

Swimming Technique

Grundläggande kunskaper inom hydrodynamik

Prepared by:

Johan Wallberg, Svenska Simförbundet, Sweden

Inledning

Att simma är förmodligen det närmaste en människa kommer till att flyga utan att använda några hjälpmedel. Vi använder oss av samma mekanik som används inom aerodynamiken men att beskriva hur ett flygplan kan flyga är mycket lättare än att analysera simteknik. Vid simning rör vi oss framåt genom vattnet genom att skapa krafter och övervinna krafter och det kan väldigt förenklat uttryckas enligt:

$$F_{\text{framåtdrivning}} - F_{\text{motstånd}} = \text{Massa} * \text{Acceleration}$$

I formeln ovan tar vi endast hänsyn till de resulterande longitudinella krafterna men den visar tydligt att för att simma fortare behöver simmaren antingen öka framåtdrivningsförmågan, och/eller minska motståndet. Detta är ganska självklart men mindre självklart är hur simmaren lyckas med detta. Dessutom är det väldigt sällan en simmare genererar kraft i den exakta rörelseriktningen. Därför måste kraftkomponenter i den aktuella rörelseriktningen räknas utifrån den totala framåtdrivningen. Detta är väldigt komplicerat eftersom flera kroppsdelar rör sig samtidigt och i olika riktningar. Samma sak gäller för motståndskrafter. Vi skiljer på framåtdrivning och motstånd men egentligen är det samma sak. Vi skapar framåtdrivning med hjälp av motstånd som uppstår när vi trycker mot vattnet. Det totala motståndet kan delas upp i tryckkraft (engelskans dragforce) och lyftkraft (engelskans liftforce).

Tryckkraft: agerar i direkt motsatt riktning till rörelsen

Lyftkraft: agerar vinkelrät med rörelsens riktning.

Resultanten av dessa två blir det totala motståndet. I enklare modeller, till exempel en helt nedsänkt cylinder i konstant flödes hastighet, går det lätt att räkna ut koefficienterna för lyftkraft respektive tryckkraft enligt formler nedan där F_D är motståndskraft och F_L är lyftkraften.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \qquad C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \qquad (\text{ekvation 1 och 2})$$

Ekvation 1 och 2 visar uträkning av koefficienterna för tryckkraft respektive lyftkraft där ρ är vätskans densitet, V är flödes hastigheten på vätskan i relation till kroppen (exempelvis simmaren), A är den blötlagda arean på föremålet.

Under verkliga simförhållanden gäller ekvationen endast som en approximation då flödet kring simmaren är ostabilt, både accelererande och retarderande, samt att simmaren rör sig både över, under och genom vattenytan och detta påverkar både vågmotstånd (orsakat av störningar av vågformationer) och vattnets densitet (orsakat av bubblor). Men ovanstående ekvation används ofta i litteraturen för att kunna beskriva att simmarens motstånd är proportionellt med v^2 (hastigheten i kvadrat). Den kraft vi kommer fokusera på är framför allt tryckkraften. För att kunna förstå viktiga begrepp och enklare uträkningar av hydrodynamiska krafter är det bra med grundläggande kunskaper inom flödesmekanik.

Flödesmekanik

För att kunna analysera en rörelse i vattnet är det nödvändigt att förstå grunderna i flödesmekanik. För de flesta läsare kommer det vara mycket nya begrepp men det är ett nödvändigt ont att förstå grunderna. Så inledningsvis kommer en kort beskrivning kring vanliga begrepp och därefter generella parametrar och kategorier inom flödesmekaniken:

Vätska: materia i flytande form. I vårt fall kommer det vara vatten, men ordet vätska kommer att användas synonymt med vatten i beskrivning av begreppen nedan.

Densitet: är ett mått av ett ämnes **täthet**, således massa per volymenhet. Ju högre densitet ett ämne har desto större är mängden massa per volymenhet och definieras med enheten ρ (uttalas rå). Vattnets densitet är relativt konstant och skiftar endast marginellt med vattentemperaturen men kan ändras när luftbubblor fastnar i vattenmassan exempelvis vid benspark eller vid armtaget.

Viskositet: varje typ av vätska har olika mängder resistans mot deformation. Mätningen av det motståndet kallas viskositet. Ett bra exempel på detta är skillnaden i viskositeten hos vatten och honung. Vatten anses vara "tunt" och ha låg viskositet medan honungen är "tjock" och har hög viskositet. Det finns två sätt att rapportera eller mäta en vätskas viskositet. Det kan antingen uttryckas som **dynamisk viskositet** eller **kinematisk viskositet**.

Dynamisk viskositet (absolut viskositet): är det kvantitativa uttrycket av vätskans motståndskraft mot flöde (skjuvning) och enheten för detta är den grekiska bokstaven μ (μ).

Kinematisk viskositet: är den dynamiska viskositeten dividerat med dess densitet. Kinematisk viskositet symboliseras av den grekiska bokstaven ν (ν).

Tryck: är kraft per areaenhet som verkar i varje punkt inuti vätskor och även vinkelrätt mot angränsande kroppars ytor. Enheten för tryck är *pascal* ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ newton per kvadratmeter, N/m}^2$).

Hydrostatiskt tryck: avses det tryck som en vätska (i vårt fall vatten) orsakar. Alla punkter under ytan måste upprätthålla vikten av vätskan ovanifrån och är proportionell med djupet.

Hydrostatisk lyftkraft är en konsekvens av det hydrostatiska trycket och är i sin tur densamma som det sammanlagda trycket från den undanpressade vattenmassan.

Flöde: är ett mått på en kvantitet som passerar en viss yta under en viss tid. Flödet har en riktning och en hastighet. Flödet kan vara laminärt (följer parallella linjer utan att blandas) eller turbulent (kaosartad och oregelbunden).

Turbulens: är ett samlingsbegrepp för att beskriva en vätskas flödesmönster. Vid turbulens bildas relativt stora virvlar som efter hand bildar flera mindre virvlar som i sin tur så småningom upplöses, varigenom deras rörelseenergi blir till värme. Turbulenta flöden är slumpmässiga i den betydelsen att det inte går att förutse vilken hastighet ett flöde ska ha på en viss plats vid en viss tidpunkt. Däremot går det att beskriva det statistiskt. Turbulens kan mätas i dess **intensitet** och **längden** av turbulensen. Vid simning eftersträvas lägsta möjliga hydrodynamiska motstånd för att ha bästa rörelseekonomin. Ju mer turbulent flödet blir runt simmaren, desto större rörelsemängd går från simmaren till vattnet och skapar virvlar runt och bakom simmaren.

Dimensionslösa parametrar inom flödesmekanik.

Det finns flera dimensionslösa parametrar som spelar en viktig roll inom flödesmekaniken. Några av dessa är applicerbara inom simning och de innehåller alla parametern karaktäristisk längd (L) som beskriver storleken på det objekt som är inblandat, exempelvis längden hos en simmare eller bredden på handen. Nedan beskrivs fyra parametrar med betydelse för simtekniken:

Reynolds tal: Reynoldstalet (Re) kan beskrivas som kvoten mellan tröghetskrafter och viskösa krafter i en vätska. Vid låga Reynoldstal flödar en vätska laminärt och vid höga Reynoldstal flödar den turbulent. Reynoldstal definieras som

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{v L}{\nu} \quad (\text{ekvation 3})$$

där ρ är vätskans densitet, v är flödeshastigheten på vätskan i relation till kroppen (exempelvis simmaren), L är karaktäristisk längd, μ är vätskans dynamiska viskositet och ν är vätskans kinematiska viskositet

Reynolds tal kan komma i betydelse inom simning när man exempelvis undersöker olika frekvenser vid fjärilsimskickar under vattnet.

Exempel: Vid fjärilskicken är fotens hastighet $5,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ och fotens bredd $0,12 \text{ m}$. Vattnet är 25 grader.

$$Re = \frac{v L}{\nu} = \frac{5,5 * 0,12}{0,891 * 10^{-6}} = 7,407 * 10^5 \quad (\text{ekvation 4})$$

Froude tal: är en dimensionslös parameter som är signifikant för att beskriva flödesmekaniken kring ett objekt som är nära vattenytan eller passerar genom. I simning är det viktigt för att förklara vågmotstånd och definieras:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (\text{ekvation 5})$$

där v är vätskans flödeshastighet i relation till objektet, g är gravitationskraften och L är karaktäristisk längd. Exempel: En simmare glider i streamlineposition i $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ och har en längd från fingerspetsarna till tårna på 2,1 m.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} = \frac{1}{\sqrt{9,8146 \cdot 2,1}} = 0,22 \quad (\text{ekvation 6})$$

Accelerations tal är en dimensionslös parameter som kan korreleras till motstånd vid acceleration eller retardation och definieras som:

$$\delta = \frac{aL}{v^2} \quad (\text{ekvation 7})$$

där a är den konstanta accelerationen ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$), L är karaktäristisk längd och v är den genomsnittliga hastigheten under accelerationen.

Strouhal tal: är en dimensionslös parameter som är viktig när det förekommer någon typ av frekvens som påverkar vätskans flöde, exempelvis vid fjärilskicken, och definieras som:

$$S = \frac{nL}{v} \quad (\text{ekvation 8})$$

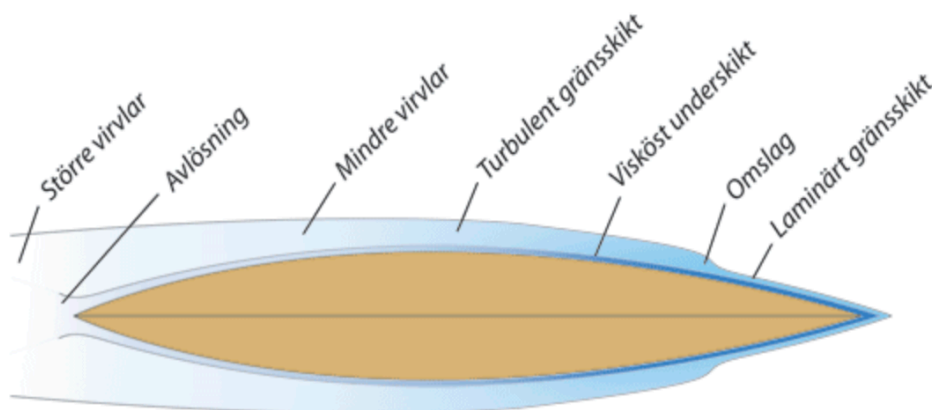
där n är frekvensen på den cykliska rörelsen, L är karaktäristisk längd och v är hastigheten.

Viktiga begrepp inom hydrodynamik.

Gränsskikt (engelskans *boundary layer*)

Med gränsskikt menas de lager vatten som är närmast kroppen och handlar om friktionsmotstånd. Oavsett hur blankpolerad och slät finish ett objekt har så kommer vattnet allra närmast objektets yta alltid att stå helt still i förhållande till objektet. Vattenmolekylerna här är som fastlimmade mot ytan, som alltså drar med sig ett tunt lager vatten. Ett friktionsmotstånd uppstår sedan mellan detta tunna lager vatten och nästa lager vatten som glider utanför. Detta andra lager påverkas i sin tur av nästa lager o.s.v ända tills fartskillnaden har utjämnats mellan vattenlagren. Friktionen mellan dessa vattenlager är proportionell i förhållande till takten som vattenhastigheten ökar med avståndet från skrovet. *Gränsskiktet* kan delas in i två olika tillstånd, **laminärt** eller **turbulent**. Ett laminärt gränsskikt innebär tunna vattenskiikt som påverkar varandra endast genom molekyllära bindningar som är ganska svaga, dvs. låg friktion mellan vattenlagren. Ett turbulent gränsskikt har starkare bindningar genom vattnets virvlande effekt. Friktionen blir högre då hastigheten på flödet ökar snabbare med avståndet från skrovet, vilket är fallet i det turbulenta gränsskiktet. Gränsskiktet status är ett nyckelbegrepp inom flödesmekaniken och har stor påverkan på storleken på motståndet ett objekt skapar.

Vid en strömlinjeformad kropp med slät yta kommer gränsskiktet vara laminärt till en början för att sedan bli mer turbulent. Med turbulens ökar friktionen och till sist kommer gränsskiktet att separera från objektet, detta kallas avlösning. Vid avlösningpunkten skapas ett undertryck som ger ett motstånd. Bild 1 visar flödet kring en strömlinjeformad kropp med slät yta där flödet går från laminärt till turbulent för att sedan separera från kroppen. En simmares kropp är inte strömlinjeformad på något sätt (även fast vi försöker) så flödet övergår från laminärt till turbulent och avlösning sker relativt tidigt.



Hydrodynamiskt motstånd

Det hydrodynamiska motståndet under simning kan delas in i två kategorier, aktivt och passivt hydrodynamiskt motstånd. **Passivt motstånd** är när simmaren befinner sig i en statiskt position, exempelvis under streamline vid vändningar och start. **Aktivt motstånd** vilket är motståndet som uppstår när simmaren utför aktiva rörelser för att skapa framåtdrivning. Simmarens aktiva motstånd vore såklart oerhört intressant att kunna mäta men idag finns endast ett fåtal tekniker och alla har sina för och nackdelar. Di Prampero et al (1974) har försökt uppskatta simmarens aktiva motstånd genom att mäta syreupptaget vid simning med och utan ett känt extra motstånd. Kolmogorov och Duplisheva (1992) uppskattade aktivt motstånd genom att mäta skillnaden i maximal simhastighet mellan fri simning och simning bogserandes med ett föremål med känt motstånd. Denna metod används också inom Svenska simförbundet för att uppskatta motståndet under maximal simning och har fördelen att den kan appliceras på alla fyra simsätten och inte kräver enorma resurser. Toussaint et al. utvecklade en metod där direkt mätning av motståndet genom att simmaren använde sig av små plattor på armtagsavstånd och drog sig fram genom vattnet.

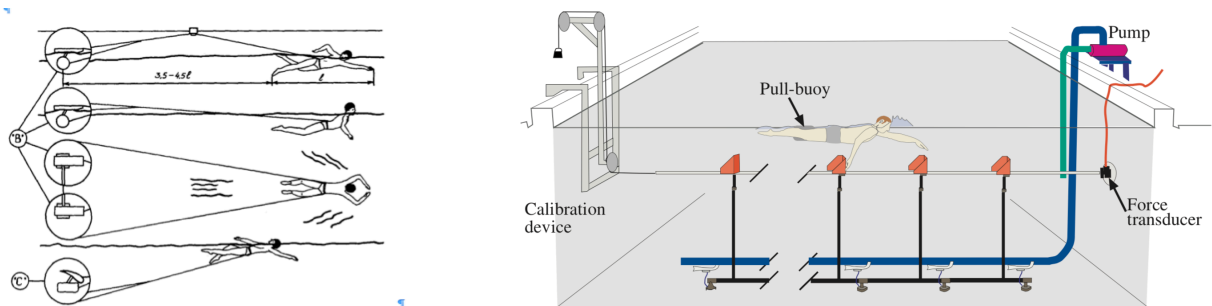


Bild 2 visar: VPM metoden (Kolmogorov och Duplisheva) och MAD-systemets uppbyggnad (Toussaint et al.)

För en tränare i klubbmiljö finns oftast inga av dessa metoder tillgängliga utan allt som oftast får det visuella och enklare indirekta verktyg som simhastighet och distans per armtag fungera som utvärdering av simtekniken. Med grundkunskaper inom hydrodynamik kan man resonera kring vad som orsakar eventuella förändringar av motstånd och på så sätt också förstå följderna av teknik förändringar. Även om det inte finns möjlighet att kvantifiera motståndet är det fortfarande en stor vinst att förstå vad som orsakar motståndet och vilka faktorer som påverkar storleken på motståndet. I följande kapitel kommer vi gå igenom hydrodynamikens grunder och vilka faktorer som påverkar storleken på motståndet.

Hydrodynamiskt motstånd (engelskans drag) är den motståndskraft som verkar på ett föremål som rör sig genom vatten. Den totala motståndskraften som verkar på en simmare som rör sig med en konstant hastighet består ffa av *formmotstånd*, *vågmotstånd* och *friktion*. Ytterligare motståndskrafter och indelningar kan göras (se tabell 1) men det spelar mindre roll under simning. Storleken på motståndet under simning beror på följande faktorer:

- Gränsskiktets status (laminärt eller turbulent)
- Storlek, form och orientering av simmarens kropp
- Hastigheten hos simmaren (eller kroppsdel)
- Acceleration hos simmaren (eller kroppsdel)
- Ytan på simmaren eller simmarens dräkt
- Vattnets flöde (turbulent eller laminärt)
- Djupet på simmaren (eller kroppsdel) i förhållande till ytan.
- (Temperatur / densitet)

Tabell 1: *exempel på olika typer av motstånd som uppkommer i samband med simning (engelska fackord i litteraturen)*

<i>Formdrag</i>	Orsakat av form och simmarens placering/vattenläge
<i>Skinfriktiondrag</i>	Orsakat av friktionen mellan simmaren och vattnet.
<i>Wavedrag</i>	Orsakat av vågbildningar
<i>Spraydrag</i>	Orsakat av skvätt och vattenspray
<i>Interference drag</i>	Orsakat av närhet mellan två eller flera kroppar.
<i>Induced drag</i> <i>Pressuredrag</i>	Orsakat av uppkomsten av lyftkraft Samma som totalt hydrodynamiskmotstånd minus skinfriktiondrag
<i>Eddy resistance</i>	Annan term för formdrag (används inom skeppsindustrin)

Formmotstånd

Formmotståndet (engelskans *formdrag*) har oftast störst påverkan och beror på form, storlek och placering av kroppen vilket i sin tur påverkar hur gränsskiktet kring simmaren beter sig vilket avspeglas i den turbulenta vaken bakom simmaren. Ju tidigare gränsskiktet går från laminärt till turbulent avgör storleken på formmotståndet. Hög turbulent intensitet bakom föremålet ger tydliga tecken på högt formmotstånd. Se exemplet i bild 2 nedan hur objektets olika form påverkar formmotståndet snarare än objektets frontal area.



Bild 3 visar laminärt och turbulent flöde kring olika formade föremål med samma frontal area.

Vad påverkar formmotståndet under tävlingssimning.

När **storleken** på ett föremål ökar, ökas formmotståndet proportionellt förutsatt att formen är densamma, med små korrigeringar för längdförändringen. Ändras **längden** och formen på föremålet kommer detta påverka gränsskiktets status drastiskt. Ju längre gränsskiktet kan hållas laminärt desto mindre motstånd. Gränsskiktets status är det som påverkar formmotståndet mest. Detta kan tydligt visas i exemplet i bild 3 där det totala motståndet är detsamma för den större strömlinjeformade kroppen och den lilla cylinderformade kroppen.

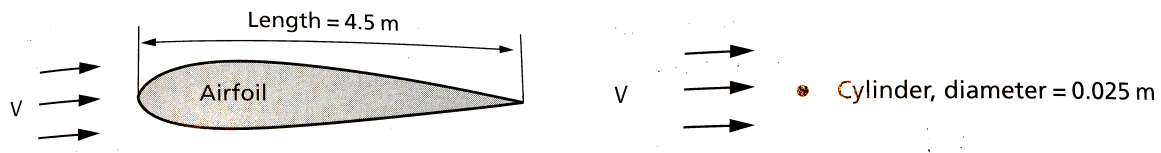


Bild 4: visar två olika kroppar med samma totala motstånd.

Placering av kroppen kommer också påverka gränsskiktets status och visas tydligt i bild 4. Simmaren skall alltid sträva efter en horisontell streamline position.

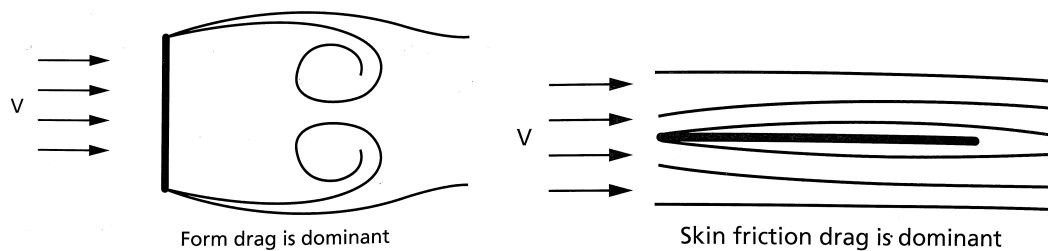


Bild 5: visar placeringenens betydelse för motståndet.

Ökad **hastighet** ger ökat formmotstånd. **Acceleration** ökar formmotståndet samtidigt som **retardation** minskar motståndet. En simmare bör därmed sträva efter en hög rörelsehastighet men med konstant acceleration under armarnas rörelser för att optimera motståndet vid framåtdrivning. Samtidigt bör undulationer i simhastigheten för hela kroppen undvikas för att minska motståndet. Att sänka simhastigheten är ingen bra metod under tävlingssimning utan det är självklart att istället försöka minska motståndet med hjälp av bättre streamline.

Nedsänkt djup på kroppen under ytan ökar arean där tryckmotstånd uppstår och formmotståndet ökar.

Turbulent vatten ger högre motstånd än stilla vatten.

Objektets yta kan spela roll för hur gränsskiktet beter sig. Det har förekommit vissa försök i simning att påverka detta men de är förmodligen in signifikanta. I andra sporter spelar objektets yta en större roll, exempelvis golfen golfbollar med dimplets.

Vågmotstånd

Det finns två typer av vågmotstånd, interna och externa vågor. Externa vågor är vågformationer som formats av andra simmare eller vågor som studsat och kommit tillbaka. Även om simmarna har varsin bana som skyddas genom linorna från vågor finns det tydliga delar av loppet där externa vågor spelar roll, exempelvis vid uppgångar efter vändning. Interna vågor skapas av simmaren själv. Formationen av dessa vågor stjäl energi då de påverkar det hydrodynamiska motståndet. När en simmare rör sig genom vattnet skapas två typer av vågor, transversala och divergerande vågor.

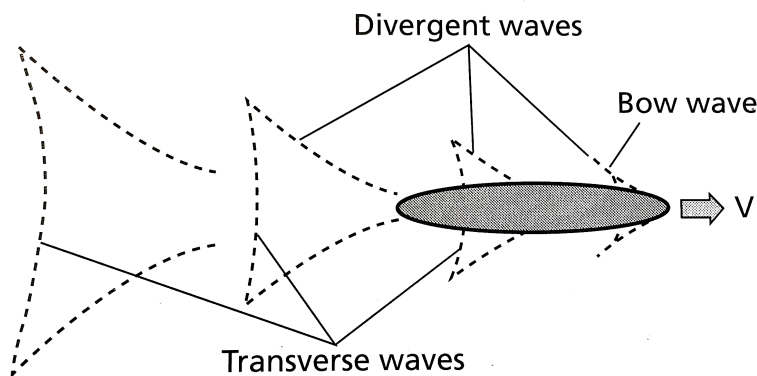


Bild 56: visar transversala och divergerande vågformationer.

Divergerande vågor skapas av tryckmotståndet och rör sig i vinkel från simmaren. Simmare skapar oftast 2-3 stycken divergerande vågformationer beroende på längd och simsätt. Den mest tydliga är den första vågen, den så kallade bogvågen. Den andra typen av vågor är de transversala vågformationerna och de rör sig i samma riktning som simmaren. De transversala vågformationerna blir ofta förstörda av simmarens rörelse, exempelvis vid frisims benspark men spelar roll för det totala vågmotståndet.

Med hjälp av Froude talet kan storleken på vågmotståndet räknas ut via en vågmotståndskoefficient (C_w)

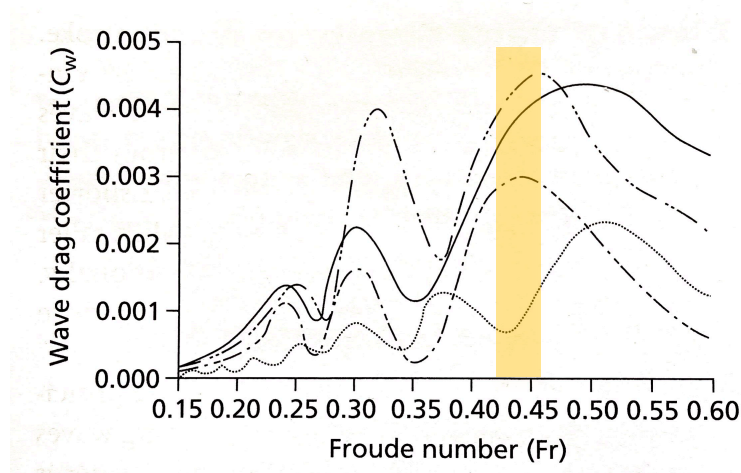
$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (\text{ekvation 9})$$

När Froude talet är uträknat enligt ovan kan en vågmotståndskoefficient räknas fram (C_w).

$$F_w = C_w \left(\frac{1}{2} \rho S V^2 \right) \quad (\text{ekvation 10})$$

Där S är den blötlagda ytan av objektet, ρ är vattnets densitet och V hastigheten i kvadrat. Relationen mellan Froude-talet och vågmotståndskoefficienten är icke linjärt (se bild 6). Denna oregelbundenhet orsakas av att vågorna samverkar. Därav kan motståndet öka eller minska drastiskt vid vissa hastigheter. Med rätt kombination av simmarens längd och simhastighet kan simmaren i teorin hitta en optimal simhastighet där vågmotståndet är lågt.

I diagrammet nedan visas typiska värden av vågmotståndskoefficienten för olika typiska skeppskonstruktioner (ref)



Diagrammet 1 visar vågmotståndskoefficienten på y-axeln och Froude talet på x-axeln för olika typiska skeppskonstruktioner. Gula området visar Froude talen från ekvation 11.

Så vad är då Froude-talet hos en simmare. En ungdoms simmare A som är 1,37 m lång och simmar i en hastighet av $1.53 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, respektive en seniorsimmare B som simmar $1.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ och är 1,8 m lång.

$$Fr = \frac{1,53}{\sqrt{g \cdot 1,37}} = 0,42 \text{ (A)}$$

$$Fr = \frac{1,9}{\sqrt{g \cdot 1,8}} = 0,45 \text{ (B) \quad (ekvation 11)}$$

Förutsatt att vågmotståndskoefficienten för en simmare liknar övriga båtarkoster i diagrammet 1 kommer båda simmarna ha mer eller mindre samma vågmotstånd, trots att seniorsimmaren simmar mycket fortare. Det låga vågmotståndet förklaras med seniorsimmarens längd. Detta fenomen förklarar varför simmare över tid kan minska sitt hydrodynamiska motstånd under tillväxtfasen trots att de samtidigt utvecklar en högre simhastighet och ökad frontal area.

Vad påverkar vågmotståndet under tävlingssimning.

Som vi sett ovan kommer **längden** på simmaren påverka vågmotståndet men även **storleken** på arean av simmaren som är nedsänkt i vattnet (se ekvation 10 och 5).

Placeringen av kroppssegmenten kommer också spela roll för vågmotståndet och detta kan man tydligt se under bröstsimmets olika faser när kroppen går från glidfas i streamline till böjda knän och höjd torso i preparationsfasen.

Även om det i dagsläget saknas vågmotståndskoefficienter specifikt för simmare spelar såklart **hastighet** en central roll för vågmotståndet. Till skillnad från övriga typer av motstånd verkar det som att vågmotståndet minskar vid acceleration av objektet vid Froude-tal mellan 0,3-0,6.

Nedsänkt djup under ytan kommer påverka vågmotståndet. Ju längre under ytan en simmare befinner sig ytan desto mer minskar vågmotståndet och försvinner helt när simmaren når ca 2m djup (5x måttet på torsions djup) men redan vid 0,6m har vågmotståndet sjunkit drastiskt. Vid höga hastigheter där vågmotståndet kommer spela en stor roll för totala motståndet kan det därför löna sig att simma ca 1m under ytan. Detta fenomen utnyttjas vid start och vändning maximalt av vissa elitsimmare.

Friktion (skinfriktiondrag)

Ytfriktion är den tredje typen av motstånd som huvudsakligen påverkar en simmare och är precis om det låter de krafter som uppstår när två ytor glider mot varandra. I simningens fall är detta simmarens hud/baddräkt och vattnet. Gränsskiktets status är avgörande för storleken på friktionsmotståndet och till skillnad från formmotståndet minskar ytfriktionen när gränsskiktet separerar från objektet. Trots detta är det alltid bättre att sträva efter god streamline under simning då storleken på ytfriktionen är så mycket mindre än formmotståndet. Ytfriktionen är dock tillräckligt stor för att påverka det totala motståndet i höga hastigheter och detta har bidragit till framtagandet av tävlingsdräkter och att simmare rakar kroppen vid viktiga tävlingar. Friktionsmotståndets storlek kan räknas ut vid både laminärt och turbulent flöde med förutsättning att gränsskiktet ej separerat från objektet.

$$F_D = C_f \left(\frac{1}{2} \rho V^2 A \right) \quad (\text{ekvation 12})$$

Ekvation 12 visar uträkning av friktionskraften lyftkraft där ρ är vätskans densitet, V är flödeshastigheten på vätskan i relation till kroppen (exempelvis simmaren), A är den blötlagda arean på föremålet och C_f är en friktionskoefficient. Av ekvation 12 kan det tydligt utläsas att storleken på arean och hastigheten kommer att påverka friktionskraftens storlek.

Vad påverkar friktionsmotståndet under tävlingssimning.

Storlek, form och placering kommer att påverka gränsskiktet status och på så vis ytfriktionen. Det går att räkna ut ytfriktionen vid både turbulent och laminärt gränsskikt. När gränsskiktet sedan separerar från objektet blir friktionen noll.

Likt andra typer av motstånd ökar friktionen vid ökad **hastighet**. Vid laminärt flöde ökar motståndet med $V^{3/2}$ och vid turbulent flöde med $V^{9/5}$.

Ytans karaktär (glatt eller skrovlig) påverkar storleken på friktionen. En skrovlig yta ger ökad friktion.

Sammanfattning motstånd

- Den totala motståndskraften som verkar på en simmare består framför allt av formmotstånd, vågmotstånd och friktion. Där formmotståndet är dominerande.
- Storleken på motståndet under simning beror på följande faktorer:
 1. Gränsskiktets status (laminärt eller turbulent)
 2. Storlek, form och orientering av simmarens kropp
 3. Hastigheten hos simmaren (eller kroppsdel)
 4. Acceleration hos simmaren (eller kroppsdel)
 5. Ytan på simmaren eller simmarens dräkt
 6. Vattnets flöde (turbulent eller laminärt)
 7. Djupet på simmaren (eller kroppsdel) i förhållande till ytan.
 8. (Temperatur / densitet)
- Det hydrodynamiska motståndet under simning kan delas in i aktivt och passivt hydrodynamiskt motstånd.

Hydrodynamiskt motstånd för armtagets framåtdrivning

Vi skiljer på framåtdrivning och motstånd men egentligen är det samma sak. Vi skapar framåtdrivning med hjälp av motstånd som uppstår när vi trycker mot vattnet. Enligt Newtons tredje lag skapas en lika stor kraft i motsatt riktning som trycket och det är denna kraft som hjälper simmaren fram genom vattnet. Det är viktigt att poängtera att simmaren av olika anledningar inte alltid kan applicera trycket rakt bakåt, exempelvis pga anatomiska begränsningar, olika simsätt och positionering av kroppsdelar. Det finns med andra ord mängder med lösningar för att ta sig från ena sidan av poolen till den andra. Således finns det inte heller en perfekt teknik utan alla individer kommer ha sin egna optimala individanpassade teknik.

Armarnas och benens rörelsemönster beskrivs i relation till antingen kroppens position eller vattnet. Det förstnämnda är kanske mer praktiskt vid teknikinläring men rörelsemönstret i relation till vattnet kan förklara de krafter som skapar framåtdrivning. För att lättare kunna analysera simtekniken brukar simtaget eller bentaget delas in i olika faser. Det finns flera uppdelningar och dessa har beskrivits i detalj av olika författare (Maglischo 2003, Haljand 2007). Rein Haljand delar exempelvis in frisimsarmtaget i tre faser efter handens rörelse, catch -pull -recovery, och bröstsimsmarmtag delas in enligt utsvep/catch, insvep/pull, recovery/glidfas. Bröstsimsmarmtaget är ett tydligt exempel på när det inte går att applicera kraften rakt bakåt (motsatt simriktningen) medan frissimmets armtag är mer i motsatt simriktningen.

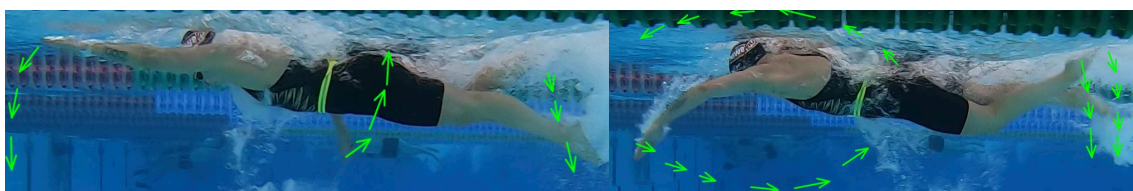


Bild 7: vänster arm *catch*, höger arm *exit*

Bild 7 vänster arm *pull*, höger arm *recovery*

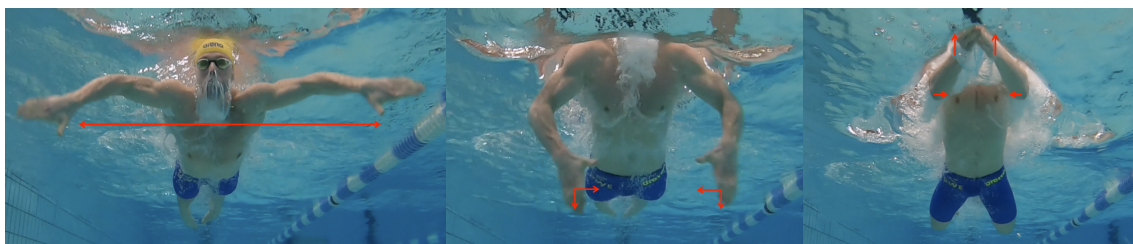


Bild 8 visar armarnas rörelsemönster under armdragets olika faser. Utsvep/pull - insvep/uppsvep - recovery

Den dominerande motståndskraften vid armarnas och benens rörelse är formmotstånd och alla de principer som gicks igenom i avsnittet om formmotstånd kan appliceras även på framåtdrivning. I tabell 2 sammanfattas olika aspekter på hand och arm som påverkar formmotståndet.

Tabell 2: *exempel på aspekter på hand och arm som påverkar formmotståndet*

Storlek på hand och arm
Form på hand och arm
Orientering och placering av hand och arm
Riktning på hand och arm
Hastighet på hand och arm
Acceleration på hand och arm

Vad påverkar formmotståndet vid armtagens rörelse

Storlek på hand och arm går det inte att göra mycket åt men **formen** på handen går att påverka. För att maximera formmotståndet bör handen formas så platt som möjligt. Tummen kan vara abducerad och fingrarna kan hållas något distanserade från varandra (4-6mm, Schleifhauf et al 1979) för att optimera handens motstånd vid tryck.

Orientering, placering och riktning på hand och arm kommer att avgöra vilken frontalarea vattnet "ser". Kombinationen av dessa kommer också avgöra hur stor del av formmotståndet som kommer från *lyft* respektive *tryckkraft*. Denna aspekt har varit av intresse bland simforskningen i årtionden. Med hjälp av CFD metoden har Bixler et al (2003) räknat ut lyft respektive tryckmotstånds koefficienterna vid olika angreppsvinklar av handen, armen eller båda tillsammans. Angreppsvinkel (illustreras i bild 9 där handens form och placering i förhållandet till flödesriktningen) avgör storleken på tryck respektive lyft krafterna enligt ekvation 1 och 2.

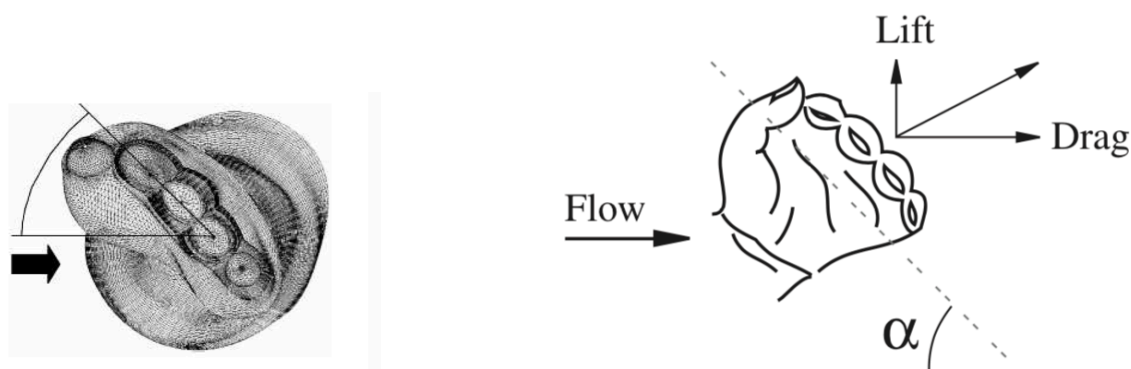
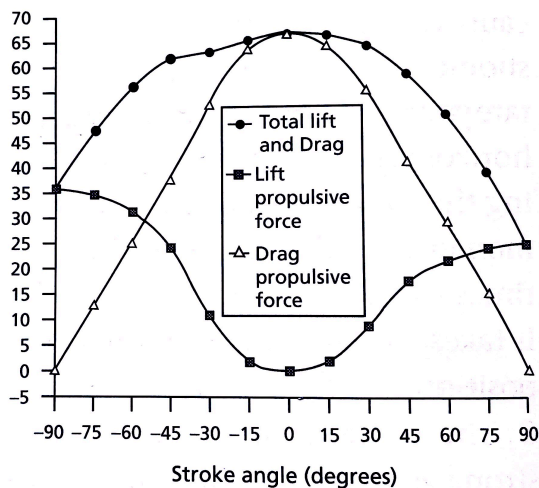


Bild 9 visar angreppsvinkel, flödesriktning och kraftkomponenterna lyft och tryck.

Under simningen är förhållanden gentemot bild 9 de motsatta, vattnet är stilla (ingen flödesriktning) och handen och armen har en dragriktning. Samma ekvation gäller oavsett om det är vattnet eller händer som rör sig. I diagrammet 2 visas resultatet vid olika angreppsvinklar för hand och arms påverkan på det totala motståndet och även fördelningen av lyft respektive tryckkraft.



Diagrammet 2 visar totala motståndet (fyllda cirklar) lyftkraft (fyllda kvadrater) och tryck (icke fyllda trianglar) vid olika angreppsvinklar vid en flödes hastighet av 2m/s och en turbulens intensitet på 1% (Bixler 2003)

Av diagrammet ovan kan det tydligt utläsas att den totala högsta kraften uppnås när hand och arm har en angreppsvinkel nära 0, dvs trycket appliceras rakt bakåt. Det går även att skapa relativt mycket kraft av kombinationen av lyft och tryckkraft vid lägre angreppsvinklar som (-30 - +30) och simmaren utnyttjar detta under simcykelns olika faser, främst under bröstsimmens utsvep och insvep.

Handens och armens **placering** och **orientering** kommer också påverka storleken på formmotståndet. Hand och arm bör i möjliga mån placeras så att en stor dragyta skapas och möjliggör en dragriktning i direkt motsatt simriktning. Här kommer fysiologiska och biomekaniska faktorer påverka. Ett exempel är frösimmens armtag där en del simmar med en tidig vertikal underarms position under catch-fasen (ofta kallad "hög armbåge") medan andra simmare använder mer rak arm som går djupare. En tidig vertikal position kommer skapa en mer optimerad placering för formmotstånd tidigt i simdraget och en hand positionering närmare kroppen ger en kortare hävstång och minskar belastningen på den involverade muskulaturen. Vid sprintsimning kommer effekt prioriteras över simekonomi. Det är därför mer vanligt att sprintsimmaren använder en mer rak armföring rakt bakåt för att skapa ett större vridmoment ($\text{moment} = \text{Hävstång} \times \text{Kraft}$). Istället för att skapa en något större yta med en tidig vertikal underarmsposition utnyttjas hastighet för att skapa högt motstånd. Under vissa faser vid simsättens armtag kommer armar och händer vara nära ytan och vågor kan uppstå. Vågmotstånd påverkar storleken på det totala motståndet och rent teoretiskt skulle det finnas optimala positioner där våg och formmotståndet samverkar på bästa sätt, exempelvis under ryggsim där armtaget sker nära vattenytan. Ingen forskning har än så länge kvantifierat detta så det är svårt att ge några generella rekommendationer.

Hastighet och acceleration kommer påverka formmotståndet vid framåtdrivning. Ökad hastighet ger ökat motstånd och är således bra för framåtdrivning. Höga hastigheter kommer kosta mer energi och det finns en risk att vid för hög rörelsehastighet vid starten av armtaget medföra att simmaren inte kan bibehålla denna höga hastighet och får en retardation i rörelsen som resulterar i kraftigt minskad framåtdrivning. Skickliga simmare startar armtagsrörelsen i något högre rörelsehastighet än simhastigheten för att sedan accelerera handen genom hela armtaget.

Acceleration av hand och arm har stor effekt på motståndet och retardation kan skapa negativ motstånd vid framåtdrivning när rörelsen är lägre än flödes hastigheten. Tryck och lyftkrafter påverkas olika vid acceleration. Lyftkraften påverkas mindre av acceleration än tryckkraften och detta innebär att under simdragets rörelse där riktningen är rakt motsatt simriktningen och det är praktiskt genomförbart, bör accelerationen prioriteras. Armen påverkas också mer av acceleration än handen. Orsaken till detta har att göra med när gränsskiktet separerar från objektet. Handen skarpa kanter gör att detta är mer konstant medan armens mer rundade form påverkar gränsskiktets status i större utsträckning.

Sammanfattning framåtdrivning armar

- Både handen och armen spelar roll för framåtdrivning.
- Sträva efter att ha handflatan pekandes mot fötterna med dragriktning rakt bakåt
- Acceleration av hela draget är viktigt för framåtdrivning. Prioritera något långsammare start för att bibehålla acceleration i slutet av lopp där tröttheten påverkar tekniken.
- Det finns många kombinationer av lyft och tryckkraft som skapar stort motstånd och det finns flera orsaker till att en simmare ändrar position och riktning, exempelvis för balans, för att kunna rotera, för att förlänga draget eller för att kunna accelerera på nytt. Alla simmare kommer att ha en individuell lösning för detta och det är med hänsyn till hydrodynamik, biomekanik, fysiologi som en optimal individuell teknik kan utformas.

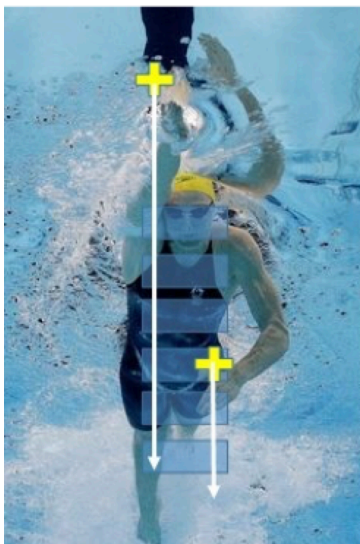


Bild 10 visar exempel på frisimsteknik där simmarens kognitiva bild är att simma på en tågräls för att få korrekt placering och riktning av armdraget.

Hydrodynamiskt motstånd för bentagets framåtdrivning

Det finns tre typer av bentag under simning, frisim/ryggsimskick, bröstbentag och fjärilskick. Benkicken bidrar till framåtdrivningen och hjälper också till att stabilisera kroppspositionen och vattenläget, speciellt under ryggsim och frisim där kroppen roterar kring sin längsgående axel. Fjärilskicken används mer eller mindre i alla simsätten vid undervattensfasen och kan vara mer effektiv än simning på ytan på grund av minimeringen av vågmotståndet (se tidigare avsnitt om vågmotstånd) Hur skapas då framåtdrivning från bentaget och hur ska man tänka för att optimera dess involvering i simtekniken. Till skillnad från fiskar och exempelvis delfiner som skapar framåtdrivning med hjälp av virvlar som uppstår när stjärtfenan utför sina rörelser verkar det som om vi människor får nöja oss med att trycka vattnet bakåt. Virvlarna som skapas av delfinens uppåt respektive neråtkick roterar åt olika håll så att en jetström uppstår och skjuter dem fram genom vattnet (bild 11). Vid oscillerande rörelse kan den dimensionslösa parametern Strouhal tal (se *ekvation 8*) hjälpa till att förklara effektiviteten av kickrörelsen.

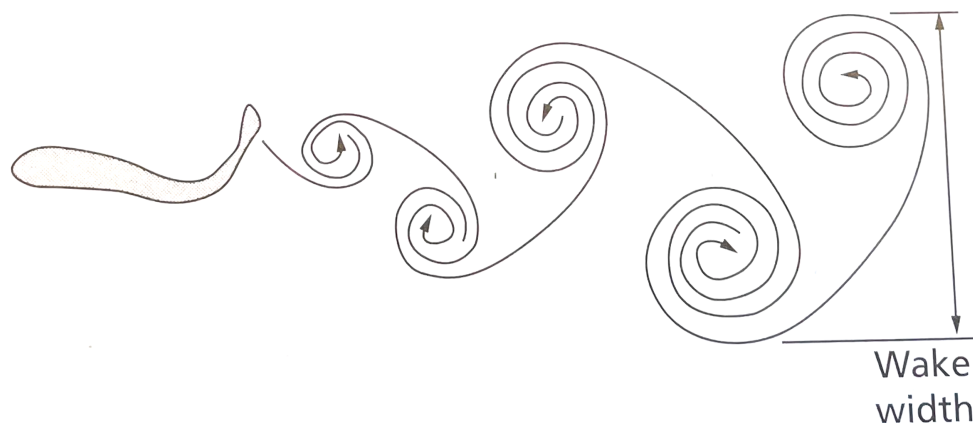


Bild 11 visar typiska virvlar som uppstår vid fiskar oscillerande rörelser.

Om en simmare som är 1.90m lång kickar i en hastighet vid ytan av $1.9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ men en frekvens av 150kicks/min blir Strouhal talet 2,5. Skulle samma simmare simma under vattenytan används istället amplituden på vågformationen som skapas av simmarens kickrörelse. Vågformationen vid fjärilskick under ytan har studerats av Arellano et. al. (1999, 2002) och har visat sig vara ca 1,5m. Strouhal talet för samma exempel som tidigare blir då 1,97 vid fjärilskick under vattenytan. Fiskar, delfiner och hajars typiska Strouhal tal nära deras maximala observerade simhastigheter ligger mellan 0,25 - 0,35 vilket skiljer sig markant från en simmare. Vi kan därmed konstatera att människan inte simmar som en fisk. Istället får simmare förlita sig på att skapa formmotstånd och pressa vatten bakåt. Precis som tidigare kommer storlek, position och riktning samt hastighet och acceleration vara viktiga för motståndets storlek. Fötternas storlek kan vi inte påverka men placering och ytan "vattnet ser" påverkas av rörligheten. Ett tydligt exempel på ovanstående är flexibiliteten i fotleden vid undervattenssimningen. En 10° ökad dorsal och plantar flexion genererar ca 17 % högre netto kraft för hela kroppen i nedåt kickrörelsen vid 2.15m/s simhastighet mätt med CFD-metoden [25, 26].

Med tanke på kickens begränsade framåtdrivningsförmågan blir det viktigt att minimera det resistenta motståndet, dvs inte för stora dorsala flexioner i knä, höft och fotled. Förutom att assistera en god stabilitet och kroppsposition kan bensparken under frisim även inverka på vågmotståndet. Det är inte alls ovanligt bland duktiga elitsimmare att deras benspark ligger mitt i vågformationen bakom simmaren och bidrar till att vågmotståndet minskar på grund av att den blir deformerad (Toussaint 2002).

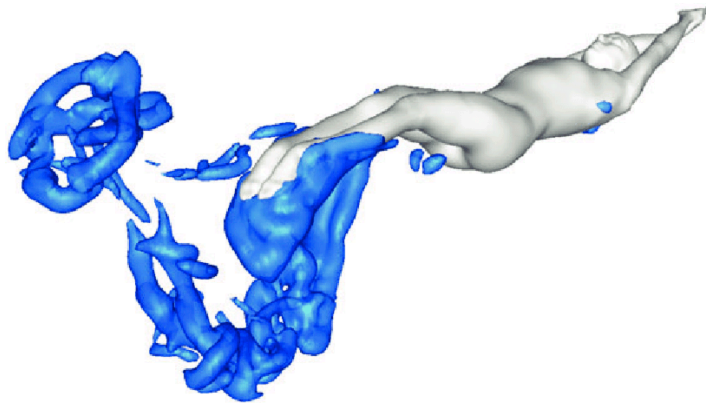


Bild 12 visar flödet kring simmaren vid fjärilskick under vattenytan med CFD metod.

Bröstsimsbentaget

Även om bröstsimsbentaget skiljer sig mycket från fot/benets rörelsemönster under frisim och fjärilssim är det fortfarande formmotståndet som skapar framåtdrivning. Det gäller att skapa en stor yta som pressar bakåt med både acceleration och hög hastighet. Trycket från bröstsimskicken skall därför appliceras rakt bakåt. Förmågan att skapa en stor yta att pressa med kommer att vara begränsad av rörligheten i fot, knäled och höft. Detta är förmodligen anatomisk genetiskt betingat där inte alla individer kan nå ut i de positioner som anses mera optimala. Under bröstsimsbentagets rörelsemönster uppstår positioner där simmare utsätts för stort motstånd och simhastigheten sjunker till nästan noll. Det blir en avvägning vilken position som fortfarande skapar hög framåtdrivning men samtidigt inte för mycket motstånd i prepareringen av rörelsen som blir den mest effektiva. Dessa utmaningar gör bröstsimmets till ett simsätt med stora hastighets undulationer och till skillnad från exempelvis frisim och ryggsim kommer transversala vågor att flytta sig upp och ner längs simmaren. Koordinationen av hastighet och acceleration av arm och benrörelsen kommer spela en stor roll för hur simmaren kan utnyttja moment och vågrörelser för att finna en bättre simekonomi.

I bilderna nedan visas exempel på hur en elitsimmare löser ovanstående utmaningar. Vid bröstsimskickens initial fas (bild 13) är underbenen i stort sett helt vertikala med fötter riktade rakt utåt för att skapa maximal pressyta. För att nå denna position har simmaren fått böja ca 60 grader i höftled.

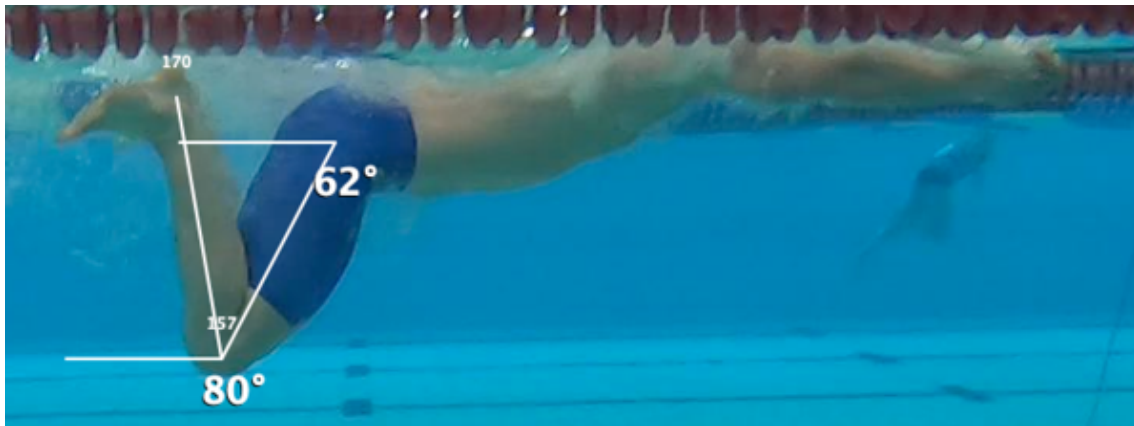


Bild 13 visar benens position under initiala kickfasen.

I bild 14 visar benens och armarnas rörelsemönster och hastighet under preparationsfasen, dvs armarnas och benens återföring, och indikerar korrekt koordination och hastighet av armarna och benen. Armåterföringen som sker innan benåterföringen har samma accelererande hastighet som benåterföringen för att bibehålla moment och undvika för stora undulationer i hastighet. När sedan trycket bakåt sker med benen skall detta göras med hög impuls och med riktning bakåt för att skapa så stort formmotstånd som möjligt.

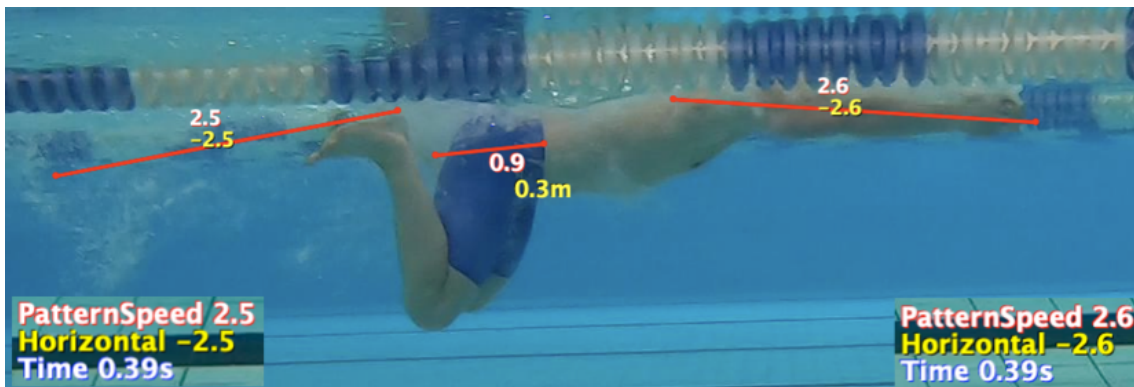


Bild 14 visar benens och armarnas rörelsemönster och hastighet under preparationsfasen

Sammanfattning framåtdrivning bentag

- Framåtdrivning från bentaget skapas genom formmotstånd och riktningen bör vara bakåt
- Rörligheten i vissa leder kommer att påverka förmågan att skapa storlek, form, positionering av pressytan (fot, underben)
- Det resistenta motstånd som uppstår vid bentagets rörelse måste avvägas mot framåtdrivningseffekten av rörelsen så det blir en god simekonomi
- Hastighet och acceleration av rörelsen skapar högre formmotstånd

Referenser

- Arellano R. Pardillo S. Gavilan A. (2002) Underwater undulatory swimming kinematic characteristics, vortex generation and application during starts, turn and swimming strokes XX *International Symposium on Biomechanics in Sports*. Spain
- Bixler B. & Riewald S. Analysis of a swimmers hand and arm in steady flow conditions using computer fluid dynamics. *Journal of Biomechanics* 35 2002. 713-717
- Di Prampero P. Pendergast D. Wilson D. Rennie D. Energetics of swimming man. *Journal of Applied Physiology* 37. 1974. 1-5
- Hollander A. de Groot G. van Ingen G. Toussaint H. Contribution of the legs to propulsion in front crawl swimming. *International Series of Sport Science, Vol 18. Swimming Science V. Human Kinetics* 1988
- Kolmogorov S. Duplisheva A. Active drag, useful mechanical power output and hydrodynamic force coefficient in different swimming strokes at maximal velocities. *Journal of Biomechanics* 25. 1992. 311-318
- Loebbekke A, Mittal R, A computational method for analysis of underwater dolphin kick hydrodynamics in human swimming. *Biomechanics* March 2009; 8(1): 60–77
- Lytle A., Keys M., The Use of Computational Fluid Dynamics to Analyse Swimming Technique in ASCTA Journal 2006.
- Maglischo E.W. (2003) *Swimming fastest*. Champaign, IL: Human Kinetics
- Toussaint H., de Groot G. Active drag related to velocity in female and male swimmers. *Journal of Biomechanics* 6 1988, 18-28.
- Toussaint H.M., Beek p. J., Biomechanics in front crawl competitive swimming. *Sports Med*, 13 2002, 8-24