



FYSISK OCH NUMERISK MODELLERING AV FLÖDESMÖNSTER I UTJÄMNINGSMAGASIN MED ÖAR



MARIA VIKSTRÖM

Institutionen för Vatten, Miljö och Transport
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg

Innehållsförteckning

Abstract

Sammanfattning

1	Förord	3
2	Syfte och genomförande	4
3	Bakgrund	6
3.1	Dagvatten	6
3.2	Metoder för rening och fördröjning av dagvatten	6
3.3	Utformning av utjämningsmagasin och dammar	7
3.3.1	Faktorer som påverkar strömningen	8
3.3.2	Öar	9
4.1	Modellbassängen	11
4.2	Vattnets distribution	12
5	CFD	13
5.1	Navier-Stokes ekvationer	13
5.2	Turbulensmodeller	17
6	Numerisk modellering	21
6.1	Förenklingar och begränsningar	21
6.2	Modelluppbyggnad	21
6.1.1	Skapandet av modellen	21
6.2.2	Beräkningsnät	22
6.3	Randvillkor och använda parametrar	23
6.3.1	Randvillkor	23
6.3.2	Använda parametrar och funktioner	24
6.3.2.1	Diskretisering	24
6.4	Numeriska simuleringar	25
6.4.1	Simulerade geometrier och placeringar	25
7	Fysisk modellering	28
7.1	Syfte	28
7.2	Mätning av strömmönster	28
7.2.1	Försöksutrustning	28
7.2.2	Uppbyggnad av hinder	30

7.3	Mätningar	32
8	Spårämnesförsök	33
9	Resultat	35
9.1	Resultat för Hinder 1 och Hinder 4	35
9.1.1	Fysiska mätningar	35
9.1.2	Numeriska simuleringar	38
9.1.3	Spårämnesförsök	43
9.2	Numeriska resultat för övriga hinder	45
10	Felkällor	47
11	Slutsatser och diskussion	49
12	Referenslista	54

Bilaga 1	Genomförda numeriska simuleringar
Bilaga 2	Volymelementindelning för Hinder 1
Bilaga 3	Beräknade strömningsmönster för Hinder 1
Bilaga 4	Beräknade strömningsmönster för Hinder 2
Bilaga 5	Beräknade strömningsmönster för Hinder 3
Bilaga 6	Beräknade strömningsmönster för Hinder 4
Bilaga 7	Beräknade strömningsmönster för Hinder 5

1 Förord

Detta examensarbete har utförts under våren år 2001 på institutionen för Miljö, Vatten och Transport på sektionen för Väg- och Vattenbyggnad på Chalmers.

Projektet är en fortsatt studie av ett pågående doktorandprojekt som utförs av Åsa Adamsson på Chalmers. Under hennes forskning uppkom önskemål om att modellera ett utjämningsmagasin med öar och vi kom gemensamt fram till ett upplägg som inkluderade både numeriska simuleringar och fysiska mätningar.

Jag vill tacka min handledare Åsa Adamsson för all hjälp och uppmuntran hon bistått med under arbetets gång. Ett tack skall även riktas till min examinator professor Lars Bergdahl. Tack även till Jesper Knutsson som har hjälpt mig mycket under uppstart av laboratiemätningarna, samt till övrig personal på institutionen för Miljö, Vatten och Transport som hjälpt mig då det behövts.

Maria Vikström

Göteborg, hösten 2001

2 Syfte och genomförande

Syftet med detta examensarbete är att med hjälp av CFD, Computational Fluid Dynamics, numeriskt simulera och analysera hur de hydrauliska förhållandena i ett avsättningsmagasin ändras då en ö eller ett hinder placeras framför inloppet. Resultaten från simuleringarna skall jämföras med fysiska modellförsök utförda i Vattenhallen på sektionen för Väg- och Vattenbyggnad på Chalmers. Målet är att kunna utröna hur väl de tredimensionella strömningsförhållandena i den fysiska modellen stämmer med de numeriskt modellerade samt finna en så lämplig placering av de olika hindren som möjligt med hänsyn till magasinets reningsförmåga. Öarnas syfte är att minska kortslutningen och öka uppehållstiden och därmed reningsförmågan.

För att genomföra detta kommer ett antal simuleringar göras med hjälp av det tredimensionella beräkningsprogrammet Fluent 5.4.8, med Gambit 1.3.2 som preprocessor. Simuleringarna skall göras för ett antal olika utformningar på hindren samt för ett antal olika placeringar i bassängen. Både de numeriska simuleringarna och de fysiska mätningarna skall genomföras för tre olika flöden, 20 l/s, 8 l/s samt 4 l/s. Bassängen, i vilken de fysiska modelleringarna skall genomföras, har måtten 12,9·8,9·1 m. Inloppet består av ett cirkulärt rör med diametern 0,23 m beläget längs ena kortsidas mitt, precis under vattenytan. Utloppet består av ett 0,8 m brett överfall vid motstående kortsidas mitt.



Fig. 2.1 *Översiktsfoto av modellbassängen*

Detta examensarbete är en fortsatt studie av en pågående doktorsavhandling vilken utförs av Åsa Adamsson på institutionen för Vatten, Miljö och Transport på sektionen för Väg- och Vattenbyggnad på Chalmers. Hon har tidigare studerat strömmönster för samma försöksbassäng dels utan några hinder, och dels med en undervattensmur nära inloppet. Resultat från detta examensarbete kommer därför att jämföras med resultat från Åsa Adamssons licentiatuppsats (Adamsson, 1999).

3 Bakgrund

3.1 Dagvatten

Med dagvatten menas det vatten som efter nederbörd i form av regn eller snö rinner av hårdgjorda ytor, såsom gator, tak eller hårt packat grus. En viss del av detta vatten avdunstar eller infiltreras i marken. Hur mycket vatten som verkligen behöver avledas är beroende av nederbördens intensitet och varaktighet, markegenskaper och topografi samt avrinningsområdets storlek.

Det är av högsta intresse att finna lämpliga sätt att rena detta dagvatten utan att belasta reningsverk eller avloppsvattenledningar mer än nödvändigt. Dagvattnets reningsbehov skiljer sig från det för avloppsvatten och behöver inte genomgå lika många processer samtidigt som ur dimensioneringssynpunkt för reningsverken är önskvärt att undvika de höga flödestoppar som uppstår till följd av kraftiga regn. Det går inte av ekonomiska skäl att dimensionera ett avloppsledningsnät efter höga flöden som kanske aldrig överskrids, utan dimensioneringen får ske så att summan av anläggningskostnad, driftskostnad och kostnad i samband med översvämning minimeras.

Tre olika huvudgrupper finns för avledning av spill- och dagvatten. Duplikatsystemet är idag dominerande och är uppbyggt så att spillvatten avleds i en ledning och dagvatten i en annan. Det separata systemet är det äldsta och billigaste systemet och innebär att allt dagvatten samlas upp i öppna diken. Med ett separat ledningsnät leds dagvattnet idag oftast rakt till en recipient som då belastas med höga föroreningshalter. Leds dagvattnet istället via det kombinerade systemet, där dagvatten och spillvatten avleds i en gemensam ledning, till avloppsreningsverk kommer vid för höga flöden orenat avloppsvatten att bräddas till recipienten. Sammansättningen och därmed reningsbehovet på dagvattnet varierar med avrinningsområdets karaktär och användning (Kompendium i VA-ledningsteknik, 1995).

3.2 Metoder för rening och fördröjning av dagvatten

Det finns idag ett antal metoder för att ta hand om dagvatten. Ett sätt att reducera föroreningarna är att anlägga dagvattendammar eller utjämningsmagasin för omhändertagande av dagvatten. Andra exempel på reningsmetoder är infiltrationsanläggningar där vattnet magasineras under en kort period för att sedan filtreras genom marken, eller våtmarker där föroreningar och ämnen kan upptas av växter, sedimentera eller genomgå

mikrobiell nedbrytning. I detta arbete kommer fokus att läggas på dagvattendammar och utjämningsmagasin för omhändertagande av dagvatten.

Det är viktigt att mängden föroreningar som slutligen når recipienten minskas och att flödet utjämnas för att motverka dämning och översvämning uppströms recipienten.

Utgjämningsmagasin har funnits länge inom avloppshanteringen, men då oftast som begränsade magasin under mark med syfte att magasinera avloppsvatten vid kraftiga flödestoppar. Detta vatten kan sedan portioneras ut till recipienten eller den avskärande ledningen under en längre tid. Risk för dämning uppströms magasinet är ett problem vid dessa anläggningar. Ett annat problem är att sediment tenderar att sätta igen ledningar och delar av utjämningsmagasinet.

Utgjämningsmagasin i form av öppna dammar är något som har fått större utbredning under de senaste åren och som sannolikt kommer att användas betydligt mer i framtiden. En damm ger inte bara ett estetiskt bidrag till närmiljön, utan fungerar samtidigt som flödesutjämnare och vattenrenare. Här kan sedimenteringseffekten som skapade problem i de slutna magasinerna utnyttjas till rening av dagvatten. Förbättringen av vattenkvalitet är främst ett resultat av sedimentering av partikulärt material samt biologisk reducering eller denitrifiering av närsalter.

3.3 Utformning av utjämningsmagasin och dammar

När en damm skall anläggas och utformas är det många faktorer som spelar in. Dessa kan delas in i fem huvudgrupper; tekniska-, ekonomiska-, ekologiska-, sociala- och estetiska faktorer (Persson, 1999). De tekniska faktorerna är de som ansetts vara mest intressanta i detta arbete.

Hur väl reningen av dagvattnet fungerar är i hög grad beroende av vattenhastigheten i dammen. Vattenhastigheten är i sin tur beroende av områdets hydrologi, dammvolymen, vattnets uppehållstid och strömningsmönster. Andra faktorer av betydelse är temperatur, flödesbelastning och vegetationstyp. En damm eller ett magasin där möjlighet skapas för avskiljning av partiklar bör även ha en hög hydraulisk effektivitet vilket innebär att en så stor del av volymen som möjligt bör vara aktivt medverkande. Detta uppnås genom att minimera antalet så kallade döda zoner, d.v.s. zoner där vattnet ej är effektivt medverkande till avskiljningen av partiklar. För att nå god avskiljning är det även viktigt att ett jämt fördelat flöde skapas genom dammen.

Flöden med en jämn hastighetsprofil existerar dock endast i dammar med ett stort längd-bredd förhållande. Vattenmassan i en damm rör sig generellt inte med en homogen profil, utan kännetecknas snarare av virvlar och recirkulation (Persson, 2000). Hur detta längd-bredd förhållande bör se ut finns många åsikter om. Förhållanden på 5-10:1 har rekommenderats (Thackston *et al*, 1987), medan andra studier rekommenderar förhållanden på 1-4:1 (Reed *et al*, 1995). Dock finns forskning som tyder på att vindpåverkan över systemen är så dominerande att längd-bredd förhållandet är av mindre betydelse för dammens hydrauliska egenskaper (Kadlec och Knight, 1996).

Ur hydraulisk synpunkt är en rektangulär damm med in- och utlopp placerade längs kortsidorna den mest effektiva utformningen (Persson, 1999).

En dagvattendamm bör även ha en stor dammvolym för att på så sätt ge möjlighet för långa uppehållstider och en stor magasineringskapacitet. Detta är viktigt då dammen bör kunna fungera som ett fördröjningsmagasin och utjämna flödestoppar likaväl som för avskiljning av partiklar. En stor magasineringskapacitet är speciellt viktig för det första regnet i en regnserie, så kallat "first flush", då det första regnet drar med sig stor del av de föroreningar som ackumulerats sedan det föregående regntillfället (Persson, 1999).

3.3.1 Faktorer som påverkar strömningen

Ett antal olika faktorer är avgörande för strömningen i dammar. De är bottenpografi, inströmningseffekter, råhet (friktion mot botten och vegetation), dammens plangeometri, vind och temperatur (Persson, 1999).

Vidare skriver Persson att bottenutformningen påverkar strömningens lokala riktning i olika delar av dammen och genom utplacering av bankar och sänkor kan denna strömning påverkas.

Inströmningseffekterna kan förändra strömningsbilden i stora delar av dammen. Det är dock endast i mindre dammar, där dammens totala area är liten i förhållande till ytan kring inloppet, som hela dammens strömmönster påverkas. Genom att det inkommande vattnet har en hög hastighet, ofta i form av en jetstråle, kan det förändra strömbilden drastiskt vid inloppet. Detta sker inte i samma utsträckning vid dammens utflöde. En jetstråle kan i vissa situationer dra med sig omgivande vatten. Det kan vara fördelaktigt att utforma inloppet med en svagt ökande öppning, detta för att bromsa hastigheterna in i dammen.

Nedanstående figur visar tre exempel på hur inloppets utformning kan påverka strömbilden i dess närhet.

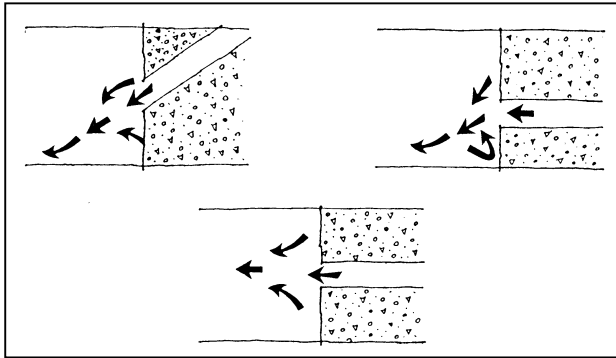


Fig. 3.3.1 Exempel på hur jetströmmar kan inverka på strömbilden kring inloppet. Störst verkan får sådana effekter vid mindre dammar eller bassänger vid reningsverk (Persson, 1999).

3.3.2 Öar

Ett sätt att påverka strömningsmönstret i en damm är att anlägga öar eller hinder i närheten av inloppet. Dessa har då som syfte att bromsa den jetstråle som bildas vid inloppet för att på så sätt kunna minska vattenhastigheterna och snabbare få lugnare strömningsförhållanden i så stora delar av dammen som möjligt. Som tidigare beskrivits är en snabb övergång till ett jämnt fördelat flöde önskvärt.

Avskiljningsgraden i dammen kan genom lägre hastigheter och ett jämt fördelat flöde förbättras eftersom mer partiklar tillåts sedimentera. Med förändrat strömningsmönster kan andelen döda zoner påverkas så att större del av dammen effektivt medverkar i reningsprocessen. Det är önskvärt att ha en så lång uppehållstid i ett system för partikelavskiljning som möjligt, dvs. den tid en partikel befinner sig mellan inloppet och utloppet bör vara maximal och lika lång för alla partiklar, då en hög uppehållstid medför att partiklarna har längre tid att sedimentera fullständigt på.

Genom anläggandet av en ö kan man minska graden av kortslutning, vilket är ett mått på hur snabbt en föroreningspuls når utloppet. Dessa parametrar kan uppskattas genom spårämnesförsök, vilket beskrivs noggrannare i kapitel 8.

Då dagvattendammarna ofta anläggs i rekreatiomsområden bidrar anläggandet av en ö med exempelvis träd och buskar även till det estetiska värdet och kan upplevas som ett trevligt inslag till miljön.

Tidigare studier med numerisk modellering av dammar visar på en positiv effekt vid anläggandet av öar framför inloppet. Försök har visat på att en ö i storleksordningen 2 % av dammens area framför inloppet ger en betydligt lägre kortslutning och en högre effektiv volym (Persson, 1999). Samma studie visar att en undervattensvall ger goda resultat i form av minskad kortslutning. Kortslutningen är ett mått på hur omrört vattnet är.

I denna studie har målet varit att se hur strömningen i ett rektangulärt avsättningsmagasin ändras och hur kortslutningen kan minskas då en ö placeras framför inloppet. Öarna har placerats på olika avstånd från inloppet och har också haft olika dimensioner.

4 Försöksanläggningen

Den anläggning som använts i den fysiska modelleringen och som varit modell för de numeriska simuleringarna fanns under detta arbetes genomförande uppbyggd i Vattenhallen på sektionen för Väg- och Vattenbyggnad på Chalmers.

4.1 Modellbassängen

Försöksmodellen hade måtten 12,9·8,9·1 m och var uppbyggd av betongelement med måtten 0,39·0,15·0,19 m. Bassängens botten var täckt av en plastmatta vilken även täckte betongväggarnas baksida. Vattendjupet i bassängen hölls på en konstant nivå av 1,0 m.

Inloppet bestod av ett cirkulärt rör med diametern 0,23 m beläget längs ena kortsidas mitt, precis under vattenytan. Utloppet bestod av ett 0,8 m brett överfall vid motstående kortsidas mitt.



Fig. 2.1 *Översiktsfoto av modellbassängen*

De hinder, eller öar, som byggts upp i bassängen bestod även de av betongelement av samma typ som tidigare beskrivits.

4.2 Vattnets distribution

Det system för vattendistribution som använts bestod av en högreservoar med en volym på cirka 80 m³ från vilken vattnet med självfall rann till själva vattenhallen. Flödet reglerades med ventiler och kontrollerades av en flödesmätare. För låga flöden har en turbinflödesmätare använts och för flöden på 8 l/s och uppåt har en elektromagnetisk flödesmätare använts. Efter att vattnet gått igenom försöksbassängen pumpades det till en lågreservoar med en volym av ca 120 m³. Därifrån pumpades vattnet tillbaka till högreservoaren.

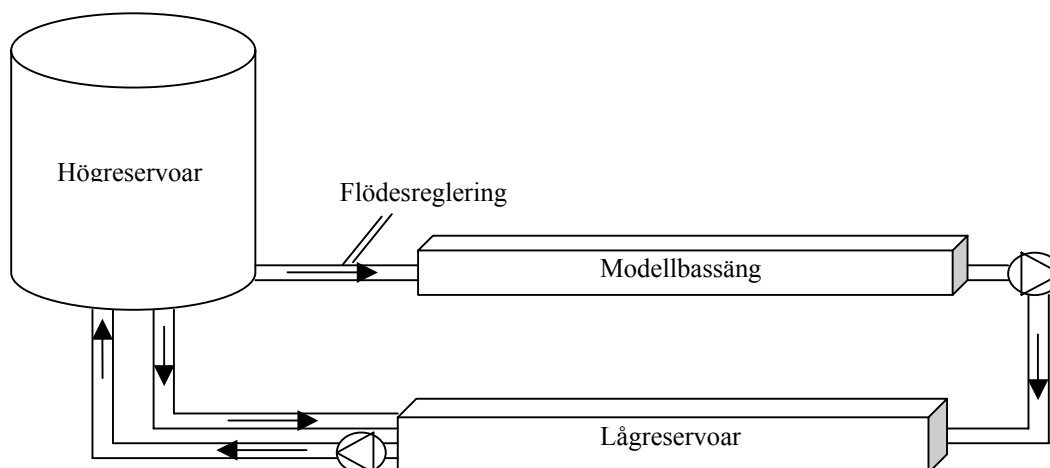


Fig. 4.2 Principiell skiss över vattnets distribution i försöksanläggningen.

För att bibehålla en ungefärligt konstant vattennivå oberoende av flödet in i bassängen kunde överfallets höjd regleras. Vattennivån i bassängen låg då mellan 1,000-1,005 m.

Fem olika ögeometrier i ovan beskrivna bassäng har simulerats numeriskt, vilket beskrivs mer ingående i kap. 6. De olika geometrier redovisas i nedanstående tabell. Av dessa utformningar har Hinder 1 och Hinder 4 byggts upp som fysiska modeller på vilka mätningar utförts.

Benämning	Mått [m·m]
Hinder 1	2·2
Hinder 2	4·1
Hinder 3	4·0,3
Hinder 4	2·2 (romb)
Hinder 5	1·1

Tabell 4.3 Ögeometrier

5 CFD

Det har länge funnits ett behov av att kunna förutsäga hur en fluid uppträder i olika sammanhang. I dagvattensammanhang är strömningsmönstret och de hastigheter som uppstår mycket viktiga för avskiljningens effektivitet. För att kunna förstå hur exempelvis strömning fungerar tredimensionellt har det under de senaste årtiondena utvecklats programvaror för att med hjälp av datorer kunna simulera och beräkna flöden. Referens för detta kapitel är då inget annat anges Rodi (1993), Versteeg och Malalasekera (1995) och Fluent Users's Guide (1998).

CFD, Computational Fluid Dynamics, är ett verktyg som kan användas för att med finita volymer beräkna hur en fluid rör sig.

De grundläggande teorier CFD-beräkningarna bygger på är följande;

- Konservering av fluidens massa, vilket innebär att massflödet in i en kontrollvolym är lika stort som massflödet ut adderat med förändringen av massa i kontrollvolymen.
- Newtons andra lag, vilken säger att förändringen per tidsenhet i rörelsemängd hos en partikel är lika med summan av de krafter som verkar på partikeln.
- Termodynamikens första lag, vilken säger att förändringen i energi hos en partikel är lika med summan av den bildade värmeenergin och uträttat arbete på partikeln.

De ekvationer som löses i CFD-programmet är Navier-Stokes differentialekvationer.

5.1 Navier-Stokes ekvationer

CFD-simuleringar bygger på Navier-Stokes ekvationer vilka i sin tur bygger på att massa, energi och rörelsemängd i ett system hela tiden konserveras.

Genom att ställa upp en massbalans för ett infinitesimalt element i en inkompressibel vätska med konstant densitet kan följande kontinuitetsekvation härledas:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5.1)$$

där u = hastigheten i x-led
 v = hastigheten i y-led
 w = hastigheten i z-led

Rörelsemängden definieras som produkten av en partikels hastighet och dess massa. De olika krafter som verkar på en partikel i vätskan är dels ytkrafter såsom tryck och viskösa krafter, dels inre krafter såsom gravitation, centrifugalkrafter, corioliskrafter och elektromagnetiska krafter.

Ser man på en kontrollvolym i vätskan på samma sätt som för massbalansen utsätts denna för ett tryck, p , i rörelseriktningen samt skjuvspänningar, τ_{ij} , vid dess yta till följd av de viskösa krafterna på grund av inre friktion. De inre krafterna utgörs i rörelsemängdekvationerna av en tilläggskraft, S_{Mi} .

Rörelsemängdekvationerna i x-, y- respektive z-led kan då härledas till;

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (5.2)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (5.3)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (5.4)$$

där u = hastigheten i x-led
 v = hastigheten i y-led
 w = hastigheten i z-led
 ρ = densiteten

Tilläggstermen, S_{Mi} , beror av inre krafter såsom gravitation, vilket gör att den med hänsyn enbart till detta skulle bli;

$$S_{Mx} = 0$$

$$S_{My} = 0$$

$$S_{Mz} = -\rho g$$

I detta fall med strömning i ett slutet system, utan fri vattenyta (vattenytan i modellen är konstant), blir även denna term noll då ingen hänsyn behöver tas till gravitationen eftersom densiteten är konstant.

Navier-Stokes ekvationer består av tre differentialekvationer som beskriver bevarandet av en viskös vätskas rörelsemängd. För en inkompressibel vätska kan dessa med hjälp av ekvationerna (5.1), (5.2), (5.3) och (5.4) uttryckas enligt nedan;

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (5.5)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (5.6)$$

$$\frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (5.7)$$

De flesta flöden i dagvattenssammanhang måste anses vara turbulenta, särskilt i de fall då tillflödet utgörs av en jetstråle vilket är fallet i denna studie. Ett turbulent tillstånd karakteriseras av höga Reynolds tal (>2300 för rör) och en stor oregelbundenhet i tid och rum. Laminär strömning har däremot en regelbunden hastighetsvariation och rör sig i skikt.

Trots att hastigheterna är varierande med tiden kan ett turbulent tillstånd ändå anses vara stationärt, beroende på att medelvärdet av hastigheten är konstant med tiden samt att hastighetsvariationerna har egenskaper som är konstanta med tiden (German och Kanth, 1997).

Eftersom virvlarnas storlek och dess karakteristiska längder och hastigheter varierar så kraftigt i ett turbulent tillstånd skulle det behövas extremt hög upplösning i simuleringarna för att kunna beräkna de processer som sker i de minsta virvlarna. Detta är idag inte möjligt. För att ändå kunna ta hänsyn till vad som sker i dess små virvlar måste beräkningarna kompletteras med en så kallad turbulensmodell.

Turbulensmodellen innebär att hastighets- och tryckvektorerna, U_i och P , förenklas och delas upp i ett medelvärde med en fluktuerande del enligt följande;

$$U_i = \bar{U} + u'(t) \quad (5.8)$$

$$P = \bar{P} + p'(t) \quad (5.9)$$

där U_i, P = Hastighet respektive tryck i x- och z-riktningen
 $\bar{U}, \bar{P}$ = Medelhastighet respektive medeltryck i x- och z-riktningen
 $u'(t), p'(t)$ = Hastighets- respektive tryckvariationer i x- och z-riktningen

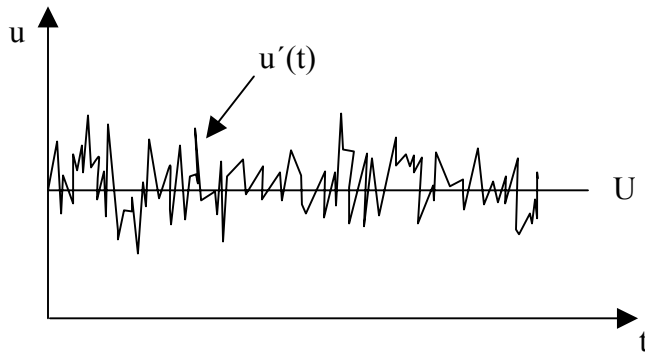


Fig. 5.1 Hastighetsvektorernas uppdelning i ett medelvärde och en fluktuerande del.

Då ekvation (5.8) och (5.9) sätts in i Navier-Stokes ekvationer erhålls följande ekvationer på tensorform;

$$\frac{\partial \bar{U}_j}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (5.10)$$

Den sista termen i ovanstående ekvation, $\overline{u'_i u'_j}$, kallas för Reynolds spänningsterm och representerar turbulensen. För att helt kunna lösa ekvationen krävs ett antagande för denna term som måste simuleras med hjälp av en turbulensmodell. De senare ekvationerna kallas ibland Reynolds ekvationer eller Reynolds medelvärdesbildade Navier-Stokes ekvationer.

5.2 Turbulensmodeller

Turbulensmodellerna används för att kunna modellera de Reynoldska krafter som uppstår i ett turbulent flöde. Många olika modeller finns att tillgå i CFD-programmen, i denna studie har den så kallade k-ε modellen använts med vissa variationer. Detta är en väl vedertagen turbulensmodell som ofta används i flödesberäkningar. Modellen tar hänsyn till diffusion samt produktion och nedbrytning av turbulens. En klar fördel med denna modell jämfört med en annan välkänd sådan, blandningslängdsmodellen, är att k-ε modellen fungerar även för återcirkulerande tredimensionella flöden där konvektion och diffusion inte kan antagas vara försumbara.

Två transportekvationer (partiella differentialekvationer), en för den turbulenta kinetiska energin, k , och en för dissipationshastigheten hos den kinetiska energin, ε , skall lösas. En förutsättning i dessa ekvationer är att den turbulenta viskositeten, μ_t , är lika stor i alla riktningar. Den turbulenta viskositeten är ett mått på förhållandet mellan Reynolds spänningsterm och deformationshastigheten hos vätskan enligt nedanstående samband;

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.2.1)$$

En annan förutsättning för att k-ε modellen skall stämma är att det råder fullt utvecklad turbulens. Detta är inte sant nära väggar, vilket gör att modellen måste kompletteras med en "standardväggfunktion". Fullt utbildad turbulens finns troligen bara precis vid inloppet i jetstrålen i verkligheten.

Differentialekvationen för den kinetiska energin, k , härrör från en exakt ekvation medan den för den kinetiska energins dissipationshastighet, ε , till viss del bygger på antaganden och då är mer osäker. Denna del kan därför vid behov kompletteras med en RNG-term, vilket kommer att beskrivas senare.

Transportekvationerna som skall lösas kan tecknas enligt nedan;

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (5.2.2)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5.2.3)$$

I ovanstående ekvationer representerar högerledets första term transport av k eller ε på grund av diffusion, den andra termen innehållande G_k , vilken beskrivs nedan, generering av k eller ε och den sista termen motsvarar nedbrytningen av k eller ε .

$$G_k = -\overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5.2.4)$$

$C_{1\varepsilon}$ och $C_{2\varepsilon}$ är konstanter och σ_k och σ_ε är de turbulenta Prandtls tal (för turbulent diffusion) för k respektive ε och ges värden nedan.

Den turbulenta viskositeten, μ_t , beräknas i ekvation (5.2.2) och (5.2.3) genom att kombinera k och ε enligt följande;

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{där } C_\mu \text{ är en konstant.} \quad (5.2.5)$$

För standardlösningen av k- ε modellen har värden på ett de konstanter som ingår i ekvation (5.2.2) och (5.2.3) erhållits genom experiment med luft- och vattenströmmar i turbulent tillstånd. Nedanstående konstanter har visat sig fungera väl för ett brett spektrum av flöden;

$$\begin{aligned} C_{1\varepsilon} &= 1,44 \\ C_{2\varepsilon} &= 1,92 \\ C_\mu &= 0,09 \\ \sigma_k &= 1,00 \\ \sigma_\varepsilon &= 1,30 \end{aligned}$$

Som tidigare beskrivits kan k- ε modellen kompletteras ytterligare med en så kallad RNG-term. RNG är en förkortning för engelskans *renormalization group* och är ett matematiskt uttryck. Resultatet blir ett tillskott i de båda transportekvationerna för k och ε och förändrade konstanter. Transportekvationerna ser då ut enligt följande;

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (5.2.6)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (5.2.7)$$

Till skillnad från standardekvationerna används här de inverterade värdena på Prandtls tal för k och ε , α_k och α_ε . En annan skillnad är att en effektiv turbulent viskositet introduceras, vilken måste beräknas ur en differentialekvation;

$$d\left(\frac{\rho^2}{\sqrt{\varepsilon\mu}}\right) = 1,72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v}^3 - 1 + C_v}} d\hat{v} \quad \text{där } \hat{v} = \frac{\mu_{eff}}{\mu} \quad (5.2.8)$$

och $C_v \approx 100$

Ovanstående differentialekvation kan på ett mer exakt sätt beskriva hur den effektiva turbulensen varierar med det effektiva Reynolds tal och virvelstorlekar, vilket gör att turbulensmodellen stämmer bättre för låga Reynolds tal och för områden nära väggar än tidigare. Värdet på C_μ ändras här till 0,0845, $C_{1\varepsilon}$ till 1,42 och $C_{2\varepsilon}$ till 1,68. Fluent beräknar dock den effektiva viskositeten med den förinställda default-formeln (5.2.5), men ger möjligheten att vid låga Reynolds tal välja att beräkna μ_t med ekvation (5.2.8). I de gjorda simuleringarna har den förinställda ekvationen inte ändrats.

Den största skillnaden med RNG-varianten i turbulensmodellen är den sista termen i transportekvationen för dissipationshastigheten; R , vilken kan skrivas som;

$$R = \frac{C_\mu \rho \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k} \quad \text{där} \quad \eta = S \frac{S}{\varepsilon} \quad (5.2.10)$$

$\eta_0 = 4,38$
 $\beta = 0,012$

S motsvarar resultanten av hastighetsförändringarna i x-led enligt nedan;

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.2.11)$$

Genom att studera ekvation (5.2.10) och (5.2.11) kan det utläsas att då skärhastigheten är hög, ($\eta > \eta_0$), fås en mindre nedbrytning av ε vilket förstärker dess inverkan på lösningen samtidigt som k får en mindre inverkan vilket gör att även den effektiva viskositeten minskar. Detta gör att RNG-modellen fungerar bättre för flöden med varierade hastigheter med även låga Reynolds tal och för flöden med stora skärhastigheter. Resultat från simuleringarna av försöksbassängen i detta arbete visar att RNG-modellen

fungerar bättre för höga flöden än standard $k-\epsilon$ modellen, se kap. 9. Detta beror troligtvis på att försöksbassängen har stora områden med låga hastigheter och låga Reynolds tal.

6 Numerisk modellering

6.1 Förenklingar och begränsningar

Som alltid vid försök att numeriskt och fysiskt modellera ett verkligt förlopp har ett antal antaganden och förenklingar varit nödvändiga. Alla ansättningar av randvärden i den numeriska modellen innebär en förenkling och generalisering av verkligheten.

I den numeriska modellen har ett symmetriplan ansatts som randvärde vid vattenytan. Detta gör att den fria vattenytan som finns i den fysiska modellen är låst. Små vågor bildas på vattenytan i den fysiska modellen vilka då inte tas någon hänsyn till vid beräkningarna. Ingen hänsyn tas heller till den förhöjning eller avsänkning av vattenytan som sker i närheten av ön. Även i anslutning till överfallet sker i verkligheten en gradvis avsänkning av vattenytan.

Ingen hänsyn har tagits till eventuell påverkan av vind över den fysiska modellen. Då modellförsöken skett inomhus är denna förenkling mycket lik de verkliga förhållanden som rått. På samma sätt har eventuella temperaturskiktningar genom volymen försummats. Vid den jämförande fysiska modelleringen mättes vattentemperaturen på tre olika djup i bassängen för att säkerställa att den var konstant, vilket gör att denna förenkling inte har någon nämnvärd effekt på resultaten.

Använda randvärden och parametrar och dess innebörd förklaras närmare i kapitel 6.3.

6.2 Modelluppbyggnad

6.1.1 Skapandet av modellen

I preprocessorn Gambit 1.3.2 byggdes modellens geometri upp genom att först skapa punkter, sedan linjer, ytor och volymer. För att få en verkligare hastighetsprofil vid inloppet byggdes modellen upp med ett tre meter långt rör. Detta kan dock vara ett för lågt antagande då hastigheten antas vara konstant över tvärsnittet. En riktig hastighetsprofil bör troligtvis ha hunnit utvecklas innan flödet når bassängen.

6.2.2 Beräkningsnät

Volymelementindelningen, beräkningsnätet, byggs även upp i preprocessorn. Elementnätet som genereras styr antalet beräkningspunkter och dess placeringar i geometrin och påverkar i hög grad kvaliteten på simuleringarna i Fluent. I detta arbete har elementnätet byggts upp med tetraedriska element, detta för att kunna kombinera inloppsrörets nät med bassängens på enklast sätt. Vilken typ av element som väljs bör inte spela någon avgörande roll vid strömningsberäkningarna så länge elementen är tillräckligt små. Det viktiga vid genereringen av ett volymnät är att få små celler av god kvalitet i de områden där hastighetsgradienterna och turbulensen är stor. Det går inte att modellera turbulens och virvlar inom varje enskilt element.

För att få en lämplig fördelning av volymelementen krävs en del pyssel och tålamod. En tätare elementindelning har skapats i närheten av inlopp och utlopp, samt i närheten av ön i bassängens mittstråk. Det är i dessa områden man kan förvänta sig mest förändringar. Det är troligt att hastigheterna blir högre vid bassängens sidor då vattnet tvingas förbi hindret men eftersom beräkningsnätet är relativt tätt redan från början, 0.2 m, har ingen extra förtätning gjorts där. Antalet beräkningsceller varierar något mellan de olika modellerna, men är i genomsnitt strax över 260 000 celler.

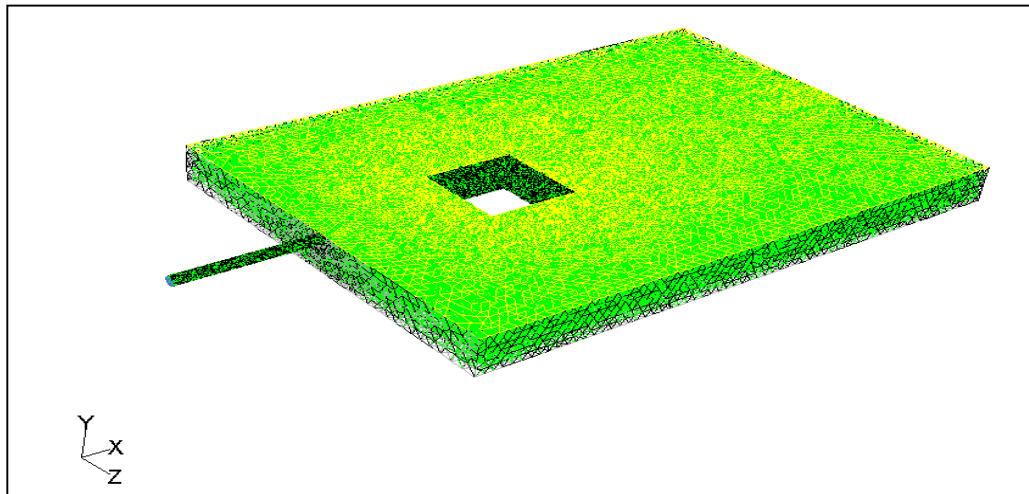


Fig. 6.2.2 Elementindelning för Hinder 1.

Mer detaljerade bilder på modellernas elementindelning finns redovisade i Bilaga 2.

I preprocessorn finns möjlighet att bestämma vilka randvillkor som skall gälla, dock ansätts inga ingångsvärden eller materialparametrar med siffror. De olika randvillkoren och dess innebörd tas upp i kapitel 6.3.

När den geometriska modellen färdigställts exporteras den för att sedan kunna läsas i Fluent 5.4.8.

6.3 Randvillkor och använda parametrar

Som tidigare beskrivits anges vilken typ av randvärden Fluent skall använda sig av i beräkningarna redan i preprocessorn. Hur de fungerar och vilka övriga ingångsvärden och förutsättningar som är använda i de olika beräkningarna kommer att diskuteras i detta kapitel.

6.3.1 Randvillkor

Randvillkoret för inflödet till bassängen är satt till ”*velocity inlet, normal to boundary*”. Detta innebär att hastigheten antas vara jämt fördelad över gränsytan och vinkelrät mot denna. Detta villkor har ansatts vid den bitersta gränsytan i inloppsröret, vilket troligen gör att en riktig hastighetsprofil hinner utvecklas innan flödet når själva bassängen. De hastigheter som använts redovisas i nedanstående tabell.

Flöde [l/s]	Hastighet [m/s]
20	0,481
8	0,193
4	0,096

Tabell 6.3.1 Inloppshastigheter

Möjlighet finns även att ansätta värden på turbulensintensiteten och dissipationshastigheten. I de flesta simuleringar har förinställda värden använts. En turbulensintensitet på 1 %, vilket är det förinställda värdet, anses generellt vara låg och en turbulensintensitet på 10 % eller högre, vilket har använts som jämförelse i vissa simuleringar, anses vara hög. Skingringen av virvlarna, längdskalan för dissipationen, har även den varit förinställd. Vid de simuleringar där turbulensintensiteten sattes till 10 % minskade även denna faktor från 1 till 0,2 m.

För överfallet vid bassängens utlopp har *pressure outlet* använts som randvillkor, vilket innebär att ett statiskt tryck anges. Trycket är i detta fall noll. Fördelen med att använda detta randvillkor istället för *outflow* är att lösningen lättare konvergerar, dvs. blir numeriskt stabil.

För samtliga fasta ytor i modellen har randvillkoret *wall* använts, vilket innebär att vattnets hastighet vid väggen är noll. Default-värdet på ytornas råheter, 0,5 mm, har genomgående använts. För betongytorna och inloppsöröret är detta helt rimliga värden, för plastmattan däremot bör de kanske vara lägre. Dock är hastigheterna längs botten låga i nästan hela bassängen, utom precis vid inloppet, vilket gör att råheten har mycket liten inverkan på det slutliga resultatet.

Vid vattenytan har ett symmetriplan antagits, vilket innebär att en fiktiv likadan bassäng speglas ovanpå den verkliga. Detta gör att hastighetsgradienten vid ytan hela tiden är noll. Symmetriplanet fungerar då som ett lock och låser vattenytan. Detta kan möjligtvis påverka lösningen i närheten av hindren i simuleringarna då det i verkligheten sker en liten förhöjning eller avsänkning av vattenytan där.

För att på ett korrekt sätt kunna modellera strömningen i närheten av en solid vägg måste volymselementindelningen vara mycket tät, vilket kräver orimligt hög datorkapacitet. För att kringgå detta problem kan en så kallad "*wall function*" användas. Denna utgår från att flödet utvecklats fullt turbulens i det aktuella området.

6.3.2 Använda parametrar och funktioner

6.3.2.1 Diskretisering

När Navier-Stokes differentialekvationer skall lösas omvandlar Fluent problemet till diskreta algebraiska ekvationer med hjälp av kontrollvolymer som sedan kan lösas numeriskt. Genom bakåtdifferens beräknas riktningar och värden i nästföljande cell baserat på resultaten från den tidigare. Möjlighet finns att välja vilken typ av bakåtdifferens som skall användas för de olika storheterna. För samtliga simuleringar har andra ordningens ekvationer använts för rörelsemängdberäkningarna samt SIMPLEC och STANDARD för tryckberäkningarna. Första ordningens ekvationer har i de allra flesta fall använts för diskretiseringen av k och ϵ , dock har försök gjorts med andra ordningens ekvationer för att se hur det påverkade den slutliga lösningen.

6.3.2.2 Underrelaxationsfaktorer

Eftersom de ekvationer som löses i Fluent är icke-linjära måste man kunna kontrollera förändringen av de beräknade storheterna mellan varje cell. Detta görs genom underrelaxationsfaktorerna där det kan anges hur stor del av varje beräknad lösning i en cell som skall tas med i beräkningen för värdet i nästa cell. De värden som är använda i detta arbete redovisas i nedanstående tabell (Adamsson, 1999);

Underrelaxationsfaktor	Värde
Tryck	0,1
Rörelsemängd	0,3
Turbulent kinetisk energi, k	0,5
Turbulent dissipationshastighet, ε	0,5

Tabell 6.3.2.2 *Underrelaxationsfaktorer*

6.4 Numeriska simuleringar

Vid modellering av samtliga öar och ö-placeringar har Gambit 1.3.2 använts som preprocessor och Fluent 5.4.8 som solver och postprocessor. Simuleringar har genomförts för tre olika flöden; 4, 8 samt 20 l/s och med olika varianter på turbulensmodellen. Vilka olika alternativ som använts vid simuleringarna beskrivs nedan samt finns redovisade i Bilaga 1.

Vid utformning och placering av öarna har ett antal olika alternativ modellerats och utvärderats. Inget av hindren har en geometri som är direkt applicerbar i naturen där inga helt raka sidor eller rätvinkliga hörn skulle vara särskilt estetiskt tilltalande. I de fall dammarna inte ligger i rekreatiomsområden och hindren anläggs enbart för att ändra dammens hydrauliska egenskaper är de mer lämpliga. Som kontroll för hur Fluent arbetar med liknande problem och hur väl det stämmer överens med verkliga förhållanden fungerar dock utformningarna lika väl som mer sannolika varianter.

För att få en referensmodell att jämföra resultaten med har simuleringar även gjorts för ett alternativ utan något hinder (Adamsson, 1999).

6.4.1 Simulerade geometrier och placeringar

Fem olika utformningar på öar, eller hinder, i bassängen har modellerats numeriskt. Samtliga öar har placerats längs bassängens mittlinje. I preprocessor har bassängbotten och vattenytan separerats från hindret så att inget vatten över huvud taget kan strömma genom, över eller under hindren. Detta gäller för samtliga simuleringar för alla typer av hinder. De geometrier som använts i simuleringarna redovisas i nedanstående tabell.

Benämning	Mått [m·m]
Hinder 1	2·2
Hinder 2	4·1
Hinder 3	4·0,3
Hinder 4	2·2 (romb)
Hinder 5	1·1

Tabell 6.4.1 *Ögeometrier*

Nedanstående bilder visar geometrierna med dess elementindelning i horisontalplanet för Hinder 1 till Hinder 5 på ett avstånd av 3 m från inloppet till bassängen.

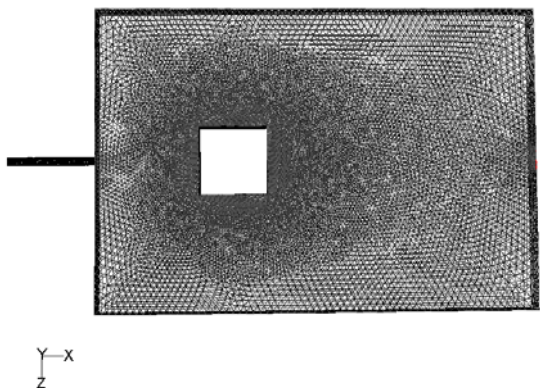


Fig. 6.4.1.1 Hinder 1, 3 m från inloppet

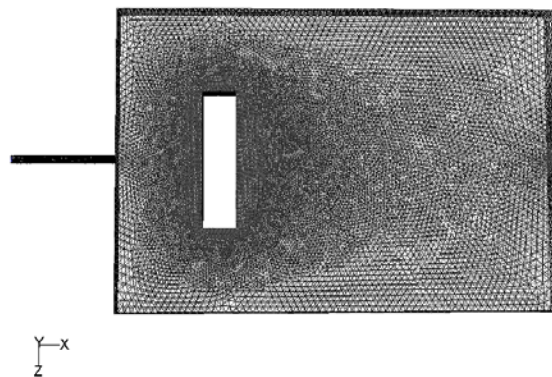


Fig. 6.4.1.2 Hinder 2, 3 m från inloppet

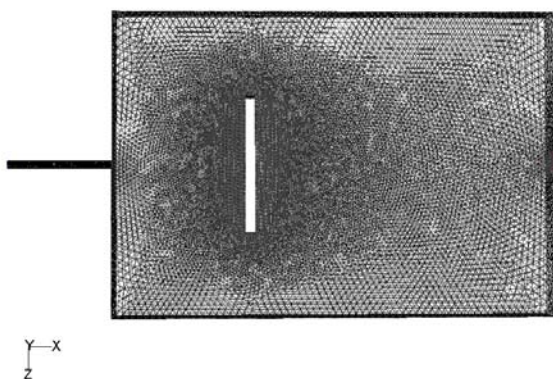


Fig. 6.4.1.3 Hinder 3, 3 m från inloppet

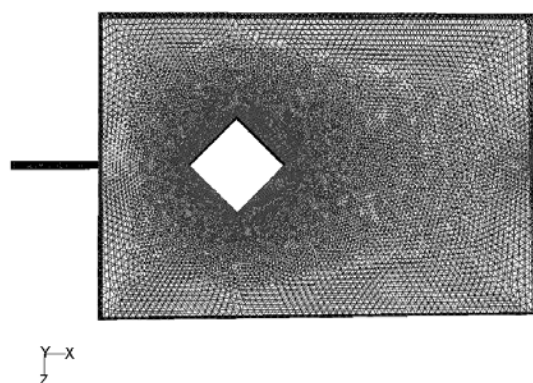


Fig. 6.4.1.4 Hinder 4, 3 m från inloppet

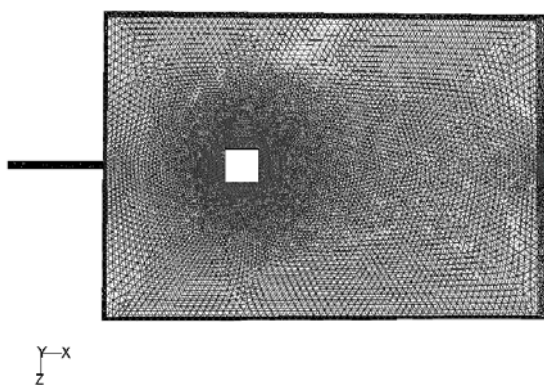


Fig. 6.4.1.5 Hinder 5, 3 m från inloppet

Öarna har placerats med sin mittpunkt på fem olika avstånd från bassängens inlopp så att dess närmsta vägg hamnade på 2, 3, 4, 5 respektive 6 meters avstånd från rörmynningen enligt nedanstående figurer.

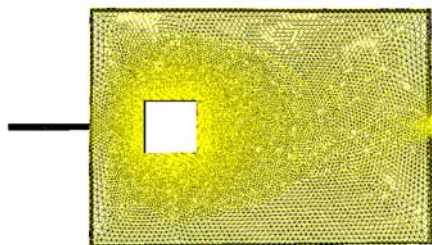


Fig. 6.4.1.6. Hinder 1, 2 m från inloppet.

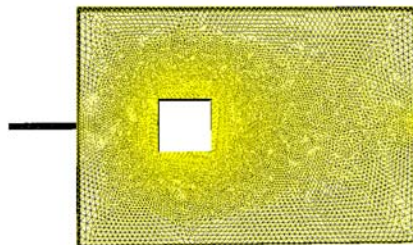


Fig. 6.4.1.7. Hinder 1, 3 m från inloppet.

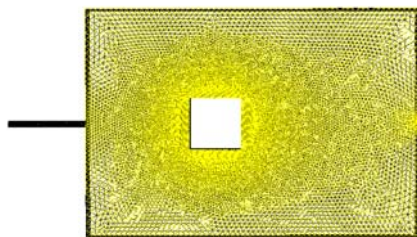


Fig. 6.4.1.8. Hinder 1, 4 m från inloppet.

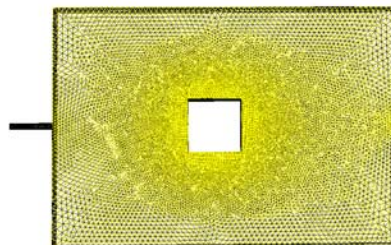


Fig. 6.4.1.9. Hinder 1, 5 m från inloppet.

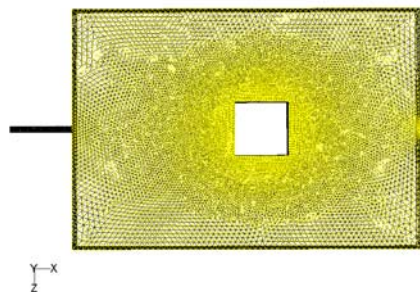


Fig. 6.4.1.10. Hinder 1, 6 m från inloppet.

Simuleringar har gjorts med flöden på 4, 8 respektive 20 l/s för alla geometrier, dock har inte alla placeringar av öarna i längdled i bassängen simulerats. Genomförda simuleringar finns redovisade i Bilaga 1.

Vissa av geometrierna för öarna skapades först efter att en modell av Hinder 1 byggts upp i Vattenhallen och utvärderats mot beräknade resultat. Utgående från dessa resultat konstaterades vilken typ av geometri som var intressant att titta närmare på. De två hinder (Hinder 1 och Hinder 4) som även modellerats fysiskt beskrivs i kapitel 7.2.2 mer ingående, de övriga geometrierna beskrivs i ett separat avsnitt.

7 Fysisk modellering

Samtliga modellförsök har genomförts i vattenhallen på sektionen för Väg- och vattenbyggnad på Chalmers.

7.1 Syfte

Syftet med de laboratorieförsök som genomförts var att få underlag för jämförelse mellan modellerade mätningar och de simuleringar som gjorts med hjälp av CFD-programmet Fluent 5.4.8. Mätningarna visar strömningsmönstret i bassängen vid olika stationära flöden. Vattenhastigheten är inte utvärderad under mätningarna. De öar som utvärderats fysiskt är Hinder 1 (2·2 m) och Hinder 4 (2·2 m, rombformad).

7.2 Mätning av strömmönster

7.2.1 Försöksutrustning

7.2.1.1 Kameror

För att kunna göra mätningar av det strömningsmönster som uppstod i bassängen vid olika flöden användes programvaran MacReflex i kombination med två videokameror med tillhörande videoprocessorer.

Videokamerornas uppgift var att registrera positionen hos de åtta markörer som placeras i bassängen. Markörerna bestod av s.k. strömkors vilka var fästa på olika avstånd från ett flöte klätt i ljusreflekterande tejp. Kamerorna sände ut ljusblixtar vilket gjorde att markörerna lystes upp och videokamerornas processorer kunde då registrera dess positioner. En bild registrerades varje sekund under 40 minuter. För att en position skall sparas i MacReflex-programmet krävs att bägge kamerorna registrerat den.

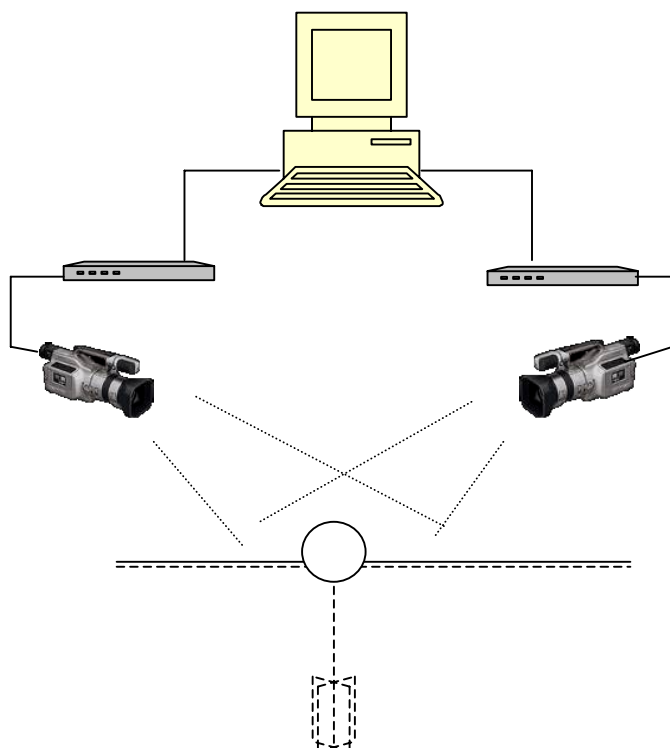
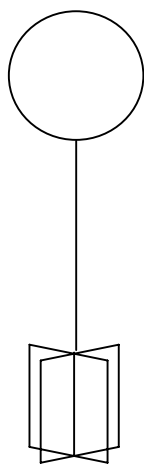


Fig. 7.2.1.1 *Principiell bild av mätutrustning*

7.2.1.2 **Markörer**

Strömkorsens syfte var att skapa en mätpunkt som följer strömmarna och håller samma hastighet som vattnet. Denna typ av markörer är ofta använd i liknande mätningar, exempelvis vid mätning av strömmönstret i Järnbrottsdammen i Göteborg (German och Kanth, 1997).



Strömkorset bör ha en relativt stor area under vattenytan så att den kan följa strömlinjerna och en så liten area som möjligt över vattenytan där vind kan påverka rörelserna. Så var inte fallet i dessa inomhusförsök där vinden var försumbar. Flödet bör även tynga ner i vattnet så lite som möjligt för att undvika att påverka strömningen.

Strömkorset måste även bestå av ett material med låg densitet för att undvika att krafter uppstår som ändrar riktning och hastighet hos rörelsen. Tröghetskrafterna är omöjliga att helt undvika, däremot är det viktigt att se till att de är lika stora i alla riktningar. Strömkorsen använda i mätningarna bestod av aluminiumplattor med måtten

Fig. 7.2.1.2 *Skiss av strömkors använt vid fysiska mätningar av strömningsmönstret.*

0,15·0,15·0,15 m. Markörerna har i försöken fästs med en tunn nylonlina så att deras tyngdpunkt legat på 0,85, 0,50 samt 0,15 m avstånd från ytan. Flödet bestod av ett frigolitklot med diametern 0,12 m.

7.2.1.3 Kalibrering

Sex kontrollmarkörer med givna positioner fanns utplacerade runt bassängen. Dessa användes vid kalibrering av utrustningen. Kvaliteten på det uppmätta resultatet beror i hög grad av hur väl modellen kan kalibreras.

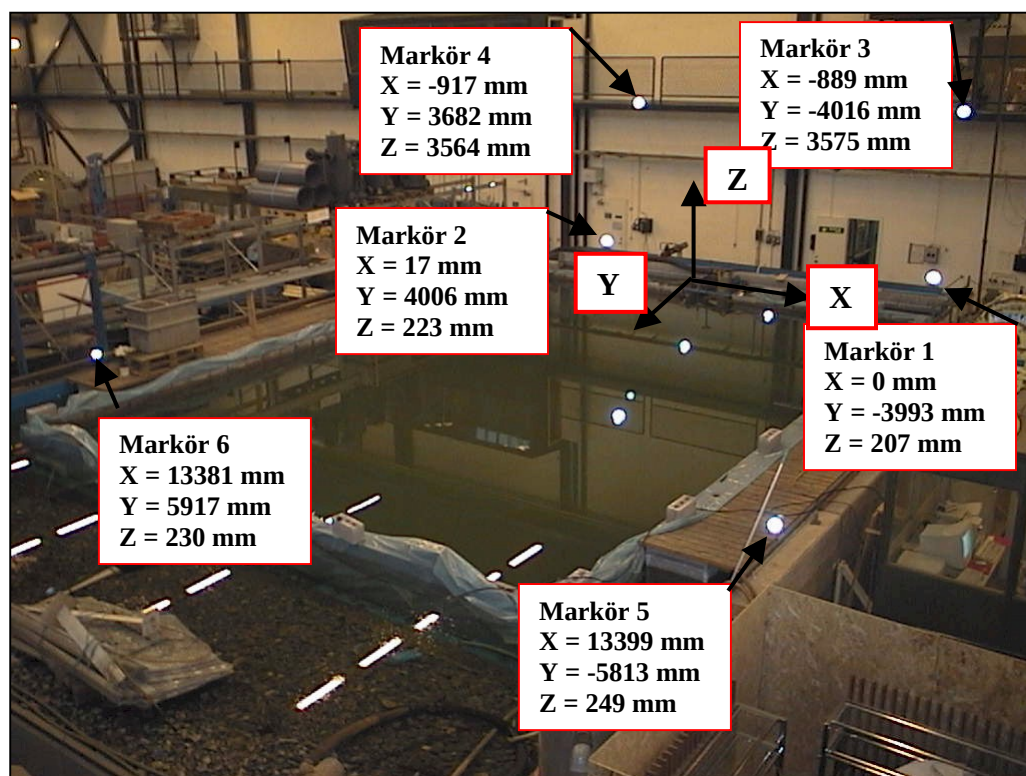


Fig. 7.2.1.3 Översiktsfoto av modellbassängen, med använt koordinatsystem och referenspunkter för kalibrering.

7.2.2 Uppbyggnad av hinder

För att bygga upp de två fysiskt modellerade hindren i försöksbassängen användes betongelement med måtten 0,39·0,19·0,15 m. Modellerna har gjorts ihåliga.

Det optimala vid jämförelse med modellerade resultat vore att klä hindrets innsidor med ett plasthölje för att minimera genomströmningen av vatten. Detta är speciellt viktigt vid spårämnesförsök och ansågs i detta fall inte vara

av större betydelse för strömningsmönstret. Vattnet inne i hindret bör i försöken vara så stillastående att det inte orsakar några större störningar. Även i en verklig ö fås en viss genomströmning av vatten, dock var de numeriskt modellerade öarna byggda helt täta.

Det har även varit svårt att få de uppbyggda modellernas geometri att överensstämma exakt med de som är modellerade i Fluent. Skillnaderna är inte stora, men ojämnheter och dylikt kan ge upphov till virvlar och förändrat strömningsmönster i bassängen. Då dessa effekter bör bli mycket små har modellgeometrierna accepterats.

Den första modellön som byggdes upp i försöksbassängen var Hinder 1 och hade en kvadratisk form med måtten 2·2 m. Hindret placerades med närmsta sidan 3 m från inloppet och med tyngdpunkten mitt framför detta.

På grund av avsaknad av en betongsåg blev betongelementen svåra att dela till önskade mått och hindret fick därför en något ojämn kant i det främre vänstra hörnet sett från inloppet. Detta skulle kunna ge upphov till störningar för strömningen. Procentuellt sett är dock ojämnheterna små och anses inte ha någon nämnvärd effekt.

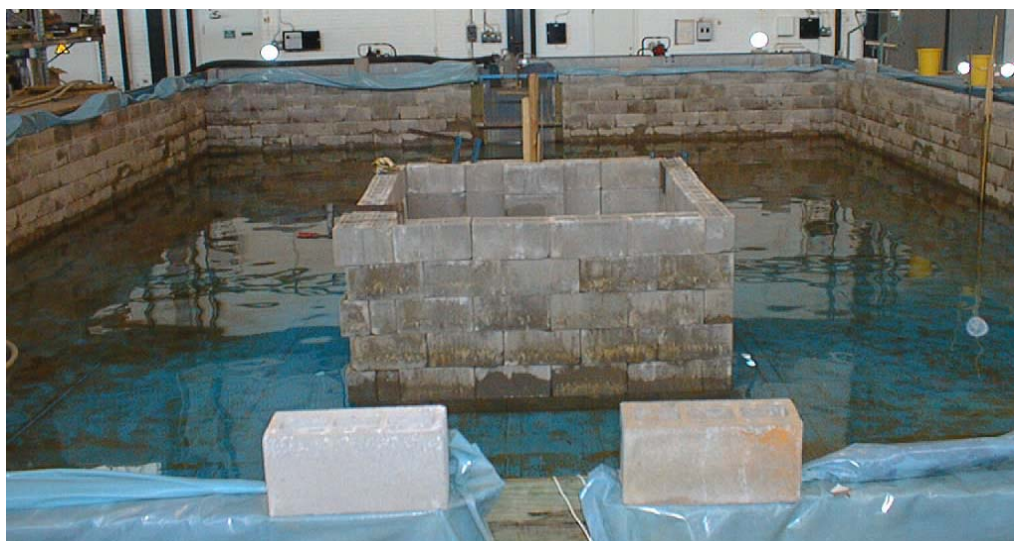


Fig. 7.2.2.1 *Hinder 1, uppbyggt i Vattenhallen.*

Den borte sidan fick dock en sämre utformning, då en glipa på ungefär 10 cm uppstod i dess mitt. Enligt simuleringarna är hastigheterna mycket låga just här vilket gjorde att modellen förenklades och ett antal träplankor med betongelement bakom placerades där. Påverkan på strömningen kan anses vara försumbar.

Hinder 4 byggdes efter mätningar med ovanstående modell upp på liknande sätt, dock behövdes inga träplankor användas för att sluta strukturen.

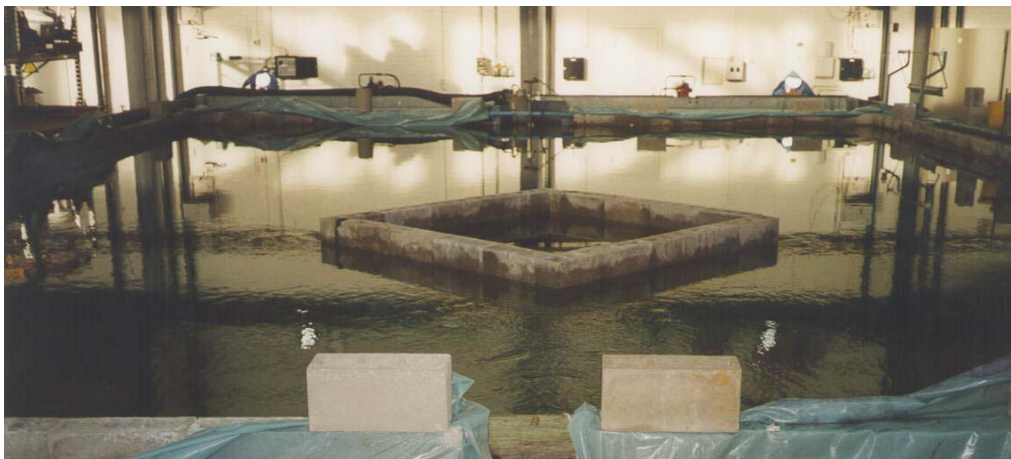


Fig. 7.2.2.2 *Hinder 4, uppbyggt i Vattenhallen.*

7.3 Mätningar

Mätningar av strömmönstret har för de två uppbyggda geometrierna genomförts för tre olika flöden och på tre olika djup från vattenytan som tidigare beskrivits. De åtta markörerna har släppts både i anslutning till bassängens inlopp samt bakom och bredvid hindret för att kunna få mätningar av så stor del av bassängen som möjligt. I de fall då markörerna haft lämpliga positioner vid en avslutad mätning har en ny påbörjats direkt som en fortsättning av den tidigare.

För varje djup har minst två, ofta tre, mätningar gjorts och sparats för utvärdering. Resultat från utvärderingen av flödesmönstren redovisas i kap. 9.

8 Spårämnesförsök

Som en ytterligare undersökning av de hydrauliska förhållandena i magasinet har två spårämnesförsök genomförts. Spårämnesförsök kan även simuleras numeriskt i Fluent, men då detta examensarbete är begränsat till att endast omfatta simuleringar av strömmönster har detta inte gjorts.

Ett spårämnesförsök genomförs på så sätt att en föroreningspuls, i detta fall utgjord av det rödfärgade ämnet rhodamin, tillsätts vid bassängens inlopp. Syftet är att kunna studera hur föroreningen transporteras genom dammen. Vid bassängens utlopp mäts med hjälp av en flourometer koncentrationen av rhodamin som funktion av tiden. Med hjälp av spårämnesförsöken kan några så kallade nyckeltal beräknas (Persson, 1999). De nyckeltal som beaktats i denna studie beskriver dels effektiv volym och dels graden av kortslutning i bassängen.

Kortslutningen är ett mått på hur omrört vattnet är och kan beräknas som:

$$S = \frac{T_{16}}{T_{50}}$$

där T_{16} är tiden det tar för 16% av föroreningspulsen att nå utloppet och T_{50} den tidpunkt då hälften av föroreningen nått utloppet. Ett högt tal eftersträvas.

Ett annat nyckeltal som beaktats vid jämförelse mellan öarna är de effektiva volymsförhållandet, e . Det definieras som;

$$e = \frac{t_{medel}}{t_{no\ min\ ell}} = \frac{V_{effektiv}}{V_{total}}$$

Resultatet från spårämnesförsök kan även illustreras i en graf som visar koncentrationen vid utloppet som en funktion av tiden. När toppen på kurvan, T_{peak} (se Fig.8.1), snabbt indikerar detta att föroreningspulsen går rakt genom bassängen utan att cirkulera (hög kortslutning) och därmed få möjlighet att avskiljas under någon längre tid. En mer förskjuten kurva är önskvärd.

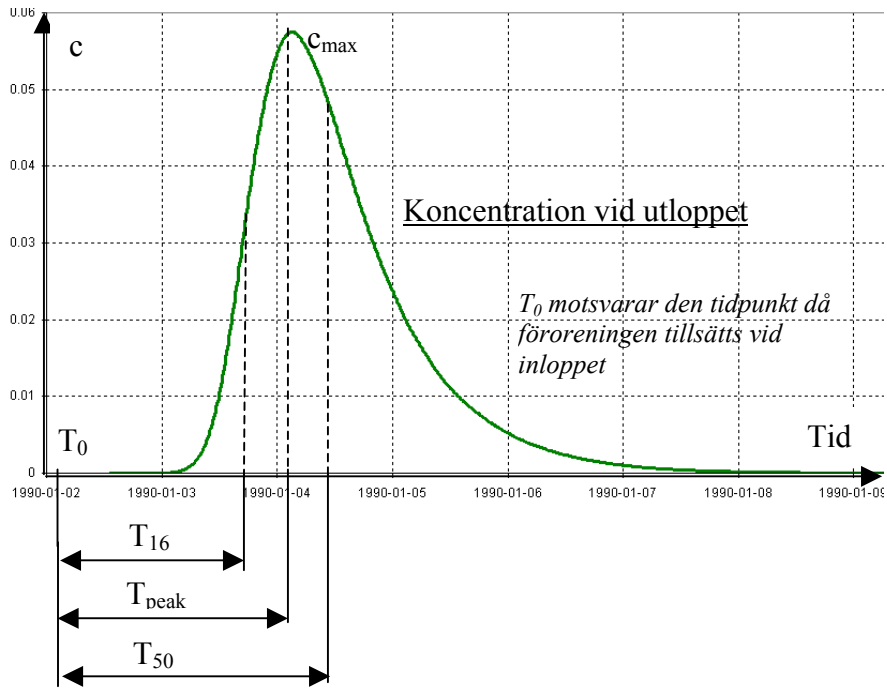


Fig. 8.1 Beskrivning av T_{peak} , T_{16} samt T_{50} .

9 Resultat

I detta kapitel redovisas resultat från de fysiska och numeriska simuleringar som genomförts, med fokus på de två hinder där fysiska mätningar utförts. I bilagorna redovisas ett urval strömningsbilder från de numeriska simuleringarna för samtliga hinder.

9.1 Resultat för Hinder 1 och Hinder 4

9.1.1 Fysiska mätningar

9.1.1.1 Hinder 1

Genom att enbart med ögat se på de rörelser som markörerna fick vid de olika flödena kunde tydliga virvlar kring inloppet urskiljas. Två stora recirkulerande virvlar syntes även bakom hindret. Markörer som avsiktligt placerades bakom hindret följde virvlarna tillbaka mot ön.

Ingen större skillnad i strömmönster syntes mellan de olika flöden och på de olika djup mätningarna utfördes på, däremot var den virvel som skapades i djupled framför hindret tydligas på djupet 85 cm under vattenytan. Flötet låg då en bit framför själva strömkorsen. I nedanstående bilder syns ett antal reflektioner som inte härstammar från strömkorsens placeringar, men det generella strömningsmönstret är trots detta tydligt urskiljbart.

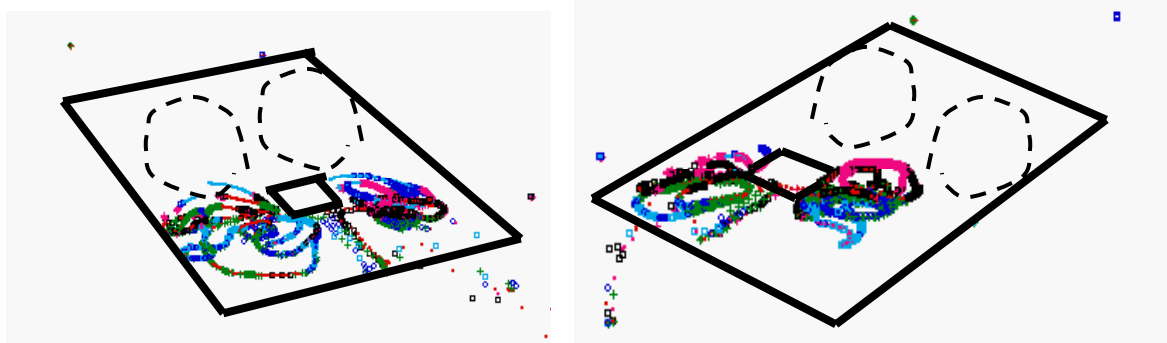


Fig. 9.1.1.1.1 Uppmätt strömningsmönster ur två kameravinklar för Hinder 1 vid flödet 20 l/s, 15 cm under vattenytan. Två recirkulerande virvlar konstaterades även bakom ön, och har i figuren ritats in manuellt.

Eftersom strömningsmönstret var mycket likt i samtliga utförda mätningar redovisas för Hinder 1 mätningar för de olika inflödena och för Hinder 4 mätningar för de olika djupen på strömkorsen under ytan. För Hinder 1

redovisas uppmätta strömningsmönster för djupet 15 cm under vattenytan för de tre olika flödena; 20 l/s, 8 l/s samt 4 l/s.

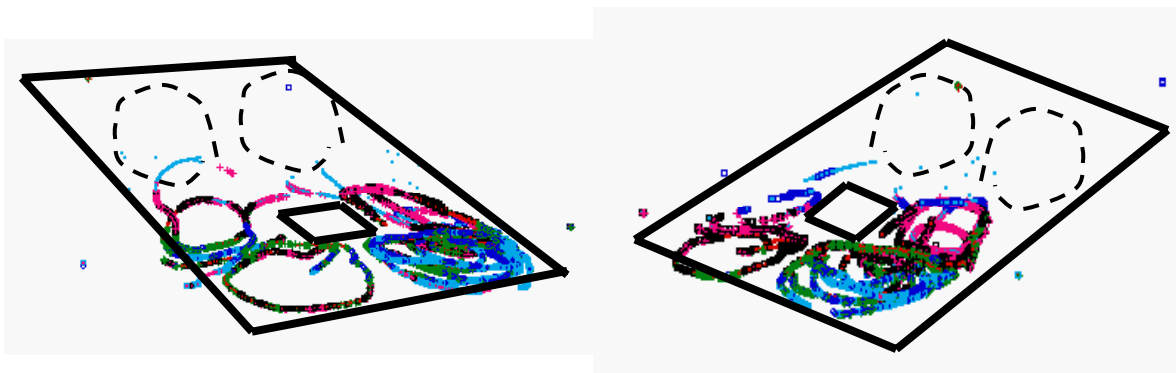


Fig. 9.1.1.1.2 Uppmätt strömningsmönster ur två kameravinklar för Hinder 1 vid flödet 8 l/s, 15 cm under vattenytan. Två recirkulerande virvlar konstaterades även bakom ön, och har i figuren ritats in manuellt.

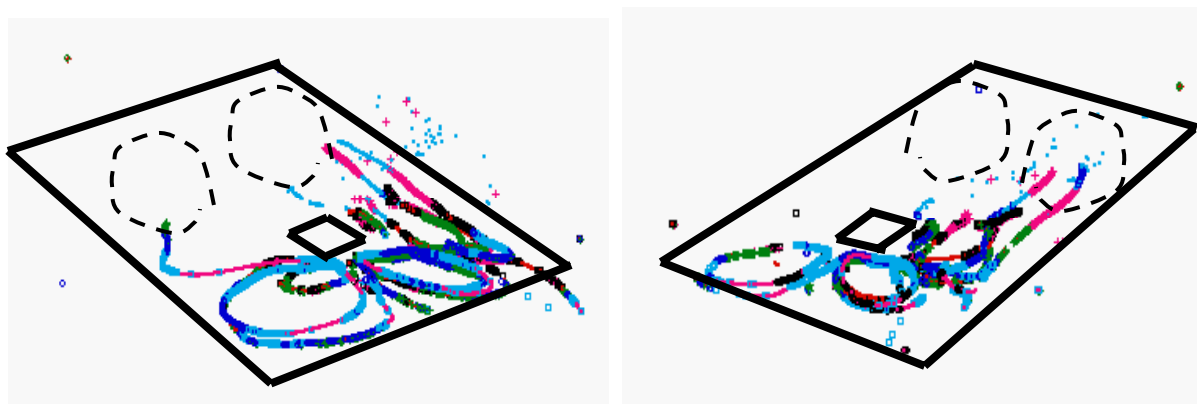


Fig. 9.1.1.1.3 Uppmätt strömningsmönster ur två kameravinklar för Hinder 1 vid flödet 4 l/s, 15 cm under vattenytan. Två recirkulerande virvlar konstaterades även bakom ön, och har i figuren ritats in manuellt.

9.1.1.2 Hinder 4

Även för Hinder 4 var de två stora recirkulerande virvlarna vid bassängens långsidor tydligt framträdande. De två virvlarna vid sidan om jetstrålen är tydliga även med denna öutformning. För Hinder 4 redovisas uppmätt strömningsmönster enbart för inflödet 20 l/s men för de tre olika djupen under vattenytan; 15 cm, 50 cm samt 85 cm.

För Hinder 4 fick mätresultaten högre kvalitet då de två stora recirkulerande virvlarna längs bassängens långsidor är tydligt framträdande.

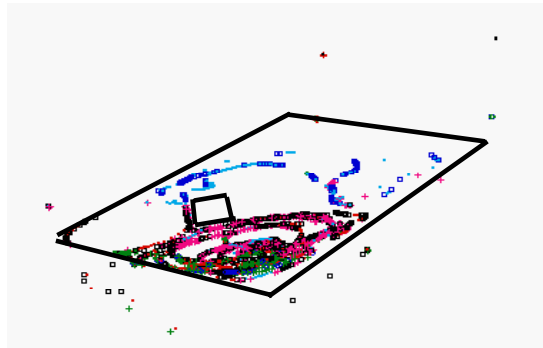
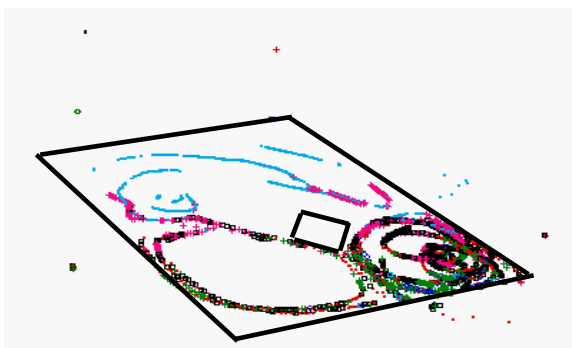


Fig. 9.1.1.2.1 Uppmätt strömningsmönster ur två kameravinklar för Hinder 4 vid flödet 20 l/s, 15 cm under vattenytan.

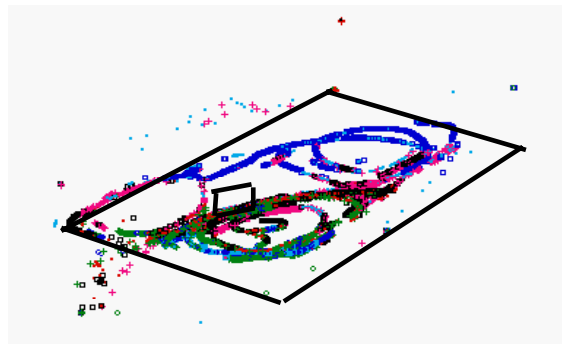
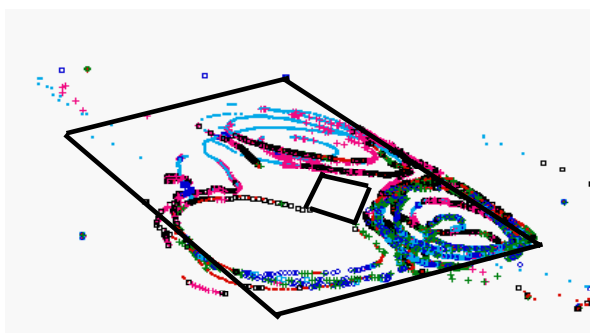


Fig. 9.1.1.2.2 Uppmätt strömningsmönster ur två kameravinklar för Hinder 4 vid flödet 20 l/s, 50 cm under vattenytan.

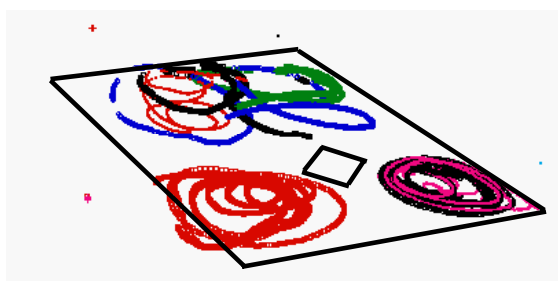


Fig. 9.1.1.2.3 Uppmätt strömningsmönster ur två kameravinklar för Hinder 4 vid flödet 20 l/s, 85 cm under vattenytan.

9.1.2 Numeriska simuleringar

Endast ett urval resultatbilder kan av utrymmesskäl redovisas i detta kapitel och i bilagorna. Samtliga filer och resultat finns dock arkiverade på institutionen för Vatten, Miljö och Transport på Chalmers.

9.1.2.1 Simuleringar med $k-\varepsilon$

Först gjordes simuleringar med den traditionella $k-\varepsilon$ modellen för att beskriva turbulensen i systemet vid lösningen av Navier-Stokes ekvationer.

De första simuleringarna visade för samtliga geometrier på ett ganska osannolikt strömningsmönster i bassängen, med ett helt virvelfritt utseende. Inga virvlar bildades i horisontalplanet i bassängen som förväntat, däremot strömmade allt vatten rakt förbi hindret. Vid närmare titt på uppförandet runt jetstrålen från inloppet syntes inga tecken på att vatten sögs in i strålen vilket borde vara fallet. Dock syntes en liten återcirkulerande virvel i djupled, från inloppet, mot öarna och tillbaka mot inloppet. Hastigheterna blev låga i hela bassängen, med lägst hastighet bakom och i närheten av hindren och något högre vid kanterna och i anslutning till in- och utlopp. Liknande strömningsmönster och hastighetsfördelning uppstod vid samtliga placeringar av öarna i längdled i bassängen.

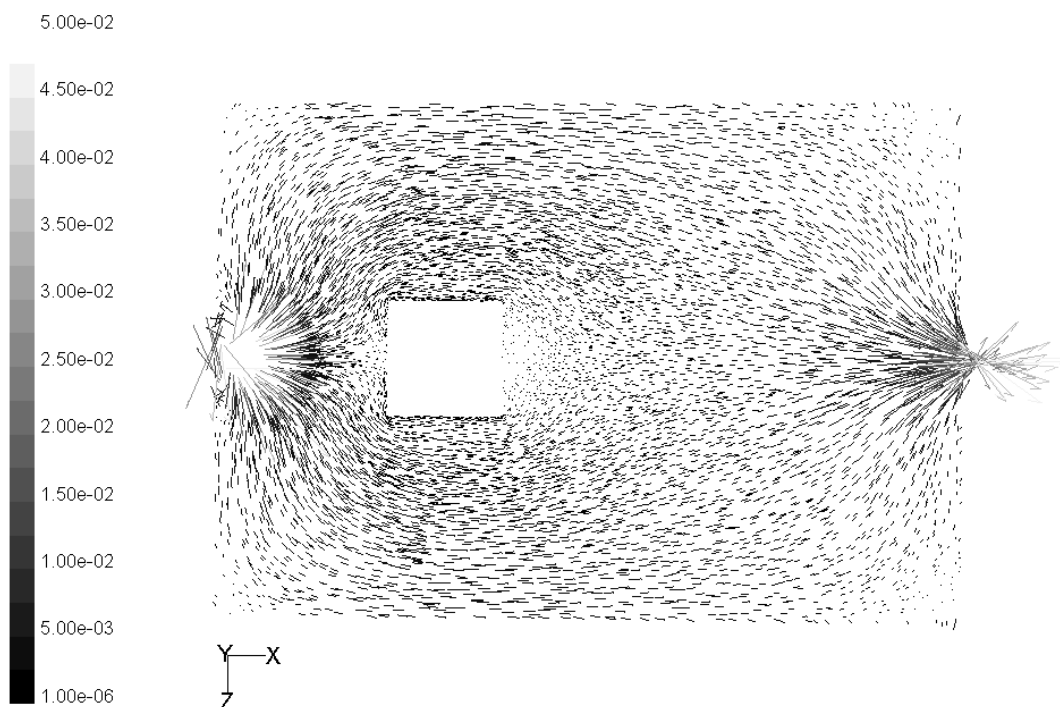


Fig. 9.1.2.1 Strömmönster för Hinder1, 3 m från inloppet med standard $k-\varepsilon$, flödet 20 l/s, 15 cm under vattenytan.

Efter att ha modellerat Hinder 1 även fysiskt framkom intresset av att se hur en geometri där jetstrålen från inloppet inte bryts av lika tvärt påverkade strömningen. Utgående från detta vreds Hinder 1 45 grader så att dess ena hörn stod mitt framför inloppet, det benämns då som Hinder 4.

Då turbulensmodellen beskrevs med standard k- ϵ utan några tilläggstermer uppstod även för Hinder 4 ett helt virvelfritt strömningssmönster.

9.1.2.2 Simuleringar med andra turbulensmodeller

Efter att resultaten från beräkningarna med ursprungliga ekvationer enligt ovan studerats byggdes en modell av Hinder 1 placerat med ena sidan tre meter från inloppet upp i vattenlabbet. Då mätningar gjorts för tre olika flöden på tre olika djup från ytan kunde man genom att med blotta ögat studera det verkliga strömningssmönstret se att resultatet inte stämde överens med det modellerade. När detta konstaterats gjordes nya simuleringar med tillskottstermen RNG, vilken beskrivs i kap. 5.2, i strömningsekvationernas turbulensmodell för samtliga flöden. För flödet 20 l/s gjordes för vissa ögeometrier även simuleringar där RNG-termen inte medräknades men turbulensintensiteten ökades från 1 % till 10 % samtidigt som den specifika längdskalan för virvlarna minskades från 1m till 0,2 m. Ytterligare försök gjordes för samma flöde men med andra ordningens lösning för k och ϵ vid diskretiseringen av lösningen, även denna gång utan RNG-termen i turbulensmodellen.

Resultatet då RNG-termen lagts till k- ϵ modellen blev betydligt mer lik den uppmätta. Strömmönstret för speciellt 20 l/s blev mycket mer realistiskt för i synnerhet Hinder 1, då två virvlar bildades på ömse sidor om hindret samtidigt som två stora och avlånga virvlar bildades vid långsidorna.

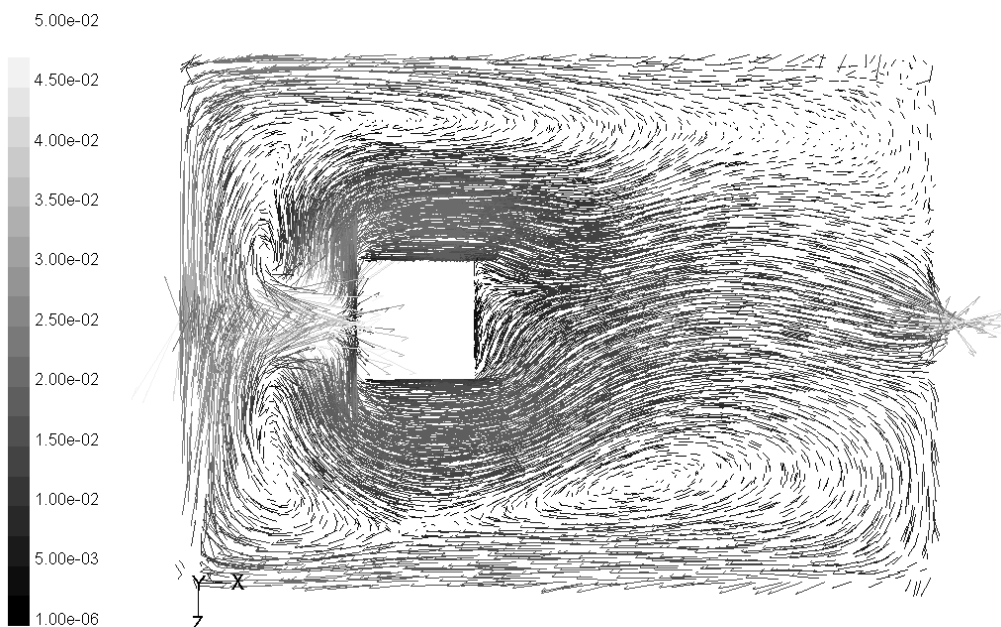


Fig. 9.1.2.2. Strömmönster för Hinder1, 3 m från inloppet med standard k- ϵ med RNG, flödet 20 l/s, 15 cm under vattenytan.

En stor virvel i djupled syntes även tydligt i resultaten och var också visuellt urskiljbar i de fysiska mätningarna.

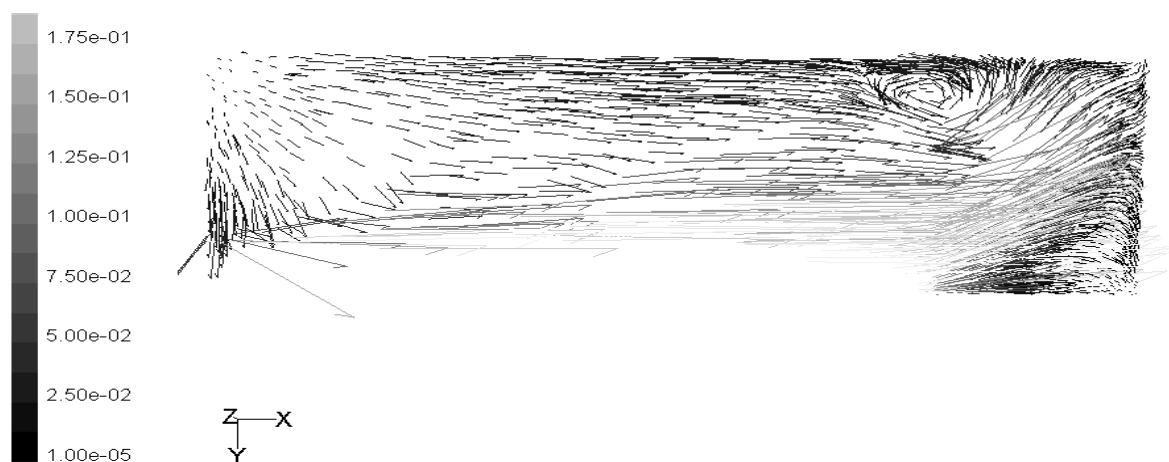


Fig. 9.1.2.3. Närbild av strömningsmönstret i djupled kring jetstrålen vid inloppet för Hinder1, 3 m från inloppet med standard $k-\epsilon$ med RNG, flödet 20 l/s, 15 cm under vattenytan. Figurens högra kant motsvarar hindrets yta.

En mer riktig strömbild än den som erhöles med standard $k-\epsilon$ uppstod runt jetstrålen där omgivande vatten ”söks in” i strålen.

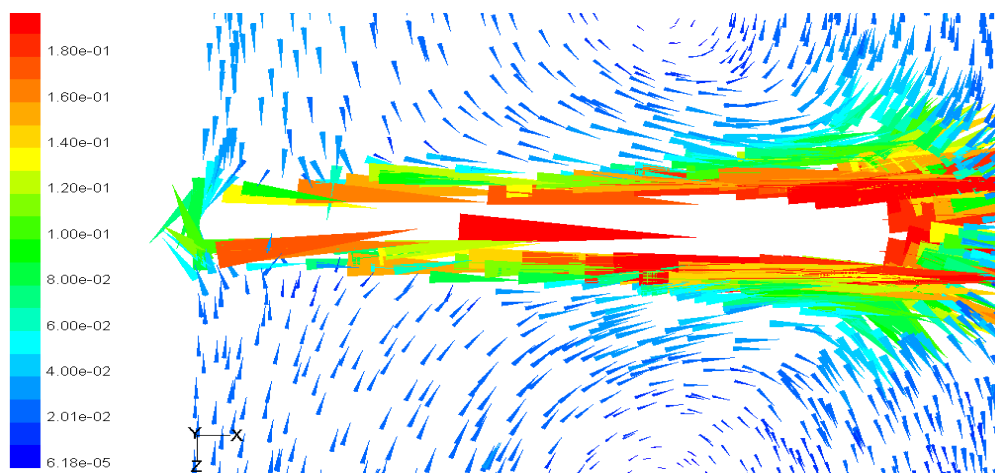


Fig. 9.1.2.4. Närbild av strömningsmönstret kring jetstrålen vid inloppet för Hinder1, 3 m från inloppet med standard $k-\epsilon$ med RNG, flödet 20 l/s, 15 cm under vattenytan.

På samma sätt som för Hinder 1 förbättrades den beräknade strömningsbilden för Hinder 4 betydligt då RNG-termen lades till turbulensmodellen. Två virvlar syns då mellan ön och inloppet, dock är de två recirkulerande virvlarna vid bassängens långsidor inte lika tydliga. Detta kan möjligtvis bero på att den

aktivt medverkande arean bakom hindren är större för Hinder 4 då zonen med mycket låga hastigheter är mindre än för den helt "rektangulära" (icke vridna) ön, vilket diskuteras utförligare i kap. 11. Flödet får då större area att fördela sig på och hastigheterna tvingas inte upp och bildar virvlar på samma sätt som för Hinder 1 där stor del bakom hindret inte är aktivt medverkande till strömningen.

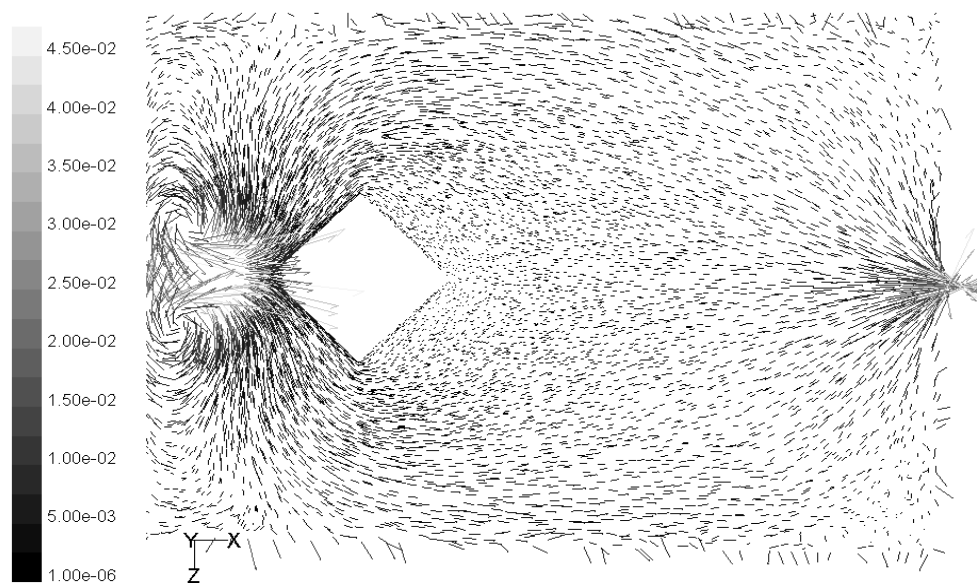


Fig. 9.1.2.5 Strömmönster för Hinder4, 3 m från inloppet med standard $k-\varepsilon$ med RNG, flödet 20 l/s, 15 cm under vattenytan.

För 8 l/s för de båda öarna syntes två mindre virvlar vid inloppets sidor samt antydning till två små virvlar vid hörnen på utloppsväggen. Inga stora återcirkulerande virvlar bildades i simuleringarna, vilket är i sämre överensstämmelse med uppmätta resultat. Liknande resultat syntes för 4 l/s. För de två lägre flödena syntes hastighetsvektorer med högre hastigheter och orimliga riktningar på hastighetsvektorerna längs långsidornas väggar. Strömningsmönstret för de två öarna är i stort sett likadant och därför redovisas enbart strömningsmönster för flödena 8 l/s samt 4 l/s för Hinder 1. För Hinder 4 finns motsvarande resultat i Bilaga 6. I bilagorna finns även redovisat hur strömningsmönstret varierar med djupet för de båda öarna.

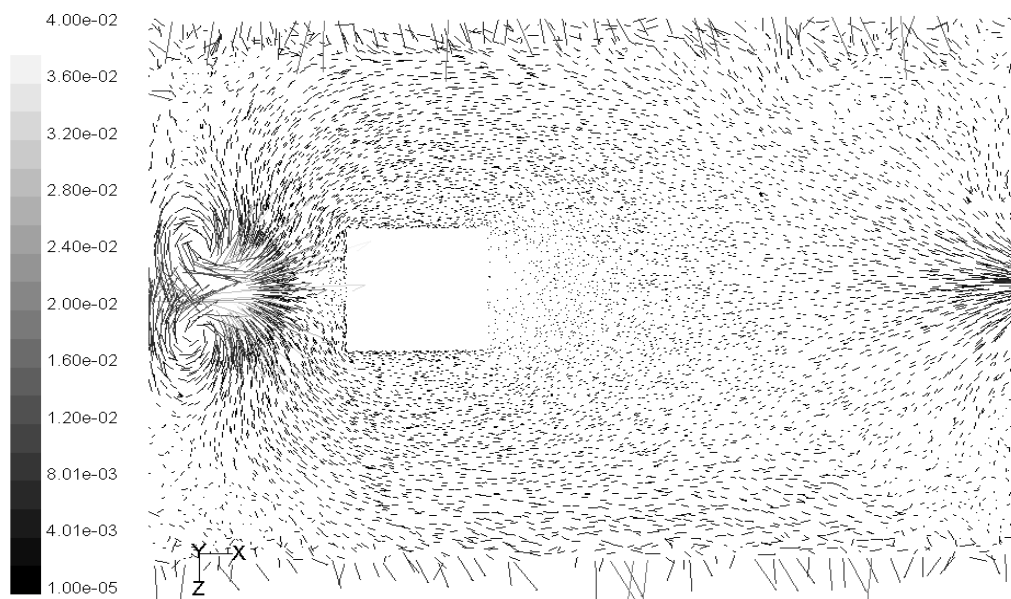


Fig. 9.1.2.6 Strömmönster för Hinder1, 3 m från inloppet med standard $k-\varepsilon$ med RNG, flödet 8 l/s, 15 cm under vattenytan.

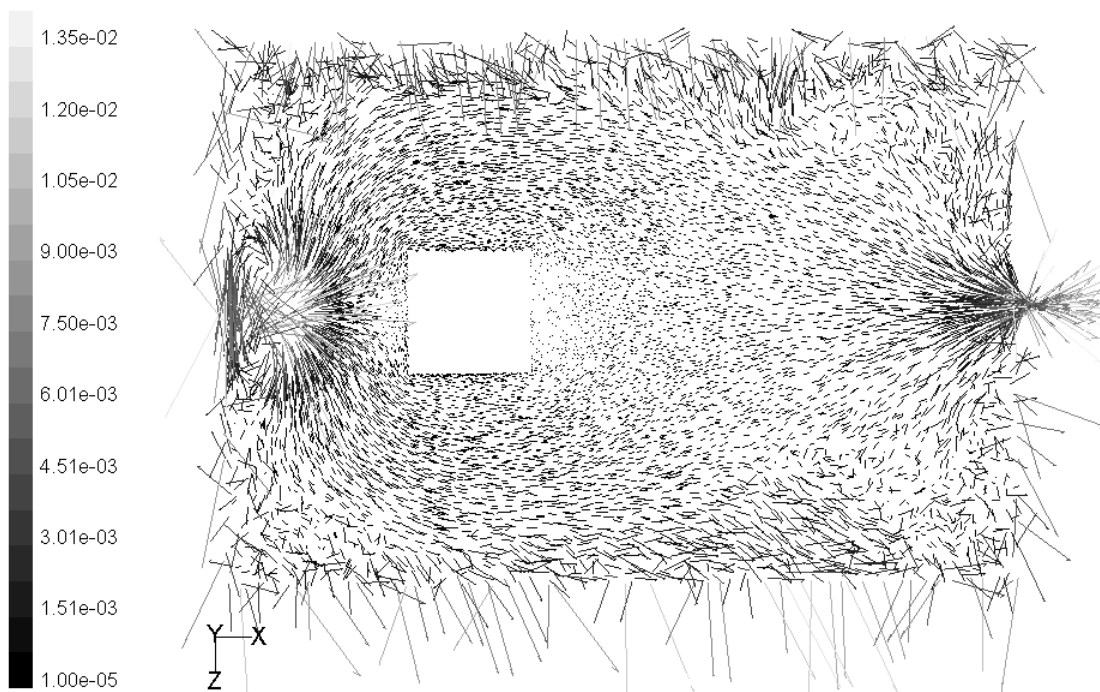


Fig. 9.1.2.7 Strömmönster för Hinder1, 3 m från inloppet med standard $k-\varepsilon$ med RNG, flödet 4 l/s, 15 cm under vattenytan.

Då RNG-termen var borttagen men turbulensintensiteten och virvlarnas längdskala ändrades syntes för Hinder 1 inga större förändringar mot tidigare resultat. Likaså skedde inga större förändringar när k och ε beräknades med andra ordningens ekvationer vid diskretiseringen. För Hinder 4 har simuleringar gjorts med ändringar i turbulensintensiteten och virvlarnas längdskala med RNG-termen inkluderad, dock kunde inga tydliga skillnader mot simuleringar med enbart RNG-modellen konstateras.

9.1.3 Spårämnesförsök

Spårämnesförsöken genomfördes för de två uppbyggda hindren vid flödet 20 l/s. Föroreningspulsen utgjordes av 300 ml rhodamin, vilket tillsattes i inloppsröret.

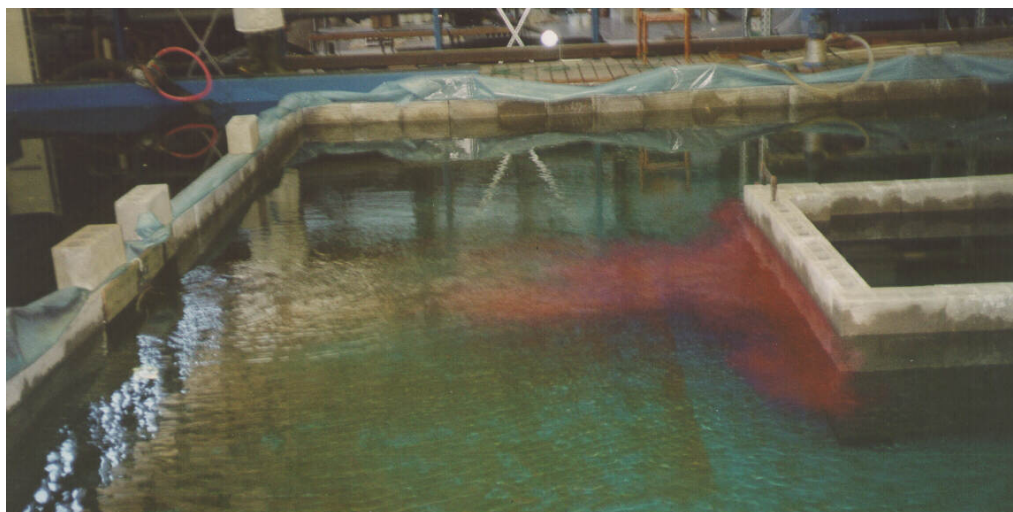


Fig. 9.1.3 *Spårämnesförsök för Hinder 1*

Vid utloppet mätte en s.k. flourometer koncentrationen av föroreningar som en funktion av tiden vilket resulterade i nedanstående kurvor. För att kunna visa på effekten av hinder i bassängen visas även resultat från tidigare utförda försök utan hinder (Adamsson, 1999).

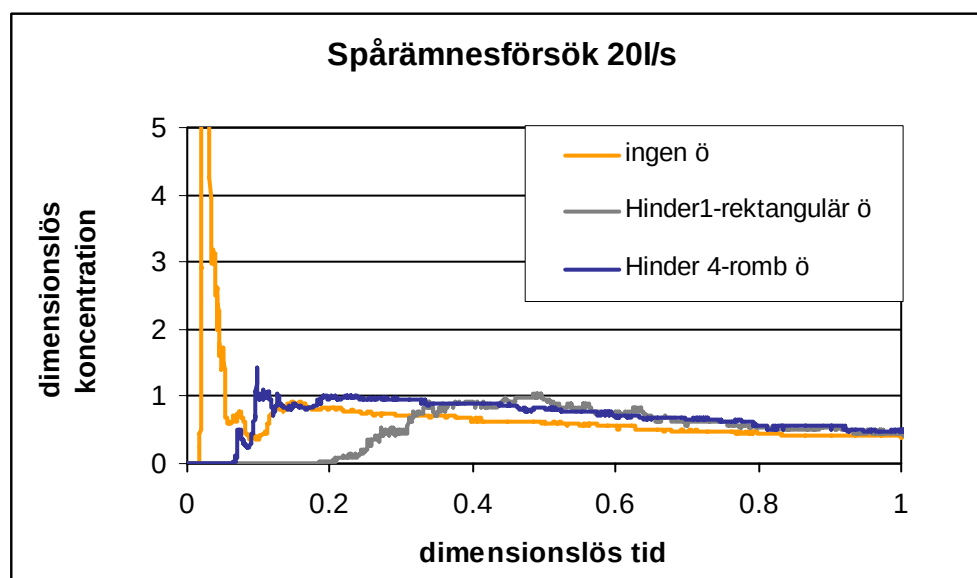


Fig. 9.1.4 Resultat från spårämnesförsök för de två öutformningarna samt för fallet utan någon ö.

Som synes i ovanstående graf fås en positiv effekt av de båda öarna i bassängen. Den rektangulära ön bromsar jetstrålen mer effektivt och gör att föroreningen stannar i bassängen under en längre tid och då får en ökad avsättningstid. I bägge fallen minskas kortslutningen markant och den höga topp som snabbt når utloppet i fallet utan ö har reducerats.

Tidigare beskrivna nyckeltal, se kap.8, har även beräknats utgående från mätresultaten i spårämnesförsöken och redovisas i nedanstående tabell.

Beräknat nyckeltal	Utan ö	Hinder 1 (rekt.)	Hinder 4 (romb)
S (kortslutning)	0,16	0,47	0,39
E (effektiv volym)	0,51	0,97	0,66

Tabell 9.1.5 Beräknade nyckeltal för de två öarna, jämförelse med fallet utan ö.

Ur tabellen kan konstateras att kortslutningen förbättrades med nära 200 % för Hinder 1 respektive 150 % för Hinder 4. På samma sätt ökade den effektiva volymen med 90 % för Hinder 1 och med ungefär 30 % för Hinder 4. För Hinder 1 blev den effektiva magasinvolymen hela 0,97, d.v.s. nära en idealiskt utformad damm. Liknande resultat har dock erhållits i andra studier, där spårämnesförsök har genomförts med 2,5-D modellverktyget Mike21, för en rektangulär bassäng med en ö vid inloppet. Då erhöles en effektiv volym på 0.96 (Persson, 2000).

9.2 Numeriska resultat för övriga hinder

Då antalet simuleringar för samtliga öar uppgår till 53 st är endast ett urval resultatbilder med i rapporten. I detta avsnitt visas resultat av strömningsberäkningarna för Hinder 2, 3 samt Hinder 5 för flödet 20 l/s på djupet 15 cm under ytan. Använd turbulensmodell är i dessa simuleringar standard $k-\epsilon$ med RNG. För de olika flödena och placeringarna samt över djupet är resultaten relativt lika för de olika öarna. I bilagorna redovisas samtliga öars strömningsmönster för modellering med standard $k-\epsilon$ med RNG för de tre flödena på djupet 15 cm under vattenytan.

Hinder 2 utgjordes av en bredare ö med måtten 4·1 m. Som väntat skapades mycket tydliga virvlar i horisontalplanet innan ön och hastigheterna vid sidan om hindret ökade något. Bakom hindret skapades en utbredd lugn zon med låga hastigheter.

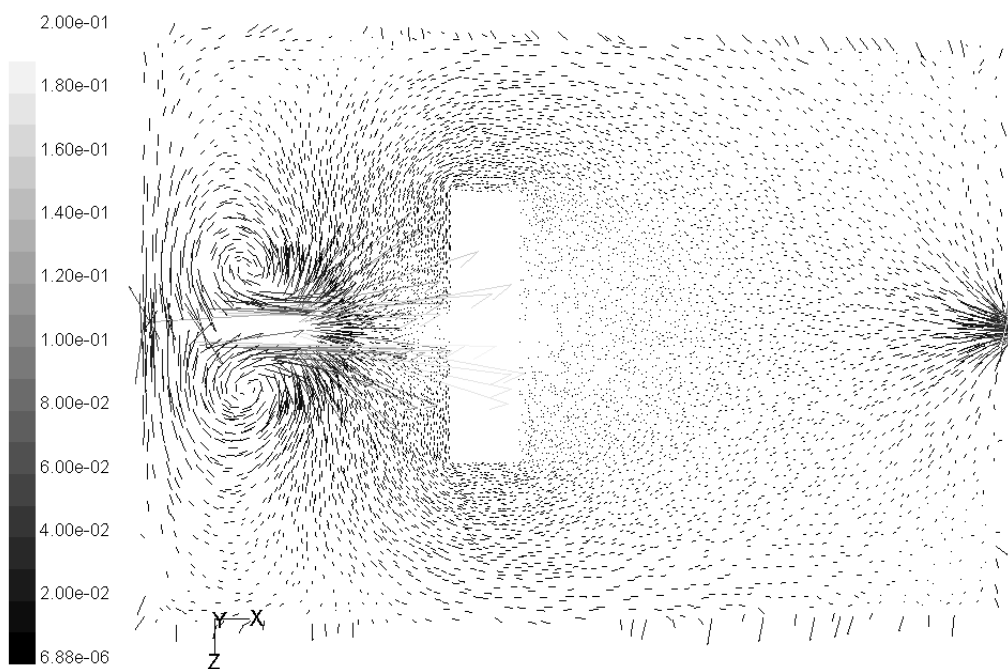


Fig. 9.2.1 Strömmönster för Hinder2, 4 m från inloppet med standard $k-\epsilon$ med RNG, flödet 20 l/s, 15 cm under vattenytan.

Hinder 3 gjordes smalare än Hinder 2 och hade måtten 4·0,3 m. Tydliga virvlar kan konstateras innan ön, samt en stor zon med låga hastigheter bakom ön. Inga recirkulerande virvlar skapas i beräkningen bakom ön.

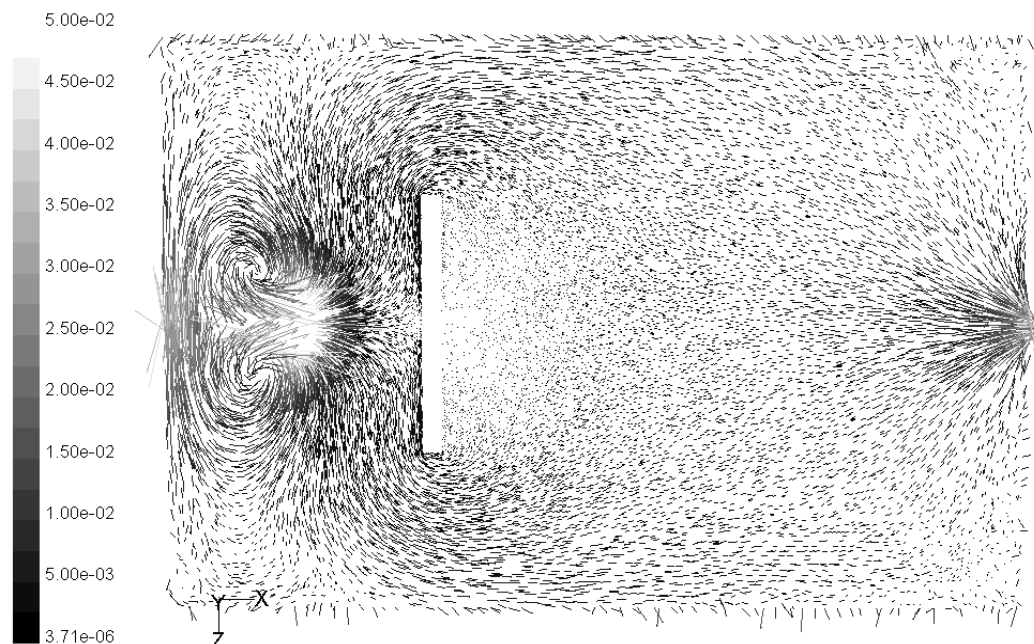


Fig. 9.2.2 Strömmönster för Hinder3, 3 m från inloppet med standard $k-\varepsilon$ med RNG, flödet 20 l/s, 15 cm under vattenytan.

Hinder 5 utformades kvadratisk med sidan 1 m. Liksom för övriga öar bildas två stora virvlar vid inloppet och en lugn zon bakom ön.

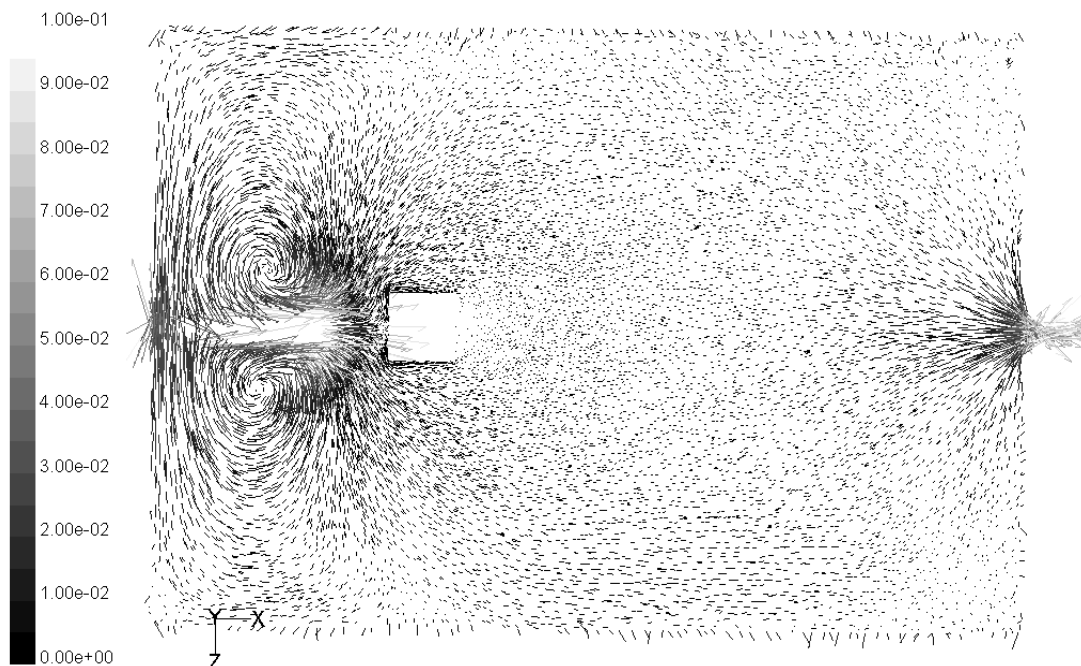


Fig. 9.2.3 Strömmönster för Hinder5, 3 m från inloppet med standard $k-\varepsilon$ med RNG, flödet 20 l/s, 15 cm under vattenytan.

10 Felkällor

Då all numerisk modellering innebär en förenkling av verkligheten finns många felkällor som kan orsaka skillnader i resultat mot fysiska modelleringar. På samma sätt finns många förenklingar vid uppförandet av den fysiska modellanläggningen som kan bidra till fel i resultaten.

Vid släppandet av markörerna vid mätningarna i Vattenhallen gjordes misstaget att i vissa fall släppa dem för tätt inpå varandra. Detta har gjort det mycket svårt att på ett riktigt sätt utvärdera resultaten och sålla bort reflektioner som inte berodde på strömkorsen. Under försöken fanns dessutom gott om reflektioner från solen på vattenytan. De strömningsbilder som finns presenterade i denna studie innehåller därför reflektioner från omgivningen som för att få en mer överskådlig bild borde ha sållats bort. Under de förutsättningar som rått har det varit ett alltför tidskrävande arbete att rensa bort alla reflektioner. Fel kan även uppstått under kalibreringen av mätutrustningen.

Under de numeriska simuleringarna har ett stationärt flöde antagits. Under mätningarna i bassängen fick systemet stå i 3-4 timmar innan markörerna släpptes för att ett stationärt flödesmönster skulle hinna utvecklas och temperaturen vara jämn över djupet. Möjligen var flödet inte fullt utvecklat under vissa av mätningarna.

Vid uppbyggandet av den numeriska modellen skapades ett symmetriplan som randvillkor för vattenytan, vilket innebär att den låses till en konstant nivå. I verkligheten skapas en liten förhöjning av vattenytan framför öarna samt en sänkning av vattenytan vid utloppets överfall. Viss vågbildning skapas även i bassängen, då särskilt i närheten av inloppet. Påverkan av detta på strömningen kan dock antas vara mycket liten.

I den numeriska modellen har öarna antagits vara helt täta. I verkligheten byggdes öarna upp av betongelement där en viss genomströmning tilläts. Även om hastigheterna på vattnet inne i hindren med blotta ögat var noll kan det antas att så inte var fallet.

Som tidigare konstaterats har randvillkor och i synnerhet valet av turbulensmodell stor betydelse för kvaliteten på resultaten. Felaktiga antaganden tillsammans med en dålig volymelementindelning kan även ge sämre resultat. Kvaliteten på elementindelningen är i hög grad avgörande för lösningens noggrannhet. Kontroller av elementnätets kvalitet gav dock goda värden och beräkningarna konvergerade dessutom på ett riktigt sätt. Möjligtvis

borde försök ha gjorts med en annan form på elementen för att finna ett mer optimalt beräkningsnät.

11 Slutsatser och diskussion

Resultaten från strömningsberäkningarna och mätningarna i bassängen visar på ett flödesmönster som domineras av två stora virvlar framför öarna samt två stora recirkulerande virvlar bakom öarna längs bassängens långsidor. En tydlig virvel i djupled bildas framför de modellerade öarna. De fysiska mätningarna visar på ett liknande resultat för samtliga flöden samt att strömningsmönstret är relativt samstämmigt genom profilen i djupled.

En jämförelse mellan resultaten från genomförda numeriska simuleringar och de fysiska modellförsöken visar på en relativt god överensstämmelse vid höga flöden, i detta fall särskilt för 20 l/s. Vid försök och simuleringar från samma anläggning har liknande resultat konstaterats (Adamsson, 1999). För de lägre flöden som modellerats fås en sämre överensstämmelse, vilket även konstaterats i tidigare försök (Adamsson, 1999).

I denna studie har det visat sig vara av stor betydelse hur turbulensen i systemet är beskriven. I en bassäng som denna uppstår en komplicerad flödesbild med både turbulenta och laminära områden. Vid de lägre flödena dominerar den laminära strömningsbilden. Då tillägg görs i turbulensmodellens transportekvationer med den i kap. 5.2 beskrivna RNG-termen, blir simuleringresultaten i Fluent betydligt mer lika de uppmätta strömmönstren. Denna tilläggsterm gör att modellen tar hänsyn till ett bredare spektrum av flöden, då den traditionella $k-\epsilon$ modellen fungerar bäst vid höga Reynolds tal och RNG vid lägre.

Vid väggarna fås vid de lägre flödena hastighetsvektorer med osannolika riktningar då tilläggstermen RNG är med i turbulensmodellen. Detta kan bero på att de viskösa krafter som verkar på fluiden dominerar precis vid väggarna och de turbulenta krafterna är som lägst där. För att få rimligare resultat vid väggar bör eventuellt de viskösa krafterna dämpas. Det bör även undersökas mer ingående hur RNG-modellen fungerar tillsammans med väggfunktionerna.

Nedanstående figur visar på kraftfördelningen mellan viskösa och turbulenta krafter i ett område nära en vägg.

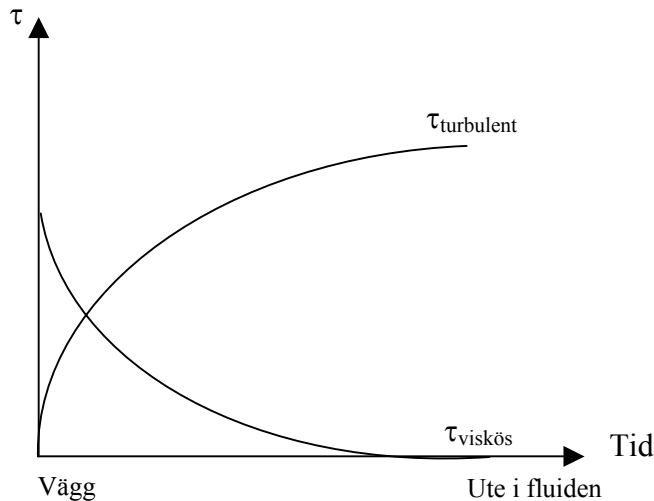


Fig. 11.1 Fördelning av krafter vid en vägg respektive ute i fluiden.

För att undvika effekterna av underligt riktade hastighetsvektorer i områden nära väggarna kan det vara av intresse att undersöka hur en beskrivning med "Near Wall" funktioner hanterar dessa problem. Standard vägg funktionerna vilka är använda i denna studie löser inte upp området närmast väggarna numeriskt, se Fig. 11.2. Near Wall löser däremot upp hela området till väggen. Standard vägg funktionerna sparar dock mycket simuleringsstid.

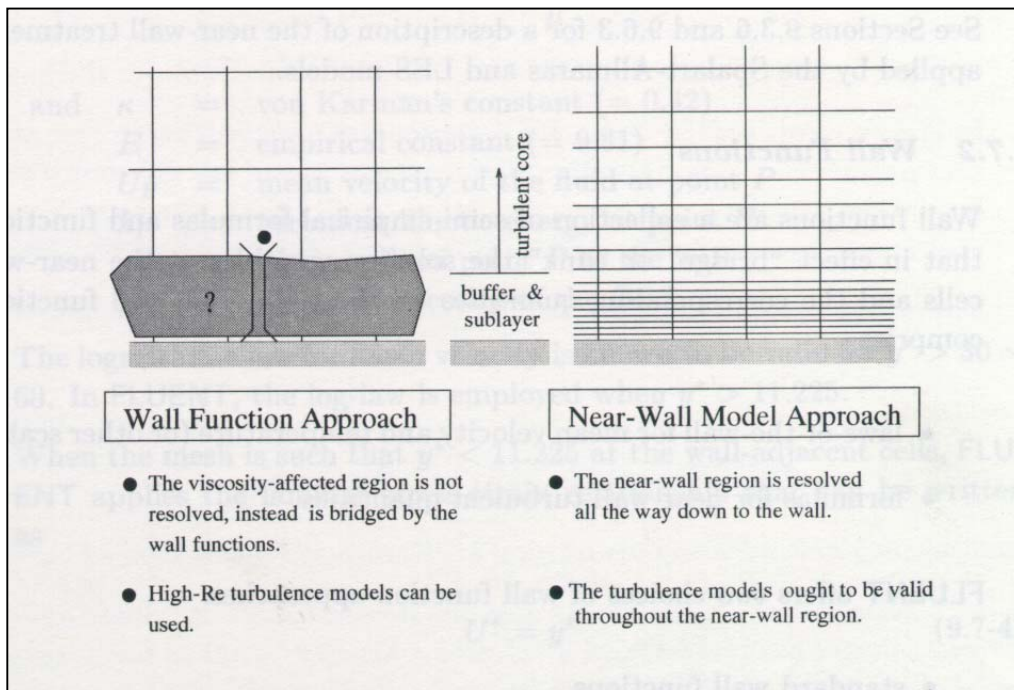


Fig. 11.2 Jämförelse mellan standard vägg funktioner och "near wall" modellering (Fluent User's Guide, 1995).

Ingen större förändring av de numeriska resultaten kunde konstateras vid förändring av övriga parametrar i beräkningarna.

Anledningen att recirkulerande virvlar i horisontalplanet bakom öarna är tydligare i de numeriska simuleringarna för den rektangulära ön (Hinder 1) än för den rombiska (Hinder 4) kan vara att flödet bakom öarna fördelas över en större area. Den aktivt medverkande arean bakom hindren är större för Hinder 4 då zonen med mycket låga hastigheter är mindre än den för Hinder 1. Flödet får då större area att fördela sig på och hastigheterna tvingas inte upp och bildar virvlar på samma sätt som för Hinder 1 där stor del bakom hindret inte är aktivt medverkande till strömningen enligt nedanstående figurer.

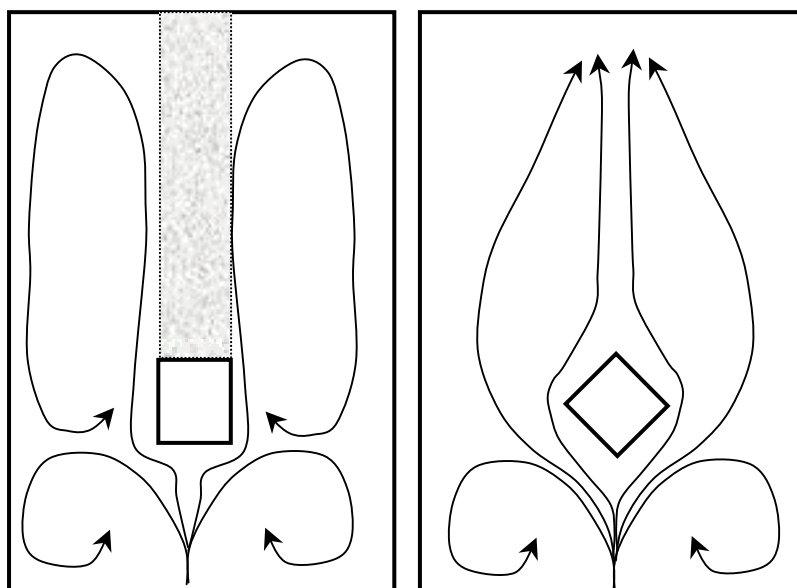


Fig. 11.3 *Principskiss över möjliga areor medverkande för strömningen för Hinder 1 och Hinder 4. Den skuggade arean för Hinder 1 motsvarar den del som ej är aktivt medverkande.*

Placeringen av öar eller hinder för att förändra ett systems hydrauliska egenskaper bör utredas betydligt mer utförligt. Vad som kan konstateras utifrån detta examensarbete med den validering av resultat som den fysiska modelleringen inneburit är att en rektangulär ö ger en betydligt lägre kortslutning än en rombformad. Den rektangulära utformningen ger dock tydliga recirkulerande virvlar, även i djupled, vilket kan leda till att sediment dras upp från botten vid höga flödestoppar. I bägge fallen bromsas

hastigheterna upp till följd av hindren och lugna zoner skapas bakom dem. Något högre hastigheter skapas vid sidan om hindren.

De fysiskt uppmätta resultaten tillsammans med de övriga utformningar som enbart modellerades numeriskt visar på att placeringen i längdled verkar vara av mindre betydelse för att bryta den jetstråle som bildas vid inloppet. Möjligen kan man genom att placera öarna på ett större avstånd från inloppet minska storleken och effekten av de recirkulerande virvlarna. En bredare ö skapar större recirkulerande virvlar i horisontalplanet och bidrar till ökade hastigheter längs bassängens långsidor.

Spårämnesförsöken visar på att de fysiskt modellerade öarna ger en god effekt på bassängens hydrauliska egenskaper. Hinder 1 gav en effektiv volym som var i det närmsta idealisk och innebar en förbättring med ca 90 % mot fallet utan ö, medan Hinder 4 ledde till en förbättring på ca 30 %. Bägge utformningarna var mycket effektiva för att minska kortslutningen i bassängen. Hinder 1 medförde en förbättring på nära 200 % och Hinder 4 en förbättring på ca 150 %. Båda öarna reducerade den höga koncentrationstoppen vid utloppet. Resultaten stämmer bra överens med tidigare studier med 2.5- dimensionella beräkningsverktyg (Persson, 1999).

Med tidigare resonemang om effektivt medverkande volymer i åtanke skulle det vara önskvärt med den minskning av kortslutningseffekten som den rektangulära ön gav, men med en större effektiv volym bakom hindret. En optimal ö skulle möjligtvis kunna utformas avsmalnande mot utloppet för att kunna utnyttja större del av vattenvolymen bakom hindret som bidrag till strömningen samtidigt som jetstrålen från inloppet bryts effektivt.

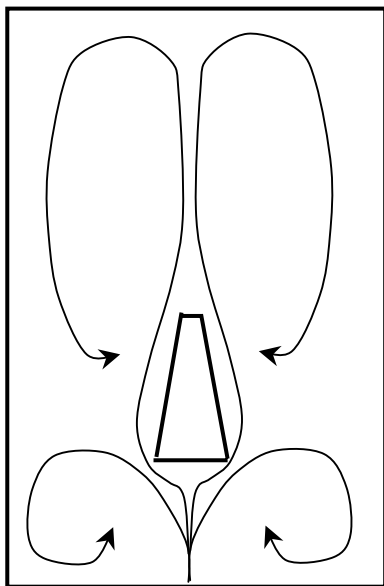


Fig. 11.4

Principskiss över utformning av en ö där den låga kortslutning som erhöles för Hinder1 kombinerats med en avsmalnande geometri för att effektivt utnyttja volymen bakom hindret för avskiljning.

Tidigare forskning har visat att en ö placerad framför inloppet resulterar i att en likformig strömning utvecklas snabbare än flera små öar (German, Kanth, 1997). I samma studie har framkommit att oregelbundna utformningar på öarna ger mer komplexa virvelbildningar än en rektangulär sådan.

En verklig dagvattendamm belastas av flöden som varierar i tiden. Det vore därför intressant att belasta bassängen och den numeriska modellen med en tidsserie transienta flöden för att se hur strömningsmönstret påverkas. Dock kan det ur denna studie konstateras att strömningen är mycket likartad för de tre flöden som modellerats. Det är därför troligt att en transient belastning skulle ge liknande resultat. I en dagvattendamm är bottenutformningen och vindpåverkan över ytan i hög grad avgörande för strömningsmönstret. I en rektangulär bassäng som den som använts i denna studie skapas däremot ett mycket komplicerat strömningsmönster som inte är lika lätt att modellera som ett som styrs av dammens geometri.

Användandet av CFD-teknik inom den moderna VA-tekniken är idag begränsat. Tredimensionella modeller kräver oftast mer datorkraft och längre simuleringstider än 2.5-dimensionella. För att kunna simulera tredimensionella flöden på ett mer korrekt sätt bör turbulensmodellens betydelse utredas noggrant. Det bör dessutom på ett användarvänligt sätt utredas hur turbulensen skall beskrivas vid låga flöden.

12 Referenslista

Adamsson, Å. (1999) *Computational Fluid Dynamics for Detention Tanks – Simulation of Flow Pattern and Sedimentation*. Göteborg: Chalmers reproservice. ISSN 0348-1050

Chapra, S. (1997) *Surface Water Quality Modelling*. Singapore: McGraw-Hill International Editions – Civil Engineering Series. ISBN 0-07-115242-3

Ferziger, J.H. och Peric, M. (1997) *Computational Methods for Fluid Dynamics*. New York: Springer – Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 3-540-59434-5

Fluent 5 User's Guide. (1998) Fluent Inc. USA

Gambit User's Guide. (1998) Fluent Inc. USA

German, J och Kanth, H. (1997) *Strömningssimulering i en dagvattendamm – verifierad FE-analys i FIDAP*. Examensarbete 1997:8. Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola

Häggström, S. (1988) *Hydraulik för V-teknologer*. Undervisningsskrift 1988:6. Institutionen för Vattenbyggnad. Göteborg, Chalmers Tekniska högskola: Minab.

Kadlec, R och Knight, R. (1996) *Treatment Wetlands*. CRC Press, Lewis Publishers.

Kompendium i VA-ledningsteknik. (1995) Institutionen för Vatten, Miljö och Transport. Göteborg: Chalmers Tekniska Högskola

Olson, R. (1980) *Essentials of engineering fluid mechanics – fourth edition*. Harper&Row Publishers, New York. ISBN 0-700-22532-3

Persson, J. (1999) *Hydraulic Efficiency in Pond Design*. Göteborg: Chalmers reproservice. ISSN 91-7197-804-6

Persson, J. *The hydraulic performance of ponds of various layouts*. Urban Water 2 (2000) 243-250. Elsevier Science Ltd.

Reed, S; Crites, R; Middlebrooks, E. (1995) *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. Mc Graw-Hill, New York.

Rodi, W.(1993) *Turbulence models and their application in hydraulics – a state of the art review*. Rotterdam: IAHR monograph series. ISBN 90-5410-150-4

Thackston, E; Shields, F; Schroeder, P. (1987) *Residence time Distribution of Shallow Basins*. Journal of Environmental Engineering, Vol. 113, Nr 6, sid. 1319-1332.

Versteeg, H.K och Malalasekera, W. (1995) *An introduction to Computational Fluid Dynamics – The finite volume method*. London: Longman Group Ltd. ISBN 0-582-21884-5

Bilaga 1

Genomförda numeriska simuleringar

Genomförda numeriska simuleringar

Hinder	1			2			3	4	5		Summa
	20 l/s	8 l/s	4 l/s	20 l/s RNG	8 l/s RNG	4 l/s RNG	20 l/s Turb1	20 l/s Turb2	20 l/s RNG+ Turb2	8 l/s RNG+ Turb2	
Hinder 1											
Koord 1	1	1	1								3
Koord 2	1	1	1	1	1	1	1	1			8
Koord 3	1	1	1								3
Koord 4	1	1	1								3
Koord 5	1	1	1								3
Hinder 2											
Koord 1	1	1	1	1							4
Koord 2	1	1	1	1	1	1					6
Koord 3	1	1	1	1							4
Koord 4		1		1							2
Koord 5		1									1
Hinder 3											
Koord 1		1									1
Koord 2		1		1	1	1					4
Hinder 4											
Koord 2	1	1	1	1	1	1			1	1	8
Hinder5											
Koord2				1	1	1					3
Totalt											53

Förklaring av ovan använda termer:

- 1: Simuleringar med standard k- ϵ
- 2: Simuleringar med standard k- ϵ samt RNG
- 3: Simuleringar med standard k- ϵ , turbulensintensitet ökad från 1 till 10 % specifik längdskala för virvlarna minskad från 1 till 0,2 m.
- 4: Simuleringar med standard k- ϵ , andra ordningens lösning för k och ϵ vid diskretiseringen
- 5: Simuleringar med standard k- ϵ samt RNG, andra ordningens lösning för k och ϵ vid diskretiseringen

Bilaga 2

Volymselementindelning för Hinder 1

Volymelementindelning för Hinder 1

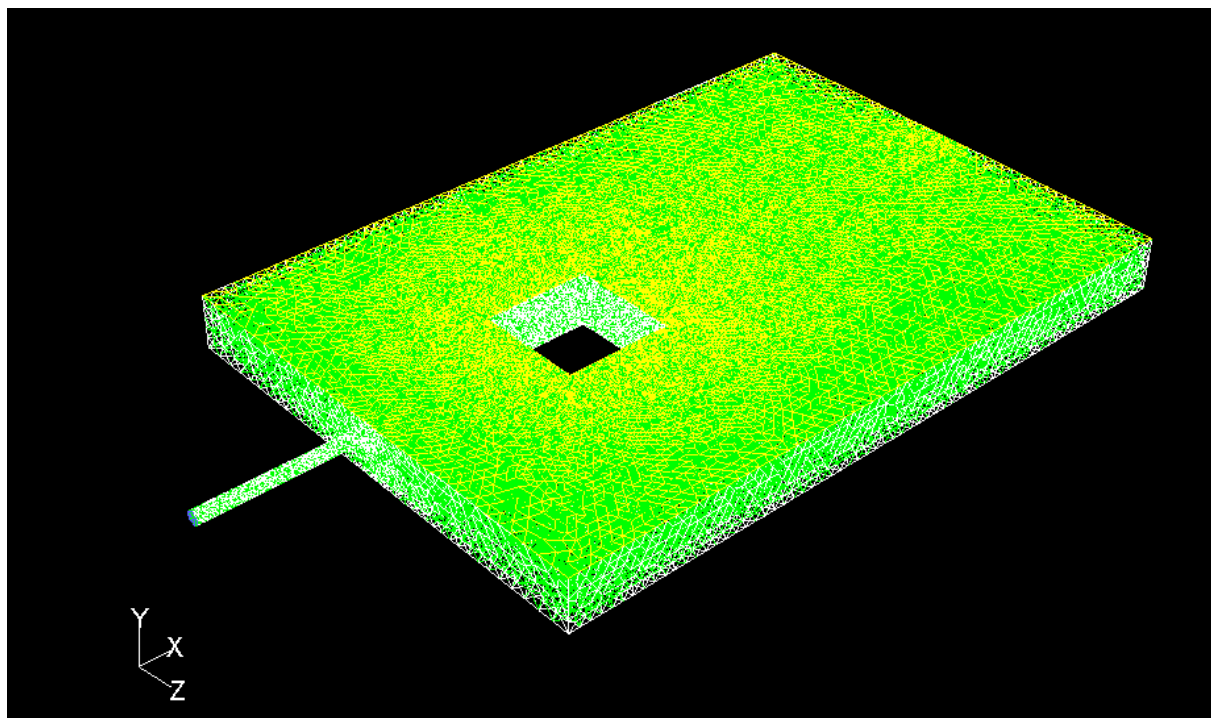


Fig. 1 Elementindelning för den totala volymen, Hinder 1

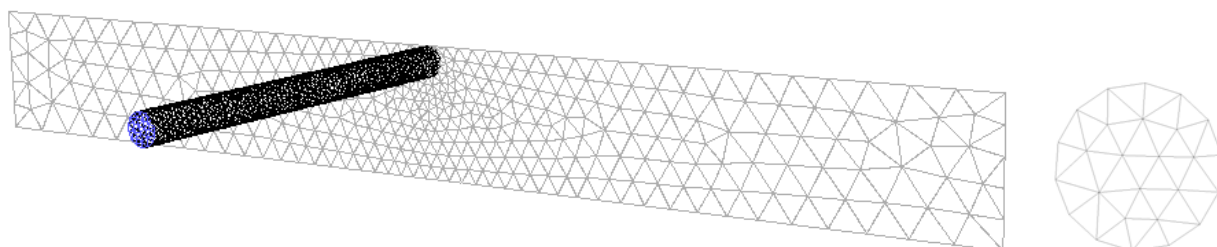


Fig. 2 Elementindelning för inloppsröret samt inloppsväggen.

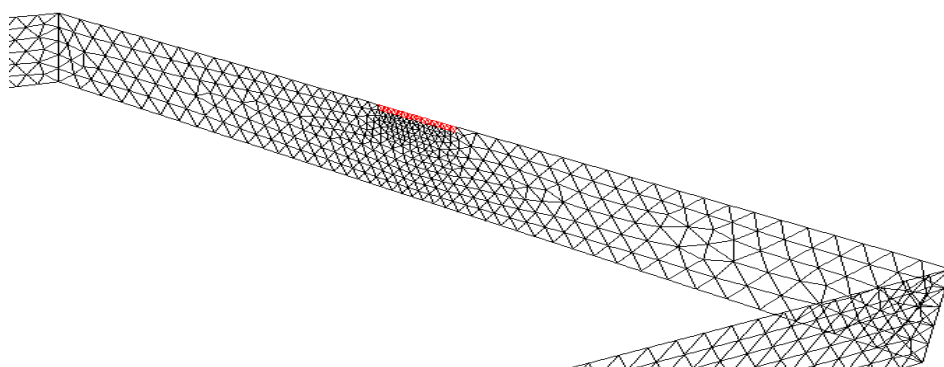


Fig. 3 Elementindelning för överfallet samt utloppsväggen.

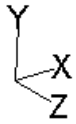
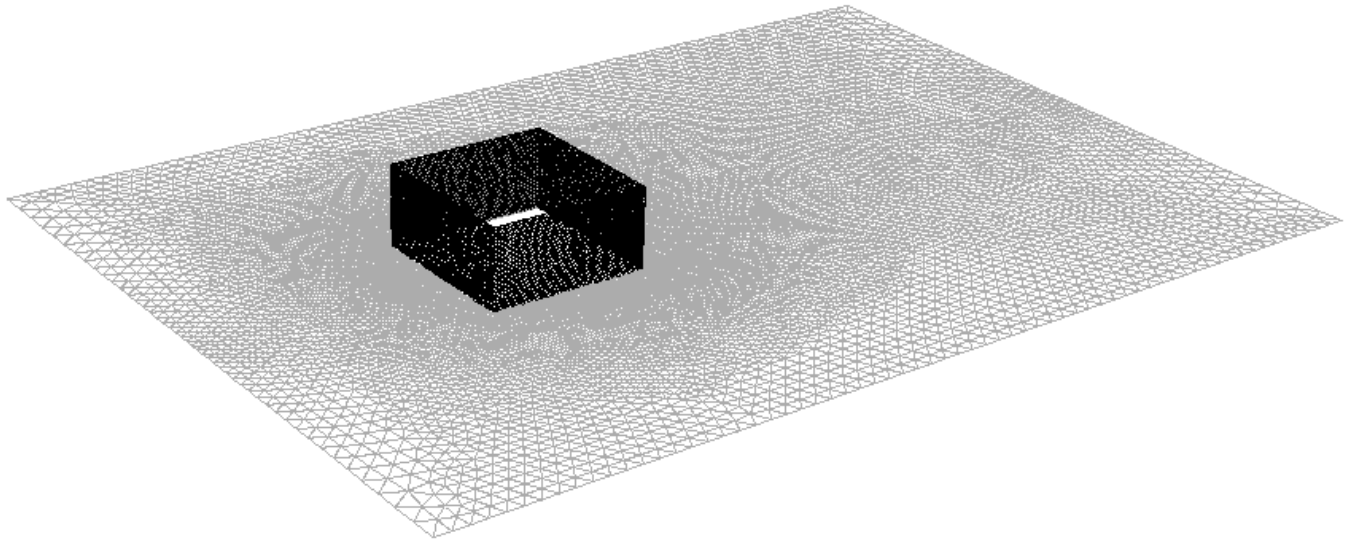


Fig. 4 Elementindelning för hindret samt bassängbotten.

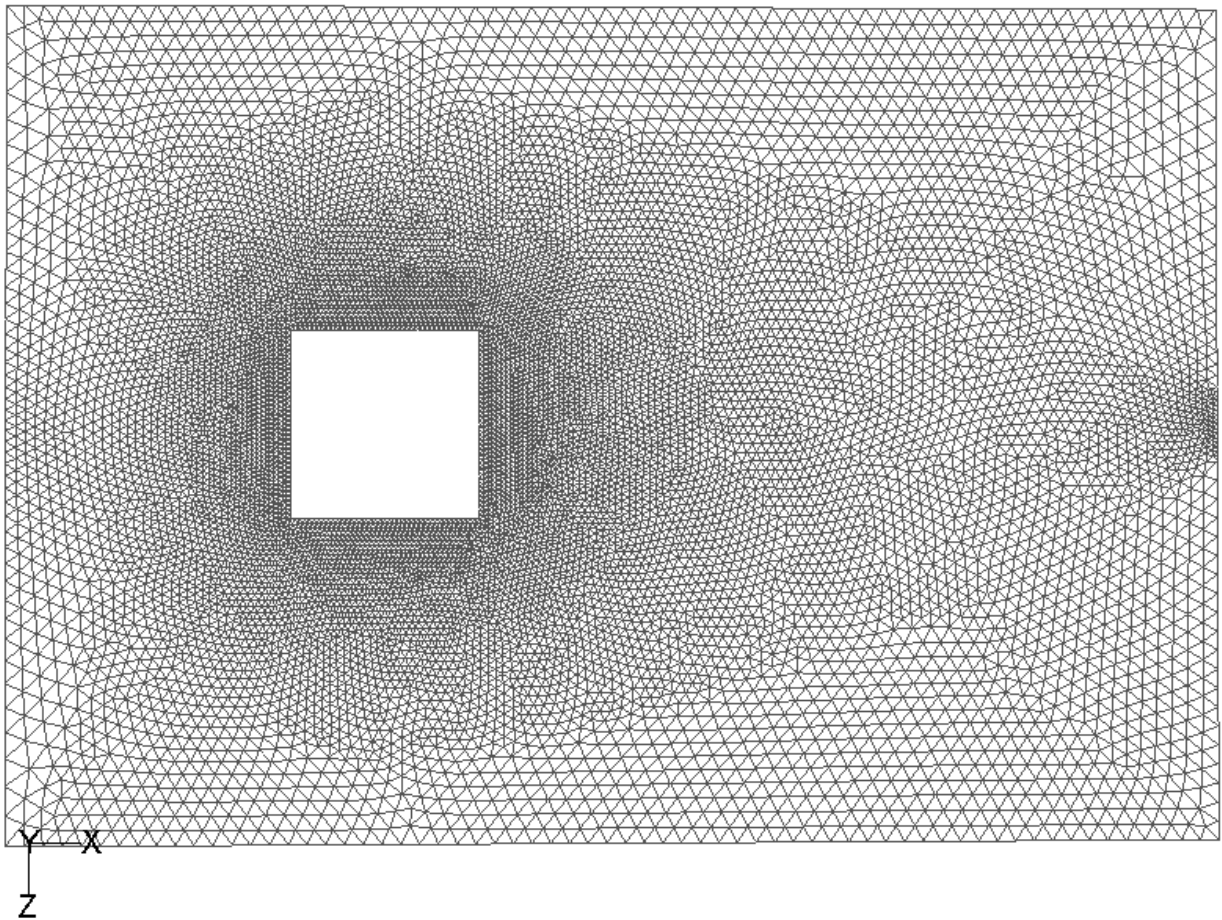


Fig. 5 Elementindelning för vattenytan/symmetriplanet.

Bilaga 3

Beräknade strömningsmönster för Hinder 1

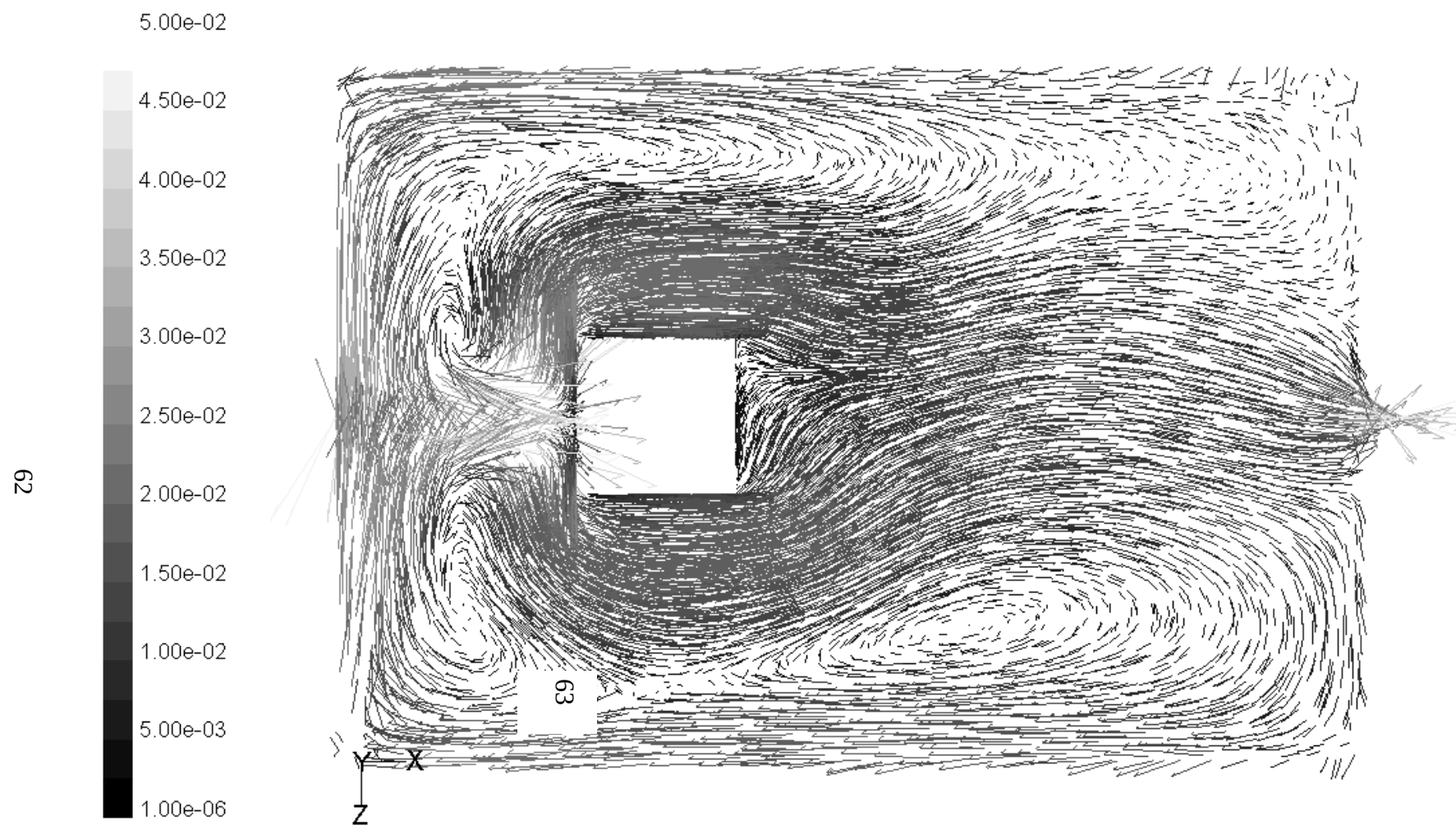


Fig. 1

Strömmönster för Hinder1, 3 m från inloppet med standard $k-\varepsilon$ med RNG, flödet 20 l/s, 15 cm under vattenytan.

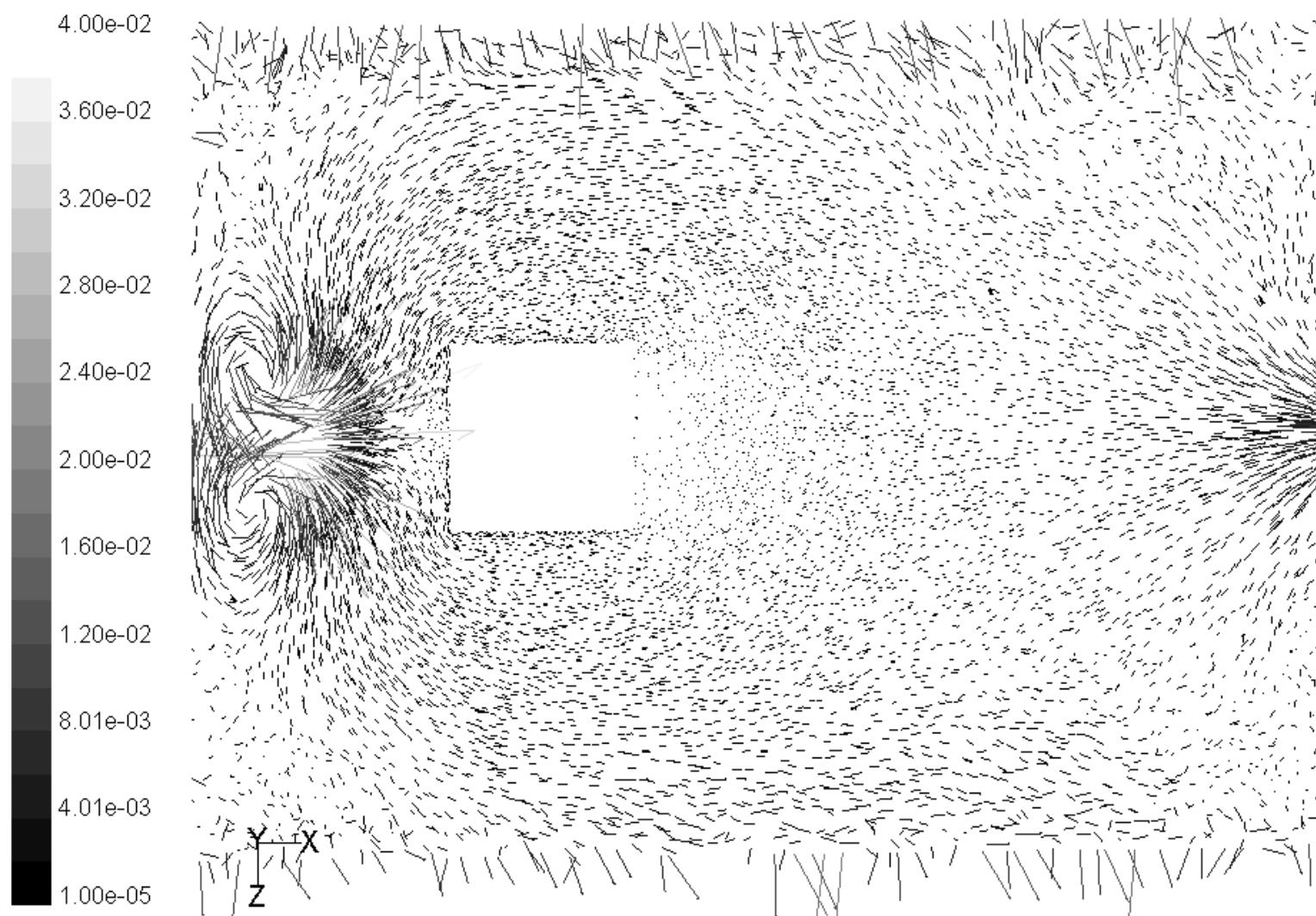


Fig. 2 Strömmönster för Hinder1, 3 m från inloppet med standard $k-\varepsilon$ med RNG, flödet 8 l/s, 15 cm under vattenytan.

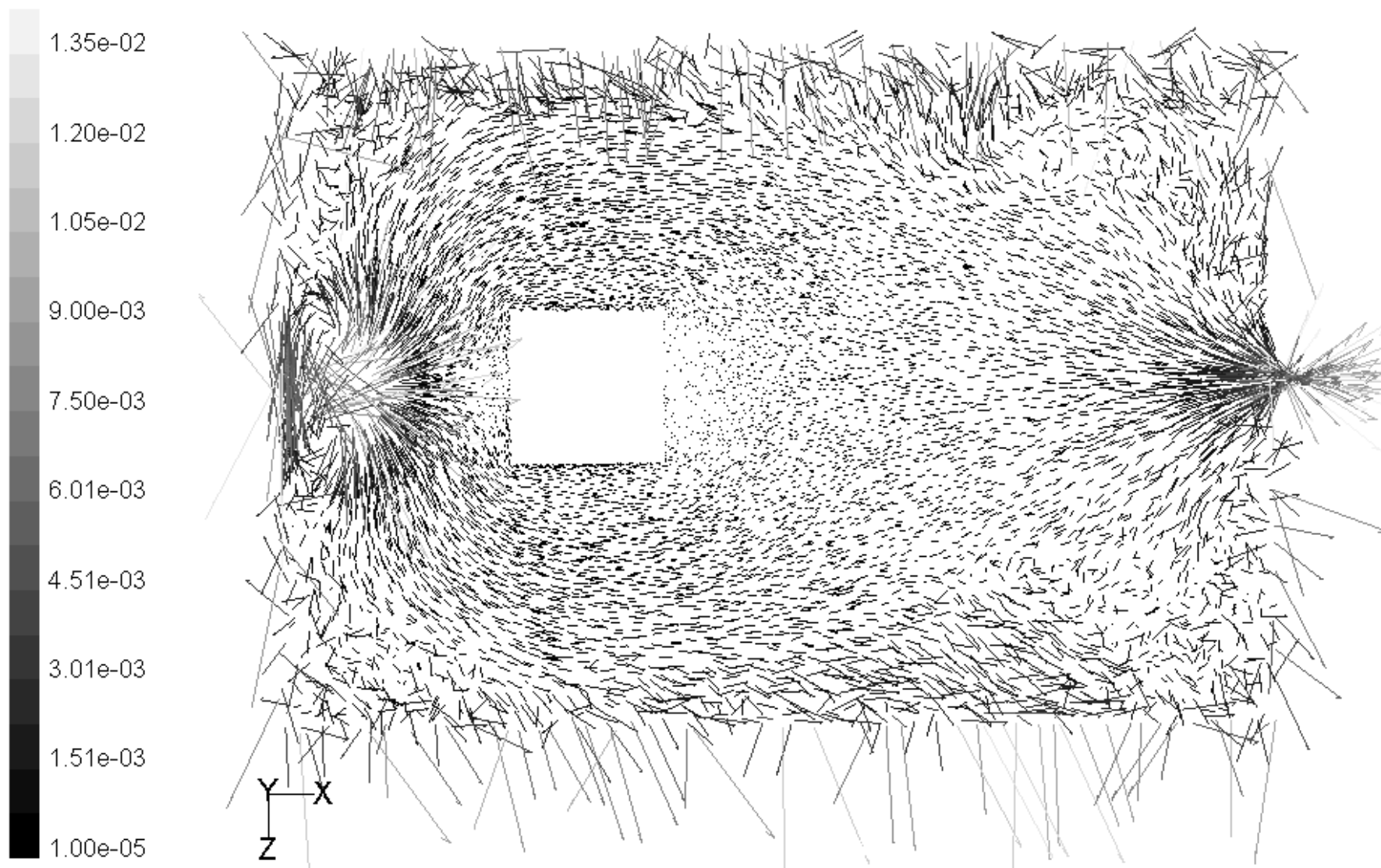


Fig. 3 Strömmönster för Hinder1, 3 m från inloppet med standard $k-\epsilon$ med RNG, flödet 4 l/s, 15 cm under vattenytan.

Bilaga 4

Beräknade strömningsmönster för Hinder 2

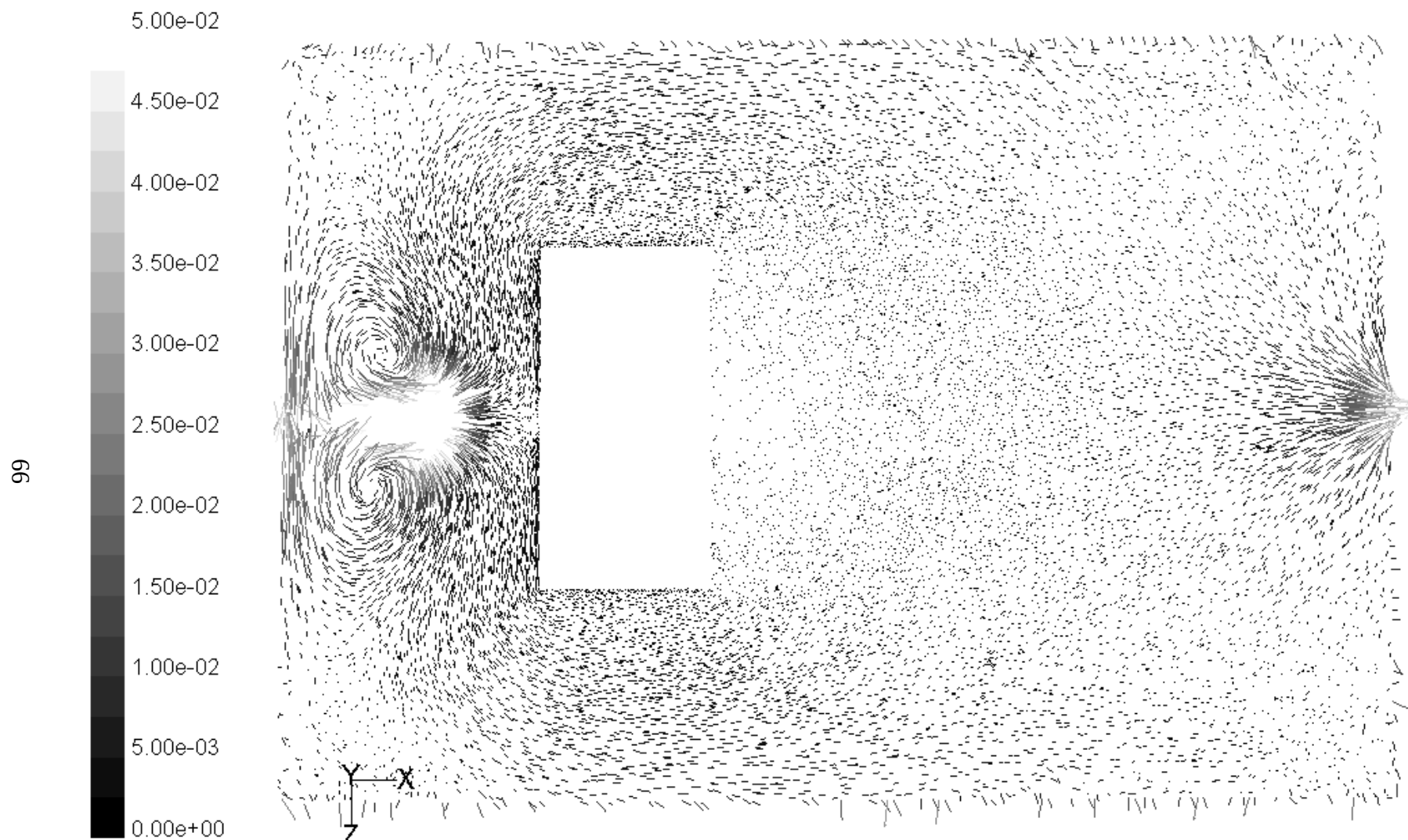


Fig. 1 Strömmönster för Hinder2, 3 m från inloppet med standard $k-\varepsilon$ med RNG, flödet 20l/s, 15 cm under vattenytan. Observera att för denna placering i modellbassängen har ön blivit djupare än i övriga simuleringar för Hinder 2. Det påverkar dock inte strömningsmönstret nämnvärt.

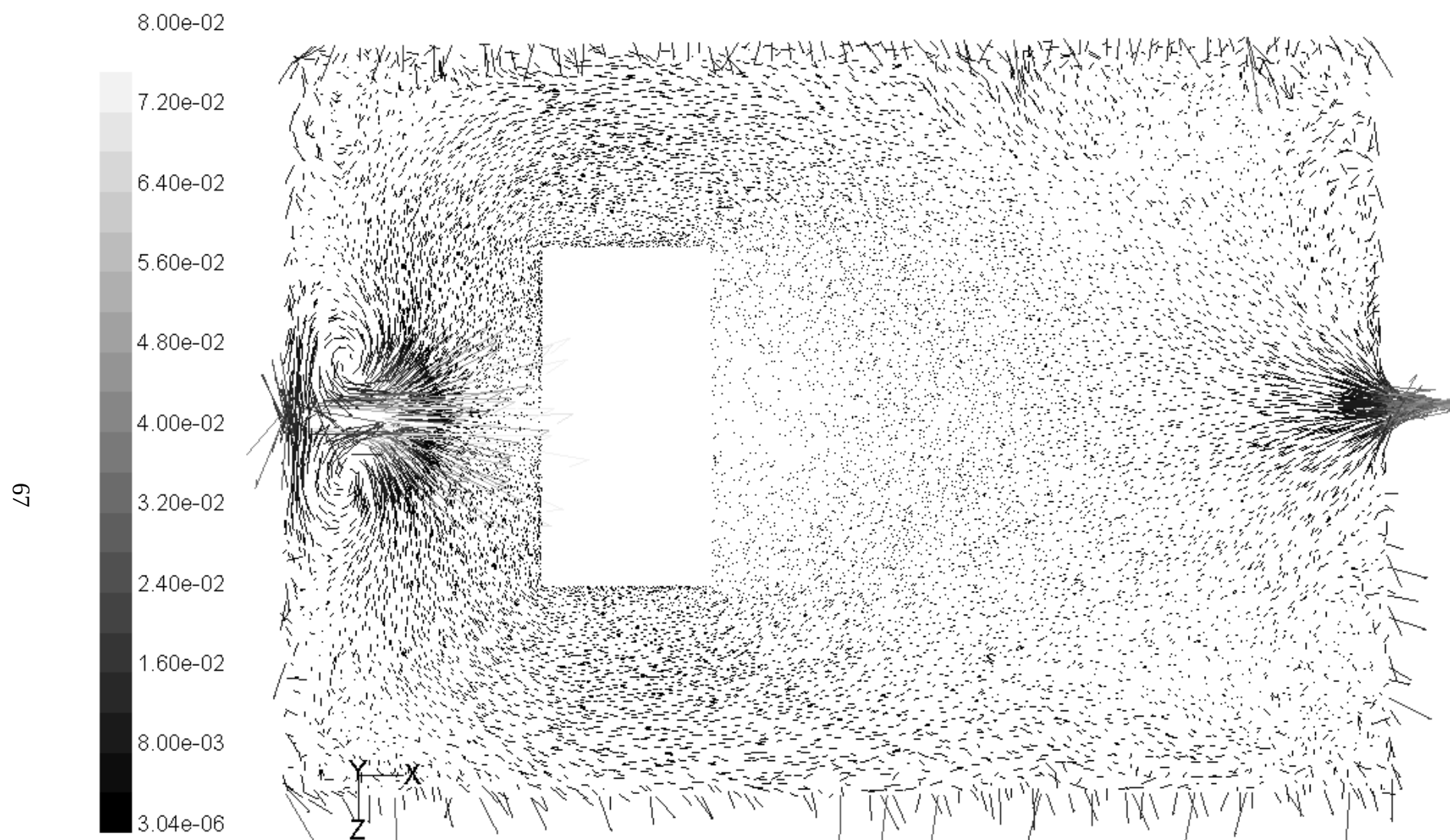


Fig. 2

Strömmönster för Hinder2, 3 m från inloppet med standard $k-\varepsilon$ med RNG, flödet 8 l/s, 15 cm under vattenytan.

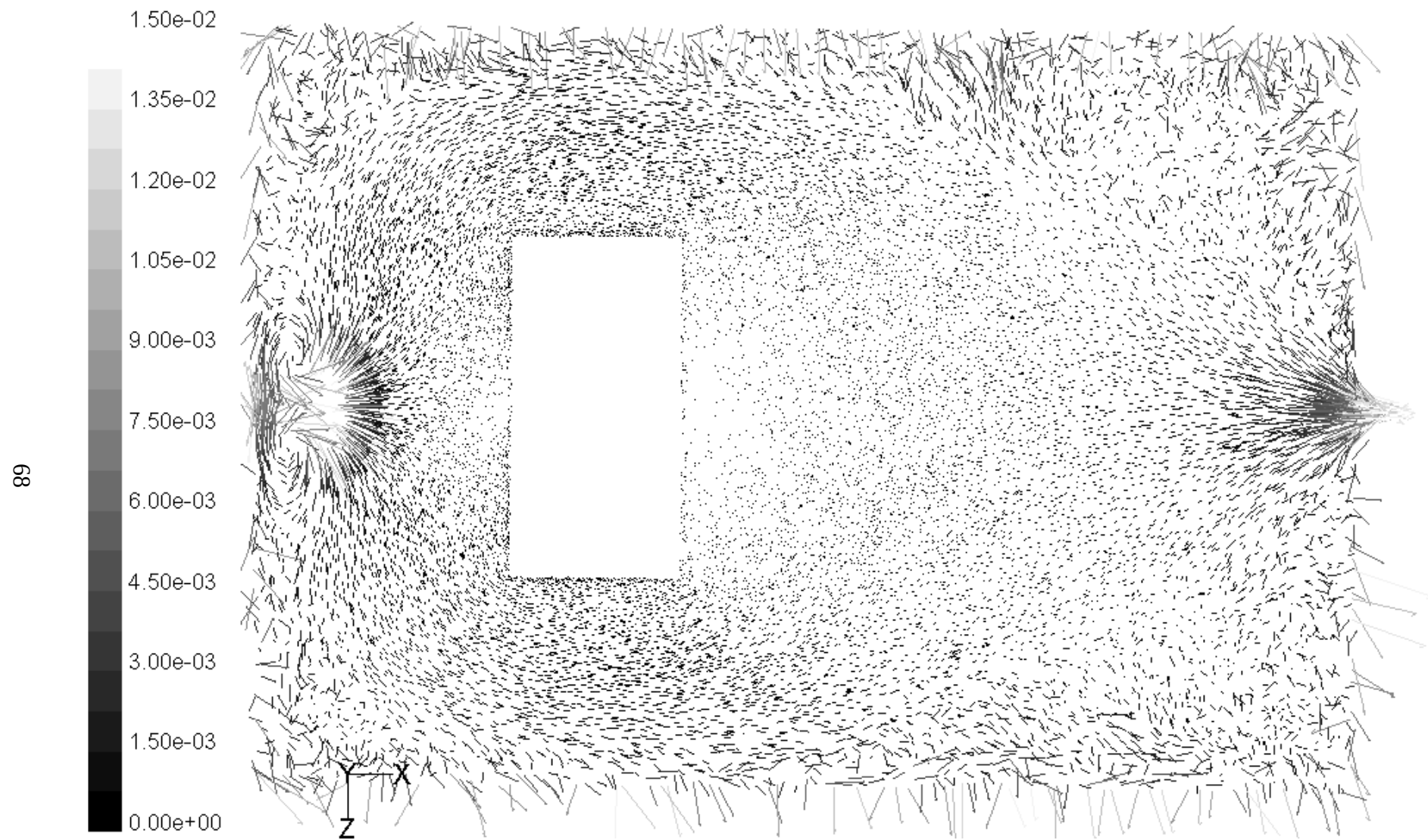


Fig. 3 Strömmönster för Hinder2, 3 m från inloppet med standard $k-\varepsilon$ med RNG, flödet 4 l/s, 15 cm under vattenytan.

Bilaga 5

Beräknade strömningsmönster för Hinder 3

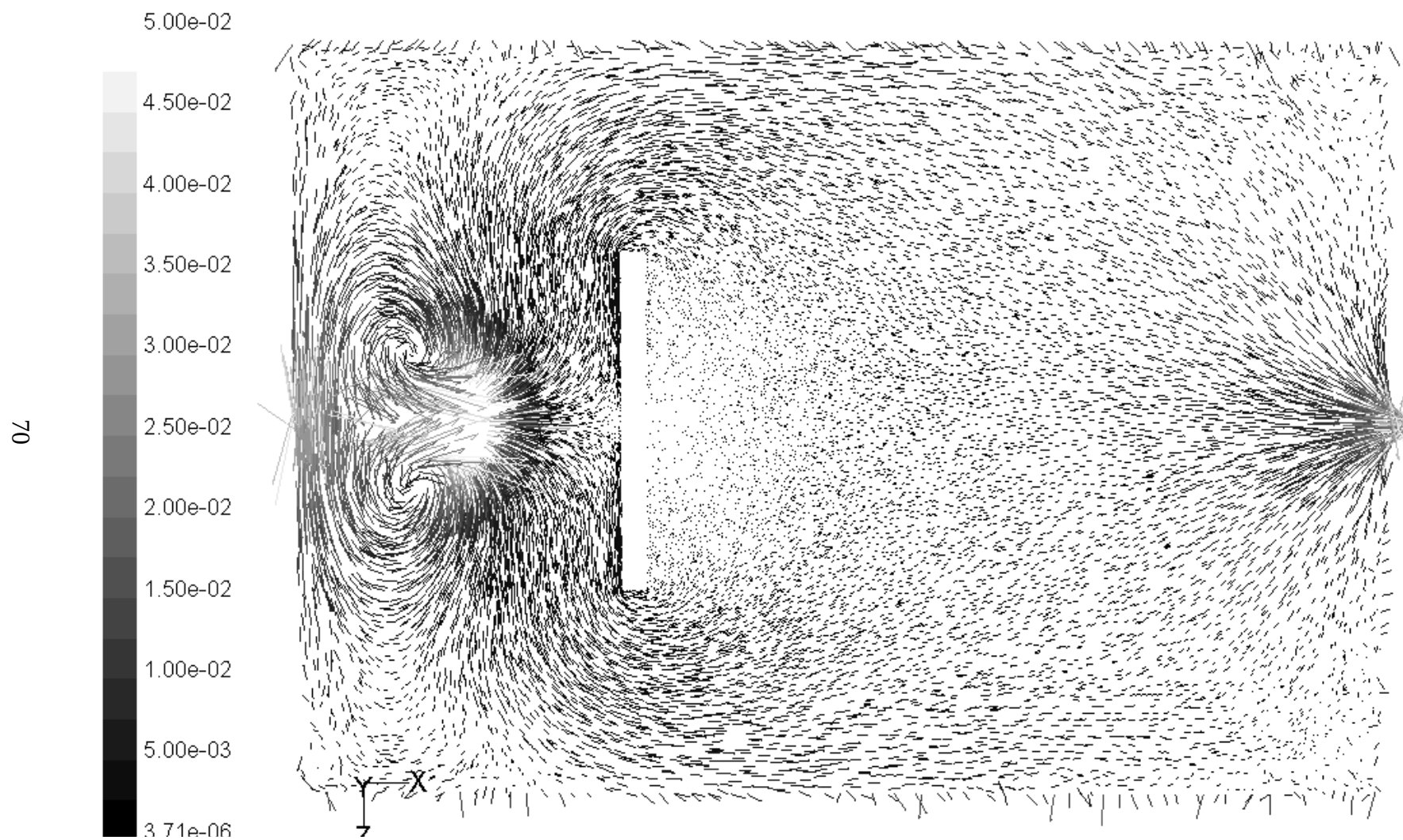


Fig. 1

Strömmönster för Hinder 3, 3 m från inloppet med standard $k-\varepsilon$ med RNG, flödet 20 l/s, 15 cm under vattenytan.

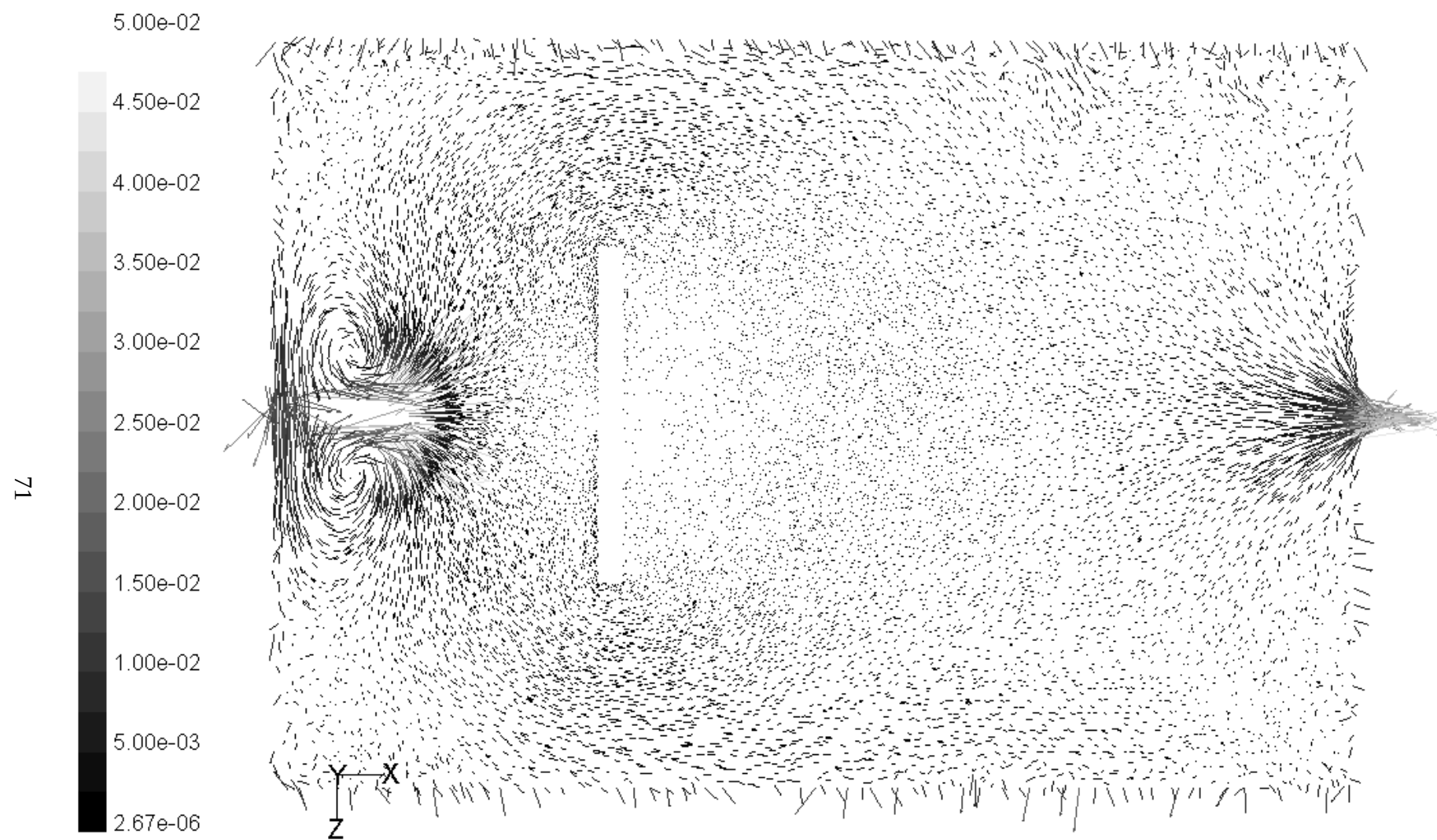
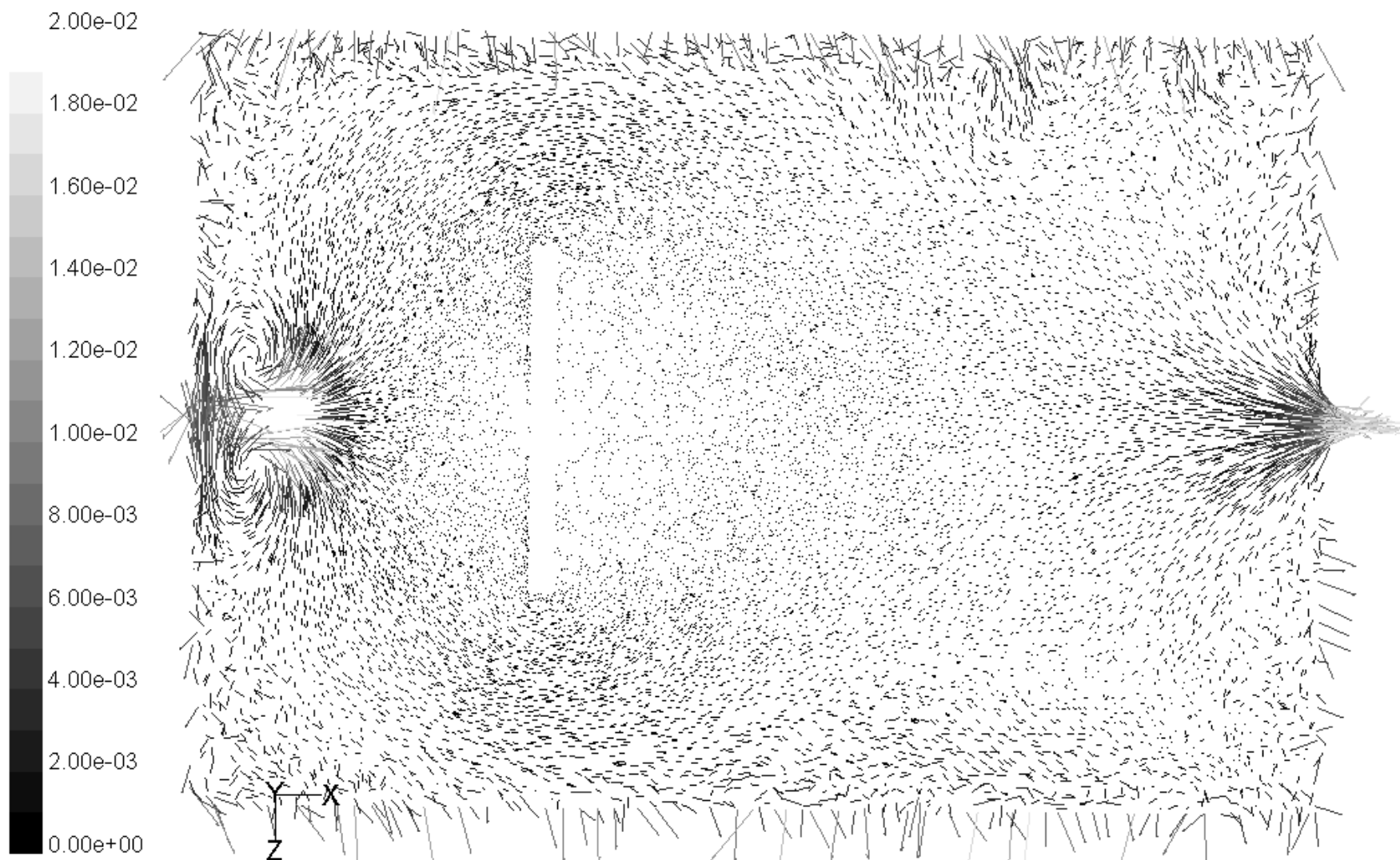


Fig. 2

Strömmönster för Hinder 3, 3 m från inloppet med standard $k-\varepsilon$ med RNG, flödet 8 l/s, 15 cm under vattenytan.

**Fig. 3**

Strömmönster för Hinder 3, 3 m från inloppet med standard $k-\varepsilon$ med RNG, flödet 4 l/s, 15 cm under vattenytan.

Bilaga 6

Beräknade strömningsmönster för Hinder 4

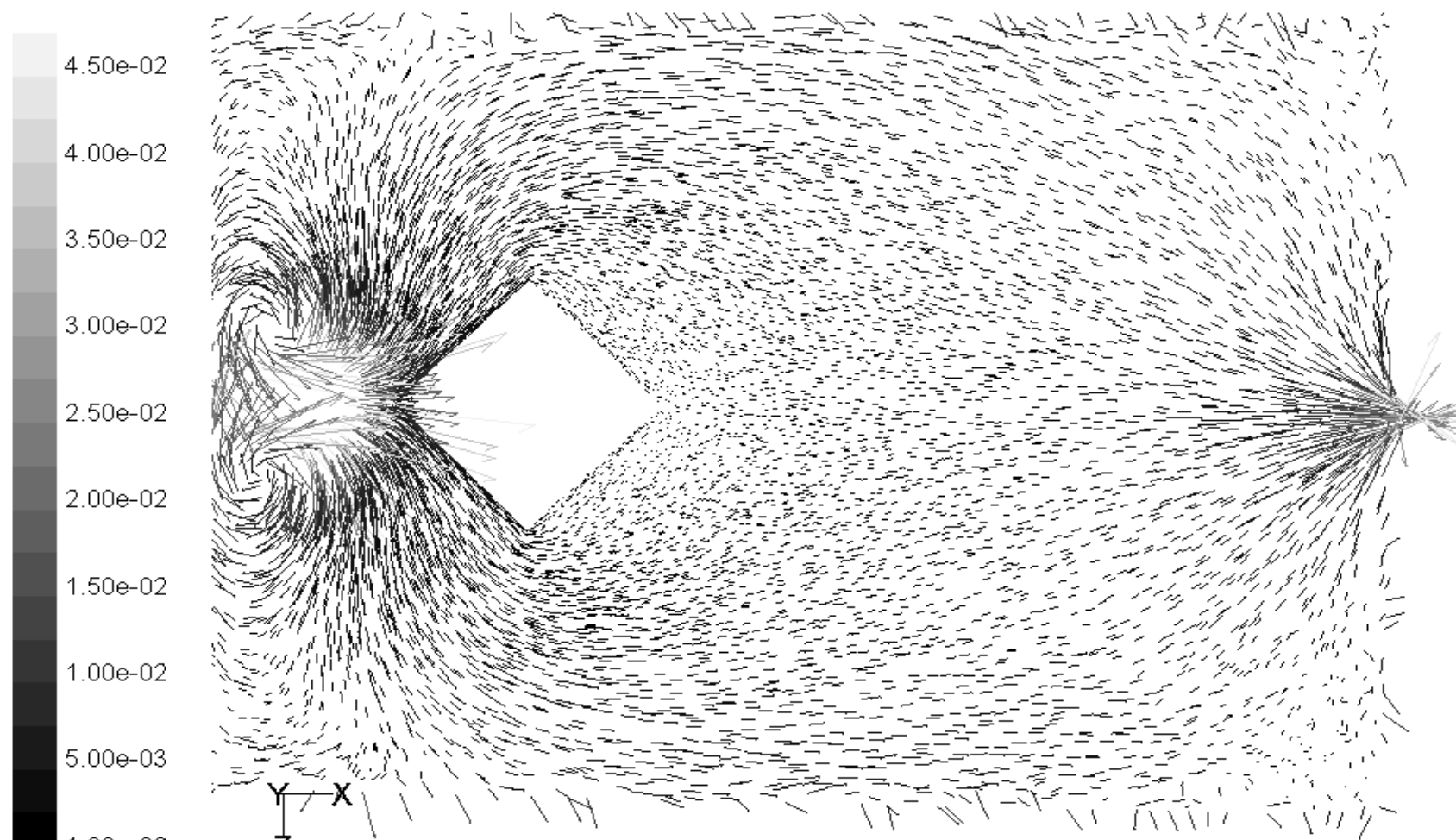


Fig. 1 Strömmönster för Hinder 4, 3 m från inloppet med standard $k-\varepsilon$ med RNG, flödet 20 l/s, 15 cm under vattenytan.

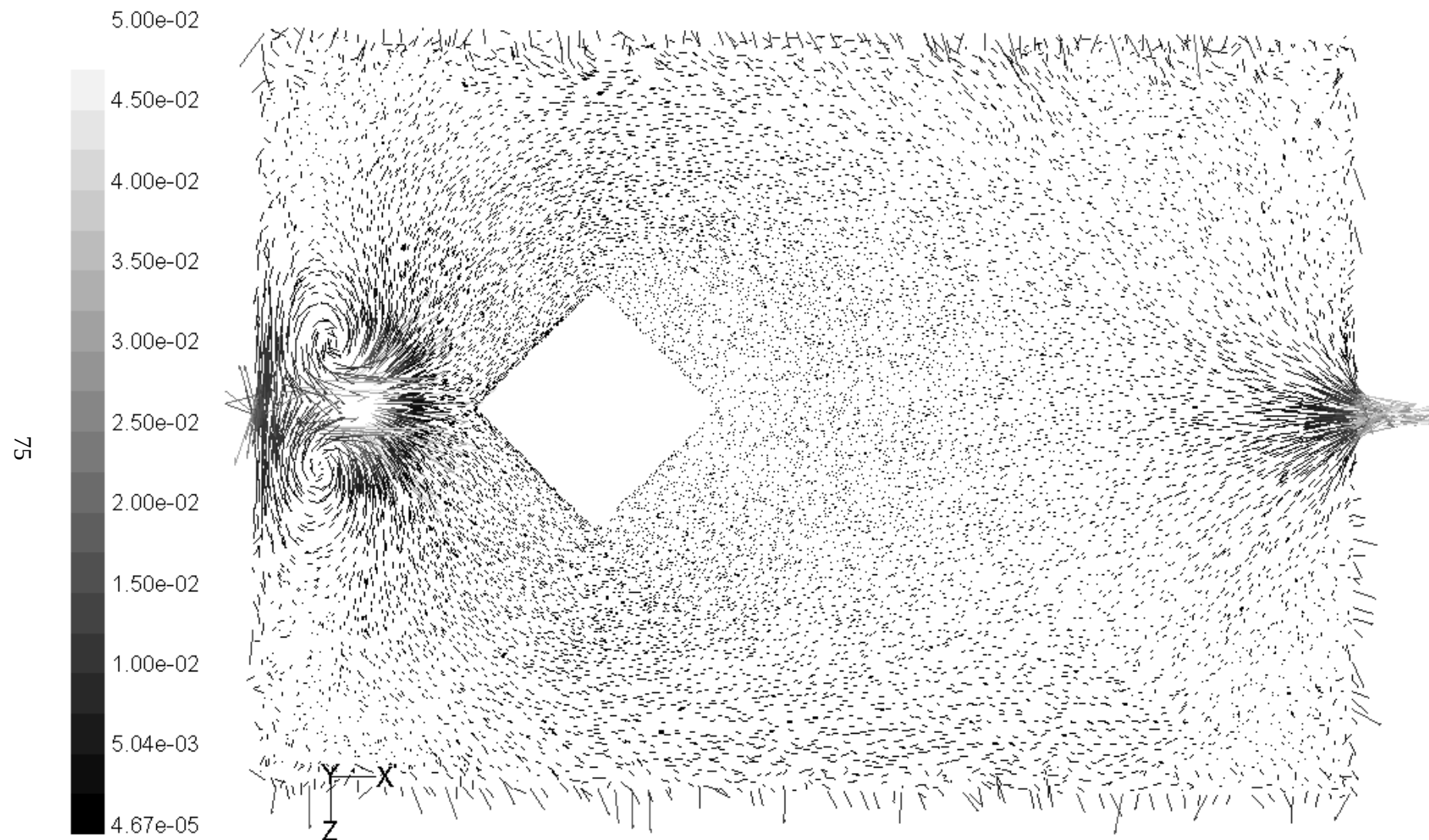


Fig. 2

Strömmönster för Hinder 4, 3 m från inloppet med standard $k-\varepsilon$ med RNG, flödet 8 l/s, 15 cm under vattenytan.

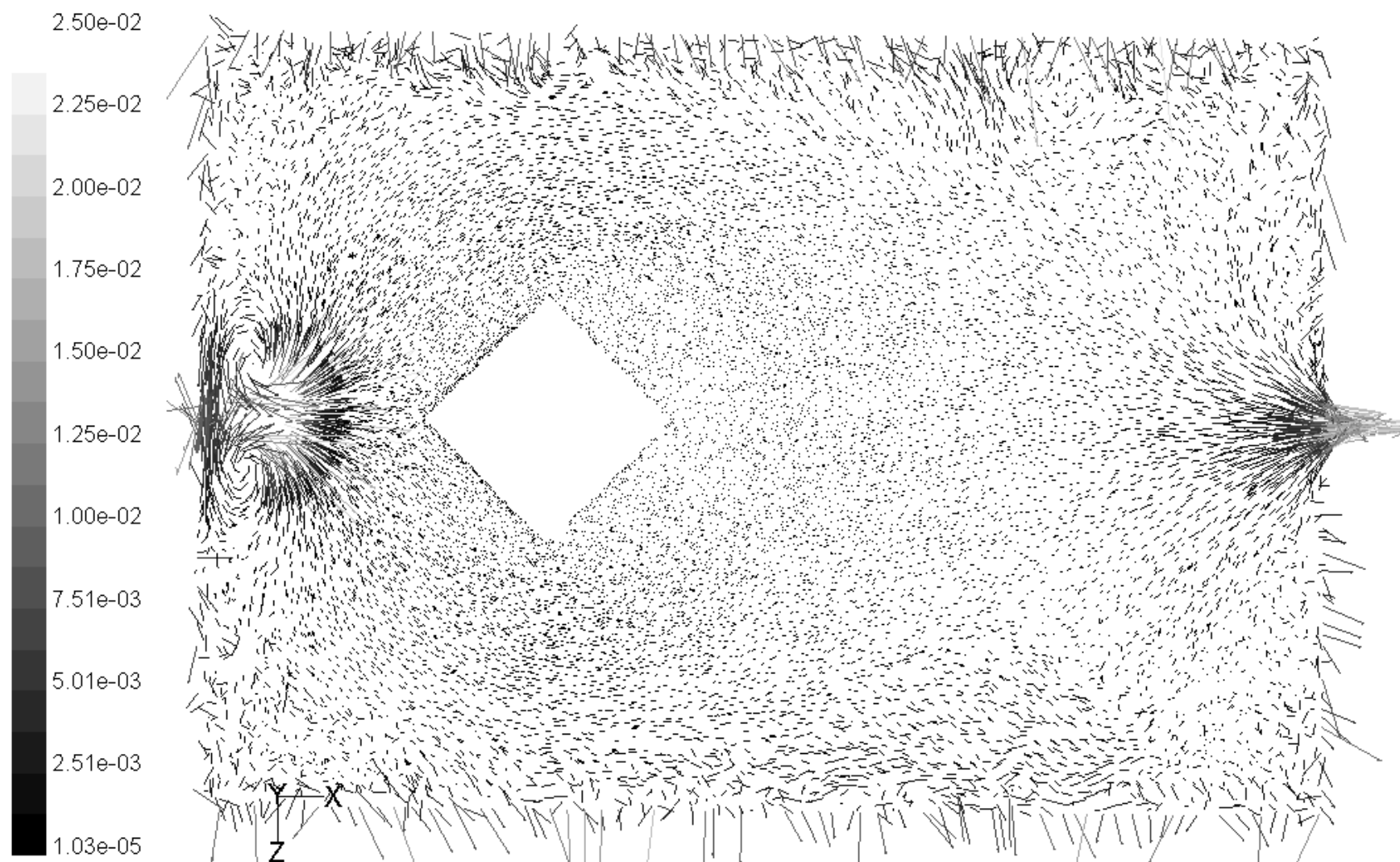


Fig. 3

Strömmönster för Hinder 4, 3 m från inloppet med standard $k-\varepsilon$ med RNG, flödet 4 l/s, 15 cm under vattenytan.

Bilaga 7

Beräknade strömningsmönster för Hinder 5

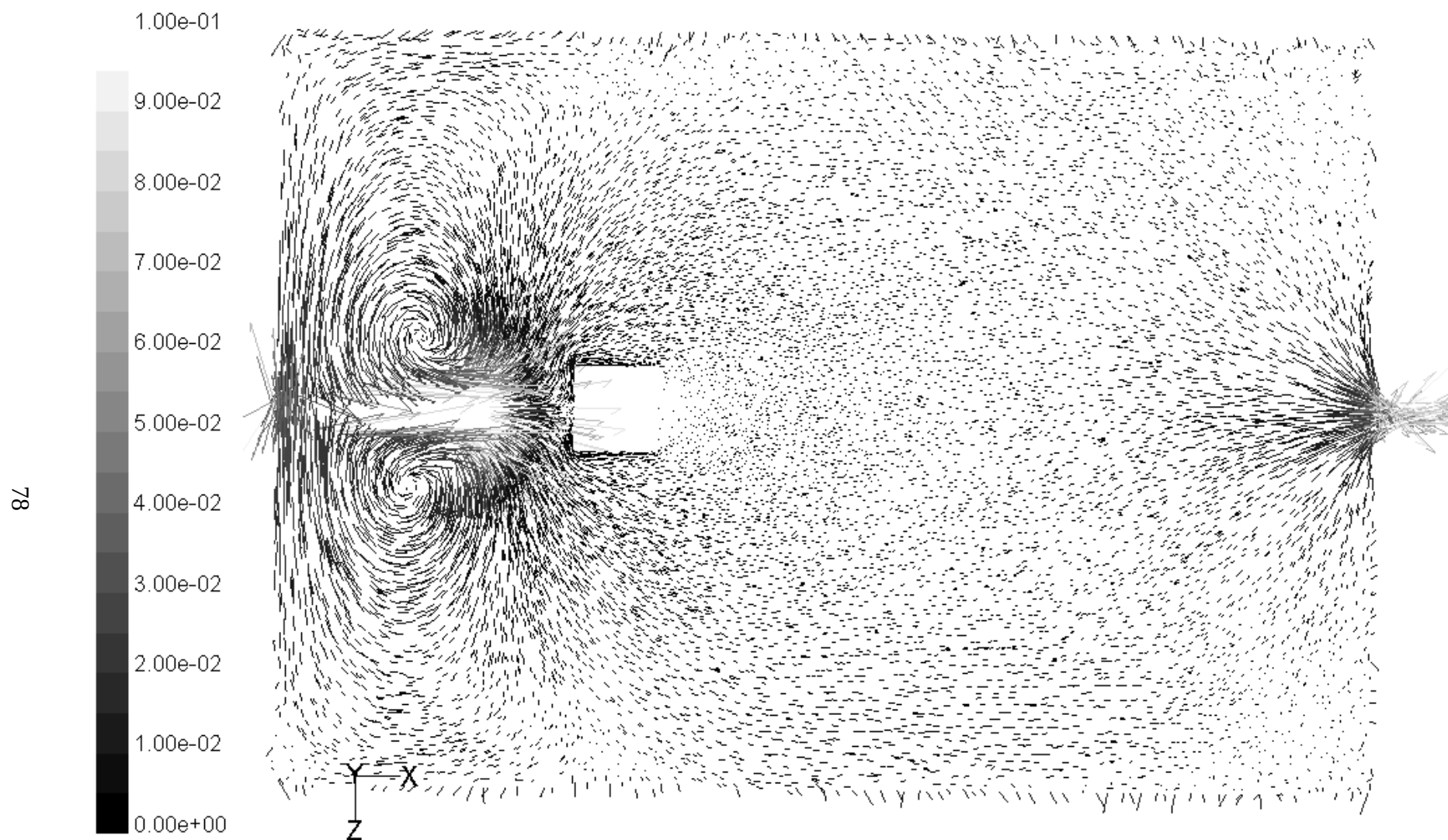


Fig. 1

Strömmönster för Hinder5, 3 m från inloppet med standard $k-\varepsilon$ med RNG, flödet 20 l/s, 15 cm under vattenytan.

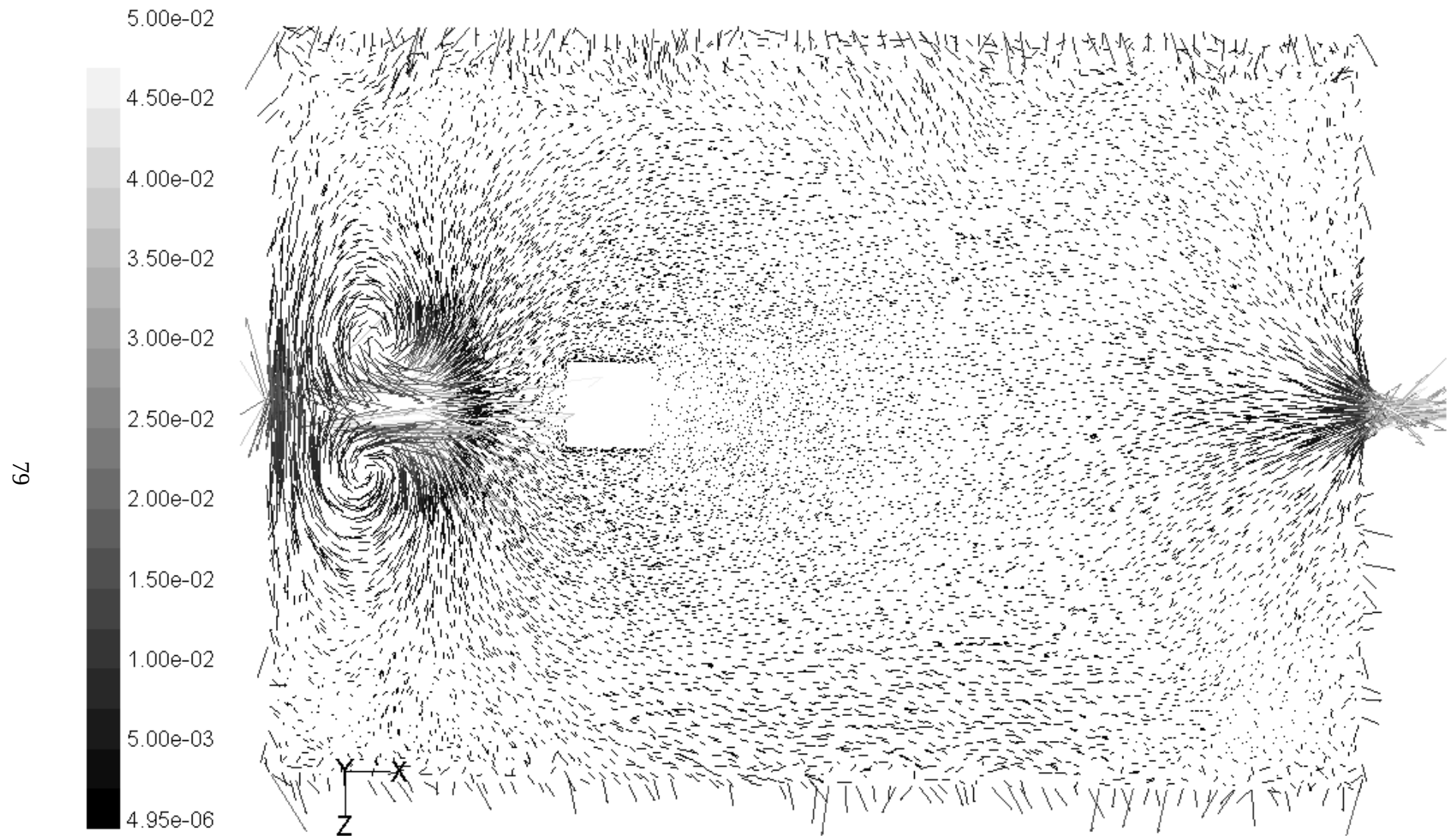


Fig. 2

Strömmönster för Hinder5, 3 m från inloppet med standard $k-\varepsilon$ med RNG, flödet 8 l/s, 15 cm under vattenytan.

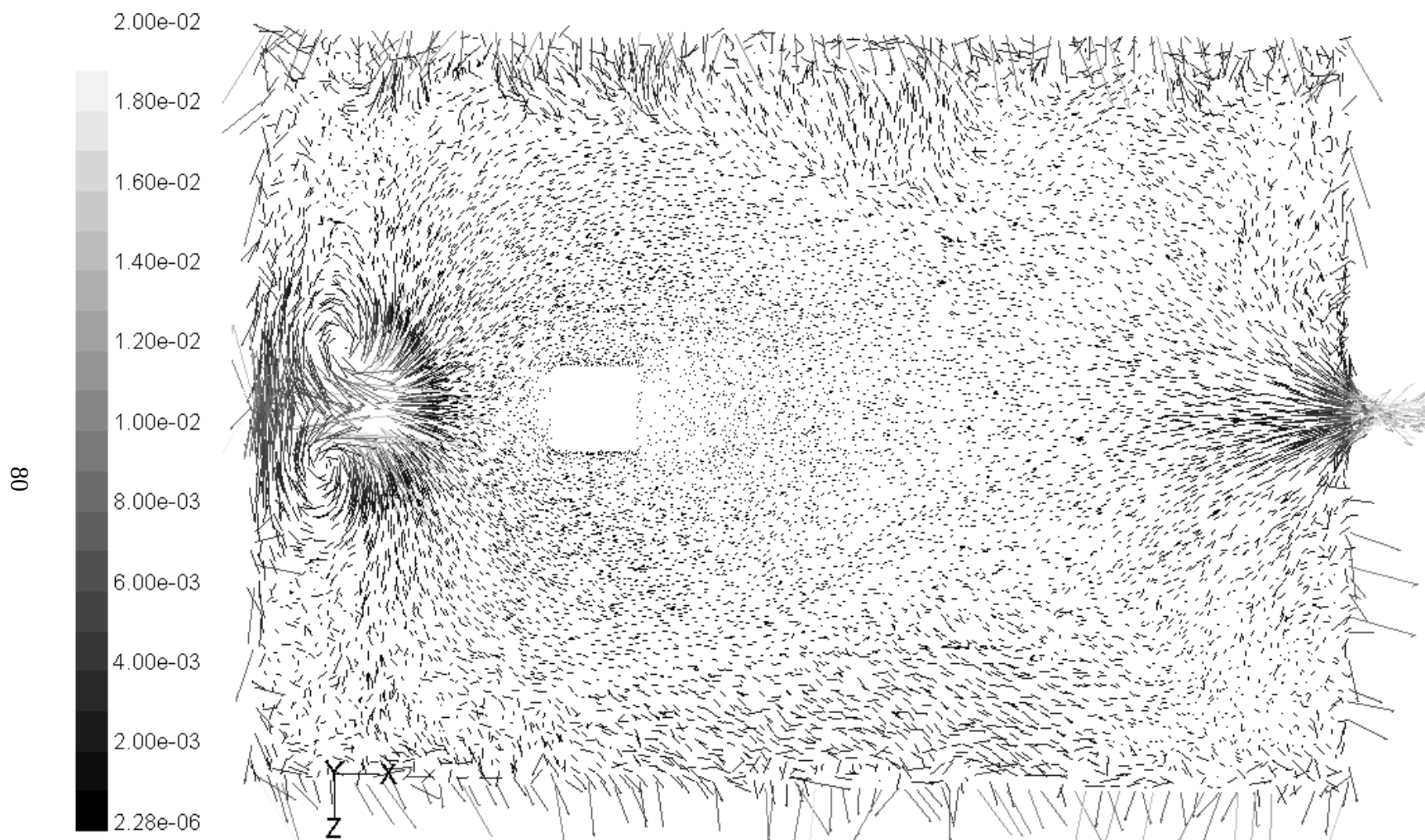


Fig. 3 Strömmönster för Hinder5, 3 m från inloppet med standard $k-\varepsilon$ med RNG, flödet 4 l/s, 15 cm under vattenytan.