwindigkeit in der T a l r i c h t u n g, nicht entlang den Flusswindungen ist. „Es sei gleich hier vorausgeschickt, dass die beobachteten Geschwindigkeiten U stets kleiner ausfielen als die berechneten, dass aber trotzdem die hier dargelegte Theorie im wesentlichen brauchbar scheint. Für jene Abweichungen folgt unten eine Erklärung."

Ik heb deze hypothese vermeld, daar zij de vorming van meanders tracht af te leiden uit eene oscillatie, welke samenhangt met de natuur der waterbeweging en de oplossing dus in de juiste richting zoekt. Er doet zich echter deze moeilijkheid voor: in eene seiche slingeren de waterdeeltjes heen en weer in rechte banen, die beneden in het water evenwijdig zijn aan den bodem en bovenin aan de oppervlakte. In den extremen stand heerscht er rust. In Fig. 43 moesten dus de waterdeeltjes zich tusschen P en Q met a f n e m e n d e snelheid naar den linker (buiten-) oever bewegen. Als zij Q passeeren moest deze zijdelingsche strooming tot stilstand zijn gekomen en tusschen Q en R moesten de waterdeeltjes zich van den linker (buiten-) oever naar den rechter (binnen-) oever bewegen. Dit is echter geheel in strijd met de waarneming. Verdere moeilijkheden ontstaan in de volgende gevallen: Indien een rivier achtereenvolgens twee bochten maakt, zooals A-A^1 en B-B^1 in Fig. 35. Er is dan een hoogstand bij A^1 aan den linkeroever. Daarop moet dus een hoogstand rechts volgen. Deze moet dan in het been A-B liggen anders kan bij B^1 geen hoogstand links zijn. Moeilijkheden doen zich ook voor, indien de regelmatige serie met beenen van gelijke lengte onderbroken wordt door een extra lang of extra kort been, vgl. Fig. 41. De eerst volgende hoogstand komt dan niet in de volgende bocht terecht, maar of te vroeg of te laat. De aanname, dat het lange been dan precies zoo diep zou zijn, en het korte zoo ondiep, dat de versnelling respectieve vertraging van de seiche voortplanting

de hoogstanden toch in de bochten zou doen plaats vinden, klinkt niet bepaald overtuigend!!

Ik ga niet verder op deze hypothese in, daar EXNER zelf in zijne schoone studie van 1928 de m.i. juiste verklaring der meandervorming gegeven heeft.

Verklaringen baseerend op de theorie van HELMHOLTZ.

Nadat VON HELMHOLTZ (1888, 1889, 1890) bewezen had, dat bij het zich over elkaar bewegen van vloeibare media golven moeten ontstaan, hebben verschillende onderzoekers deze zienswijze toegepast op de vorming van ripplemarks en duinen, en ten slotte ook op die van meanders, enz. Zoo zet AXEL HAMBERG deze zaak aldus uiteen (referaat bij DE GEER, pag. 100, vertaling van mij): „Door de beweging der watermassa's van een rivier tusschen de zandhellingen der oevers, ontstaat wrijving, die de neiging heeft zich om te zetten in golfvorming. Deze kan echter niet onmiddellijk tot stand komen, daar het zand een al te onbeweeglijk medium is. In plaats van golven ontstaat er eene ongelijke verdeeling van den druk van het water tegen de oevers. Op bepaalde punten wordt de druk verhoogd en daartusschenin liggen knooppunten met verminderde inwerking. De afstand tusschen deze punten is ongeveer dezelfde bij rivieren van overeenkomstige dwarsdoorsnede, en richt zich in hoofdzaak naar den toestand bij hoogwater."

„De erosie hangt af van de drukverschillen en maakt zich spoedig merkbaar als serpentine vorming. De meanders moeten dus des te duidelijker zijn naar mate het materiaal van de rivierbedding fijner en gelijkmatiger is en zich gemakkelijker laat vormen. Aanleidingen tot bochten moeten volgens deze theorie met korte tusschenafstanden langs beide oevers van alle stroomen voorkomen. De vorming van serpentinen moet eindelijk het intensiefste daar plaats vinden, waar de rivier het grootste percentage van haar energie in wrijving omzet, hetgeen volgens GILBERT (1880) daar geschiedt, waar het verval het geringste is, d.w.z. op horizontale vlakten. Juist deze toestand is bijzonder typeerend voor het meerendeel van, misschien zelfs voor alle rivierloopen met serpentinen."

Men vergelijke deze opvatting van GILBERT met de waarnemingen van VAUGHAN CORNISH (zie MINNAERT, Plaat V en pag. 145) die ik naar aanleiding der „Kunstmatig rechtgelegde rivieren" besprak. Daar treden sterke pulsaties op door de groote bodemwrijving, doch het verval en de snelheid zijn geenszins gering.

EXNER (1928) knoopt aan zijne beschouwingen over het ontstaan der duinen door soortgelijke golvingen ook eene uiteenzetting vast over het ontstaan van meanders, enz. Wie eene duidelijke, beknopte verklaring wenscht, die aan de wiskundige kennis der lezers geen al te hooge eischen stelt, vindt hier, wat hij zoekt.

Voor een verder overzicht van de verschillende theorieën noemt HOL (1939) pag. 164, H. KAUFMANN, Rythmische Phänomene der Erdoberfläche, 1929, en O. MAULL, Geomorphologie (Enzyklopädie der Erdkunde, 1938).

AAN WELKE VOORWAARDEN MOET VOOR DE VORMING VAN MEANDERS WORDEN VOLDAAN?

Recapitulatie der eigenschappen van typische meanders.

Voor wij verder gaan met onze beschouwingen over meanders, wil ik eerst nog eens recapituleeren, welke eigenschappen typisch ontwikkelde, zuivere meanders vertoonen: de kromtestraal neemt van de beenen regelmatig af en daarna weer toe. Het dwarsprofiel is in de rechte panden symmetrisch, hetzij met gelijk blijvende diepte, hetzij met de grootste diepte in het midden. In de bochten wordt het geleidelijk driehoekig, waarbij de grootste diepte meer en meer den buitenoever nadert. De diepte bereikt haar maximum ongeveer twee rivierbreedten benedenwaarts van het punt der sterkste kromming; ook het begin van het ondiepere gedeelte in de beenen is ongeveer dit zelfde bedrag stroomafwaarts verschoven. Het rivierbed is, vooral in de bochten, vrij van banken en ondiepten. Het sediment afkomstig van de aansnijding der buitenoevers wordt naarmate het in de rivier terecht komt, dadelijk opgenomen en vervoerd, deels naar eene binnenbocht en daar afgezet, deels verder stroomafwaarts. De watermassa vormt én in de rechte panden én in de bochten één geheel met één homogeen systeem van snelste stroomdraad, daarbij behoorende turbulentie zones, enz. Het is gunstig voor de vorming van meanders, indien de watermassa aanzienlijk is, daar hierdoor de invloed van kleine onregelmatigheden der bedding en van den tegenstand, dien de wrijving over den bodem en de oevers biedt, relatief in beteekenis afneemt, zoodat centrifugaalkracht enz. zich duidelijk kunnen doen gelden. Dit is m.i de verklaring van het feit, dat, zooals IMAMURA vermeldt, bij een zeer gering verhang kleine rivieren geen mooie meanders kunnen vormen, in tegenstelling met groote stroomen.

In welk gedeelte van den stroomloop komen meanders voor?

Ik beschouw nu achtereenvolgens de verschillende deelen eener rivier, beginnende met den bovenloop om te zien of er al dan niet meanders voorkomen en te trachten eene verklaring te vinden voor het eventueele ontbreken.

De bovenloop der rivieren ligt indien zij typisch ontwikkeld is, gewoonlijk in het hooggebergte of ten minste in een middengebergte. Het verhang der rivier is groot. Het dal heeft den vorm van een V of U. De rivieroevers bestaan voor een vaak aanzienlijk deel uit vaste rots. Waar dit niet het geval is, bestaan zij uit groote blokken, afkomstig van de dalwanden.

Deze blokken zijn deels zoo zwaar, dat de rivier ze ook bij hoogwater niet verplaatsen kan, deels liggen zij tegen elkaar of met behulp van kleinere steenen zoo vast geklemd, dat de rivier ze evenmin verwijderen kan. Gelukt het de rivier na langen tijd enkele dezer blokken los te werken, zoo rollen zij een klein stuk stroomafwaarts en zetten zich opnieuw stevig vast. Dit geheele complex van blokken heeft dus niet het karakter van sediment-last van den stroom, doch eerder van onregelmatige uitwassen van den oever, die bij elke verplaatsing opnieuw toevallige, niet van de stroomingswetten afhankelijke, onregelmatigheden vormen. Het water kan zich niet in een enkelen stroom vereenigen, doch moet zich oplossen in een aantal de blokken omstroomende armen; het vormt watervallen, stroomversnellingen en kommen. Van een homogenen compacten waterstroom is geen sprake. De toevallige ligging der rotsblokken beheerscht de situatie, en verstoort voortdurend het systeem van rhythmisch golvende wervels, waarnaar de waterbeweging streeft. Het spreekt van zelf, dat zich hier geen meanders kunnen vormen.

In den middenloop zijn eventueel ingezonken meanders mogelijk, zooals later besproken zal worden. Vele rivieren stroomen echter in hun middenloop in een vrij breed dal, waarvan de bodem bedekt is met dikke lagen grof grint. Indien nu de rivier hier bochten vormt, zoo kunnen deze zich toch niet tot meanders ontwikkelen. Het grove grint, dat den oever opbouwt, heeft n.l. slechts geringe standvastheid. Het fijnere materiaal wordt door den stroom gemakkelijk los- en weggespoeld en de uit grof materiaal bestaande rest stort ineen, valt in de rivier en vult de diepere geul aan den voet van den oever. Alleen het relatief fijnere grint wordt verwijderd, het grove blijft liggen en dwingt het water zijdelings uit te wijken, hier van den oever af, zoodat de bocht verlaten wordt, daar er tegen aan, zoodat meer en meer materiaal neer gebroken wordt, dat niet vervoerd kan worden. Het dwarsprofiel der rivier blijft niet langer driehoekig. De rivier wordt breeder doch ondieper, de homogeniteit van den stroom gaat verloren, want: (LEIGHLY, 1934) „... it appears fairly certain that the behavior of such (breede en ondiepe) streams — the formation of multiple channels and mid-channel bars, for example — is an expression of the development of more or less parallel bands of water, in each of which there is a thread constituting a local maximum of velocity." Er ontstaan dus grintbanken en eilanden. De rivier kan geen meanders vormen, doch verwildert. Dit is niet het gevolg van te groote snelheid, doch wordt veroorzaakt door de eigenschappen van het oevermateriaal, de te geringe standvastheid. Bij SUPAN (1916) pag. 517, lezen wij: „Nach einem Satz von LÓCZY, den CHOLNOKY an der Theiss bestätigt fand, ist es von wesentlichem Einfluss, ob die Flussgeschiebe schwerer oder leichter beweglich sind, als das Material der Ufer; im ersteren Fall schafft der Fluss Sandbänke, im zweiten Mäander". Deze waarneming bevestigt den invloed van het oevermateriaal op de vorming van meanders.

Ook tamelijk zuiver zand is voor de vorming van meanders ongeschikt. De rivier breekt ook hier de oevers zoo snel af, dat zij het vele zand niet meer baas kan worden, zij verwildert dus. Een voorbeeld van een dergelijken toestand vertoont de South Platte River in Nebraska. Zie SALISBURY and ATWOOD, Pl. L.

De b e n e d e n l o o p veler rivieren ligt in eene alluviale vlakte. De bodem bestaat hier uit fijne sedimenten: vooral leemig tamelijk fijn zand en voorts zand en fijn grint.

HJULSTRÖM (1935) geeft in zijn „Tabel 7" een interessant overzicht, samengesteld uit varia onderzoekingen, van de „erosion velocity" voor materiaal van verschillende korrelgrootte, waaruit ik hieronder een deel weergeef.

characteristics of the material	size of particles, mm.	erosion velocity, cm/sec.
stiff clay soil	0.001 5	137
stiff clay (very colloidal)	0.001 5	130
alluvial silts, when colloidal	0.005	130
„ „ „ not „	0.005	76
feiner Lehm und Schlamm	0.05 - 0.1	26
very light pure sand, of quicksand character	0.13	27
	0.38	24
Schlamm, grob	0.40	15.0
feiner Sand	0.45	15.2
	0.51	28
sand, fein	0.70	20
	0.79	34.1
	1.71	34.4
coarse sand	2	50
Kiesel	12	120 - 125
	14	125 - 150
	16	130 - 180
	70	266 - 280

HJULSTRÖM verstaat hier onder „erosion velocity" die snelheid, waarbij „a uniform material moves over a bedding of loose material of the same grain size". Dit is eene geringere snelheid, dan die waarbij deeltjes uit een laag kleïig zand los gespoeld worden. LEIGHLY (1932) pag. 21 verklaart deze eigenschap als volgt: „Steep transverse slopes in a stream channel can obviously exist only when composed of material whose particles can resist the tendency of the turbulent water to dislodge them. The resistance in unconsolidated material is a direct function of the mass of individual particles

and an inverse function of the size of the interstices among them. In fine material the interstices are so small that movement (nl. van indringend water) among the particles is laminar practically from the wetted surface of the bed inward. Hence the familiar stability of clay banks of streams." Oevers uit dergelijk materiaal, kleïig zand met enkele lagen zand en fijn grint worden meestal slechts geleidelijk door den stroom teruggesneden en als er grootere massa's tegelijk losbreken, en in het water vallen, dan desintegreeren deze weldra. Het fijne materiaal kan gemakkelijk door den stroom weggevoerd worden en naar den overkant der rivier overgebracht worden. De diepe geul langs den voet van den buitenoever wordt steeds door de rivier schoon gehouden. Het driehoekige profiel blijft dus bewaard. Het van stroomopwaarts door de rivier aangevoerde sediment is eveneens fijn en wordt grootendeels in suspensie vervoerd. Er kunnen zich zoodoende geen banken of eilanden vormen, die de ontwikkeling der meanders zouden kunnen storen. Dat de waterhoeveelheid der rivieren in hun benedenloop meestal aanzienlijk is en gewoonlijk minder sterk fluctueert, dan in midden- en bovenloop, schijnt mij wel een gunstige omstandigheid te zijn, doch niet eene noodzakelijke voorwaarde. Het feit, dat meanders vooral te zoeken zijn in den benedenloop der rivieren, vindt dus zijne verklaring in de eigenschappen van de oevers in dit gedeelte van den loop.

Zij- en diepteerosie.

Wat het verband tusschen zij- en diepteerosie betreft, sluit ik mij aan bij de hieronder geciteerde opvatting van HETTNER, DAVIS, AHLMANN en JOHNSON. HETTNER schrijft, pag. 375: „Die Ausgestaltung der Erosionsrinnen beruht auf einer Verbindung der seitlichen Erosion und der Erosion in die Tiefe. Man ist allerdings oft der Ansicht, dass ein zeitlicher Wechsel zwischen diesen beiden Vorgängen stattfinde, dass der Fluss nach der Seite nur arbeite, wenn er die Arbeit in die Tiefe noch nicht beginnen könne oder schon zum Abschluss gebracht habe. Diese Auffassung halte ich für irrig. Die Ursachen der seitlichen Erosion sind immer vorhanden, möge der Fluss einschneiden oder nicht; sie findet daher immer statt und nimmt nur in dem einen und in dem anderen Falle verschiedene Formen an." en op pag. 369: „. . . . werden die Krümmungen immer weiter, und zwar, worauf namentlich W. M. DAVIS — blijkbaar (1899) — hingewiesen hat, nicht einfach zur Seite, sondern, wegen der Lage des Stromstriches, schräg nach abwärts ausgezogen . . ." Met HETTNER overeenstemmend schrijft AHLMANN, pag. 67: „Schon oben habe ich darauf aufmerksam gemacht, dass diese beiden (zijdelingsche en diepteerosie) im allgemeinen gleichzeitig arbeiten, und dass die eine oder andere nicht ausschliesslich einem Stadium des fluvialen Zyklus angehört oder ein solches charakterisiert." Ook DOUGLAS JOHNSON wijst hier met nadruk op, (1932) pag. 484 en 485: „The contrast in conditions just sketched has been

responsible for a widespread misconception,. frequently encountered in the literature in some such form as the following: „The stream now ceases to cut down, and begins to cut laterally." While the first part of the quoted statement may be true temporarily, it is not true as a generality, and hence is misleading. But the error involved in the phrase „and begins to cut laterally" implies a more serious and fundamental misconception of stream processes. Lateral cutting is at a maximum during the early stages of stream development, when the current is most vigorous and provided with the most effective cutting tools. Normally the lateral migration of a stream will always exceed its vertical incision, in youth as well as in maturity and old age. This will be true, not only for the outsides of particular bends, but for the stream course as a whole, due to the fact that the bends, like meanders, sweep downstream. Exceptional chasms, where for special reasons and for a short time vertical cutting undoubtedly has exceeded lateral cutting, should not blind us to the more usual conditions. Neither should the fact that the stream in Figure 1 has a narrow, steep-sided valley cause us to lose sight of the fact that in sinking its course from A to A^1 it has cut laterally twice as great a distance as it has cut vertically; and has cut laterally much more than stream B, Figure 2, which possesses an open valley floor. It is the proportion of vertical to lateral cutting which undergoes such a far-reaching change when the stream reaches equilibrium. Lateral cutting is henceforth slightly less effective than formerly; but vertical cutting is enormously reduced. This is why the effect of lateral cutting now first becomes prominent in the production of a relatively flat valley floor. The beginnings of such a floor, with its floodpain cover, afford evidence that the profile of equilibrium has at last been established."

Onregelmatigheid der meanderbochten.

Eene rivier met vereffend verhang, stroomend in eene alluviale vlakte van tamelijk gelijkmatige samenstelling, streeft er naar, een complex te vormen van even groote, gelijkmatige kronkels. De meandergordel schuift wel voortdurend stroomafwaarts, doch in zijn geheel. De regelmaat wordt daardoor dus niet gestoord. Vroeger of later breekt echter hier of daar een hals door en er vormt zich een hoefijzermeer. Het plaatselijk verhoogde verhang wordt geleidelijk weer vereffend en de middelpuntvliedende kracht van het water, dat aan den doorbroken hals een bocht van zeer geringen straal moet volgen, streeft er naar deze bocht weer eene grootte te geven in overeenstemming met de kracht van den stroom. Voor het evenwicht echter geheel hersteld is, breekt ergens anders een hals door, enz. Onregelmatigheid der kronkels is dan ook regel, gelijkmatigheid uitzondering. De onregelmatige bochten van ingezonken meanders, waar doorbraak van een hals zeldzaam is, moeten wel

daaraan toegeschreven worden, dat het gesteente zelden zoo homogeen is, als losse sedimenten in eene alluviale vlakte.

Als voorbeeld van zeer regelmatige kronkels heb ik aan de bij dit opstel behoorende afbeeldingen ook een kaartje toegevoegd van de Kendel, een zijtak der Niers, nabij de Nederlandsch-Duitsche grens. Het laagterras van den Rijn treedt hier in verbinding met dat der Maas. Tusschen den echten aggradatietijd, toen het laagterras bedekt was met een net van verwilderde waterloopen, en den insnijdingstijd in het Oud Holoceen ligt een overgang waarin het laagterras bedekt is geweest met een groot aantal meanderende armen. Een zeer fraai voorbeeld is de Kendel. Dat hare krommingen zoo regelmatig zijn, ligt wel hierin, dat deze niet al te lang in gebruik zijn gebleven. Toen het gevaar voor doorbreken der halzen naderde (men ziet op Fig. 14 slechts één aanduiding van eene beginnende doorbraak), verloor de Kendel haren toevoer van Rijnwater ten gevolge van de voortschrijdende concentratie, die gepaard gaat met diepte-erosie. Zoo zijn de Kendel-kronkels fossiel geworden en de schoone meanderbogen zijn bewaard gebleven tegen latere omvorming. Het huidige beekje is een verarmde rivier, die alleen de naaste omgeving draineert.

Het schijnt mij overigens toe, dat niet alle verlegging van meanderende stroomen haren oorsprong vindt in het door breken van een hals. Boven is er op gewezen, dat de onderlinge afstand der grintbanken in kunstmatig recht (of nagenoeg recht met groote flauwe krommingen) gelegde rivieren eene functie is van de waterhoeveelheid. Bij verandering van waterstand schuiven de banken verder uiteen of naderen elkaar. De afstand tusschen de banken, die aequivalent is met het meander-interval, of, wat op hetzelfde neerkomt, de afstand van kruising tot kruising, d.w.z. de lengte der bekkens (de biefs van FARGUE) wordt grooter of kleiner. Indien dus de waterstand eener rivier sterk toeneemt, dan zullen bed en stroom niet aan elkaar aangepast zijn. Het resultaat kan dan zijn, dat de stroom het bed niet kan blijven volgen, maar als het ware derailleert. De eenmaal uit de oude bedding getreden rivier zoekt zich nu een nieuwe baan, die meer of minder sterk van den vroegeren loop verschillen zal.

Ingezonken meanders.

Daar vaak de nadruk gelegd wordt op het geringe verhang, dat den benedenloop der rivieren kenmerkt en hierin de hoofdoorzaak, de conditio sine qua non, gezien wordt, willen wij eens onderzoeken, wat er gebeuren zou, indien eene door fijn kleiïg-zandige sedimenten stroomende rivier een groot verhang verkreeg. Ik neem aan, dat de dikte der alluviale laag zoo groot is, dat de ondergrond, rots of grove sedimenten, niet aangesneden wordt. Ten gevolge van het sterke verhang zal nu naast eene krachtige zij-erosie ook een krachtige diepte-erosie beginnen. In den regel zal in de natuur eene derge-

lijke opheffing zoo langzaam geschieden, dat de denudatie de gelegenheid krijgt de fijne, hooger en hooger boven de erosiebasis stijgende sedimenten weg te ruimen. De dalvlakte verheft zich dan nooit hoog boven de rivier en de toestand blijft praktisch onveranderd. Ik sluit nu dit geval uit en neem aan, dat de sedimenten niet door regen enz. weggeruimd worden. De stroom komt nu in een canyon te liggen met hooge steile wanden. Daar dit losse materiaal niet voldoende standvastheid bezit, om lang in hooge wanden te blijven staan, en dat nog des te minder, daar deze door de zijdelingsche erosie ondermijnd worden, kalven de oevers op groote schaal af en storten in de rivier. Deze zal nu een tijd lang verwilderen, tot deze overmaat van last verwijderd is en dan in het uitgeruimde dal weer vrije meanders vormen.

Gesteld echter het volgende geval: Eene rivier komt bij het te voorschijn komen uit het gebergte op eene vlakte, die eene vrij groote helling bezit, zoodat het verhang der rivier aanzienlijk wordt. Deze vlakte bestaat uit fijne „meander sedimenten", die bovendien de eigenschap bezitten van g r o o t e s t a n d v a s t h e i d. De rivier zal zich nu in deze vlakte insnijden, en daar de diepteerosie van zijerosie vergezeld gaat, zal zij meanders vormen, die geleidelijk over zullen gaan in ingezonken meanders.

Aan de eischen, die wij hierboven aan het „meander sediment" stelden, wordt vrijwel voldaan door een rotsgesteente, waarin geen gangen van eruptiefgesteente of kwarts voorkomen, dat homogeen is en bovendien — een zeer belangrijke eigenschap — bij het verweeren in niet al te groote fragmenten uiteenvalt. Bij vast gesteente, vooral indien dit geplooid is, zal aan de boven gestelde eischen van homogeniteit en regelmatige verbrokkeling gewoonlijk in geringere mate voldaan worden, dan bij alluviale sedimenten. Het is dus te verwachten, dat de regelmatigheid der kronkels bij ingezonken meanders geringer zal zijn, dan bij vrije.

Twee verdere condities, die vervuld moeten worden, zijn: het van bovenstrooms komende of door zijrivieren geleverde grint mag niet zoo grof zijn, of in zoo groote hoeveelheid aangevoerd worden, dat de rivier de macht erover verliest en tot uitwijken gedwongen wordt. De andere voorwaarde heeft betrekking op het relief der doorstroomde streek. Dit moet gering zijn, dus ongeveer peneplain karacter vertoonen, want indien de dalwanden aan weerszijden zeer hoog opstijgen, ontstaat dezelfde toestand als in den reeds besproken bovenloop.

Natuurlijk ontken ik geenszins, dat de bekende verklaring met behulp van een ouderen cyclus voor vele ingezonken meanders de juiste kan zijn. Het schijnt mij echter, dat men verkeerd doet in het samen voorkomen van meanders en aanzienlijk verhang eene tegenspraak te zien en dus het bestaan van meandres encaissés te beschouwen als een bewijs, dat er noodzakelijkerwijze zulk een oudere cyclus moet bestaan hebben, hetgeen trouwens reeds voor jaren door DAVIS (1913) pag. 15 duidelijk uitgesproken is:

„It does not, however, seem to be necessary always to assume that meandering valleys require two cycles of erosion for their development; for a meandering course may be assumed during the gradual incision of a first cycle valley."

Zie ook HOL (1939) pag. 165: „... men mag niet zonder meer alle dalmeanders beschouwen als de door insnijding vastgelegde geërfde vrije meanders der thans opgeheven vlakte (schiervlakte, kustvlakte, enz.)."

Uitspraken als: „Da der Serpentin- und Mäanderlauf dem Alterstadium angehört und darum ein Resultat der ganzen vorausgegangenen Entwicklung ist..." voeren op een dwaalspoor. R. J. RUSSELL (1936) schrijft, pag. 123: „Fallacies in the conventional argument are patent but ignored." en wijst er dan op, dat de alluviale vlakten in den onderloop der rivieren tot de jongste deelen der dalen behooren, gevormd lang na het dal van de „jonge" rivier in het gebergte.

Ook BLACHE komt op grond van eene uitvoerige terreinstudie aan de Moezel tot de conclusie, dat zich in vast gesteente ook meanders kunnen vormen. Hij schrijft, pag. 211: „... que la liaison qu'on envisage habituellement entre les méandres libres et les méandres encaissés ne représente qu'une hypothèse, destinée à résoudre l'énigme des méandres encaissés. Mais on n'a jamais montré le passage d'un méandre libre à un méandre encaissé autrement que comme une possibilité. Ici au contraire on assiste à la naissance d'un méandre encaissé; et on montre qu'il est affranchi de toute parenté avec un méandre libre." Hij verwerpt dan ook, pag. 202, de door R. MUSSET in 1926 geformuleerde stelling, dat: „Il n'est pas douteux que les méandres encaissés dérivent de méandres divagants primitifs... L'accord est à peu près fait sur ce point." Ook DE MARTONNE is er, pag. 438, niet gerust op, dat de officieele verklaring der ingezonken meanders steeds de juiste is.

MARINELLI schrijft over de ingezonken meanders: „... Het is dus evident, dat meanders slechts volledig en in regelmatigen vorm kunnen kronkelen in onsamenhangende, fijne en min of meer homogene gronden, zooals die, welke uit fijne aanslibbingen bestaan. Overigens laat resistente rots de vorming van meanders niet toe, behalve door groote rivieren, terwijl de ongelijkmatigheid van het materiaal de kronkels belet eenigszins regelmatig te worden." Hij vervolgt dan aldus: „Quindi, quando vi siano meandri in regioni collinose e montuose, si tratta di meandri in origine liberamente sviluppati in larghi fondi vallivi ovvero in pianure alluvionali, i quali, per un rapido sollevamento della regione ed un conseguente rapido periodo di erosione in profondità dei corsi d'acqua, risultarono affondati, o, come si suol dire, incastrati." Ik zou dit als volgt willen vertalen: Daarom wanneer er meanders zijn in heuvelachtige en bergachtige streken, handelt het zich om meanders, die oorspronkelijk vrij kronkelden in breede dalvlakten ofwel in

alluviale vlakten, waarin zij, door een snelle opheffing van de streek en eene daarop volgende periode van snelle diepte-erosie der waterloopen, verdiept zijn geworden, of, zooals men gewoon is te zeggen, ingezonken."

MARINELLI schijnt dus alle meanders als twee-cyclisch te beschouwen.

Het probleeem der ingezonken meanders ligt in hoofdzaak echter buiten mijn eigenlijk thema. Ik ga er dus niet verder op in.

SAMENVATTING VAN WAT ER M.I. VOOR HET ONTSTAAN VAN MEANDERS NOODIG IS.

In eene rivier — mits deze niet te zeer belemmerd wordt door het karakter der oevers of door overlading met sediment — bestaat ten gevolge van den aard der waterbeweging steeds de neiging met regelmatige tusschenruimten bochten te vormen. De stroomsnelheid is hierbij niet van principieel belang. Deze bochten groeien uit tot meanders indien de gesteldheid der oevers daartoe geschikt is.

Geschikt voor de vorming van meanders zijn bij matige stroomsnelheid: losse sedimenten van tamelijk geringe korrelgrootte, met een voldoend gehalte aan klei om ze standvast te maken. Bij grootere snelheid: tamelijk homogene rotsen, liefst niet te hard, die bij de verweering uiteenvallen in niet te groote fragmenten, zoodat de stroom deze steeds gemakkelijk wegvoeren kan.

Ongeschikt voor de vorming van meanders zijn rotsoevers van zeer afwisselende resistentie of groote hardheid alsmede de aanwezigheid van groote rotsblokken; verder oevers, die bij de erosie gemakkelijk ineenstorten en dan zeer veel puin tegelijk leveren, of wel zeer grof puin.

VOORGESTELDE DEFINITIE VAN HET BEGRIP MEANDER.

Wij mogen dus m.i. alleen die rivierbochten meanders noemen, waarin de neiging van stroomend water om regelmatige horizontale en verticale golvingen te vormen, die eene functie zijn van verhang en waterhoeveelheid, voldoende duidelijk tot uitdrukking komt. Zoolang het stroomende water nog niet het materiaal beheerscht — cum grano salis opgevat — hebben wij te doen met bochten, maar niet met echte meanders.

Dat DE GEER een onderscheid maakt tusschen serpentinen en meanders, heb ik reeds bij de „samengedrukte meanders" besproken.

De echte tweecyclische ingezonken meanders blijven hierbij natuurlijk buiten beschouwing.

SUMMARY

In the introduction the author states that our mind is not satisfied if we only know the result of a process going on in nature. We want to know the steps by which this result has been reached. Mathematically speaking,

we are not contented with the integral function alone, we also want to know the differential equation by whose solution it was obtained.

Now, as R. J. RUSSELL writes: „Meandering is clearly not a two-dimensional process to be solved inductively on the basis of map, or pattern, evidence." We must therefore also study the hydraulics of rivers.

A short synopsis of the contents is given below.

MOVEMENT OF WATER IN RIVERS. This movement of water in rivers is never laminar, but always turbulent. The author mentions a large eddy, observed by himself, in Strait Lintah (Dutch East Indies), causing transverse movement of the current (see Fig. 34). If the slope is less than about 0.003 6 the water will flow, above this limit the movement becomes shooting. This division is not arbitrary, but is based on the fact that at a steeper slope the velocity of the water itself will exceed the velocity of the swiftest waves traveling on its surface, and at a flatter slope will fall short of it. On this difference depends the behaviour of the stream when meeting an obstacle (boulders on its bottom, etc.). That the line of maximum velocity lies below the surface is not caused by the resistance of the air, but by the internal motion, that continually brings masses of water up to the surface as „boils" and sends them down again. Near the bottom of the river the resistance of friction, w, exceeds the pull, T, exerted by gravity in the direction of flow; at the surface it is reversed. See Fig. 16 and 17. Continually masses of water are forced up by the eddies. Above a certain height above the bottom the pull of gravity will exceed the resistance of friction. The masses of water are accelerated and gain in velocity during their ascent to the surface. From the surface they descend again and for some time — the pull of gravity still exceeding friction — gain in velocity until their mixing with the surrounding water puts a stop to the acceleration. At this level the velocity will be a maximum. In straight reaches according to some authors there is a double spiral motion, turning in opposite directions according to the rising or falling of the waterlevel. Others, f.i. MÖLLER, only speak of a motion like in Fig. 33 and 37. LEIGHLY has a different opinion, see Fig. 18. In bends the waterlevel is raised in the outer side of the bends (Fig. 20). Formulae for the rising are cited. The influence on erosion of this rising and the ensuing changes in slope of the different parts of the bend are explained (see Fig. 19, taken from LEIGHLY). Moreover it is shown, that the stronger erosion of the second half of every bend will cause the whole riverbed to shift downstream. Experiments made by VOGEL and THOMPSON discarding helicoidal movement and measurements by BLUE, HERBERT and LANCEFIELD proving helicoidal movement, are mentioned (see Fig. 32 and 38). The author suggests an explanation for the movement of sediment transversely to the riverbed — though the current, as observed by VOGEL and THOMPSON, is directed downstream — by remar-

king (see Fig. 29), that in adjoining eddies — owing to centrifugal force — the sediment will collect along the circumference. By the mixing of the water the sediment will travel from A to B and from B to C, since B will gain more from A then there goes back, and C will gain more from B then there is returned. Coarser sand and small stones might even by centrifugal force be hurled from one eddy into the other and hence travel transversily even without any transverse movement of the water. Steepness of slope in itself will not, as some authors mean, tend to rectify the course of a river, since centrifugal force forces the water to follow the bends. If however the increased slope causes overloading, braiding will ensue and now the inside arms, having a shorter way, than the outside ones, may collect all the water and a straighter course may be the result.

PROPERTIES OF MEANDERS. The horizontal forms of meanders and the terms used in description are exposed, see Fig. 22. The theory of EXNER about the shifting of the crossings is discussed, see Fig. 21. As an instance of the proportion of bends to the total length the Theiss is mentioned. As to the form of the bends is stated that the circle and straight line are unnatural, the river tending to other curves. According to FARGUE this curve is a „spirale volute" (also called CORNU-spiral or clothoid). In a later publication he mentions a lemniscate. LEIGHLY suggests a logarithmic spiral, also other curves have been advocated. As to vertical form the alternation of deeps in the sharpest part of the bends and of shallows at the crossings is exposed. The „laws of FARGUE" which govern the occurrence of the different horizontal and vertical forms are stated, see Fig. 23-28. It is shown that the down stream shifting of meanders has nothing to do with the so called general slope of the flood-plain. In Fig. 42 the strongest erosion is at B, though the water here runs up-valley. If channels of perfectly equal slope, and hence equal erosion, see Fig. 44, are bend in shapes like Fig. 45 or 46, without change in slope, it is difficult to see why in the sections corresponding in direction with that of the valley, erosion should increase. If a portion of a river, see Fig. 43, is cut out and rotated about a vertical axis, will the erosion show periodic changes, reaching a maximum every time MW corresponds with the valley-slope? Will it have any influence on the erosion between B and C, Fig. 31, if SA is replaced by EA and CN by CW? The true cause has been explained above in connection with Fig. 19.

MEANDERBELT. That the width of the meander belt, mb, is a function of the width of the river itself, b, is generally admitted. See Fig. 1 to 13, taken from the Atlante dei Tipi Geografici, moreover Fig. 14 and 15. As relation of mb/b JEFFERSON gives the proportion 18 : 1, RIPLEY gives a formula (see pag. 254) that works out at about the same value. According to DE GEER intrenched meanders show a higher proportion, viz. about 30 : 1.

Measurements by the writer seem to confirm this higher proportion and show the frequent occurrence of long straight reaches between bends. The explanation might be that entrenched meanders in general will have a relatively steep slope, hence swift stream. The centrifugal force is strong, at floods there is no loss of water flowing over the banks as with rivers on wide plains. Hence concentration of volume, high velocity, hence large radius of curvature. On the other hand, the banks being high and steep, the river is deeper and therefore narrower, hence mb/b greater. The cause of the long straight reaches between bends might be that water striking the river banks at a sharp angle can still wear away loose material, but not rock, therefore concentration of erosion in the part where curvature is strong. Then inhibited meanders, who according to DE GEER should be called „serpentines" in order to distinguish them from the true, free meanders, are mentioned, a beautiful instance being the Klarälv in Sweden. Moreover the method of DE GEER for computing the width of the corresponding free meander belt (viz. 18 times the width of the river, or 2.5 times the meander interval) is discussed. The observation of TOWER that inhibited meanders move quicker downstream than perfectly free ones is explained from the following facts: inhibited meanders occur in narrow valleys, free meanders in wide ones. The slope of narrow valleys will, as a rule, be steeper than that of wide valleys, hence the current of the river swifter. Since the wearing away of the banks and hence the downstream shifting is dependent on the velocity of the current, it is evident that the inhibited meanders of swift streams in narrow valleys will travel at a higher speed than those of free meanders. As to increasing their radius the case is reversed, the inhibited meanders being hindered by the resistance of the valley walls, the free meanders working in soft strata throughout. Again free meanders in sweeping down valley, will remove a narrow strip from the valley wall (see Fig. 39). If however there occurs a break through at h, this process will be interrupted and a spur is left standing at a. Since no break through can happen in inhibited meanders, they sweep down their valley uninteruptedly, and no spurs are left standing (see Fig. 40). The investigation of IMAMURA about the meander belt of small rivers as compared with that of larger ones is mentioned and some explanations are suggested.

CAUSE OF THE FORMATION OF MEANDERS. This cause has been sought in the influence of siderivers, and in the deposition of sediment in the inside of the bends. These views seem to the autor to be erroneous. The theory that overloading will cause meanders is proved to be wrong, since in this case braiding must result. Some textbooks start from already existing bends, or see the cause of meanders in accidental obstructions. In this case meanders ought to show the form of damped oscillations, see Fig. 30. Moreover the wellknown fact, that

the size of meanders depends on the size of the river (see Fig. 1-15), proves that we have not to do with something accidental. The opinion that a straight line in the direction of steepest slope is the natural form for a stream bed, is proved to be erroneous by the discussion of the behaviour of rivers that are conducted through straight artificial channels. The streamline in this case will not remain in the middle of the channel with gradually diminishing velocity to both sides, but it will take on a wavy form. Mostly these waves lie in a horizontal plane, but in steep shallow flumes, they may become vertical, the water running down in gushes. Alternatingly the stream will press against one bank and then against the other. If the banks offer little resistance, soon a series of meanders will be started. If the banks are strongly protected, a pattern of alternating deeps is formed with gravelbanks to their sides. See Fig. 36 taken from AHLMANN. This proves that meandering is a natural tendency inherent in streams. The behaviour of streams in narrow valleys confirms this view. They also try to assume bends suited to the size of the stream. Further RUSSELL's statement that considerable change of level has great influence on the formation of meanders is mentioned. A theory proposed by EXNER in 1919 explaining meandering as a kind of seiche-phenomenon is proved to be wrong. When a river passes through a bend the transverse movement of the surface layers, as it actually occurs, is in contradiction to that demanded by the Seiche-theory. Other difficulties occur if two consecutive bends turn to the same side, see Fig. 35, or if the distance from bend to bend varies, as in Fig. 41. The seiche maximum will then occur either too soon or too late. The true explanation is to be sought in the theory of HELMHOLTZ about the waves and wavelike oscillations set up in fluids (including gases) of unequal density moving one over the other. The formation of meanders, dunes, ripple-marks etc. belong in the same class. A clear exposé of this matter is to be found in an article by EXNER (1928).

Which conditions are necessary for the formation of meanders?

First the properties of typical meanders are recapitulated, viz. the radius of curvature gradually diminishes to a minimum and then increases again, the cross profile in straight reaches is symmetrical, in bends triangular, the greatest depth and the begin of the shallows occur below (shifted about twice the width of the stream) the point of strongest curvature and of the end of the bends. The river bed is, especially in bends, free from sand- and gravelbars or partitions. The water forms one compact mass, with one system of greatest velocity. It is favorable for the formation of meanders, if the total quantity of water is large, since this diminishes the importance of small obstructions and of friction and enables the tendencies

inherent in streaming water to preponderate. Then a survey is made of the upper, middle and lower courses of a river and the opportunity for the formation of meanders in these different reaches is discussed. The upper course of rivers ist mostly situated in mountainous, or at least hilly, country. The river banks consist of rock, offering great resistance to erosion. Moreover big boulders are likely to come down the slopes and fall into the river. Consequently the loose material present in the bed being for a good deal so coarse that the stream cannot move it, it looses the character of load and assumes that of irregular projections of the banks. The result is that the tendency of the water to form regular bends is continually disturbed. The river water can not unite to the regular massive pattern necessary for the formation of meanders, but must divide around big boulders and falls apart into a number of rapids and basins. In this part of the course the resistance of the encountered material dominates over the tendency of streaming water to form regular bends. In the middle course sometimes the formation of meanders is possible (entrenched ones). In most cases however, there is a great amount of coarse gravel present. Banks of coarse gravel usually have little coherence and will cave into the river in so large amount that the current can not hold its bed free from gravel bars and braiding is the result. Sand, when containing only very little clay, will show the same tendency to braiding, f.i. the South Platte River in Nebraska. The lower course of most rivers lies in alluvial plains. The sediments forming the river bed are here relatively fine gravel and sand, and, what is of great importance, these sands and gravels mostly are mixed with clay. The result is that here the banks can easily be eroded, but do not fall into the stream in excessive masses at one moment. The river can keep its bed clean from bars, or nearly so. The writer agrees with the statement made by HETTNER, DAVIS, AHLMANN and JOHNSON that side-erosion is always present, wether accompanied by down cutting or not. Though theoretically we might expect a series of equal and similar curves, observation shows considerable irregularity of the meanders of most rivers. Apart from the effect of unequal hardness of the banks, this will mostly be caused by the formation of cut-offs. To the author this seems not to be the only cause. Only at definite values of water volume, slope, width and depth of the bed and radius of curvature there will be equilibrium between river and bed. Especially at sudden floods the lack of adjustment may cause the river to „derail" and take another course for a shorter or longer distance. Since many writers emphasize the importance of feeble slope for the formation of meanders, it is interesting to consider what would happen, if the slope of a river taking its course through fine loamy sands, were increased considerably. I assume that the layer of fine sediment is of great thickness. Because of the steep slope erosion to the sides and especially in depth will be stimu-

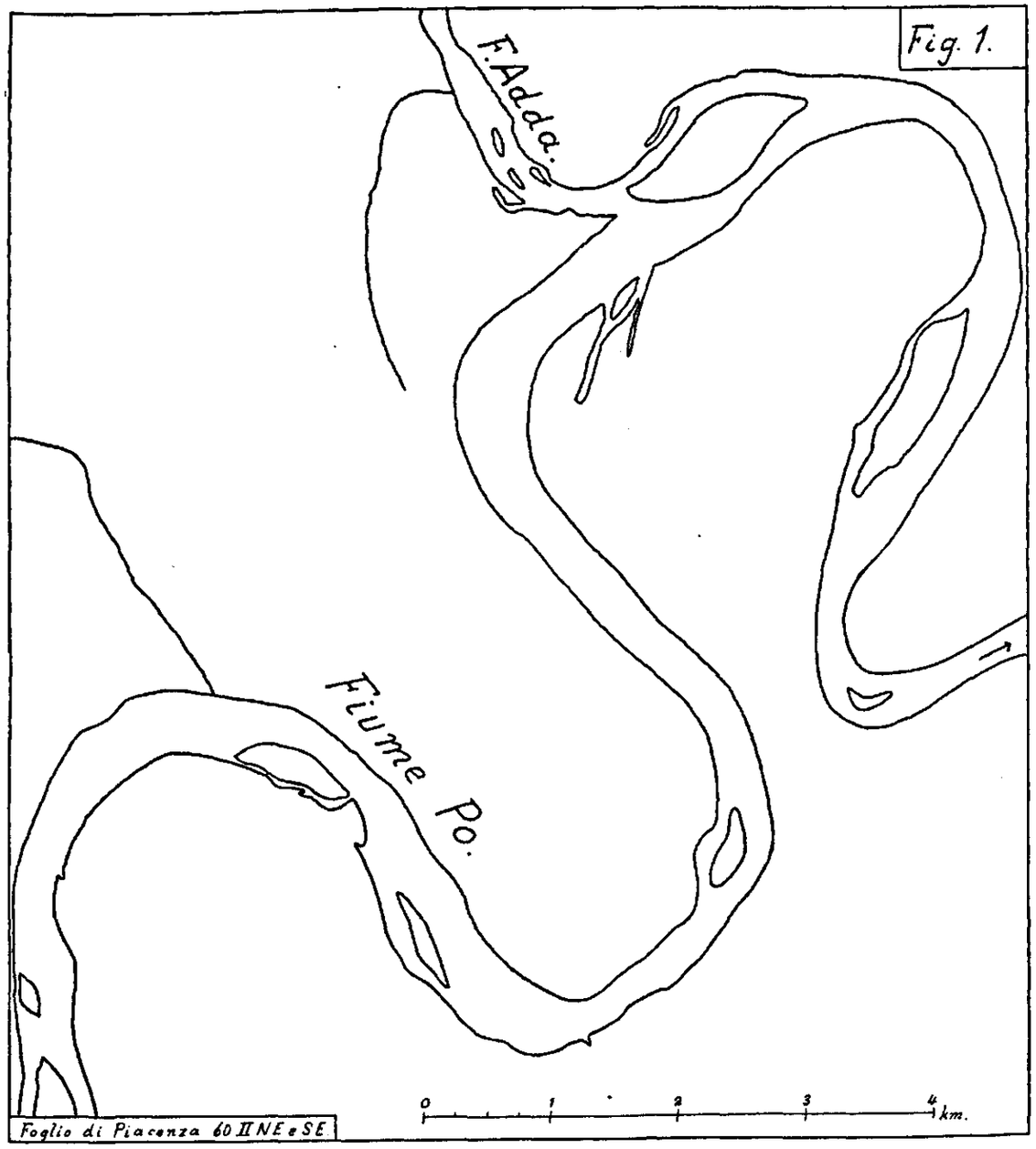
lated. In nature these soft sediments would, as a rule, not stand the strain. They would fall into the river in great masses and after a period of confused braiding the river would flow between low banks in a wide valley of feeble slope and begin to form free meanders. Let us therefore make the further assumption that these fine sediments can stand in high steep walls. The result will then be a river with entrenched meanders. The properties of the material, we here have assumed, are those of a rock, free from veins or dikes, of even, not too great hardness and — an important property — disintegrating into relatively small fragments, when weathering. It seems therefore unnecessary to assume bicyclic origin for all entrenched meanders. A good deal can perfectly well be monocyclic. But why then do entrenched meanders mostly occur in regions of feeble relief, peneplains, etc.? Because in regions of strong relief the circumstances are those of the „upper course" already described, or else tributaries would bring much coarse gravel and cause braiding.

CONCLUSION. Conditions necessary for the formation of meanders. In a river — if not too much hampered by the character of its bed or by overloading — there is always present the tendency to form regularly spaced curves of a size which is a function chiefly of quantity of water, slope, friction of the bed and load. Low velocity is not essential. Meanders will be formed whenever the nature of the banks is suitable.

Suitable are at moderate or low velocity loose sediments of pretty fine grain, containing enough clayey matter to render the river banks stable; at higher velocity homogeneous rocks, preferably not too hard, falling apart into fragments of moderate size, when weathering, so that the current can easily carry them away. Unsuitable are rocky banks of uneven hardness (by folding, intrusions, etc.) and the presence of big boulders, further banks that will yield too easily to erosion and produce either an excess of or else very coarse sediment.

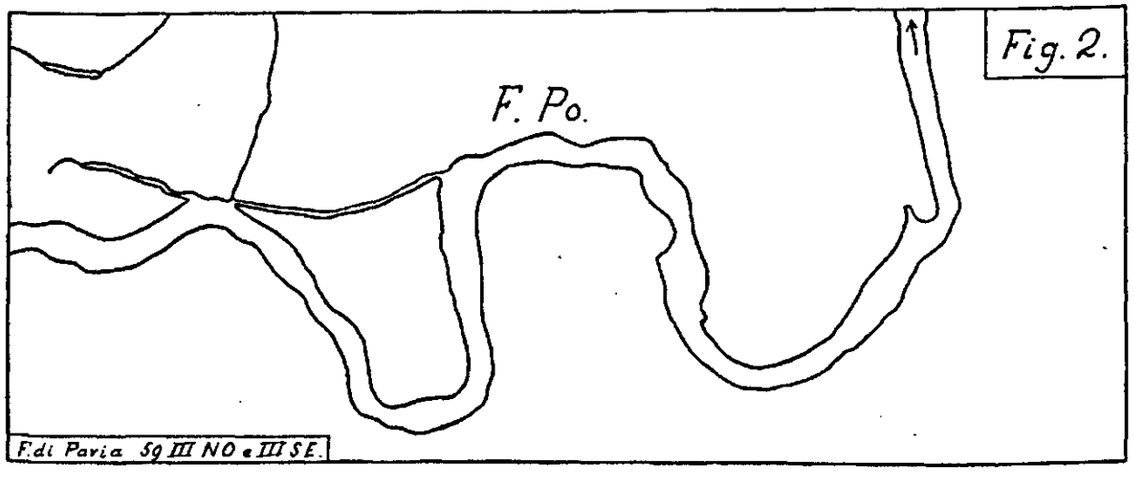
PROPOSED DEFINITION OF THE TERM MEANDER. It seems to me that we may only call those river bends meanders in which the tendency of flowing water to form regular horizontal and vertical waves is sufficiently clear. As long as the flowing water not yet prevails upon the material — taken cum grano salis — we have to do with bends, not with true meanders.

Fig. 1.



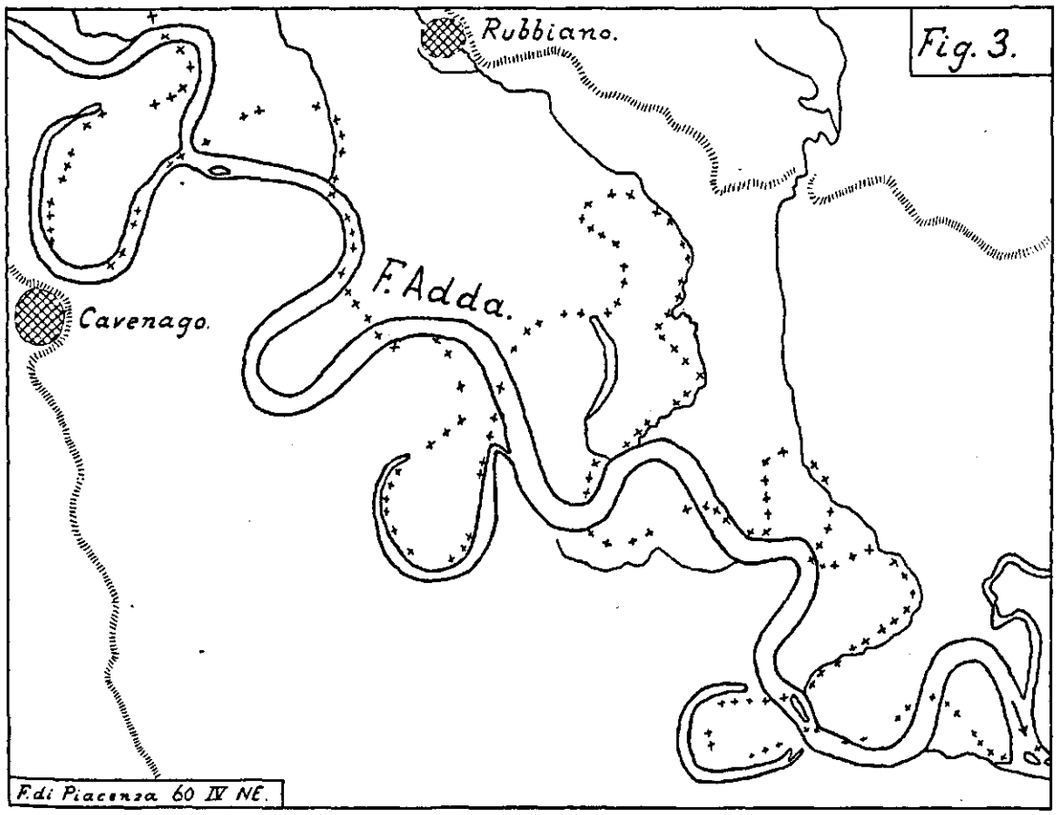
Foglio di Piacenza 60 II NE e SE

Fig. 2.



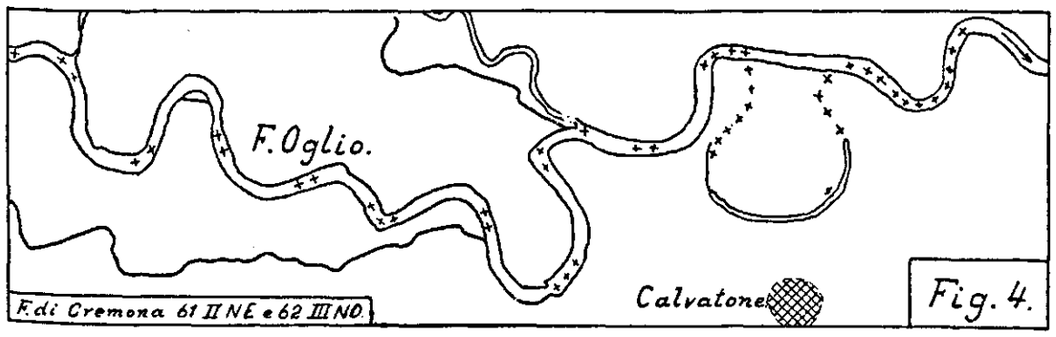
F. di Pavia 59 III NO e III SE.

Fig. 3.



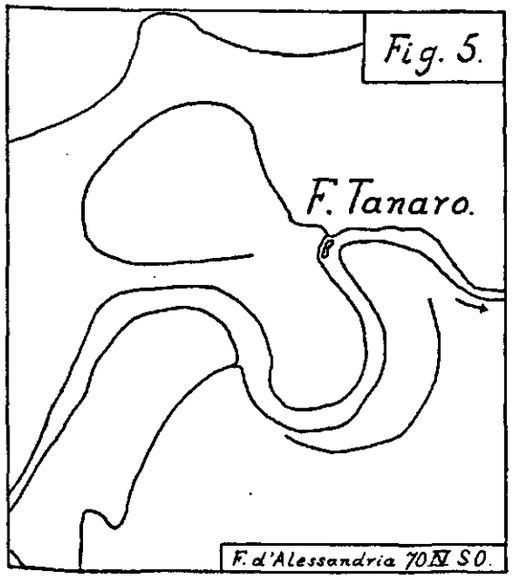
F. di Piacenza 60 IV NE.

Fig. 4.



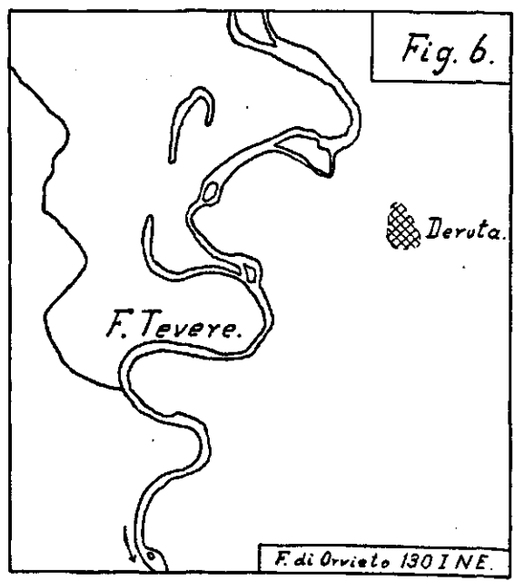
F. di Cremona 61 II NE e 62 III NO.

Fig. 5.



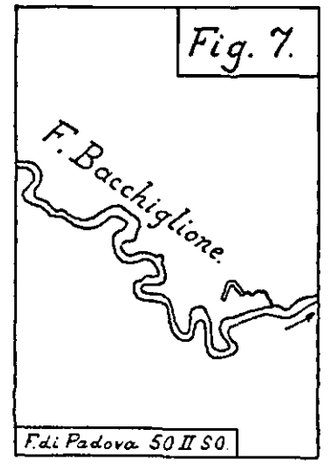
F. d'Alessandria 70 IV SO.

Fig. 6.



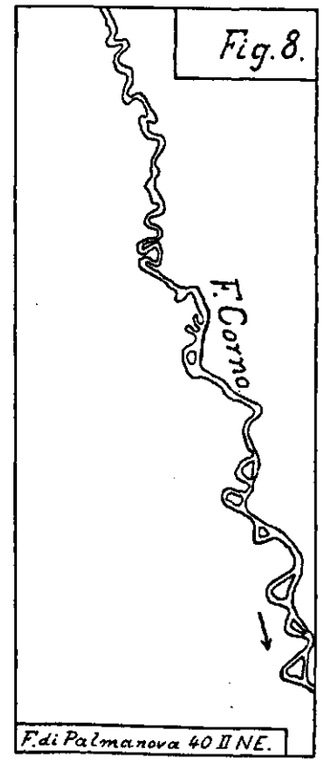
F. di Orvieto 130 I NE.

Fig. 7.



F. di Padova 50 II SO.

Fig. 8.



F. di Palmanova 40 II NE.

Fig. 9.



F. di Pavia 59 II SE.

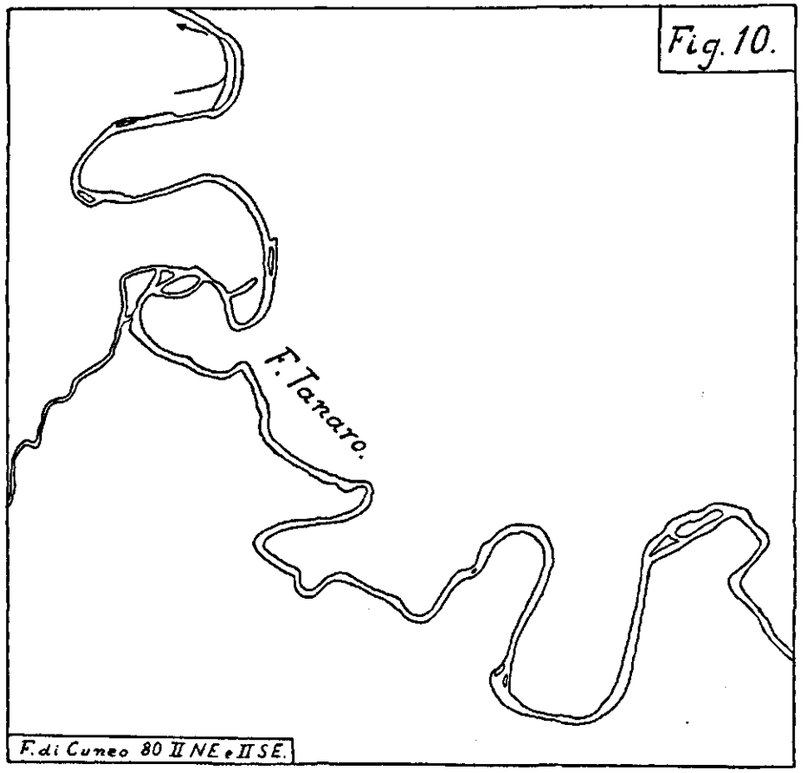


Fig. 10.

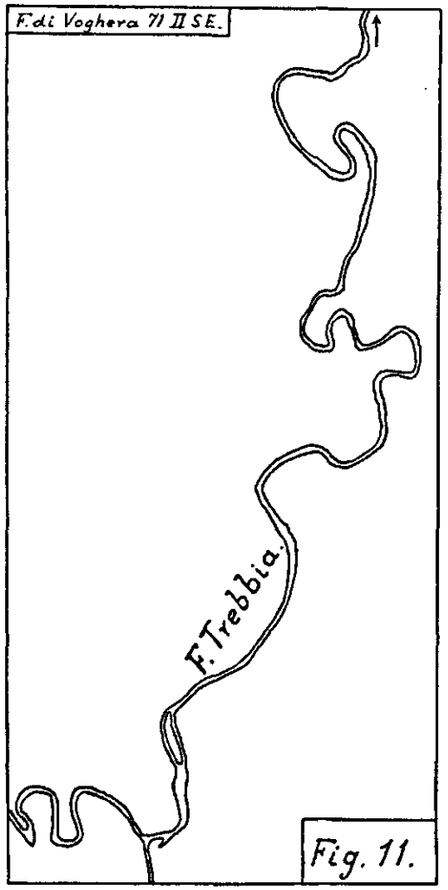


Fig. 11.

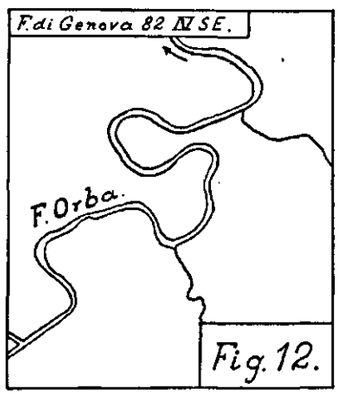


Fig. 12.

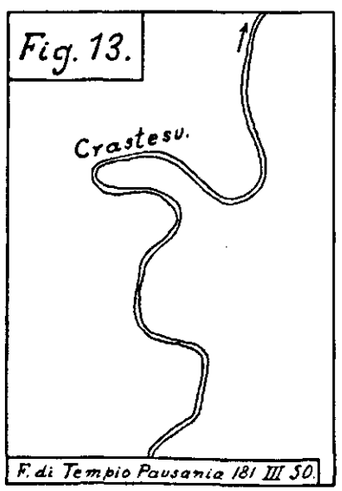


Fig. 13.

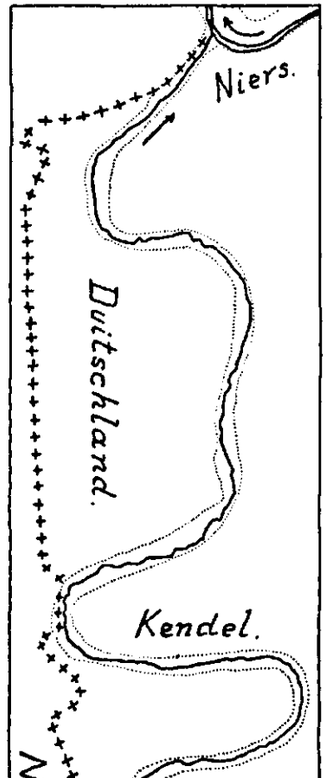


Fig. 14.

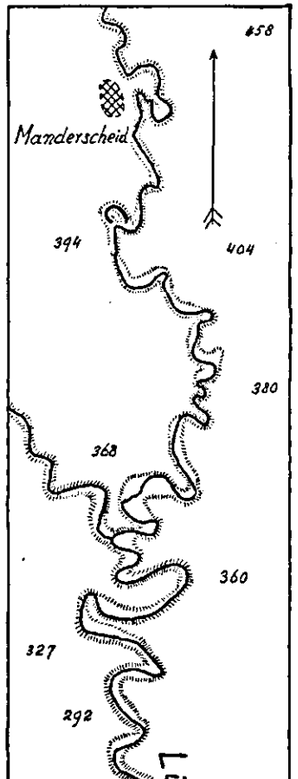


Fig. 15.

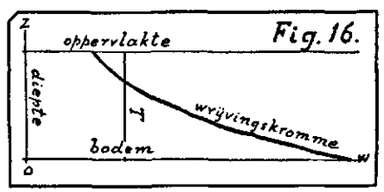


Fig. 16.

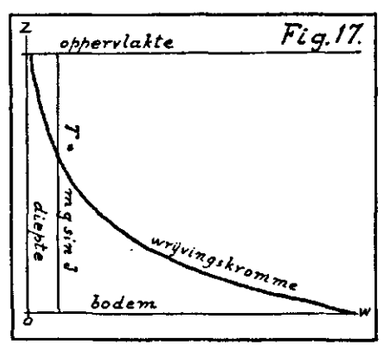


Fig. 17.

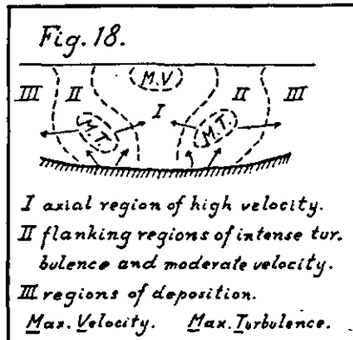


Fig. 18.

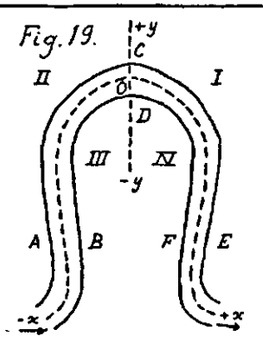


Fig. 19.

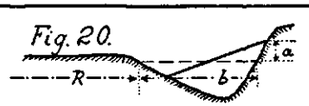


Fig. 20.

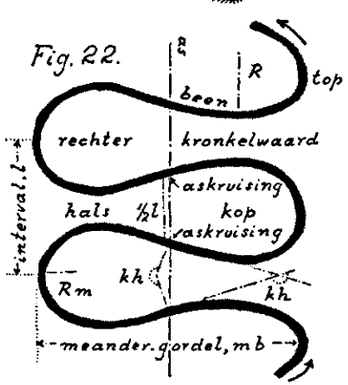


Fig. 22.


Fig. 21.

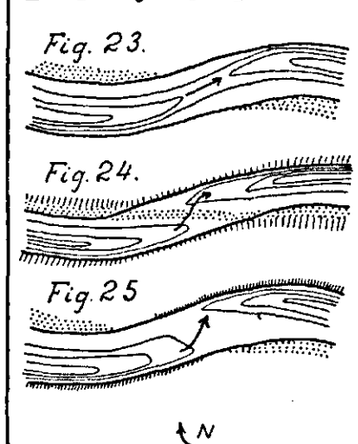
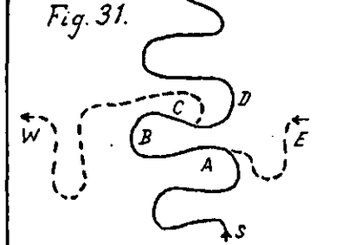

Fig. 23.

Fig. 24.


Fig. 25

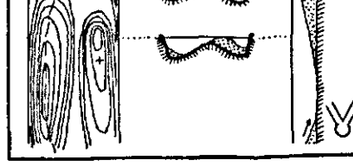
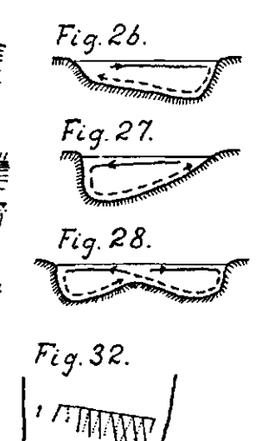


Fig. 31.


Fig. 26.

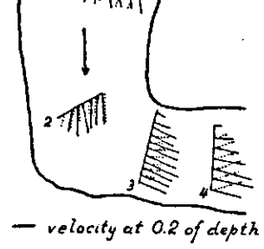

Fig. 27.

Fig. 28.

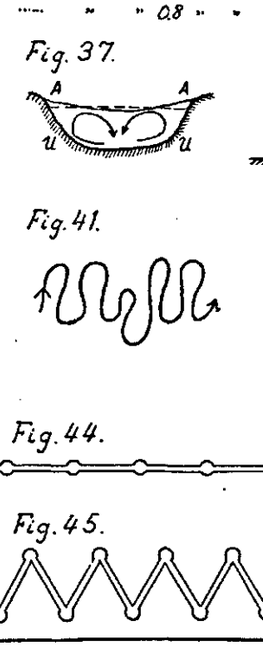


Fig. 32.

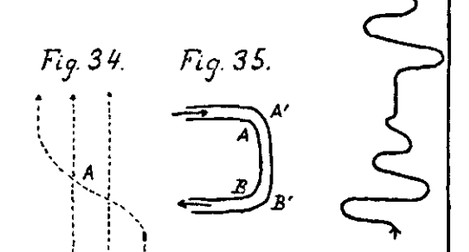


Fig. 29.

Fig. 33.

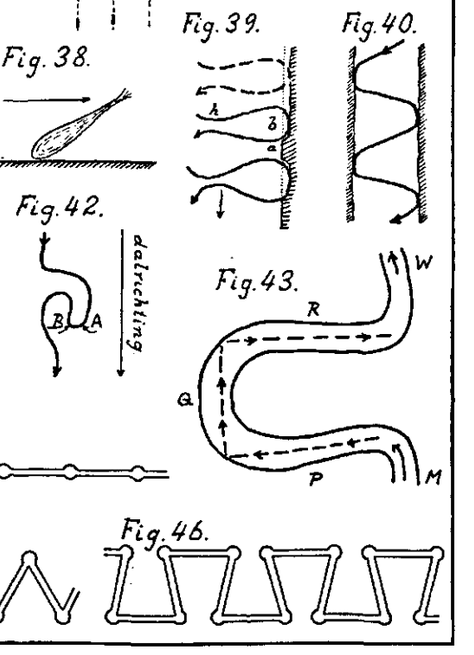


Fig. 35.

Fig. 34.

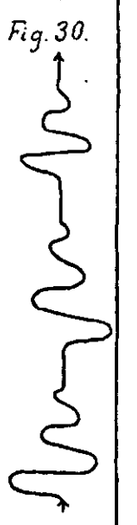

Fig. 30.

Fig. 40.

Fig. 36.

Fig. 37.

Fig. 38.

Fig. 39.

Fig. 41.

Fig. 42.

Fig. 43.

Fig. 44.

Fig. 45.

Fig. 46.