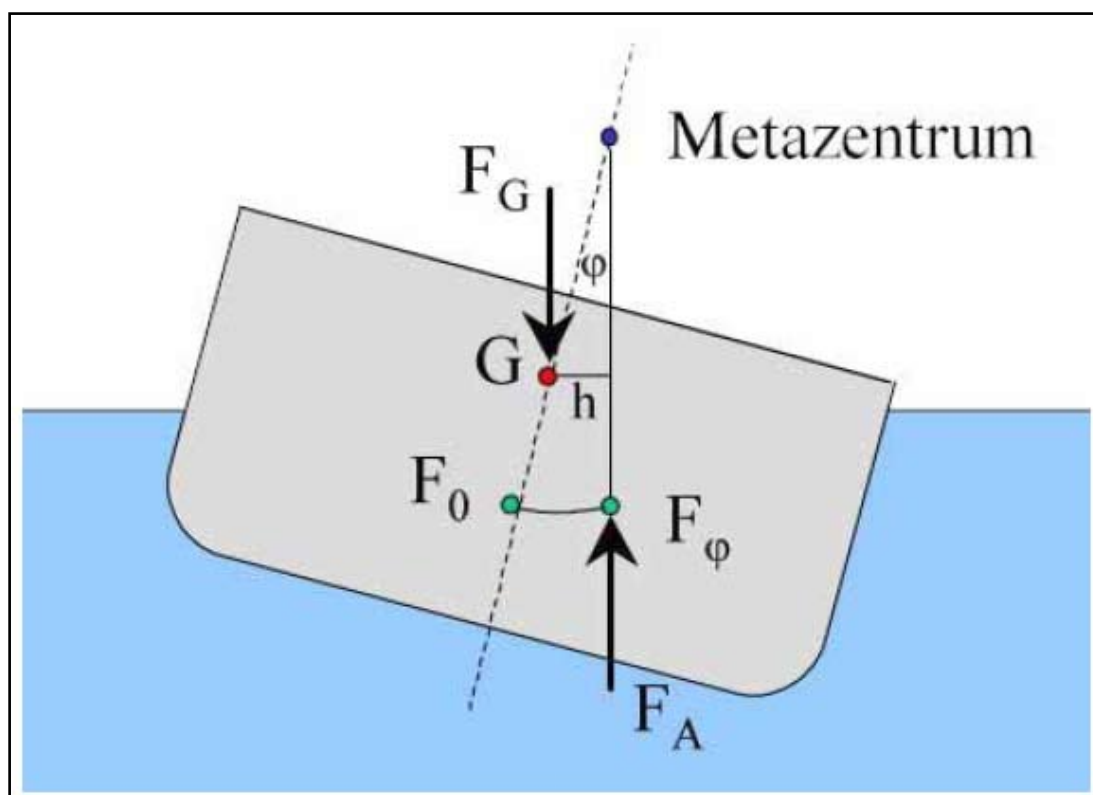


Hydrodynamik für Kanuten



Eine Einführung in Grundbegriffe und Zusammenhänge der
Hydrostatik und Hydrodynamik an Beispielen aus der Welt
der Kanufahrer

von
Mathias-H. Weber

Kiel, Januar 2008

Was ist Hydrodynamik?

Als mir auf die simple Frage, was denn Hydrodynamik eigentlich sei, so schnell nichts rechtes einfiel, habe ich mal bei Wikipedia nachgesehen und folgende erschöpfende Erklärung gefunden:

Die Hydrodynamik (...) ist ein Teilgebiet der Strömungslehre und beschäftigt sich mit bewegten Flüssigkeiten und Gasen. Untersucht werden z. B. laminare und turbulente Strömungen in offenen und geschlossenen Gerinnen sowie Bewegungen und Kraftverhältnisse in Druckleitungen. Die Aquadynamik beschäftigt sich ausschließlich mit Wasser. Die grundlegende Gleichung der Hydrodynamik ist die Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0$$

(mit der Massendichte ρ und dem Geschwindigkeitsvektor v) welche aussagt, dass der Massefluss durch eine geschlossene Fläche immer gleich der Veränderung der Masse im Inneren der Fläche sein muss.

Das ist zweifellos beeindruckend, aber wenig hilfreich für den Durchschnittskanuten. Deshalb will ich hier in einfachen Worten definieren, was ich in diesem Artikel mit Hydrodynamik meine.

Wir alle kennen das Phänomen, dass unterschiedliche Bootstypen sich unter gleichen Bedingungen mitunter sehr unterschiedlich verhalten. Wir bewegen uns mit unseren Booten an der Grenzfläche zwischen Wasser und Luft. Wenn man einmal vom Wind absieht, so wird die wesentliche Kraft, die uns bei der Ausübung unseres Sportes begegnet, durch das Wasser verursacht, an dessen Grenzfläche zur Luft wir uns bewegen. Das Wechselspiel der statischen wie dynamischen Eigenschaften des Wassers mit der Form unserer Boote ist der wesentliche Inhalt dieses Papiers.

Dabei sollen zwei nicht ganz unwichtige Randbedingungen gelten: Zum einen sei der Einfluss der Luft vernachlässigt und zum anderen angenommen, dass das Wasser, auf dem wir uns bewegen, ententeichflach daliegt.

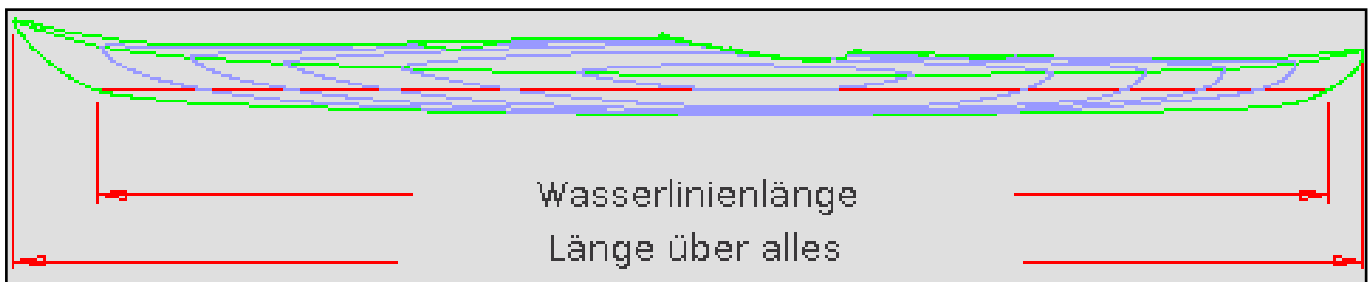


Begriffe

Wenn man sich einem Thema systematisch nähern will, dann ist die erste Aufgabe, dass man sich auch für vermeintlich selbstverständliche Größen auf eine fest definierte Begrifflichkeit einigt und nur diese benutzt. Daher will ich hier kurz einige zur Beschreibung des Verhaltens von Kajaks wichtige Größen kurz definieren, um ein gemeinsames Verständnis zu erreichen. Dabei beschränke ich mich auf die wichtigsten Größen, auf die auch in diesem Vortrag Bezug genommen wird.

Länge (Length)

Wenn man sein Kajak kauft, ist die erste beeindruckende Größe seine Länge. Wenn wir uns für die hydrodynamischen Eigenschaften des Bootes interessieren, müssen wir aber einige Abstriche an der Herstellerangabe machen. In den Prospekten ist in aller Regel die Länge genannt, die das Boot in der Garage in Anspruch nimmt.



Das ist die Länge über alles

Hydrodynamisch bedeutsamer als die Länge über alles ist aber die Länge der Wasserlinie. Die ist in der Regel deutlich geringer und liegt bei vielen Seekajaks durchaus deutlich unter fünf Metern. Die Länge der Wasserlinie ist bestimmend die maximal erreichbare Geschwindigkeit. Wenn ich im Folgenden von der Länge eines Bootes spreche, dann ist immer die Länge seiner Wasserlinie gemeint

Breite (Beam)

Als Breite eines Kajaks wird seine größte Ausdehnung in Querrichtung betrachtet. Sie liegt bei Seekajaks üblicherweise zwischen 50 und 60 Zentimeter, kann bei faltbooten aber auch mal 80 Zentimeter betragen. Die Breite eines Bootes hat ebenfalls einen Einfluss auf die Effektivität, Anstrengung in Geschwindigkeit umzuwandeln. Bei schmaleren Booten ist die Entfernung geringer, um die das Wasser bei der Vorwärtsbewegung zur Seite gedrückt werden muss und das erzeugt weniger Widerstand. Die Breite hat auch einen wesentlichen Einfluss auf die Stabilität: Je breiter das Boot, desto stabiler wird es sich anfühlen, wenn man sich hineinsetzt.



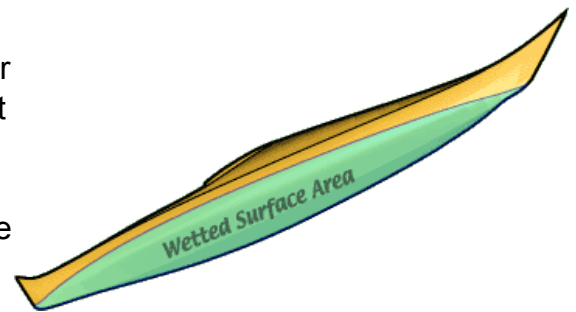
Bei meinem Kajak *flagranti* (Nordkapp Jubilee von Valley Canoe Productions) beträgt die Länge über alles 5,48 Meter während die Länge der Wasserlinie je nach Beladung zwischen ca 4,4 und 4,7 Meter - also fast einen Meter weniger!

Die Breite über alles beträgt 54 cm, was ziemlich genau mit der Breite an der Wasserlinie überein-

stimmt, die lediglich zwischen 53 und 54 cm schwankt.

Benetzte Oberfläche (Wetted Surface)

Die benetzte Oberfläche ist die Gesamtfläche aller Teile des Bootes, die nass werden, wenn das Boot im Wasser liegt. Diese Größe ist nicht einfach zu berechnen. Sie ist entscheidend für den Widerstand, den das Boot erfährt, wenn man es bei moderaten Geschwindigkeiten durchs Wasser bewegt. Natürlich hängt die benetzte Oberfläche vom Gewicht des Fahrers und der Zuladung ab und ist somit wie die meisten anderen Kennwerte keine Konstante des Bootstyps.



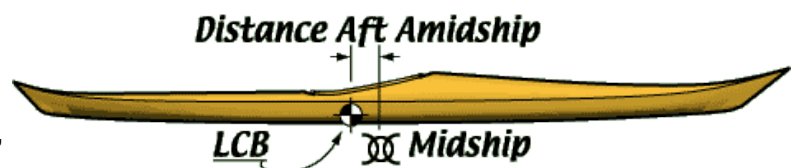
Verdrängung (Displacement)

Die Verdrängung gibt das Volumen des Wasserkörpers an, der verdrängt wird, wenn an seiner Statt das Boot im Wasser schwimmt. Diese Größe kann sowohl in Kubikmetern angegeben sein, wie auch in Kilogramm.

Auftriebspunkt (Center of Buoyancy)

Gedachter Punkt, durch den die gesamte Auftriebskraft wirkt. Wenn man senkrecht auf den Auftriebspunkt drückt, versinkt das Boot auf seiner gesamten

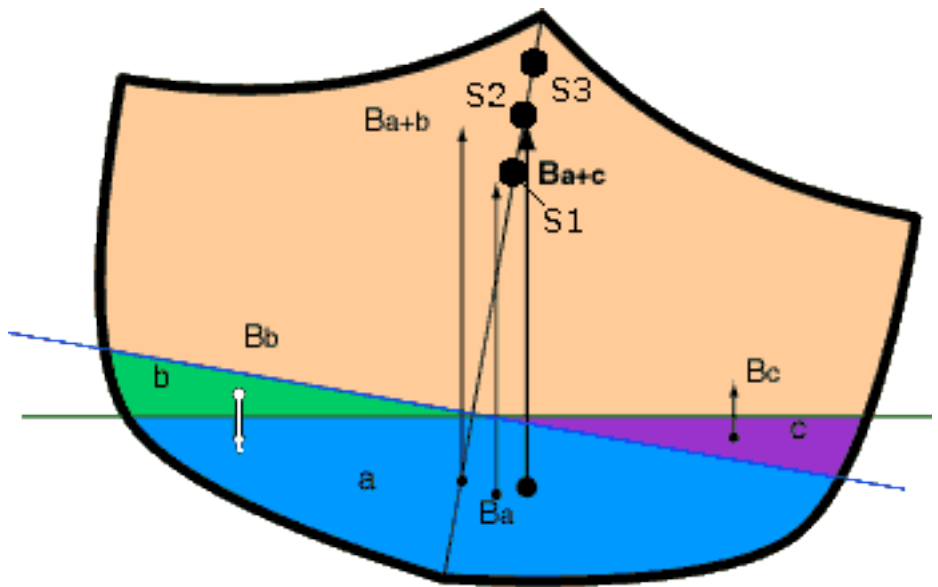
Länge gleichmäßig im Wasser. Sinkt das Heck stärker als der Bug, drückt man hinter dem Auftriebspunkt, sinkt der Bug stärker, so erfolgt der Druck vor dem Auftriebspunkt.



Schwerpunkt (Center of Gravity)

Gedachter Punkt, durch den die gesamte Gewichtskraft wirkt. Wenn ein Schiff ruhig im Wasser liegt, kann man sicher sein, dass die Linie durch seinen Schwerpunkt und seinen Auftriebspunkt genau auf den Erdmittelpunkt zeigt - einfach ausgedrückt: Dass Auftriebspunkt und Schwerpunkt genau übereinander liegen.

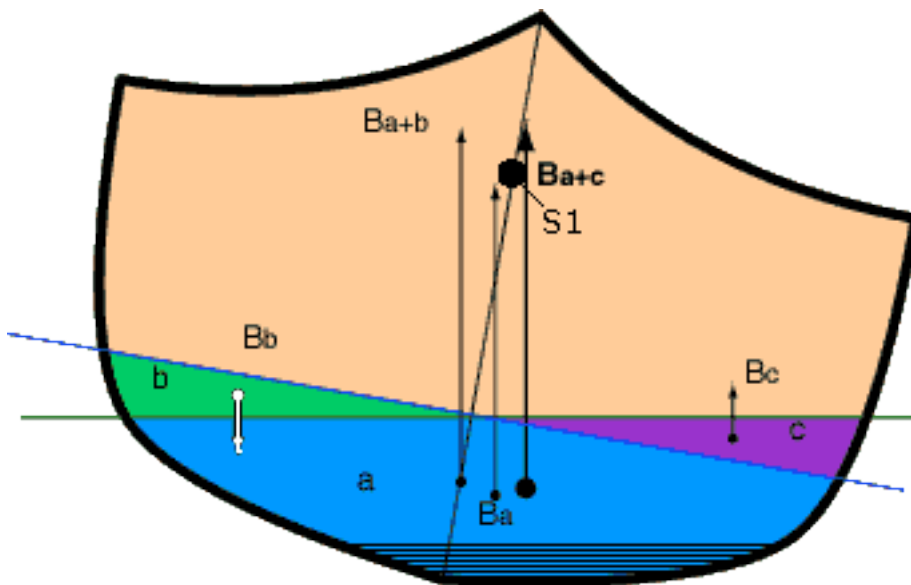
Ob das Boot kippt oder nicht, hängt entscheidend davon ab, wo in dieser Anordnung der Schwerpunkt liegt. Liegt er bei S1 ist das Boot stabil und wird sich wieder aufrichten, liegt er bei S2, steht die Sache auf der Kippe, und bei S3 wird eine Stützbewegung unausweichlich sein.



Es wird deutlich, wie entscheidend ein niedriger Schwerpunkt für die Stabilität eines Bootes ist.

Das kann z.B. durch einen niedrigen Sitz erreicht werden oder durch (zusätzliche) Beladung.

Außerdem sieht man, dass für geringe Auslenkungen aus der Gleichgewichtslage nur diejenigen Teile des Bootes eine Veränderung des Auftriebspunktes bewirken, die nahe an der Wasseroberfläche liegen. Das Erzeugen eines rückstellenden Momentes bei kleinen Auslenkungen, nennt man Anfangsstabilität. Das heißt mit anderen Worten, dass die Form des Unterwasserschiffes keinen nennenswerten Einfluss auf die Anfangsstabilität hat.

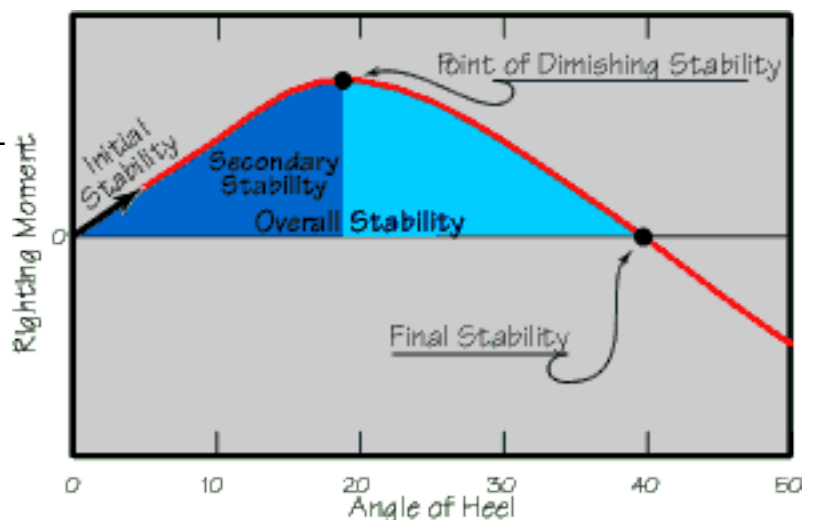


Nehmen wir an, der Schwerpunkt befinde sich im Punkt S1, so dass wir nach dem obigen Bild eine stabile Situation hätten, jetzt sei aber Wasser in das Boot eingedrungen. Das Wasser wird sich natürlich im unteren Teil des Bootes sammeln und der Fläche a etwas von ihrer auftriebsenden Wirksamkeit nehmen. Sei dieser Verlust so groß wie der der lila Kartoffelecke c, so wird der

Auftriebspunkt wieder an den Ort B_a wandern. Damit liegt er aber links vom Schwerpunkt und die vormals stabilen Verhältnisse haben sich ins Gegenteil verkehrt.

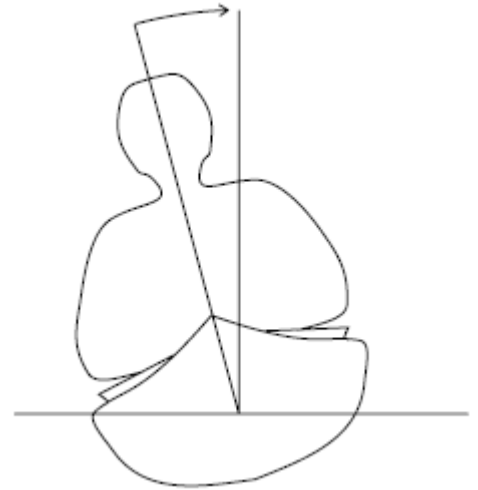
Wenn man nun für unterschiedliche Auslenkungswinkel die zugehörige rückstellende Kraft in ein Diagramm einträgt, erhält man eine sogenannte Stabilitätskurve, aus der man mit ein bisschen Übung einiges über die Eigenschaften eines Bootes ablesen kann, ohne es unbedingt gefahren zu sein.

An der abgebildeten beispielhaften Kurve kann man die wesentlichen Stabilitätsmerkmale ablesen. Da ist zuerst einmal die Höhe der Kurve. Wenn man die Kur-



ven für zwei unterschiedliche Boote vergleicht, dann erzeugt das Boot mit der höheren Kurve die größere Rückstellkraft und fühlt sich steifer und stabiler an. Die nächste Größe ist die Steigung bei null Grad. Ein Boot mit einer steileren Kurve hat eine größere Anfangsstabilität und wird sich ebenfalls steifer anfühlen. Der Scheitelpunkt der Kurve ist der Punkt, an dem die Stabilität abnimmt. Liegt dieser Punkt sehr hoch oder bei sehr großen Winkeln, hat das Boot eine hohe Endstabilität. Die Fläche unter der Kurve entspricht der Energie, die das Boot absorbieren kann, bevor es umkippt. Der Kippunkt liegt dort, wo die Kurve die x-Achse schneidet und markiert den Winkel, bei dem ein Kentern unausweichlich ist - es sei denn, man stützt.

Auf der folgenden Doppelseite ist ein Beispiel-Datenblatt abgebildet, wie es in der Zeitschrift *Seakayaker's Magazine* für deren Boots-Reviews verwendet wird. Dort werden jeweils vier Kurven für jedes Boot gezeichnet. Die Kurven 1 und 2 sind ohne Gepäck für einen ca. 70 Kilogramm schweren Paddler und einen ca. 90 Kilogramm schweren aufgenommen. Die Kurven 3 und 4 beziehen sich auf dieselben Paddler, berücksichtigen aber etwa 45 Kilogramm Zuladung. Die Stabilitätscharakteristiken, die durch die Kurven gezeigt werden, sind statisch, d.h. sie geben wieder, wie ein Kajak sich verhalten würde, dessen Paddler bewegungslos im Boot sitzt: Wirbelsäule und Hüften sind blockiert. Das spiegelt natürlich nicht die wirklichen Verhältnisse wieder, bei denen der Paddler dynamisch auf die Bewegungen des Bootes reagiert, ist so aber besser geeignet, für unterschiedliche Boote vergleichbare Daten zu ermitteln.

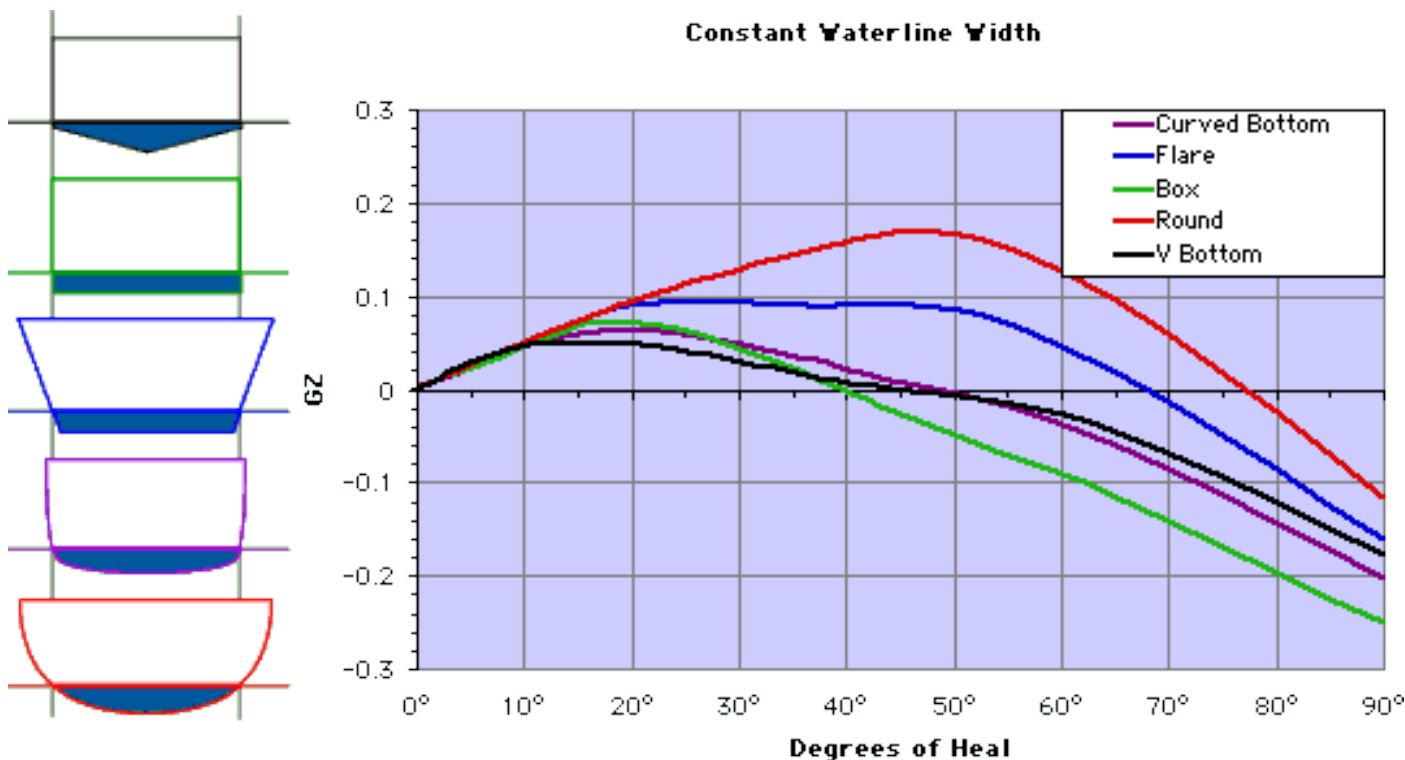


Man erkennt erstens, dass sich die Kurven, die für die Verhältnisse mit Zuladung gerechnet wurden, deutlich im höheren Bereich aufhalten. Ein Effekt, den wir alle kennen, dass nämlich ein beladenes Boot drastisch stabiler im Wasser liegt als ein unbeladenes. Und manchmal macht man sich das auch zunutze, so habe ich früher in brenzigen Situationen schon mal ein paar Säcke Strandsand spazieren gefahren.

Die Erkenntnis, dass mehr Gewicht mehr Stabilität bedeutet, könnte den Eindruck vermitteln, dass ein schwererer Paddler ebenfalls mehr Stabilität von seinem Boot erfährt als ein leichterer. Das Gegenteil ist der Fall. Woran liegt's? Im Gegensatz zu Beladung, die den Gesamtschwerpunkt im allgemeinen günstig beeinflusst, liegt der Schwerpunkt des Paddlers sehr viel höher und hat damit eine gegenteilige Wirkung. Das unterstreicht noch einmal die Wichtigkeit eines niedrigen Sitzes.

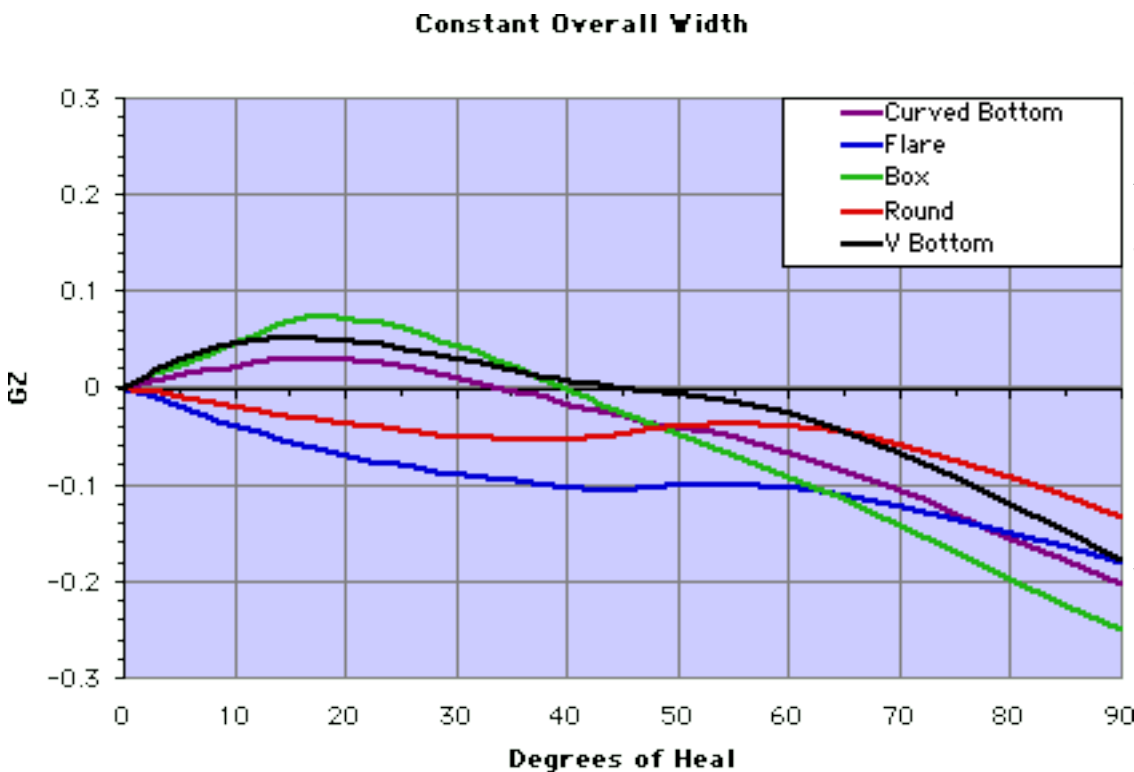
In der folgenden Graphik sind die Kurven für das Aufrichtmoment bei Booten unterschiedlicher Rumpfform dargestellt. Für alle Rumpfformen ist dieselbe Breite an der Wasserlinie angenommen. Die y-Achse ist hier mit dem horizontalen Abstand des Auftriebspunktes vom Schwerpunkt bemaßt. Diese Größe ist aber proportional zur Rückstellkraft und wir interessieren uns hier nur für die qualitativen Verhältnisse nicht für die absoluten Werte.

Zunächst kann man hier sehr schön erkennen, dass die Anfangsstabilität von der Rumpfform vollkommen unabhängig ist - alle Kurven starten nahezu deckungsgleich. Es fällt aber auch auf, dass die runde Rumpfform hier die höchste Stabilitätskurve aufweist. Das widerspricht unser aller Erfahrung, wenn man sich an die wackelnden Rennpaddler erinnert, die Boote mit ausgesprochen rundem Spant fahren. Aber die Zahlen lügen nicht, vielmehr wird aus der Graphik deutlich, dass der Rundspant oberhalb der Wasserlinie weit nach außen krägt. Bei einer Neigung wird dieses zusätzliche Volumen ins Wasser gedrückt und erhöht den Auftrieb überproportional. Das gilt für alle Spantenrisse, die sich oberhalb der Wasserlinie weiten, wie man auch an der Trogform sehen



kann.

Um unser Weltbild wieder ins Lot zu bringen, sind in der unteren Graphik die Verhältnisse bei konstanter Gesamtbreite für dieselben Rumpfformen dargestellt. Daran kann man sehr deutlich erkennen, warum die Gesamtbreite eines Bootes nichts über seine Stabilität aussagt. Und die Graphik lehrt uns Ehrfurcht vor Rennpaddlern, die sich in ein Boot setzen, das theoretisch sofort beim Betreten umkippt. Eine interessante Kleinigkeit ist die Tatsache, dass die Trogform, obwohl sie ähnlich über die Wasserlinie hinausragt, noch katastrophalere Stabilitätseigenschaften hat, als die runde Form. Das liegt dran, dass die Volumenverteilung bei der runden Form eben doch



noch etwas günstiger ist, als bei der Trogform.

Aus unseren bisherigen Stabilitätsbetrachtungen könnte man schließen, dass ein Boot einfach nur einen kastenförmigen Spantenriss haben und möglichst breit sein muss, damit wir viel Freude dran haben.--

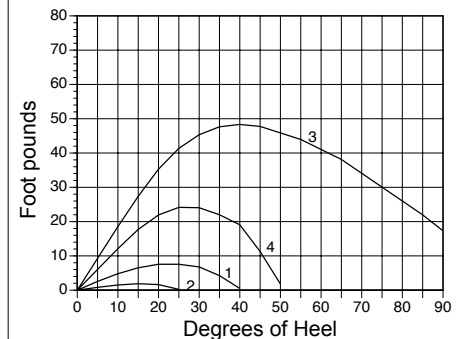


Nordkapp LV

by Valley Canoe Products

Paddler Weight	150 lbs	200 lbs	150 lbs	200 lbs
Cargo weight	none	none	100 lbs	100 lbs
Waterline length	14.38	14.78	15.04	15.04
Waterline beam	1.70	1.72	1.74	1.74
Draft	0.37	0.42	0.46	0.48
Prismatic coefficient	0.49	0.49	0.50	0.50
Block coefficient	0.37	0.38	0.39	0.39
Wetted surface in sq.ft.	17.34	19.18	20.89	20.89
Pounds to immerse one inch	40.85	77.78	79.85	79.85
Effective waterline length			14.91	
Volume, cu.ft.			11.52	
Center of buoyancy, % of length from bow				
Metric equivalents				
Paddler Weight	68.04 kg	90.72 kg	68.04 kg	90.72 kg
Cargo weight	none	none	45.46 kg	45.46 kg
Waterline length	4.38	4.51	4.58	4.58
Waterline beam	0.52	0.53	0.53	0.53
Draft	0.11	0.13	0.14	0.15
Prismatic coefficient	0.49	0.49	0.50	0.50
Block coefficient	0.37	0.38	0.39	0.39
Wetted surface in sq.meters	1.61	1.78	1.94	1.94
Kgs to immerse 2.54 cm	18.53	35.28	36.22	36.22
Effective waterline length			4.54	
Volume cubic meters			0.33	

Righting/Heeling Moments (Fixed-weight)



Stability Curves

1. 150 lb. paddler, no cargo
2. 200 lb. paddler, no cargo
3. 150 lb. paddler, 100 lb. cargo
4. 200 lb. paddler, 100 lb. cargo

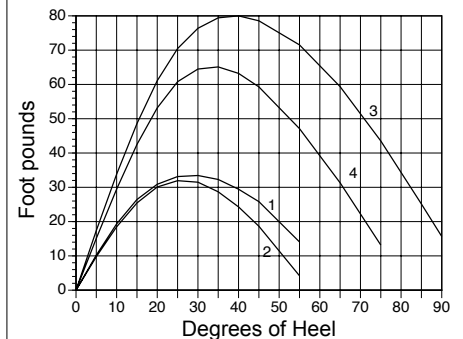
Measurements	
Length overall in decimal ft	17.45
Beam in inches	21.18
Volume in cu.ft.	11.52
Cockpit width in inches	15.63
Cockpit length in inches	31.00
Coaming height forward, inches	12.50
Coaming height aft, inches	8.25
Height of seat in inches	1.44
Weight in pounds	60.25
Metric Equivalents	
Length overall in meters	5.32
Beam in meters	0.54
Volume in kiloliters	0.33
Cockpit width, cm	39.69
Cockpit length, cm	78.74
Coaming height forward, cm	31.75
Coaming height aft, cm	20.96
Height of seat, cm	3.65
Weight in kg	27.33

Kestral 140

by Current Designs

Paddler Weight	150 lbs	200 lbs	150 lbs	200 lbs
Cargo weight	none	none	100 lbs	100 lbs
Waterline length	12.82	12.92	13.01	13.08
Waterline beam	2.07	2.11	2.13	2.14
Draft	0.32	0.37	0.42	0.46
Prismatic coefficient	0.48	0.50	0.51	0.52
Block coefficient	0.36	0.38	0.40	0.42
Wetted surface in sq.ft.	18.09	19.60	20.97	22.24
Pounds to immerse one inch	83.41	87.73	90.90	93.11
Effective waterline length			13.01	
Volume, cu.ft.			14.11	
Center of buoyancy, % of length from bow				
Metric equivalents				
Paddler Weight	68.04 kg	90.72 kg	68.04 kg	90.72 kg
Cargo weight	none	none	45.46 kg	45.46 kg
Waterline length	3.91	3.94	3.96	3.99
Waterline beam	0.63	0.64	0.65	0.65
Draft	0.01	0.11	0.13	0.14
Prismatic coefficient	0.48	0.50	0.51	0.52
Block coefficient	0.36	0.38	0.40	0.42
Wetted surface in sq.meters	1.68	1.82	1.95	2.07
Kgs to immerse 2.54 cm	37.84	39.79	41.23	42.23
Effective waterline length			3.96	
Volume cubic meters			0.40	

Righting/Heeling Moments (Fixed-weight)



Stability Curves

1. 150 lb. paddler, no cargo
2. 200 lb. paddler, no cargo
3. 150 lb. paddler, 100 lb. cargo
4. 200 lb. paddler, 100 lb. cargo

Measurements	
Length overall in decimal ft	13.91
Beam in inches	25.98
Volume in cu.ft.	14.11
Cockpit width in inches	17.38
Cockpit length in inches	37.75
Coaming height forward, inches	12.00
Coaming height aft, inches	9.13
Height of seat in inches	0.63
Weight in pounds	47.25
Metric Equivalents	
Length overall in meters	4.24
Beam in meters	0.66
Volume in kiloliters	0.40
Cockpit width, cm	44.13
Cockpit length, cm	95.89
Coaming height forward, cm	30.48
Coaming height aft, cm	23.18
Height of seat, cm	1.59
Weight in kg	21.43

Geschwindigkeit

Ein Boot soll schnell sein. Das ist ein gängiger Wunsch und ein oft geäußertes Attribut, wenn es um die Bewertung eines Kajaks geht.

Allerdings bin ich schon etliche Boote gefahren und habe dabei die Erfahrung gemacht, dass ein Boot überhaupt nicht schnell ist, es sei denn, ich zwingen es durch heftiges Paddeln dazu. Alles, was ein Boot oder ein Bootstyp macht, ist, sich mehr oder weniger heftig dagegen zu wehren, dass man es auf eine bestimmte Geschwindigkeit bringt.

Wenn mit dem Paddel Wasser nach hinten beschleunigt wird, erzeugt das eine Gegenkraft, die das Boot nach vorne beschleunigt. Das ist das ganze Geheimnis des Paddelns. Würden keine Widerstände auf die Bootshülle wirken, würde diese Beschleunigung dazu führen, dass das Boot über alle Grenzen an Geschwindigkeit zunehmen würde, ein Umstand, der der Erfahrung der allermeisten Kanuten entgegensteht. Dieser Widerstand, den ein Boot dem Versuch, es zu beschleunigen, entgegengesetzt, besteht im wesentlichen aus vier Anteilen.

Reibungswiderstand

Wenn die Bootshülle sich ihre Furche durchs Wasser gräbt, ist eine kleine Schicht Wasser in der „Rauheit“ der Bootssoberfläche gefangen. Da die Moleküle dieser Schicht mit den anderen Wassermolekülen in größerer Entfernung von der Oberfläche in Verbindung stehen, wird sich ihre Vorwärtsbewegung auf die entfernten Moleküle übertragen. Diese viskose Wechselwirkung ist begrenzt auf eine dünne sogenannte Grenzschicht, in der ca. 99% der Reibungsverluste entstehen.

Luftwiderstand

Auf alle Teile des Bootes, der Aufbauten und des Paddlers, die aus dem Wasser oder dem Boot ragen, wirkt ein Luftwiderstand. Selbstverständlich ist für unsere Betrachtungen immer vorausgesetzt, dass Windstille herrscht und die Luftströmung allein durch die Bootsgeschwindigkeit hervorgerufen wird.

Wirbelerzeugung

Gleitet ein Bootsrumpf durch das Wasser, strömt das Wasser an seiner Oberfläche vorbei. Man kann sich genauso gut vorstellen, dass der Bootskörper sich in Ruhe und das Wasser in Strömung befindet. Die Bahnen der strömenden Wasserteilchen nennt man Stromlinien. Man unterscheidet nun zwei grundsätzlich unterschiedliche Arten von Strömungen: laminare und turbulente Strömungen. Bei einer laminaren Strömung liegen die Stromlinien alle fein neben einander, ohne sich zu durchmischen. Bei einer turbulenten Strömung führt die Reibung zwischen den sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit bewegendenden Wasserteilchen zur Bildung von Wirbeln, so dass sich kein geschlossenes Bild von Strömungslinien mehr ergibt. So ein Wirbel stellt eine gewisse Energie dar, die ihm natürlich durch die Bewegung des Bootes verliehen worden ist, und die somit der Bootsgeschwindigkeit entzogen worden ist.

Wellenerzeugung

Wenn sich ein Bootsrumpf durchs Wasser bewegen will, muss er das Wasser, das sich vor ihm befindet, wegschieben. Gleichzeitig entsteht durch die Bewegung hinter dem Rumpf ein Loch, in das das umgebende Wasser hineinläuft. Beide Effekte führe dazu, dass sich Wellen bilden:

die Bug- und die Heckwelle. Wenn man manchmal sieht, wie sich vor und hinter einem Schiff weiße Berge türmen, kann man sich vorstellen, dass es eine erhebliche Energie kostet, diese aufzubauen, Energie, die der Geschwindigkeitssteigerung nicht mehr zur Verfügung steht.

Bei den in der Praxis vorkommenden Geschwindigkeiten spielt der Luftwiderstand eine deutlich untergeordnete Rolle. Ebenso ist der Widerstand durch Wirbelerzeugung an einer wohl dimensionierten Hülle vernachlässigbar und wird meist mit dem zur Wellenerzeugung zusammengefasst. So können wir uns für alles folgende ohne nennenswerten Verlust an Aussagekraft auf den Reibungswiderstand und den Widerstand durch die Wellenerzeugung beschränken.

Reibungswiderstand (Frictional Resistance)

Der Reibungswiderstand wird wesentlich bestimmt durch die Größe der benetzten Oberfläche, die Beschaffenheit der Oberfläche und die Geschwindigkeit des Bootes:

$$R_f \sim C_f * A_w * v^2$$

Hierin sind R_f die Widerstandskraft durch Reibung, C_f der Reibungskoeffizient, A_w die benetzte Oberfläche sowie v die Geschwindigkeit.

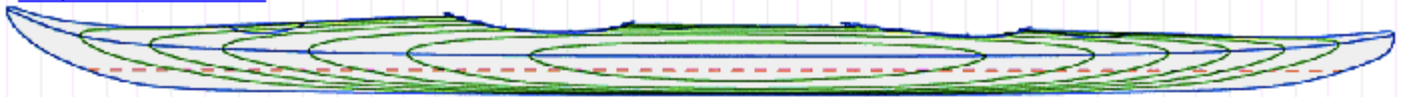
Der Reibungskoeffizient hängt wesentlich von der Glattheit der Oberfläche ab, je glatter sie ist, desto günstiger fällt der Reibungskoeffizient aus.

Die benetzte Oberfläche ist in etwa proportional zur Breite und zur Wurzel der Länge. Um eine günstige Bootsform hinsichtlich des Reibungswiderstands zu erhalten, sollte das Boot also möglichst kurz, vor allem aber möglichst schlank sein.

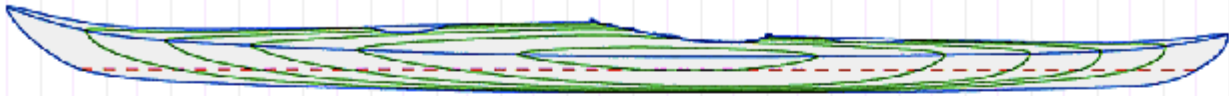
Dass die Abhängigkeit von der Geschwindigkeit quadratisch ist, ist nicht sonderlich verwunderlich, kennt man so einen ähnlichen Zusammenhang doch aus dem Physikunterricht für die kinetische Energie eines Körpers mit der Geschwindigkeit v . Für exakte Betrachtungen ist die Zahl zwei in der Potenz für die Geschwindigkeit allerdings doch etwas hoch gegriffen. Dazu muss man die beiden Anteile der Reibung, den durch die laminare Strömung sowie durch die Turbulenzen hervorgerufene Reibung, genauer betrachten. Für unsere Belange ist die Zahl zwei hinreichend genau.

In der folgenden Abbildung sind seine Reihe von Kajak unterschiedlicher Größe zu sehen. Das reicht vom über sechs Meter langen und fast 70 cm breiten Zweier bis zum viereinhalb Meter langen Einer für kleine und leichte Paddler, der keine 50 Zentimeter an der Wasserlinie breit ist.

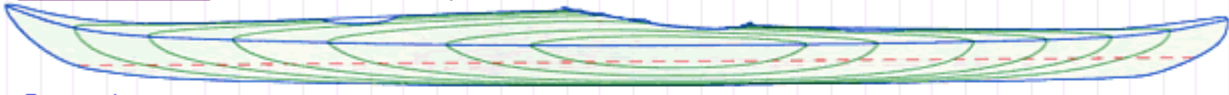
[Cape Ann Double](#)



[Cape Ann Expedition](#)



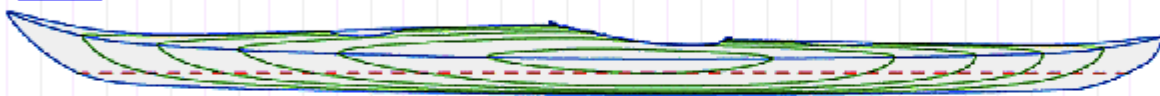
[Cape Ann HV](#) - scaled from Cape Ann



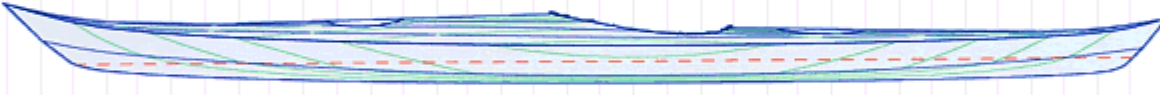
[Cape Ann](#)



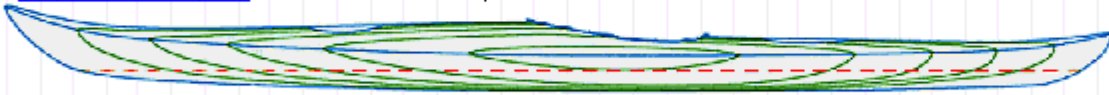
[Storm](#)



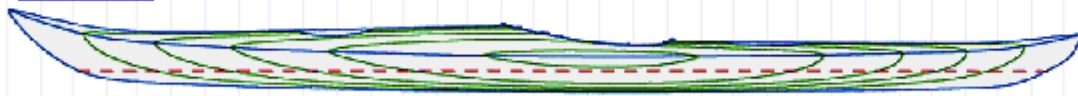
[Cirrus](#) and [Cirrus Hybrid](#)



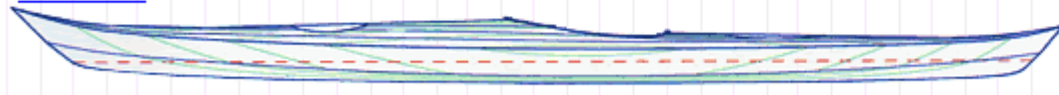
[Expedition Sport](#) - scaled from Expedition



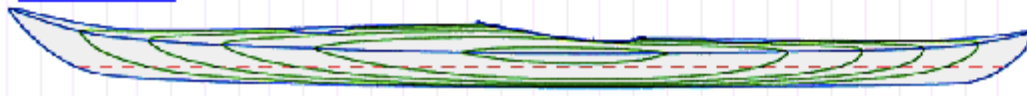
[Storm LT](#) - scaled from Storm

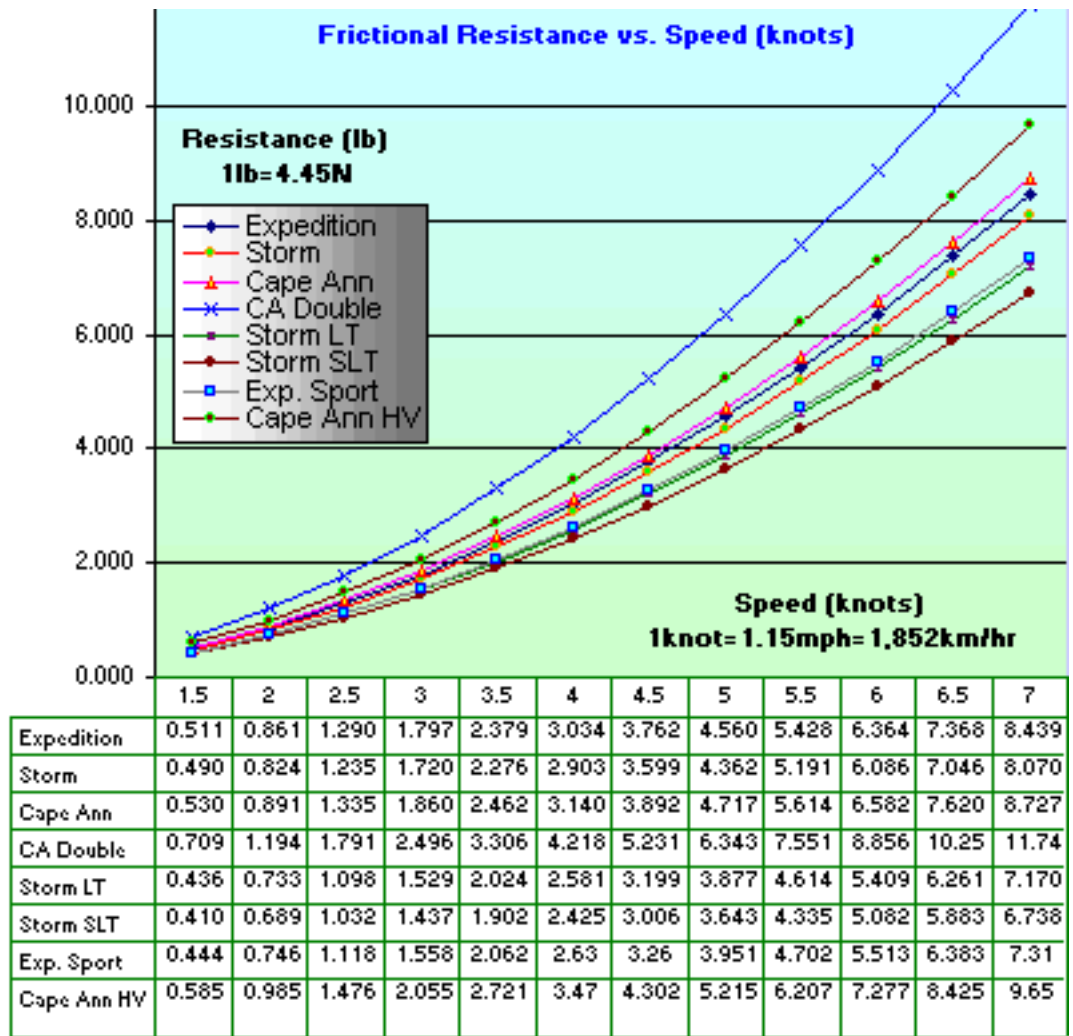


[Cirrus LT](#) - scaled from Cirrus



[Storm SLT](#) - scaled from Storm





Für die nebenstehenden Boote wurde der Reibungswiderstand errechnet und in einer gemeinsamen Graphik dargestellt. Wie zu erwarten, weist der Zweier (CA Double) die Kurve mit dem höchsten Widerstand auf und das kleinste und schmalste Boot den niedrigsten. Wenn man sich allerdings für den Zweier den Wert z.B. bei der Geschwindigkeit 3,5 Knoten (ca 6,5 km/h) ansieht und berücksichtigt, dass diese Kraft ja auf zwei Paddler aufgeteilt wird, dann erkennt man, warum ein Zweier leicht jeden Einer aussticht, wenn etwa gleichstarke Paddler in den Booten sitzen.

Wir merken uns für den Augenblick, dass der Reibungswiderstand bei einer Geschwindigkeit von vier Knoten auf der verwendeten Skala in etwa bei drei liegt.

Widerstand durch Wellenerzeugung (Wave Making Resistance / Residual Resistance)

Die zweite Quelle des Widerstandes gegen eine Beschleunigung ist die der Wellenerzeugung durch das Boot. Wenn das Boot sich seine Furche pflügt, wird am Bug Wasser beiseite geschoben, was dazu führt, dass sich eine Welle formt, die sich vom Boot fortbewegt. Auch am Heck entsteht eine Welle durch das Loch, das die sich fortbewegende Bootshülle hinterlässt und in die das umgebende Wasser einströmt. Dadurch entsteht hinter dem Boot ein Unterdruck, der das Boot quasi zurücksaugt. Beide Wellen sind sichtbares Zeichen für die Tatsache, dass Energie aus der Vorwärtsbewegung vom Boot fortgetragen wird. Und natürlich steht die Energie, diese Wellen zu erzeugen, nicht mehr der Beschleunigung des Bootes zur Verfügung.

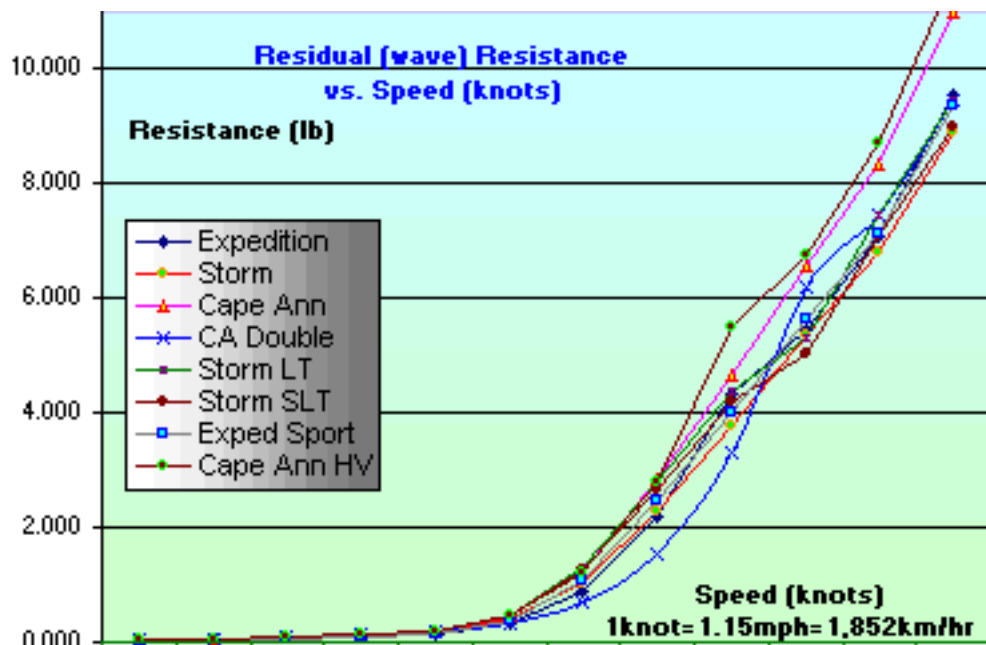
Die mathematischen Zusammenhänge beim Widerstand durch Wellenerzeugung entziehen sich leider weitgehend einer analytischen Betrachtung, so dass zu numerischen Näherungsverfahren gegriffen werden muss. Ein üblicher Ansatz ist die sogenannte Taylor-Reihenentwicklung, der das Prinzip zu Grunde liegt, dass man jeden Kurvenverlauf (hier den Widerstand in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit) durch eine geeignete Summe einfacher Potenzkurven annähern kann. Wenn man dieses Verfahren an in Schlepptanks gewonnenen Messdaten orientiert, findet man vereinfacht etwa folgenden Zusammenhang:

$$R_w \sim C_4 * (v / \sqrt{L})^4 + C_3 * (v / \sqrt{L})^3 + C_2 * (v / \sqrt{L})^2 + C_1 * (v / \sqrt{L}) + C_0$$

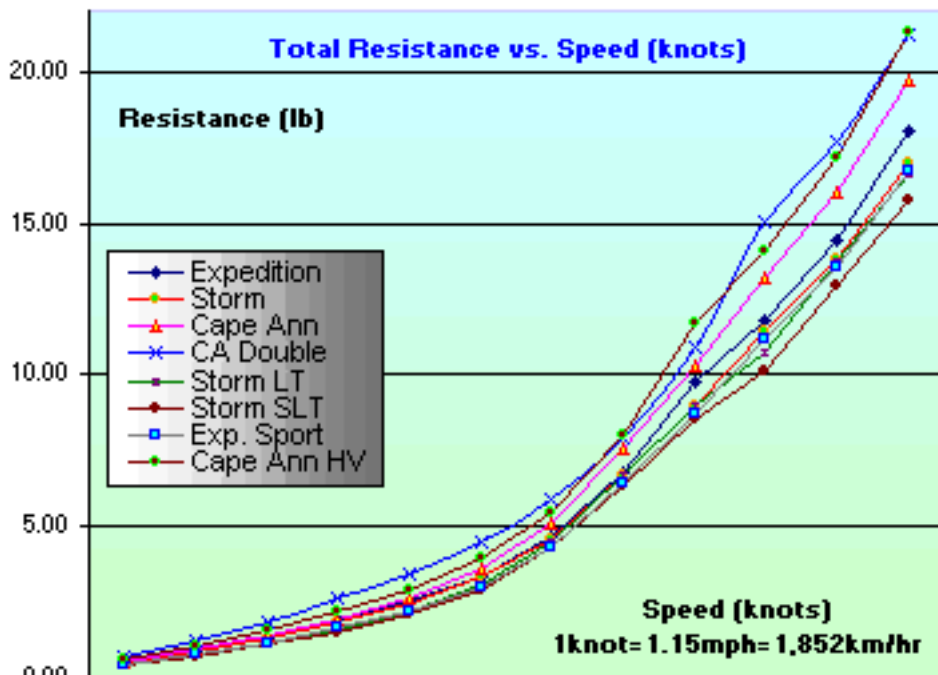
Das heißt in kurzen Worten, dass der Widerstand durch Wellenerzeugung in der vierten Potenz mit der Geschwindigkeit wächst! Wie kann es bei einer so massiven Aussage dieser Formel dann angehen, dass man sein Boot überhaupt fortbewegen kann? Das liegt daran, dass die Koeffizienten bei den höheren Potenzen so winzig klein sind, dass man sie anfänglich garnicht spürt. Wächst die Geschwindigkeit aber erst einmal über eine gewisse Größe, gibt es kein Halten mehr - die Potenzen vergrößern den Widerstand über alle Maßen.

Und noch etwas erkennt man leicht an der länglichen Formel: Je größer die Länge des Schiffes ist, desto geringer ist der Wellenwiderstand bei einer gegebenen Geschwindigkeit! Das ist doch die Erkenntnis, die uns schon immer dämmerte und auf die wir so lange gewartet haben! Dazu später mehr.

Ein Blick auf die Werte der Kurve zeigt, dass bei dem vorhin erwähnten Reibungswiderstand von etwa drei bei einer Geschwindigkeit von vier Knoten hier lediglich ein Wert von eins als Wellenwiderstand gegenübersteht! Damit ist auch klar, dass die Kurve des Gesamtwiderstandes bei Geschwindigkeiten unterhalb von vier Knoten praktisch alleine durch den Verlauf des Reibungswiderstandes bestimmt wird. Erst bei noch höheren Geschwindigkeiten macht sich der Einfluss des Wellenwiderstandes bemerkbar.

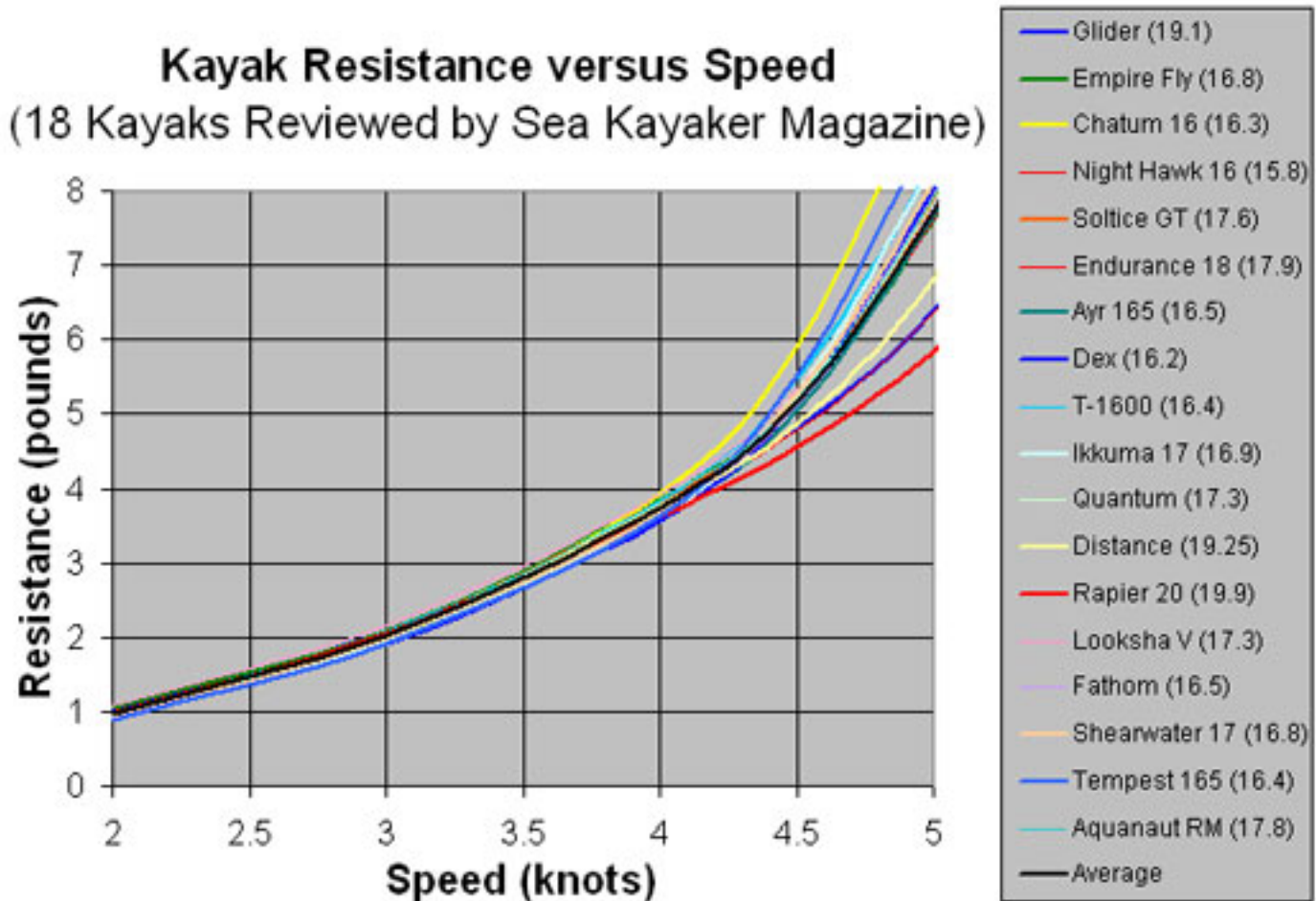


	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
Expedition	0.021	0.045	0.073	0.098	0.152	0.333	0.867	2.185	4.341	5.436	7.066	9.574
Storm	0.024	0.052	0.081	0.101	0.177	0.429	1.012	2.290	3.753	5.346	6.808	8.919
Cape Ann	0.024	0.051	0.081	0.108	0.185	0.443	1.211	2.844	4.671	6.585	8.365	10.99
CA Double	0.025	0.059	0.099	0.141	0.166	0.310	0.680	1.553	3.317	6.189	7.469	9.467
Storm LT	0.023	0.048	0.074	0.093	0.187	0.474	1.312	2.805	4.402	5.325	7.466	9.458
Storm SLT	0.021	0.045	0.070	0.089	0.173	0.446	1.265	2.669	4.180	5.057	7.089	8.980
Exped Sport	0.019	0.041	0.066	0.089	0.153	0.376	1.057	2.467	3.989	5.638	7.149	9.391
Cape Ann HV	0.028	0.061	0.097	0.126	0.205	0.474	1.198	2.805	5.479	6.765	8.706	11.62



	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
Expedition	0.53	0.91	1.36	1.90	2.53	3.37	4.63	6.75	9.77	11.8	14.4	18.0
Storm	0.51	0.87	1.31	1.82	2.45	3.33	4.61	6.65	8.94	11.4	13.8	16.9
Cape Ann	0.55	0.94	1.42	1.97	2.65	3.58	5.10	7.56	10.2	13.1	15.9	19.7
CA Double	0.73	1.25	1.89	2.64	3.47	4.53	5.91	7.90	10.8	15.0	17.7	21.2
Storm LT	0.46	0.78	1.17	1.62	2.21	3.06	4.51	6.68	9.02	10.7	13.7	16.6
Storm SLT	0.43	0.73	1.10	1.52	2.07	2.87	4.27	6.31	8.51	10.1	12.9	15.7
Exp. Sport	0.46	0.78	1.18	1.64	2.21	3.00	4.31	6.41	8.69	11.1	13.5	16.7
Cape Ann HV	0.61	1.04	1.57	2.18	2.92	3.94	5.5	8.02	11.6	14.0	17.1	21.2

Auch die folgende Graphik zeigt dieses Phänomen noch einmal sehr deutlich. Darin sind die Widerstandskurven von 18 Kajaks dargestellt, die im Laufe der Jahre vom Sea Kayaker Magazine getestet worden sind. Das sind sehr unterschiedliche Boote von ca 4,5 Meter bis fast 6 Meter Länge. Man erkennt, dass bis zur Geschwindigkeit von 4 Knoten praktisch kein Unterschied im Widerstand zu erkennen ist. Erst bei noch höheren Geschwindigkeiten fächern die Kurven auf und die extrem langen Boote zeigen einen deutlichen Vorteil.



Also ist es doch erstrebenswert, ein möglichst langes Boot zu haben, um möglichst schnell paddeln zu können? Betrachten wir die letzte Graphik, dann sind wir doch bei fünf Knoten und oberhalb mit dem sechs Meter langen Rapier von Valley besser bedient, als mit irgendeinem anderen kürzeren Boot. Das stimmt natürlich - setzt aber voraus, dass wir in der Lage sind, dauerhaft die Kraft aufzubringen, die erforderlich ist, um das Boot auf fünf Knoten zu halten.

In der folgenden Tabelle sind die Widerstandswerte einiger Boote aufgeführt - einmal bei einer Geschwindigkeit von vier Knoten (~7,4 km/h) und einmal bei fünf Knoten (~9,3 km/h). Die Tabelle ist sortiert nach der Größe des Widerstandes bei 5 Knoten.

In der letzten Spalte sieht man die Kraftsteigerung, die notwendig ist, um das Kajak mit fünf statt mit vier Knoten zu bewegen. Dabei sieht man, dass ich mit meinem Boot (Nordkapp H20) für fünf Knoten mehr als doppelt soviel Kraft aufbringen muss. Aber bei vier Knoten brauche ich immer noch weniger Kraft als bei dem in dieser Tabelle als schnellstes aufgeführtem Boot!

Das macht überaus deutlich, dass man ohne ein entsprechendes Training, das Potential seines Bootes bei Geschwindigkeiten über vier Knoten garnicht ausnutzen kann. Das ist überaus tröstlich, denn es bedeutet, dass man nicht unbedingt ein teures Boot braucht, um vorne mitpaddeln zu können.

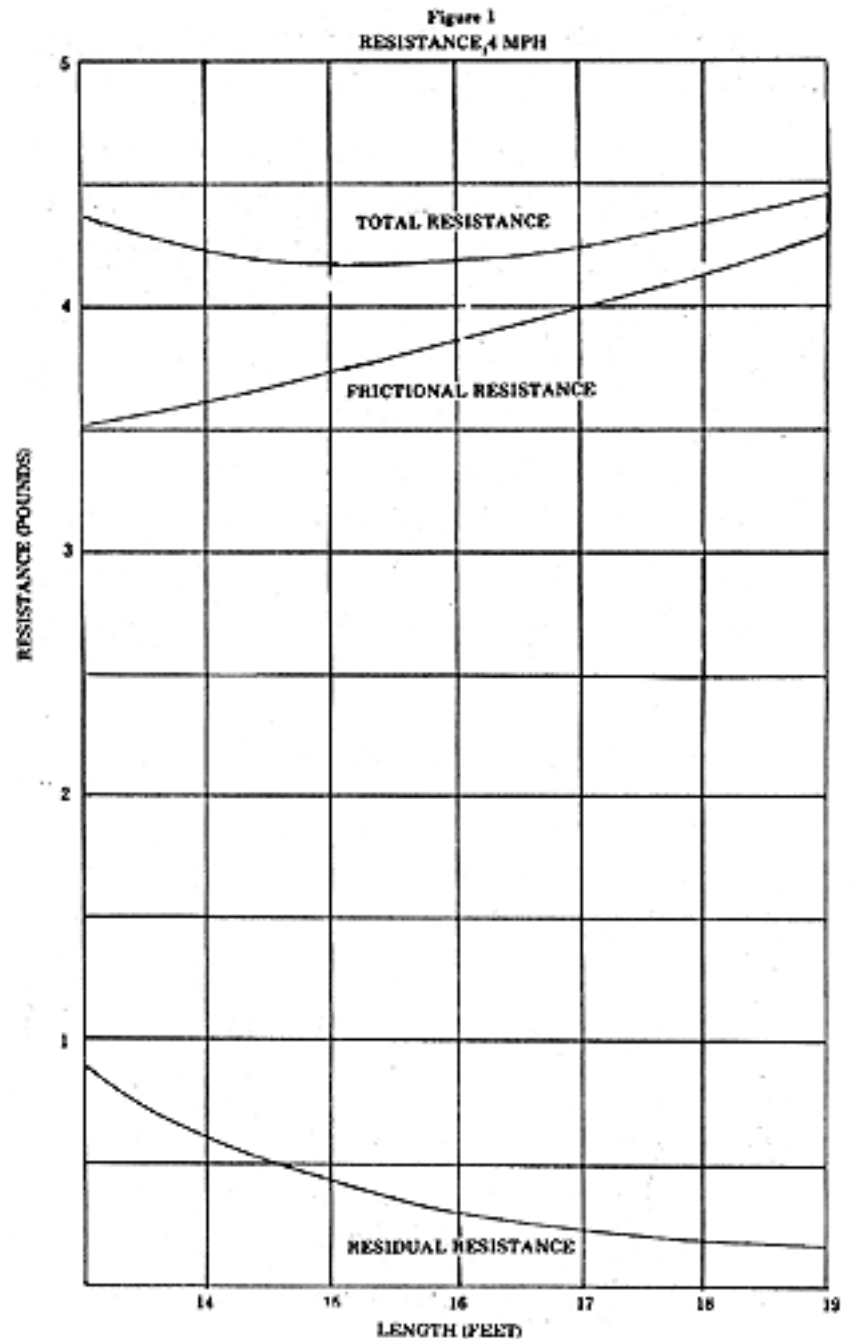
Bootstyp	Maße (LxB;Vol.)	Wasser widerstand bei 4 kn (7,4 km/h)	Wasser- widerstand bei 5 kn (9,3 km/h)	erforderliche Kraft- steigerung** in %
FW 2000 (Moskito) Nelo (Portugal)	562x44 cm ca. 301 Liter	1,70 kg	2,89 kg	70 % / 0 %
Looksha II Necky (CDN)	610x51 cm ca. 392 Liter	1,68 kg	2,90 kg	72 % / 0,3 %
Extreme Current Designs (CDN)	577x55 cm ca. 389 Liter	1,59 kg	2,93 kg	84 % / 1,4 %
Expedition Current Designs (CDN)	571x57 cm ca. 408 Liter	1,63 kg	2,95 kg	81% / 2,1 %
Inuk Kirtan (GB)	550x51 cm ca. 315 Liter	1,63 kg	2,95 kg	81% / 2,1 %
Viviane Kajak-Sport (FIN)	580x55 cm ca. 392 Liter	1,66 kg	2,99 kg	80 % / 3,5 %
Point K1XP Point 65°N (S)	549x53 cm ca. 334 Liter	1,67 kg	3,11 kg	86 % / 7,6 %
Epic (USA) Wilderness	PE: 523x56 cm ca. 336 Liter	1,70 kg	3,14 kg	85 % / 8,7 %
Barracuda Prijon (D)	PE: 508x56 cm ca. 330 Liter	1,66 kg	3,23 kg	95 % / 11,8 %
Zoom Nimbus (CDN)	533x55 cm ca. 336 Liter	1,62 kg	3,24 kg	100 % / 12,1 %
Artisan Kajak-Sport (FIN)	555x56 cm ca. 343 Liter	1,61 kg	3,25 kg	101 % / 12,5 %
Khatsalano S Feathercraft (CDN) (Faltboot)	532x60 cm ca. 313 Liter	1,63 kg	3,27 kg	101 % / 13,1 %
Aquanaut (GFK) Valley (GB)	537x55 cm ca. 330 Liter	1,69 kg	3,31 kg	96 % / 14,5 %
Touryak (PE) Prijon (D)	463x61 cm ca. 380 Liter	1,72 kg	3,37 kg	96 % / 16,6 %
Kodiak Prijon (D)	PE: 507x58 cm ca. 381 Liter	1,67 kg	3,38 kg	102 % / 17,0 %
Magellan Dagger (USA)	PE: 508x58 cm ca. 371 Liter	1,65 kg	3,49 kg	112 % / 20,8 %
Yukon Eski Prijon (D)	500x57 cm ca. 345 Liter	1,66 kg	3,49 kg	110 % / 20,8 %
Nordkapp H₂O Valley (GB)	547x54 cm ca. 306 Liter	1,60 kg	3,51 kg	119 % / 21,5 %
K1VR Point 65°N (S)	508x56 cm ca. 355 Liter	1,70 kg	3,53 kg	108 % / 22,1 %
Romany Explorer Nigel Dennis (GB)	533x55 cm ca. 340 Liter	1,65 kg	3,55 kg	115 % / 22,8 %
K1R Point 65°N (S)	508x56 cm ca. 394 Liter	1,65 kg	3,56 kg	116 % / 23,2 %
Solstice GT (LV) C. Designs (CDN)	536x62,5 cm ca. 392 Liter	1,74 kg	3,56 kg	104 % / 23,2 %
Eclipse Perception (USA)	PE: 521x57 cm ca. 375 Liter	1,97 kg	3,58 kg	82 % / 23,9 %
Aquanaut (PE/PES) Valley (GB)	PE: 522x57 cm ca. 341 Liter	1,75 kg	3,59 kg	105 % / 24,2 %
Cortez 16.5 Dagger (USA)	PE: 503x56 cm ca. 373 Liter	1,73 kg	3,60 kg	108 % / 24,6 %
Nordkapp LV Valley (GB)	532x54 cm ca. 294 Liter	1,60 kg	3,63 kg	127 % / 25,6 %
Sea Lion Perception (USA)	PE: 518x59 cm ca. 368 Liter	1,81 kg	3,63 kg	101 % / 25,6 %
Viking Kajak-Sport (FIN)	498x55 cm ca. 302 Liter	1,65 kg	3,64 kg	120 % / 26,0 %

Wenn man sich einmal in Erinnerung ruft, mit welcher Geschwindigkeit wir normalerweise den größten Teil der Zeit unterwegs sind, dann muss man sich eingestehen, dass die wenigsten über die Kraft verfügen und kaum jemand in der Lage ist, eine Geschwindigkeit von fünf Knoten über die Distanz einer typischen Seekajak-Tour zu halten.

Wenn man dann demütig annimmt, dass man sich überwiegend mit einer Geschwindigkeit von vier Knoten fortbewegt, kann man eine Graphik erstellen, in der der Reibungswiderstand und der Wellenwiderstand in Abhängigkeit von der Rumpflänge aufgetragen sind. Genau das ist in der nächsten Graphik dargestellt. Man erkennt, dass der Reibungswiderstand mit zunehmender Bootslänge zunimmt - die benetzte Fläche wird ja schließlich größer.

Der Wellenwiderstand nimmt bei konstanter Geschwindigkeit mit zunehmender Bootslänge ab - da stand ja die Wurzel der Länge überall im Nenner. Wenn man dann die Kurve des des Gesamtwiderstandes betrachtet, stellt sich heraus, dass sie ein Minimum hat. Das heißt nichts anderes, als dass es für eine gegebene Geschwindigkeit eine optimale Rumpflänge gibt, bei der der Gesamtwiderstand seinen niedrigsten Wert hat. Jedes längere Boot - bei ansonsten gleichem Design - hat bei dieser Geschwindigkeit einen höheren Widerstand und ist nur mit größerer Kraft auf dieser Geschwindigkeit zu halten.

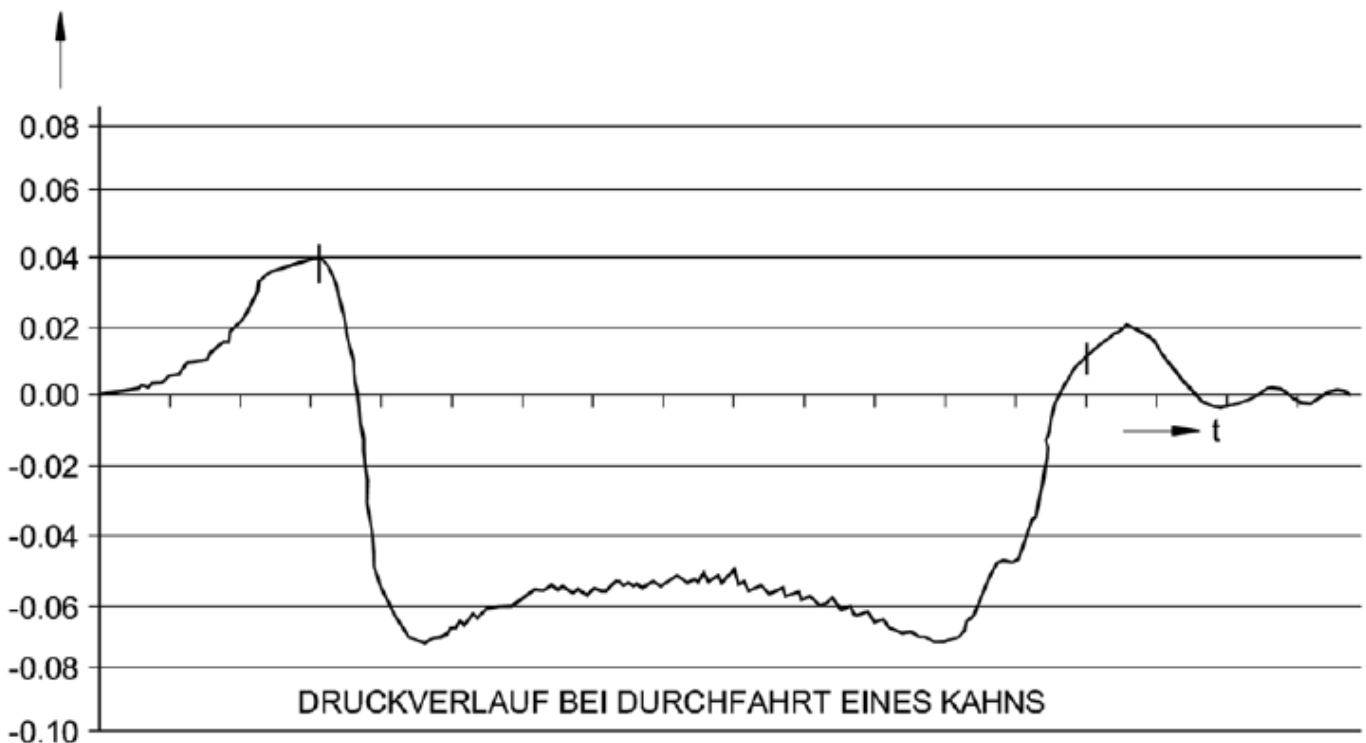
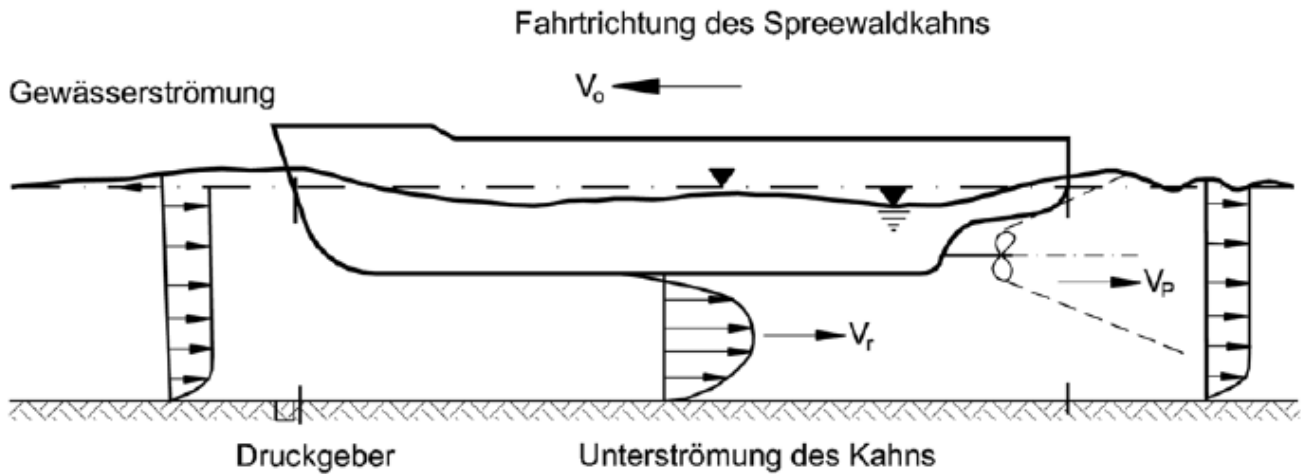
Und wenn man sich dann in der Graphik den absoluten Wert der optimalen Länge bei vier Knoten ansieht, dann überrascht es nicht, dass die meisten Seekajaks in etwa fünf Meter lang sind!



Just one of the designer's dilemmas. The longer hull runs with more skin friction, but less form resistance. No matter what the choice, you're wrong for some paddlers.

Flachwasser-Effekt

Zum Schluss möchte ich noch auf einen speziellen hydrodynamischen Effekt eingehen, weil gerade dieser uns sehr häufig begegnet und zu schaffen macht. Er beschreibt die Vorgänge, die ablaufen, wenn ein Schiff in ein Gewässer kommt, dessen Tiefe nicht mehr unermesslich groß gegenüber dem Tiefgang des Schiffes ist. Dadurch, dass die Bootshülle das Wasser unter sich zwingt, hat es nur noch einen eingeschränkten Querschnitt zur Verfügung, um von vorne nach hinten zu strömen. Dabei meldet sich dann die eingangs kurz gezeigte Kontinuitätsgleichung zu Wort und setzt eine Kettenreaktion in Gang:



Zuerst zwingt sie das Wasser unter dem Boot dazu, schneller zu strömen, als es in unendlich tiefen Wasser der Fall wäre. Das wiederum hat nach Bernoulli einen Druckabfall zur Folge, der als Reaktion das Schiff tiefer eintauchen lässt. Dadurch wird natürlich zum einen die benetzte Fläche deutlich größer, zum anderen natürlich auch die erzeugten Wellen am Bug und am Heck. Am Ende kann dann so eine Katastrophe stehen wie 1987 beim Schiff „Harald of Free Enterprise“:

Den letzten Untersuchungsergebnissen nach kenterte das Schiff durch eine tragische Verkettung

mehrerer Faktoren. Das offene Bugtor allein hätte auch bei voller Fahrt das Schiff mit anzunehmender Sicherheit nicht zum Kentern gebracht, da die Bugwelle nicht an die Unterkante des Auto-decks heranreichte. In der Vergangenheit fuhren Schiffe der Reederei auch mit offenen Bugtoren, ohne dass dies zu Unfällen führte. Um im Hafen von Zeebrügge mit seinen niedrig liegenden Laderampen festmachen zu können, musste das Schiff die Ballasttanks fluten, um es auf die Höhe der Hafenanlagen abzusinken. Durch die niedrige Wassertiefe in Hafennähe entstand während der Fahrt eine Sogwirkung, die das Schiff nach unten zog und erst so den Wassereintritt im Auto-deck ermöglichte.

