Oversigt over Resultaterne af nogle Undersøgelser over de ved Vindens Kraft fremkaldte Strømninger i Havet.

Af Prof. **A. Colding.**

(Meddelt i Selskabets Møde d. 11te Februar 1876.)

Forud for den ovennævnte Undersøgelse ville vi betragte et meget simpelt Strømningsforhold, og da navnlig antage, at der hen over den plane Bund af en Ledning, hvis Fald i Strømmens Retning er $\frac{h}{l}$, strømmer en Vandmasse frem i Retning af Faldet. Lad os derhos forudsætte, at Vandmassen alene paavirkes af Tyngdekraften og af Ledningsmodstanden, at Strømmens Brede er saa stor, at Ledningens Sideflader ingen Indflydelse udøve paa de betragtede Dele af Strømmen, samt at dens Vandspeil flyder parallelt med Bundplanen. I saadant Tilfælde er Vanddybden H constant, ligesom Strømhastigheden for ethvert Element er constant. For denne Strøm, hvis Vandspeil antages at bevæge sig fuldkommen frit og hvis Dybde antages at være tilstrækkelig stor, gjælder Formlerne (52) i min tidligere Afhandling om Strømningsforholdene i almindelige Ledninger og i Havet, hvilke Formler under de gjorte Forudsætninger kunne skrives:

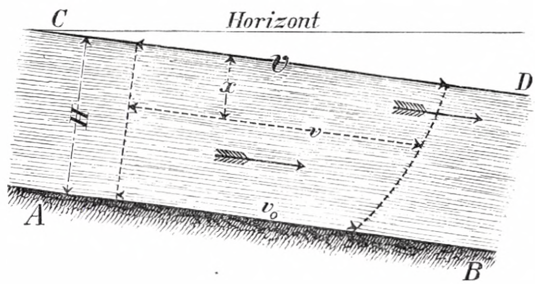
$$v = \mathfrak{V} - 4{,}8\sqrt{m}\,.\,v_0\,.\left(\frac{x}{H}\right)^{\frac{3}{2}} \text{ og } g\,\frac{h}{l} = \frac{m\,v_0^2}{H}, \quad \ldots\ldots \quad (1)$$

hvor $\mathfrak{V}$ betegner Vandstrømmens største Hastighed, Vandspeilshastigheden, medens v_0 betegner Bundhastigheden og v Vandets

Hastighed i Afstanden x fra det frie Vandspeil; m er Bundens Modstandscoefficient og $(m \, . \, v_0{}^2)$ fremstiller den Modstand, som Bunden udøver imod Vandets Bevægelse, for Eenhed af Overflade. Ved at multiplicere den sidste af Ligningerne (1) med $(4{,}8)^2$ bemærkes let at den første Ligning kan skrives:

$$v = \mathfrak{V} - 26{,}833 \, . \left(\frac{x}{H}\right)^{\frac{3}{2}} . \sqrt{\frac{h}{l} \, H} \quad \ldots\ldots \quad (2)$$

Fig. 1.



og derefter, at Strømningsforholdene i den betragtede Vandstrøm kunne fremstilles ved den hostaaende Figur 1, hvori $A\,B$ er Ledningens Bund og CD Strømmens Vandspeil.

Tænke vi os dernæst Strømmens Overflade begrændset af en med Ledningens Bund parallel Plan eller Dækflade, saa er det indlysende, at hvis denne Dækflade bevæger sig frem i Strømmens Retning med samme Hastighed $\mathfrak{V}$ som Vandspeilet, med hvilket den er i Berøring, saa vil Dækslet ingen Indflydelse udøve paa Strømforholdene i Ledningen, da det ingen Modstand udøver paa Vanddelenes Bevægelse, eftersom den relative Hastighed mellem Dækslet og Vandet, der berører samme, er Nul.

Har Dækplanen derimod en anden Hastighed end Vanddelene af Strømmens Overflade, saa er den relative Hastighed mellem begge ikke Nul, og i saadant Tilfælde bliver selvfølgelig Vandbevægelsen i Ledningen paavirket af Dækslet med en Kraft, som afhænger af den relative Hastighed, hvormed Dækfladen bevæger sig over Strømmens Overflade. Strømmens Overfladehastighed bliver da forskjellig fra den fritløbende Strøms Hastighed $\mathfrak{v}$, og naar vi almindeligt ved v_1 betegne Hastigheden af Vandet ved Dækslet, samt ved V betegne Dækfladens Hastighed, saa kan den relative Hastighed mellem Dækslet og Strømmens Overflade, uden Hensyn til Fortegnet, fremstilles ved $(v_1 - V)$. Betegne vi dernæst Dækfladens Modstandscoefficient ved m_1, saa er det klart, at der mellem Dækslet og Vanddelene opstaaer en Modstandskraft, som kan udtrykkes ved $m_1 (v_1 - V)^2$, ganske paa samme Maade som Modstandskraften ved Ledningens Bund kan fremstilles ved $m \, . \, v_0{}^2$.

Naar Dækslets Modstandskraft er Nul maa man have $V = v_1$; da er som vi have seet Strømmens Overfladehastighed $v_1 = \mathfrak{v}$.

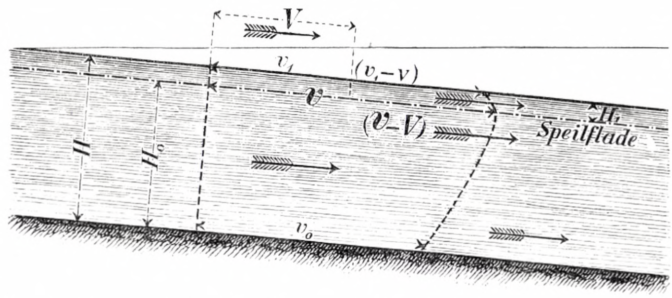
Er V derimod positiv og mindre end den frie Strøms Overfladehastighed, saa lider Strømmen en Modstand, som er udtrykt ved $m_1 (v_1 - V)^2$, og denne Modstand fremkalder naturligviis ganske tilsvarende Forhold ved Strømmens Overflade, som de der fremkaldes ved Ledningens Bund af den derværende Reaction. Som Følge heraf bliver hele Vandstrømmen, hvis Dybde er H, deelt i to selvstændige Strømme, nemlig en øvre Strøm, hvis Dybde vi ville kalde H_1 og en nedre Strøm, hvis Dybde vi ville betegne med H_0, saaledes, at $H_0 + H_1 = H$. Af disse to Strømme paavirkes Overstrømmen alene af Dækfladens Modstand, Understrømmen alene af Bundfladens Modstand, saaledes som jeg tidligere har viist, og enhver af disse to Strømme bevæger sig paa sin Flade som en fri og ubedækket Strøm, der har sit frie Vandspeil i Skillefladen mellem begge Strømme. Denne fælleds Vandspeilsflade, hvori Strømhastigheden er større end for noget andet Punkt af de to Strømme, kalder jeg Strømmenes S p e i l f l a d e, og Hastigheden i denne Flade, hvis Beliggenhed varierer med V, betegner jeg ved $\mathfrak{v}$.

Naar $V = v_1$, saa er Dækslets Modstand Nul, altsaa Overstrømmens Dybde $H_1 = 0$ og $v_1 = \mathfrak{v}$; i dette Tilfælde falder Speilfladen altsaa ved Overfladen og danner Vandspeilet, hvori Hastigheden er et Maximum, som antydet i Fig. 1.

Formindskes V, saa forøges Modstanden ved Overfladen og

Maximumshastigheden $\mathfrak{v}$ sænker sig under Overfladen en tilsvarende Dybe H_1, see Fig. 2. Naar altsaa V aftager fra $\mathfrak{v}$ til

Fig. 2.



Nul, saa aftager Overfladehastigheden, medens Dybden H_1 tiltager, og tænkes V derefter yderligere at aftage, eller hvad der er det samme, tænkes V at voxe negativt, saa kan Vandets Overfladehastighed v_1 derved bringes til at aftage indtil Nul, see Fig. 3 og 4; for endnu større negative Værdier af V

Fig. 3.

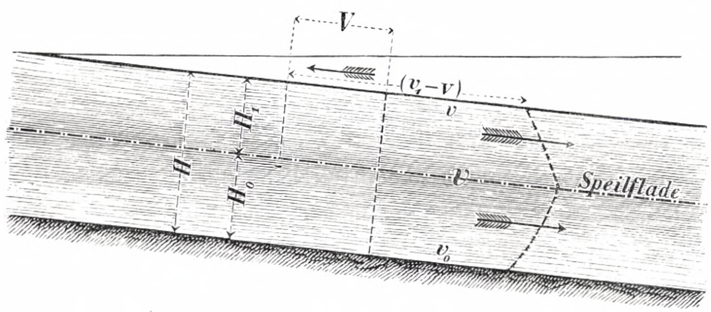
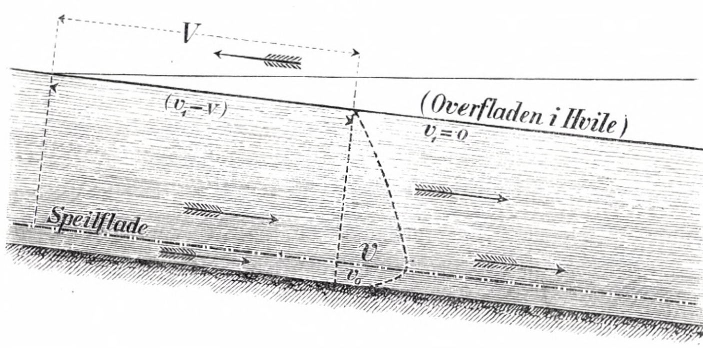
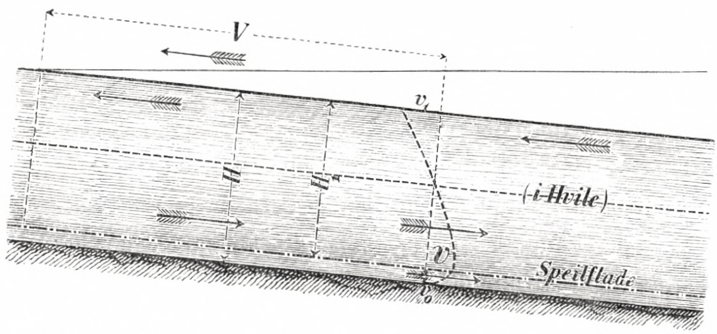


Fig. 4.



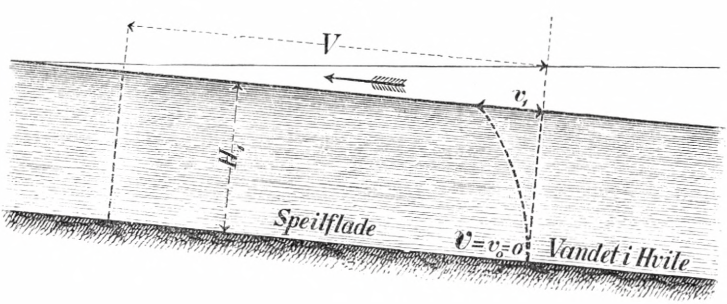
gaaer endelig v_1 over til at voxe negativt. Overstrømmens Dybde H_1 vedbliver imidlertid at voxe og da denne Strøms Hastighed er positiv i Dybden H_1 men negativ ved Dækslet, saa er det klart, at der findes et Sted i Strømmen, hvor Hastigheden er Nul, see Fig. 5. Afstanden fra Dækslet til dette Punkt voxer med V, og

Fig. 5.



jeg skal derved blot bemærke, at naar denne Afstand er $= 0{,}45 . H$ saa er Vandføringen af hele Strømmen $= 0$. Samtidigt med at Overstrømmens Dybde H_1 tiltager, aftager naturligviis Understrømmens Dybde $H_0 = H - H_1$, og for en vis Værdi af V forsvinder aabenbart Understrømmen aldeles, og navnlig i det Øieblik da den Modstand, som Dækfladen under sin Bevægelse i modsat Retning af Vandspeilsfaldet udøver mod Overfladen af Vandmassen, bliver saa stor, at den drivende Kraft, som derfra meddeles Vandet, er ligestor med den drivende Kraft, som fremkaldes ved Tyngdens Virkning paa den hele Vandmasse. Naar dette indtræder, river Dækslet hele Vandmassen med sig, medens denne løber frem paa Dækfladen saaledes at Vanddelene ved Bunden netop forblive i Hvile, som antydet paa Fig. 6.

Fig. 6.



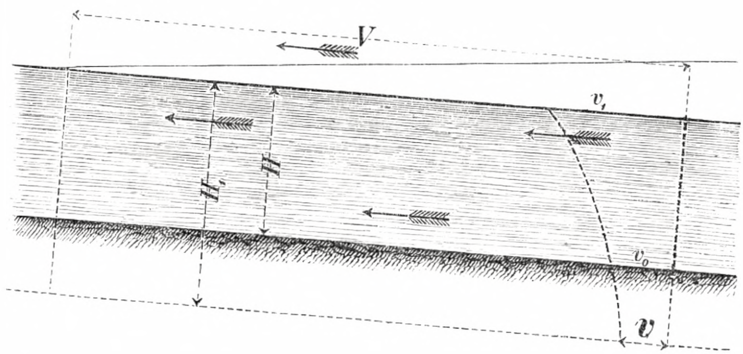
I det Øieblik hvor Understrømmen forsvinder, falder aabenbart Maximumshastigheden $\mathfrak{v}$ i Speilfladen sammen med Bundhastigheden v_0, og man har $\mathfrak{v} = v_0 = 0$. Den hele Vandmasse kan da betragtes som en Strøm, der løber paa den med Hastigheden V bevægede Dækflade, i Retning af Ledningens Fald, og hvis frie Vandspeil befinder sig ved Ledningens Bund. Da Vandets virkelige Hastighed ved Dækfladen er v_1 og ved Bundfladen er Nul, saa er Vandets relative Hastighed med Hensyn til Dækfladen foroven $= \div (V - v_1)$ og forneden $= - V$.

Den hele her beskrevne Gruppe af Strømningsforhold, fra det Tilfælde, hvor Vandstrømmen helt og holdent bevæger sig paa Ledningens Bundflade og dens Overflade er fri, til det Tilfælde, hvor Vandmassen udelukkende bevæger sig paa Dækfladen, medens Strømmens Vandspeil befinder sig ved Ledningens Bund, sammenfatter jeg under Betegnelsen 1ste Classe af Strømningsforhold.

Til at danne Strømningsforhold henhørende til denne Classe udfordres altsaa, at Dækslet skal bevæge sig med en Hastighed V, der ligger mellem Grændser, som afhænge af Ledningens Dybde og Fald, og hvoraf den høiere (positive) Grændse er $V = \mathfrak{v}$, og den lavere (negative) Grændse har en saadan Størrelse, at Strømmens Bundhastighed netop er Nul.

Stiger Dækfladens Hastighed V i negativ Retning ud over den nævnte lavere Grændse, ved hvilken Bundhastigheden er Nul, imod $\div \infty$, saa fremkommer der en ny Gruppe af Vandbevægelser, der passende kan benævnes 2den Classe af Strømningsforhold. Det vil nemlig være klart, at naar Dækslets Hastighed i negativ Retning bliver større end den, ved hvilken Vanddelene ved Bunden af Ledningen ere i Hvile, saa vil Dækslets Bevægelse medføre en forøget Reaction mod Strømmens Overflade, og Følgen deraf vil være, at ogsaa de nederste Dele af Vandmassen rives med af Dækslet i negativ Retning hen over Ledningens Bund. Bundhastigheden, som vi kalde v_0, bliver altsaa negativ og der opstaaer en Reaction ved Bunden, udtrykt ved $m . v^2$, som vil antage en saadan Størrelse, at Strømhastigheden bliver constant for den givne Hastighed V af Dækslet. — Vandbevægelsen vil i dette Tilfælde være overeensstemmende med den, som finder Sted i den øverste Deel af en dybere Strøm, der løber paa Dækfladen, saaledes som det er antydet i den hostaaende Fig. 7.

Fig 7.

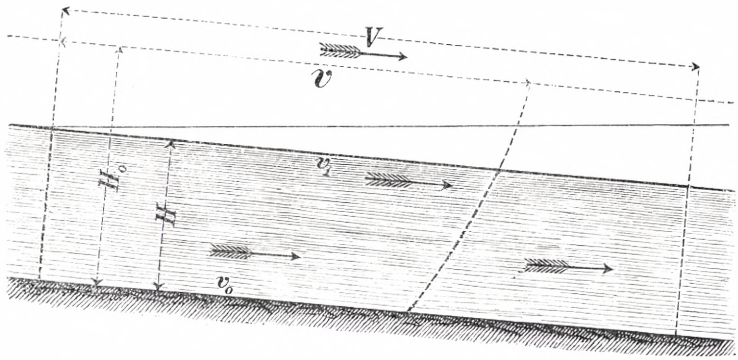


Tænke vi os paa den anden Side, at Dækslets Hastighed V voxer positivt (i Retning af Ledningens Fald) ud over den høiere Grændse for den 1ste Classe af Strømmen, altsaa fra $\mathfrak{v}$ til $+\infty$, saa opstaaer hvad jeg kalder 3die Classe af Strømforhold. Tilfælde af denne Art fremkomme altsaa, naar Dækslet bevæger sig i positiv Retning med en Hastighed V, der er større end den Hastighed, hvormed Overfladen af den betragtede Vandmasse vilde bevæge sig, naar Overfladen var fri og Strømmen foruden af Tyngdekraften kun paavirkedes af Ledningens Reaction. I dette Tilfælde vil Vandbevægelsen være overeensstemmende med den som finder Sted i den nedre Deel af en dybere Strøm, som løber paa Bundfladen, saaledes som det er antydet i Fig. 8.

Disse tre Classer af Strømningsforhold omfatte som man vil see alle de permanente Strømningsforhold, som kunne fremtræde i en Vandstrøm, som har constant Dybde og Fald; men det sees tillige let, at om Vandspeilet ikke fuldkommen er parallelt med Bunden, saa vil Strømmens Tværsnitsareal for en

Brede = 1 kun variere forholdsviis lidt, naar Strømdybden H er stor. Men naar Strømprofilet kun varierer lidt, saa varierer

Fig. 8.



ogsaa Strømhastigheden kun lidt, og kan denne betragtes som constant langs ad Strømmen, saa ere foranstaaende Formler gjældende for Strømmen.

De almindelige Love, som paa den antydede Maade lade sig udlede for Vandets Bevægelse i Strømme, der staae under Indflydelse af en bevægelig Dækflade, har det ligget nær for mig at anvende paa de Strømningsforhold i Havet, som fremkaldes ved Vindens Kraft, under Luftens Bevægelse hen over Vandspeilet. Det nærværende Arbeide har nemlig sin Oprindelse derfra, at det danner et Slags Forarbeide til en omfattende Undersøgelse over Stormen og Stormfloden den 13de November 1872, som jeg har stillet mig til Opgave at gjennemføre saa vidt muligt, for ved Hjælp af de fra mangfoldige Steder indhentede Kjendsgjerninger om dette i Storartethed og stærk udpræget Characteer næsten enestaaende Naturphænomen muligviis at kunne bringe noget Lys ud over denne Art af Naturbegivenheder, hvorom man hidindtil næsten ingen Kundskab har havt, og imod hvilke man derfor ogsaa kun høist ufuldkomment har kunnet værge sig; thi indtil nu kan man vel næppe siges at være paa det Rene med, hvad der er slige Phænomeners Aarsag, og endnu mindre har man været istand til at danne sig en tydelig Forestilling om Størrelsen af de Kræfter, som Naturen formaaer at sætte i Bevægelse under en Stormflod, som den af 13de Novbr. 1872, der hærjede en stor Deel af Østersøens Kyster.

Men idet vi betragte Luften som den bevægelige Dækflade, der med Vindens Hastighed glider hen over Vandspeilet, saa bliver det nødvendigt at undersøge, hvilke Værdier vi skulle tillægge de to Modstandscoefficienter m og m_1, der henholdsviis svare til Havbundens og til Luftens Modstand.

Med Hensyn til Havbundens Modstandscoefficient, da har jeg tidligere i min Afhandling om Strømforholdene, i Henhold til nogle ældre, af Bruning udførte Forsøg over Strømhastigheden i Rhinen m. fl. Strømme, antaget at Modstandscoefficienten for Havstrømme maatte sættes $m = 0{,}025$, fordi denne Værdi omtrent svarede til den største Ledningsmodstand, som Bruning fandt, og som jeg antog svarede til Bevægelsen af en Vandstrøm, som gaaer hen over stillestaaende Vandmasser, der ved Ujevnheder i Bunden vare forhindrede fra at følge Strømmens Løb. Senere har jeg imidlertid faaet en ikke ringe Tvivl om det er rigtigt at betragte Havstrømmenes Modstandscoefficient som Grændsen for den i de nævnte Floder fremkomne Modstandscoefficient, der maaske sandsynligere hidrørte fra de særlige Modstande, Strømmens Brydninger mod fremstaaende Klippemasser etc. foraarsagede. Denne Indvending imod min tidligere Antagelse har navnlig fundet en Bestyrkelse deri, at det er en Kjendsgjerning, at naar en Vandstrøm bevæger sig igjennem et af vore almindelige Vandløb, hvis Bund er jevn og bestaaer af Steen, Gruus, Sand o. s. v., som er fuldstændigt gjennemtrængt af stillestaaende Vand, saa vil denne derved fremkalde en langt mindre Modstand, end den som Rhinen frembød, hvilket ogsaa fremgaaer af nogle Forsøg, som Bruning har udført i en regelmæssig Canal, hvori Modstandscoefficienten var betydeligt mindre, og meget nærmede sig til den Værdi, som svarer til jevne og gode Ledninger af Muurværk, Jern o.s.v.

Min første Tvivl om Rigtigheden af at fastholde Modstands-coefficienten $m = 0{,}025$, skriver sig imidlertid derfra, at jeg ved at indføre denne Værdi i mine Formler kom til et Resultat angaaende Luftmodstanden, som var i Strid med en almindelig Lov om Fluiders Ledningsmodstand, som jeg har fremstillet i Videnskabernes Selskabs Oversigter for Aaret 1865, og som jeg senere paa mange Maader har fundet bekræftet, som en almindeligt gjældende Naturlov. Ifølge denne Lov, som siger, at Ledningsmodstanden for forskjellige Fluider, som bringes til at gjennemstrømme en given Ledning med samme Hastighed, forholder sig som Fluidernes Tæthed, — kan det nemlig paaregnes, at naar en Vandstrøm ved at bevæge sig langs ad en stillestaaende Vandflade lider en Modstand, som kan fremstilles ved: $m.v^2$, saa vil samme Strøm, ved at bevæge sig langs ad en stillestaaende Luftflade med Hastigheden v, lide en Modstand, som kan fremstilles ved: $m.\varrho.v^2$, naar ϱ betegner Luftens Tæthed i Forhold til Vand.

Bestemme vi efter denne Lov Luftens Modstandscoefficient m_1, idet vi foreløbigt lade Havbundens Modstandscoefficient m henstaae som ubekjendt, da sætter Stormen og Høivandet den 13de November 1872 os istand til paa den meest storartede Maade at bestemme Havbundens Modstandscoefficient m.

Bemærke vi nemlig at Luftens Tæthed er 0,0013 af Vandets, saa følger deraf, at $m_1 = 0{,}0013.m$ og at $\sqrt{m_1} = 0{,}036.\sqrt{m}$; indføre vi derefter disse Værdier for m_1 og for $\sqrt{m_1}$ i de almindelige Formler, saa kunne vi til Bestemmelsen af Modstandscoefficienten m noget nær benytte hvilke Observationer over Stormen og Høivandet af 13de Novbr. 1872 vi ville; vi kunne saaledes benytte de observerede Forhold ved et Hav af ringe Dybde f. Ex. «Frische Haff» eller ved et Hav af betydelig Dybde f. Ex. Østersøen mellem Sverrig og Rusland; vi kunne vælge Strækninger, hvor Strømmen løber med Vinden eller hvor Strømmen løber imod Vinden; vi ville for dem alle temmelig nær finde samme Værdi for m, nemlig $m = 0{,}0037$ og $\sqrt{m} = 0{,}061$. Sammenligne vi nu til Slutning disse Værdier for m og $\sqrt{m}$ med de Værdier for Modstandscoefficienten som svare til Brunings Observationer i den pannerdenske Canal, saa viser det sig, at de efter hans Undersøgelser bestemte Værdier af m netop dreie sig omkring den her fundne Værdi. Sammenligne vi fremdeles den ved Hjælp af Stormen og Høivandet bestemte Modstandscoefficient med Modstandscoefficienten for Vandets Bevægelse i nye og gode Jernledninger, efter de af den berømte franske Ingenieur Darcy's udførte Forsøg, saa finde vi at for alle de nye Ledninger, som af Darcy ere blevne grundigt undersøgte, har Modstandscoefficienten viist sig at være $m = 0{,}0036$, hvilket Tal ogsaa findes at svare til Ledningsmodstanden i vel udførte Muurværksledninger. Det staaer saaledes fast, at den udviklede Theori bekræftes af Erfaring, og det er desuden vel værd at lægge Mærke til, at de heromhandlede Formler ikke blot ere tjenlige til Bestemmelsen af Havstrømmenes Vandføring, men at de have en saadan almindelig Gyldighed, at de tillige omfatte de sædvanlige Formler, som gjælde for Vandets Bevægelse i almindelige Ledninger, og til Exempel kunne benyttes til Bestemmelsen af Vandets Løb i en almindelig Cloak.