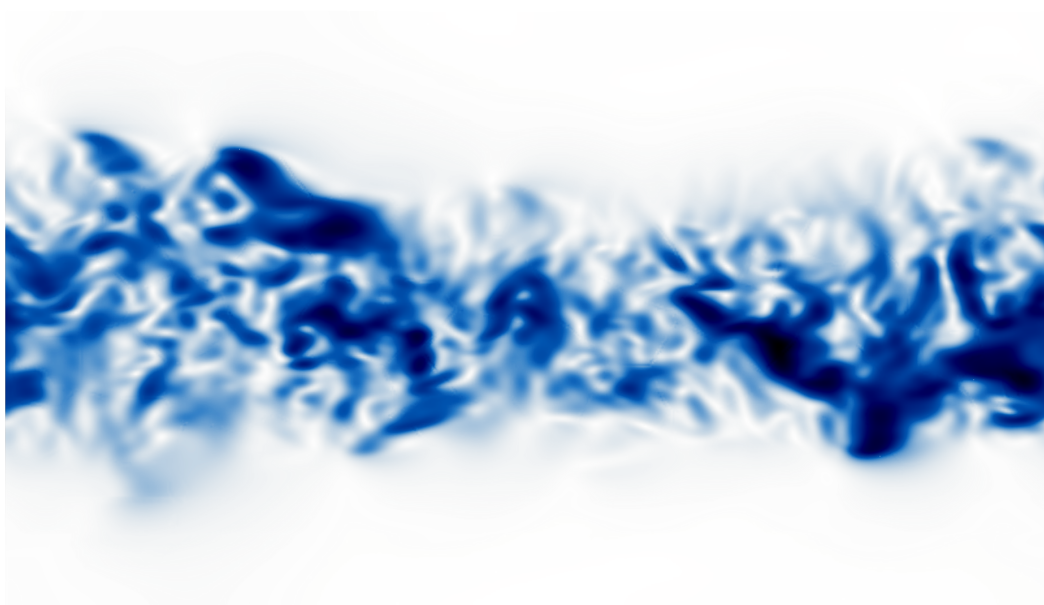


Implementation av en spatial/temporal metod för att simulera turbulenta vakar

CARL JANMARK, MARCUS WINROTH, EMMA ALENIUS



Carl Janmark, Marcus Winroth, Emma
Alenius

Implementation av en spatial/temporal
metod för att simulera turbulenta vakar

Titel	Implementation av en spatial/temporal metod för att simulera turbulenta vakar
Title	Implementation of a spatial/temporal method for simulating turbulent wakes
Rapportnr/Report no	FOI-R--5510--SE
Månad/Month	Februari
Utgivningsår/Year	2024
Antal sidor/Pages	25
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Customer	Försvarsmakten
Forskningsområde	Undervattensforskning
Projektnr/Project no	E85103
Godkänd av/Approved by	Lars Høstbeck
Ansvarig avdelning	Försvarsteknik

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

Ubåtar lämnar efter sig en hydrodynamisk turbulent signatur i kölvattnet som kan detekteras med olika sensorer. Eftersom signaturen kan leva kvar länge blir det dock kostsamt att numeriskt simulera vakgeneratorn (ubåten) och hela dess kölvatten samtidigt, därför måste en annan metod tillämpas.

En sådan metod för att simulera fluktuationerna i vaken består i att dela upp problemet i två delar: en spatial med vakgeneratorn och en temporal för vaken. Den temporala simuleringen sker med cykliska randvillkor mellan in- och utlopp, så att tidsutvecklingen kan tolkas som en förflyttning nedströms, och initieras från ett givet tidssteg i den spatiala simuleringen. Denna rapport undersöker förmågan hos denna typ av temporala simuleringsmetod.

Metoden utvärderas för en sfär vid Reynolds tal $Re_D = 8600$. Sfären valdes som vakgenerator på grund av tillgängligheten av referensdata i litteraturen för validering av metoden. Närvaken i den spatiala simuleringen jämförs med data från DNS-simuleringar och vaken längre nedströms valideras mot vindtunnelmätningar. Olika nät, domänstorlekar och randvillkor undersöks och rekommendationer kring hur beräkningarna bör ställas upp ges. Resultaten visar att metoden kan nyttjas för att beräkna fluktuationsnivån långt nedströms ett objekt.

Nyckelord

Hastighetsfluktuationer, sfär, vak, kölvatten.

Abstract

Submarines leave a hydrodynamic turbulent signature trace in its wake that can be detected with different sensors. Since the turbulence is very long-lived it is computationally expensive to numerically simulate both the wake-generator (submarine) and its whole wake, therefore another method must be used.

One such method for simulating the turbulent fluctuations consists of splitting the problem into two parts: one spatial simulation of the wake generator, and one temporal simulation of the wake region. The temporal simulation uses cyclic boundary conditions between the inlet and outlet, so that the development in time can be interpreted as a displacement downstream, and is initiated from a given timestep in the spatial simulation. This report explores the capabilities of this type of temporal simulation method.

The method is evaluated for a sphere at Reynolds number $Re_D = 8600$. The sphere was chosen as the wake generator due to the availability of reference data in the literature to validate the method. The near-wake characteristics are compared to DNS-simulation data and the far-wake characteristics are compared to data from wind tunnel measurements. Various meshes, domain sizes, and boundary conditions are also tested, and recommendations on how the computations should be set up are given. The results show that the method can be used for computing the fluctuation profiles far downstream of an object.

Keywords

Velocity fluctuations, sphere wake.

Innehåll

1	Introduktion	9
2	Spatiala simuleringar	11
2.1	Geometri	11
2.2	Turbulensmodell, numeriska metoder och randvillkor	11
2.3	Beräkningsnät	11
2.4	Tidssteg	11
2.5	Validering	11
3	Temporala simuleringar	15
3.1	Geometri, numeriska metoder och randvillkor	15
3.2	Beräkningsnät	15
3.3	Initiering	15
3.4	Prober och medelvärdesbildning	15
3.5	Påverkan av domänstorlek	16
3.6	Påverkan av startpunkt	17
3.7	Beräkningskostnad	18
3.8	Radiella profiler - jämförelse med data från litteraturen	19
4	Slutsats	23
4.1	Framtida studier	23
	Litteraturförteckning	25

Nomenklatur

Nedan återfinns en lista över nomenklatur och definitioner som används i rapporten.

D	Sfärens diameter
Re_D	Reynolds tal, $Re_D = UD/\nu$
l_c	Vakens karakteristiska längdskala
U_0	Friströmshastighet
U_x	Medelhastighet i x-riktningen
U_d	Hastighetsdeficit
U_c	Vakens karakteristiska hastighet
u'_x	Hastighetsfluktuation i x-led
ν	Kinematisk viskositet
r^+	Dimensionslöst väggavstånd
p	Tryck
ν_t	Turbulent viskositet
t	Tid
x	Koordinat i flödesriktningen
x_0	Vakens virtuella utgångspunkt
x_c	Temporal domänens centrumposition vid $t=0$
x_s	Temporal domänens uppströmsrand vid $t=0$
Ω_{20}	Spatial domän för sampling ner till $x/D=20$
Ω_{100}	Spatial domän för sampling ner till $x/D=100$
$l_{temporal}$	Temporal domänens längd
K_{Ω_x}	Beräkningskostnad för spatiell simulering
$K_{spatial-temporal}$	Beräkningskostnad för spatial/temporal metod
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
LES	Large Eddy Simulation
DNS	Direct Numerical Simulation
WALE	Wall-Adapting Local Eddy-viscosity
PISO	Pressure-Implicit with Splitting of Operators

1 Introduktion

Ubåtar lämnar efter sig en hydrodynamisk signatur i form av en vak, vilken långt nedströms karakteriseras av förhöjda turbulensnivåer i vattnet som kan upptäckas och därmed röja ubåtens färdväg och position. Numeriska simuleringar är ett effektivt verktyg för att förstå hur vaken ser ut bakom en ubåt under olika förhållanden. Den geometriska utsträckningen på vaken innebär dock att beräkningskraften som behövs för att simulera hela vaken, inklusive ubåten, är mycket större än vad som finns tillgängligt. En beräkningseffektivare metod behöver därför användas.

En genomgång av olika sådana metoder som finns i litteraturen för att simulera vakar har gjorts av Alenius [1]. I denna studie används en metod som bygger på den som beskrivs av Pasquetti [2], vilken går ut på att dela upp problemet i två delar; en spatial och en temporal del. I den första, spatiala, delen simuleras objektet och en mindre del av dess vak. I den andra, temporala, delen används startdata från en given tidpunkt i den spatiala simuleringen till att sätta upp en simulering med cykliska, ibland kallade periodiska, in/utloppsrandvillkor, där utloppsrandens värden ansätts på inloppsranden. Detta ger att tidsutvecklingen kan tolkas som en förflyttning nedströms i kölvattnet.

För att utvärdera en implementation av Pasquetti's metod studeras en sfär i ett icke-stratifierat flöde. Sfären valdes som vakgenerator för att det är en simpel och väldokumenterad geometri som det finns data på i litteraturen lämplig för validering. För att lösa upp de turbulenta fluktuationerna i flödet används turbulensmodellen LES, för mer information om strömningsmekaniska beräkningar och turbulensmodeller se [3].

Enligt Townsend [4] och George [5] förväntas att vakens halvbredd i ett axisymmetriskt flöde skalar som den karakteristiska längden

$$l_c = (x - x_0)^{1/3} D^{2/3} \quad (1.1)$$

vilket ger att hastighetsdeficiten

$$U_d(x, r) = U_0 - U(x, r) \quad (1.2)$$

skalar som den karakteristiska hastigheten

$$U_c(x) = U_0 (x - x_0)^{-2/3} D^{2/3} \quad (1.3)$$

där U_0 är friströmshastigheten, x är avståndet nedströms, x_0 är vakens virtuella ursprungspunkt och D är sfärens diameter. Uberoi [6] har genomfört vindtunnelmätningar av vaken bakom en sfär vid $Re_D = UD/\nu = 8600$, där ν är den kinematiska viscositeten, vilka visar att fluktuationsprofilerna och hastighetsdeficitprofilerna sammanfaller för $x/D \geq 50$ när de skalas med l_c och U_c . Data från dessa mätningar har här använts som referens.

I kapitel 2 presenteras de spatiala simuleringarna inklusive de numeriska metoderna, beräkningsnäten och hur simuleringarna har validerats. I kapitel 3 presenteras de temporala simuleringarna inklusive hur de har initierats, utvärderats, och validerats mot tidigare publicerade resultat. I kapitel 4 diskuteras slutsatserna och potentiella framtida studier.

2 Spatiala simuleringar

För att ta fram startdata och referensdata till de temporala simuleringarna genomförs traditionella beräkningar med LES av en sfär och dess vak, här kallade spatiala simuleringar. I det här kapitlet beskrivs hur geometrin sätts upp, vilka numeriska metoder som används och hur dessa valideras mot tidigare studier.

2.1 Geometri

Geometrin består av en sfär med diameter D placerad med centrum i origo omgiven av en domän $\Omega_{20} = \{(x, y, z) \in [-4, 5, 23, 5]D \times [-8, 8]D \times [-8, 8]D\}$, med ett flöde i x-riktningen.

En större domän, $\Omega_{100} = \{(x, y, z) \in [-4, 5, 107, 5]D \times [-8, 8]D \times [-8, 8]D\}$, används för att ta fram referensdata längre nedströms och för att starta vissa temporala simuleringar från en position längre nedströms, se sektion 3.6.

2.2 Turbulensmodell, numeriska metoder och randvillkor

Simuleringarna utförs med LES-modellen WALE [7] i CFD-verktyget OpenFOAM 5.0¹ med en PISO-lösare. Den numeriska diskretiseringen görs med ett andra ordningens centraldifferensschema för gradienter och divergenser, samt ett andra ordningens implicit backwardsschema för tidsintegreringen.

Simuleringarna utförs med ett hastighetsinlopp, ett totaltrycksutlopp och friktionsfria väggar på sidorna av beräkningsdomänen. På sfärens yta sätts hastigheten till noll.

2.3 Beräkningsnät

Beräkningsdomänen diskretiseras med ett hex-dominerat ostrukturerat nät byggt i verktyget snappyHexMesh, som är en del av OpenFOAM-paketet, se Figur 2.1. Nätet är uppbyggt av ett grundnät av kubiska celler med en sida på $0,4 D$ och ovanpå detta finns flera förfiningsregioner. För varje förfiningsnivå halveras cellernas längd i samtliga riktningar. Närmast sfärens yta finns ett prismalager av 6 celler i ytans normalriktning med en tillväxtfraktion av 1,2. Höjden på det första prismalagret är $10^{-3} D$, vilket ger ett maximalt r^+ på 0,32. Upplösningen av sfärens yta är en cell per grad. Näten för Ω_{20} och Ω_{100} innehåller $2,1 \cdot 10^7$ respektive $5,5 \cdot 10^7$ celler.

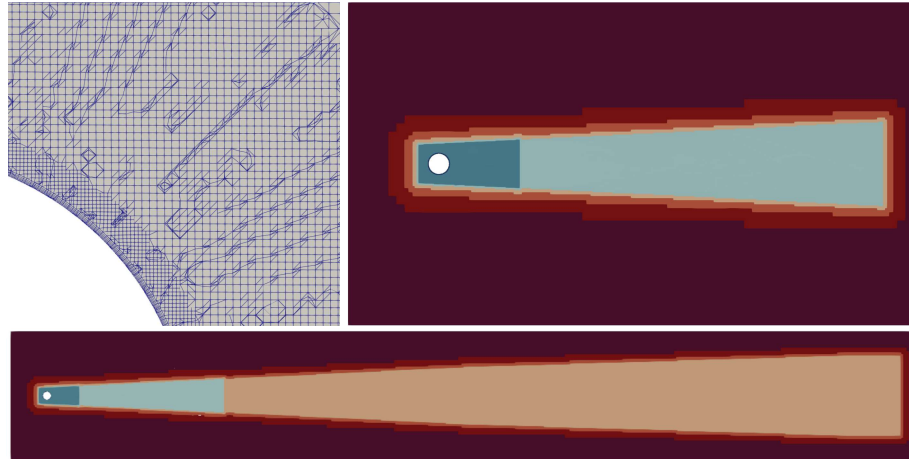
2.4 Tidssteg

Tidssteget sätts konstant till ett värde som ger ett konvektivt Couranttal under 0,6 i vaken. Couranttalet når 1,42 i det accelererade flödet i nära anslutning till sfären. För simuleringarna vid $Re_D = 8600$ uppnås detta vid $dt = 357,76 D/U$.

2.5 Validering

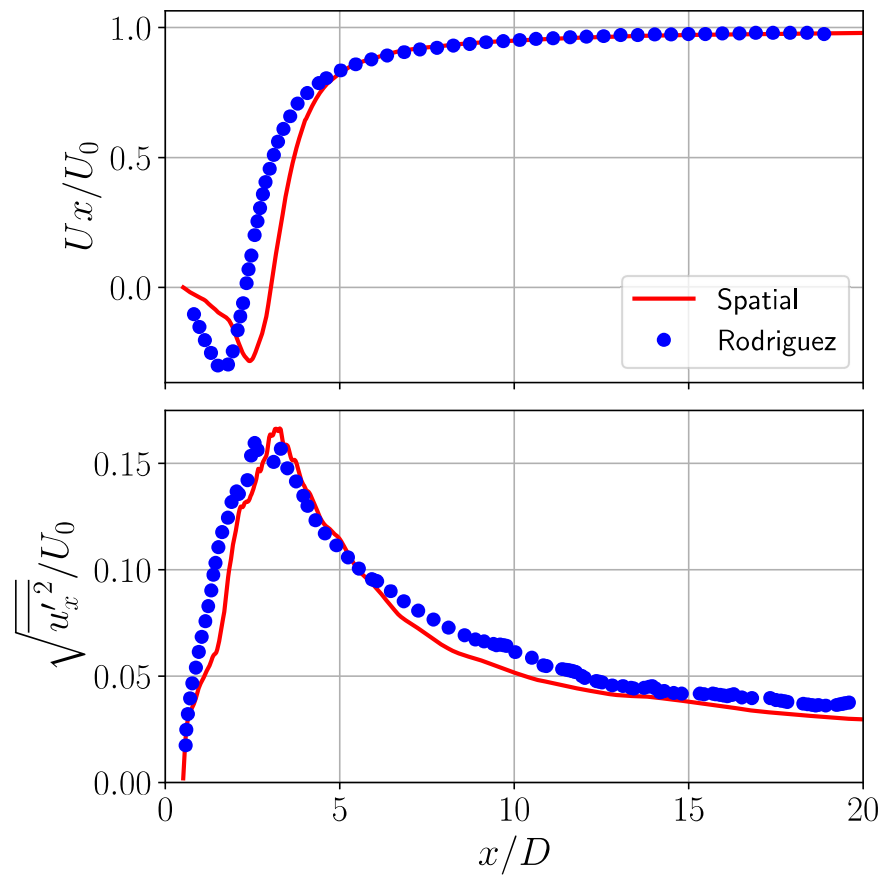
För att validera metoden genomfördes simuleringar för $Re_D = 3700$ vilka jämfördes med DNS-data från Rodriguez [8]. I Figur 2.2 ses att recirkulationszonen är betydligt längre än för Rodriguez, där U_x är medelhastigheten i strömningsriktningen, u'_x är hastighetsfluktuationen och U_0 är fristömshastigheten. Vid detta Reynoldstal testas följande; olika nätförfiningar, att ändra från friktions-

¹www.openfoam.org



Figur 2.1: Nätet runt sfären (vänster), nätförfiningsregionerna i den mindre beräkningsdomänen Ω_{20} (höger) och i den större beräkningsdomänen Ω_{100} (under).

fritt till hastighetsvillkor på väggarna av beräkningsdomänen och att ändra tryckutloppet till zero gradient. Ingen av dessa ändringar påverkar recirkulationszonens längd nämnvärt. Eftersom detta främst påverkar närvaken och inte det område, efter $x/D = 5$, som används för referensdata till de temporala simuleringarna valdes det relativt grova nät som beskrivs i sektion 2.3 för att ta fram initieringsdata till den temporala simuleringen.



Figur 2.2: Medelhastighet och fluktuationsnivå på centrumlinjen från utförda LES-beräkningar och Rodriguez [8].

3 Temporala simuleringar

Detta kapitel beskriver hur de temporala simuleringarna sätts upp och initieras, hur data samplas, samt hur lösningen beror på beräkningsdomänens storlek och simuleringens startpunkt. Resultaten jämförs sedan med mätdata från Uberoi [6], dessa består av varmtrådsmätningar i en vindtunnel vid $Re_D = 8600$.

3.1 Geometri, numeriska metoder och randvillkor

Geometrin för de temporala simuleringarna består av ett enkelt rätblock. Olika storlekar på domänen har utvärderats för att ta fram simuleringsriktlinjer, vilket beskrivs närmare i sektion 3.5.

Turbulensmodellen och de numeriska metoder som används är samma som används för de spatiala simuleringarna, se sektion 2.2. Simuleringarna utförs med cykliska randvillkor mellan in- och utlopp, där utloppsrandens värden ansätts på inloppsranden, och friktionsfria väggar på sidorna av beräkningsdomänen.

3.2 Beräkningsnät

Beräkningsdomänen diskretiseras med ett hexdominerat nät byggt i verktyget blockMesh och förfinat med verktyget refineMesh, vilka är delar av OpenFOAM. Nätet är uppbyggt av ett grundnät av kubiska celler med en sida av $0,2D$ och med cylindriska förfiningsregioner kring centrumlinjen. För varje förfiningsnivå halveras cellernas längd i samtliga riktningar. Totalt används två förfiningsnivåer, vilket ger ett nät med ca. $2 \cdot 10^7$ celler. Ett tvärsnitt av nätet kan ses i Figur 3.1.

3.3 Initiering

För att initiera de temporala simuleringarna överförs fälten p (tryck), ν_t (turbulent viskositet) och u (hastighet) från ett givet tidssteg i den spatiala simuleringen enligt följande, vilket visualiseras i Figur 3.2:

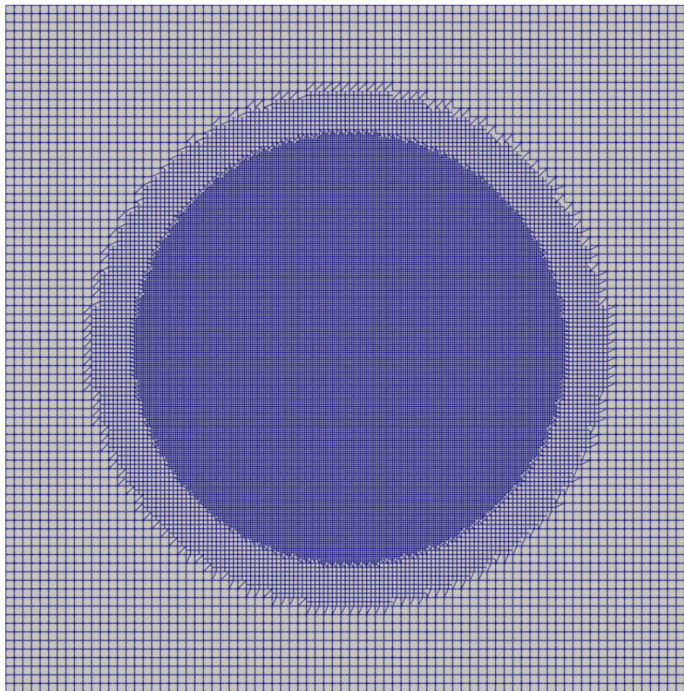
1. Fälten från centrum av den temporala domänen, x_c , och en fjärdedel av den temporala domänens längd, $l_{temporal}$, nedströms förs över till ett nytt nät.
2. Det nya nätet speglas nedströms.
3. Resultatet förs över till den temporala domänen.
4. Steg 1, 2 och 3 upprepas för fälten uppströms x_c .

På detta sätt uppnås kontinuitet över in- och utloppsrand vilket gör att cykliska randvillkor kan användas.

Pasquetti [2] lägger här till ett steg där friströmshastigheten subtraheras från hastighetsfältet. Detta gör att tidssteget kan ökas ytterligare så att beräkningstiden kan minskas, men också att det kan förekomma negativa hastigheter i x-led i inloppet. Detta steg används inte i denna studie.

3.4 Prober och medelvärdesbildning

Prober är placerade längs centrumlinjen med ett mellanrum av $D/2$ och radiellt från dessa med mellanrum $D/20$ i 72 givna azimuthala riktningar. För en given tidpunkt t i den temporala simuleringen används dessa prober för att beräkna



Figur 3.1: Ett tvärsnitt av nätet i av den temporal domänen.

spatiella medelvärden och fluktuationsnivåer för olika radiella positioner. Dessa tolkas som tillhörande x -positionen nedströms sfären enligt ekv. 3.1:

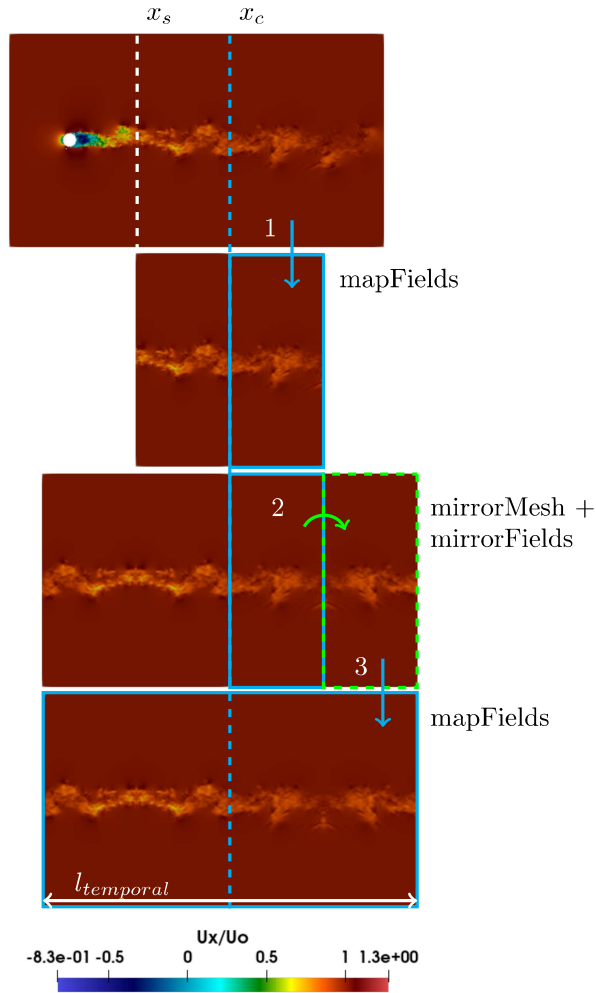
$$x = x_c + t \cdot U_0. \quad (3.1)$$

För att minska inverkan av initialfälten på resultaten så medelvärdas bildas en ensemble av fem temporala simuleringar med startvärden från olika tidpunkter i den spatiala simuleringen. Domänstorleksstudien har inte medelvärdas bildats på detta sätt utan består endast av en temporal simulering per fall. I Figur 3.4 syns att simuleringarna konvergerar efter $x/D = 100$ vilket tyder på att detta inte är absolut nödvändigt för studier längre nedströms.

3.5 Påverkan av domänstorlek

I denna studie används det värde för vakens virtuella utgångspunkt x_0 som beräknats av Uberoi [6], $x_0 = 12D$, vilket $300D$ nedströms ger en karakteristisk längd $l_c(x = 300D) \approx 6,6D$. Beräkningsdomänen behöver vara stor nog att inte påverka vakens utveckling och de strukturer som växer i den. Tidigare studier visar att beräkningsdomänen bör vara minst dubbelt så bred som den karakteristiska längden l_c [9]. Det innebär att för en simulering som går $300D$ nedströms sfären bör beräkningsdomänen vara minst $13,2D$ bred. Längden på domänen måste vara tillräckligt stor för att rymma ett par våglängder av de största strukturerna, vilka förväntas skala med l_c .

Olika storlekar på beräkningsdomänen har utvärderats för att ta fram simuleringsriktlinjer. I simuleringar med en bredare domän har beräkningsnätet breddats med oförändrad nättäthet i den yttre delen. De domänlängder och bredder som har undersökts är $16D$ och $28D$, vilket motsvarar $2,4l_c$ respektive $4,2l_c$ vid $x = 300D$. I Figur 3.3 ses att en ökning av domänens höjd och bredd inte påverkar resultatet. De kortare domänerna visar dock på ett cykliskt



Figur 3.2: Överföringsprocedur från spatial till temporal simulering. Notationen mapFields och mirrorMesh refererar till funktionsnamn i OpenFOAM. mirrorFields refererar till en egenutvecklad funktion som speglar fältvariablerna.

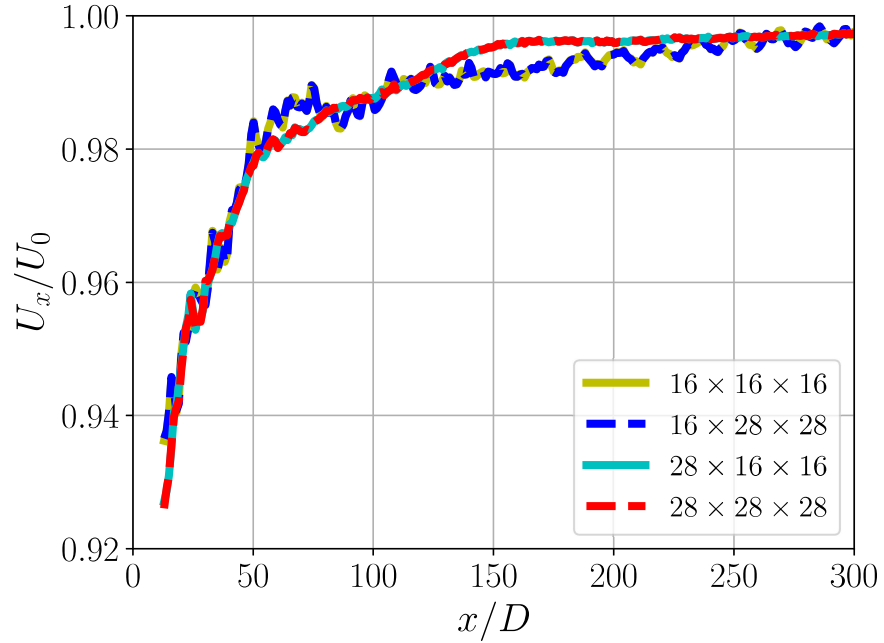
beteende där perioden har samma längd som domänen. Detta fenomen startar vid $x/D = 120$, där den temporala domänens längd $l_{temporal} \approx 3,3 l_c$. Den längre domänen har vid $x/D = 300$, vilket är så långt nedströms simuleringen har körts, längden $l_{temporal} \approx 4,2 l_c$.

Baserat på detta rekommenderas att domänens längd sätts till minst $3,5 l_c$. I resterande simuleringar används domänen med dimensionerna $(28 \times 16 \times 16) D$. Detta kan jämföras med Pasquetti's [2] domän som är $(36 \times 8 \times 24) D$, den är dock dimensionerad för ett stratifierat flöde och därmed en betydligt långsammare tillväxt av vaken på höjden. Den används ner till $x/D = 2500$, vilket ger $l_{temporal} \approx 2,7 l_c$.

3.6 Påverkan av startpunkt

Effekten av startpunktens position, x_s , har undersökts för $x_s = 5 D$ och $x_s = 17 D$.

Figur 3.4 och 3.5 visar att dessa lösningar konvergerar efter ca $100 D$, då differensen mellan de båda ensemblerna är under 0,2% relativt friströmshastig-



Figur 3.3: Effekt på medelhastigheten längs centrumlinjen av ändring av domänstorleken. Domändimensionerna är uttryckta som (längd $\times$ höjd $\times$ bredd) i enheter av D .

heten. Baserat på detta dras slutsatsen att data till den temporala simuleringen kan extraheras från $x_s = 5D$ i den spatiala simuleringen och resultaten som presenteras i kommande diskussioner startas vid $x_s = 5D$. Detta då den spatiala simuleringen som krävs för att generera denna data är betydligt billigare i termer av beräkningstid.

Den initiala differensen mellan de spatiala kurvorna och ensemblerkurvorna i Figur 3.4 antas vara uppstartseffekter från speglingen.

3.7 Beräkningskostnad

För att utvärdera beräkningskostnaden för denna metod jämförs här den långa spatiala simuleringen i domänen Ω_{100} med den sammansatta spatiala/temporala metoden.

Beräkningskostnaden uppskattas genom att multiplicera antalet simulerade sekunder med antalet processortimmar per simulerad sekund. Antalet simulerade sekunder är proportionellt mot hur långt nedströms vaken studeras, x . Antalet processortimmar per simulerad sekund antas växa linjärt med avseende på antalet celler i domänen.

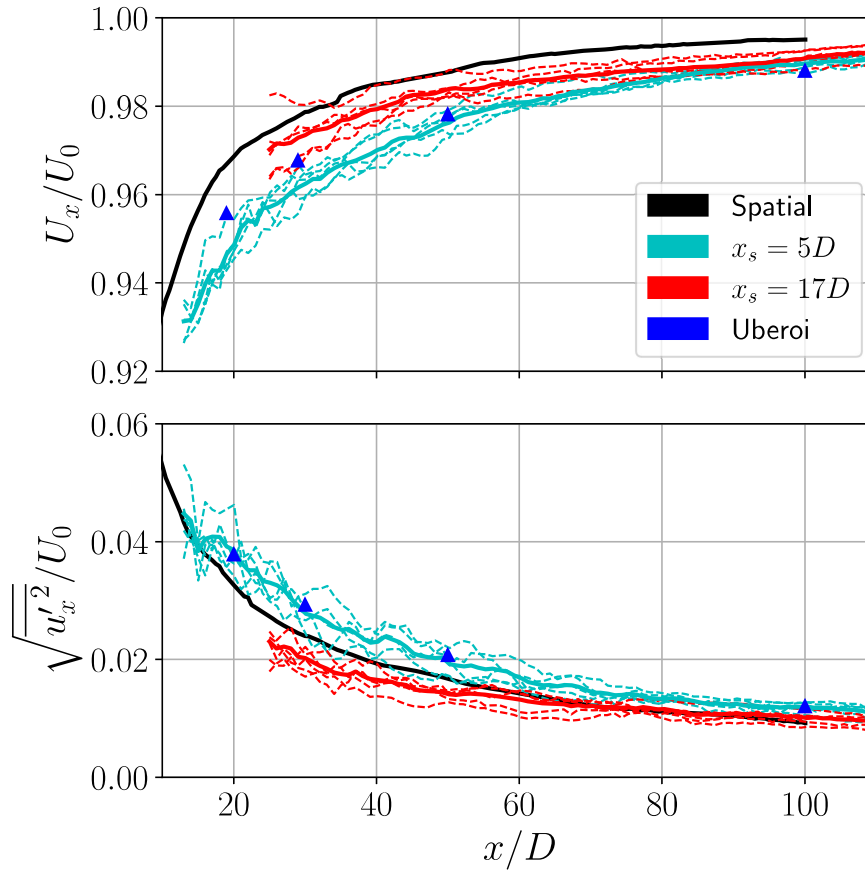
För en spatiell simulering fås att antalet celler är proportionellt mot hur långt nedströms vaken simuleras, x , vilket ger att beräkningskostnaden skalar som:

$$K_{\Omega_x} \propto x^2.$$

Detta kan jämföras med den spatial-temporala metoden, där domänstorleken är oberoende av x , vilket ger att beräkningskostnaden skalar som:

$$K_{\text{spatial-temporal}} \propto x.$$

Baserat på de genomförda simuleringarna fås att det i beräkningstid krävs 31000 processortimmar att ta fram fluktuationsprofiler vid $x/D = 100$ med den



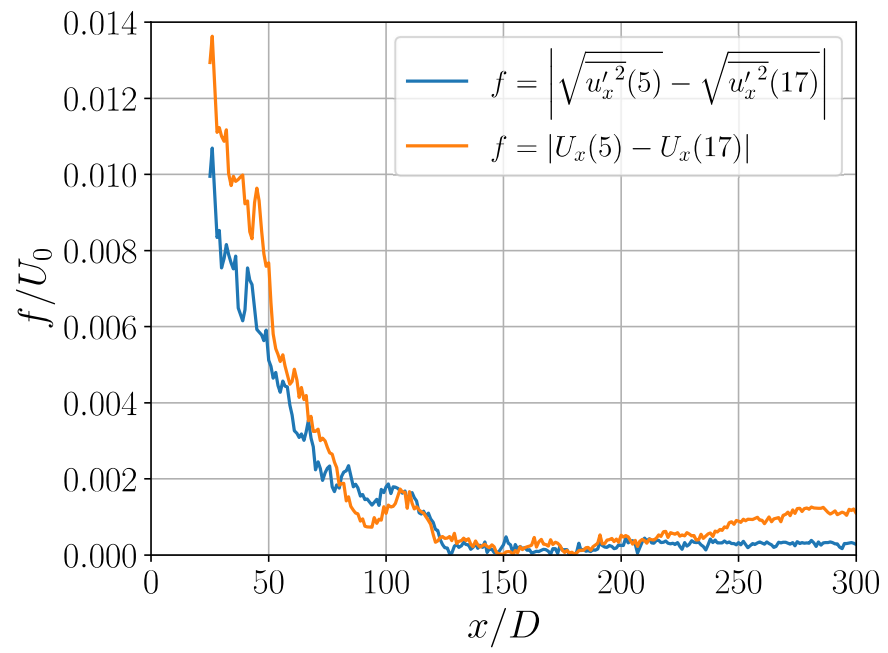
Figur 3.4: Medelhastighet och fluktuationsnivå på centrumlinjen för den spatiala simuleringen, ensembler från två olika startpunkter, x_s , (tunna streckade linjer) och deras respektive medelvärden (heldragna linjer) samt uppmätta värden från Uberoi [6] (trekanter).

långa spatiala, men endast 21000 processortimmar med den spatiala/temporal metoden, varav 4000 processortimmar i den spatiala delen. Här är det också värt att nämna att det tidssteg som valts för de temporala simuleringarna är ca. fyra gånger så stort som det för de spatiala simuleringarna, vilket resulterade i ett konvektivt Couranttal på 0,3 i vaken. Tidssteget skulle alltså kunna dubblas igen för att matcha Couranttalen i vaken mellan simuleringarna, vilket skulle kunna halvera beräkningstiden för den temporal ensemblen.

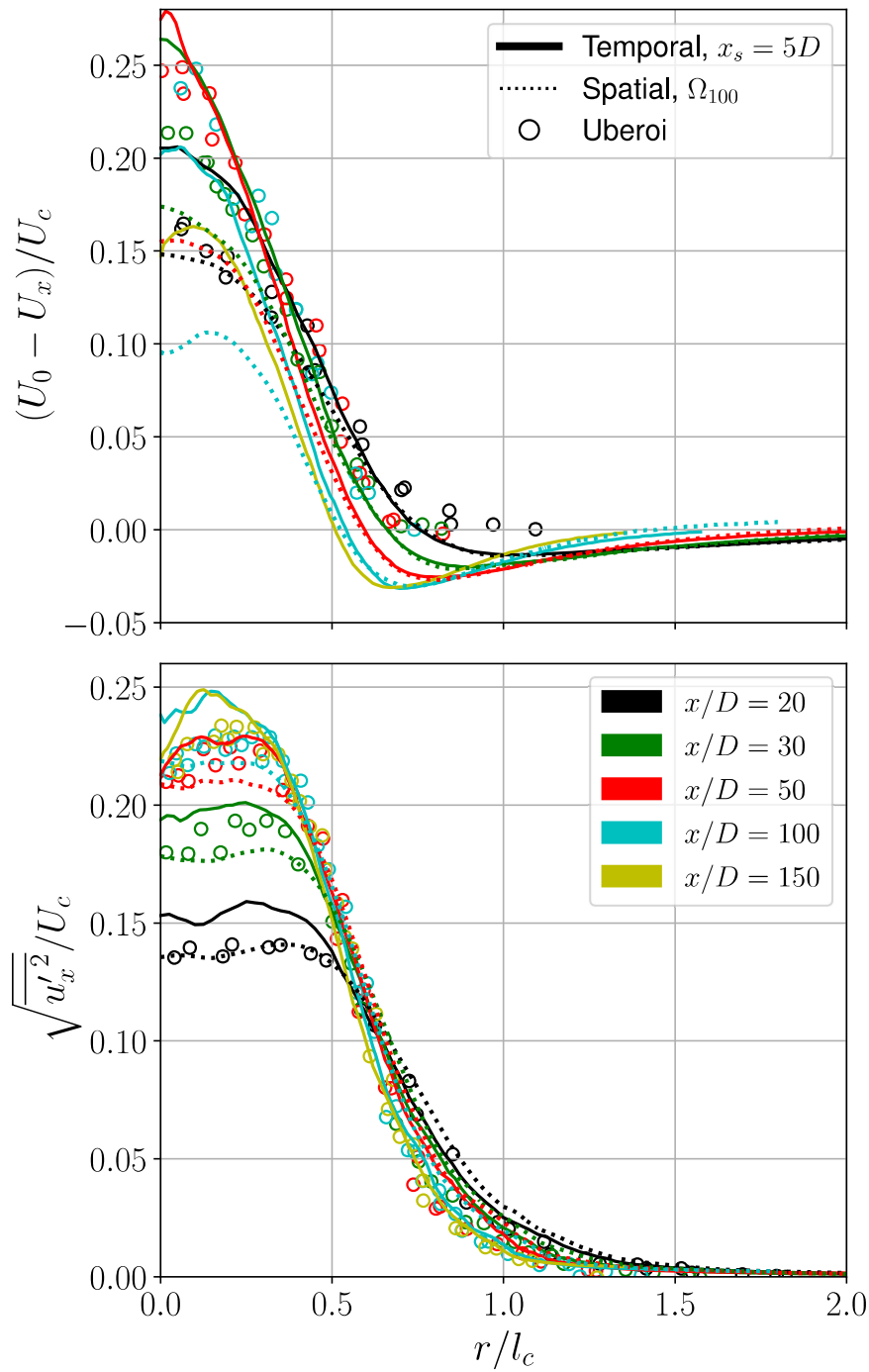
3.8 Radiella profiler - jämförelse med data från litteraturen

Här presenteras resultaten från den temporal ensemblen som startade vid $x_s = 5D$ och jämförs med data från den spatiala simuleringen av den långa domänen Ω_{100} samt data från Uberoi [6].

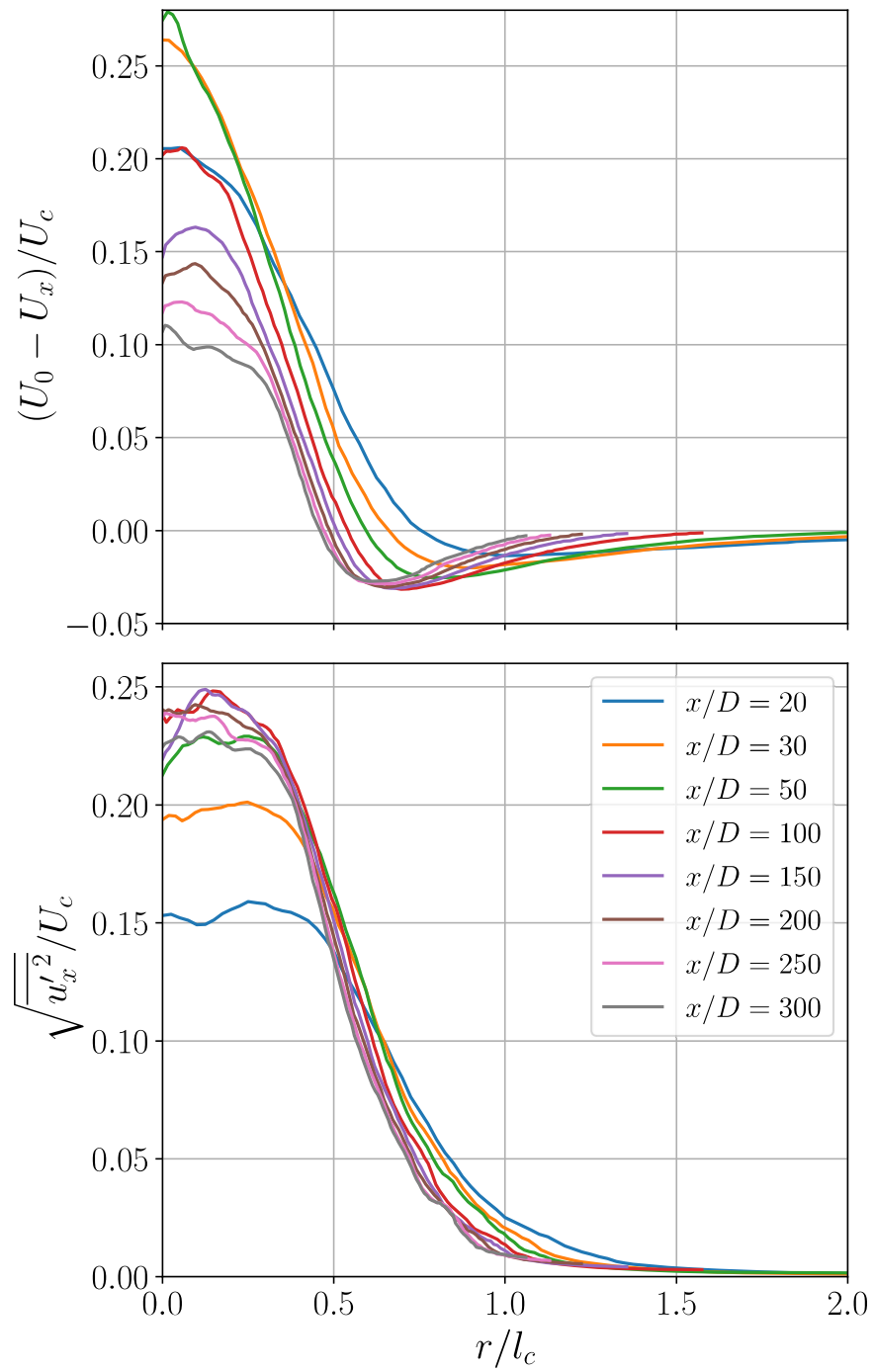
I Figur 3.6 kan det noteras att Uberois hastighetsdeficitprofiler saknar regionen med accelererat flöde kring $r/l_c \approx 0,75$ samt att för både den temporal och den spatiala simuleringen avtar hastighetsdeficiten fortare än väntat. För $x/D > 50$ förväntas hastighetsdeficiten sammanfalla när den skalas med l_c och U_c , se ekv. 1.1, samt ekv. 1.3. Fluktuationsprofilerna sammanfaller däremot väl för $x/D > 50$ för båda simulering metoderna. Detta syns än tydligare när profiler längre nedströms analyseras, se Figur 3.7.



Figur 3.5: Differens i medelhastighet och fluktuationsnivå relativt fristörms hastigheten mellan två olika startpunkter x_s .



Figur 3.6: Radiella profiler för hastighetsdeficiten och fluktuationsnivån för olika nedströms positioner x/D . För hastighetsdeficiten är referensvärdena från Uberoi tagna vid $x/D = [19, 29, 50, 100]$.



Figur 3.7: Radiella profiler för hastighetsdeficiten och fluktuationsnivån för olika nedströms positioner, x/D , från den temporala simuleringen.

4 Slutsats

En metod för att simulera vakar långt nedströms ett objekt, baserat på Pasquettis [2] temporal/spatiala metod har utvärderats på vaken bakom en sfär vid $Re_D = 8600$ och resultaten har jämförts med mätdata från Uberoi [6]. Implementationen fungerar bra för att prediktera fluktuationsnivåerna långt nedströms i vaken, men underskattar hastighetsdeficiten i samma område. Då det är fluktuationerna som är av störst intresse att studera ses dock detta som godtagbart och slutsatsen är att detta är en lovande metod för att studera turbulens långt nedströms i vakar. För att utvärdera metoden har påverkan av ett par parametrar studerats med följande slutsatser:

1. Beräkningsvolymens längd bör vara minst $3,5 l_c$ i strömriktningen och $2 l_c$ i tvärriktningen för att undvika periodicitet och inträngningseffekter. Se ekv. 1.1 för definition av den karakteristiska längden l_c .
2. Startpunkten för den temporala simuleringen kan läggas relativt nära vakgeneratorn i den spatiala simuleringen, så länge hela den överförda volymen är klart utanför recirkulationszonen och området med starka gradienter [10]. I detta fall gav en startpunkt $5 D$ nedströms bra resultat.
3. Beräkningstiden har utvärderats och jämförts med en spatial simulering av hela vakgeneratorn och vaken ner till $x/D = 100$ och metoden, med hänsyn taget till Couranttalet, uppskattas kunna ge besparing på 60%. Den stora besparingen kommer dock ännu längre nedströms, då beräkningstiden endast ökar linjärt med avseende på x till skillnad från de rena spatiala simuleringarna där den ökar med x^2 . Om tidssteget kan ökas ytterligare, tex genom att subtrahera friströmshastigheten från hastighetsfältet som Pasquetti [2] gör så kan besparingen bli ännu större.

4.1 Framtida studier

Den här beskrivna metoden öppnar upp möjligheter till en mängd olika studier av intresse. Här beskrivs ett axplock av de som anses vara av störst nytta för att på ett effektivt sätt kunna simulera vaken långt nedströms bakom en ubåt.

Det har visats i denna rapport att lösningen av de temporala simuleringarna är relativt okänsliga för initialfältet. Detta är positivt då det ställer lägre krav på simuleringen som används för initiering. Trots detta är en relativt lågt upplöst LES beräkningsmässigt dyr att genomföra på en realistisk geometri, så som en ubåt. Det är därför önskvärt att nyttja simuleringar av Reynolds Average Navier-Stokes (RANS) ekvationerna. Då RANS endast ger medelvärden så behövs någon form av syntetisk turbulens användas för att perturbera lösningen som ska användas för initiering. Att undersöka hur väl detta presterar jämfört med att initiera simuleringen från en LES är därför av intresse. Tidigare studier av vaken bakom en sfär har visat på lovande resultat för denna typ av metod [1].

Densiteten i vattenvolymen är ofta i någon mån stratifierad. Detta kommer att påverka vakens utbredning och karaktäristik. Det är därför av intresse att inkludera denna stratifiering i metoden som har undersökts i denna studie.

Ytterligare något som bör studeras är hur pass väl olika framdriftsmodeller kan inkorporeras. Detta är viktigt då ett framdriftssystem väsentligt påverkar vakens karaktäristik. Framdriftsmodeller varierar i komplexitet och finns för både tidsupplösta och medelvärdessimuleringar. Detta innebär att framdriftsmodeller kan inkorporeras både för initialsimuleringar med LES, URANS

(unsteady RANS) och RANS.

För att minska beräkningstiden för de temporala simuleringarna är det av intresse att undersöka hur lösningen påverkas av att subtrahera friströms-hastigheten från hastighetsfältet på samma sätt som Pasquetti [2].

Litteraturförteckning

- [1] E. Alenius, "Cfd-metoder för att studera turbulenta vakar bakom ubåtar och ytfartyg - en litteraturstudie", FOI-R-5496-SE, 2023.
- [2] R. Pasquetti, "Temporal/spatial simulation of the stratified far wake of a sphere", *Computers & Fluids*, vol. 40, no. 1, pp. 179–187, 2011.
- [3] S. B. Pope, *Turbulent Flows*. Cambridge University Press, 2000.
- [4] A. Townsend, *The structure of turbulent shear flow*. Cambridge university press, 1976.
- [5] W. K. George, "The self-preservation of turbulent flows and its relation to initial conditions and coherent structures", *Advances in turbulence*, vol. 3973, 1989.
- [6] M. S. Uberoi and P. Freymuth, "Turbulent Energy Balance and Spectra of the Axisymmetric Wake", *The Physics of Fluids*, vol. 13, no. 9, pp. 2205–2210, 09 1970.
- [7] N. Franck and F. Ducros, "Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor", *Flow Turbulence and Combustion*, vol. 62, pp. 183–200, 09 1999.
- [8] I. Rodriguez, R. Borell, O. Lehmkuhl, C. D. P. Segarra, and A. Oliva, "Direct numerical simulation of the flow over a sphere at $re=3700$ ", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 679, pp. 263–287, 2011.
- [9] M. J. Gourlay, S. Arendt, D. Fritts, and J. Werne, "Numerical modeling of initially turbulent wakes with net momentum", *Physics of Fluids*, vol. 13, no. 12, pp. 3783–3802, 2001.
- [10] A. VanDine, K. Chongsiripinyo, and S. Sarkar, "Hybrid spatially-evolving dns model of flow past a sphere", *Computers & Fluids*, vol. 171, pp. 41–52, 2018.

