

CFD-simuleringer med plasserte hindringer i utløpet til Brokke kraftstasjon for reduksjon av gassovermetning i Otra

SOLVEIG SKARPENES FJELLBAKK OG ELINE MOLAUG

VEILEDER

Joao Leal

Sammendrag

Gassovermetning dannes når luft løses opp i vann under et trykk høyere enn det atmosfæriske trykket og kan oppstå dersom luft blir dratt med inn i inntakssystemet til et vannkraftverk. Nedstrøms Brokke kraftstasjon er det rapportert gassovermetningsmålinger på opp til 176%. Det er påvist at en gassovermetning over 110% kan føre til fiskedød, og det vurderes derfor å utføre tiltak for å redusere gassovermetningen i Otra.

I denne studien blir ulike tiltak for reduksjon av gassovermetning i utløpet til Brokke kraftstasjon undersøkt ved å benytte CFD-simuleringer i Ansys og modellering i Matlab. Studien baseres på at økt turbulensdannelse vil føre til reduksjon av gassovermetning. Gassovermetningsdata fra målestasjoner nedstrøms Brokke blir benyttet for bestemmelse av utgassingskonstanten, og virkningen av en installert deflektor blir i denne studien vurdert.

Ansys Fluent blir benyttet for 2D- og 3D-simuleringer for bestemmelse av den mest effektive hindringsutformingen for reduksjon av gassovermetning i utløpet. Ved å undersøke ulike hindringsformer kom det frem at en hindring med en vinkel på 120° mot strømningsretningen var den som skapte høyest gjennomsnittlig turbulent kinetisk energi (TKE) innenfor et gitt område. Ulike avstander mellom hindringer ble videre undersøkt, og modellering av gjennomsnittlig TKE viste at hindringer plassert tett førte til høyest turbulensdannelse.

Resultatene ga høyest gjennomsnittlig TKE for tre hindringer plassert på en linje i utløpets bredde. Gassovermetningsreduksjonen for dette forsøket ble modellert for ulike β_2 -verdier. For $\beta_2=15$ ble gassovermetningen redusert fra 170% til 154% over de siste 20 meterne av utløpet, og for $\beta_2=1,5$ ble gassovermetningen redusert fra 170% til 168% over den samme strekningen. Parameteren β_2 må kalibreres for utløpet på Brokke før den endelige gassovermetningsreduksjonen ved innsatte hindringer kan fastslås. Videre tiltak for plassering av ytterligere hindringer, og undersøkelser rundt oppdemming i utløpet ved innsetting av tette hindringer, bør vurderes.

Abstract

If air is drawn into the intake system of a power plant, super saturated gas may develop. Super saturated gas can occur if air is dissolved in water under a pressure higher than the atmospheric pressure. Downstream Brokke power plant measurements of super saturated gas values up to 176% have been reported. It has been shown that super saturated gas over 110% can lead to fish death, and measures should be considered to reduce the total dissolved gas in Otra.

In this study, various measures for reducing super saturated gas in the outlet of Brokke power station are investigated by using CFD-simulations in Ansys and modeling in Matlab. The method of the study assumes that increased turbulence will lead to a reduction of super saturated gas. Super saturated gas data from measuring stations downstream Brokke power plant were used to determine the gas constant, and the effect of an installed deflector is evaluated.

Ansys Fluent was used for 2D- and 3D-simulations to determine the most effective obstacle design for reduction of super saturated gas in the outlet. By investigating various obstacle designs, it was found that an obstacle with an angle of 120 ° against the flow direction led to the highest average turbulence kinetic energy (TKE) within a given area. Various distances between obstacles were further investigated, and modeling of the average TKE showed that obstacles placed close to each other led to the highest turbulence.

The simulation results which gave the highest average TKE was three obstacles placed on a line over the outlet width. The super saturated gas reduction for this experiment was modeled with various β_2 -values. For $\beta_2=15$, the super saturated gas was reduced from 170% to 154% over the last 20 meters of the outlet, and for $\beta_2=1.5$, the super saturated gas was reduced from 170% to 168% over the same area. The parameter β_2 should be calibrated to fit the outlet at Brokke before a super saturated gas reduction for the outlet can be modeled. Further measures for insertion of additional obstacles, and investigations of damming in the outlet when placing obstacles close together, should be considered.

Individual/group Mandatory Declaration

The individual student or group of students is responsible for the use of legal tools, guidelines for using these and rules on source usage. The statement will make the students aware of their responsibilities and the consequences of cheating. Missing statement does not release students from their responsibility.

1.	I/We hereby declare that my/our report is my/our own work and that I/We have not used any other sources or have received any other help than mentioned in the report.	<input checked="" type="checkbox"/>
2.	I/we further declare that this report: <ul style="list-style-type: none">- has not been used for another exam at another department/university/university college in Norway or abroad;- does not refer to the work of others without it being stated;- does not refer to own previous work without it being stated;- have all the references given in the literature list;- is not a copy, duplicate or copy of another's work or manuscript.	<input checked="" type="checkbox"/>
3.	I/we am/are aware that violation of the above is regarded as cheating and may result in cancellation of exams and exclusion from universities and colleges in Norway, see Universitets- og høyskoleloven §§4-7 og 4-8 og Forskrift om eksamen §§ 31.	<input checked="" type="checkbox"/>
4.	I/we am/are aware that all submitted reports may be checked for plagiarism.	<input checked="" type="checkbox"/>
5.	I/we am/are aware that the University of Agder will deal with all cases where there is suspicion of cheating according to the university's guidelines for dealing with cases of cheating.	<input checked="" type="checkbox"/>
6.	I/we have incorporated the rules and guidelines in the use of sources and references on the library's web pages.	<input checked="" type="checkbox"/>

Publishing Agreement

Authorization for electronic publishing of the report.

Author(s) have copyrights of the report. This means, among other things, the exclusive right to make the work available to the general public (Åndsverkloven. §2).

All theses that fulfill the criteria will be registered and published in Brage Aura and on UiA's web pages with author's approval.

Reports that are not public or are confidential will not be published.

I hereby give the University of Agder a free right to

make the task available for electronic publishing:

JA NEI

Is the report confidential?

JA NEI

(confidential agreement must be completed and signed by the Head of the Department)

- If yes:

Can the report be published when the confidentiality period is over?

JA NEI

Is the task except for public disclosure?

JA NEI

(contains confidential information. see Offl. §13/Fvl. §13)



Fastsatt av Dekan ved UiA Fakultet for teknologi og realfag 30.01.2018.

STANDARDAVTALE

om utføring av masteroppgave/bacheloroppgave/prosjektoppgave (oppgave) i samarbeid med bedrift/ekstern virksomhet (bedrift).

Avtalen er ufravikelig for studentoppgaver ved UiA Institutt for Ingeniørvitenskap som utføres i samarbeid med bedrift.

Partene har ansvar for å klarere eventuelle immaterielle rettigheter som tredjeperson (som ikke er part i avtalen) kan ha til prosjektbakgrunn før bruk i forbindelse med utførelse av oppgaven.

Avtale mellom

Student: Elise Molau født: 27.01.94

Veileder(e) ved UiA: Joac Leal

Bedrift/ekstern virksomhet: Otra Kraft DA

og
UiA v/instituttleder

om bruk og utnyttelse av resultater fra masteroppgave/prosjektoppgave.

1. Utførelse av oppgave

Studenten skal utføre

Bacheloroppgave	<input type="checkbox"/>
Masteroppgave	<input checked="" type="checkbox"/>
Prosjektoppgave	<input type="checkbox"/>

(sett kryss)

i samarbeid med

Otra Kraft DA

bedrift/ekstern virksomhet

01.01.19 - 01.07.19

startdato – sluttdato

Oppgavens tittel er:

"Reduksjon av gassovermetning nedstrøms Brokke kraftstasjon"

Ansvarlig veileder ved UiA har det overordnede faglige ansvaret for utforming og godkjenning av prosjektbeskrivelse og studentens læring.

2. Bedriftens plikter

Bedriften skal stille med en kontaktperson som skal gi studenten nødvendig tilretteleggelse av arbeidet ved virksomheten og kan om mulig bidra i veiledning i samarbeid med veileder ved UiA. Bedriftens kontaktperson er:

Bernt Blindheim

Formålet med oppgaven er studentarbeid. Oppgaven utføres som ledd i studiet, og studenten skal ikke motta lønn eller lignende godtgjørelse fra bedriften. Bedriften skal dekke følgende utgifter knyttet til utførelse av oppgaven:

Bedriften stiller kontorplass til disposisjon for studentene mens arbeidet pågår, og vil dekke kostnadene for studentenes deltakelse på produksjonsteknisk konferanse (PTK) 4. til 6. mars 2019.

3. Partenes rettigheter

a) Studenten

Studenten har opphavsrett til oppgaven. Alle immaterielle rettigheter til resultater av oppgaven skapt av studenten alene gjennom oppgavearbeidet, eies av studenten med de reservasjoner som følger av punktene b) og c) nedenfor.

Studenten har rett til å inngå egen avtale med UiA om publisering av sin oppgave i UiA sine institusjonelle arkiv på internett. Studenten har også rett til å publisere oppgaven eller deler av den i andre sammenhenger dersom det ikke i denne avtalen er avtalt begrensninger i adgangen til å publisere, jfr punkt 4.

b) Bedriften

Der oppgaven bygger på, eller videreutvikler materiale og/eller metoder (prosjektbakgrunn) som eies av bedriften, eies prosjektbakgrunnen fortsatt av bedriften. Eventuell utnyttelse av videreutviklingen, som inkluderer prosjektbakgrunnen, forutsetter at det inngås egen avtale om dette mellom student og bedrift.

Bedriften skal ha rett til å benytte resultatene av oppgaven i egen virksomhet dersom utnyttelsen faller innenfor bedriftens virksomhetsområde. Dette skal fortolkes i samsvar med begrepets innhold i Arbeidstakeroppfinningsloven¹ § 4. Retten er ikke-eksklusiv.

Bruk av resultatet av oppgaven utenfor bedriften sitt virksomhetsområde, jfr. avsnittet ovenfor, forutsetter at det inngås egen avtale mellom studenten og bedriften. Avtale mellom bedrift og

¹ Lov av 17. april 1970 om retten til oppfinnelser som er gjort av arbeidstakere
<http://www.lovdata.no/all/hl-19700417-021.html>

student om rettigheter til oppgaveresultater som er skapt av studenten, skal inngås skriftlig og er ikke gyldig inngått før UiA (ved instituttleder) har mottatt skriftlig gjenpart av avtalen.

Dersom verdien av bruken av resultatene av oppgaven er betydelig, dvs. overstiger NOK 100.000, se fotnote ², er studenten berettiget til et rimelig vederlag.

Arbeidstakeroppfinnelsesloven § 7 gis anvendelse på vederlagsberegningen. Denne vederlagsretten gjelder også for ikke-patenterbare resultater. Fristbestemmelsene i § 7 gis tilsvarende anvendelse.

c) UiA

De innleverte eksemplarer/filer av oppgaven med vedlegg, som er nødvendig for sensur og arkivering ved UiA, tilhører UiA. UiA får en vederlagsfri bruksrett til resultatene av oppgaven, inkludert vedlegg til denne, og kan benytte dette til undervisnings- og forskningsformål med de eventuelle begrensninger som fremgår i punkt 4.

4. Utsatt offentliggjøring

Hovedregelen er at studentoppgaver skal være offentlige. I særlige tilfeller kan partene bli enig om at hele eller deler av oppgaven skal være undergitt utsatt offentliggjøring i maksimalt 5 år, dvs. ikke tilgjengelig for andre enn student og bedrift i denne perioden.

Oppgaven skal være undergitt utsatt offentliggjøring i

ett år	<input type="checkbox"/>
to år	<input type="checkbox"/>
tre år	<input type="checkbox"/>
fem år	<input type="checkbox"/>

(sett kryss bak antall år hvis dette punktet er aktuelt)

Behovet for utsatt offentliggjøring er begrunnet ut fra følgende:

De delene av oppgaven som ikke er undergitt utsatt offentliggjøring, kan publiseres i UiA sine institusjonelle arkiv, jfr punkt 3 a), andre avsnitt.

Selv om oppgaven er undergitt utsatt offentliggjøring, skal bedriften akseptere at studenten kan benytte hele eller deler av oppgaven i forbindelse med eventuelle jobbsøknader, samt videreføring i et eventuelt doktorgradsarbeid.

5. Generelt

Denne avtalen skal ha gyldighet foran andre avtaler som er eller blir opprettet mellom to av partene som er nevnt ovenfor. Dersom student og bedrift skal inngå avtale om konfidensialitet

² innskattede inntekter etter at utgifter til ervervsmessig utnyttelse er trukket fra, herunder kostnader forbundet med rettighetssikring og kommersialisering.

G. G.

om det som studenten får kjennskap til i bedriften, skal UiA sin standardmal for konfidensialitetsavtale benyttes. Eventuell avtale om dette skal vedlegges denne avtalen.


Eventuell uenighet som følge av denne avtalen skal søkes løst ved forhandlinger. Hvis dette ikke fører frem, er partene enige om at tvisten avgjøres ved voldgift i henhold til norsk lov. Tvisten avgjøres av sorenskriveren ved Agder tingrett eller den han/hun oppnevner.

Denne avtale er underskrevet i 4 - fire - eksemplarer hvor partene skal ha hvert sitt eksemplar. Avtalen er gyldig når den er godkjent og underskrevet av UiA v/instituttleder.

Kristiansand 05.02.19 Eline Molau
Sted, dato student

GRIMSTAD, 06.02.19 Yuri Leal (JOAO LEAL)
Sted, dato veileder ved UiA

1-3-2019 Geir Gramo
Sted, dato instituttleder, UiA institutt



Rysstad 13.02.19, 
Sted, dato for bedriften/institusjonen stempel og signatur





Fastsatt av Dekan ved UiA Fakultet for teknologi og realfag 30.01.2018.

STANDARDAVTALE

om utføring av masteroppgave/bacheloroppgave/prosjektoppgave (oppgave) i samarbeid med bedrift/ekstern virksomhet (bedrift).

Avtalen er ufravikelig for studentoppgaver ved UiA Institutt for Ingeniørvitenskap som utføres i samarbeid med bedrift.

Partene har ansvar for å klarere eventuelle immaterielle rettigheter som tredjeperson (som ikke er part i avtalen) kan ha til prosjektbakgrunn før bruk i forbindelse med utførelse av oppgaven.

Avtale mellom

Student: Olveeg Skarvenes Fjellbakk født: 22.06.92

Veileder(e) ved UiA: Jean Leal

Bedrift/ekstern virksomhet: Otra Kraft DA

og

UiA v/instituttleder

om bruk og utnyttelse av resultater fra masteroppgave/prosjektoppgave.

1. Utførelse av oppgave

Studenten skal utføre

Bacheloroppgave	<input type="checkbox"/>
Masteroppgave	<input checked="" type="checkbox"/>
Prosjektoppgave	<input type="checkbox"/>

(sett kryss)

i samarbeid med

Otra Kraft DA

bedrift/ekstern virksomhet

01.01.19 - 01.07.19

startdato – sluttdato

Oppgavens tittel er:

Reduksjon av gassovermetning nedstrøms Brokke kraftstasjon

Ansvarlig veileder ved UiA har det overordnede faglige ansvaret for utforming og godkjenning av prosjektbeskrivelse og studentens læring.

2. Bedriftens plikter

Bedriften skal stille med en kontaktperson som skal gi studenten nødvendig tilretteleggelse av arbeidet ved virksomheten og kan om mulig bidra i veiledning i samarbeid med veileder ved UiA. Bedriftens kontaktperson er:

Bernt Blindheim

Formålet med oppgaven er studentarbeid. Oppgaven utføres som ledd i studiet, og studenten skal ikke motta lønn eller lignende godtgjørelse fra bedriften. Bedriften skal dekke følgende utgifter knyttet til utførelse av oppgaven:

Bedriften stiller kontorplass til disposisjon for studentene mens arbeidet pågår, og vil dekke kostnadene for studentenes deltakelse på produksjonsteknisk konferanse (PTK) 4. til 6. mars 2019.

3. Partenes rettigheter

a) Studenten

Studenten har opphavsrett til oppgaven. Alle immaterielle rettigheter til resultater av oppgaven skapt av studenten alene gjennom oppgavearbeidet, eies av studenten med de reservasjoner som følger av punktene b) og c) nedenfor.

Studenten har rett til å inngå egen avtale med UiA om publisering av sin oppgave i UiA sine institusjonelle arkiv på internett. Studenten har også rett til å publisere oppgaven eller deler av den i andre sammenhenger dersom det ikke i denne avtalen er avtalt begrensninger i adgangen til å publisere, jfr punkt 4.

b) Bedriften

Der oppgaven bygger på, eller videreutvikler materiale og/eller metoder (prosjektbakgrunn) som eies av bedriften, eies prosjektbakgrunnen fortsatt av bedriften. Eventuell utnyttelse av videreutviklingen, som inkluderer prosjektbakgrunnen, forutsetter at det inngås egen avtale om dette mellom student og bedrift.

Bedriften skal ha rett til å benytte resultatene av oppgaven i egen virksomhet dersom utnyttelsen faller innenfor bedriftens virksomhetsområde. Dette skal fortolkes i samsvar med begrepetts innhold i Arbeidstakeroppfinnelsesloven¹ § 4. Retten er ikke-eksklusiv.

Bruk av resultatet av oppgaven utenfor bedriften sitt virksomhetsområde, jfr. avsnittet ovenfor, forutsetter at det inngås egen avtale mellom studenten og bedriften. Avtale mellom bedrift og

¹ Lov av 17. april 1970 om retten til oppfinnelser som er gjort av arbeidstakere
<http://www.lovdata.no/all/hl-19700417-021.html>

B.G.

student om rettigheter til oppgaveresultater som er skapt av studenten, skal inngås skriftlig og er ikke gyldig inngått før UiA (ved instituttleder) har mottatt skriftlig gjenpart av avtalen.

Dersom verdien av bruken av resultatene av oppgaven er betydelig, dvs. overstiger NOK 100.000, se fotnote ², er studenten berettiget til et rimelig vederlag. Arbeidstakeroppfinnelsesloven § 7 gis anvendelse på vederlagsberegningen. Denne vederlagsretten gjelder også for ikke-patenterbare resultater. Fristbestemmelsene i § 7 gis tilsvarende anvendelse.

c) UiA

De innleverte eksemplarer/filer av oppgaven med vedlegg, som er nødvendig for sensur og arkivering ved UiA, tilhører UiA. UiA får en vederlagsfri bruksrett til resultatene av oppgaven, inkludert vedlegg til denne, og kan benytte dette til undervisnings- og forskningsformål med de eventuelle begrensninger som fremgår i punkt 4.

4. Utsatt offentliggjøring

Hovedregelen er at studentoppgaver skal være offentlige. I særlige tilfeller kan partene bli enig om at hele eller deler av oppgaven skal være undergitt utsatt offentliggjøring i maksimalt 5 år, dvs. ikke tilgjengelig for andre enn student og bedrift i denne perioden.

Oppgaven skal være undergitt utsatt offentliggjøring i

ett år	<input type="checkbox"/>
to år	<input type="checkbox"/>
tre år	<input type="checkbox"/>
fem år	<input type="checkbox"/>

(sett kryss bak antall år hvis dette punktet er aktuelt)

Behovet for utsatt offentliggjøring er begrunnet ut fra følgende:

De delene av oppgaven som ikke er undergitt utsatt offentliggjøring, kan publiseres i UiA sine institusjonelle arkiv, jfr punkt 3 a), andre avsnitt.

Selv om oppgaven er undergitt utsatt offentliggjøring, skal bedriften akseptere at studenten kan benytte hele eller deler av oppgaven i forbindelse med eventuelle jobbsøknader, samt videreføring i et eventuelt doktorgradsarbeid.

5. Generelt

Denne avtalen skal ha gyldighet foran andre avtaler som er eller blir opprettet mellom to av partene som er nevnt ovenfor. Dersom student og bedrift skal inngå avtale om konfidensialitet

² innskattede inntekter etter at utgifter til ervervsmessig utnyttelse er trukket fra, herunder kostnader forbundet med rettighetssikring og kommersialisering.

om det som studenten får kjennskap til i bedriften, skal UiA sin standardmal for konfidensialitetsavtale benyttes. Eventuell avtale om dette skal vedlegges denne avtalen.

Eventuell uenighet som følge av denne avtalen skal søkes løst ved forhandlinger. Hvis dette ikke fører frem, er partene enige om at tvisten avgjøres ved voldgift i henhold til norsk lov. Tvisten avgjøres av sorenskriveren ved Agder tingrett eller den han/hun oppnevner.

Denne avtale er underskrevet i 4 - fire - eksemplarer hvor partene skal ha hvert sitt eksemplar. Avtalen er gyldig når den er godkjent og underskrevet av UiA v/instituttleder.

Kristiansand 05.02.19 Sølveig S Tjellbakk
Sted, dato student

GAIA-STAD, 06.02.19 Jørn Lø (JORN LØAL)
Sted, dato veileder ved UiA

 UNIVERSITETET I AGDER
Institutt for ingeniørvitenskap

18 FEB 2019 Geir Grønmo
Sted, dato instituttleder, UiA institutt

Rysstad 13.02.19  
Sted, dato for bedriften/institusjonen stempel og signatur

Forord

Denne studien utgjør masteroppgaven vår innen fornybar energi ved Universitetet i Agder. Gjennom studien har vi fått anledning til å samarbeide med Agder Energi AS og Otra Kraft DA for å undersøke den aktuelle problemstillingen om gassovermetning i Otra. Etter ønske fra oppdragsgiverne ble rapporten skrevet på norsk. Vi ønsker å takke Agder Energi og Otra Kraft for å ha gitt oss muligheten til å arbeide med denne problemstillingen, og for oppholdet på Produksjonsteknisk konferanse i Oslo. Vi retter en spesiell takk til vår kontaktperson i Agder Energi, Bernt Blindheim, som har vært behjelpelig gjennom hele studien. Videre ønsker vi også å takke Åsulv Haugetveit fra Otra Kraft som har vist stor interesse for prosjektet. UniResearch Miljø har gitt oss innblikk i relevante rapporter og tilgang på nødvendige måledata, og vi vil da rette en spesiell takk til Ulrich Pulg og Espen Olsen Espedal.

Studien har hatt stort fokus på modellering og simulering av turbulens, og i den sammenheng har simuleringsprogrammet Ansys blitt benyttet. Johan Olav Brakestad har sørget for tilgang på lisens i Ansys og tilgang til superserveren Thor, noe som har gitt oss mulighet til å utføre studien med ønsket metode. Studien har vært utfordrende og lærerik, da vi ikke hadde erfaringer fra Ansys annet enn fra forskningsprosjektet gjennomført høsten 2018.

Vi har jobbet som et team gjennom hele studien, men med separate fokusområder. Eline har utført simuleringer i Ansys, mens Solveig har arbeidet videre med analysering av simuleringsresultatene i Matlab. Det er viktig å påpeke at lisensen i Ansys ble delt med tre doktorgradsstudenter, noe som førte til at lisensen kun var tilgjengelig hver fjerde dag. Sist, men ikke minst, ønsker vi å takke veilederen vår fra Universitetet i Agder, Joao Leal, for all hjelp og støtte gjennom semesteret.

Universitetet i Agder, Grimstad, 23.05.19

Solveig Skarpenes Fjellbakk

Solveig Skarpenes Fjellbakk

Eline Molaug

Eline Molaug

Innhold

Sammendrag	i
Abstract	iii
Forord	xvii
Figurer	xxiii
Tabeller	xxv
Symbolliste	xxvii
Begrepsliste	xxix
1 Introduksjon	1
1.1 Tidligere arbeid	1
1.1.1 Gassovermetning ved Tafjord kraftverk	2
1.1.2 Gassovermetning nedstrøms Brokke kraftstasjon	2
1.1.3 Beregning av gassovermetning	6
1.1.4 Gassovermetningsboblenes egenskaper	7
1.1.5 Resultater fra forskningsrapport	7
1.2 Problemstilling	9
1.3 Begrensninger	9
1.4 Rapportens oppbygging	10
2 Teori - Turbulens	11
2.1 Laminær og turbulent strømning	11
2.2 Turbulensintensitet og turbulent kinetisk energi	13
3 Teori - CFD	15
3.1 Simulering og modellering av turbulens	15
3.1.1 Reynolds Averaged Navier Stokes	16
3.1.2 Eddy-viskositetsmodeller	16
4 Metode	19
4.1 Utløp Brokke kraftstasjon	19
4.2 Analyse av måledata og modellering i Matlab	22

4.3	Ansys Fluid Flow	27
4.4	Ansys Fluent og Matlab	29
4.4.1	Steg 1 - Oppsett i Fluent	31
4.4.2	Steg 2 - Testsimuleringer i 3D	35
4.4.3	Steg 3 - Hindringsutforming i 2D	35
4.4.4	Steg 3 - Modellering	38
4.4.5	Steg 4 - Hindringer på ulik linje i 2D	39
4.4.6	Steg 4 - Modellering	40
4.4.7	Steg 5 - Hindringer på linje i 2D	41
4.4.8	Steg 5 - Modellering	42
4.4.9	Steg 6 - Avsluttende simuleringer i 3D	43
4.4.10	Steg 6 - Modellering	44
4.5	Modellert reduksjon av gassovermetning	44
5	Resultat og diskusjon	47
5.1	Utløp Brokke kraftstasjon	47
5.2	Analyse av måledata og modellering i Matlab	47
5.3	Ansys Fluid Flow	49
5.4	Ansys Fluent og Matlab	51
5.4.1	Steg 1 - Oppsett i Fluent	51
5.4.2	Steg 2 - Testsimuleringer i 3D	53
5.4.3	Steg 3 - Optimal hindringsvinkel i 2D	56
5.4.4	Steg 3 - Modellering	57
5.4.5	Steg 4 - Hindringer på ulik linje i 2D	60
5.4.6	Steg 4 - Modellering	61
5.4.7	Steg 5 - Hindringer på linje i 2D	63
5.4.8	Steg 5 - Modellering	64
5.4.9	Steg 6 - Avsluttende simuleringer i 3D	65
5.4.10	Steg 6 - Modellering	66
5.5	Modellert reduksjon av gassovermetning	69
6	Feilkilder	75
7	Konklusjon	77
8	Videre arbeid	79
9	Referanser	81

A	Vedlegg - Korrelasjon gassovermetning og vannføring bekkeløp	85
B	Vedlegg - Plantegninger utløp Brokke	87
C	Vedlegg - Informasjon om måledata	89
D	Vedlegg - Matlabskript - Analyser	91
E	Vedlegg - Gassovermetningsgrafer	93
F	Vedlegg - Matlabskript - Utgassingskonstant	95
G	Vedlegg - Matlabskript - TKE	97
H	Vedlegg - Plantegninger steg 1	99
I	Vedlegg - Plantegninger steg 2	101
J	Vedlegg - Matlabskript - Steg 3,4 og 5	103
K	Vedlegg - Plantegninger steg 6	105
L	Vedlegg - Matlabskript - Steg 6	107
M	Vedlegg - Matlabskript - Modellert reduksjon av gassovermetning	109
N	Vedlegg - Utredning av partiell differensialligning	115
O	Vedlegg - Simuleringsresultater steg 2	117
P	Vedlegg - Simuleringsresultater steg 3	121
Q	Vedlegg - Simuleringsresultater steg 4	127
R	Vedlegg - Simuleringsresultater steg 5	133
S	Vedlegg - Simuleringsresultater steg 6	135
T	Vedlegg - Modellert gassovermetningsverdi	137

Figurer

1.1	<i>Frisk halefinne, A, og gassbobler i halefinne, B.</i>	3
1.2	<i>Korrelasjon mellom gassovermetning og vannføring i Farå</i>	3
1.3	<i>Deflektor installert ved dam Tjurrmoen i 2018</i>	4
1.4	<i>Simulert turbulensintensitet for to ulike hindringer</i>	8
2.1	<i>Øyeblikkelig hastighetsbilde for laminært og turbulent grensesjikt</i>	12
4.1	<i>Oversikt over utløpets plassering</i>	20
4.2	<i>Plantegning for utløpet til Brokke kraftstasjon</i>	20
4.3	<i>Foto tatt fra midtsøyle opp mot utløpstunnel (venstre) og ned mot Otra (høyre)</i>	21
4.4	<i>Oppdeling av utløpskanalen for simuleringer</i>	22
4.5	<i>Oversikt over målestasjonenes plassering i Otra</i>	23
4.6	<i>Gassovermetningen målt i utløp Brokke, ovenfor- og nedenfor dam Tjurrmoen i 2015 og 2018</i>	24
4.7	<i>Gassovermetningen i utløpet og nedstrøms Brokke, målt i 2015</i>	25
4.8	<i>Utgassingskonstanten mellom målestasjonene ved utløp Brokke og overfor Tjurrmoen</i>	26
4.9	<i>Utforming av hindringen benyttet i forskningsrapporten sett ovenfra, med strømningsretning mot høyre</i>	27
4.10	<i>Maksimal TKE for de ulike simulerte vinklene</i>	29
4.11	<i>Flytskjema for fremgangsmåte i metode</i>	30
4.12	<i>Masketetthet del 2</i>	32
4.13	<i>Utsnitt av maskenettet i del 3</i>	32
4.14	<i>Simuleringsmodell for forsøk 2.1 og 2.2</i>	35
4.15	<i>Maskenett med standardinnstillinger og maskenett med manuelle innstillinger</i>	36
4.16	<i>Bestemt sorteringsmetode for innhenting av verdiene til maskenettets noder</i>	38
4.17	<i>Plassering av origo for simuleringsmodellene i steg 4</i>	40
4.18	<i>Hindringer plassert på linje i del 3 av utløpet</i>	42
4.19	<i>Plassering av hindringer for forsøk 6.2 og forsøk 6.3</i>	43
5.1	<i>Konvergent forsøk(øverst) og ikke konvergent forsøk(nederst) i Fluid Flow</i>	50
5.2	<i>Plan over TKE ved terskel og plan over TKE ved hopp i steg 2</i>	53
5.3	<i>Simuleringsresultater for forsøk 2.2a og 2.2b</i>	54
5.4	<i>Hastighet og TKE på et plan i xy-planet i steg 2</i>	55
5.5	<i>Dannelse av TKE i forsøk 3.4a</i>	56

5.6	<i>Den beste (120°) og dårligste (150°) hindringsvinkelen for gjennomsnittlig TKE i steg 3</i>	58
5.7	<i>TKE for forsøk 3.4a og for forsøk 4.11 i steg 4</i>	61
5.8	<i>Kontur av TKE for forsøk 5.2 og forsøk 5.4</i>	64
5.9	<i>Volumfraksjon av fasene og TKE vist som kontur i xy-plan for forsøk 6.2</i>	66
5.10	<i>Kontur av TKE i xy-plan, xz-plan og yz-plan for forsøk 6.1</i>	67
5.11	<i>Kontur av TKE i xy-plan, xz-plan og yz-plan for forsøk 6.2</i>	68
5.12	<i>Kontur av TKE i xy-plan, xz-plan og yz-plan for forsøk 6.3</i>	69
5.13	<i>Modellert gassovermetning ved ulik β_2 for forsøk 6.2.1</i>	71
5.14	<i>Kontur av TKE ved gjennomsnittlig dybde i xz-planet for forsøk 6.2</i>	73
7.1	<i>Hindringsplasseringen som ga høyest gjennomsnittlig TKE</i>	77
8.1	<i>Plassering av en skillevegg for å forlenge utløpskanalen</i>	80
B.1	<i>Plantegninger av profiler i utløpet</i>	87
B.2	<i>Plantegninger av snitt E-E og F-F i utløpet</i>	87
E.1	<i>Gassovermetningen målt i utløp Brokke, ovenfor- og nedenfor Tjurrmoen demning i 2015</i>	93
E.2	<i>Gassovermetningen målt i utløp Brokke, ovenfor- og nedenfor Tjurrmoen demning i 2018</i>	94

Tabeller

3.1	<i>Fordeler og ulemper ved de ulike Eddy-viskositetsmodellene</i>	17
4.1	<i>Vinkler simulert i steg 3</i>	37
4.2	<i>Andre hindringer simulert i steg 3</i>	37
4.3	<i>Intervall på x- og y-aksen i steg 3</i>	38
4.4	<i>Gjennomsnittlig TKE for den mest optimale vinkelen</i>	39
4.5	<i>Gjennomsnittlig TKE for forsøk 3.4b</i>	39
4.6	<i>Kombinasjonshindringer simulert i 2D</i>	40
4.7	<i>Intervall på x- og y-aksen for hindring plassert til venstre i steg 4</i>	41
4.8	<i>Intervall på x- og y-aksen for hindring plassert til høyre i steg 4</i>	41
4.9	<i>Gjennomsnittsverdien av TKE for de beste forsøkene i steg 4</i>	41
4.10	<i>Plassering av hindringer på samme linje i steg 5</i>	42
4.11	<i>Intervall på x- og y-aksen for forsøk i steg 5</i>	43
4.12	<i>Gjennomsnittlig TKE for de to beste forsøkene i steg 5</i>	43
4.13	<i>Intervall på x-, y- og z-aksen i steg 6</i>	44
4.14	<i>Konstante parametre for utregning av gassovermetningsreduksjonen</i>	45
5.1	<i>Gjennomsnittsverdier for TKE, hastighet i x-retning og samlet hastighet for området for de ulike vinklene i steg 3</i>	58
5.2	<i>Gjennomsnittsverdier for TKE, hastighet i x-retning og samlet hastighet for området for forsøk 3.1b-3.4b</i>	60
5.3	<i>Gjennomsnittsverdier for TKE, hastighet i x-retning og samlet hastighet for området for plassering på venstre side i steg 4</i>	62
5.4	<i>Gjennomsnittsverdier for TKE, hastighet i x-retning og samlet hastighet for området for plassering på høyre side i steg 4</i>	62
5.5	<i>Gjennomsnittsverdier for TKE, hastighet i x-retning og samlet hastighet for området i steg 5</i>	64
5.6	<i>Gjennomsnittsverdier for de avsluttende simuleringene for TKE, hastighet i x-retning, samlet hastighet og skjærspenning i steg 6</i>	66
5.7	<i>Reduksjon av gassovermetning i del 3 av utløpet for forsøk 6.2 ved ulike gassovermetnings- og β_2-verdier</i>	70
C.1	<i>Informasjon om måledata fra UniResearch Miljø 2015</i>	89
C.2	<i>Informasjon om måledata fra UniResearch Miljø 2018</i>	89

Symbolliste

Symbol	Beskrivelse
θ	Vinkel
β_2	Overføringskoeffisient for frispeil
ε	Turbulent dissipasjonsrate
ν	Molekylær kinematisk viskositet for gass i vann
C	Gassovermetningskonsentrasjon
C_{sat}	Likevektskonsentrasjon for gassovermetning ved frispeil
C_μ	Gassovermetningens turbulente viskositetskoeffisient
D_m	Molekylær diffusivitet for vann
$D_{m,luft}$	Molekylær diffusivitet for gass i vann
D_t	Turbulent dispersjonskoeffisient
G_{km}	Gassovermetningsverdien subtrahert med 100% i målestasjonen nedstrøms
G_o	Gassovermetningsverdien subtrahert med 100% ved første målestasjon
I	Turbulensintensitet
J	Overføringsfluksen til gassovermetningen over et grensesnitt
K	Utgassingskonstant
k	Turbulent kinetisk energi
ΔL	Distansen mellom målestasjonene
q_c	Gassovermetningsdannelse
S_t	Turbulent Schmidttall
T	Tidsintervall mye lenger enn noen turbulens-tidsskala, men mye kortere enn tidsskalaen for gjennomsnittlig strømnings-ustabilitet
t	Tidsintervall
u	Strømningshastighet
\bar{u}	Gjennomsnittlig strømningshastighet
u'	Tilfeldig varierende hastighet
u'_i	Tilfeldige hastighetssvingninger
u_{rms}	Standardavviket for settet av tilfeldige hastighetssvingninger
\vec{V}	Hastighet
wss	Wall shear stress - skjærspenning fra Ansys

Begrepsliste

Begrep	Betydning
3D-overflate	Isosurface, 3D-modell av ønsket parameter
CFD	Computational Fluid Dynamics
Flomløp	Spillway
Frispeilstrømning	Open channel flow, strømninger med overflate mot luft
Eddy	Virvelstrømninger
Hindring	Konstruksjon som er designet for å skape turbulens
Intervallgrense	Grensene for arealet/volumet
k-epsilon	Turbulensmodell som tilbyr god beregning i strømninger borte fra vegger
k-omega	Turbulensmodell som tilbyr god beregning i strømninger i nærheten av vegger
Kontur	Contour, plan med fargespekter av verdispennet til en ønsket parameter
Ndf	Nedenfor
Nedstrøms	Nedstrøms utløpet til Brokke kraftstasjon
Oppstrøms	Oppstrøms utløpet til Brokke kraftstasjon
Reynoldsspenning	Reynold stress
SST	Shear Stress Transport - Turbulensmodell kombinert av k-epsilon og k-omega
TKE	Turbulent kinetisk energi
Turbulenstopp	Områder i konturen med høye turbulensverdier
Utlufting	Gassovermetning reduseres ved at luftbobler treffer vannoverflaten
Utløpet	Utløpet til Brokke kraftstasjon
Uttak	Den simulerte modellens utløp

1 Introduksjon

Gassovermetning kan oppstå i vannkraftverk, og da spesielt i kraftverk med francisturbiner som utnytter stor fallhøyde, og er et kjent problem innen vannkraftbransjen. Gjennom flere år har det blitt observert fiskedød i Otra som et resultat av høye gassovermetningsverdier. Gassovermetningen i elva oppstår i Brokke kraftverk i Setesdal ved at luft trekkes inn i kraftverkets inntakssjakter og blandes med vann under trykk høyere enn det atmosfæriske trykket [1].

Brokke kraftstasjon har en fallhøyde på 303 meter, og benytter fire francisturbiner for kraftproduksjon. I gjennomsnitt produserer kraftstasjonen 1500 GWh årlig. Vann fra hovedreservoaret Botsvatn og 14 ulike bekkeløp blir anvendt for kraftproduksjonen [2]. Målinger utført nedstrøms kraftstasjonen viser periodevise gassovermetningsmålinger på opp til 176%, der 100% er den naturlige verdien. Canadian Council of Ministers of the Environment har satt en anbefalt grense for gassovermetning på 110%, da verdier høyere enn dette i de fleste tilfeller vil føre til fiskedød [3]. Dverglaksen Byglandsbleka, som holder til i Otra, har nasjonal vernestatus, og som et resultat av gassovermetningen nedstrøms Brokke kraftstasjon blir fisken forhindret i å etablere seg i området. Miljømyndighetene har satt krav om at bleka skal kunne vandre til Hallandsfossen oppstrøms Brokke kraftstasjon innen 2022 [4], men på grunn av de høye gassovermetningsverdiene fra kraftstasjonen vil ikke dette være mulig. Mulige tiltak for å redusere gassovermetningen er derfor under vurdering.

1.1 Tidligere arbeid

Gjennom forskningsrapporten *Brokke kraftstasjon - Turbulensanalyse for reduisering av gassovermetning* [5], ble det fremlagt en detaljert beskrivelse av gassovermetningsproblematikken nedstrøms Brokke kraftstasjon. I denne rapporten vil introduksjonen inneholde et sammendrag av den aktuelle problematikken. Det vil også presenteres ny og tidligere forskning på metoder for å fjerne gassovermetning, blant annet ved hjelp av en deflektor.

1.1.1 Gassovermetning ved Tafjord kraftverk

Problemstillingen rundt gassovermetning har vært kjent i lang tid. I 1978 ble det registrert fiskedød i et oppdrettsanlegg plassert nedstrøms Tafjord kraftverk. Det ble i 1980 utført målinger som viste en gassovermetning på opptil 146% i utløpet, og for å kunne undersøke hvordan gassovermetningen spredte seg i fjorden ble oppdrettsanlegget flyttet fra Tafjord i 1981. Overmettet vann ble påvist opptil 10 km fra utløpet, og det ble undersøkt hvilke tiltak som kunne gjøres for å redusere problemet [6].

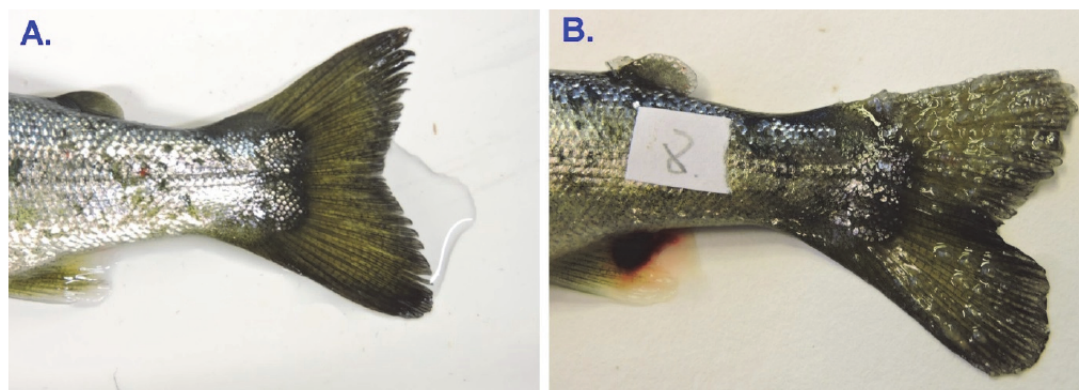
Høsten 1983 ble det gjennomført en utvidelse av inntaket og installert en luftesjakt for å bedre forholdene rundt utblåsning av luft, men det ble antatt at dette ikke ville ha stor betydning for gassovermetningen. Tiltakene som ble vurdert for å hindre gassovermetningen var en lang, frispeil skråtunnel og et nivåregulert inntaksbasseng. Skråtunnelen ble ansett som det mest praktisk gjennomførbare tiltaket, men dette ble ikke vurdert videre på grunn av høye kostnader [6].

På utløpssiden ble det vurdert en ombygging av avløpstunnelen og et avluftingsanlegg etter utløpstunnelen. Målinger viste at en frispeil avløpstunnel ville gi en betydelig redusert gassovermetning, men at det ikke var garantert å gi lave nok verdier til å ha oppdrettsanlegg i fjorden. For tiltak i fjorden ble det også skissert tre alternativer. Disse var utslipp på dypt vann for å blande utslippet med sjøvann, innblanding i sjøvann ved bruk av boblegardin, og boblegardin eller skjørt for oppumping av saltvann ved oppdrettsanlegget. Ingen av disse alternativene ble vurdert videre. Ved avslutning av rapporten var det ingen tiltak som med sikkerhet og innenfor kostnadsrammen kunne redusere gassovermetningen i utløpet i Tafjord [6].

1.1.2 Gassovermetning nedstrøms Brokke kraftstasjon

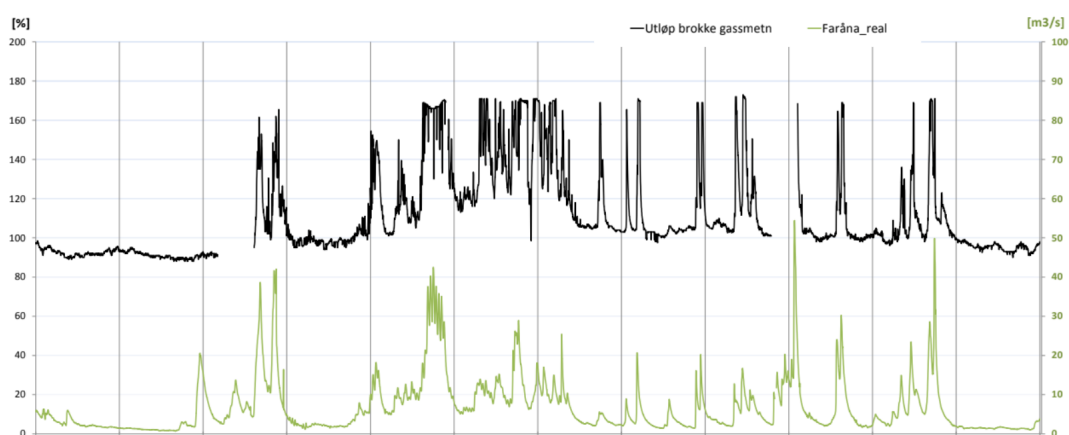
UniReseach Miljø har studert Otra nedstrøms Brokke kraftstasjon gjennom flere år, og arbeidet viser at gassovermetningen er kritisk over lengre perioder i området. Fra 2013-2015 var gassovermetningen over 110% i mer enn 45% av tiden. Verdier over 103% kan føre til dykkersyke hos fisken og er heller ikke anbefalt [3]. Dykkersyke oppstår ved at overmettet vann trekkes inn gjennom fiskens gjeller og videre inn i fiskens kroppsvev. Ved høy gassovermetning over lengre tid vil bobler i kroppsvevet oppstå, spesielt i områdene

rundt finner, øyne, munn, organer og blodkar. Gassovertmetningsverdier over 120% vil føre til død før bobledannelse oppstår [7]. Figur 1.1 gir et inntrykk av hvordan fisk blir påvirket av høye verdier av gassovertmetning, der gassboblene er fremtredende i halefinnen hos en fisk utsatt for gassovertmetning.



Figur 1.1: *Frisk halefinne, A, og gassbobler i halefinne, B. Foto: Trond Einar Isaksen [8]*

I vårløsningen er vannhastigheten høy med store vannmengder i bekkeløpsinntakene, og dette fører til at luft blir dratt inn i innløpstunnelene. I disse periodene vil det ofte være høye gassovertmetningsverdier, og målinger gjennomført av UniResearch Miljø har vist en klar korrelasjon mellom vannføring i bestemte bekkeløpsinntak og gassovertmetningen [1]. I figur 1.2 vises korrelasjonen mellom gassovertmetning og vannføringen i bekkeløpsinntaket Farå i 2012. Større versjon av figur 1.2 er gitt i vedlegg A.



Figur 1.2: *Korrelasjon mellom gassovertmetning og vannføring i Farå [1]*

Målestasjoner plassert i elva viser at gassovermetningsverdier over 110% har blitt observert opp til 21 km nedstrøms utløpet [7]. For å redusere gassovermetningens utbredelse ble det installert en deflektor ved dam Tjurrmoen, 11 km nedstrøms Brokke kraftstasjon. Deflektoren er designet for å luften vannet, og dermed føre til reduksjon av gassovermetning. Figur 1.3 viser deflektorens design med og uten vannføring. Målinger tatt av gassovermetningen nedstrøms og oppstrøms deflektoren påviste 63% reduksjon av gassovermetningsverdiene den første måneden i drift [8].



Figur 1.3: Deflektor installert ved dam Tjurrmoen i 2018. Foto: Sebastian Stranzl [8]

Det har blitt gjennomført ulike forsøk for å fastslå påvirkningsgraden av gassovermetningen i økosystemet nedstrøms Brokke kraftstasjon. Bunndyrsprøver ble tatt i juni 2014 og i september 2015, hvor det i begge tilfeller var en klar reduksjon av bunndyr nedstrøms utløpet [7]. Høsten 2012 ble det utført elfiske, hvor resultatene bekreftet at det var en svært lav fisketetthet i området nedstrøms utløpet, og først etter 4 km, i Rysstadbassenget, kunne tettheten sammenlignes med fisketettheten oppstrøms utløpet [1]. Dette kan forklares ved at Rysstadbassenget er dypere enn elva. Vanndybden er en viktig faktor for fiskens evne til å takle gassovermetning, da det antas at gassovermetningsnivået reduseres med 10% for hver dybdemeter [9]. UniResearch Miljø har lagt frem ulike tiltak for

reduksjon av gassovermetning nedstrøms Brokke kraftstasjon. Et av tiltakene som kunne utføres for å redusere problemet, at luft blir dratt inn i inntakstunnelene fra bekkeløpsinntakene, var å snevre inn inntakene eller å plassere vakuuminntak i inntaksjaktene i bekkeløpsinntakene [8], men dette er dyrt og omfattende arbeid. Tiltak nedstrøms utløpet ble derfor også undersøkt.

Gjennom et utbredt studie av gassovermetningsområdet har UniResearch Miljø undersøkt korrelasjonen mellom temperatur, vannføring, elvemorfologi, vanngeometri og hydraulikk med raten av utgassing. Ved bruk av formel 1.1, kan utgassingskonstanten, K , bli beregnet ved hjelp av endringene i gassovermetningsverdier mellom to målepunkter over en gitt distanse:

$$G_{km} = G_0 e^{-K\Delta L} \quad (1.1)$$

hvor G_{km} er gassovermetningsverdien over metningspunktet (100%) i den andre målestasjonen, G_0 er gassovermetningsverdien over metningspunktet i den første målestasjonen, og ΔL er distansen mellom målepunktene målt i km. For hver nye gassovermetningsverdi ble nye beregninger gjennomført. Resultatene ble videre brukt til å analysere hvilke faktorer i elva som korrelerte best med K -verdien, og resultatene viste at faktoren som hadde høyest korrelasjon var skjærspenning. Vannhastighet og turbulens var også signifikante faktorer [10].

UniResearch Miljø undersøkte også utlegging av stein eller konstruksjon av en diagonal terskel som tiltak for reduksjon av gassovermetning nedstrøms elva. Ved hjelp av korrelasjonen mellom skjærspenning og K -verdi ble ulike scenarier for økt reduksjon av gassovermetning nedstrøms Brokke fremlagt. Ulike tiltak ble analysert, der en maksimal verdi på 176% og en gjennomsnittlig maksimalverdi på 153% gassovermetning ble vurdert. Målet var å oppnå en gassovermetning på maksimum 110% nedstrøms utløp Hekni [10]. Resultatene fra analysen viste at et scenario med en diagonal terskel med en høyde på 1 meter og bredde på 300 meter plassert en kilometer nedstrøms Brokke, kombinert med utlegging av stein i et område på 1,6 kilometer, ville redusere gassovermetningen fra 153% ved utløp Brokke til 107,9% nedstrøms utløp Hekni. Dersom gassovermetningen var 173% ved Brokke ville nivået reduseres til 110,8% nedstrøms utløp Hekni. Med standardavvik tatt i betraktning må gassovermetningen være under 104,6% for å være 95 % sikker på å ikke overskride 110%. De gitte resultatene vil ikke kunne garantere gassovermetning under anbefalt nivå dersom tiltakene ble utført [10].

1.1.3 Beregning av gassovermetning

Gassovermetning kan oppstå nedstrøms flomløp, da luft blir dratt med ned i bassenget og fanget av virvlingene i nedslagsområdet. I rapporten *Modeling total dissolved gas production and transport downstream of spillway: Three-dimensional development and applications* [11] benyttes empiri for å skape en numerisk modell for prediksjon av gassovermetning etter et flomløp. Modellen tar hensyn til konveksjon-diffusjonstransportligningen gitt i formel 1.2 for å beregne gassovermetningskonsentrasjonen i bassenget nedstrøms flomløpet. Hastighetsprofilen ved overmettet vann er tilnærmet lik hastighetsprofilen ved mettet vann, og det blir derfor antatt at de hydrodynamiske strømmingene ikke vil bli påvirket av gassboblene i transportligningen.

$$\nabla \bullet (\vec{V}C) = \nabla \bullet [(D_m + D_t)\nabla C] + q_c \quad (1.2)$$

C er gassovermetningskonsentrasjonen, D_m er den molekylære diffusiviteten, q_c er gassovermetningsdannelsen og D_t er gassovermetningens turbulente dispersjonskoeffisient som kan beregnes ved ligning 1.3 [11]:

$$D_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon S_t} = \frac{\mu}{\rho S_t} \quad (1.3)$$

hvor C_μ er gassovermetningens turbulente viskositetskoeffisient, k er den turbulente kinetiske energien, ε er den turbulente dissipasjonsraten, μ er den turbulente viskositeten og ρ er tettheten. S_t er det turbulente Schmidttallet som antas å være lik 1 [11].

Siste ledd i ligning 1.2 representerer bobledannelsen som oppstår i flomløpet. For å finne utgassingene kan leddet erstattes med ligning 1.4:

$$J = \beta_2 \cdot \left(\frac{\nu}{D_m} \right)^{-0,5} \cdot (\varepsilon\nu)^{0,25} \cdot (C - C_{sat}) \quad (1.4)$$

hvor J er overføringsfluksen til gassovermetningen over et grensesnitt, β_2 er gassovermetningens overføringskoeffisient for frispilstrømning og ν er molekylær kinematisk viskositet for gass i vann. Den numeriske modellen fremstilt i rapporten gir realistiske resultater for flere ulike lokasjoner, men det kreves kalibrering før modellen kan benyttes [11].

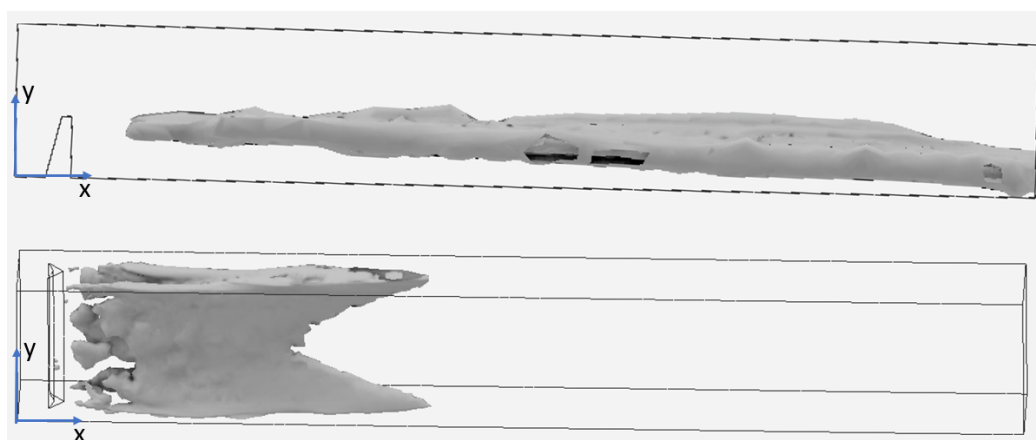
1.1.4 Gassovermetningsboblenes egenskaper

I rapporten *A multidimensional two phase flow model for the total dissolved gas downstream spillways* [12] blir sammenhengen mellom boblestørrelse og volumfraksjon i bunnen av et flomløp undersøkt. Studien benytter to-dimensjonal simulering med to faser. Resultater ble gitt for tre ulike tilfeller. Det første tilfellet viste andel volumfraksjon i tilfeller hvor små gassovermetningsbobler med en radius på 0,11 mm var simulert. Studien viste at små bobler i hovedsak oppstår i de dypeste områdene etter flomløpet, og løses fort opp. Det andre tilfellet viste gassovermetningsbobler av medium størrelse med en radius på 0,18 mm. Bobler av denne størrelsen fanges i virvlingene skapt av flomløpet og presses ned mot bunnen av bassenget. Boblene vil ha en lav hastighet og bruker lang tid på å løses opp. Det siste tilfellet viste bobler med en radius på 1,56 mm, og disse er store nok til at de vil trekkes mot overflaten og oppløses relativt hurtig. Med bakgrunn i studien er det vist at bobler med en radius på rundt 0,18 mm vil bruke lengst tid på å løses opp og vil derfor skape en høyere gassvolumfraksjon [12]. Nedstrøms Brokke kraftstasjon er det ikke utført målinger på boblestørrelsen, men observasjoner gjort av forskere fra UniResearch Miljø gir en anslått boblestørrelse mye mindre enn 1 mm. Størrelsen på boblene reduseres med dybden på vannet. UniResearch Miljø har utført undersøkelser for gassovermetningens kjemiske innhold, der en gassovermetningsboble består av 31,6% oksygen og 68,4% nitrogen [1].

1.1.5 Resultater fra forskningsrapport

Gjennom forskningsrapporten *Brokke kraftstasjon - Turbulensanalyse for reduisering av gassovermetning* [5] ble flere ulike hindringer konstruert i simuleringsprogrammet Ansys Fluid Flow for observasjon av turbulensdannelse. For å redusere gassovermetningen ble det plassert hindringer for turbulensgenerering i utløpet til Brokke. I forskningsrapporten ble det ikke konkludert med noen konkrete tiltak da resultatene ikke ga gjennomsnittlige turbulensverdier, men kun viste maksimumsverdier. Turbulensdannelsens omfangsområde og styrke kunne likevel brukes som indikatorer på hvilke hindringer som ville gi de beste resultatene. To av hindringenes 3D-overflater av turbulensintensitet fra analysen er vist i figur 1.4, hvor det øverste tilfellet viser en hindring som strekker seg over hele modellens bredde. Denne hindringen ga best resultater for turbulensdannelse over et stort omfangsområde. Det nederste tilfellet viser en høy hindring med vinkling motstrøms

vannets retning. Her ble det dannet turbulens over et mindre omfangsområde, men med kraftigere intensitet enn i tilfellet over.



Figur 1.4: *Simulert turbulensintensitet for to ulike hindringer [5]*

1.2 Problemstilling

I denne studien er det ønskelig å observere turbulensdannelsen i utløpet til Brokke kraftstasjon ved å benytte en CFD-analyse. I samarbeid med Otra Kraft og Agder Energi, og med bakgrunn i rapporten *Brokke kraftstasjon -Turbulensanalyse for reduisering av gassovermetning* er følgende problemstilling satt:

Kan hindringer plasseres i utløpet for å redusere gassovermetningsverdiene fra Brokke kraftstasjon?

Basert på problemstillingen ble følgende forskningsspørsmål satt:

- Hvilke hindringer vil føre til størst turbulensdannelse?
- Hvordan bør hindringer plasseres i forhold til hverandre for å skape høyest turbulensdannelse?
- I hvor stor grad er det mulig å redusere gassovermetningen ved plassering av hindringer i utløpet?

Problemstillingen og forskningsspørsmålene danner grunnlaget for studiens metodikk. Ved bruk av CFD-simuleringer vil turbulenskarakteristikken for ulike hindringer bli evaluert. Resultatene fra de ulike simuleringene vil bli benyttet for utforming av et endelig forslag for tiltak i utløpet til Brokke kraftstasjon.

1.3 Begrensninger

Fokusområdet for simuleringene i denne studien er begrenset til de 150 meterne utløpskanalen består av, og simuleringer i andre deler av elva vil ikke bli gjennomført. Metodikken for oppgaven tar utgangspunkt i at økning i turbulensdannelse fører til reduksjon av gassovermetning. Reduksjon av gassovermetning vil bli beregnet med hensyn på formler utarbeidet fra andre studier på området. Ved å inkludere gasstransport i CFD-simuleringene kunne sammenhengen mellom turbulens og utgassing blitt undersøkt ytterligere, men dette er omfattende arbeid som ikke vil bli undersøkt i denne studien.

1.4 Rapportens oppbygging

Kapittel 1 starter med en presentasjon av gassovermetningsproblemet i Otra. Etter en gjennomgang av tidligere arbeid og studier om gassovermetning blir problemstillingen presentert, etterfulgt av begrensninger og denne rapportens oppbygging. Rapportens teori er inndelt i to kapitler som omhandler turbulens og CFD.

I kapittel 4 blir studiens metode gjennomgått. Metoden er oppdelt i flere delkapitler. Delkapittel 4.4, *Ansys Fluent og Matlab*, er oppdelt i seks ulike steg, hvor fremgangsmåten for CFD-simuleringer og tilhørende modellering av data i Matlab blir beskrevet. Her blir også aktuell teori for valg av innstillinger i Ansys forklart. Kapittel 5 er lagt opp likt som delkapitlene i kapittel 4, og inneholder diskusjon av studiens metodikk og en gjennomgang av resultater. Siste avsnitt i kapittel 5 gir en oppsummering av relevante feilkilder for studien.

Kapittel 6 inneholder rapportens konklusjon og i kapittel 7 blir det fremlagt forslag for videre arbeid. Referanser er gitt i kapittel 8, etterfulgt av vedlegg navngitt alfabetisk.

2 Teori - Turbulens

Turbulens blir beskrevet som tilfeldige og kaotiske bevegelser i et fluid, og det er vanskelig å forutsi turbulensens bevegelsesmønster [13]. I 1937 ble følgende definisjon foreslått av Taylor og von Karman ¹ [14]:

Turbulens er en uregelmessig bevegelse som generelt vises i fluider, gassform eller flytende, når de flyter forbi faste overflater eller selv når nabostrømmer av samme fluid strømmer forbi eller over hverandre.

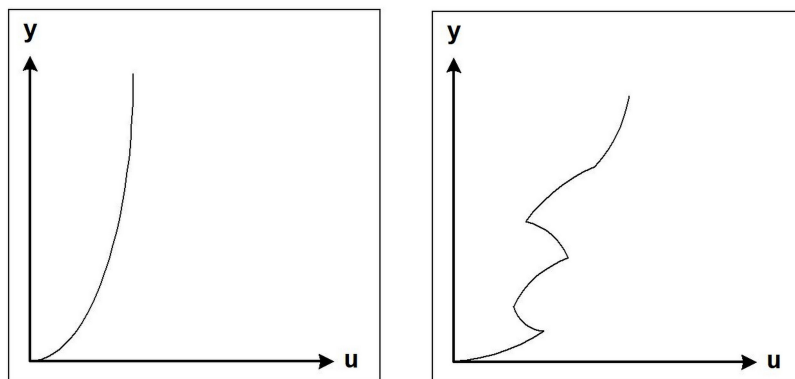
2.1 Laminær og turbulent strømning

I et fluid skilles det mellom laminære og turbulente strømninger. Laminære strømninger kjennetegnes ved at strømningenes partikkelbaner er jevne og glatte, og det oppstår lite blanding av væskepartikler på tvers av strømningslinjene. For turbulente strømninger er strømningenes partikkelbaner uforutsigbare og tilfeldige, og det finnes derfor ingen funksjon som kan fastslå hastighetsforløpet som en funksjon av tiden i disse tilfellene [15]. Det finnes likevel matematiske modeller som beskriver turbulens på bakgrunn av empiri, og strømningshastigheten modelleres som en sum av to komponenter, som vist i ligning 2.1:

$$u = \bar{u} + u' \tag{2.1}$$

der \bar{u} er den gjennomsnittlige strømningshastigheten og u' er en tilfeldig varierende hastighet. Den tilfeldige variasjonen i ligningen fører til at det turbulente grensesjiktet for en øyeblikkelig hastighetsprofil ikke gir en jevn kurve, i motsetning til grensesjiktet for laminære strømninger [15]. Figur 2.1 viser forskjellen i grensesjiktet for laminære og turbulente strømninger i en øyeblikkelig hastighetsprofil, der strømningshastigheten vil endres med hensyn på friksjon.

¹Definisjonen er direkte oversatt fra engelsk



Figur 2.1: Øyeblikkelig hastighetsbilde for laminært og turbulent grensesjikt [15]

Formen på den gjennomsnittlige hastighetsprofilen i et turbulent grensesjikt er etablert ved teori og eksperimenter. Nær bunnen vil hastigheten være lav, med stigende gjennomsnittshastigheter i høyden. Langs overflaten vil vannhastigheten reduseres på grunn av vindens påvirkning [16]. Regionen svært nær bunnen kalles det laminære underlaget, og i denne delen vil turbulensen undertrykkes av viskositeten. Dette gjør at det ikke vil være turbulens ved bunnen, og at det er viskositeten som styrer den vertikale transporten av moment. Over det laminære underlaget er hastighetsprofilen logaritmisk. I denne delen vil turbulensen styre den vertikale transporten, og turbulensnivået vil øke med fri strømningshastighet [17].

Turbulensens strømningsinstabilitet kan oppstå fra strømmingens kontakt med en vegg eller overflate, eller fra kontakten mellom to lag av fluider som beveger seg med ulik hastighet. Dette kalles fri skjærspenning, og som et resultat av denne skjærspenningen oppstår det eddier (virvelstrømninger) kontinuerlig. De store eddiene brytes ned til mindre eddier som til slutt forsvinner. Fordi eddiene kontinuerlig dannes og brytes ned vil det til en hver tid være store variasjoner i eddienes lengdeskala. Jo høyere Reynoldstallet er, desto større vil variasjonene i eddienes lengdeskala være. Stor variasjon i lengdeskalaene vil føre til større utfordringer for å bestemme turbulensen i CFD-simuleringer [18]. Reynoldstallet beskriver strømmingen i en væske eller gass. Tallet er lik forholdet mellom fluidets indre friksjonsarbeid og kinetiske energi, og henger dermed sammen med viskositeten. Ved lavt Reynoldstall vil fluidets strømming være laminær, og ved økende Reynoldstall vil strømmingen være turbulent [19].

2.2 Turbulensintensitet og turbulent kinetisk energi

Det er påvist en sammenheng mellom turbulens og gassovermetning, der en økning i turbulensdannelse vil føre til en raskere reduksjon av gassovermetning [20]. Når vann treffer en hindring vil det oppstå vakefelt bak og ved siden av hindringen, og i disse vakefeltene vil strømmingene være svakere og mer turbulente enn omgivelsesstrømmingene. Dette vil føre til at det generelt er høyest turbulensintensitet ved de laveste vannhastighetene [21, 22].

De turbulente bevegelsene forbundet med eddier er omtrent tilfeldige, og kan karakteriseres ved bruk av statistiske konsepter. I teorien er hastighetsmålingene kontinuerlige og gjennomsnittshastigheten kan beregnes ved integrering, men i praksis er de målte hastighetene en serie av adskilte punkter, u_i [17]. Gjennomsnittshastigheten finnes ved bruk av ligning 2.2:

$$\bar{u} = \int_t^{t+T} u(t) dt = \frac{1}{N} \sum_1^N u_i \quad (2.2)$$

der t er tidsintervall og T er tidsintervall mye lenger enn noen turbulens-tidsskala, men mye kortere enn tidsskalaen for gjennomsnittlig strømningsustabilitet [17]. Ligning 2.3 gir den turbulente svingningen og ligning 2.4 uttrykker turbulensens styrke:

$$u'(t) = u(t) - \bar{u} \quad u'_i = u_i - \bar{u} \quad (2.3)$$

$$u_{rms} = \sqrt{u'(t)^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i)^2} \quad (2.4)$$

der u_{rms} er definert som standardavviket for settet av de tilfeldige hastighetssvingningene, u'_i [17]. Turbulensintensiteten, I , er gitt i ligning 2.5:

$$I = \frac{u_{rms}}{\bar{u}} \quad (2.5)$$

En turbulensintensitet mindre enn 1% blir ansett som lav, og en turbulensintensitet større enn 10% blir ansett som høy [17]. Forholdet mellom turbulensintensiteten og turbulent kinetisk energi, k , vises i ligning 2.6 [23]:

$$k = \frac{3}{2} (\bar{u}I)^2 \quad (2.6)$$

Turbulent kinetisk energi (TKE) er den gjennomsnittlige kinetiske energien per volum fluid i forhold til turbulente strømningseddier. TKE kjennetegnes fysisk av den målte, gjennomsnittlige kvadratiske (rms) hastighetsendringen. Skjærspenning og vaker er eksempler på tilfeller der TKE blir produsert [24].

3 Teori - CFD

Computational Fluid Dynamics (CFD) er et samlebegrep for kraftige analyse- og beregningsverktøy for simulering av fluider. Numeriske metoder, matematiske modeller og programvareverktøy benyttes for å forutsi fluidene kvalitativt. De matematiske modellene kan supplere og i noen tilfeller erstatte de fysiske målingene for å forutsi strømningsforhold, og kan deles inn i to hovedgrupper; prognostiske og diagnostiske modeller. CFD-modellen er den mest brukte modellen innen de prognostiske modellene [25, 26].

Ved å benytte CFD-modeller kan det blant annet simuleres i 3D og for flerfasestrømninger. I simuleringene må fluidets egenskaper bestemmes for å brukes som inngangsdata for kjøring av simuleringene. Eksempler på disse egenskapene er hastighet eller massestrøm, tid, trykk og temperatur [25, 26].

CFD-modellers resultater inneholder feilkilder som kan oppstå blant annet på grunn av antatte inngangsdata, utilstrekkelig matematisk modell og for lav datakraft. Påliteligheten til modellen vil også svekkes ved turbulente strømningsforhold og ved flerfasestrømninger [25].

3.1 Simulering og modellering av turbulens

For å karakterisere turbulensen må enten eddiene løses, eller de må modelleres for å se effekten de har på strømningsforholdene. På tross av kompleksiteten rundt prediksjon av turbulens eksisterer det ulike tilnæringer for turbulenssimulering [13].

Direct Numerical Simulation (DNS) er en syv-ligningsmodell som er laget for å løse opp alle tidsskalaene og lengdene til eddiene. Denne modellen er svært tidkrevende, dyr og beregningsmessig krevende, og er derfor ikke praktisk gjennomførbar i denne studien. I simuleringssmodellen *Large Eddy Simulation* (LES) er de små eddiene nær veggene modellert, og det er kun de store eddiene som løses. LES er billigere enn DNS, men mengden beregningsverktøy som kreves er fortsatt for stor til at modellen kan benyttes for de fleste praktiske anvendelser [18].

3.1.1 Reynolds Averaged Navier Stokes

Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) bruker turbulensmodeller for å modellere alle eddiene. De gjennomsnittlige Navier Stokes-ligningene benyttes for å beregne de tilfeldige bevegelsene og effekten dette gir. Fordi RANS er basert på definisjonen av turbulent viskositet vil det være noen begrensninger, blant annet vil RANS ha begrensninger for strømninger med rotasjoner, strømningskurver, overgangsstrømmer mellom turbulente og laminære strømninger og stagnerende regioner i strømningene. RANS er, til tross for begrensningene, den mest brukte tilnærmingen innen simulering [18].

3.1.2 Eddy-viskositetsmodeller

Ved å benytte de gjennomsnittlige Navier-Stokes-ligningene for strømningene vil det oppstå tilleggspåkjenninger, Reynolds-spenninger, som også må modelleres. Reynolds-spenningene kan modelleres ved hjelp av en eddy-viskositetsmodell. Det finnes ulike typer eddy-viskositetsmodeller, og disse modellene kan brukes både med og uten veggfunksjoner [18]. Eddy-viskositetsmodellene som er nevnt i tabell 3.1 benytter to ligninger for prediksjon av turbulens.

Tabell 3.1: Fordeler og ulemper ved de ulike Eddy-viskositetsmodellene [18]

Modell	Fordeler	Ulemper
<i>k-ϵ standard</i>	Lett å implementere, gir stabile beregninger, gir rimelig prediksjon ved mange strømninger	Ikke egnet for virvlende og roterende strømninger eller for strømninger med sterk separasjon og med aksesymmetriske stråler
<i>k-ϵ realizable</i>	Forbedret modell som gir god prediksjon for plane og runde stråler, negativ trykkgradient, rotasjon og sterk strømningskurve	Dårligere beregningsegenskaper for grenselagsstrømmer enn <i>k-ω</i>
<i>k-ω</i>	Beregner grenselagstrømninger bedre enn <i>k-ϵ</i> , kan integreres til veggen uten å bruke noen dempingsfunksjoner, og gir en robust og nøyaktig prediksjon for et bredt spekter av grenselagstrømmer med trykkgradient	For følsom for den frie strømningsverdien av ω , og grensebetingelser for innløp
<i>k-ω SST</i>	God prediksjon av separasjon og sammenslåing sammenlignet med <i>k-ϵ</i> og <i>k-ω</i> . God ytelse sammenlignet med <i>k-ϵ</i> i simulering av grenselag med ugunstige trykkgradienter. Modellen fjerner noen mangler i den opprinnelige <i>k-ω</i> -modellen og regner kryssdiffusjon ved å slå sammen <i>k-ϵ</i> og <i>k-ω</i>	Trenger begrensninger for å forbedre prediksjon av stagnasjonsregioner i strømningene, har problemer med å forutsi turbulensnivåer og komplekse interne strømninger, og tar ikke hensyn til oppdrift

4 Metode

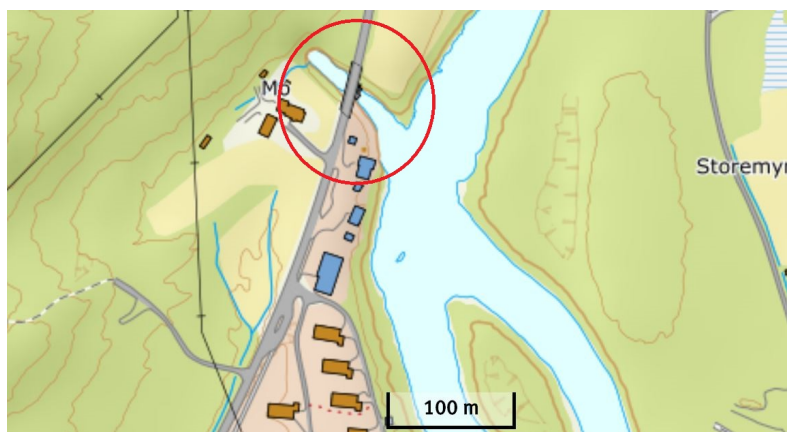
Metodikken for oppgaven utspiller seg gjennom modellering og simulering i programvarene Ansys Discovery Aim 19.2 Fluid Flow, Ansys 19.2 Fluent og Matlab R2017b. Ansys benytter numeriske metoder til å løse simuleringer og tilbyr flere programvarer for industrielle applikasjoner [27]. Fluid Flow ble i denne studien benyttet for simuleringer i 3D med kun en fase, mens Fluent ble brukt dersom flere faser skulle simuleres. Fluid Flow har et enklere oppsett og færre valgalternativer sammenlignet med Fluent som er avansert og tilbyr flere simuleringsmuligheter. Matlab ble benyttet for modellering av resultatdata fra simuleringene.

Gassovermetningsdata innhentet av UniResearch Miljø fra september til november 2015 og fra oktober og ut desember 2018 ble modellert i Matlab for bestemmelse av utgassingskonstanten, K , nedstrøms utløpet. Målet med modelleringen var å benytte resultatene for å gi en prediksjon for hvilke gassovermetningsverdier som vil forekomme nedstrøms Otra ved ulike lokasjoner dersom hindringer blir plassert i utløpet.

Fluid Flow ble i denne studien benyttet for å simulere hindringer med ulike vinkler for å finne det tilfellet som dannet mest turbulens. Forsøkene var basert på resultatene fra forskningsrapporten, der 12 ulike hindringer ble undersøkt og simulert i Fluid Flow. Resultatene fra Fluid Flow var ikke tilfredstillende og Ansys Fluent ble brukt videre for samtlige simuleringer fordelt på seks ulike steg. Måledata fra de aktuelle simuleringsmodellene ble videre kombinert med ligning 1.2 for å finne reduksjonen av gassovermetning over simuleringsområdet.

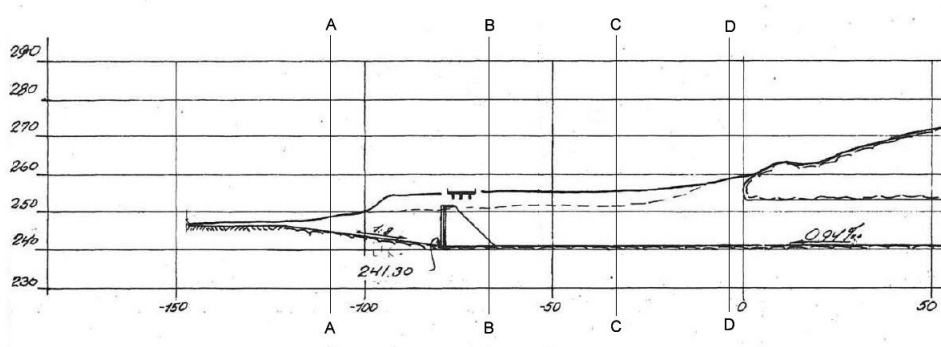
4.1 Utløp Brokke kraftstasjon

Denne studien vil, i likhet med rapporten *Brokke kraftstasjon - Turbulensanalyse for reduisering av gassovermetning* [5], ta utgangspunkt i de 150 meterne fra kraftstasjonens tunnelutløp til utløpets innblanding med den naturlige elva. Utløpets form og beliggenhet er markert med en rød sirkel i figur 4.1.



Figur 4.1: Oversikt over utløpets plassering

For å kunne designe simuleringsmodeller av området var det nødvendig å se på de originale plantegningene fra utbyggingen av kraftstasjonens utløp. Arbeidet med utbyggingen ble utført med hensyn på terrenget, og det kan derfor være avvik mellom plantegningene og det eksisterende utløpet. Plantegningen i figur 4.2 viser snittet av utløpet fra siden. Denne figuren inneholder fire merkede snitt, der plantegningene til snittene kan finnes i vedlegg B. Designet på den dypeste delen av utløpet er 8 meters bunnbredde og 12 meters toppbredde med 11 meter høye vegger. Høyden på veggene i den grunneste delen er 4 meter, der ytterste del av utløpet har en bunnbredde på omtrent 24 meter og en toppbredde på 25 meter. Figur 4.2 viser også midtsøylen som er plassert i utløpet. Denne er 1 meter bred og støtter opp en bro over utløpet. En mer detaljert beskrivelse av utløpet med mål og flere plantegninger kan leses i rapporten *Brokke kraftstasjon - Turbulensanalyse for reduisering av gassovermetning* [5].



Figur 4.2: Plantegning for utløpet til Brokke kraftstasjon [28]

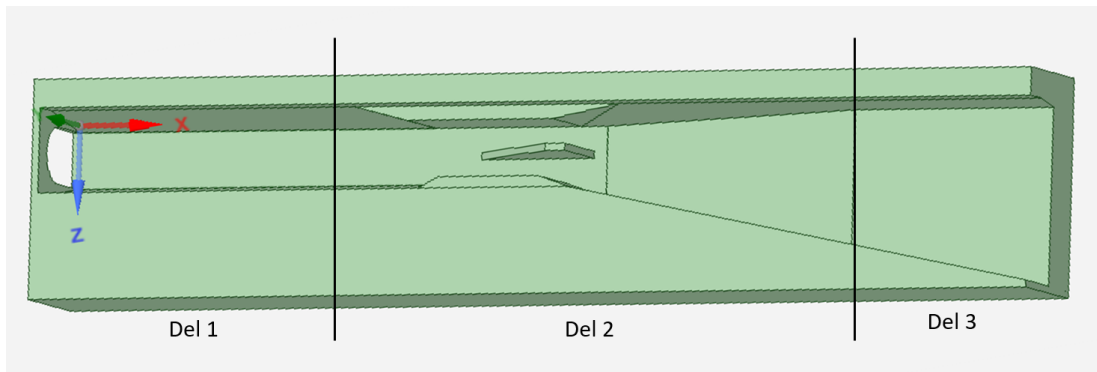
Vanddybde og vannføring vises ikke i plantegningene. Målinger har vist at vanddybden er omtrent 8,5 meter på de dypeste områdene av utløpet, og omtrent 2 meter på de grunneste områdene. Vannføringen varierer mye gjennom året, med en maksimum vannføring på $136 \text{ m}^3/\text{s}$ og en middelvannføringen på omtrent $80 \text{ m}^3/\text{s}$. Vanddybden vil variere ved endringer i vannføringen, men den naturlige elvens vannføring vil også ha innvirkning på utløpets vanddybde. Det er antatt en variasjon i vanddybde på omtrent 0,5 meter.

Det ble gjennomført en ekskursjon til Brokke for å undersøke utløpet. Utløpet fra Brokke renner ut fra tunnelgangen i fjellet, og består i følge plantegningene av omtrent 150 meter med utløpskanal før vannet treffer Otra (se figur 4.3). Uavhengig av vannføringen vil siste del av tunnelgangen ha friskeilstrømning.



Figur 4.3: Foto tatt fra midtsøyle opp mot utløpstunnel (venstre) og ned mot Otra (høyre)

For simulering i Ansys vil en forenklet modell av utløpet bli benyttet. Modellen er designet med hensyn på plantegningene. For å redusere simuleringstiden ble utløpet oppdelt i tre ulike deler som vist i figur 4.4. Del 1 er de første 47 meterne fra tunnelen. Del 2 går fra 47 til 120 meter, og inneholder midtsøylen og utløpets stigning. Del 3 går fra 120 til 150 meter og er det grunneste partiet i utløpet. Den siste delen vil være hovedområdet for de fleste simuleringene i denne studien.



Figur 4.4: *Oppdeling av utløpskanalen for simuleringer*

4.2 Analyse av måledata og modellering i Matlab

Datasett fra UniResearch Miljø ble brukt for å sammenligne måledata fra flere målestasjoner nedstrøms utløpet til Brokke kraftstasjon. Disse målestasjonene og deres avstand fra utløpet er markert i figur 4.5. Ved Tjurrmoen er det plassert to målestasjoner, en overfor demningen og en på undersiden av demningen der minstevannføringen slippes gjennom.



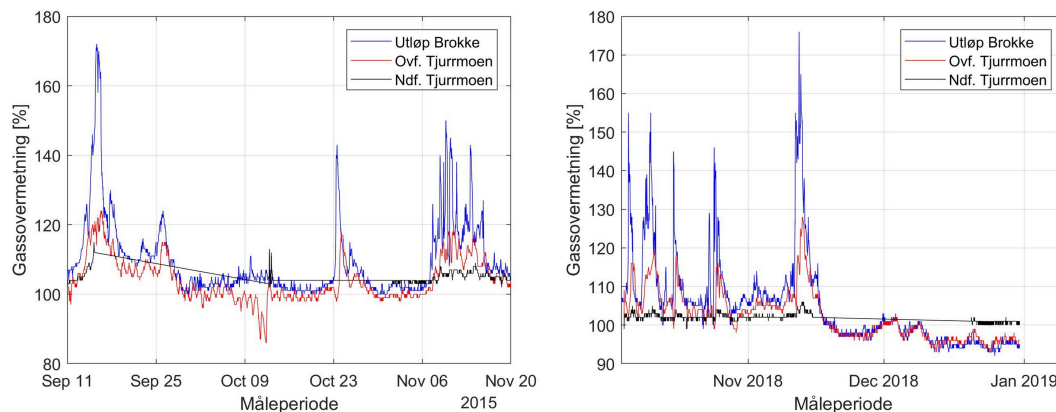
Figur 4.5: Oversikt over målestasjonenes plassering i Otrå

Ett sett med måledata fra september til november 2015, og ett sett fra oktober og ut desember 2018 ble analysert. Datasettene fra 2015 inneholdt målinger fra seks målestasjoner; utløp Brokke kraftstasjon, overfor Tjurrmoen, nedenfor Tjurrmoen, Blekeløpet, utløp Hekni kraftstasjon og Ose bro. Antall utførte målinger for målestasjonene i 2015, datoer for når målingene ble utført, og informasjon om temperatur er gitt i tabell C.1 i vedlegg C. Datasettene fra 2018 inneholdt målinger fra fire av de samme stasjonene; Utløp Brokke kraftstasjon, overfor Tjurrmoen, nedenfor Tjurrmoen og utløp Hekni kraftstasjon. Målingene fra datasettet for 2018 inneholdt resultatene fra deflektoren som er plassert nedenfor Tjurrmoen. Tabell C.2 i vedlegg C oppgir den samme informasjonen for målingene utført i 2018 som i tabellen for 2015.

Målingene i datasettene er i utgangspunktet utført hver halvtime, men her er det mangler i måledataene for flere av stasjonene. For å kunne benytte datasettene til modellering i Matlab var det nødvendig å sortere alle målingene etter dato, og å slette målinger som var oppført dobbelt. Dette ble utført i Excel.

Ved å benytte måledata fra de to datasettene kunne det undersøkes i hvor stor grad gassovermetningsverdien ble forbedret av deflektoren som er montert nedstrøms Tjurrmoen demning. I Matlab ble verdiene fra Excel-arkene hentet inn, og skriptet ble deretter kodet for å få grafer med fremstillinger av metningsverdiene. Kodingen fra Matlab kan finnes i vedlegg D. De manglende målingene presenteres som rette linjer over et større tidsrom i grafene.

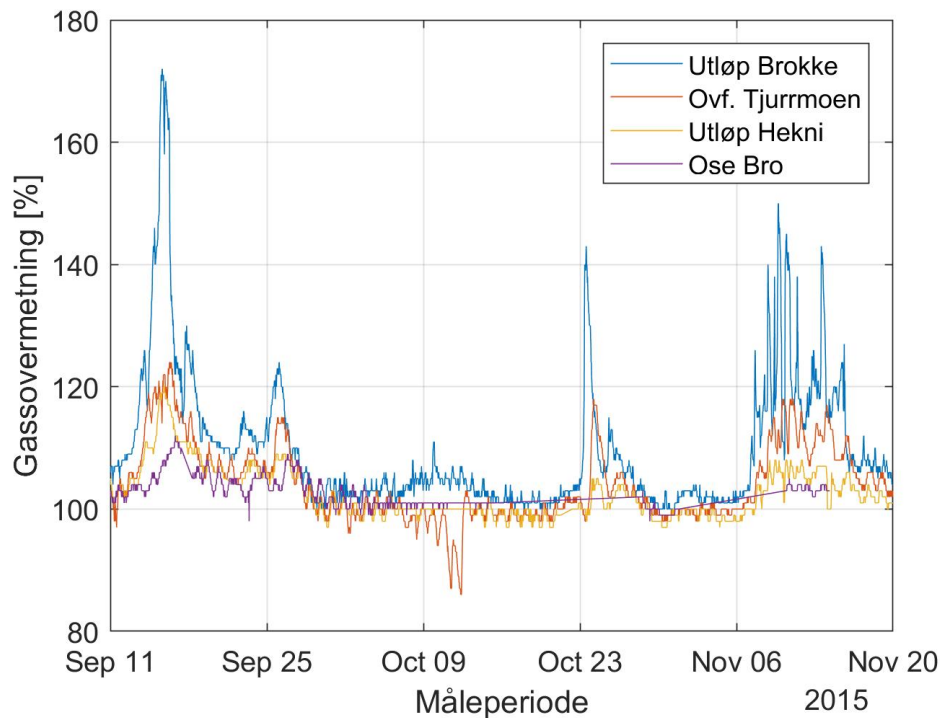
Figur 4.6 fremstiller måledata fra 2015 og 2018. Begge datasettene inneholder perioder med gassovermetningsverdier over 170%, og lengre perioder med lavere gassovermetning. Dette gir et greit sammenligningsgrunnlag på tross av at målingene er utført i ulike tidsrom. Større bilder av grafene i figur 4.6 finnes i vedlegg E.



Figur 4.6: Gassovermetningen målt i utløp Brokke, ovenfor- og nedenfor dam Tjurrmoen i 2015 og 2018

Datasettene ble også brukt til å se hvordan gassovermetningen ble luftet ut nedover Otra. Målestasjonene mellom inntaket og utløpet til Hekni kraftstasjon (Nedstrøms Tjurrmoen og Blekeløpet) ble ekskludert i de videre undersøkelsene fordi målingene fra disse stasjonene viste at deflektoren reduserte gassovermetningsverdien tilstrekkelig på denne strek-

ningen. Gassovermetningen nedstrøms Brokke ble, som vist i figur 4.7, redusert mellom utløp Brokke og Tjurrmoen demning.

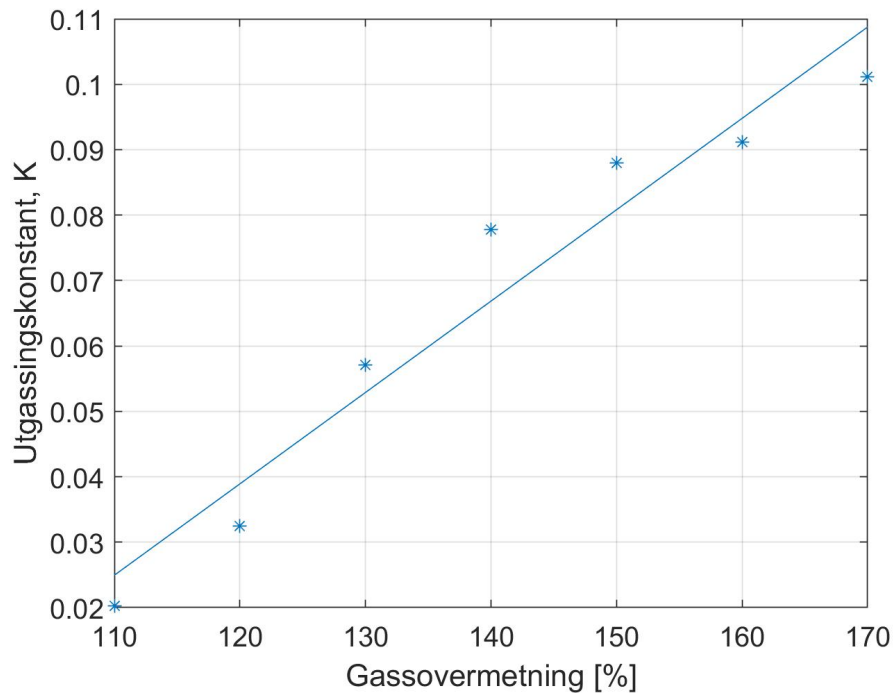


Figur 4.7: Gassovermetningen i utløpet og nedstrøms Brokke, målt i 2015

For å kunne predikere hvordan gassovermetningen ville reduseres nedstrøms Brokke var det nødvendig å finne utgassingskonstanten, K . Denne konstanten kunne beregnes ved å benytte ligning 1.1 fra delkapittel 1.1.2 *Gassovermetning nedstrøms Brokke kraftstasjon*. Figur 4.7 med gassovermetningsverdier fra 2015 ble brukt som referanse for G_{km} og G_0 . Først ble gassovermetningstoppene modellert med utsnitt på x-aksen for de største toppene, og på den måten kunne gassovermetningens tidsforskyvning bestemmes. En gjennomsnittsverdi på 16 timer ble bestemt ut i fra modelleringene for de ulike toppene mellom utløpet og Tjurrmoen demning.

Videre ble det lest av en gassovermetningsverdi i utløpet for den første toppen, på 170%. Nå kunne den bestemte gjennomsnittstiden på 16 timer benyttes for å lese av forskyvningen i gassovermetningstoppene 11 km nedstrøms utløpet, ovenfor Tjurrmoen. Denne

verdien ble lest av til 123%. Ligningen fra UniResearch Miljø ga da $K=0,1012$. Ved å utføre dette for hver tiende gassovermetningsverdi ble grafen i figur 4.8 laget, og her ble det også satt inn en lineær tilnærming til punktene. Skriptet for utgassingskonstanten er gitt i vedlegg F. Ligning 1.1 fra UniResearch Miljø ble kombinert med beregninger utført



Figur 4.8: *Utgassingskonstanten mellom målestasjonene ved utløp Brokke og overfor Tjurrmoen*

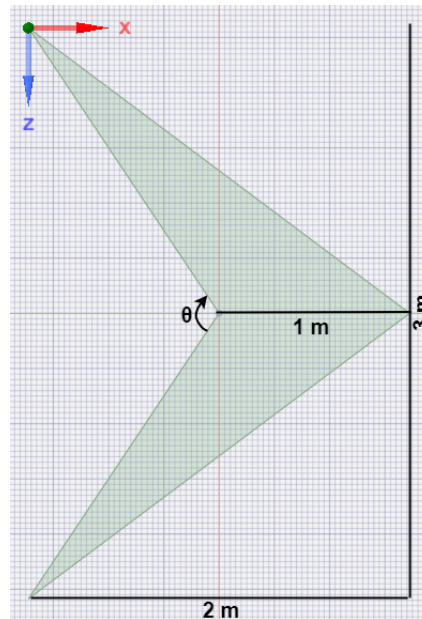
for utregning av skjærspenning i samme rapport for å regne ut skjærspenningen [10]. Her var det ønskelig å se på skjærspenningen kun i utløpet slik at denne verdien senere kunne sammenlignes med resultater fra Ansys og Matlab, men rapportene inneholdt ikke måledata for kun utløpet. En graf med observert utgassing nedstrøms Brokke ble benyttet for å se på målingene for de første 1,5 km. Disse verdiene ble satt inn i ligning 4.1 [10]:

$$G_{km} = G_0 e^{-(0,0271997+0,0077792 \cdot wss) \cdot L} \quad (4.1)$$

hvor wss er skjærspenningen. Gassovermetningen etter 1,5 km ble lest av til 140% og gassovermetningen ved startpunktet var 154%. Skjærspenningen for de første 1,5 km ble da 22,22 Pa.

4.3 Ansys Fluid Flow

I figur 4.9 vises hindringen brukt i forskningsrapporten sett ovenfra. Modellen hadde en lengde i x-retning på 2 meter og en lengde på 3 meter i z-retning. Lengden fra hindringens midtpunkt til endepunkt var 1 meter. Disse målene ga en vinkel på $\theta = 112,6^\circ$ i midtpunktet.



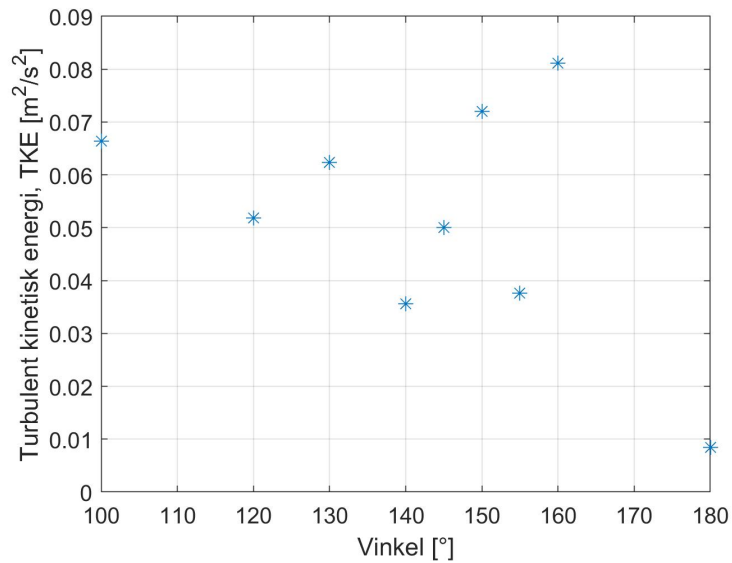
Figur 4.9: Utforming av hindringen benyttet i forskningsrapporten sett ovenfra, med strømningsretning mot høyre

Simuleringsmodellene for forsøkene ble designet med en fast bredde på 3 meter i z-retning og en lengde på 1 meter mellom midtpunkt og endepunkt. Modellenes lengde i x-retning ble justert for å skape ønsket vinkel. Samtlige simuleringsmodeller for Fluid Flow ble utformet i tilleggsprogrammet Ansys SpaceClaim Geometry. Før dette kunne åpnes måtte det fastslås at modellen skulle kjøres i *Steady-State* og kun ville inneholde en fase, vann. I SpaceClaim Geometry kunne en ny modell formes med programmets tegne- og designverktøy eller en ferdig modell kunne importeres inn. For å definere volumet som skulle simuleres ble et volumekstrakt utført, og dette utgjorde selve simuleringsområdet. Volumekstraktet ble skapt ved å markere hvilke flater som rammet inn modellen og deretter hvilke flater som representerte innsiden av volumet.

Videre ble modellens maskenett bestemt. Fluid Flow har en funksjon for automatisk generering av maskenett, som ble benyttet i innledende simuleringer. Simuleringene ble gjennomført med *Solution Fidelity: High*, noe som sørget for en maske av høy kvalitet på modellen. Ved senere simuleringer ble denne masken definert manuelt, da dette ga rom for tettere masker i nærheten av hindringer.

Under *Setup* ble hele volumekstraktet valgt til *Physics Regions*. Vegger, tak og gulv i modellene ble satt til *Stationary Walls* med *No slip*. Innstillingen danner et laminært underlag hvor farten vil være null, og skaper en logaritmisk hastighetsprofil som forklart i kapittel 2.1. Innløpshastigheten ble definert som 1,05 m/s, da dette tilsvarer en vannføring på $80 \text{ m}^3/\text{s}$ ved tunnelutløpet på Brokke. Utløpet ble valgt til trykk-basert med *Gauge Static Pressure* på 0 Pa. Turbulensmodellen ble satt til *k-Omega Shear Stress Transport(SST)*, og dette ble utført med å aktivere *Reynolds Average NS* og videre velge ønsket modell under *RANS model*. Simuleringene ble kjørt med en kurve på maksimalt 1000 iterasjoner. Dersom simuleringen ikke oppnådde konvergens oppstod en advarsel. I disse tilfellene betød dette at modellen inneholdt en større feilmargin enn ønsket.

Simuleringene ble først utført i en enkel boks med en lengde på 150x20 meter og en høyde på 20 meter. Hindringen ble plassert 20 meter inn i modellen, og hadde en høyde på 6 meter. Hindringer med vinkel mellom 100° og 180° ble først simulert med en vinkelendring på 20° per simulering. Vinkelen som utga høyest resultat var 140° . For å snevre inn resultatene ble flere vinkler mellom 120° og 160° simulert. Fem av de ni simuleringene oppnådde ikke konvergens, og resultatene vist i figur 4.10 viser at det ikke er en klar sammenheng mellom turbulens og vinkel. Matlabskriptet for modellering av resultater i Fluid Flow er gitt i vedlegg G. For å oppnå konvergens kunne det maksimale iterasjonsnummeret økes, eller *Solution Advancement Exponent* endres fra 0 til 1, noe som førte til en mer aggressiv løsningsmetode. Endring av disse parametrene utga ingen forskjell, og det ble derfor bestemt å se på et mindre simuleringsområde med et tettere maskenett.

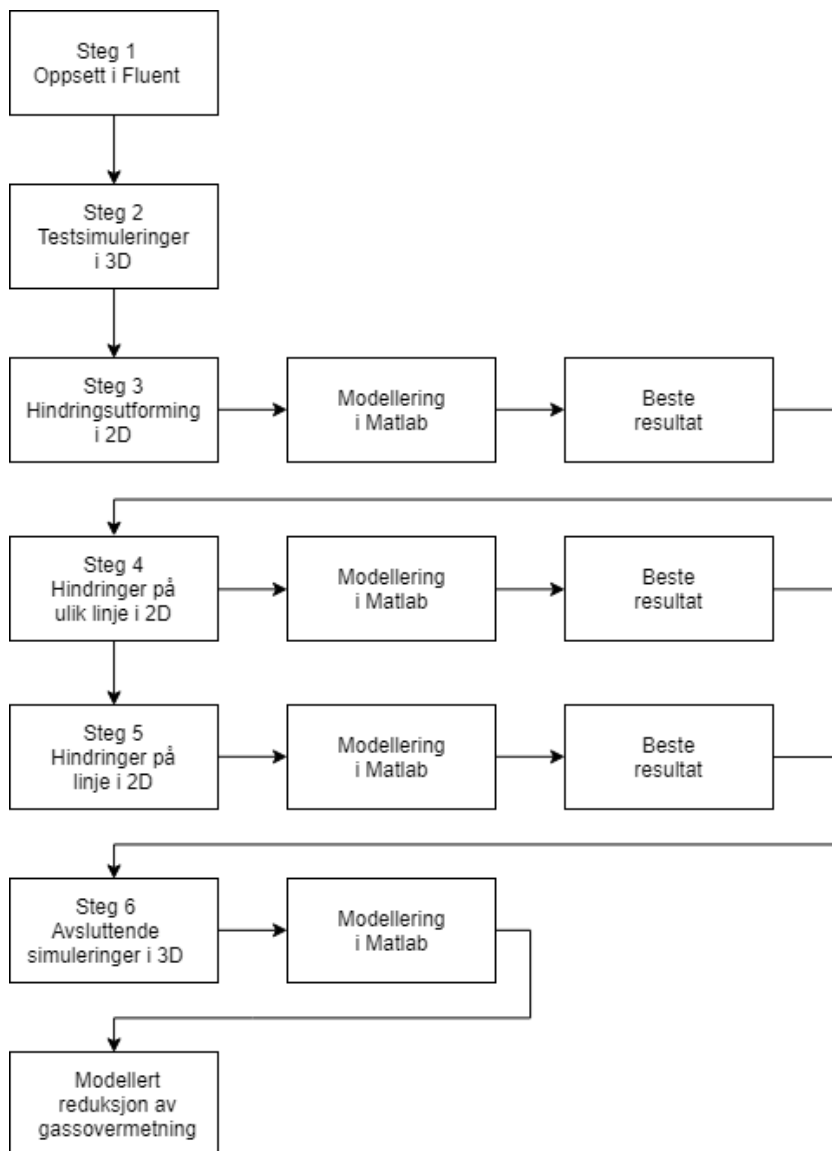


Figur 4.10: *Maksimal TKE for de ulike simulerte vinklene*

Et simuleringsområde på 8x20 meter og en høyde på 10 meter ble benyttet for nye simuleringer. I disse tilfellene ble vegger og tak satt til symmetri, og strømmingene ville dermed ikke påvirkes av grensene, men heller etterligne strømmingene i nærheten. Her ble også maskenettet definert manuelt, men på tross av dette oppnådde heller ikke disse modellene konvergens. Resultatene ble ansett som utydelige og usikre, og ble ikke brukt videre.

4.4 Ansys Fluent og Matlab

Da simuleringene i Fluid Flow ikke ga ønskede resultater ble programmet Ansys Fluent benyttet for videre arbeid. Simuleringer i 2D og 3D ble knyttet opp mot hverandre og delt inn i seks ulike steg. Simuleringer i 2D ble bygget i xy-planet, og simuleringer i 3D ble bygget opp fra xz-planet. Fremgangsmåten for metoden er gitt i figur 4.11.



Figur 4.11: *Flytskjema for fremgangsmåte i metode*

Steg 1 tok for seg utløpets utforming, generering av maskenett og gjennomgang av fremgangsmåte for simulering i 3D. I steg 2 ble del 3 av utløpet brukt videre for innsetting av diverse hindringer i 3D for validering av simuleringsmodellen. I steg 3 ble arbeidet fra Fluid Flow gjenopptatt og det ble gjennom 2D-simulering bestemt hvilken vinkel som ville skape høyest turbulens i et gitt område, og her ble i tillegg ytterligere fire ulike hindringsformer simulert. I steg 4 og 5 ble den beste hindringen fra steg 3 benyttet og

det ble videre undersøkt hvor det ville være mest gunstig å plassere flere hindringer i samme modell. Simuleringsresultatene fra steg 3-5 ble via Matlab modellert for å finne gjennomsnittlige verdier av TKE for bestemmelse av det neste stegets simulering. I steg 6 ble det gjennomført simuleringer i 3D som tok for seg de mest relevante løsningene fra de andre stegene. Siste del av metoden benytter simuleringsresultatene fra steg 6 for å beregne reduksjonen av gassovermetning i utløpet.

4.4.1 Steg 1 - Oppsett i Fluent

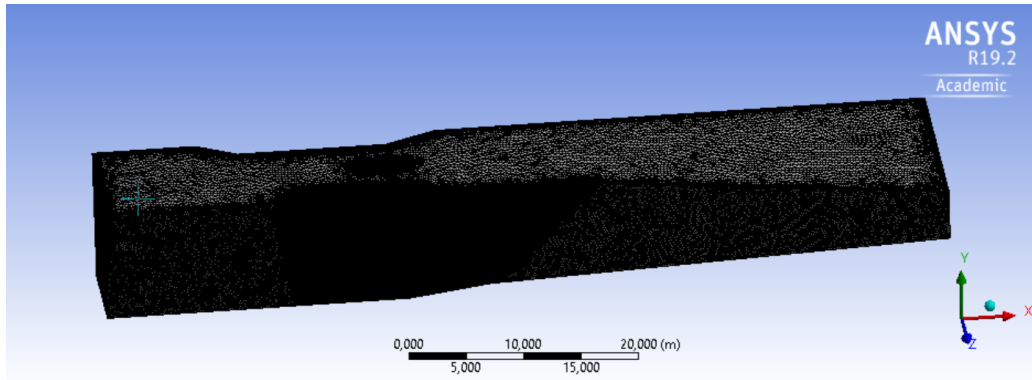
Det ble brukt mye tid på testsimuleringer for å bestemme fremgangsmåte for innstillinger i Ansys. Endelig fremgangsmåte er fremlagt i dette steget. Første steg for 3D-simulering i Ansys var å skape simuleringsmodellen. Selve modellen ble designet i SpaceClaim Geometry, med hjelp av programmets tegnefunksjoner og draegenskaper. Plantegninger av del 2 og 3 er gitt i vedlegg H. Videre ble et volumekstrakt utført for å definere simuleringsområdet.

Generering av maskenett: Maskenettet for 3D-simuleringer kan ha en *Element Order* som er *Linear* eller *Quadric*, som henholdsvis baseres på flate eller kurvede elementer. Simuleringer med flate elementer vil ha behov for et finere maskenett for å kunne gi nøyaktige resultater i kritiske områder. Et maskenett med kurvede elementer vil gjerne gi et mer nøyaktig resultat, men er mer krevende både tidsmessig og i form av datakraft. På grunn av begrenset tidsbruk og kapasitet var det dermed mest hensiktsmessig å benytte flate elementer for de aktuelle simuleringene [29].

Den forenklede modellen av utløpet var 150 meter lang og opp til 25 meter bred, noe som førte til en svært stor simuleringsmodell. Et maskenett må være tett for å innhente den nødvendige informasjonen i simuleringen. Det ble først utført simuleringer hvor hele modellen ble simulert, men dette krevde for mye datakapasitet og modellen ble delt opp i tre deler for videre simulering, som vist i figur 4.4.

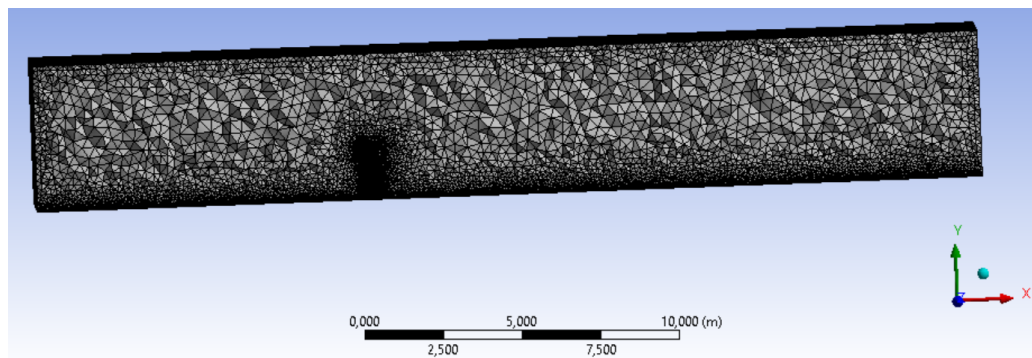
Deler av utløpet med faktorer som ville påvirke strømmingene ble simulert med et maskenett justert tettere i aktuelle områder, slik at de områdene med størst påvirkningsfaktorer ville ha et finere maskenett enn de områdene som var konstante. Et eksempel på dette var at modellens tak i del 2 var mindre detaljert enn midtsøylen. Figur 4.12 viser maske-

tettheten til del 2. Elementstørrelsen ble satt til å være maksimum 0,2 meter, men ved hjelp av verktøyet *Sizing* kunne elementstørrelsen endres på bestemte flater. Taket ble oppjustert til en maksimum elementstørrelse på 0,5 meter og midtsøyla og flatene rundt ble nedjustert til 0,05 meter.



Figur 4.12: Masketetthet del 2

I figur 4.13 vises masketettheten i del 3 i et tilfelle hvor en hindring ble satt inn i utløpet. Figuren viser en *Slice Plane* av maskene, altså et utsnitt fra volumekstraktets innside. Her vises det tydelig at masken var tettere i flatene som hadde sammenheng med en hindring, samt i bunnen av modellen.



Figur 4.13: Utsnitt av maskenettet i del 3

Flaten for inntaket ble markert og funksjonen *Create Named Selection* ble benyttet for å navngi flaten til *inlet*. Det samme ble utført med vegger, som fikk navnet *walls* taket som fikk navnet *atmospheric* og utløpet som ble *outlet*.

Oppsett i Fluent: Før Fluent ble åpnet var det nødvendig å utføre valg basert på datakapasitet og ønsket nøyaktighet i *Fluent Launcher*. Her ble dimensjonene satt til 3D og *Double Precision* ble valgt. Double precision måtte aktiveres for å kunne kjøre en flerfaset strømming. Prosseseringsalternativene for simuleringen ble satt ut fra kapasitet på aktuell datamaskin. I selve simuleringsprosessen ville det være mulig å bruke superserveren Thor, noe som ga tilgang på opp til 16 kjerner. Oppsettsfasen kunne ikke utføres på superserveren og ble utført med 4 kjerner. Dette påvirket ikke resultatet, men førte til lengre prosesseringstid under oppsettsfasen.

I Fluent måtte flere parametre bli fastslått før modellen var klar for å simuleres. Oppsettsdelen av Fluent er satt opp som et hieraki hvor ulike valg må tas for flere av trinnene. Hierakiet består blant annet av: *General*, *Models*, *Materials*, *Cell Zone Conditions* og *Boundary Conditions*.

Under *General* bestemmes simuleringens tilstand. Simuleringen kan enten løses med hensyn på trykk eller med hensyn på tetthet. En trykkbasert løsning vil benytte en projeksjonsbasert algoritme som beregnes med en trykklikning basert på kontinuitets og momentlikninger. For en tetthetsbasert løsning vil beregningen være basert på kontinuitet, moment og energi. For flerfasesimuleringer vil det ikke være mulig med tetthetsbaserte løsninger, og dermed ble disse simuleringene beregnet med hensyn på den trykkbaserte metoden [30].

Tidsinstillingene ble satt til *Steady*, da simuleringene er statiske og ikke inneholder faktorer som fører til endring over tid. *Velocity Formulation* kan settes til *Absolute* eller *Relative*, og valget her bestemmes av hvilke strømninger som vil være tilstede i simuleringmodellen. Dersom simuleringen er av roterende strømninger vil *Relative* være aktuelt, men i disse simuleringene uten rotasjoner var *Absolute* den mest passende [30].

Under *Models* ble de matematiske modellene for fluidene bestemt. *Multiphase* gjorde det mulig å kjøre simuleringer med flere faser. Her var det tre modeller å velge mellom; *Volume Of Fluid (VOF)*, *Mixture Model* og *Eulerian Model* hvor alle metodene benytter Euler-Euler tilnærmingen. Ved denne tilnærmingen ville volumfraksjonen av alle faser ha en sum lik én og anses som kontinuerlige funksjoner av tid og rom [31]. VOF-modellen er anvendelig for *steady-state*-simuleringer, og var dermed den mest passende for de aktuelle simuleringene. Under VOF ble *Open Channel Flow* aktivert for å kunne kjøre simuleringer

med frispeilstrømning. VOF-ordning for beregning ble bestemt til *Implicit* da dette ville løses best for en *Steady-State*-simulering. *Number of Eulerian Phases* ble satt til to, som i disse tilfellene var luft og vann. Da simuleringen tar hensyn til tyngdekraft i en flerfasemodell blir *Implicit Body Force* aktivert, noe som vil gjøre det enklere for modellen å oppnå konvergens. *Interfacial AntiDiffusion* kan være gunstig dersom maskenettet er grovt, men dette ble ikke brukt i disse simuleringene.

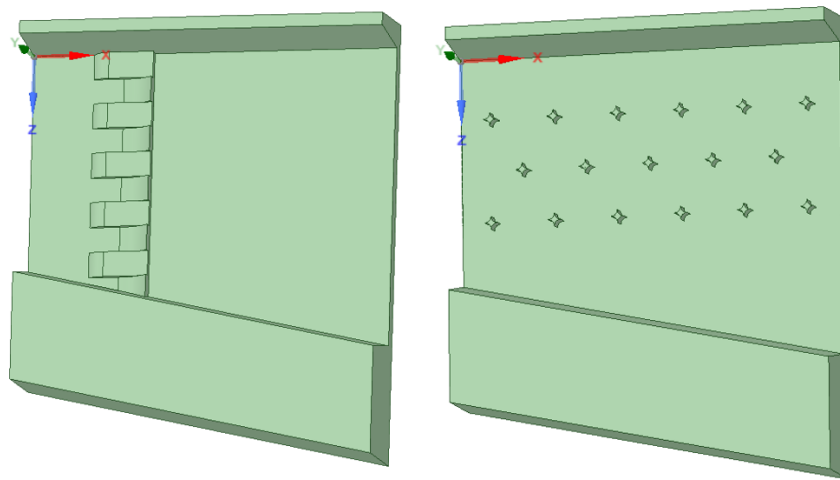
Videre under *Models* måtte viskositetsmodellen bestemmes. Basert på teorien gjennomgått i kapittel 3.1 *Simulering og modellering av turbulens*, ble k-omega SST valgt. *Materials* gir en oversikt over hvilke faser som skal simuleres. Ved å åpne materialpanelet kunne luft og vann legges til som faser, hvor fase 1 ble satt til luft og fase 2 til vann. Målinger fra utløpet på Brokke kraftstasjon fra oktober og ut desember 2018 ga en gjennomsnittstemperatur på 4°C. Vannets temperatur ble endret ved å justere tettheten og viskositet slik at den korrelerte med ønsket temperatur.

Under *Boundary Conditions* ble grenseverdiene for modellen bestemt. Her ble både *atmospheric* og *outlet* satt til *Pressure-Outlets* med *Open Channel* aktivert. Under *Open Channel* ble *Free Surface Level* satt til den aktuelle delens vannhøyde. Vannhøyden for del 1 og del 2 var 8,5 meter, mens del 3 hadde en vannhøyde på 2,1 meter. Inntaksverdien ble satt som et *Mass-Flow-Inlet* med verdien 80 000 kg/s som tilsvarer gjennomsnittlig vannføring gjennom Brokke kraftstasjon. Også her ble *Open Channel* aktivert og vannhøyde ble innsatt. Resterende vegger ble satt som vegger med *No Slip Conditions*. Under *Cell Zone Conditions* og videre *Operating Conditions* ble *Specified Operating Density* aktivert og referansepunkt for trykk ble bestemt til en y-verdi nær taket av modellen. *Numerical Beach* og *Compute From Inlet Boundary* ble aktivert for å forhindre refleksjon av bølger påvirket av modellens utløp [30].

Videre ble modellen initialisert ved en *Standard Initialization*, da modellen har *Open Channel Flow* ble beregningsmetoden *Flat Method* benyttet. Beregningene ble kalkulert fra innløpet av modellen. Volumfraksjonen for fase 2 ble satt til 1. Videre ble det under *Solution data* valgt ut ekstra informasjonsdata som det var ønsket at skulle bli registrert under simuleringen. Da 3D-simuleringene krevde stor datakapasitet ble serveren Thor benyttet. Case- og data-filer ble eksportert fra Fluent og lagt i en journalfil. Simuleringene ble startet gjennom journalfilen eksternt på serveren ved hjelp av programmene WinSCP og PuTTY.

4.4.2 Steg 2 - Testsimuleringer i 3D

I steg 2 ble det utført simuleringer med en hindring som dekker hele utløpets bredde og simuleringer med flere hindringer plassert tett. Figur 4.14 viser hindringenes utforming. En plantegning for forsøk 2.1 er gitt i vedlegg I. Forsøk 2.2 med tette hindringer ble både simulert med turbulensmodellen k-epsilon realizable og k-omega SST. Forsøket med tette hindringer er også gitt i vedlegg I. Disse simuleringene var tidkrevende, og videre simuleringsmetode ble endret til 2D-simuleringer for valg av hindringer.

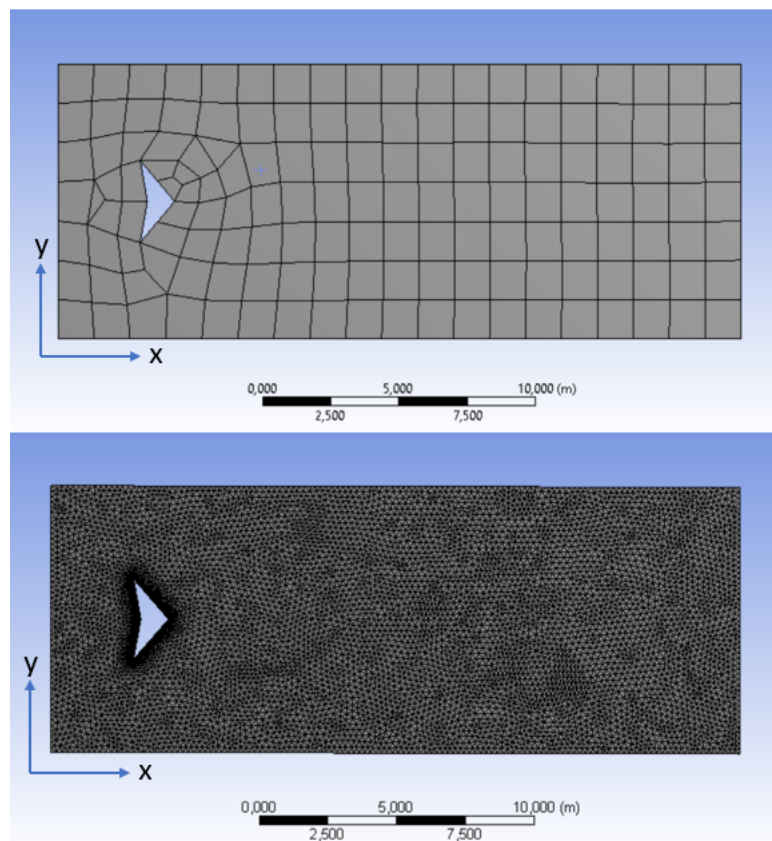


Figur 4.14: Simuleringsmodell for forsøk 2.1 og 2.2

4.4.3 Steg 3 - Hindringsutforming i 2D

Simuleringene i Fluid Flow ga ikke ønsket resultat, og fremgangsmåten for bestemmelse av hindringsutforming ble endret til 2D-simuleringsmodeller i Fluent. For å kunne skape en 2D-modell, måtte Ansys *Workbench* settes til 2D. Dette ble utført ved å åpne *Properties*-panelet, markere *Geometry* og videre velge analysetype 2D. For design av simuleringsområdet ble programvaren *Design Modeler* i Ansys benyttet. Hindringene ble plassert etter tre meter i en 10x25 meter stor boks. For å kunne bruke modellen videre måtte området omgjøres til en overflate, og dette ble utført ved å velge *Concept* og videre *Create Surface from Sketches*. Ved å markere skissen og velge *Apply* ble det opprettet en *Surface Body* av det valgte området. For å kunne benytte dette som et strømningsområde måtte regionen endres fra *Solid* til *Fluid*.

Modellen ble videre importert til programmet *WB Module*, hvor maskenettet ble definert. Før maskenettet ble generert måtte overflatens bredde endres til *Thickness=0*. Øverst i figur 4.15 vises maskenettet som ble generert ved standardinnstillingene i programmet. For å skape et tettere maskenett ble elementstørrelsen på modellen endret til 0,2 meter og maskenettsmetoden ble endret fra *Quadrilateral dominant* til *Triangles*. Ytterligere ble det lagt til *Sizing* rundt hindringen på 0,025 meter. Dette førte til et tettere maskenett i området rundt hindringen, som vist i den nederste figuren. Siste steg i *WB Module* var å navngi de ulike grensene. Her ble *inlet*, *outlet*, *wall* og *hindring* bestemt.



Figur 4.15: Maskenett med standardinnstillinger og maskenett med manuelle innstillinger

Fluent ble åpnet med *Double Precision* og 4 kjerner. Modellen ble satt opp som en *Pressure Based, Absolute, Steady* og *Planar* modell. Turbulensmodellen ble valgt til *k-omega SST*. Standard valg av fluid er luft, og dette ble også i dette steget endret til vann med tetthet og viskositet for 4°C.

Fokusområdet for innsetting av hindringer var i del 3 av utløpet, og en hastighet på 2,24 m/s ble benyttet for 2D-simuleringene. Området *inlet* ble satt til et *Velocity-Inlet* der hastigheten på 2,24 m/s tilsvarte $80 \text{ m}^3/\text{s}$ i inntaket på del 3. Modellens vegger ble satt til *Symmetri*, da det ikke var ønskelig med innvirkning fra veggene. Utløpet ble satt som et *Pressure-Outlet* med *Gauge Pressure=0*. Hindringen ble satt som en vegg med *No Slip Conditions*. Under *Reference Values* ble *inlet* valgt. Videre ble det brukt en *Hybrid Initialization*. En *Standard Initialization* var ikke nødvendig da svartverdier var fastslått under *Reference Values*. Det ble benyttet opp til 1000 iterasjoner for å løse simuleringen.

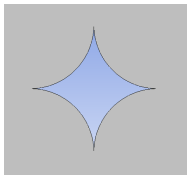
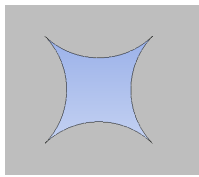
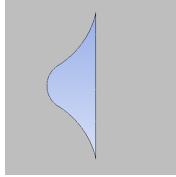
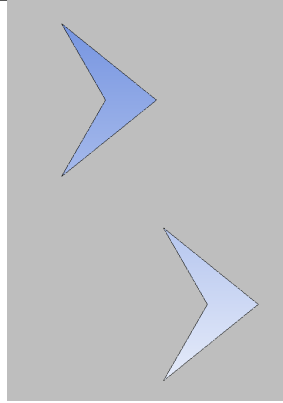
Det ble utført forsøk med ti hindringer med ulik vinkel, der hindringene ble bygd på samme måte som forsøkene i Fluid Flow. De ulike vinklene som ble simulert er gitt i tabell 4.1. Alle forsøkene ble simulert på xy-planet sett ovenfra og uten hensyn til høyde.

Tabell 4.1: *Vinkler simulert i steg 3*

Forsøk	3.1a	3.2a	3.3a	3.4a	3.5a	3.6a	3.7a	3.8a	3.9a	3.10a
Vinkel [°]	100	110	115	120	125	130	140	150	160	-140

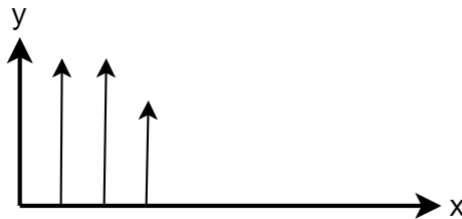
Hindringer med nye utforminger ble også simulert i 2D for å undersøke om disse ville gi bedre resultater enn den optimale vinkelen. Hindringene som ble undersøkt er gitt i tabell 4.2, hvor x-retning er horisontalt og y-retning er vertikalt.

Tabell 4.2: *Andre hindringer simulert i steg 3*

Forsøk	3.1b	3.2b	3.3b	3.4b
Utforming				

4.4.4 Steg 3 - Modellering

For å analysere 2D-simuleringene fra Fluent ble relevant resultatdata eksportert til Matlab som en ASCII-fil. Dataene ble hentet inn i Matlab ved å benytte *readtable* og deretter plukke de kolonnene som inneholdt relevante verdier, skriptet fra Matlab er gitt i vedlegg J. De relevante verdiene ble sortert i rekkefølge for å kunne benyttes til figurer og gjennomsnittsverdier. Bestemt sorteringsmåte var, som skissert i figur 4.16, å hente inn første verdi på x-aksen, og de påfølgende verdiene på y-aksen. Deretter ble neste verdi i x-retning og dens verdier i y-retning hentet inn, helt til alle verdier var plassert i denne rekkefølgen. Videre ble det generert et maskenett for å danne en kontur av resultatene. Skriptet ble modellert med ulike intervaller på x- og y-aksen, og de endelige intervallene er gitt i tabell 4.3.



Figur 4.16: Bestemt sorteringsmetode for innhenting av verdiene til maskenettets noder

Tabell 4.3: Intervall på x- og y-aksen i steg 3

	x-akse [m]	y-akse [m]
Intervall	[3:0.01:23]	[0:0.01:10]

Ved å benytte intervallene ble gjennomsnittsverdier for arealet regnet ut for TKE, hastighet i x-retning og samlet hastighet. Matlabskriptet finnes i vedlegg J. For å avgjøre hvilken hindringsvinkel som ville skape høyest turbulensdannelse ble gjennomsnittsverdien for TKE benyttet. Vinkelen på hindringen med best gjennomsnittlig TKE er presentert i tabell 4.4.

Tabell 4.4: Gjennomsnittlig TKE for den mest optimale vinkelen

Forsøk	Vinkel [°]	TKE [m^2/s^2]
3.4a	120	0,4267

Simuleringene ble først utført med 10° endring for hver simulering, fra 100° til 160°. Det ble også kjørt en simulering for -140°. Modelleringen i Matlab viste at vinkelen på 120° ga best gjennomsnittlig TKE, og det ble utført nye simuleringer for å undersøke om 115° eller 125° ville gi høyere utslag på TKE enn utslaget for vinkelen på 120°. Disse vinklene ga lavere gjennomsnittlig TKE, og 120° ble bestemt som den optimale vinkelen på hindringen.

Det ble også utført fire simuleringer med andre hindringer. Intervallene for de nye forsøkene ble beholdt like som i simuleringene med vinklede hindringer. Tabell 4.5 presenterer gjennomsnittlig TKE for det beste av de fire forsøkene.

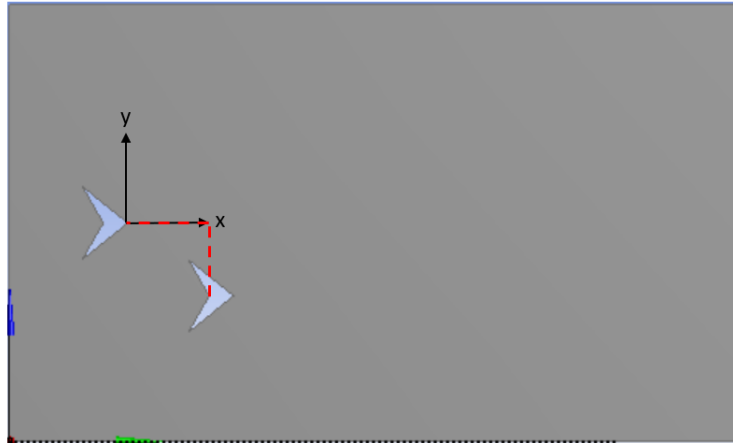
Tabell 4.5: Gjennomsnittlig TKE for forsøk 3.4b

Forsøk	TKE [m^2/s^2]
3.4b	0,5246

Hindringen med den optimale vinkelen ga grunnlaget for videre simulering i 2D, og de høye TKE-verdiene i forsøk 3.4b ga grunnlaget for sammensetningen av hindringer som skulle undersøkes i steg 4.

4.4.5 Steg 4 - Hindringer på ulik linje i 2D

For å finne den beste plasseringen dersom en ekstra hindring skulle settes inn, ble flere simuleringer gjennomført. Samtlige hindringer simulert i dette steget hadde en vinkel på 120° og var identiske med hindringen simulert i forsøk 3.4a. Figur 4.17 illustrerer hvordan hindring nummer to ble flyttet både i x- og y-retning ut fra den originale hindringens endepunkt. Den stiplede linja representerer forskyvingen hindring nummer to har i x- og y-retning, som i dette tilfellet var 2,5 meter i x-retning og -3 meter i y-retning. De ulike plasseringene for forsøkene er gitt i tabell 4.6.



Figur 4.17: Plassering av origo for simuleringsmodellene i steg 4

Tabell 4.6: Kombinasjonshindringer simulert i 2D

Venstre side			Høyre side		
Forsøk	x-retning [m]	y-retning [m]	Forsøk	x-retning [m]	y-retning [m]
4.1	2	-2	4.10	2	2
4.2	2,5	-2	4.11	2,5	2
4.3	3	-2	4.12	3	2
4.4	2	-2,5	4.13	2	2,5
4.5	2,5	-2,5	4.14	2,5	2,5
4.6	3	-2,5	4.15	3	2,5
4.7	2	-3	4.16	2	3
4.8	2,5	-3	4.17	2,5	3
4.9	3	-3	4.18	3	3

4.4.6 Steg 4 - Modellering

Fremgangsmåten for innhenting av data fra Ansys til Matlab var lik i steg 3 og 4. Matlab-skriptet var også likt, med unntak av intervallet i y-retning som ble endret for å passe til hindringenes turbulensdannelse. Matlabskriptet kan sees i vedlegg J.

Først ble hindringene for venstre side modellert, og konturen av TKE dannet grunnlaget for valg av intervallgrenser. Intervallgrensene er gitt i tabell 4.7.

Tabell 4.7: Intervall på x - og y -aksen for hindring plassert til venstre i steg 4

	x-akse [m]	y-akse [m]
Intervall for forsøk 4.1-4.3	[3:0.01:23]	[5:0.01:15]
Intervall for forsøk 4.4-4.6	[3:0.01:23]	[5.5:0.01:15.5]
Intervall for forsøk 4.7-4.9	[3:0.01:23]	[6:0.01:16]

Alle simuleringene med hindring plassert på høyre side ble også modellert for å finne gjennomsnittsverdiene for TKE. For modelleringen for høyre side ble det bestemt å holde intervallgrensen lik for de seks første forsøkene, og deretter ble intervallgrensen endret for de siste tre forsøkene, presentert i tabell 4.8. Den beste gjennomsnittlige TKE for venstre og høyre side er gitt i tabell 4.9.

Tabell 4.8: Intervall på x - og y -aksen for hindring plassert til høyre i steg 4

	x-akse [m]	y-akse [m]
Intervall for forsøk 4.10-4.15	[3:0.01:23]	[3:0.01:13]
Intervall for forsøk 4.16-4.18	[3:0.01:23]	[2:0.01:12]

Tabell 4.9: Gjennomsnittsverdien av TKE for de beste forsøkene i steg 4

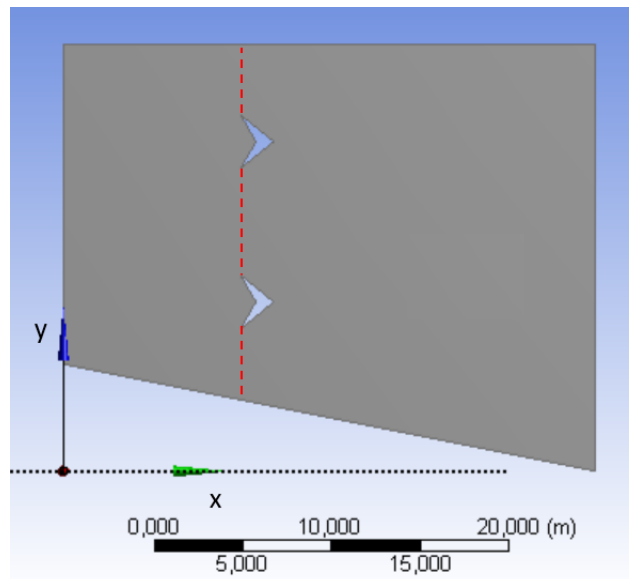
Venstre		Høyre	
Forsøk	TKE [m^2/s^2]	Forsøk	TKE [m^2/s^2]
4.4	0,4709	4.11	0,4329

Gjennomsnittsverdiene for TKE viste at plasseringen til hindringen i forsøk 4.4 ga best resultat på venstre side, og at forsøk 4.11 var best for hindringen plassert på høyre side.

4.4.7 Steg 5 - Hindringer på linje i 2D

Gjennom steg 5 ble fire forsøk med hindringer plassert på samme linje utført. Som vist i figur 4.18 ble hindringene plassert på samme linje ti meter ut i en modell formet som del 3 av utløpet. Grønn pil er x -retning og blå pil er y -retning. Veggene i denne modellen ble satt som *Stationary Walls* med *No Slip Condition*. Avstanden mellom hindringene er

målt fra vinge til vinge som vist med rødt i figuren. Forsøkene som ble simulert er gitt i tabell 4.10.



Figur 4.18: Hindringer plassert på linje i del 3 av utløpet

Tabell 4.10: Plassering av hindringer på samme linje i steg 5

Forsøk	Antall hindringer	Avstand fra vegg [m]	Avstand mellom hindringer [m]
5.1	2	4,5	5
5.2	2	5	4
5.3	2	4	6
5.4	3	2,75	2,75

4.4.8 Steg 5 - Modellering

Modelleringen i steg 5 ble utført på samme måte som modelleringen i steg 3 og 4, men det ble bestemt nye intervallgrenser. Disse intervallene er gitt i tabell 4.11. En funksjon for å forkaste NaN ble benyttet i dette steget. De fire forsøkene i steg 5 ble modellert, og de to forsøkene som ga høyest utslag på gjennomsnittlig TKE er gitt i tabell 4.12.

Tabell 4.11: Intervall på x - og y -aksen for forsøk i steg 5

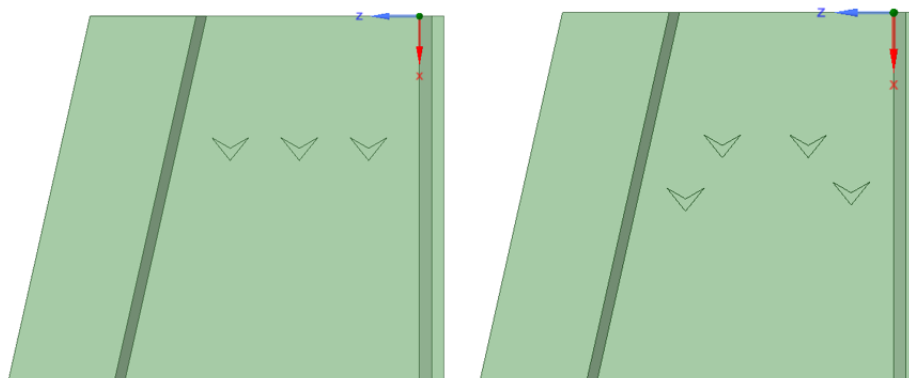
	x-akse [m]	y-akse [m]
Intervall	[10:0.01:30]	[0:0.01:24]

Tabell 4.12: Gjennomsnittlig TKE for de to beste forsøkene i steg 5

Forsøk	TKE [m^2/s^2]
5.2	0,2975
5.4	0,5187

4.4.9 Steg 6 - Avsluttende simuleringer i 3D

Modellene simulert i dette steget var av del 3 av utløpet. Forsøk 6.1 er uten hindringer, og er gitt i vedlegg H. Den optimale hindringsvinkelen fra forsøk 3.4a ble brukt videre i forsøk 6.2 og 6.3. Forsøk 6.2 har hentet hindringene fra forsøk 5.4, som ga det beste resultatet fra steg 5, som vist til venstre i figur 4.19. De bakerste hindringene i forsøk 6.3 er plassert med hensyn på forsøk 4.4 og 4.11, som var de beste resultatene i steg 4. I steg 5 var forsøk 5.2 med en distanse på 4 meter mellom hindringene det forsøket som ga best resultater når kun to hindringer ble simulert, og denne distansen ble brukt for å plassere de fremste hindringene i modellen i forsøk 6.3. Forsøk 6.3 er vist til høyre i figur 4.19. Høyden på samtlige hindringer ble satt til 1.8 meter. Plantegninger for forsøk 6.2 og 6.3 er gitt i vedlegg K.



Figur 4.19: Plassering av hindringer for forsøk 6.2 og forsøk 6.3

4.4.10 Steg 6 - Modellering

I steg 6 ble samme metode som i de tidligere stegene benyttet for å hente inn simuleringsresultatene til Matlab. Skriptet måtte justeres for å modellere i 3D i stedet for i 2D, og er gitt i vedlegg L. Etter at de relevante verdiene var hentet ut og sortert ble det satt inn intervallgrenser for bestemmelse av maskenettet. Intervallene er presentert i tabell 4.13.

Tabell 4.13: *Intervall på x-, y- og z-aksen i steg 6*

	x-akse [m]	y-akse [m]	z-akse [m]
Intervall	[0:0.1:30]	[0:0.1:2.1]	[0:0.1:17]

For modelleringen i 3D måtte også *NaN* forkastes for å hente ut gjennomsnittsverdier. For å få konturer i 3D ble det inkludert tre ulike plot i Matlab, der plottene ga konturer av tverrsnitt ved en gitt x (yz-plan), en gitt y (xz-plan) og en gitt z (xy-plan).

Modelleringen i dette steget hentet inn gjennomsnittlige verdier for de samme parametrene som i de andre stegene, men her ble også den gjennomsnittlige skjærspenningen funnet. Skjærspenningen skulle benyttes for utregning av en ny gassovermetningsverdi etter de 30 meterne utløpet består av.

4.5 Modellert reduksjon av gassovermetning

Ligningene gitt i delkapittel 1.1.3, *Beregning av gassovermetning*, ble undersøkt for å finne utgassingene i utløpet med de simulerte hindringene fra forsøk 6.2. De konstante parametrene brukt for beregning av reduksjon av gassovermetning er gitt i tabell 4.14. Den molekylære diffusiviteten, D_m , måtte bestemmes for en temperatur på omtrent 4°C , og ble løst ved å benytte en graf med diffusivitetskoeffisienter for gasser løst i vann ved ulike temperaturer [32].

Tabell 4.14: *Konstante parametre for utregning av gassovermetningsreduksjonen*

Parameter	Verdi	Benevning
ν	$1,5 \cdot 10^{-6}$	m^2/s
ρ	1000	kg/m^3
D_m	$8,264 \cdot 10^{-9}$	m^2/s
C_{sat}	100	%
S_t	1	-

Transportligningen for gassovermetningsreduksjon gitt i ligning 1.2, kombinert med ligning 1.3 og 1.4 løses til uttrykket gitt i ligning 4.2.

$$\begin{aligned}
 u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = & \left[\frac{\partial}{\partial x} (D_m + D_t) \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + (D_m + D_t) \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right] + \\
 & \left[\frac{\partial}{\partial y} (D_m + D_t) \cdot \frac{\partial C}{\partial y} + (D_m + D_t) \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right] + \beta_2 \cdot \left(\frac{\nu}{D_m} \right)^{-0,5} \cdot (\varepsilon \nu)^{0,25} \cdot (C - C_{sat})
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

Reduksjonen av gassovermetning fra utløpets start til utløpets slutt ble modellert som vist i vedlegg M. Første del av skriptet ble beholdt likt som i steg 6, men det ble også lagt inn en funksjon for å finne gjennomsnittlige dybdeberegninger for de ulike parameterne. Videre ble det modellert for-løkker for å finne endring i D_t som en funksjon av endring i x- og y-retning. For å løse første- og andreordensleddene av den partielle differensialligningen ble henholdsvis en regressiv og sentrert tilnærming til elementmetoden benyttet. Videre ble Liebmann's-metoden brukt for å gjøre C eksplisitt og deretter kjøre iterasjoner av denne ligningen. Til slutt ble grensebetingelsene satt for C. Utredningen er gitt i vedlegg N. Dette ble modellert med bruk av for-løkker for å beregne en ny gassovermetningsverdi fra den partielle differensialligningen.

Forsøk 6.2.1 ble modellert med en startverdi for gassovermetningen på 170 %, forsøk 6.2.2 med en startverdi på 150 % og forsøk 6.2.3 med en startverdi på 130 %. De tre forsøkene ble modellert med tre ulike verdier for β_2 .

5 Resultat og diskusjon

I dette kapittelet blir delkapitlene i metoden gjennomgått, og oppgavens metodikk og resultater blir diskutert.

5.1 Utløp Brokke kraftstasjon

Etter en ekskursjon på Brokke ble det klart at plantegningene ikke gir nøyaktige mål for utløpets utforming. Det ble i løpet av ekskursjonen og ved hjelp av kartbilder antatt at utløpet er litt kortere enn 150 meter, og at den venstre veggen av utløpet er kortere enn tidligere antatt. Veggene i utløpet er av stein og har høyere ruhet enn vist i plantegningene, og spesielt mot utløpets slutt er veggens utforming grov. Utformingen av utløpets bunn er ukjent, men også her ble det antatt en høyere ruhet enn vist i plantegningene.

Plantegningene viser en bunnbredde på 8 meter og en toppbredde på 12 meter, men disse målingene kan avvike med virkeligheten da utløpet ble konstruert med hensyn til terrenget. I denne studien ble likevel arbeidet utført med plantegningene som kilde, da det ville være for krevende å få nøyaktige målinger av det faktiske utløpet. Dersom studien gir gode resultater vil det være interessant med bedre målinger for å gi et mer korrekt resultat for det angitte området. Differansen mellom virkeligheten og simuleringmodellene kan føre til feilkilder i modelleringsresultatene.

5.2 Analyse av måledata og modellering i Matlab

I denne oppgaven var det ønskelig å se på perioder som inneholdt både de høyeste målte gassovermetningstoppene, og perioder med lavere gassovermetningsverdier. På grunn av disse kriteriene var det kun bestemte måleperioder som kunne benyttes, og antall målestasjoner med data ble begrenset av de tilgjengelige måleperiodene. Flere målestasjoner i nærheten av utløpet kunne muligens gi bedre prediksjoner for utluftingsberegningene, men disse målingene var ikke tilgjengelige i denne studien.

Det meste av vannet ved Tjurrmoen går gjennom kraftverk Hekni, mens en minstevannsføring slippes via deflektoren nedenfor Tjurrmoen. 7,8 km nedstrøms Tjurrmoen er utløpet fra Hekni kraftstasjon plassert, og vannet som slippes her er ikke like utluftet som vannet fra minstevannføringsløpet. Vannet i utløp Hekni har derfor relativt lik gassovermetningsverdi som vannet ovenfor Tjurrmoen. Andelen vann fra minstevannføringsløpet er ikke stor nok til å redusere gassovermetningsverdiene til et akseptabelt nivå nedstrøms utløp Hekni, og gassovermetningsverdier over anbefalt nivå vil dermed kunne forekomme videre nedstrøms Otra. Måledata fra de ulike målestasjonene viser at utløpet til Hekni kraftstasjon har gassovermetningsverdier på opptil 120%.

Mangel på måledata fra noen av målestasjonene svekket sammenligningsgrunnlaget mellom målingene utført nedenfor Tjurrmoen i 2015 og 2018 vist i figur 4.6 i metodekapittelet. I den høyeste gassovermetningstoppen fra 2015 er det mangelfulle måledata nedenfor Tjurrmoen, men gjennom de eksisterende målingene vises det en gassovermetning på omtrent 115%. Denne verdien er målt før gassovermetningsverdien er på sitt høyeste i utløp Brokke, og det kan derfor antas at verdien nedenfor Tjurrmoen vil stige etter tidsforskyvingen. I grafen fra 2015 er det flere usikre måledata, blant annet viser målingene nedenfor Tjurrmoen en høyere gassovermetning enn målingene i utløp Brokke i midten av oktober, og i omtrent samme tidsperiode var gassovermetningsverdiene langt under 100% ved målestasjonen ovenfor Tjurrmoen. Dette tidsrommet inneholder for mye usikkerhet til at det er benyttet for sammenligninger. Grafen til høyre i figur 4.6 viser gassovermetningsverdiene nedenfor Tjurrmoen etter at deflektoren ble installert. I denne grafen var det også mangler på målinger, men perioden frem til midten av november inneholdt gode nok målinger for sammenligning mot perioden fra 2015. I november 2018 ble det målt gassovermetningsverdier opp mot 176% ved utløpet, og nedenfor Tjurrmoen ble da deflektorens virkning klar. I tilfeller der gassovermetningen tidligere ble målt til langt over 115%, førte deflektoren nå til en maksverdi på 106%. Jevnt over var målingene etter deflektoren lavere og mer stabile enn før deflektoren ble installert. Ved installasjonen av deflektoren ble dermed gassovermetningsproblemet forbedret i Otra mellom Tjurrmoen og utløp Hekni, men nedstrøms utløp Hekni er fortsatt problemet reelt.

Små variasjoner i vanntemperatur kan føre til endringer i vannets egenskaper, og temperaturmålinger i datasettene ble derfor analysert for å finne den gjennomsnittlige temperaturen i utløpet. Måledataene fra 2018 var de eneste som inneholdt temperaturmålinger for utløpet til Brokke kraftstasjon. Gjennomsnittstemperaturen ble beregnet til 4°C for

perioden, og denne verdien ble videre brukt i simuleringer. Temperaturdataene stammer fra vinterhalvåret, og det er derfor mulig at temperaturen er høyere i andre deler av året.

I metoden ble det presentert en graf, figur 4.8, med sammenhengen mellom gassovermetningen og utgassingskonstanten. Denne grafen er veldig forenklet og inneholder flere feilkilder. Den største feilkilden er tidsforskyvningens gjennomsnittsverdi på 16 timer. I virkeligheten svinger denne tiden mellom 12-25 timer ut i fra blant annet vannføringen i den naturlige elva og vannføringen gjennom Brokke kraftstasjon. For å få en mer presis utgassingskonstant måtte tidsforskyvingen vært regnet ut for de ulike vannførings- og gassovermetningsverdiene og ikke vært basert på en gjennomsnittsverdi. Vannføringsdata fra Brokke kraftstasjon kunne blitt benyttet for utregningene, men det var ikke tilgjengelig måledata av den naturlige elvens vannføring. Dette var grunnlaget for beslutningen om å bruke gjennomsnittstidsforskyvingen på 16 timer. På tross av denne feilkilden viser grafen at utgassingskonstanten er lav ved lave gassovermetningsverdier, og at den stiger ved høyere gassovermetningsverdier. Dette er forventet oppførsel for utgassing, og den lineære linja vil dermed gi et omtrentlig resultat for strekningen mellom utløp Brokke og ovenfor Tjurrmoen.

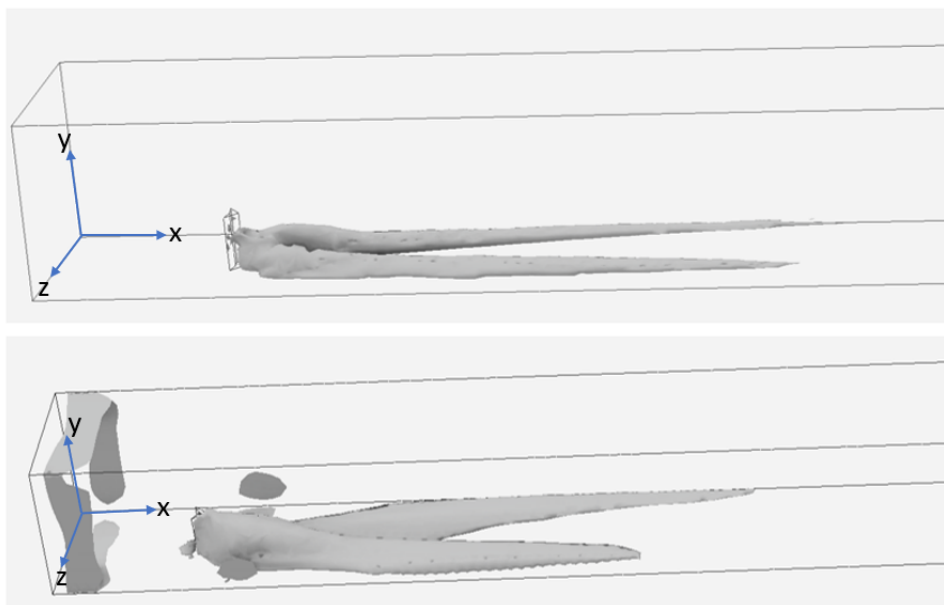
5.3 Ansys Fluid Flow

I forskningsrapporten ble det konkludert med at en hindring med en vinkel mot strømningsretningen ville skape en høy turbulensdannelse. For å bygge videre på forskningsrapporten ble ulike hindringer først simulert i Fluid Flow for å finne den optimale vinkelen. Det var også interessant å utforske hvor mye høyden påvirket turbulensdannelsen og om en lavere hindring ville skape en vertikal bevegelse i strømmingen. På bakgrunn av dette ble hindringens høyde satt til 6 meter. Vertikale bevegelser ble antatt å være gunstige, da dette sannsynligvis ville ledet gassovermetningsboblene mot vannoverflaten og dermed ført til en raskere utlufting.

Resultatene fra simuleringene viste at vinklene mellom 140° og 160° hadde de høyeste verdiene av TKE, og det ble gjennomført flere forsøk med tettere frekvens mellom disse verdiene. 3D-overflatene fra Fluid Flow ga kun et inntrykk om hvilke hindringer som eventuelt ville være bedre enn andre, men de ga ikke et bilde på hvordan turbulens-

dannelsen ville utforme seg i realiteten. Simuleringene fremviste heller ingen korrelasjon mellom maksimal TKE og vinkel på hindringene, som sannsynligvis skyldtes problemene med å oppnå konvergens. Dersom simuleringene ikke oppnår konvergens vil ikke verdiene være stabile nok til å kunne fremstille et pålitelig resultat. Flere tiltak ble utført for å finne kilden til problemet, blant annet ved å skape et tettere maskenett, en mindre simuleringsmodell, endre iterasjonsnummeret og endre løsningsmetode. Ingen av tiltakene viste forbedringer, og resultatene fra Fluid Flow ble av den grunn forkastet.

I figur 5.1 vises 3D-overflaten fra et forsøk som oppnådde konvergens og et forsøk som ikke oppnådde konvergens i Fluid Flow. Som vist i figuren har forsøket som ikke konvergente flere forstyrrelser fra blant annet modellens vegger. Turbulensmodellen k-omega SST ble valgt på bakgrunn av dens gode egenskaper for turbulensberegninger, hvor den fremlegger en kombinasjon mellom turbulens nær veggene og i strømmingene. I simuleringene i Fluid Flow blir modellene påvirket av turbulensen i nærheten av vegger, men denne modellen ble likevel benyttet videre da hindringen også har grensebetingelser som en vegg. I videre simuleringer i Fluent ble veggene satt til symmetri for å unngå turbulensdannelse påvirket av vegger.



Figur 5.1: Konvergent forsøk(øverst) og ikke konvergent forsøk(nederst) i Fluid Flow

5.4 Ansys Fluent og Matlab

Som et alternativ for 3D ble 2D-simuleringer i Fluent benyttet for å bestemme den optimale hindringsvinkelen. 2D-simuleringene var mindre krevende enn 3D-simuleringene både i form av tidsbruk og datakraft, men simuleringene ga likevel et godt bilde av hvilken vinkel som ga den beste turbulensdannelsen. 3D-simuleringene ble gjenopptatt etter at den optimale hindringsvinkelen og plasseringen av hindringene var bestemt.

Alle simuleringer med plasserte hindringer ble utført i del 3 av utløpet. Denne delen av utløpet er den grunneste og det ble antatt at det derfor ville være lettere å luften vannet i dette området. Del 3 har et bunnareal på 615 m² disponibelt for innsetting av hindringer.

5.4.1 Steg 1 - Oppsett i Fluent

De endelige innstillingene i Ansys ble bestemt etter flere uker med feilsøk og testsimuleringer. Testsimuleringene viste at problemene i hovedsak oppstod rundt modellens grensebetingelser. For uttaket ble først et trykk bestemt for å skape ønsket vanndybde i simuleringene, men dette ble forkastet da det var mer effektivt å benytte *Open Channel - Free Surface Level*. Inntakets problemer ble løst ved å benytte en *Standard Initialization* med en volumfraksjon for fase 2 satt til 1, noe som førte til at det kun kom vann gjennom inntaket.

Å generere et tett maskenett til en stor modell er tidkrevende, og maskenettet for hele utløpet tok opp mot 8 timer å generere. Med en stor modell oppstod det også problemer med å laste opp modellen til Fluent, og i enkelte tilfeller førte det til at modellen ble for krevende og ikke kunne åpnes. På bakgrunn av simuleringstid og datakapasitet ble modellen delt opp i tre deler, som vist i figur 4.4 i kapittel 4.1. For å redusere simuleringstiden ytterligere kunne modellen blitt delt opp i enda mindre deler, men dette ville innebåret en større sjans for feilkilder mellom delene. Maskenettet brukt på de tre delene var fint nok til at simuleringresultatene ga tilfredstillende informasjonsmengde. Ved hjelp av serveren Thor ble simuleringstiden redusert drastisk og en mindre simuleringmodell var derfor ikke nødvendig.

Maskenettet benyttet for simulering av del 2 hadde en maksimal elementstørrelse på 0,5 meter. Tettheten på maskenettet ble justert finere i områder hvor endringer kunne oppstå. Maskenettet i del 3 hadde en maksimal størrelse på 0,2 meter. Med de gitte elementstørrelsene ble det skapt et maskenett på rundt 5 millioner noder for både del 2 og 3. Under simuleringene kalkulerer hver node i modellen en individuell verdi, og disse verdiene blir brukt videre for blant annet dannelse av konturer i planene. Dersom maskene ikke er tette nok vil konturene gi ufullstendige resultater og modellen vil kunne inneholde feilkilder i form av usikkerhet fra et punkt til et annet.

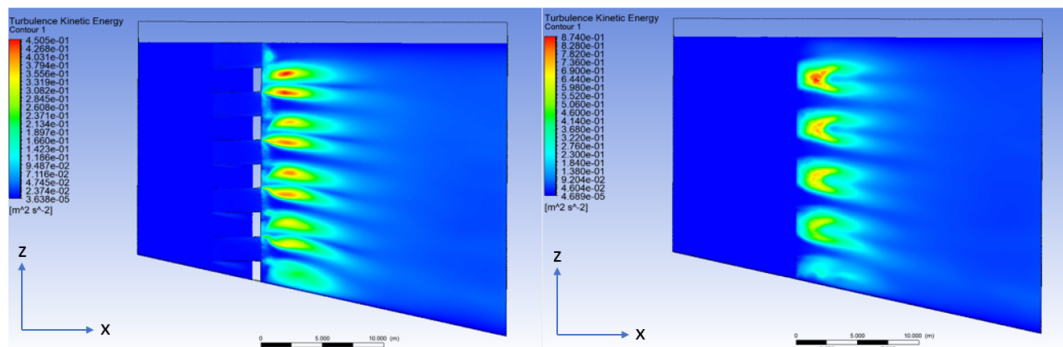
Del 1 av modellen utgjør de første 47 meterene av utløpet. Dette området inneholder ingen faktorer som vil føre til store endringer, og det er derfor ikke gjennomført simuleringer av denne delen. Det er antatt at parameterne for inntaket vil være tilnærmet like parameterne 47 meter ut i utløpet. Del 2 går fra 47 meter og frem til toppen av utløpets stigning. 5 meter ut i del 2 står midtsøylen, og direkte bak midtsøylen begynner stigningen. I dette området endrer utløpets utforming seg, noe som påvirker vannets oppførsel. Del 2 ble kun simulert en gang, da denne delen ble benyttet for observasjon av hastighet. Det var planlagt å benytte utløpsverdiene fra del 2 som inntaksverdier for del 3, men dette arbeidet var utfordrende da programmet krevde at utløpet på del 2 traff i nøyaktig samme punkt som inntaket til del 3. Enkeltdelene ble utformet separat med oppstartspunkt i origo, og dersom utløpsverdien på del 2 skulle brukes som den tredje delens inntaksverdi ville det vært nødvendig å forskyve modellen. For å unngå utfordringen ble en tilnærming brukt. Hastighetsverdien i inntaket i del 3 ble ved kalkulering beregnet til 2,24 m/s. Simuleringene i utløpet av del 2 ga en gjennomsnittlig hastighet på 1,28 m/s. Hastigheten i strømmingene blir påvirket av vegger og gulv i modellen og er derfor lavere enn den gjennomsnittlige kalkulerte hastigheten. Den kalkulerte hastighetsverdien ble brukt videre for simuleringer i 2D. Simuleringene i 2D fremstilte resultater virkelighetsnære med et plan som var antatt å ligge rett under vannoverflaten. Her ble det ikke tatt hensyn til vannets hastighetsprofil, og det ble derfor mer riktig å bruke den kalkulerte hastigheten enn den simulerte hastigheten fra del 2. Massestrøm ble brukt i tilfeller med frispeilstrømning i 3D, og 80 000 kg/s ble i disse tilfellene brukt som inngangsverdi tilsvarende 80 m³/s.

Det er usikkerhet rundt ruheten på utløpets bunn og vegger, og plantegningene med lav ruhet langs veggene ble benyttet til utforming av simuleringsmodellene. I Ansys Fluent ble standardinnstillinger for overflateruhet brukt. Dette skapte en feilkilde for simule-

ringsresultatene, spesielt for utregning av gassovermetningsreduksjonen i korrelasjon med skjærspenning og turbulens.

5.4.2 Steg 2 - Testsimuleringer i 3D

Simuleringene gjennomført i steg 2 ble brukt for å undersøke hvordan oppsettet i Fluent fungerte, og oppførselen til turbulens og hastighet ble undersøkt. I utløpet var det ønskelig å plassere hindringer som ville skape samme reduksjonseffekt som deflektoren, men dette var utfordrende da det ikke eksisterer fallhøyder i utløpskanalen. Som et alternativ ble forsøk 2.1 med en terskel over hele modellens bredde simulert. Terskelen var sammensatt vekselvis av hindringer med et hopp i enden og hindringer oppbygd med en bue i starten og en rett terskel i enden. Hensikten var å observere hvordan en rett terskel ville påvirke strømmingen i forhold til en terskel med hopp, og om modellen ville gi utslag i turbulens. Som vist i figur 5.2 kommer turbulensdannelsen godt frem i simuleringen, og hindringene med hopp vises å være mer effektive enn hindringene med rett terskel.



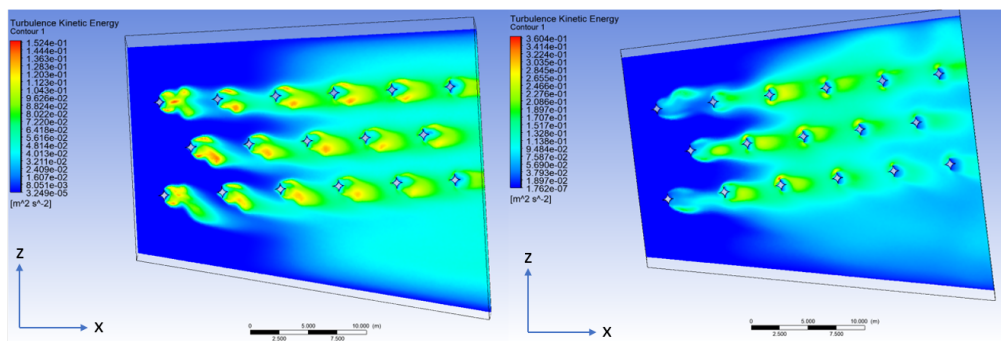
Figur 5.2: Plan over TKE ved terskel og plan over TKE ved hopp i steg 2

Resultatene er illustrert som konturer på et plan plassert i xz-planet i høyden for den aktuelle hindringen, altså ble planet for terskelen plassert 0,5 meter over bunnen og planet for hoppet plassert 1 meter over bunnen. Ved å se på målestokken til venstre i figurene har planet med terskel TKE-verdier på opp til $0,4505 \text{ m}^2/\text{s}^2$, mens planet med hopp har TKE-verdier opp til $0,8740 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Det er viktig å ta hensyn til at et plan kun viser konturene for en bestemt høyde, og at det ikke fremstiller et bilde av hvordan konturene vil være for hele simuleringsområdet. En større utgave av figurene er gitt i

vedlegg O, samt en figur med et plan fra xy-planet. Det kommer frem i xy-planet at det i området bak hoppene oppstår høy TKE som sprer seg over et stort omfangsområde både i lengde og dybde. Områdene bak tersklene opplever ikke den samme dannelsen av turbulens.

Ved innsetting av en bred terskel oppstår faren for oppdemming i utløpet. Dette kan føre til reduksjon i kraftproduksjon og er ikke ønskelig. Simuleringsmodellen tok ikke hensyn til eventuell oppdemming, da den opererte på en satt vanddybde. Utløpet har en stigning som øker risikoen for oppdemming dersom store konstruksjoner plasseres, som for eksempel ved innsetting av terskler eller hopp over hele utløpets bredde. Simuleringer med terskler gir derfor ingen garanti på at oppdemming ikke vil oppstå, og selv om simuleringen ga gode resultater for TKE ble hovedfokuset på oppgaven videre lagt på hindringer som ikke dekker hele modellens bredde.

Det eksisterer flere matematiske modeller som kan benyttes for å beregne turbulens i en simuleringsmodell. *k-omega* kjennetegnes med et godt grunnlag for beregning av turbulens i områder nær vegger og andre grensesnitt, mens *k-epsilon* gir gode beregningsresultater i fluidets strømminger, som nevnt i tabell 3.1. *k-omega Shear Stress Transport (SST)* er en turbulensmodell som kombinerer *k-omegas* beregningsfunksjoner nær vegg og *k-epsilon*s egenskaper for beregning i strømming. I forsøk 2.2 ble flere hindringer satt på rekke. Modellen ble simulert med både *k-omega SST*-modellen i forsøk 2.2a og *k-epsilon* realizable-modellen i forsøk 2.2b, som er presentert i figur 5.3. En større versjon av figurene er gitt i vedlegg O.

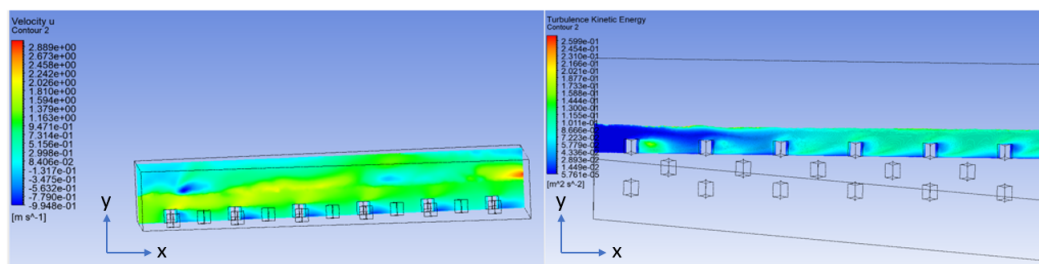


Figur 5.3: Simuleringsresultater for forsøk 2.2a og 2.2b

Resultatene vist i figuren illustrerer at begge turbulensmodellene har samme karakteristikk for turbulensdannelse, men at de fremstiller ulike verdier for TKE. Valg av turbulensmodell påvirker utslaget av TKE i modellen, og det er vanskelig å bekrefte hvilken turbulensmodell som gir det mest realistiske resultatet. Da det var ønsket å benytte skjærspenning for beregninger i steg 6 ble det besluttet å bruke k-omega SST-turbulensmodellen da denne gir gode utslag nær vegger, noe som blant annet ville være nyttig for å hente ut skjærspenningsverdier.

De tre fremste hindringene i begge tilfellene i figur 5.3 viser et uforutsigbart turbulensmønster sammenlignet med de bakerste hindringene der turbulensdannelsen er mer stabil. Ved å sette flere hindringer etter hverandre kan det antas at resultatene vil være like for hindringer plassert fra tredje kolonne og utover, og at det derfor ikke vil være nødvendig å simulere en modell med flere kolonner for å bestemme turbulensdannelsen for hindringer plassert på rekke.

Til venstre i figur 5.4 vises hastigheten fra forsøk 2.2a på et plan plassert i xy-planet. Planet er plassert fire meter i z-retning, og kutter gjennom på midten av den første rekka med hindringer. I planet kommer det frem at det oppstår vakefelt i områdene bak hindringene. Vedlegg O inneholder en større versjon av figurene. Luft har en lavere viskositet enn vann, og dette fører til at turbulente strømninger fortore vil oppstå. For å kunne se på turbulensen med en målestokk upåvirket av luftens verdier ble det brukt en *Iso-Clip*-overflate for å vise TKE kun i vannet. Dette er vist til høyre i figur 5.4.



Figur 5.4: *Hastighet og TKE på et plan i xy-planet i steg 2*

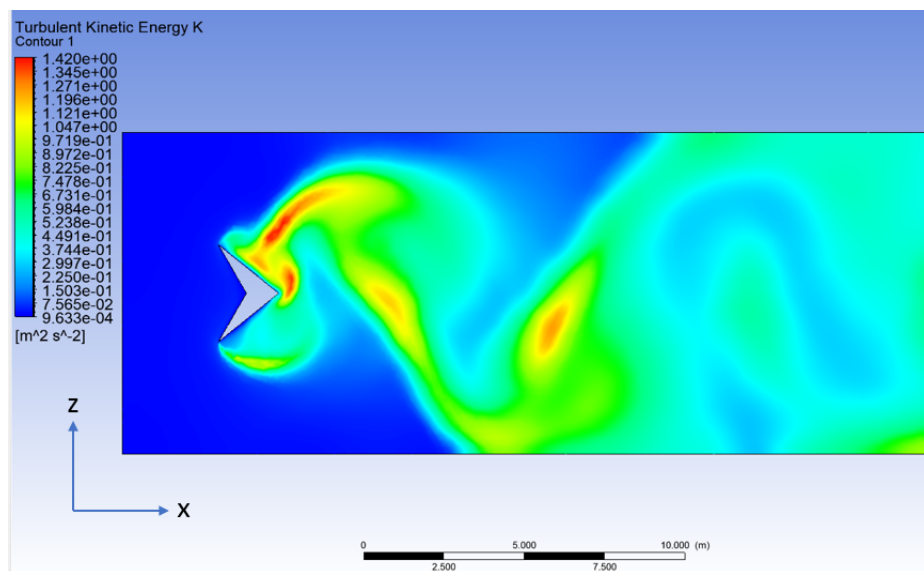
Ved å sammenligne resultatene for hastighet og TKE ble det klart at det er høyere TKE i hindringenes vakefelt, og at dette er spesielt fremtredende for den første hindringen i rekka. I områdene langs modellens gulv er TKE veldig lav, noe som er forventet ut i fra

teorien beskrevet i kapittel 2.1. De to forsøkene ga tilfredstillende resultater, og det ble derfor bestemt at innstillingene i Fluent, med turbulensmodellen k-omega SST, kunne benyttes for videre simuleringer.

5.4.3 Steg 3 - Optimal hindringsvinkel i 2D

I forskningsprosjektet ble det konkludert med at hindringer som står med vinkel mot strømningsretningen vil skape høyest turbulens. For å undersøke dette videre ble det i steg 3 benyttet 2D-simuleringer for bestemmelse av hindringens optimale vinkel. Samtlige simuleringer i steg 3 ble kjørt med grenser satt som inntak, utløp og symmetri. Ved å bruke symmetri på veggene kunne turbulensdannelsen bak hindringen observeres uten påvirkning fra modellens vegger.

Modellen fra steg 3 som viste de beste egenskapene for turbulensdannelse var forsøk 3.4a, en hindring med en vinkel på 120° . Samtlige simuleringresultater for TKE med de ulike hindringsvinklene er gitt i vedlegg P. 2D-simuleringene ga et klart mønster på turbulensdannelsen bak hindringene, og ut fra konturene fra Ansys av TKE fra forsøk 3.4a, vist i figur 5.5, kom det frem at den høyeste turbulensstoppen ville oppstå til venstre for hindringen.



Figur 5.5: *Dannelse av TKE i forsøk 3.4a*

Turbulens er tilfeldige og kaotiske bevegelser, og simuleringsmodellen kan derfor kun gi en prediksjon av hva som vil være et forventet resultat. Om turbulensen vil oppstå på høyre eller venstre side av hindringen vil i realiteten bli påvirket av for eksempel vannføring, utforming eller forstyrrelser fra utløpets vegger og bunn. For å undersøke dette videre kan det plasseres inn en hindring i det reelle utløpet først, for deretter å observere turbulensdannelsen bak hindringen over en periode. Turbulensdannelsen bak denne hindringen kan gi grunnlag for hvor en eventuell hindring nummer to bør plasseres.

I forskningsprosjektet ble det fremlagt resultater fra en modell med vinkel med strømningsretning som også hadde høy turbulensdannelse. Forsøk 3.10a ble gjennomført for en hindring speilvendt med hensyn på y-aksen, men resultatet var lavere enn for samtlige av forsøkene utført mot strømningsretningen, og det ble derfor ikke utført flere forsøk med hindringsvinkel med strømningsretningen.

Diverse andre hindringer ble simulert i 2D. Simuleringsresultatene for TKE i disse forsøkene er også gitt i vedlegg P. Hindringsformene for forsøk 3.1b og 3.2b ble designet for å skape en form for hopp mot strømningsretningen og ble basert på hindringene benyttet i forsøk 2.2. Modellen i forsøk 3.3b ble bygd opp motsatt av hvordan modellen i forsøk 3.2b var bygget. I stedet for å ha buen innover i hindringen ble denne buen bygget utover. De simulerte hindringene i forsøk 3.1b-3.3b hadde ikke like høye turbulensverdier som forsøk 3.4a med vinkelen på 120° og ble derfor ikke brukt videre. Forsøk 3.4b inneholdt to hindringer, hvor hindring nummer to ble plassert bak og til siden for den opprinnelige hindringen. Resultatene fra denne simuleringen viste høye verdier av TKE og ble grunnlaget for forsøkene simulert i steg 4.

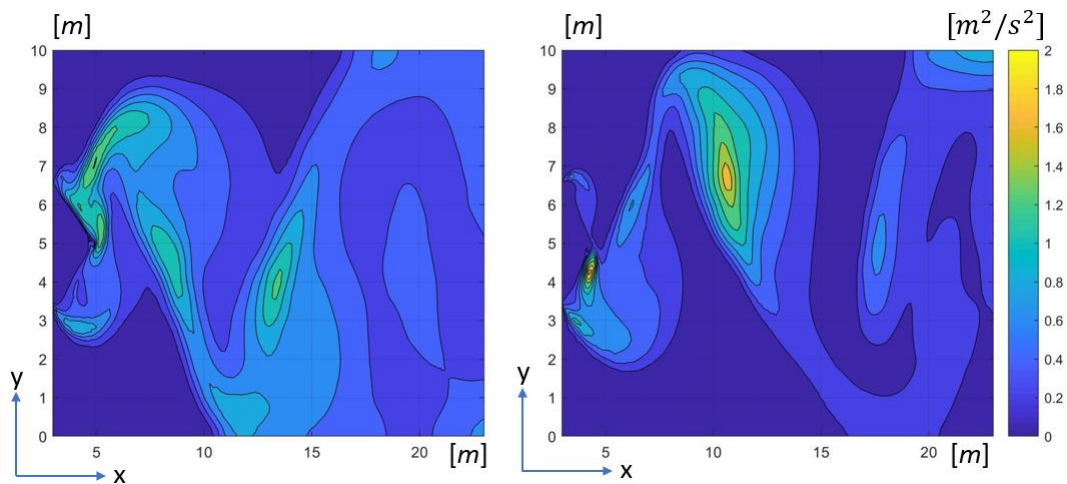
5.4.4 Steg 3 - Modellering

I tabell 5.1 er resultatene for de ulike hindringenes vinkel presentert. Alle verdier er gjennomsnittsverdier for strekningen 3-23 meter på modellens x-akse. Ved oppstart av simuleringene i 2D var det uklart hva som skulle simuleres videre, og det var også uklart hva som ville bli de endelige simuleringene. Uthenting av gjennomsnittsverdiene i modelleringen ble derfor gjennomført for alle stegene, og for alle parametre som kunne være relevante i forhold til ligningene for beregning av utgassing.

Tabell 5.1: Gjennomsnittsverdier for TKE, hastighet i x-retning og samlet hastighet for området for de ulike vinklene i steg 3

Forsøk	Vinkel	TKE [m^2/s^2]	Hastighet u [m/s]	Hastighet [m/s]
3.1a	100	0,3914	2,2420	2,9452
3.2a	110	0,3115	2,2428	3,0012
3.3a	115	0,3915	2,2406	2,9675
3.4a	120	0,4267	2,2404	2,9900
3.5a	125	0,3786	2,2418	2,9751
3.6a	130	0,3286	2,2415	3,0101
3.7a	140	0,3325	2,2410	3,0123
3.8a	150	0,2768	2,2414	3,0697
3.9a	160	0,3201	2,2409	2,9964
3.10a	-140	0,2260	2,2416	2,8219

Konturene av TKE for 2D-simuleringene ble funnet i Matlab, og til venstre i figur 5.6 er det beste resultatet av gjennomsnittlig TKE presentert. Denne hindringen har en vinkel på 120° , fra forsøk 3.4a. Den høyre delen av figuren viser det dårligste resultatet av gjennomsnittlig TKE for de testede vinklene, forsøk 3.8a der vinkelen er 150° . Målestokken er lik for begge figurene.



Figur 5.6: Den beste (120°) og dårligste (150°) hindringsvinkelen for gjennomsnittlig TKE i steg 3

Ved å se på maksimum TKE vil forsøk 3.8a se ut som det beste alternativet for turbulensdannelse på grunn av de høye maksimumsverdiene. Forsøk 3.4a har ikke like høye maksimumsverdier, men omfangsområdet for turbulensdannelsen er større, og resultatene for gjennomsnittsverdien vil derfor være høyere.

Hindringen i de ulike forsøkene ble plassert 3 meter inn i simuleringsmodellen, og de første tre meterne ble ekskludert i modelleringen da de ikke ville gi utslag på turbulensdannelse. Det ble utført flere tester for å bestemme intervallets lengde, og sluttlengthen ble valgt til 23 meter, altså 20 meter bak hindringen. Dette ble valgt for å få med de to første turbulensstoppene bak hindringene slik at gjennomsnittsverdiene skulle være mest mulig sammenlignbare for forsøkene. Ved å ha en lengde på 20 meter kunne det i tillegg undersøkes hvordan turbulensdannelsen ville blitt dersom hindringen ble plassert 10 meter inn i den 30 m lange tredje delen av utløpet. Grenseverdiene for y-aksen ble bestemt fra 0 til 10 meter for at hele den første turbulensstoppen skulle være innenfor intervallets områder for alle modelleringsresultatene. På tross av intervallenes fastsettelse viser resultatene likevel at den andre og tredje turbulensstoppen i noen av forsøkene har områder med høy TKE. Disse områdene er ikke nødvendigvis innenfor intervallets grenser for alle forsøkene, og de gjennomsnittlige verdiene kan dermed variere ved kun en liten endring for grenseområdene.

Forsøk 3.4a med en vinkel på 120° fikk høyest utslag for TKE, og det ble derfor også utført simuleringer for hindringer med vinkel på 115° i forsøk 3.3a, og 125° i forsøk 3.5a. Disse simuleringene skulle avgjøre om det var andre vinkler som ga høyere utslag for TKE. Her kunne flere vinkler enda nærmere 120° blitt simulert for å undersøke om en endring på kun 1° ville gitt bedre resultater, men det ble antatt at så små endringer ikke ville gi store utslag på det totale resultatet. Gjennomsnittsverdiene av TKE fra simuleringene viste også at det var ujevnheter i resultatene. Blant annet hadde forsøk 3.1a med vinkel på 100° lik gjennomsnittlig TKE som forsøk 3.3a med vinkel på 115° , men høyere gjennomsnittlig TKE enn forsøk 3.2a med vinkel på 110° . Resultatene ga et hint om at det er mye tilfeldigheter i resultatene fra Ansys og Matlab. Dette skyldes mest sannsynlig både feilkilder i simuleringen og modelleringen, samt turbulensens tilfeldige oppførsel. Det er mulig at resultatene hadde blitt annerledes dersom hvert forsøk ble simulert flere ganger med et gjennomsnittlig resultat fra alle simuleringsforsøk til videre bruk.

Simuleringene med de fire nye hindringene hadde samme intervaller som simuleringene med ulike vinkler i forsøk 3.1a-3.10a. Dette ble utført for å ha sammenligningsgrunnlag for gjennomsnittlig TKE, og for dermed å kunne bestemme hva som ville gi den beste turbulensdannelsen. Gjennomsnittsverdiene for disse forsøkene er vist i tabell 5.2.

Tabell 5.2: *Gjennomsnittsverdier for TKE, hastighet i x-retning og samlet hastighet for området for forsøk 3.1b-3.4b*

Forsøk	TKE [m^2/s^2]	Hastighet u [m/s]	Hastighet [m/s]
3.1b	0,1448	2,2399	2,4759
3.2b	0,1069	2,2397	2,4796
3.3b	0,2656	2,2434	2,9472
3.4b	0,5246	1,5937	3,0525

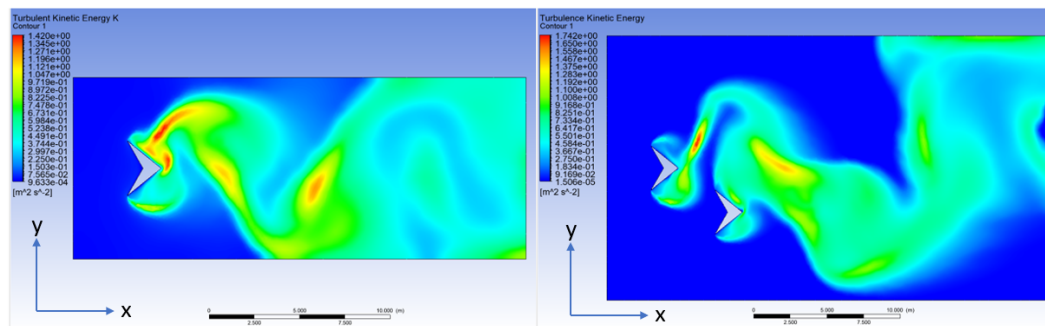
Konturene av TKE viste at turbulensens omfangsområde var lite for de tre første hindringene. I motsetning til forsøk 3.1a-3.10a var omfangsområdet i disse forsøkene så lite at hele området av de tre første turbulenstoppene var med i konturen. Årsaken til den lave verdien av gjennomsnittlig TKE har derfor ikke sammenheng med at de høyeste delene av turbulensdannelsen ligger utenfor intervallgrensene. For forsøk 3.4b har deler av den første turbulenstoppen havnet utenfor intervallgrensene, og gjennomsnittlig TKE ville sannsynligvis vært enda høyere dersom intervallet hadde blitt justert litt på y-aksen. Basert på resultatene fra forsøk 3.4b vil hindringer plassert tett skape størst TKE, men på grunn av faren for oppdemming ble ikke modeller med så små avstander mellom hindringene undersøkt videre etter steg 3.

5.4.5 Steg 4 - Hindringer på ulik linje i 2D

Den optimale hindringen funnet i forsøk 3.4a ble benyttet for simuleringer i steg 4, og forsøk 3.4b ble også undersøkt videre. I steg 3 ble den andre hindringen plassert kun en meter bak den opprinnelige hindringen. For å redusere sjansen for oppdemming ble det bestemt at avstanden mellom hindringene burde økes. Det ble utført forsøk med en ekstra hindring plassert på venstre side av den opprinnelige hindringen, men også forsøk med en ekstra hindring plassert på høyre side. Disse forsøkene ble testet for å undersøke om det ville være avgjørende for turbulensdannelsen hvilken side den andre hindringen ble plassert på, og om det var store differanser i gjennomsnittsverdiene. Simuleringsre-

sultatene, gitt i vedlegg Q, viser at hindringer plassert til venstre for den opprinnelige hindringen gir høyere turbulensdannelse enn hindringer plassert til høyre. Resultatene viser også at turbulensdannelsen er høyest når hindringene er plassert tett.

Ved å se på karakteristikken for turbulensdannelse bak hindringen på 120° ble det først antatt at det mest gunstige ville være å sette inn en hindring i området med lite turbulens. Dette området befinner seg til høyre for den opprinnelige hindringen, og er vist til venstre i figur 5.7. Til høyre i figuren vises TKE av forsøk 4.11. I stedet for å skape ekstra turbulens ble turbulensdannelsen fra den opprinnelige hindringen redusert av den andre hindringen i dette forsøket. Mellom hindringene oppstod det et felt uten turbulens som kan skyldes den økte vannhastigheten på den andre hindringens utside. Dette presset vann over i turbulensområdet til den opprinnelige hindringen, og ødela dermed turbulensdannelsen i området.



Figur 5.7: TKE for forsøk 3.4a og for forsøk 4.11 i steg 4

5.4.6 Steg 4 - Modellering

For å hente ut gjennomsnittverdiene gitt i tabell 5.3 og 5.4 ble intervallgrensene bestemt i Matlab. Opprinnelig var det ikke ønskelig å endre intervallene, men ved å se på konturen av TKE var det tydelig at sammenligningsgrunnlaget ville være bedre dersom intervallene ble endret. Intervallets lengde ble beholdt for at arealet skulle være likt som i steg 3, men start- og sluttverdiene måtte justeres for å holde den første turbulensstoppen innenfor grensene. For forsøk 4.7-4.9 og 4.16-4.18 som inneholdt hindringer med 3 meters mellomrom ble det likevel vanskelig å opprettholde dette ønsket, da deler av den første toppen med høy turbulensdannelse havnet utenfor grensene. Dette ga et dårligere sammenligningsgrunnlag for forsøkene og kan også være en del av grunnen til at gjennomsnittlig

TKE er lav i disse tilfellene. Resultatene viser også at gjennomsnittlig TKE er høyest i tilfellene der hindringen er plassert nært den opprinnelige hindringen. Dette tyder på at den mulige feilkilden med turbulensdannelse utenfor grensene i forsøk 4.7-4.9 og 4.16-4.18 ikke er så stor, og at endringen på intervallgrensene løser mye av problemet.

Tabell 5.3: Gjennomsnittsverdier for TKE, hastighet i x -retning og samlet hastighet for området for plassering på venstre side i steg 4

Forsøk	TKE [m^2/s^2]	Hastighet u [m/s]	Hastighet [m/s]
4.1	0,4626	1,8177	3,3423
4.2	0,4406	1,3692	2,8007
4.3	0,4369	1,6369	3,0494
4.4	0,4709	0,8696	2,4129
4.5	0,3635	1,4238	2,7874
4.6	0,4422	1,5973	2,9151
4.7	0,3524	1,1946	2,7674
4.8	0,4077	0,8693	2,4083
4.9	0,4018	1,0740	2,5602

Tabell 5.4: Gjennomsnittsverdier for TKE, hastighet i x -retning og samlet hastighet for området for plassering på høyre side i steg 4

Forsøk	TKE [m^2/s^2]	Hastighet u [m/s]	Hastighet [m/s]
4.10	0,4248	1,4538	3,0311
4.11	0,4329	1,8945	3,2302
4.12	0,4068	1,5298	2,9240
4.13	0,3161	1,4537	3,0152
4.14	0,3619	1,5274	2,9063
4.15	0,3355	1,0672	2,4222
4.16	0,4138	1,0955	2,6446
4.17	0,3192	0,9620	2,2486
4.18	0,3336	0,8514	2,2469

I forsøk 4.1-4.9 ble intervallgrensene justert på y -aksen hver gang hindringen ble justert lenger unna den opprinnelige hindringen i y -retning. Dette tilsvarte en endring for hvert tredje forsøk. I forsøkene 4.10-4.18 ble intervallet kun justert for de tre siste forsøkene. Dette skyldtes at turbulensdannelsen var lavere for forsøkene med en ekstra hindring på høyre side, og turbulenstoppene holdt seg derfor innenfor grensene i de seks første forsøkene.

Forsøk 3.4b fra steg 3 hadde en gjennomsnittlig TKE over området på $0,5246 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Ingen av de simulerte forsøkene i steg 4 fikk like høye verdier som forsøk 3.4b, noe som kan skyldes at hindringene i dette steget hadde større avstander enn i steg 3. Forsøk 4.4 og 4.11 hadde de beste verdiene for gjennomsnittlig TKE og ble derfor brukt for videre simuleringer. Ved å se på gjennomsnittshastigheten i x-retning og den samlede gjennomsnittshastigheten for forsøk 4.4 er det tydelig at hastigheten er veldig oppbremset i dette forsøket i forhold til i forsøkene med lavere gjennomsnittlig TKE. Denne studien inneholder ikke undersøkelser over hvor lav vannhastigheten kan være før det oppstår oppdemming innover i utløpstunnelen, og det er derfor usikkert om de gjennomsnittlige vannhastighetene i forsøk 4.4 egentlig er for lave for videre bruk.

5.4.7 Steg 5 - Hindringer på linje i 2D

I steg 5 ble ulike hindringer plassert på en linje i utløpet. Formålet med simuleringene var å undersøke virkningen av å ha flere hindringer plassert på samme linje, og for å bestemme hvor tett hindringene burde stå. Det ble også undersøkt om det ville være tilstrekkelig med to hindringer eller om tre hindringer ville være mer gunstig. En 2D-modell av del 3 av utløpet ble benyttet for forsøkene for å få de reelle avstandene i utløpet og for å få med veggens påvirkning.

Del 3 av utløpet starter i punktet hvor stigningen avtar, og det er antatt at det vil være tryggere å plassere hindringer et stykke fra stigningen med tanke på utløpets kritiske punkt for oppdemming. Hindringene i simuleringene ble plassert ti meter ut i modellen for å redusere sjansen for oppbremsing av vannet og oppdemming i utløpet. Veggene i dette steget er ikke simulert som symmetri, da det var ønskelig å danne et realistisk bilde av hvilke resultater som kunne forventes dersom noen av disse forsøkene skulle brukes videre i neste steg.

Basert på simuleringsresultatene, gitt i vedlegg R, ble det fastslått at avstandene mellom hindringene i forsøk 5.1-5.3 ikke utgjør en stor endring i turbulensdannelse. Endring av avstanden fra veggen fører heller ikke til store endringer i simuleringsresultatene. Ved å ha større avstandsvariasjoner i forsøkene ville sannsynligvis resultatene fremstilt tydeligere forskjeller. Forsøk 5.4 har hindringer plassert tett, og dette fører til høyere turbulensdannelse i simuleringsresultatene enn ved større avstander mellom hindringene.

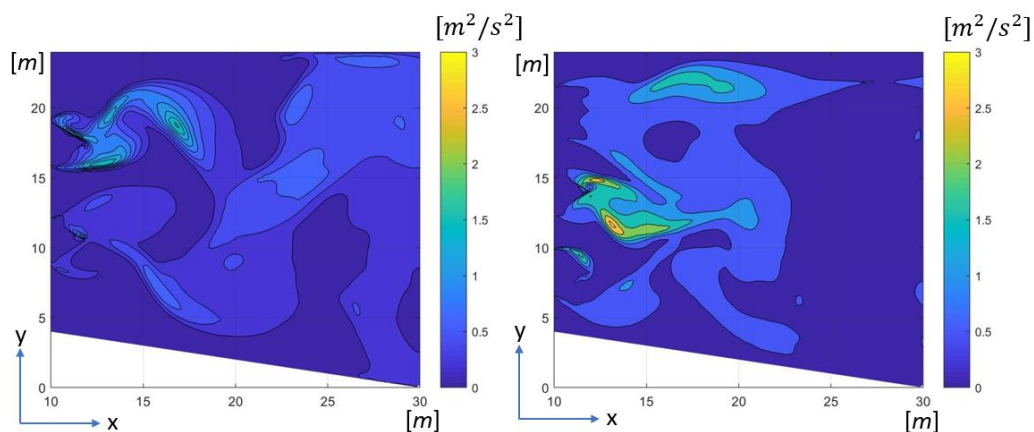
5.4.8 Steg 5 - Modellering

Matlabskriptet for steg 5 ble beholdt likt som for steg 3 og 4, men fordi modellen var simulert som del 3 av utløpet inneholdt modellen en skrå vegg på x-aksen. Dette førte til at noen av nodene i modelleringen ikke inneholdt verdier, og det ble derfor satt inn en funksjon for å se bort fra disse tomme nodene. Intervallgrensene ble tilpasset etter utløpets utforming. Gjennomsnittsverdiene gitt i tabell 5.5 kan derfor ikke sammenlignes med gjennomsnittsverdiene fra de andre stegene. For de fire forsøkene i dette steget var intervallgrensene like, og resultatene i denne tabellen er derfor sammenlignbare.

Tabell 5.5: Gjennomsnittsverdier for TKE, hastighet i x-retning og samlet hastighet for området i steg 5

Forsøk	TKE [m^2/s^2]	Hastighet u [m/s]	Hastighet [m/s]
5.1	0,2792	1,8132	2,4859
5.2	0,2785	1,8175	2,4584
5.3	0,2744	1,8175	2,4931
5.4	0,5021	1,7952	2,7623

For forsøkene med to hindringer, forsøk 5.1-5.3, var gjennomsnittsverdiene av TKE jevne. Konturene fra Matlab viste også lik oppførsel for de tre forsøkene, med lav TKE over et stort omfangsområde. Forsøk 5.2 hadde en litt høyere gjennomsnittsverdi for TKE enn forsøk 5.1 og 5.3, og basert på denne verdien ble forsøk 5.2 valgt for de avsluttende simuleringene. Konturen av forsøk 5.2 er vist til venstre i figur 5.8.



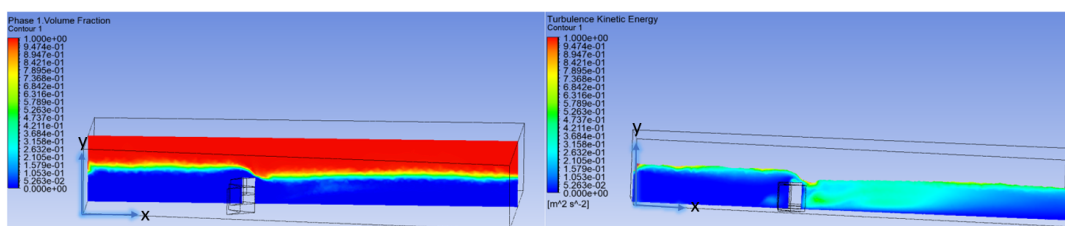
Figur 5.8: Kontur av TKE for forsøk 5.2 og forsøk 5.4

Forsøk 5.4 inneholdt tre hindringer, og resultatene fra modelleringen viser at gjennomsnittlig TKE nesten er doblet sammenlignet med simuleringmodellene med to hindringer. På grunn av den høye turbulensdannelsen var det forventet en lavere gjennomsnittshastighet for dette forsøket sammenlignet med de andre forsøkene, men den samlede hastigheten viser seg å være høyere enn hastigheten for forsøk 5.1-5.3. Konturen fra Matlab, presentert til høyre i figur 5.8, viser at dette kan skyldes høye verdier av TKE over et lite omfangsområde.

5.4.9 Steg 6 - Avsluttende simuleringer i 3D

Ved å bruke simuleringmodellen for 3D skapt i steg 1 og 2, og videre kombinere denne med resultatene fra steg 3, 4 og 5 ble simuleringmodellene for steg 6 bestemt. Det ble simulert tre ulike forsøk med del 3 av utløpet som simuleringmodell. Forsøk 6.1 er en modell uten hindringer som skulle danne et utgangspunkt for sammenligning for de andre forsøkene. Forsøk 6.2 ble basert på de beste resultatene fra steg 3 og 5, og forsøk 6.3 ble basert på en kombinasjon mellom de beste resultatene fra steg 3, 4 og 5. I vedlegg S er simuleringresultatene fremlagt.

Hindringene i forsøk 6.2 ble plassert på samme måte som i forsøk 5.4, da disse ga det beste resultatet i steg 5. Disse hindringene var plassert relativt tett, med et mellomrom på kun 2,75 m. Forsøk 6.3 inneholdt hindringer fra forsøk 4.4 og 4.11 kombinert med en distanse tilsvarende avstanden mellom hindringene i forsøk 5.2. De innsatte hindringene hadde en høyde på 1,8 meter. Høyden ble valgt på bakgrunn av vanndybden i området, der det var ønskelig å ha en hindring som lå rett under vannoverflaten. Siden hindringene endte rett under vannoverflaten ble det øverste vannlaget skjøvet oppover, og det ble dermed skapt en vertikal bevegelse i strømmingen som gjerne fører til ekstra utlufting. Ved å undersøke volumfraksjonen for et xy-plan som skjærer hindringen på midten, presentert i figur 5.9, vises det at vannet beveger seg over hindringen.



Figur 5.9: Volumfraksjon av fasene og TKE vist som kontur i xy -plan for forsøk 6.2

I steg 2 kom det frem at innsetting av hopp i simuleringmodellen førte til et felt med turbulensdannelse som et resultat av hoppets påvirkning. Som vist til høyre i figur 5.9 vil samme effekt oppstå i nedslagsområdet for vannet som passerer på oversiden av hindringen. Dette turbulensområdet er likevel ikke like intenst som turbulensområdet som oppstod etter hoppet i forsøk 2.1. Volumfraksjon og TKE for forsøk 6.3, samt større versjon av figur 5.9 er gitt i vedlegg S.

5.4.10 Steg 6 - Modellering

I dette steget måtte avstandene i intervallene endres fra 0,01 til 0,1 for at Matlab skulle klare å kjøre skriptet. Større avstander førte til færre innhentede verdier, men dette påvirket sannsynligvis ikke resultatet i stor grad.

Den gjennomsnittlige verdien av TKE beregnet for forsøkene i dette steget kan ikke sammenlignes med de andre stegene, da dette steget inneholder en ekstra dimensjon å ta hensyn til. Tabell 5.6 presenterer de ulike gjennomsnittsverdiene modellert i Matlab, blant annet skjærspenningsverdiene.

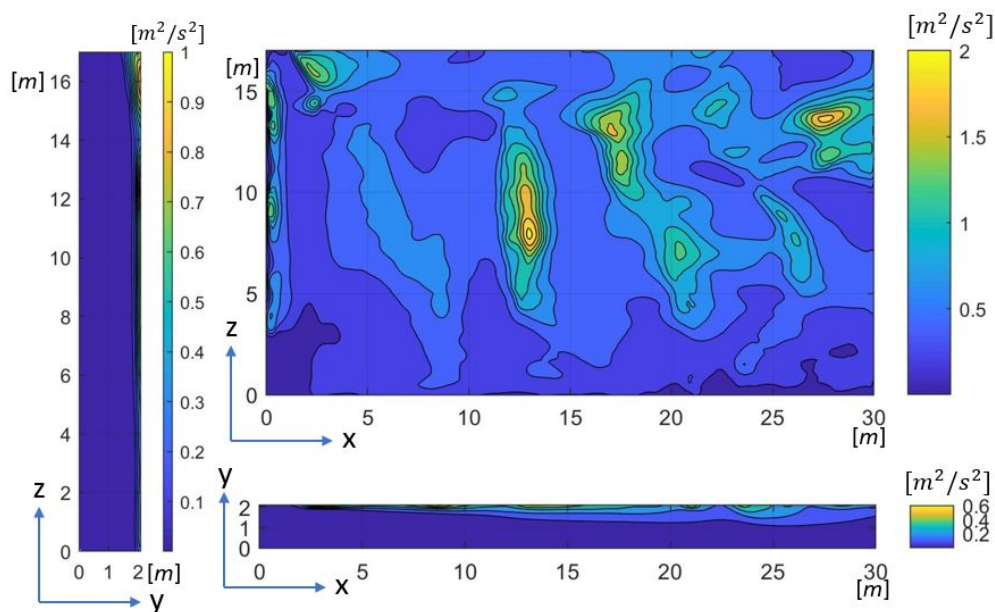
Tabell 5.6: Gjennomsnittsverdier for de avsluttende simuleringene for TKE, hastighet i x -retning, samlet hastighet og skjærspenning i steg 6

Forsøk	TKE [m ² /s ²]	Hastighet u [m/s]	Hastighet [m/s]	Skjærspenning [Pa]
6.1	0,1408	1,9420	1,9794	0,2663
6.2	0,1716	1,6219	1,7070	0,4036
6.3	0,1056	1,5851	1,7648	0,4716

Den gjennomsnittlige skjærspenningsverdien er basert på *Wall Shear Stress* fra Ansys, og resultatene viser at verdien øker med antall hindringer og veggareal i utløpet. Resultatene viser også at verdien ikke samsvarer med verdien for turbulensdannelse. På bakgrunn av dette ble det bestemt å forkaste forslaget om å bruke ligning 4.1 for utregning av en ny gassovermetningsverdi bak hindringene.

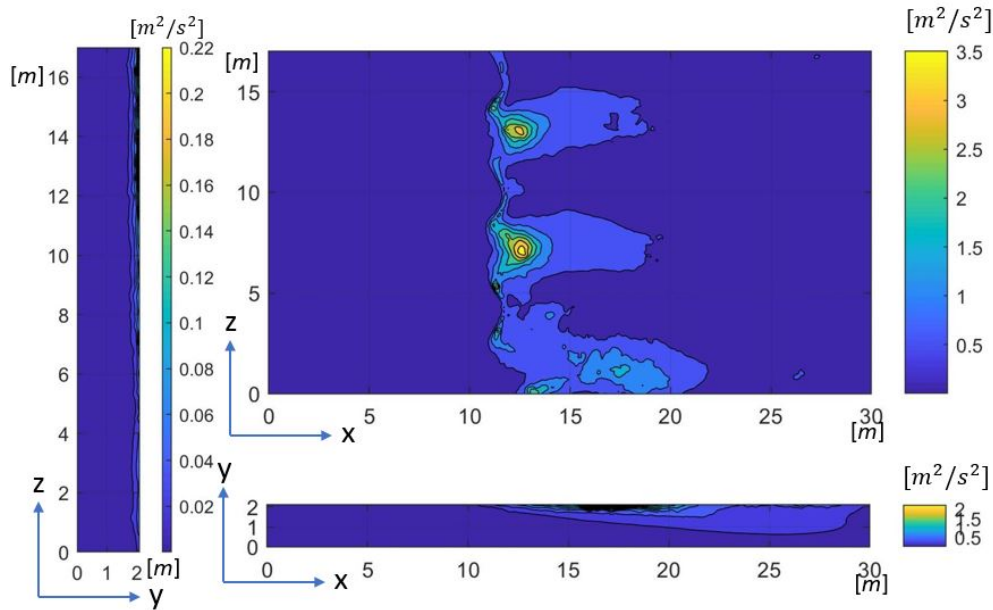
Turbulensintensiteten ble regnet ut for de ulike forsøkene ved å benytte gjennomsnittverdier for TKE og hastighet i ligning 2.6. Forsøk 6.1-6.3 fikk da gjennomsnittlige turbulensintensitetverdier på 15,48%, 19,81% og 15,03%. Disse verdiene er godt over 10% og blir derfor ansett som høy turbulensintensitet.

Gjennomsnittsverdiene viser at de modellerte resultatene fra forsøk 6.1 gir en høyere gjennomsnittlig TKE enn for forsøk 6.3. Dette var uventet, og det er usikkert hva som har ført til disse resultatene. Figur 5.10 viser konturene fra modelleringen for forsøk 6.1 i form av TKE. Til venstre i figuren er yz-planet, øverst til høyre vises xz-planet, og xy-planet er presentert nederst til høyre. Som en forenkling ble det kun laget kontur for en fremstilling av 17 meter i z-retning, og det ble ikke tatt hensyn til at bredden øker til 24 meter ved utløpets uttak.



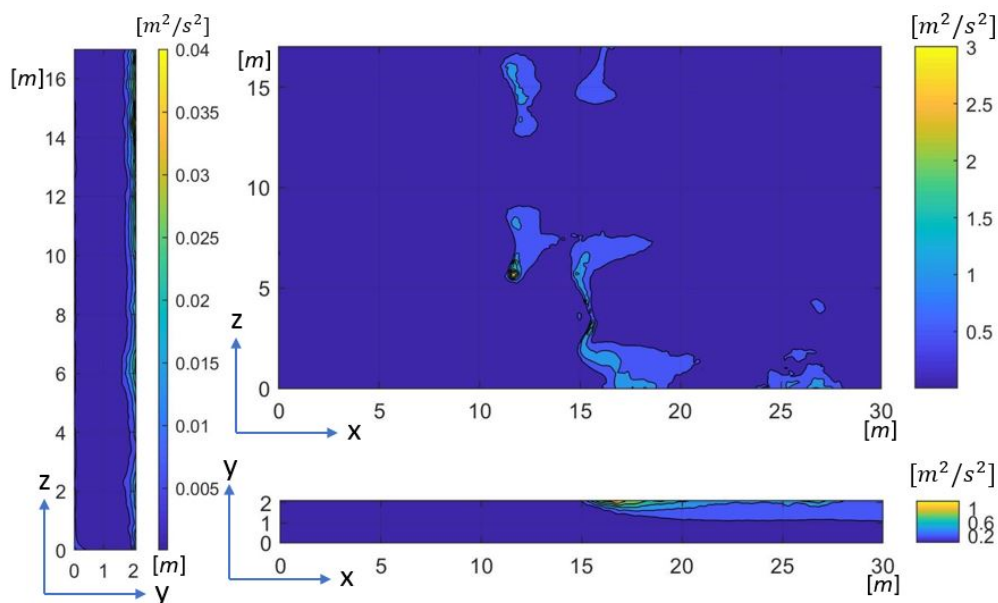
Figur 5.10: Kontur av TKE i xy-plan, xz-plan og yz-plan for forsøk 6.1

Konturene av xy -planet og yz -planet fremstår som forventet, med antydning til turbulensdannelse ved modellens vannoverflate. Konturen av xz -planet er derimot ikke som forventet, da forventet resultat var lave turbulensverdier over hele modellens plan. Det er mulig at turbulensdannelsen skyldes de turbulente strømmingene i modellen, men verdiene burde uansett vært lavere og konturen burde vært mer lik områdene uten hindringer i forsøk 6.2. Figur 5.11 viser konturene av forsøk 6.2 som inneholder tre hindringer.



Figur 5.11: Kontur av TKE i xy -plan, xz -plan og yz -plan for forsøk 6.2

Basert på 2D-simuleringene var det forventet at forsøk 6.2 ville få en høy turbulensdannelse med en utstrekning på 10-15 meter i området bak hindringen. Resultatene viser at turbulens dannes i området bak hindringene, men at turbulensen brer seg over et mindre område enn antatt. For å eventuelt øke turbulensdannelsen ytterligere kunne en andre kolonne med hindringer ha blitt plassert lengre ut i utløpet, men det er viktig å ta hensyn til at hastigheten da kunne blitt mer redusert og videre ført til oppdemming. Forsøk 6.2 viser ellers konturer som forventet, med turbulensdannelse langs vannoverflaten og i nærheten av hindringene. Målestokkene for forsøk 6.1-6.3 er forskjellige, og resultatene for forsøk 6.2 ville fremstått bedre enn for forsøk 6.1 dersom målestokken var lik. For forsøk 6.3 ble fire hindringer plassert i utløpet, og figur 5.12 viser konturene fra Matlab for de ulike planene.



Figur 5.12: Kontur av TKE i xy -plan, xz -plan og yz -plan for forsøk 6.3

Turbulensens omfangsområde er lite i dette forsøket, og i tillegg er målestokken nedjustert sammenlignet med forsøk 6.2. Gjennomsnittlig TKE gir også lavere resultater for forsøk 6.3 enn for forsøk 6.2. Disse resultatene kan skyldes flere ting, blant annet tar ikke forsøkene utført i 2D hensyn til hastighetsprofilen og kan derfor gi andre resultater enn for et likt forsøk utført i 3D. En annen årsak kan være at sammensetningen av hindringer i forsøk 6.3 ikke er ideell, og at hindringene ender opp med å redusere turbulensdannelsen fremfor å forsterke den. To av forsøkene som er benyttet for å bestemme sammensetningen i forsøk 6.3 ble hentet fra steg 4, der forsøkene ble utført med grensebetingelse satt til symmetri. Forsøkene fra steg 4 ble altså ikke undersøkt med påvirkning fra vegger, noe som kunne forandret resultatene.

5.5 Modellert reduksjon av gassovermetning

Ligning 1.2, fra kapittel 1.1.3 *Beregning av gassovermetning*, blir brukt for beregning av reduksjon av gassovermetning i utløpet. I rapporten *Modeling total dissolved gas production and transport downstream of spillway: Three-dimensional development and applications* [11] ble ligningen brukt for beregning av gassovermetningsdannelse nedstrøms et

flomløp. Ved å bytte ut siste ledd i ligningen kunne utgassingene i flomløpet beregnes og videre benyttes for beregning av reduksjon av gassovermetning i utløpet til Brokke kraftstasjon, da utgassingene både i utløpet og etter flomløpet vil skje på samme grunnlag.

De fleste av de konstante parametrene for utregning av nye gassovermetningsverdier er standardverdier for vann. Den molekylære diffusiviteten, D_m , ble beregnet for gassboblene. Gassboblene i Otra består av 31,6% oksygen og 68,4% nitrogen, og D_m ble derfor kalkulert ut fra den gitte raten mellom oksygen og nitrogen. Det ble antatt at nitrogen ville ha lik oppførsel som oksygen, og det ble derfor beregnet omtrentlige verdier for nitrogen og oksygen ut fra grafen for molekylær diffusivitet for oksygen og punktet for nitrogen. For å beregne reduksjon av gassovermetning fra startpunktet i del 3 til endepunktet i del 3 var det nødvendig å modellere gassovermetningens reduksjonsdifferanse mellom alle noder på xz-planet. Dette ble gjennomført ved bruk av for-løkker i Matlab som hentet inn forrige nodes verdi for beregning av den neste nodes verdi.

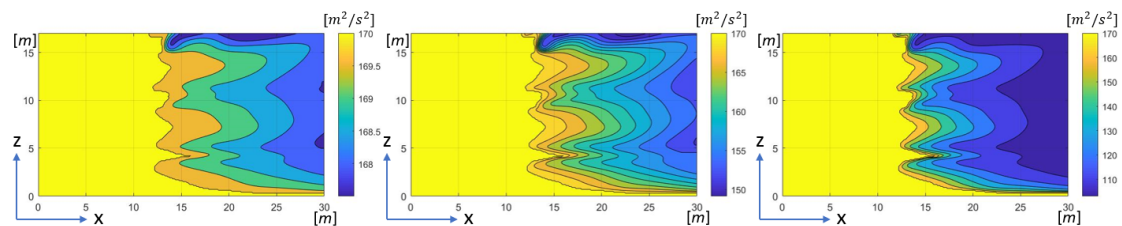
I rapporten *Modeling total dissolved gas production and transport downstream of spillway: Three-dimensional development and applications* blir gassovermetningens overføringskoeffisient for friskeilstrømning, β_2 , kalibrert til 150. Overføringsfaktoren burde i denne studien blitt kalibrert gjennom tette målepunkter, men i utløpet på Brokke er det kun ett målepunkt ved utløpets midtsøyle, og neste målepunkt med tilgjengelig data for denne studien er plassert 11 km nedstrøms utløpet. Distansen mellom målepunktene innebærer at det ikke er mulig å kalibrere β_2 med hensyn på det aktuelle utløpet, og ulike β_2 -verdier ble benyttet som forslag for modellering av gassovermetningsreduksjonene, som vist i tabell 5.7. Gassovermetningsverdiene ble valgt på grunnlag av omtrentlig maksimal verdi for gassovermetning, 170%, omtrentlig maksimal gjennomsnittlig verdi, 150%, og en lavere verdi på 130% for å undersøke forskjellene i reduksjonen.

Tabell 5.7: Reduksjon av gassovermetning i del 3 av utløpet for forsøk 6.2 ved ulike gassovermetnings- og β_2 -verdier

Forsøk	Gassovermetningsverdi inn [%]	Gassovermetningsverdi ut [%]		
		$\beta_2=1,5$	$\beta_2=15$	$\beta_2=150$
6.2.1	170	168	154	106
6.2.2	150	149	138	104
6.2.3	130	129	123	102

Tabellen viser at β_2 -verdien har stor betydning for reduksjonen av gassovermetningsverdiene. β_2 -verdien representerer utvekslingen av gassovermetning mellom vannoverflaten og atmosfæren, hvor en høy β_2 -verdi fører til stor utlufting, og en lav β_2 -verdi gir lite utlufting. Resultatene viser at en realistisk reduksjon av gassovermetning ikke kan bli bestemt uten å kalibrere β_2 for utløpet først. Et alternativ hadde vært å benytte forsøk 6.1 for en omtrentlig kalibrering av β_2 , men da forsøk 6.1 ikke ga forventede resultater vil det være urealistisk å bruke disse simuleringresultatene for kalibrering.

Figur 5.13 viser forskjellen i konturene mellom den modellerte reduksjonen av gassovermetning ved ulike β_2 -verdi for forsøk 6.2.1. Konturene viser at gassovermetningen ligger stabilt på 170% de første 10 meterne i del 3 av utløpet frem til området der hindringene er plassert. Samtlige tilfeller viser at gassovermetningen vil bli påvirket av turbulensen dannet av hindringene i utløpet, men uten en korrekt kalibrert β_2 vil det ikke være mulig å konstantere i hvor stor grad utgassingen vil skje. En større versjon av figurene, samt figurer fra forsøk 6.2.2 og 6.2.3, er gitt i vedlegg T.



Figur 5.13: Modellert gassovermetning ved ulike β_2 for forsøk 6.2.1

Resultatene i tabell 5.7 for $\beta_2=150$ er sannsynligvis ikke realistiske da det er antatt at hindringene ikke vil danne nok turbulens til å redusere gassovermetningen i så stor grad. Resultatene fra $\beta_2=150$ vil derfor ikke bli undersøkt nærmere.

Ved å ta utgangspunkt i resultatene for $\beta_2=15$ vil gassovermetningen reduseres fra 170% til 154% i løpet av de 20 meterne fra hindringene og frem til der utløpskanalen treffer Ot-ra. Figur 4.8 som presenterer utgassingskonstantene for de 11 km mellom målestasjonen ved utløpet og målestasjonen ovenfor Hekni kan benyttes for å angi en omtrentlig utgassingskonstant ved 154% gassovermetning. Dersom K leses av ved 154% til 0,082

kan denne verdien benyttes i ligning 1.1 fra UniResearch Miljø for å bestemme den nye utgassingskonstanten ovenfor Tjurrmoen, og denne verdien blir beregnet til $G_{km}=121\%$. Dette tilsvarer en omtrentlig verdi på 108% ved Ose bro.

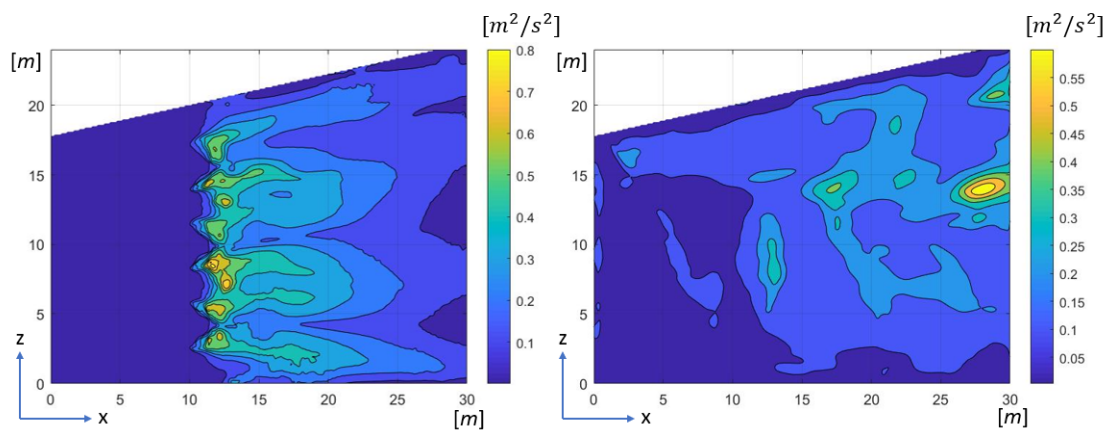
Ligning 1.1 fra UniResearch Miljø kan også benyttes for å regne ut utgassingskonstanten for de 20 meterne i utløpet. Verdien $K=13,91$ blir funnet for $\beta_2=15$ ved en gassovermetningsverdi inn på 170%. For sammenligning kan K regnes ut for de første 1,5 km av elva nedstrøms utløpet, og verdien blir beregnet til $K=0,2$. Med tanke på turbulensdannelsen i den naturlige elva sammenlignet med turbulensdannelsen for de plasserte hindringene i utløpet fremstår utgassingskonstanten ved $\beta_2=15$ som høyere enn forventet.

For $\beta_2=1,5$ ved en gassovermetning på 170% vil utgassingskonstanten for de 20 meterne i utløpet være $K=1,45$. Denne verdien er nærmere den utregnede utgassingsverdien for de første 1,5 km i elva, men det er usikkert om $K=1,45$ er mer riktig å bruke enn $K=13,91$. Dersom det er $\beta_2=1,5$ som gir de mest reelle resultatene vil dette tilsvare en minimal reduksjon av gassovermetningen i utløpskanalen. Den lineære linja i figur 4.8 og ligning 1.1 vil gi $G_{km}=110\%$ ved målestasjonen ovenfor Tjurrmoen. Disse resultatene gir en omtrentlig verdi på 104% ved Ose bro.

Ved utregning av de nye gassovermetningsverdiene ved $\beta_2=15$ og $\beta_2=1,5$ er den lineære linja i figur 4.8 brukt for avlesning av verdier. Denne linja er satt ut i fra enkelte punkter og innehar derfor mye usikkerhet. Dersom gassovermetningsverdiene ble beregnet for enkeltpunktene i figuren ville $\beta_2=15$ hatt en litt lavere gassovermetningsverdi ved Tjurrmoen; $G_{km}=120\%$. For $\beta_2=1,5$ ville gassovermetningsverdien vært høyere ved å benytte enkeltpunktene fremfor linja, med $G_{km}=122\%$. Enkeltpunktene i figuren inneholder også feilkilder på grunn av gjennomsnittsverdien på tidsforskyvingen. Resultatene av gassovermetningen ved Tjurrmoen og Ose bro er derfor bare omtrentlige verdier. Resultatene fra forsøk 6.2.2 og 6.2.3 vil ha samme karakteristikk som forsøk 6.2.1 for utregning av nye gassovermetningsverdier, men utregninger for disse forsøkene vil ikke bli presentert da forsøk 6.2.1 har de tydeligste målingsendringene.

Ved utløpets slutt vil ikke den reduserte gassovermetningsverdien være innenfor den anbefalte grenseverdien for gassovermetning dersom β_2 kalibreres til 15. For å sikre at gassovermetningen reduseres nok i utløpet viser modelleringer i Matlab at kalibreringen bør vise $\beta_2=115$ dersom gassovermetningen er 170%. Dersom kalibreringen gir lavere β_2 -verdier enn 115 bør andre tiltak vurderes for reduksjon av gassovermetning i Otra.

Den gjennomsnittlige dybdeberegningen for TKE for forsøk 6.2 er gitt til venstre i figur 5.14. Ved å sette inn en kontur for TKE i xz-planet for en bestemt y-verdi kan TKE i akkurat denne y-verdien observeres, mens gjennomsnittlig dybde gjennomfører gjennomsnittsberegninger og plasserer planet i dybden som fremstiller et gjennomsnittlig resultat for y-aksen. I dette tilfellet har y-verdien en maksimumgrense på 2,1. Grensen sørger for at den gjennomsnittlige dybdeberegningen kun tar hensyn til verdier i modellens volumfraksjon for vann, og TKE-verdier fra volumfraksjonen av luft blir forkastet i gjennomsnittsberegningen. Figuren viser at det oppstår turbulens bak hindringene, men at denne turbulensen ikke har en høy verdi gjennom hele vanddybden. Områdene mellom hindringene viser høyest TKE, men den gjennomsnittlige TKE-verdien ble likevel ikke høyere enn $0.8 \text{ m}^2/\text{s}^2$ i de mest turbulente områdene. For sammenligning ble det utført en gjennomsnittlig dybdeberegning for forsøk 6.1, vist til høyre i figuren. Konturen viser at den gjennomsnittlige TKE-verdien var lavere enn for forsøk 6.2, men verdien var fortsatt høyere enn forventet.



Figur 5.14: Kontur av TKE ved gjennomsnittlig dybde i xz-planet for forsøk 6.2

6 Feilkilder

I rapportens resultat- og diskusjonsdel har flere feilkilder blitt nevnt. Dette kapittelet tar kun for seg en oppsummering av det som blir ansett som de største feilkildene for resultatene.

CFD-modellering er krevende og har mange faktorer som kan føre til feil i simuleringsmodellen. Unøyaktige verdier for inngangsdata og parametre, samt valg av turbulensmodell, kan gjøre at simuleringsresultatene blir mangelfulle eller ukorrekte. Den prognostiske modellen kan være utilstrekkelig for simuleringene, og den tilgjengelige datakraften kan begrense resultatenes nøyaktighet. Vannmassene i utløpet fra Brokke består av både turbulente strømninger og tofasestrømninger, og begge disse faktorene gjør også at resultater fra CFD-modellen blir mer upålitelige.

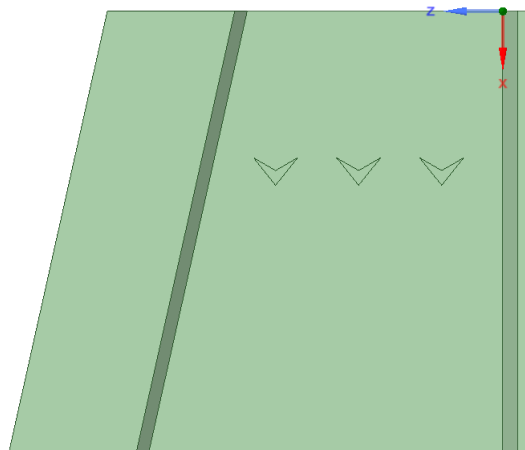
Turbulens er kaotiske og tilfeldige bevegelser i strømninger, og disse bevegelsene er derfor vanskelig å forutsi. En simuleringsmodell kjørt med like innstillinger gjentatte ganger vil kunne gi varierende resultater. For å validere resultatene burde hvert forsøk blitt simulert flere ganger, men på grunn av tidsmangel i Ansys var ikke dette mulig. Dersom modellen ikke oppnår konvergens, som for simuleringene i Fluid Flow, vil usikkerheten rundt simuleringsresultatene være ekstra høy, og dersom samme modell blir simulert igjen i disse tilfellene kan det være store differanser i resultatdataene. Da resultatdataene fra Fluid Flow ikke kunne valideres ble de forkastet.

Matematiske modeller inneholder mange feilkilder, og resultatene gir derfor bare et delvis svar på hvordan ulike hindringer vil påvirke utløpets turbulens. En fysisk modell ville gitt mer korrekte resultater i de fleste tilfeller, men dersom størrelsen på den fysiske modellen reduseres oppstår det problemer for gassovermetningsberegningene, da forholdstallet mellom vannet og gassovermetningsboblene endres. Som nevnt i avsnitt 1.1.4, *Gassovermetningens egenskaper*, har effekten av ulike boblestørrelser blitt undersøkt. Studien viser at bobler med en radius på 0,18 mm bruker lengre tid på å løses opp enn bobler med mindre eller større radius. Å benytte bobler av lavere størrelsesorden ville derfor heller ikke være en mulighet da disse boblene ville hatt en annen oppførsel enn boblene i utløpet. Dette gjør at sammenligningsgrunnlaget mellom en forminskert fysisk modell og det faktiske utløpet blir svekket.

7 Konklusjon

Hovedformålet for studien har vært å undersøke om hindringer kan plasseres i utløpet fra Brokke kraftstasjon for å redusere gassovermetningen i Otra. CFD-simuleringer gjennomført i Ansys Fluent viste at hindringer med utstrekning over hele modellens bredde ga gode resultater for turbulensdannelse, men på grunn av faren for oppdemming i disse tilfellene ble smale hindringer hovedfokuset for denne studien.

Resultatene viste at simuleringsmodellen med tre hindringer med en vinkel på 120° plassert tett på en linje i utløpet, vist i figur 7.1, ga høyest gjennomsnittlig TKE over et gitt område. Studien bekrefter at turbulensdannelsen skapt av hindringene fører til reduksjon av gassovermetningen. For $\beta_2=15$ ble gassovermetningen redusert fra 170% til 154% over de siste 20 meterne av utløpet, og for $\beta_2=1,5$ ble gassovermetningen redusert fra 170% til 168% over den samme strekningen. β_2 må kalibreres for området for å fastslå eksakt hvor stor gassovermetningsreduksjonen vil være.



Figur 7.1: *Hindringsplasseringen som ga høyest gjennomsnittlig TKE*

Dersom gassovermetningens startverdi er 170% må β_2 være minst 115 for å få en verdi innenfor den anbefalte grenseverdien for gassovermetning på maksimum 110% ut av utløpet. Dersom β_2 blir kalibrert til en lavere verdi enn dette bør andre tiltak vurderes for reduksjon av gassovermetning i Otra.

8 Videre arbeid

Resultatene for denne studien er ikke sikre før β_2 er kalibrert. For å kunne sette en endelig konklusjon for studien bør β_2 bli kalibrert ved hjelp av flere målestasjoner i utløpet. Dersom β_2 blir kalibrert riktig vil resultatene kunne avgjøre om hindringene skaper nok turbulens i utløpet til å redusere gassovermetningen til et ønsket nivå i Otra.

For å øke turbulensdannelsen kan dynamiske hindringsformer undersøkes. En turbin kan tilføre mer vertikal bevegelse i vannet enn en stillestående hindring og ville mest sannsynlig luftet ut vannet bedre. Den vertikale bevegelsen kan også skapes ved å for eksempel lage terskler med hopp i utløpet. Disse terskelene må undersøkes for å avklare at de ikke fører til oppdemming i utløpet, noe som kan påvirke kraftstasjonens virkningsgrad.

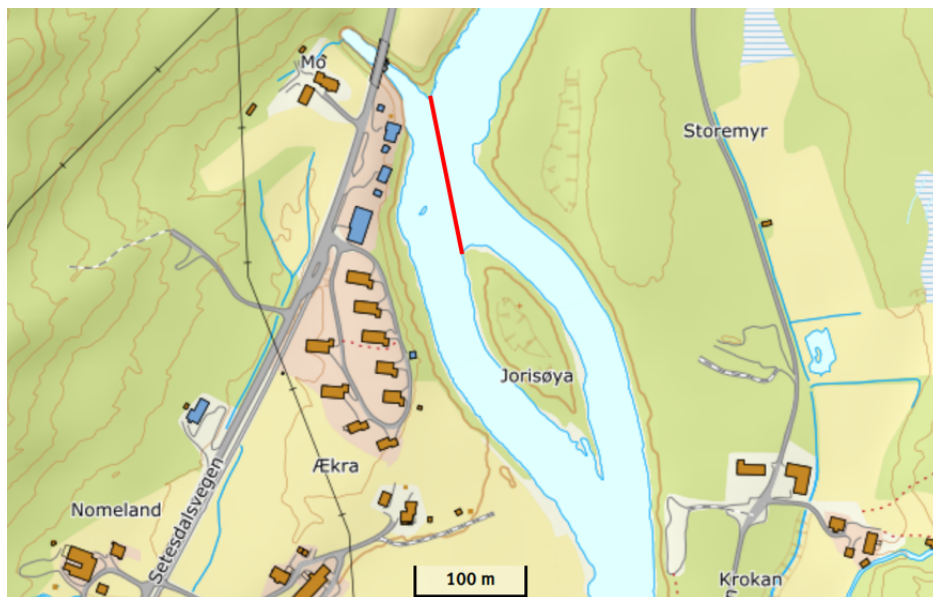
Muligheten for oppdemming bør også undersøkes for andre tiltak. Det kan være interessant å undersøke hvor stor prosentandel av utløpet som kan fylles opp med hindringer før det påvirker vannhøyden, og om vannet vil bevege seg fortere rundt hindringene fremfor å skape oppdemming. Det bør utføres forsøk for å fastslå hvor det kritiske punktet for oppdemming er ved plassering av hindringer etter utløpets stigning. Det kan også undersøkes om innsnevring av del 3 av utløpet vil føre til økt hastighet i området. Ved høyere hastighet vil turbulensen sannsynligvis bli mer intens bak hindringene, men ved innsnevring av utløpet kan faren for oppdemming øke, og dette burde bli tatt hensyn til ved eventuelt videre arbeid.

Simuleringer med maksimal vannføring er ikke utført. Gassovermetningstoppene oppstår ofte i perioder hvor det er høy vannføring i bekkeløpsinntakene. Ved høy vannføring er det forventet at høyere verdier av TKE oppstår bak hindringene, og simuleringer ved høy vannføring gjennom Brokke kraftstasjon bør gjennomføres for å se hvordan dette påvirker resultatene.

Primært har simuleringer med større hindringer blitt gjennomført. Å undersøke hvordan mindre objekter vil påvirke vannets strømminger kan derfor være interessant. For å utnytte utløpets utforming kan muligheten for installasjon av hindringer på midtsøyla undersøkes. Flere smale hindringer med utforming for vertikal bevegelse kan bli plassert fra vegg til midtsøyle i utløpet. Vertikal bevegelse kan for eksempel bli skapt av flere hindringer med

utforming som hopp plassert i ulike høyder langs midtsøylen.

Et alternativt tiltak som kan undersøkes er å forlenge utløpskanalen til Brokke ved plassering av en skillevegg som vist i figur 8.1. Her må det undersøkes om vannføringen vil bli for stor/liten på hver side av veggen, og da spesielt i flomperiodene. Dersom en slik vegg kunne blitt plassert ville vanndybden og bredden i den naturlige elva gitt bedre vilkår for raskere utgassing, samt et større område for innsetting av hindringer.



Figur 8.1: Plassering av en skillevegg for å forlenge utløpskanalen

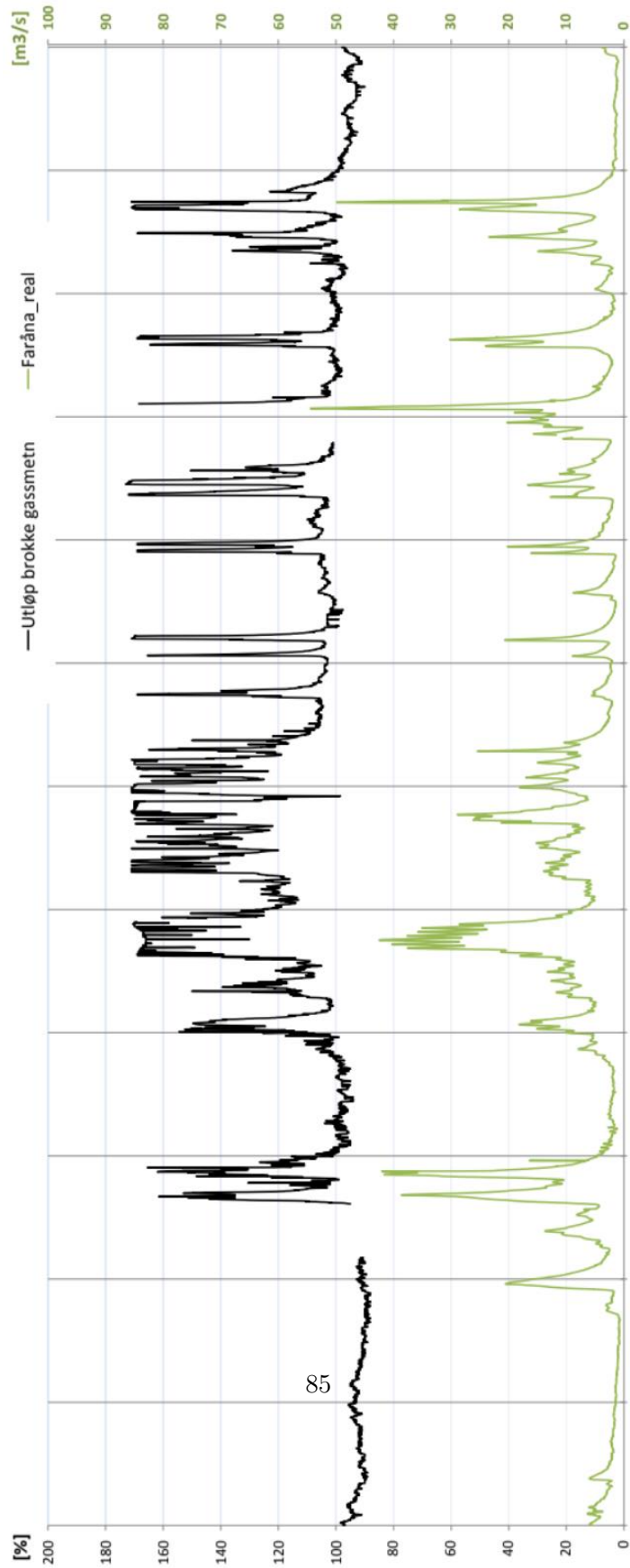
9 Referanser

- [1] Pulg U., et. al. Gassmetning i Otra nedenfor Brokke kraftverk. 2016.
- [2] Skagerak kraft. Brokke. <https://www.skagerakkraft.no/brokke/category1340.html> (Hentet 09.02.2019).
- [3] Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. Dissolved Gas Supersaturation. 1999.
- [4] Vannregion Agder. Regional plan for vannforvaltning i vannregion Agder 2016-2021. 2015.
- [5] Fjellbakk S.S., Molaug E. Brokke kraftstasjon - turbulensanalyse for redusering av gassovermetning. 2018.
- [6] Komiteen for undersøkelse av gassovermetning. *Problemer med luftovermetning i vann fra kraftverk*. Vassdragsregulantenenes forening, kap.4.2, 1984.
- [7] Pulg U., et. al. Påvirkning fra gassovermetning på bunndyr i Otra nedstrøms Brokke. 2017.
- [8] Pulg U., et. al. Gassovermetning i vassdrag – en kunnskapsoppsummering. 2018.
- [9] Weitkamp D. E., Katz M. A Review of Dissolved Gas Supersaturation Literature, Transactions of the American Fisheries Society, 109:6, 659-702. 1980.
- [10] Pulg U., et. al. Gassmetning i Otra nedenfor Brokke 2016-2017 og analyse av utgassing. 2016.
- [11] Weber L., et. al. Modeling total dissolved gas production and transport downstream of spillway: Three-dimensional development and applications. 2010.
- [12] Politano M. S., et.al. A multidimensional two-phase flow model for the total dissolved gas downstream of spillways. 2007.
- [13] Graebel W. P. *Engineering Fluid Dynamics*. Taylor and Francis, 2002.
- [14] von Karman T. . The Fundamentals of the Statistical Theory of Turbulence. 1937.

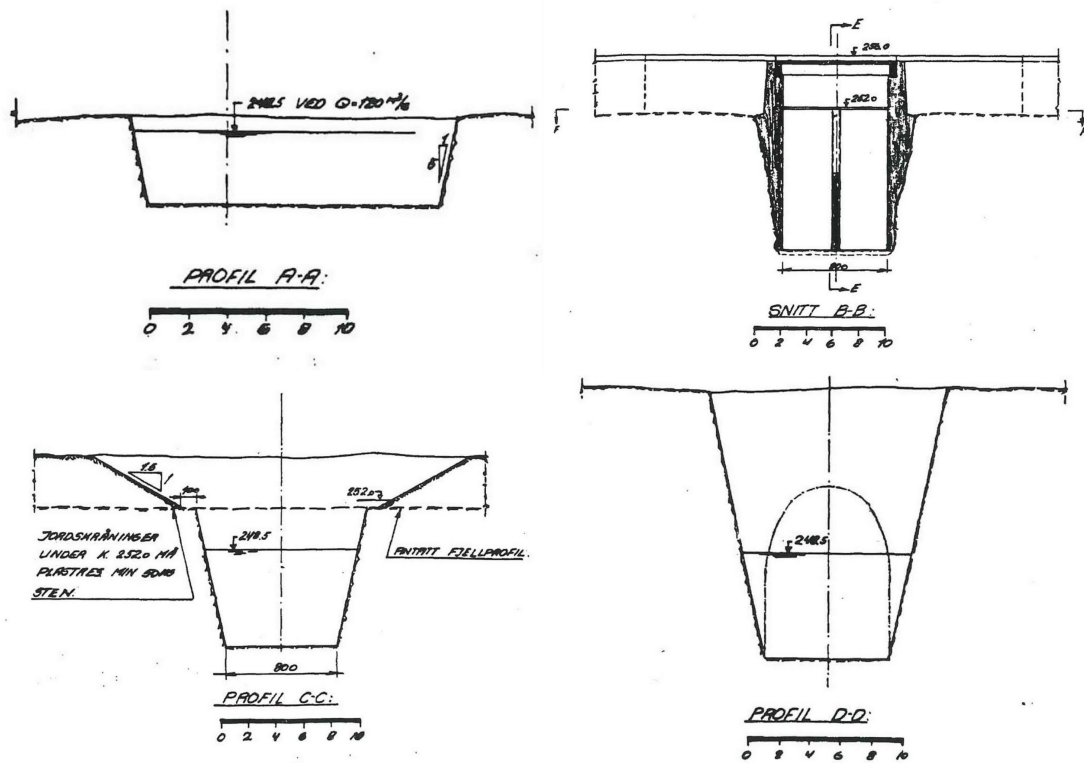
- [15] Høgskolen i Bergen. Laminær og turbulent strømming. Årstall ukjent.
- [16] Westenbroek S. M. Estimates of Shear Stress and Measurements of Water Levels in the Lower Fox River near Green Bay, Wisconsin. <https://pubs.usgs.gov/sir/2006/5226/> (Hentet 15.01.2019).
- [17] MIT Education. Basics of Turbulent Flow. Årstall ukjent.
- [18] Simudel Solutions. Basics of Turbulence Modeling. <http://www.simudel.com/basics-of-turbulence-modeling/> (Hentet 22.02.2019).
- [19] Store norske leksikon. Reynolds' tall. https://snl.no/Reynolds%27_tall (Hentet 12.02.2019).
- [20] Li R., et.al. Field observation of total dissolved gas supersaturation of high-dams. 2011.
- [21] Stull R. B. *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publishers, 1. edition, kap.1, 1988.
- [22] Cushman-Roisin B. *Environmental fluid mechanics*. John Wiley & Sons Ltd., 1. edition, kap.8, 2014.
- [23] ANSYS Fluent. 7.2.2 Determining Turbulence Parameters. <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node217.htm> (Hentet 02.04.2019).
- [24] Koziol A. P. Turbulent kinetic energy of water in compound channel. 2011.
- [25] Kuzmin D. Introduction to Computational Fluid Dynamics. <http://www.mathematik.uni-dortmund.de/~kuzmin/cfdintro/lecture1.pdf> (Hentet 04.03.2019).
- [26] Ramboll. Computational Fluid Dynamics (CFD). <http://www.ramboll.no/tjenester/bygg-og-arkitektur/vvs/cfd> (Hentet 04.03.2019).
- [27] ANSYS Inc. Simulation Software Products. <https://www.ansys.com/products> (Hentet 03.05.2019).
- [28] I/S Øvre Otra. Plantegninger. 1961, upublisert materiale.

- [29] ANSYS Inc. Choosing Between Linear and Higher Order Elements. https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/ans_mod/Hlp_G_MOD2_4.html (Hentet 21.03.2019).
- [30] ANSYS Inc. Fluent Documentation. <http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node1.htm> (Hentet 03.04.2019).
- [31] Fluent Incorporated. 20.3.2 The Euler-Euler Approach. <http://jullio.pe.kr/fluent6.1/help/html/ug/node650.htm> (Hentet 05.04.2019).
- [32] The Engineering Toolbox. Diffusion Coefficients of Gases in Water. https://www.engineeringtoolbox.com/diffusion-coefficients-d_1404.html?fbclid=IwAR1qiTzf0a30318adWFW0xsjh4FDT1p2SHwNIPSa7EwPEyyfMY1xnq0Zt6A (Hentet 30.04.2019).

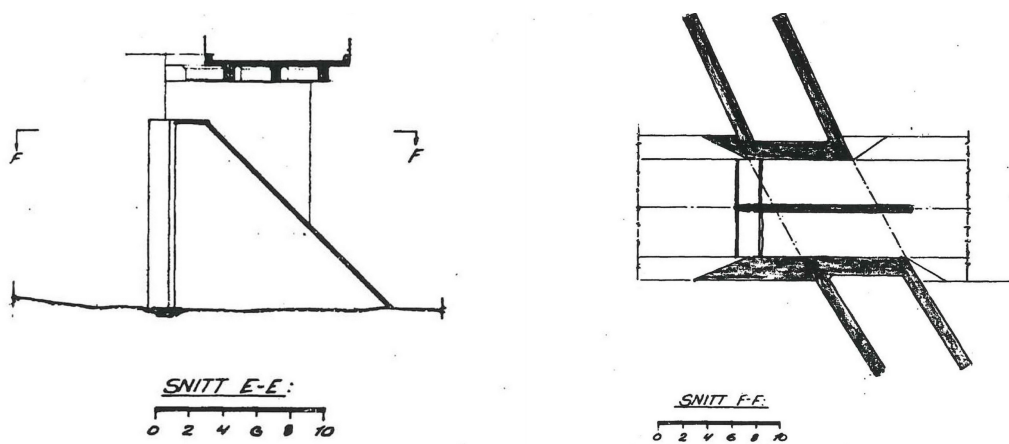
A Vedlegg - Korrelasjon gassovermetning og vannføring bekkeløp



B Vedlegg - Plantegninger utløp Brokke



Figur B.1: Plantegninger av profiler i utløpet [28]



Figur B.2: Plantegninger av snitt E-E og F-F i utløpet [28]

C Vedlegg - Informasjon om måledata

Tabell C.1: *Informasjon om måledata fra UniResearch Miljø 2015*

Målestasjoner	Antall målinger	Dato	Registrert temperatur?
Utløp Brokke kraftstasjon	3361	11.sep-09.nov	Nei
Ovenfor Tjurmoen	3346	11.sep-19.nov	Nei
Nedenfor Tjurmoen	1142	11.sep-15.sep, 12.okt-13.okt, 01.nov-19.nov	Nei
Blekeløpet	3349	11.sep-19.nov	Nei
Utløp Hekni kraftstasjon	3214	11.sep-19.nov	Ja
Ose bro	1846	11.sep-15.okt, 20.okt-31.okt, 10.nov-14.nov	Ja

Tabell C.2: *Informasjon om måledata fra UniResearch Miljø 2018*

Målestasjoner	Antall målinger	Dato	Registrert temperatur?
Utløp Brokke kraftstasjon	4199	04.okt-31.des	Ja
Ovenfor Tjurmoen	4209	04.okt-31.des	Nei
Nedenfor Tjurmoen	2530	04.okt-15.nov, 20.des-31.des	Ja
Utløp Hekni kraftstasjon	4234	04.okt-31.des	Ja

close all Vedlegg - Matlabskript - Analyser

```
close all;
clear;
clc;

%Hentet inn verdier fra Excel
T = readtable('UtBrokke15.xlsx') ;

S = readtable('OvTjurrmoen15.xlsx') ;

U = readtable('NedTjurrmoen15.xlsx');

%Plottet grafene
figure;
plot(T.(1),T.(2),'b','LineWidth',0.5);
hold on;
plot(S.(1),S.(2),'r','LineWidth',0.5);
plot(U.(1),U.(2),'k','LineWidth',0.5);
xlabel('Måleperiode','FontSize',16)
ylabel('Gassovermetning [%]','FontSize',16)
legend('Utløp Brokke','Ovf. Tjurrmoen','Ndf.
Tjurrmoen','location','northeast')
set(gca,'FontSize',12)
grid;
hgexport(gcf, 'UtenDeflektor.jpg', hgexport('factorystyle'), 'Format',
'jpeg');

close all;
clear;
clc;

%Hentet inn verdier fra Excel
T = readtable('UtBrokke18.xlsx') ;

S = readtable('OvTjurrmoen18.xlsx') ;

U = readtable('Deflektor18.xlsx');

%Hentet inn verdier fra Excel
figure;
plot(T.(3),T.(5),'b','LineWidth',0.5);
hold on;
plot(S.(3),S.(5),'r','LineWidth',0.5);
plot(U.(3),U.(5),'k','LineWidth',0.5);
legend('Utløp Brokke','Ovf. Tjurrmoen','Ndf.
Tjurrmoen','location','northeast');
xlabel('Måleperiode','FontSize',16)
ylabel('Gassovermetning [%]','FontSize',16)
grid;
set(gca,'FontSize',12)
hgexport(gcf, 'MedDeflektor.jpg', hgexport('factorystyle'), 'Format', 'jpeg');
```

```

close all;
clear;
clc;

%Hentet inn verdier fra Excel
T = readtable('UtBrokke15.xlsx') ;

S = readtable('OvTjurrmoen15.xlsx') ;

U = readtable('NedTjurrmoen15.xlsx');

W = readtable('Blekelopet15.xlsx');

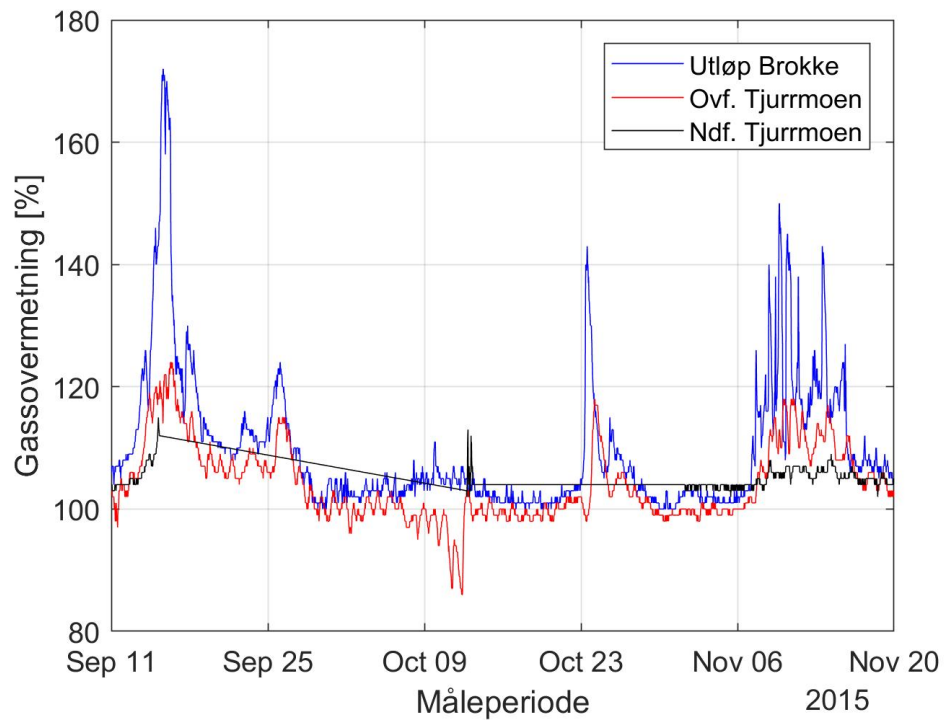
X = readtable('UtHekni15.xlsx');

V = readtable('Osebro15.xlsx');

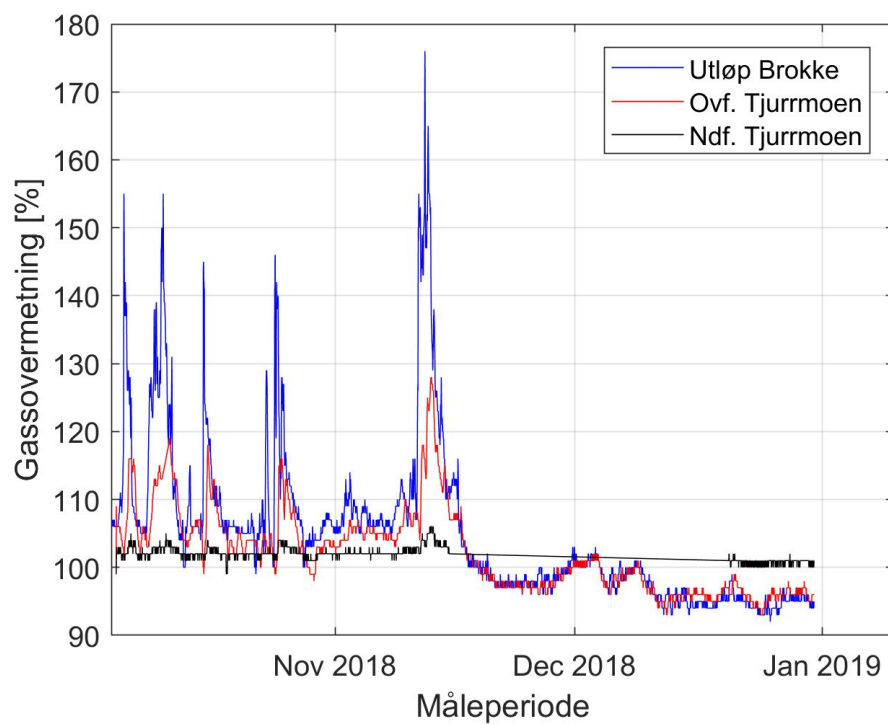
%Plottet grafene for utløp Brokke, ovenfor Tjurrmoen, utløp Hekni og Ose bro
figure;
plot(T.(1),T.(2),'LineWidth',0.5);
hold on;
plot(S.(1),S.(2),'LineWidth',0.5);
%plot(U.(1),U.(2),'LineWidth',0.5);
%plot(W.(1),W.(2),'LineWidth',0.5);
plot(X.(1),X.(2),'LineWidth',0.5);
plot(V.(1),V.(2),'LineWidth',0.5);
xlabel('Måleperiode','FontSize',16)
ylabel('Gassovermetning [%]','FontSize',16)
legend('Utløp Brokke','Ovf. Tjurrmoen','Utløp Hekni','Ose
Bro','location','northeast')
set(gcf,'FontSize',12)
grid;
hgexport(gcf, 'NedElva.jpg', hgexport('factorystyle'), 'Format', 'jpeg');

```

E Vedlegg - Gassovermetningsgrafer



Figur E.1: Gassovermetningen målt i utløp Brokke, ovenfor- og nedenfor Tjurrmoen demning i 2015



Figur E.2: Gassovermetningen målt i utløp Brokke, ovenfor- og nedenfor Tjurmoen demning i 2018

close all; Vedlegg - Matlabskript - Utgassingskonstant

```
clear;
clc;

% Avleste verdier
x=[110,120,130,140,150,160,170];
y=[0.02028,0.03242,0.05714,0.07778,0.08796,0.09121,0.10118];
xi=110:1:170;

method='spline'
yi=interp1(x,y,xi,method);

% Plottet figuren
figure;
plot(x,y,'*','LineWidth',0.5)
lsline
xlabel('Gassovermetning [%]','FontSize',16)
ylabel('Utgassingskonstant, K','FontSize',16)
set(gca,'FontSize',12)
grid;
hgexport(gcf,'TDGvK.jpg',hgexport('factorystyle'),'Format','jpeg');
```

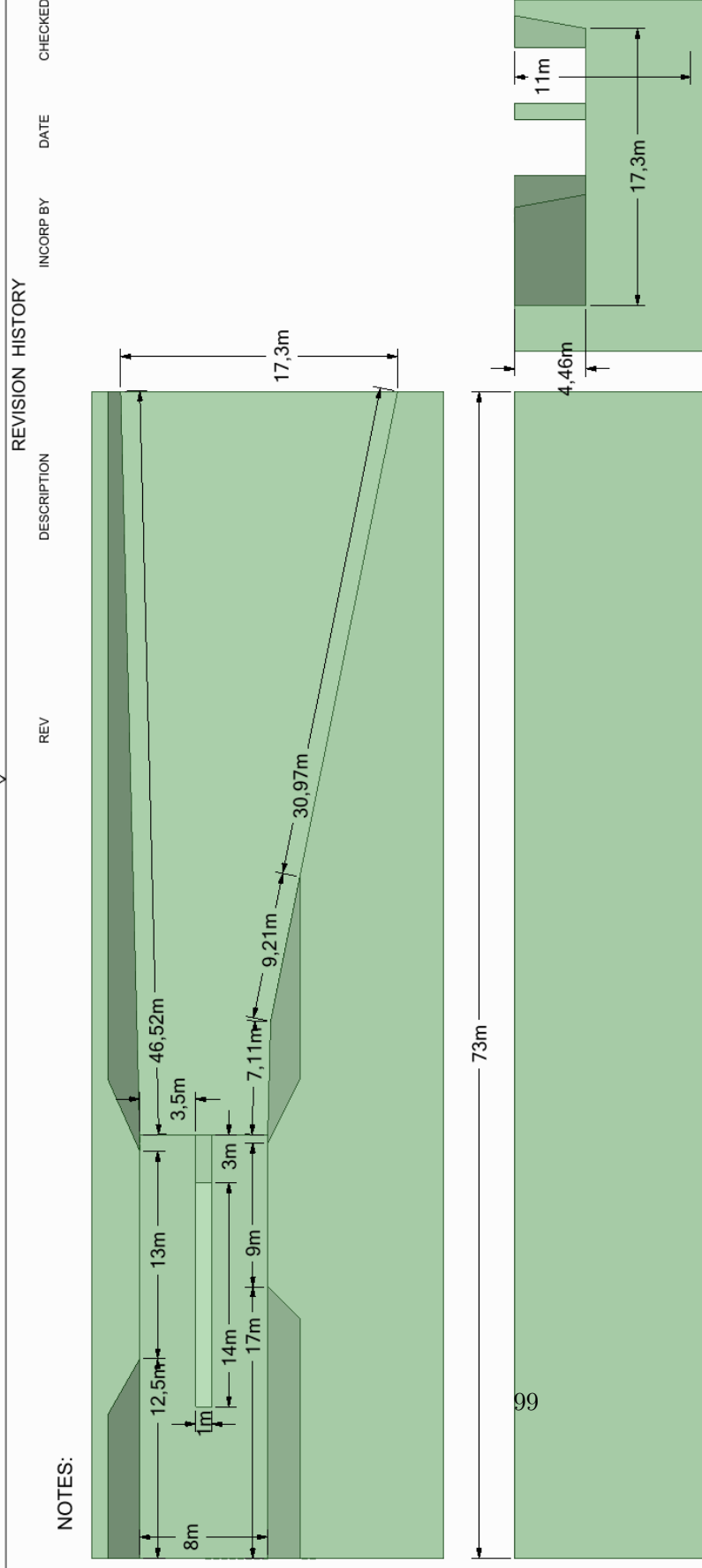

€ all Vedlegg - Matlabskript - TKE

```
close all;
clear;
clc;

grader=[100,120,130,140,145,150,155,160,180];
TKE=[0.0664,0.05182,0.062357,0.0356,0.05,0.072,0.0376,0.0811,0.00845];

figure;
plot(grader,TKE,'*','markersize',8);
xlabel('Vinkel [°]','FontSize',16)
ylabel('Turbulent kinetisk energi, TKE [m^2/s^2]','FontSize',16)
%legend('TKE','location','northwest')
set(gca,'FontSize',12)
grid;
hgexport(gcf, 'TlogTKEgrader.jpg', hgexport('factorystyle'), 'Format',
'jpeg');
```


H Vedlegg - Plantegninger steg 1



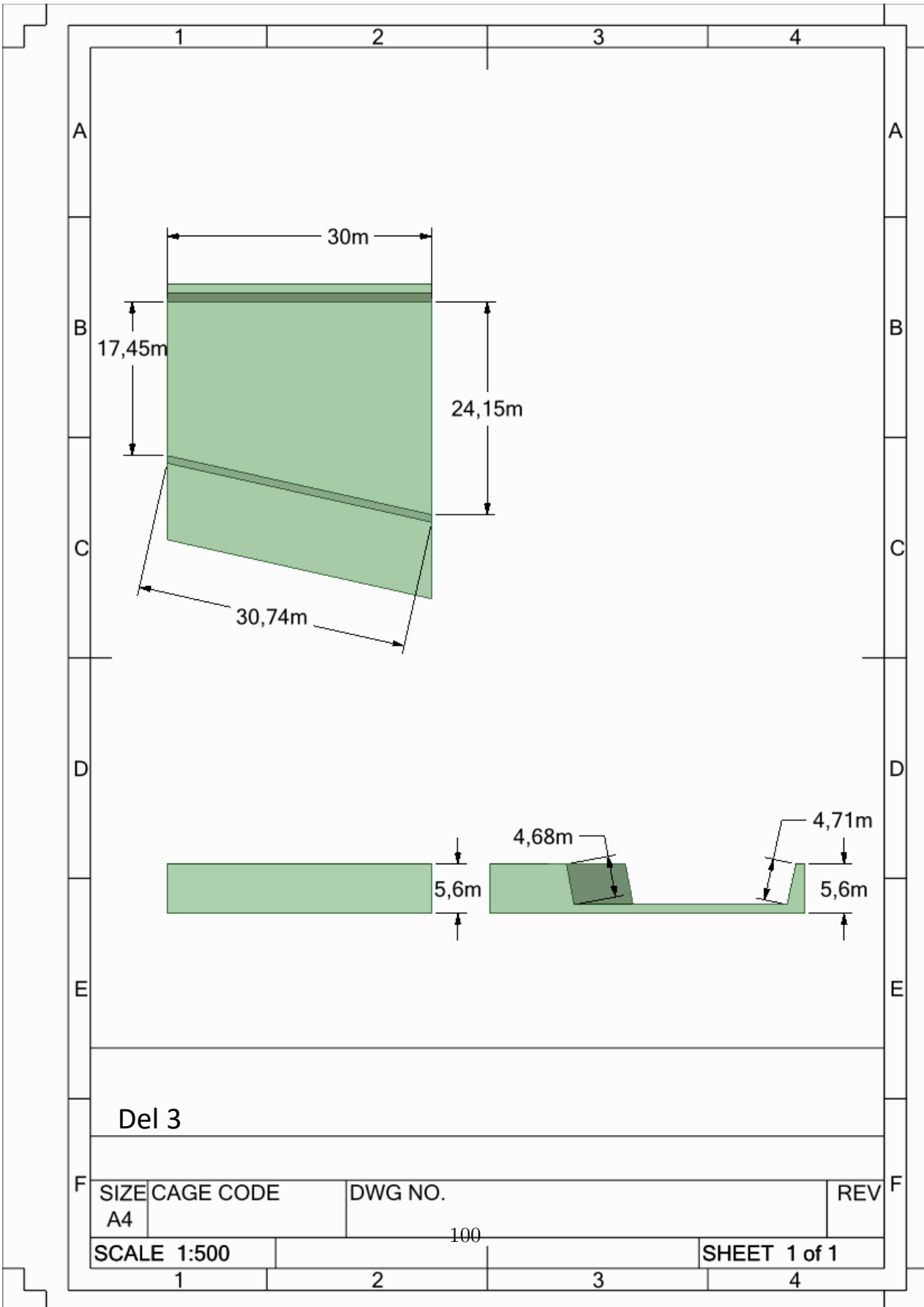
NOTES:

99

REV	DESCRIPTION	INCORP BY	DATE	CHECKED

<table border="1"> <tr> <th>2</th> <th>ITEM QTY</th> <th>REGD. NO.</th> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>		2	ITEM QTY	REGD. NO.				<table border="1"> <tr> <th>PART OR IDENTIFYING NO.</th> <th>NOMENCLATURE OR DESCRIPTION</th> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>		PART OR IDENTIFYING NO.	NOMENCLATURE OR DESCRIPTION												
2	ITEM QTY	REGD. NO.																					
PART OR IDENTIFYING NO.	NOMENCLATURE OR DESCRIPTION																						
<table border="1"> <tr> <th>INIT</th> <th>APPROVALS</th> <th>DATE</th> <th>INIT</th> <th>APPROVALS</th> <th>DATE</th> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>		INIT	APPROVALS	DATE	INIT	APPROVALS	DATE							<table border="1"> <tr> <th>SIZE</th> <th>CAGE CODE</th> <th>DWG NO.</th> <th>REV</th> </tr> <tr> <td>B</td> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>		SIZE	CAGE CODE	DWG NO.	REV	B			
INIT	APPROVALS	DATE	INIT	APPROVALS	DATE																		
SIZE	CAGE CODE	DWG NO.	REV																				
B																							
<table border="1"> <tr> <th>CONTRACT NO.</th> <th>MATERIAL</th> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>		CONTRACT NO.	MATERIAL			<table border="1"> <tr> <th>FINISH</th> <th>TREATMENT</th> <th>SIMILAR TO</th> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>		FINISH	TREATMENT	SIMILAR TO													
CONTRACT NO.	MATERIAL																						
FINISH	TREATMENT	SIMILAR TO																					
<table border="1"> <tr> <th>THIRD ANGLE PROJECTION</th> <th>USED ON APPLICATION</th> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>		THIRD ANGLE PROJECTION	USED ON APPLICATION			<table border="1"> <tr> <th>SCALE</th> <th>SHEET</th> </tr> <tr> <td> </td> <td> </td> </tr> </table>		SCALE	SHEET														
THIRD ANGLE PROJECTION	USED ON APPLICATION																						
SCALE	SHEET																						

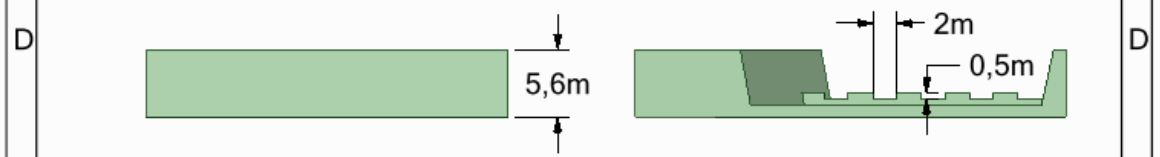
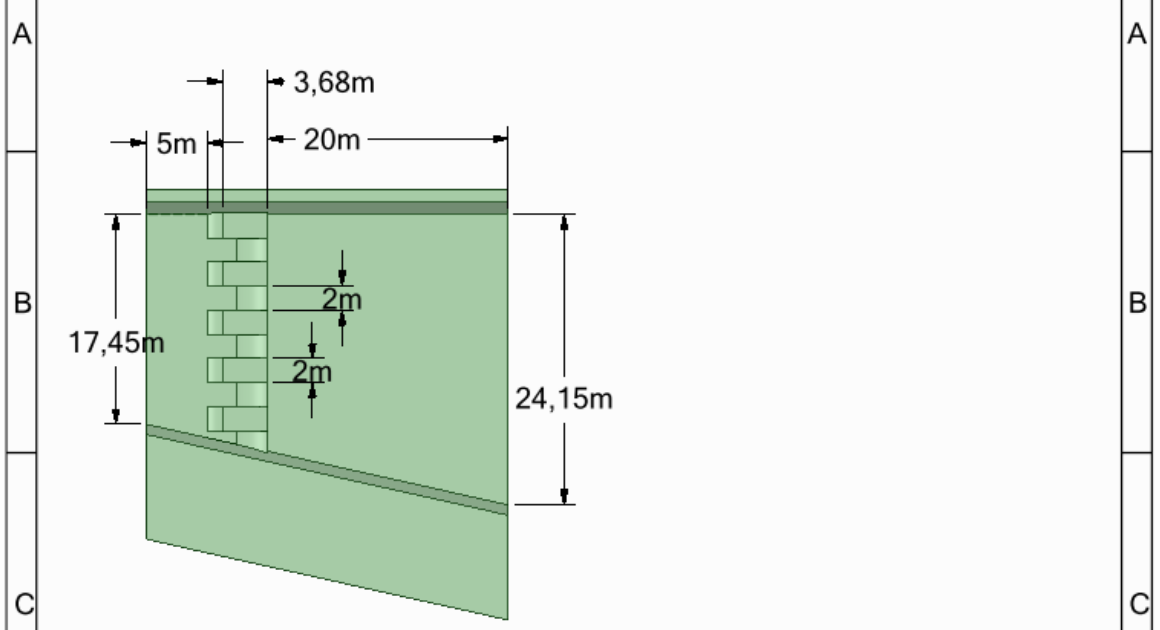
Del 2



Del 3

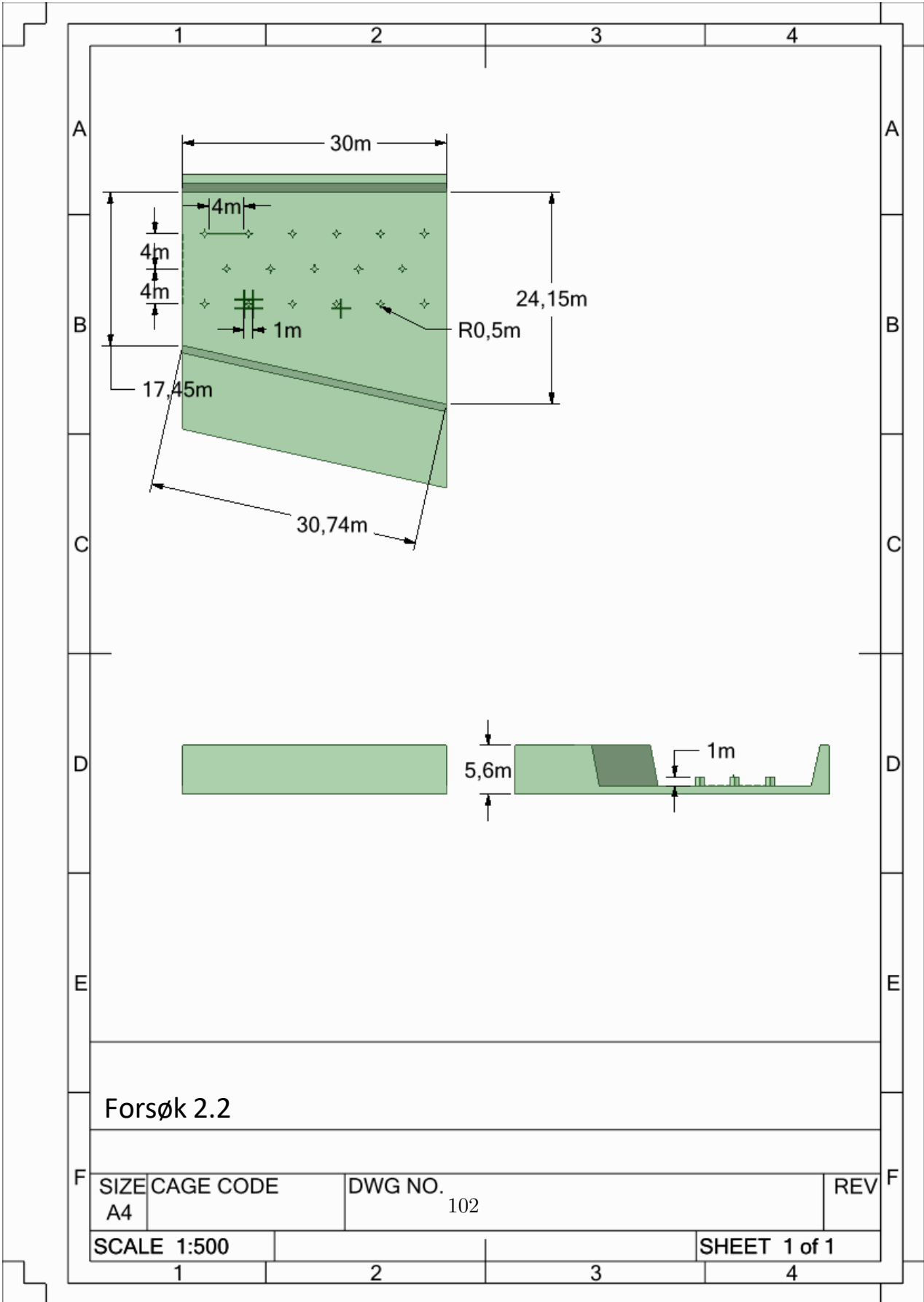
SIZE A4	CAGE CODE	DWG NO. 100	REV
SCALE 1:500		SHEET 1 of 1	

I Vedlegg - Plantegninger steg 2



Forsøk 2.1

SIZE	CAGE CODE	DWG NO.	REV
A4		101	
SCALE 1:500		SHEET 1 of 1	
1	2	3	4



Forsøk 2.2

SIZE A4	CAGE CODE	DWG NO. 102	REV
------------	-----------	----------------	-----

SCALE 1:500 SHEET 1 of 1

1 2 3 4

Matlab Vedlegg - Matlabskript - Steg 3,4 og 5

```
close all;
clear;
clc;

T=readtable('100gSB');
% Satte tabellverdiene som array
Tarray=[T.(2),T.(3),T.(6)]; %(x, y og TKE)
TIarray=[T.(2),T.(3),T.(7)]; %(x, y og TI)
Earray=[T.(2),T.(3),T.(8)]; %(x, y og epsilon)
Varray=[T.(2),T.(3),T.(9)]; %(x, y og turbulent viskositet)
Fxarray=[T.(2),T.(3),T.(4)]; %(x, y og x-hastighet)
Farray=[T.(2),T.(3),T.(5)]; %(x, y og samlet hastighet)

% Organiserte koordinatverdiene i stigende rekkefølge
Tarray1=sortrows(Tarray,[1 2]); %(først x, så y)
TIarray1=sortrows(TIarray,[1 2]); %(først x, så y)
Earray1=sortrows(Earray,[1 2]); %(først x, så y)
Varray1=sortrows(Varray,[1 2]); %(først x, så y)
Fxarray1=sortrows(Fxarray,[1 2]); %(først x, så y)
Farray1=sortrows(Farray,[1 2]); %(først x, så y)

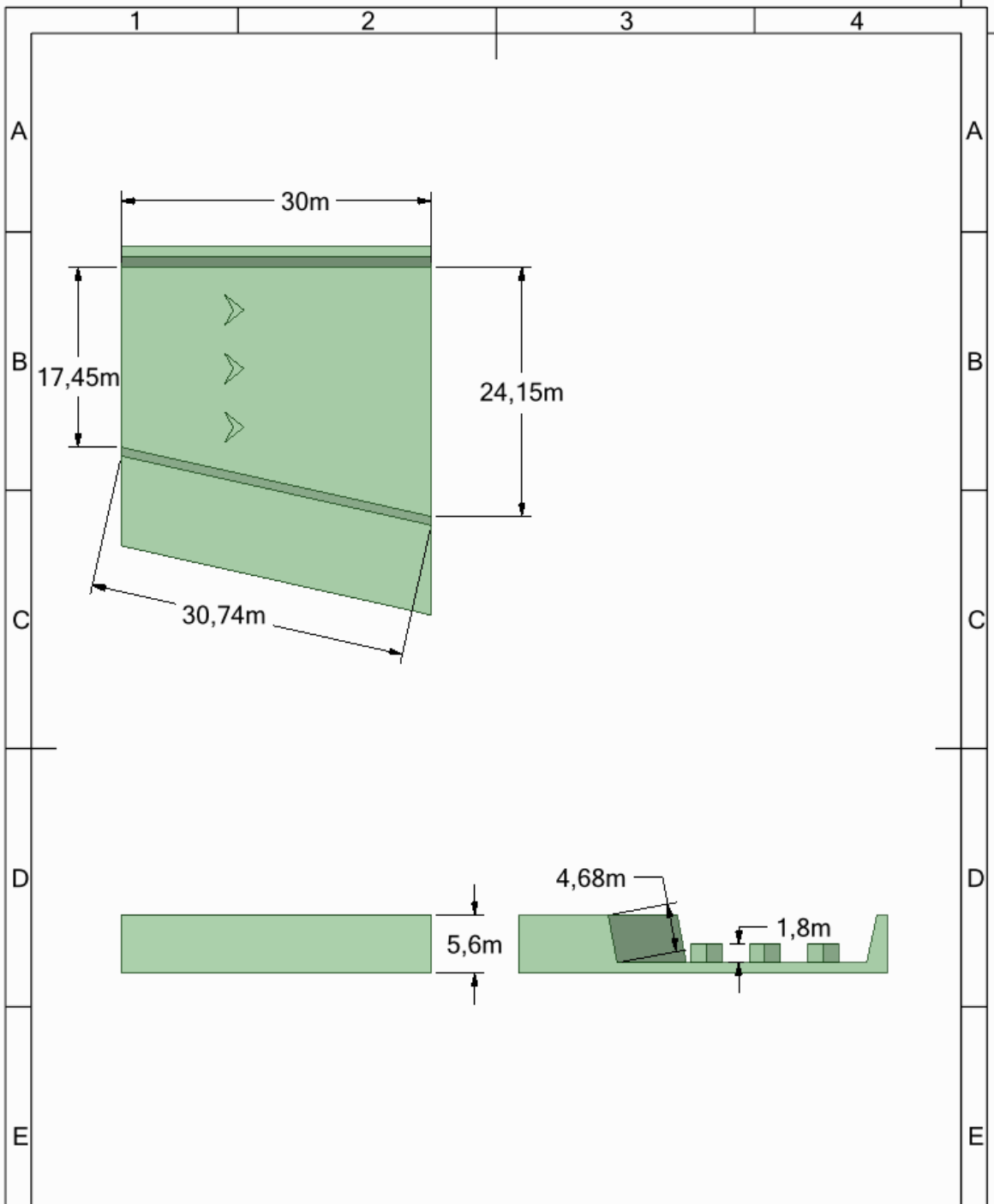
%Lagde maskenettet
[XX,YY] = meshgrid([3:0.01:23],[0:0.01:10]); %(avstand på 0.01 )

% Hentet de organiserte verdiene fra gruppene (eks. Tarray1) i maskenettet
XX,YY
TKEE = griddata(Tarray1(:,1),Tarray1(:,2),Tarray1(:,3),XX,YY);
TI = griddata(TIarray1(:,1),TIarray1(:,2),TIarray1(:,3),XX,YY);
Epsi = griddata(Earray1(:,1),Earray1(:,2),Earray1(:,3),XX,YY);
Visc = griddata(Varray1(:,1),Varray1(:,2),Varray1(:,3),XX,YY);
Velox = griddata(Fxarray1(:,1),Fxarray1(:,2),Fxarray1(:,3),XX,YY);
Velo = griddata(Farray1(:,1),Farray1(:,2),Farray1(:,3),XX,YY);

% Gjennomsnittsverdier
mean(TKEE(:))
mean(TI(:))
mean(Epsi(:))
mean(Visc(:))
mean(Velox(:))
mean(Velo(:))

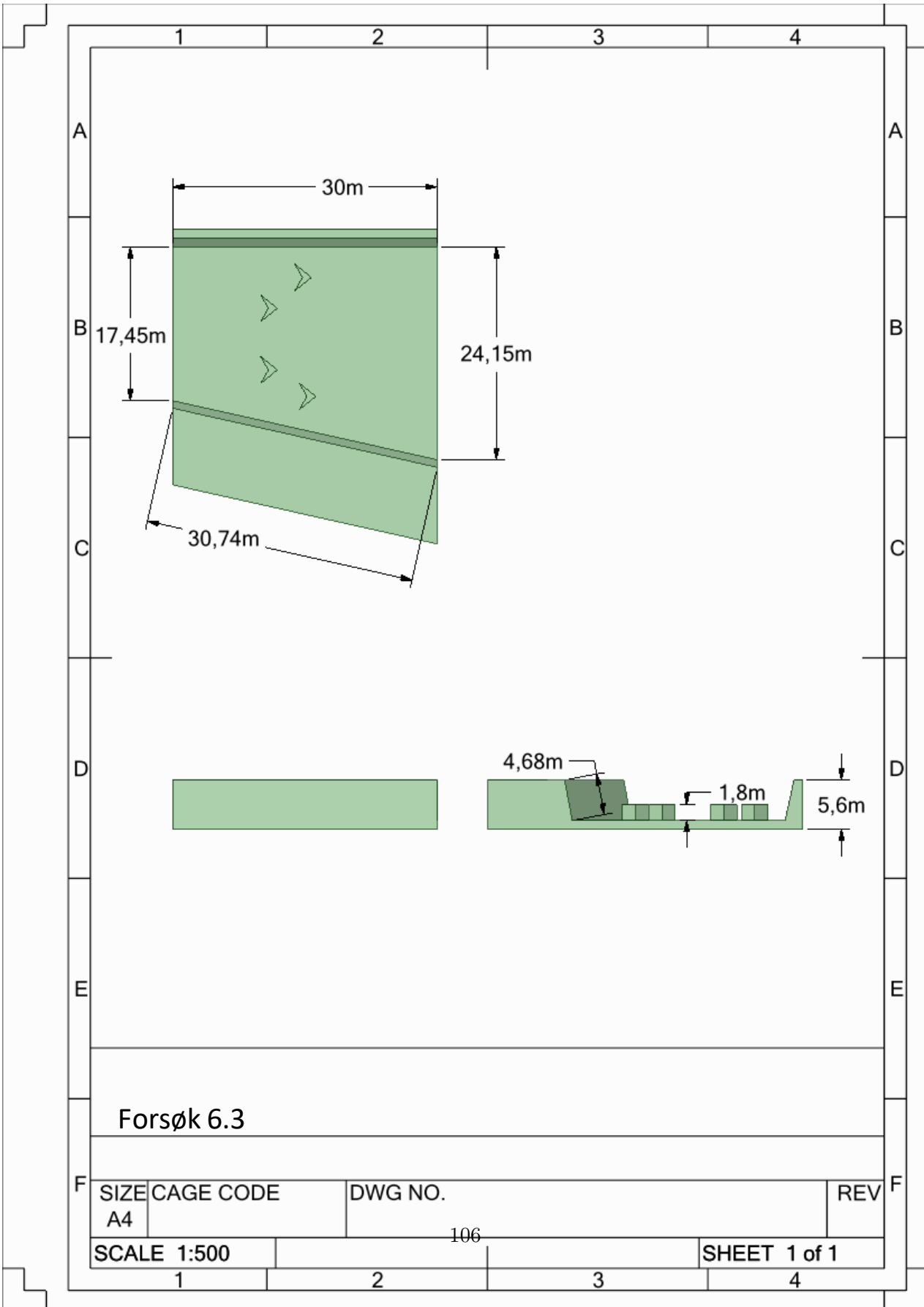
%Plottet maskenettet
figure;
contourf(XX,YY,TKEE);
h=colorbar;
caxis([0 2])
grid;
hgexport(gcf, 'TKEE100gSB.jpg', hgexport('factorystyle'), 'Format', 'jpeg');
```


K Vedlegg - Plantegninger steg 6



Forsøk 6.2

SIZE	CAGE CODE	DWG NO.	REV
A4		105	
SCALE 1:500		SHEET 1 of 1	
1	2	3	4



Forsøk 6.3

SIZE A4	CAGE CODE	DWG NO. 106	REV
SCALE 1:500		SHEET 1 of 1	

close all; Vedlegg - Matlabskript - Steg 6

```
clear;
clc;

T=readtable('NR8_results');
%Satte tabellverdiene som array
Tarray=[T.(2),T.(3),T.(4),T.(9)]; %(x, y, z og TKE)
TIarray=[T.(2),T.(3),T.(4),T.(10)]; %(x, y, z og TI)
Earray=[T.(2),T.(3),T.(4),T.(11)]; %(x, y, z og epsilon)
Varray=[T.(2),T.(3),T.(4),T.(12)]; %(x, y, z og turbulent viskositet)
Fxarray=[T.(2),T.(3),T.(4),T.(6)]; %(x, y, z og x-hastighet)
Farray=[T.(2),T.(3),T.(4),T.(5)]; %(x, y, z og samlet hastighet)
SSarray=[T.(2),T.(3),T.(4),T.(13)]; %(x, y, z og skjærspenning)

%Organiserte koordinatverdiene i stigende rekkefølge
Tarray1=sortrows(Tarray,[1 2 3]); %(først x, så y og z)
TIarray1=sortrows(TIarray,[1 2 3]); %(først x, så y og z)
Earray1=sortrows(Earray,[1 2 3]); %(først x, så y og z)
Varray1=sortrows(Varray,[1 2 3]); %(først x, så y og z)
Fxarray1=sortrows(Fxarray,[1 2 3]); %(først x, så y og z)
Farray1=sortrows(Farray,[1 2 3]); %(først x, så y og z)
SSarray1=sortrows(SSarray,[1 2 3]); %(først x, så y og z)

%Fikset 3D-maskenettet
[XX,YY,ZZ] = meshgrid([0:0.1:30],[0:0.1:2.1],[0:0.1:17]); %(we use a 0.1
spacing)

%Hentet de organiserte verdiene fra gruppene (eks. Tarray1) i maskenettet
XX,YY,ZZ
TKEE = griddata(Tarray1(:,1),Tarray1(:,2),Tarray1(:,3),Tarray1(:,4),XX,YY,ZZ);
TI =
griddata(TIarray1(:,1),TIarray1(:,2),TIarray1(:,3),TIarray1(:,4),XX,YY,ZZ);
Epsi = griddata(Earray1(:,1),Earray1(:,2),Earray1(:,3),Earray1(:,4),XX,YY,ZZ);
Visc = griddata(Varray1(:,1),Varray1(:,2),Varray1(:,3),Varray1(:,4),XX,YY,ZZ);
Velox =
griddata(Fxarray1(:,1),Fxarray1(:,2),Fxarray1(:,3),Fxarray1(:,4),XX,YY,ZZ);
Velo = griddata(Farray1(:,1),Farray1(:,2),Farray1(:,3),Farray1(:,4),XX,YY,ZZ);
Shear =
griddata(SSarray1(:,1),SSarray1(:,2),SSarray1(:,3),SSarray1(:,4),XX,YY,ZZ);

% Totalt gjennomsnitt over hele maskenettet
TKE_mean=mean(mean(nanmean(TKEE)))
Epsi_mean=mean(mean(nanmean(Epsi)))
Visc_mean=mean(mean(nanmean(Visc)))
Velox_mean=mean(mean(nanmean(Velox)))
Velo_mean=mean(mean(nanmean(Velo)))
Shear_mean=mean(mean(nanmean(Shear)))

%Plottet maskenettet
x_cs=4; %tverrsnitt ved en gitt x, dvs. en y vs. z-graf
figure(1);
contourf(squeeze(YY(:,x_cs*10+1,:)),squeeze(ZZ(:,x_cs*10+1,:)),squeeze(TKEE(:,
x_cs*10+1,:)));
h=colorbar;
%caxis([0 3])
grid;
```

```

axis equal
hgexport(gcf, 'TKEEnr8.jpg', hgexport('factorystyle'), 'Format', 'jpeg');

y_cs=2; %lateralplan ved en gitt y, dvs. en x vs. z-graf
figure(2);
contourf(squeeze(XX(y_cs*10+1, :, :)), squeeze(ZZ(y_cs*10+1, :, :)), squeeze(TKEE(y_
cs*10+1, :, :)));
h=colorbar;
%caxis([0 3])
grid;
axis equal
hgexport(gcf, 'TKEEnr8.jpg', hgexport('factorystyle'), 'Format', 'jpeg');

z_cs=1; %horisontalplan ved en gitt z, dvs. en x vs. y-graf
figure(3);
contourf(squeeze(XX(:, :, z_cs*10+1)), squeeze(YY(:, :, z_cs*10+1)), squeeze(TKEE(:,
:, z_cs*10+1)));
h=colorbar;
%caxis([0 3])
grid;
axis equal
hgexport(gcf, 'TKEEnr8.jpg', hgexport('factorystyle'), 'Format', 'jpeg');

```

Matlab Vedlegg - Matlabskript - Modellert reduksjon av gass-

```
close all;
clear;
```

overmetning

```
T=readtable('NR5_results');
%Satte tabellverdiene som array
Tarray=[T.(2),T.(3),T.(4),T.(9)]; %(x, y, z og TKE)
TIarray=[T.(2),T.(3),T.(4),T.(10)]; %(x, y, z og TI)
Earray=[T.(2),T.(3),T.(4),T.(11)]; %( x, y, z og epsilon)
Varray=[T.(2),T.(3),T.(4),T.(12)]; %(x, y, z og turbulent viskositet)
Fxarray=[T.(2),T.(3),T.(4),T.(6)]; %(x, y, z og x-hastighet)
Fyarray=[T.(2),T.(3),T.(4),T.(8)]; %(x, y, z og z-hastighet)
Farray=[T.(2),T.(3),T.(4),T.(5)]; %(x, y, z og samlet hastighet)
SSarray=[T.(2),T.(3),T.(4),T.(13)]; %(x, y, z og skjærspenning)

%Organiserte koordinatverdiene istigende rekkefølge
Tarray1=sortrows(Tarray,[1 3 2]); %(først x, så z og videre y)
TIarray1=sortrows(TIarray,[1 3 2]); %(først x, så z og videre y)
Earray1=sortrows(Earray,[1 3 2]); %(først x, så z og videre y)
Varray1=sortrows(Varray,[1 3 2]); %(først x, så z og videre y)
Fxarray1=sortrows(Fxarray,[1 3 2]); %(først x, så z og videre y)
Fyarray1=sortrows(Fyarray,[1 3 2]); %(først x, så z og videre y)
Farray1=sortrows(Farray,[1 3 2]); %(først x, så z og videre y)
SSarray1=sortrows(SSarray,[1 3 2]); %(først x, så z og videre y)

%Lagde Maskenettet
[XX,YY,ZZ] = meshgrid([0:0.1:30],[0:0.1:2.1],[0:0.1:17]); %(avstand på 0.01)

% Hentet de organiserte verdiene fra gruppene (eks. Tarray1) i maskenettet
XX,YY,ZZ
TKEE = griddata(Tarray1(:,1),Tarray1(:,2),Tarray1(:,3),Tarray1(:,4),XX,YY,ZZ);
TI =
griddata(TIarray1(:,1),TIarray1(:,2),TIarray1(:,3),TIarray1(:,4),XX,YY,ZZ);
Epsi = griddata(Earray1(:,1),Earray1(:,2),Earray1(:,3),Earray1(:,4),XX,YY,ZZ);
Visc = griddata(Varray1(:,1),Varray1(:,2),Varray1(:,3),Varray1(:,4),XX,YY,ZZ);
Velox =
griddata(Fxarray1(:,1),Fxarray1(:,2),Fxarray1(:,3),Fxarray1(:,4),XX,YY,ZZ);
Veloy =
griddata(Fyarray1(:,1),Fyarray1(:,2),Fyarray1(:,3),Fyarray1(:,4),XX,YY,ZZ);
Velo = griddata(Farray1(:,1),Farray1(:,2),Farray1(:,3),Farray1(:,4),XX,YY,ZZ);
Shear =
griddata(SSarray1(:,1),SSarray1(:,2),SSarray1(:,3),SSarray1(:,4),XX,YY,ZZ);

% % Gjennomsnittsverdier over hele maskenettet
TKE_mean=mean(mean(nanmean(TKEE)));
Epsi_mean=mean(mean(nanmean(Epsi)));
Visc_mean=mean(mean(nanmean(Visc)));
Velox_mean=mean(mean(nanmean(Velox)));
Veloy_mean=mean(mean(nanmean(Veloy)));
Velo_mean=mean(mean(nanmean(Velo)));

%Gjennomsnittlig dydberegninger
for i=1:length([0:0.1:30])
    for k=1:length([0:0.1:17])
        TKE_d(i,k)=nanmean(TKEE(1:22,i,k));
        Epsi_d(i,k)=nanmean(Epsi(1:22,i,k));
```

```

        Visc_d(i,k)=nanmean(Visc(1:22,i,k));
        Velox_d(i,k)=nanmean(Velox(1:22,i,k));
        Veloy_d(i,k)=nanmean(Veloy(1:22,i,k));
        Velo_d(i,k)=nanmean(Velo(1:22,i,k));
    end
end

%Plottet maskenettet
x_cs=10; %Tverrsnitt for en gitt x, dvs. en y vs. z graf
figure(1);
contourf(squeeze(ZZ(:,x_cs*10+1,:)),squeeze(YY(:,x_cs*10+1,:)),squeeze(Velo(:,
x_cs*10+1,:)));
h=colorbar;
%caxis([0 3])
    grid;
axis equal
    hgexport(gcf, 'TKEEnr1.jpg', hgexport('factorystyle'), 'Format', 'jpeg');

y_cs=1; %Tverrsnitt for en gitt y, dvs. en x vs. z graf
figure(2);
contourf(squeeze(XX(y_cs*10+1,,:)),squeeze(ZZ(y_cs*10+1,,:)),squeeze(Velo(y_
cs*10+1,,:)));
h=colorbar;
%caxis([0 3])
    grid;
axis equal
    hgexport(gcf, 'TKEEnr2.jpg', hgexport('factorystyle'), 'Format', 'jpeg');

z_cs=8; % Tverrsnitt for en gitt z, dvs. en x vs. y graf
figure(3);
contourf(squeeze(XX(:, :, z_cs*10+1)),squeeze(YY(:, :, z_cs*10+1)),squeeze(Velo(:,
 :, z_cs*10+1)));
h=colorbar;
%caxis([0 3])
    grid;
axis equal
    hgexport(gcf, 'TKEEnr3.jpg', hgexport('factorystyle'), 'Format', 'jpeg');

%Horisontalt plan for gjennomsnittlig-dybdeberegning av hastighet, dvs. en x
vs. y graf
figure(4);
contourf(squeeze(XX(1, :, :)),squeeze(ZZ(1, :, :)),Velo_d);
h=colorbar;
%caxis([0 3])
    grid;
axis equal
    hgexport(gcf, 'avgdepth.jpg', hgexport('factorystyle'), 'Format', 'jpeg');

```

```

%Parametre
dx=0.1;
dy=0.1;
ro=1000;
St=1;

%Beregning av leddene for Dt i x-retning
dDtdx=zeros(length([0:0.1:30]),length([0:0.1:17]));
for i=1:length([0:0.1:30])
    for k=1:length([0:0.1:17])
        if i==1
            dDtdx(i,k)=(Visc_d(i+1,k)-Visc_d(i,k))/dx/(ro*St);
        else
            if i==length([0:0.1:30])
                dDtdx(i,k)=(Visc_d(i,k)-Visc_d(i-1,k))/dx/(ro*St);
            else
                dDtdx(i,k)=(Visc_d(i,k)-Visc_d(i-1,k))/(dx)/(ro*St);
            end
        end
    end
end
end

%Beregning av leddene for Dt i y-retning
dDtdy=zeros(length([0:0.1:30]),length([0:0.1:17]));
for i=1:length([0:0.1:30])
    for k=1:length([0:0.1:17])
        if k==1
            dDtdy(i,k)=(Visc_d(i,k+1)-Visc_d(i,k))/dy/(ro*St);
        else
            if k==length([0:0.1:17])
                dDtdy(i,k)=(Visc_d(i,k)-Visc_d(i,k-1))/dy/(ro*St);
            else
                dDtdy(i,k)=(Visc_d(i,k+1)-Visc_d(i,k))/(dy)/(ro*St);
            end
        end
    end
end
end

%Parametre
Dm=8.264e-9;
kin_visc_water=1.5e-6;
Dt=Visc_d/(ro*St);
Coeff_a=Velox_d-dDtdx;
Coeff_b=Veloy_d-dDtdy;
Coeff_c=Dm+Dt;
Csat=100;
Sc=kin_visc_water/Dm;
beta2=150;
%beta2=15;
%beta2=1.5;
Kls=beta2*Sc^(-0.5)*(Epsi_d*kin_visc_water).^0.25;

%horizontal plan for gjennomsnittlig-dybdeberegning av Dm+Dt, dvs. en x vs. y
graf
figure(5);
contourf(squeeze(XX(1, :, :)), squeeze(ZZ(11, :, :)), Dm+Dt);
h=colorbar;

```



```

                                Coeff_b(i,j)*C_old(i,j-1)/dy+...
                                Coeff_c(i,j)*((C_old(i+1,j)+C_old(i-
1,j))/dx^2+...
                                (C_old(i,j-1)+C_old(i,j-
1))/dy^2)+Kls(i,j)*Csat); %dC/dy=0 at y=17, i.e. C(i,j+1)=C(i,j-1)
                                else
                                    if i==301

C_new(i,j)=1/(Coeff_a(i,j)/dx+Coeff_b(i,j)/dy+2*Coeff_c(i,j)/dx^2+2*Coeff_c(i,
j)/dy^2+Kls(i,j))*...
                                (Coeff_a(i,j)*C_old(i-1,j)/dx+...
                                Coeff_b(i,j)*C_old(i,j-1)/dy+...
                                Coeff_c(i,j)*((2*C_old(i-1,j)-
2*dx*Kls(i,j)*(C_old(i,j)-Csat))/dx^2+...
                                (C_old(i,j+1)+C_old(i,j-
1))/dy^2)+Kls(i,j)*Csat);
                                else

C_new(i,j)=1/(Coeff_a(i,j)/dx+Coeff_b(i,j)/dy+2*Coeff_c(i,j)/dx^2+2*Coeff_c(i,
j)/dy^2+Kls(i,j))*...
                                (Coeff_a(i,j)*C_old(i-1,j)/dx+...
                                Coeff_b(i,j)*C_old(i,j-1)/dy+...
                                Coeff_c(i,j)*((C_old(i+1,j)+C_old(i-
1,j))/dx^2+...
                                (C_old(i,j+1)+C_old(i,j-
1))/dy^2)+Kls(i,j)*Csat);
                                end
                                    end
                                end
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end
if max(max(abs(C_new-C_old)))<=error
    break
else
    C_old=C_new;
end
end

tdgg=C_new
%horizontalt plan for gjennomsnittlig-dybdeberegning for gassovermetning, dvs
en x vs. y graf
figure(6);
contourf(squeeze(XX(1, :, :)), squeeze(ZZ(1, :, :)), C_new);
h=colorbar;
%caxis([0 3])
grid;
axis equal

```


N Vedlegg - Utredning av partiell differensialligning

Utredning av differensialligning for modellering av redusert gassovermetning

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\vec{V}C) &= \nabla \cdot [(D_m + D_t)\nabla C] - J \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[(D_m + D_t) \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(D_m + D_t) \frac{\partial C}{\partial y} \right] - K_{L_s}(C - C_{sat}) \Rightarrow \\ \Rightarrow u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} &= \frac{\partial D_t}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial x} + (D_m + D_t) \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial D_t}{\partial y} \frac{\partial C}{\partial y} + (D_m + D_t) \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - K_{L_s}(C - C_{sat}) \Rightarrow \\ \Rightarrow \left[u - \frac{\partial D_t}{\partial x} \right] \frac{\partial C}{\partial x} + \left[v - \frac{\partial D_t}{\partial y} \right] \frac{\partial C}{\partial y} &= (D_m + D_t) \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) - K_{L_s}(C - C_{sat}) \Rightarrow \\ \Rightarrow a \frac{\partial C}{\partial x} + b \frac{\partial C}{\partial y} &= c \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) - K_{L_s}(C - C_{sat}) \end{aligned}$$

Bruker regressive elementmetode for å løse differensialligningen av førsteorden

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial x} &\approx \frac{C_{i,j} - C_{i-1,j}}{\Delta x} \\ \frac{\partial C}{\partial y} &\approx \frac{C_{i,j} - C_{i,j-1}}{\Delta y} \end{aligned}$$

Bruker sentrert elementmetode for å løse differensialligningen av andreorden

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} &\approx \frac{C_{i+1,j} - 2C_{i,j} + C_{i-1,j}}{\Delta x^2} \\ \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} &\approx \frac{C_{i,j+1} - 2C_{i,j} + C_{i,j-1}}{\Delta y^2} \end{aligned}$$

Den partielle differensialligningen kan da bli erstattet med en algebraisk ligning

$$\begin{aligned} a_{i,j} \frac{C_{i,j} - C_{i-1,j}}{\Delta x} + b_{i,j} \frac{C_{i,j} - C_{i,j-1}}{\Delta y} &= \\ = c_{i,j} \left(\frac{C_{i+1,j} - 2C_{i,j} + C_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{C_{i,j+1} - 2C_{i,j} + C_{i,j-1}}{\Delta y^2} \right) - K_{L_s}(C_{i,j} - C_{sat}) \end{aligned}$$

Ved bruk av Liebmanns metode ble $C_{i,j}$ gjort eksplisitt og videre kan en iterativ prosess bli utført

$$\begin{aligned} \left(\frac{a_{i,j}}{\Delta x} + \frac{b_{i,j}}{\Delta y} + \frac{2c_{i,j}}{\Delta x^2} + \frac{2c_{i,j}}{\Delta y^2} + K_{L_s} \right) C_{i,j} &= \\ = a_{i,j} \frac{C_{i-1,j}}{\Delta x} + b_{i,j} \frac{C_{i,j-1}}{\Delta y} + c_{i,j} \left(\frac{C_{i+1,j} + C_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{C_{i,j+1} + C_{i,j-1}}{\Delta y^2} \right) + K_{L_s} C_{sat} \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\Rightarrow C_{i,j} = \frac{1}{\left(\frac{a_{i,j}}{\Delta x} + \frac{b_{i,j}}{\Delta y} + \frac{2c_{i,j}}{\Delta x^2} + \frac{2c_{i,j}}{\Delta y^2} + K_{L_s}\right)} \left[a_{i,j} \frac{C_{i-1,j}}{\Delta x} + b_{i,j} \frac{C_{i,j-1}}{\Delta y} + c_{i,j} \left(\frac{C_{i+1,j} + C_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{C_{i,j+1} + C_{i,j-1}}{\Delta y^2} \right) + K_{L_s} C_{sat} \right]$$

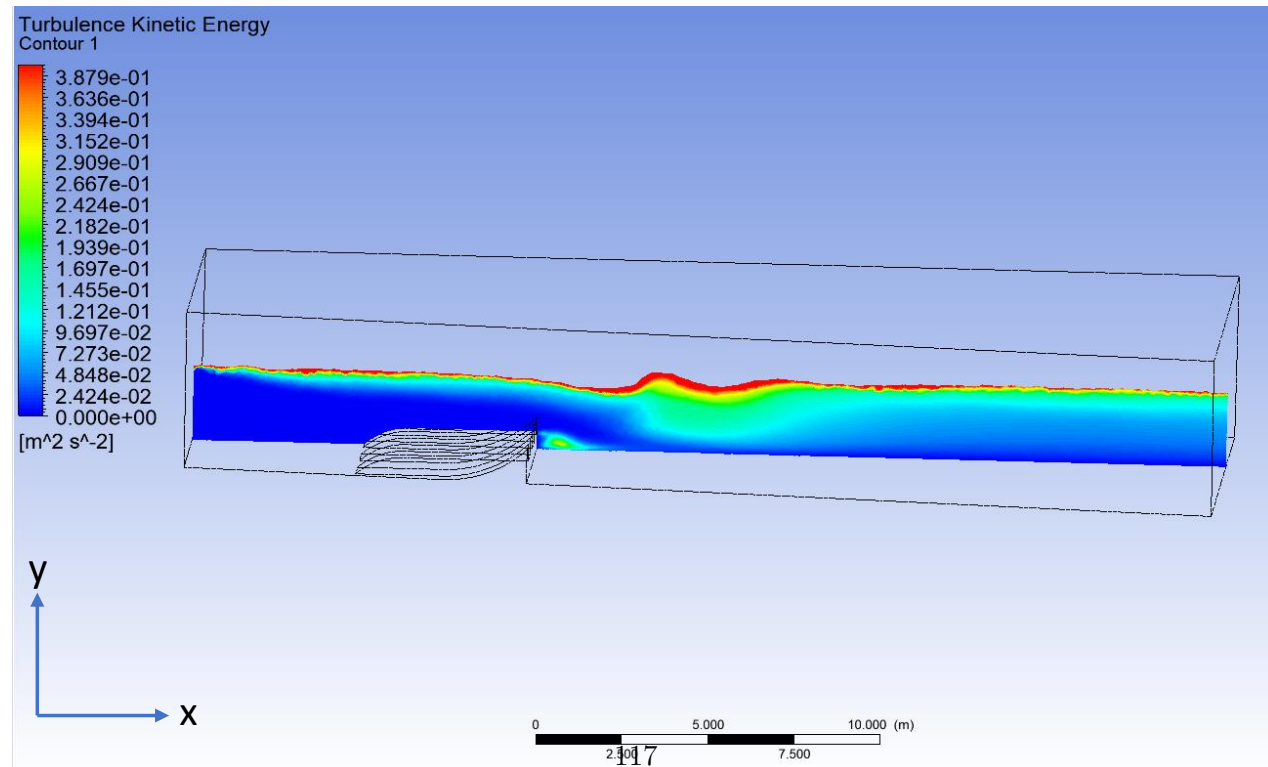
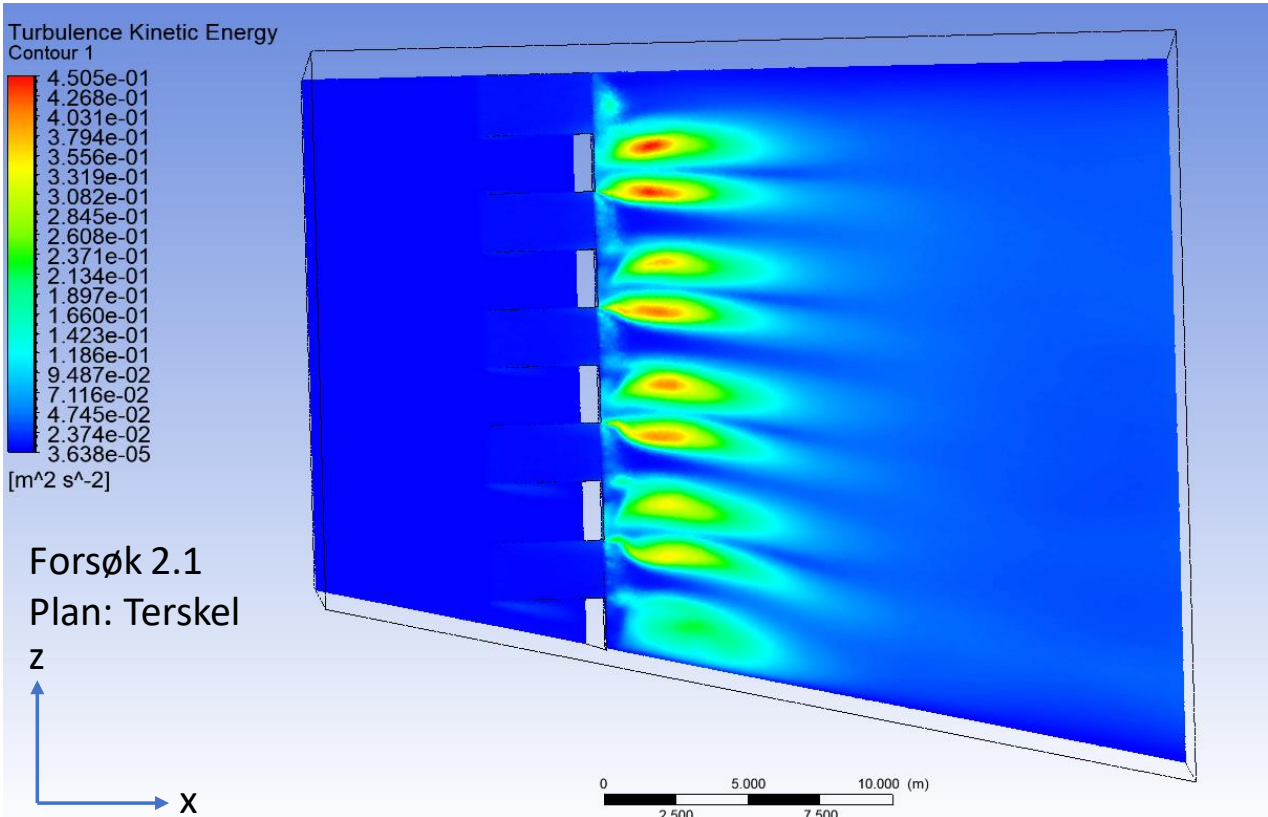
Grensebetingelser for inntak

$$C_{1,j} = 170\%, 150\%, 130\%$$

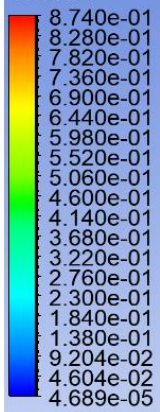
Grensebetingelser for vertikal vegg til høyre

$$\frac{\partial C}{\partial y}(y = 0m) = 0 \Rightarrow \frac{C_{i,j} - C_{i,j-1}}{\Delta y} = 0 \stackrel{j=1}{\Rightarrow} C_{i,0} = C_{i,1}$$

O Vedlegg - Simuleringsresultater steg 2

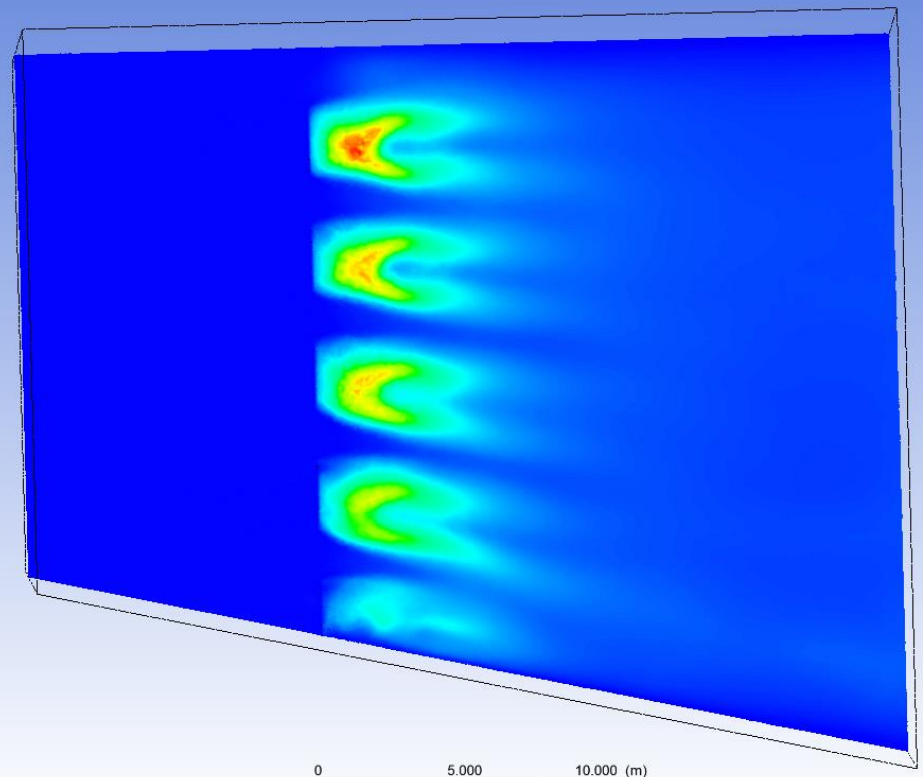
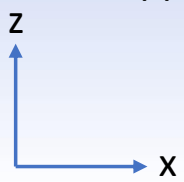


Turbulence Kinetic Energy
Contour 1

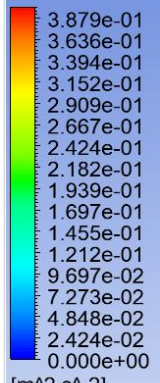


[m² s⁻²]

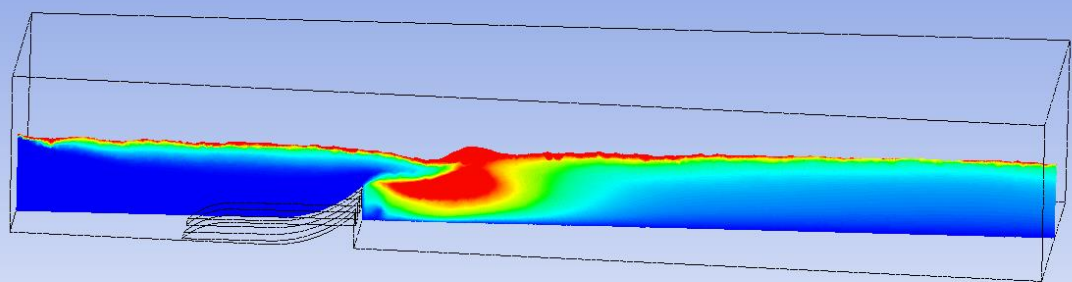
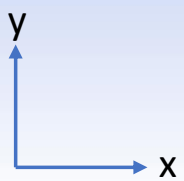
Forsøk 2.1
Plan: Hopp



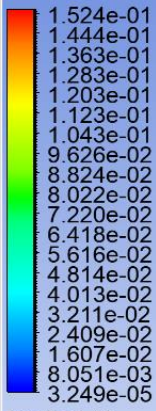
Turbulence Kinetic Energy
Contour 1



[m² s⁻²]

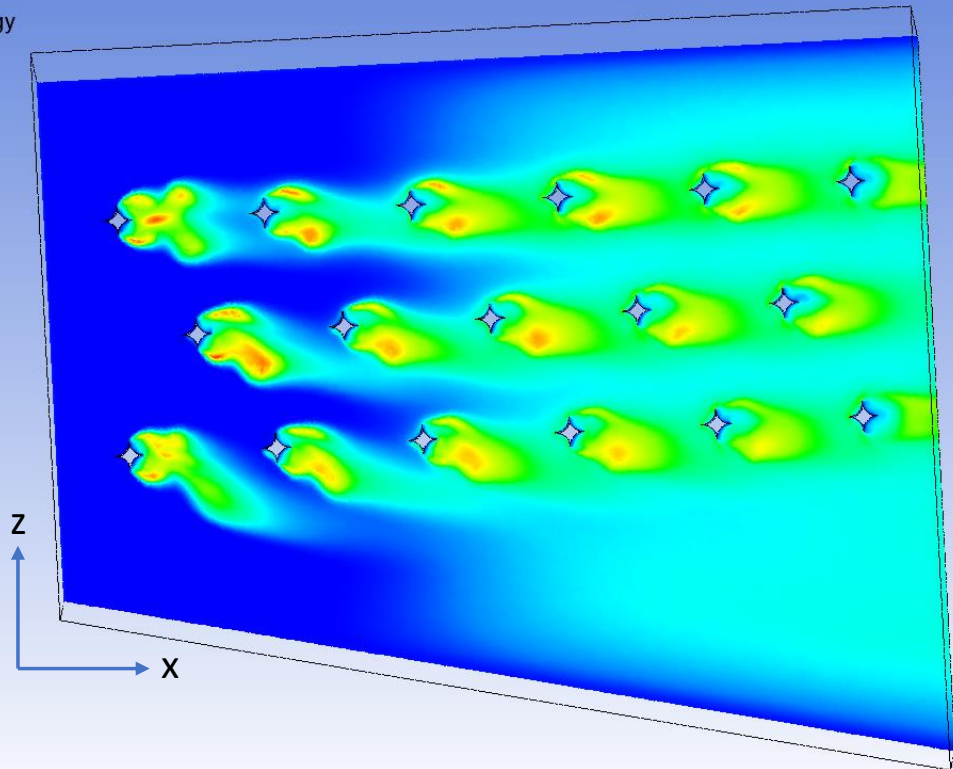


Turbulence Kinetic Energy
Contour 1

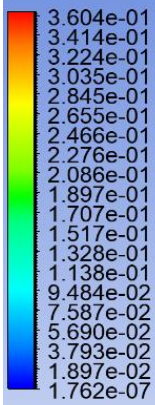


[m² s⁻²]

Forsøk 2.2
k-omega SST

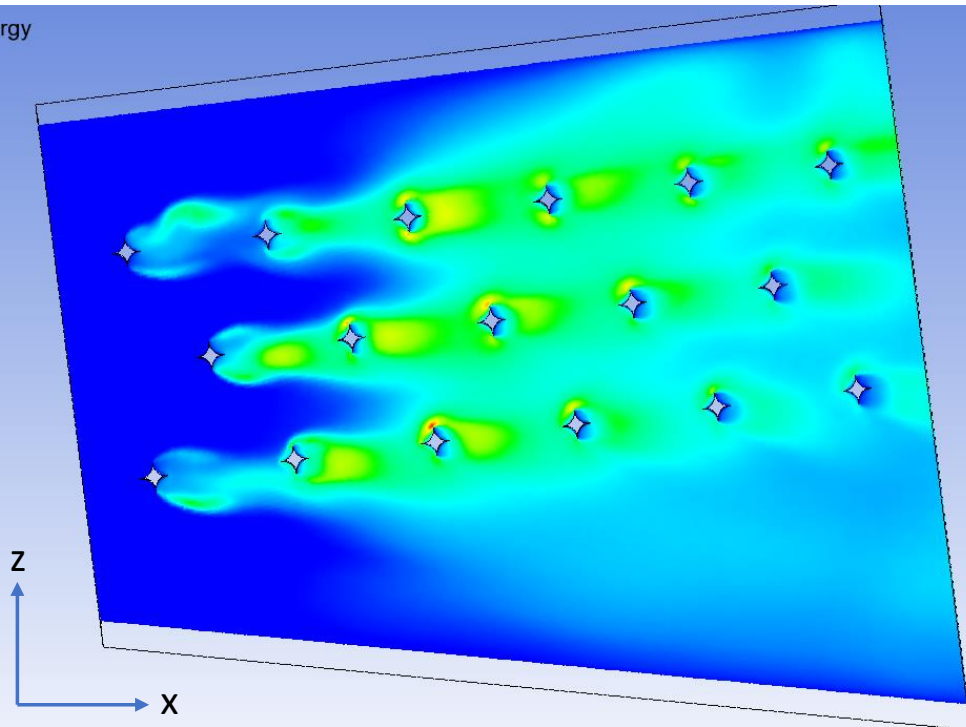


Turbulence Kinetic Energy
Contour 1

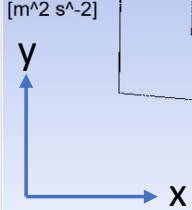
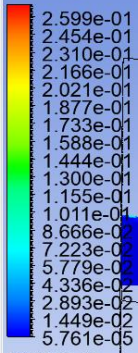


[m² s⁻²]

Forsøk 2.2
k-epsilon
Realizable

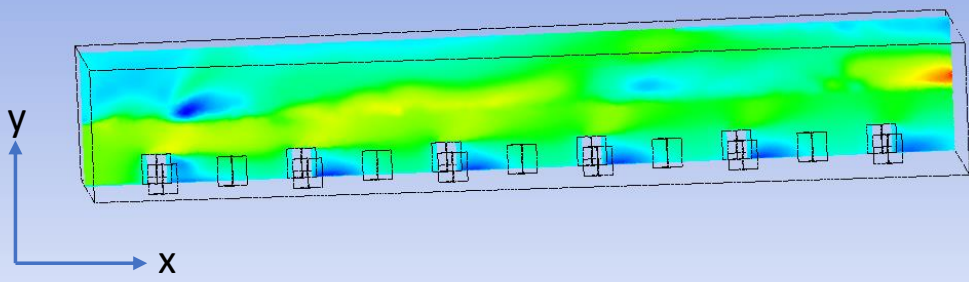
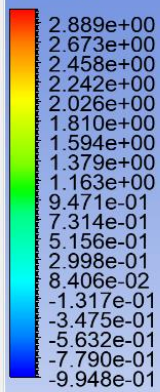


Turbulence Kinetic Energy
Contour 2



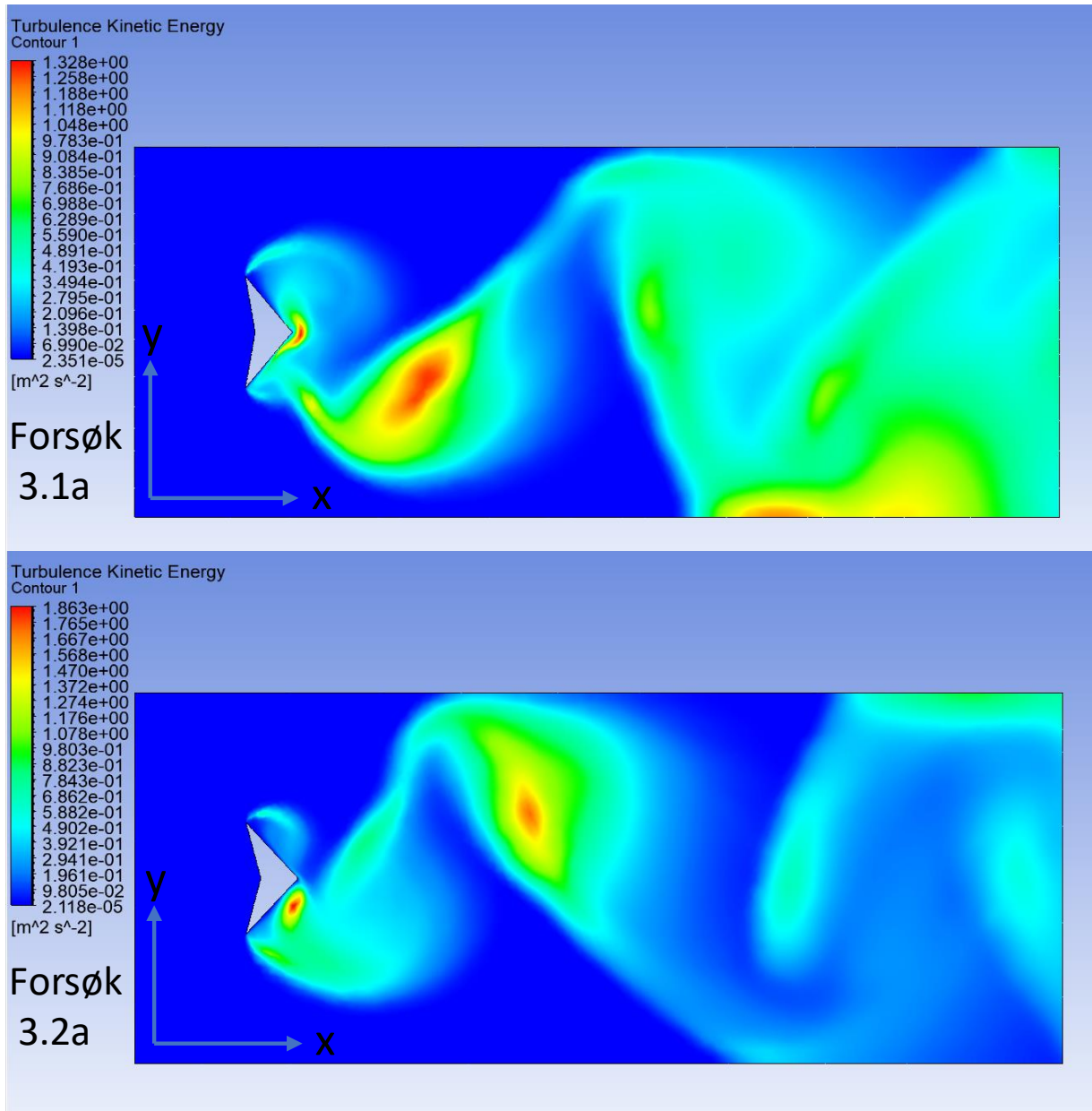
ANSYS
Forsøk 2.2
k-omega SST
TKE

Velocity u
Contour 2



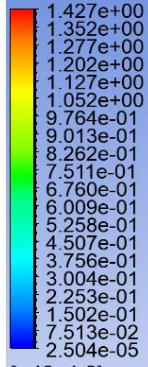
Forsøk 2.2
k-omega SST
Velocity x

P Vedlegg - Simuleringsresultater steg 3



Turbulence Kinetic Energy

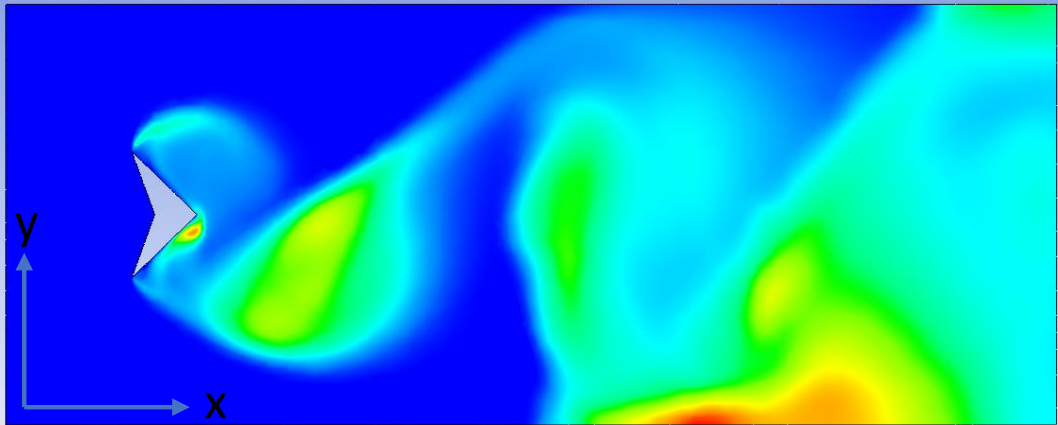
Contour 1



[m² s⁻²]

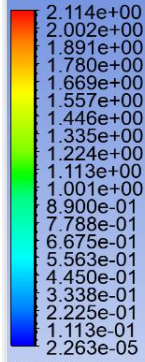
Forsøk

3.3a



Turbulence Kinetic Energy

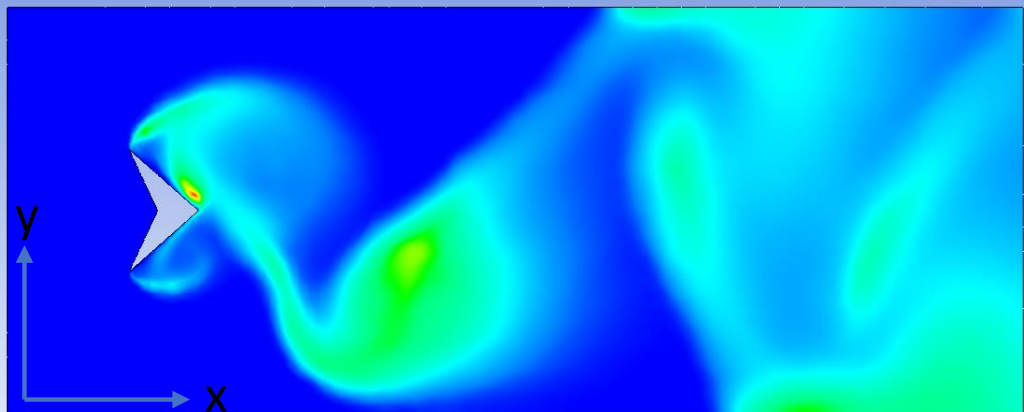
Contour 1



[m² s⁻²]

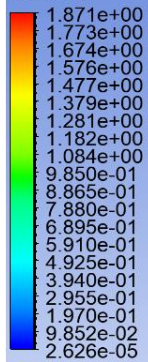
Forsøk

3.4a



Turbulence Kinetic Energy

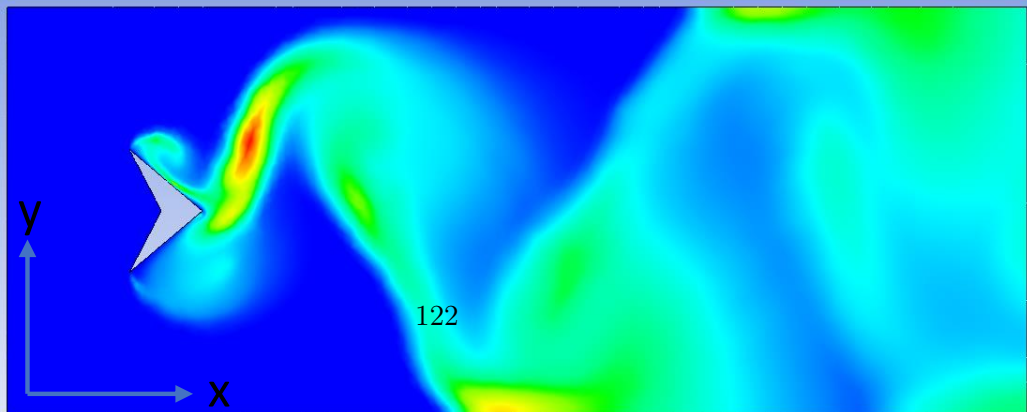
Contour 1



[m² s⁻²]

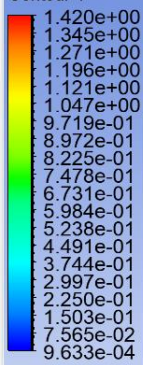
Forsøk

3.5a



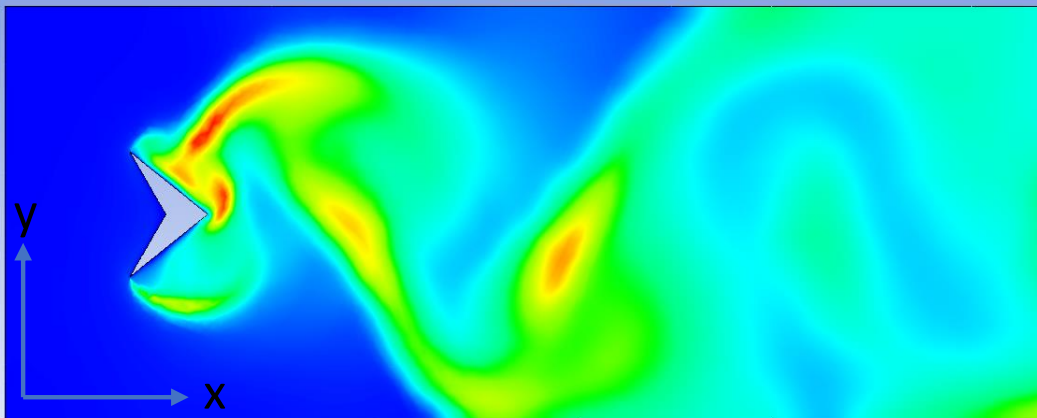
Turbulent Kinetic Energy K

Contour 1



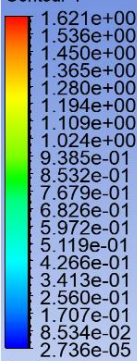
[m² s⁻²]

Forsøk
3.6a



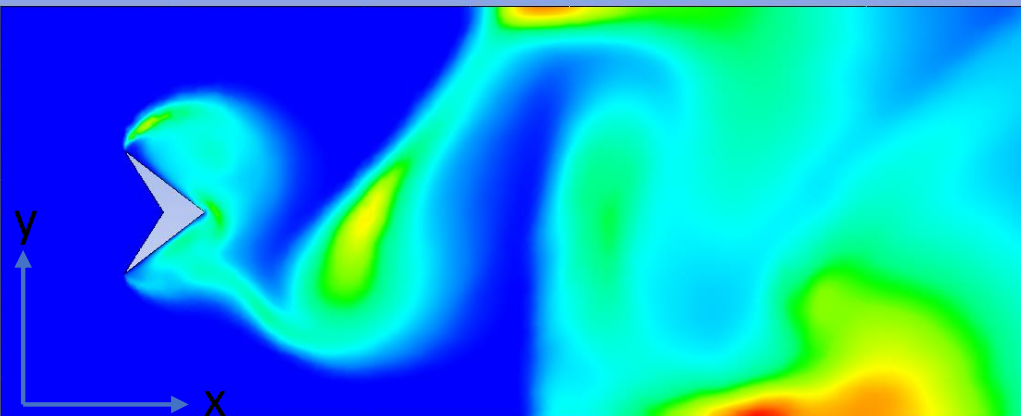
Turbulence Kinetic Energy

Contour 1



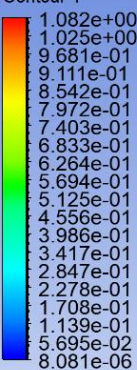
[m² s⁻²]

Forsøk
3.7a



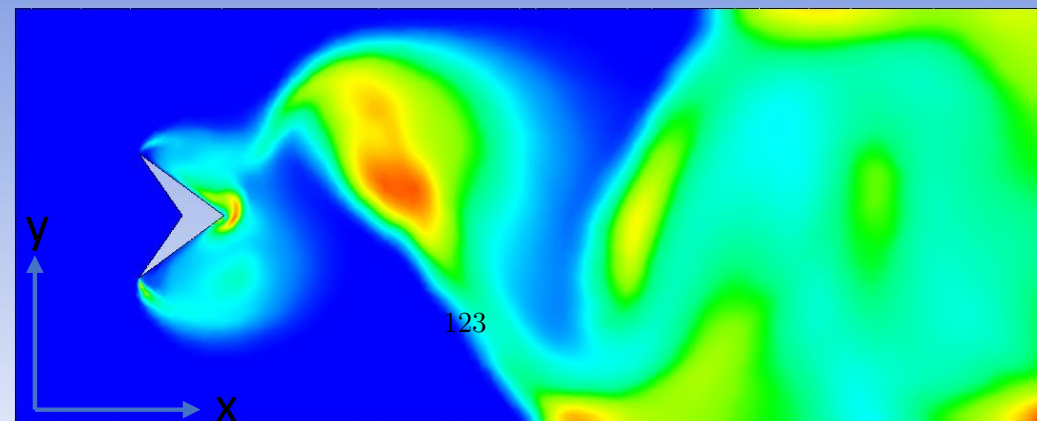
Turbulence Kinetic Energy

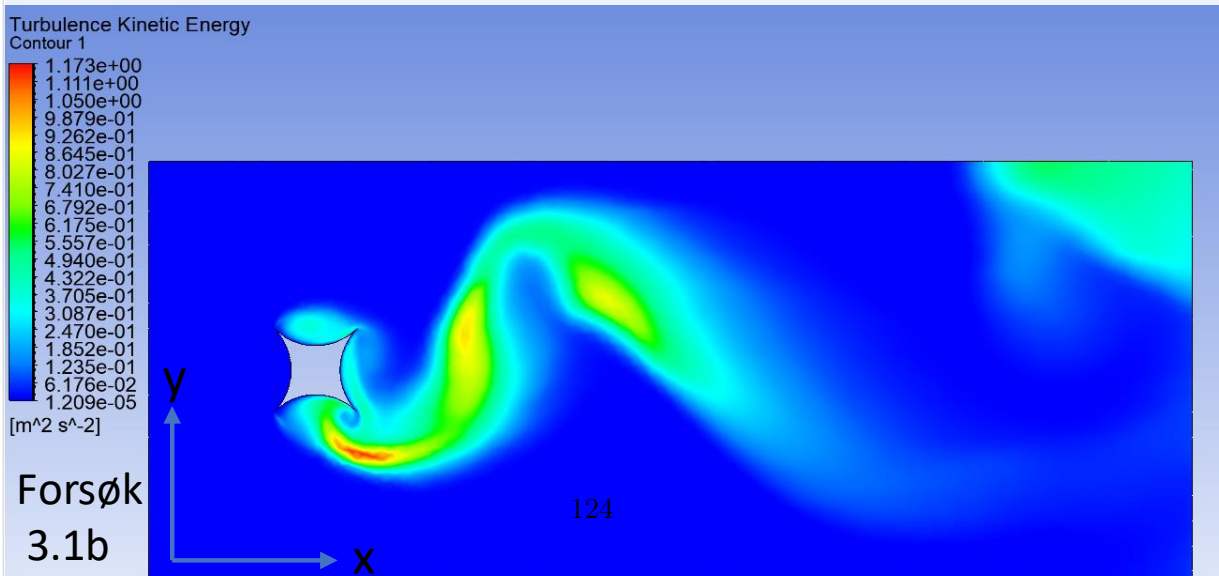
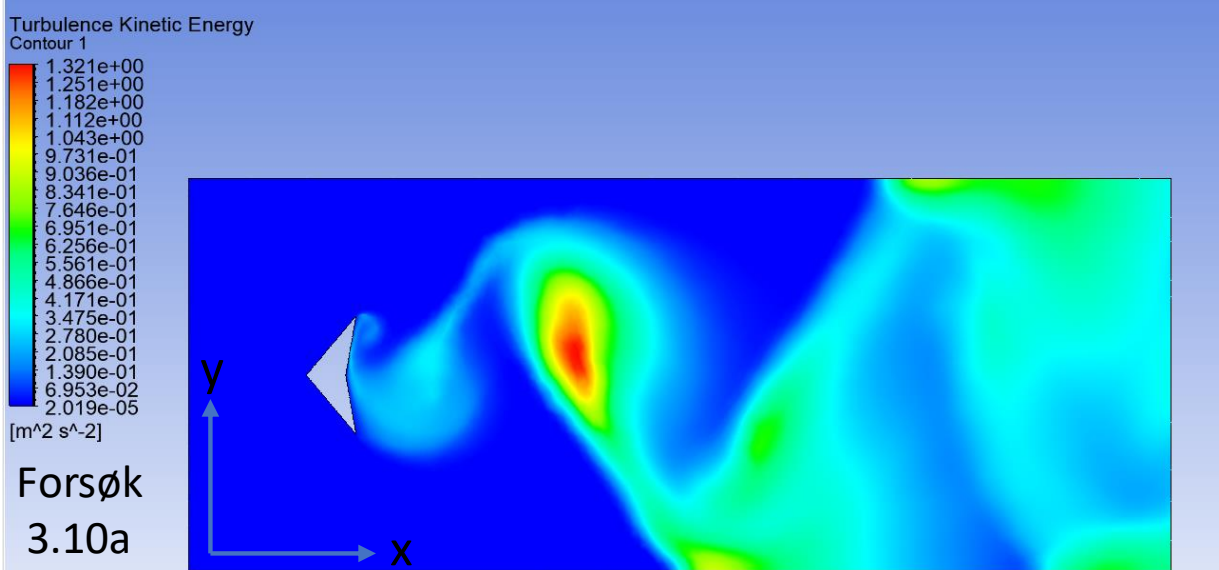
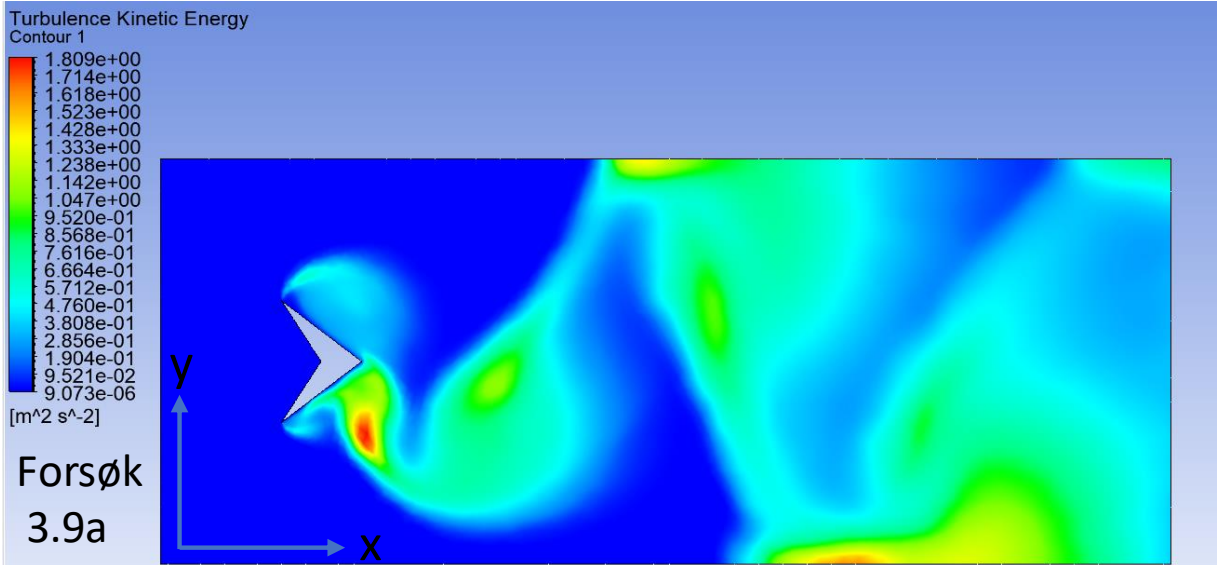
Contour 1

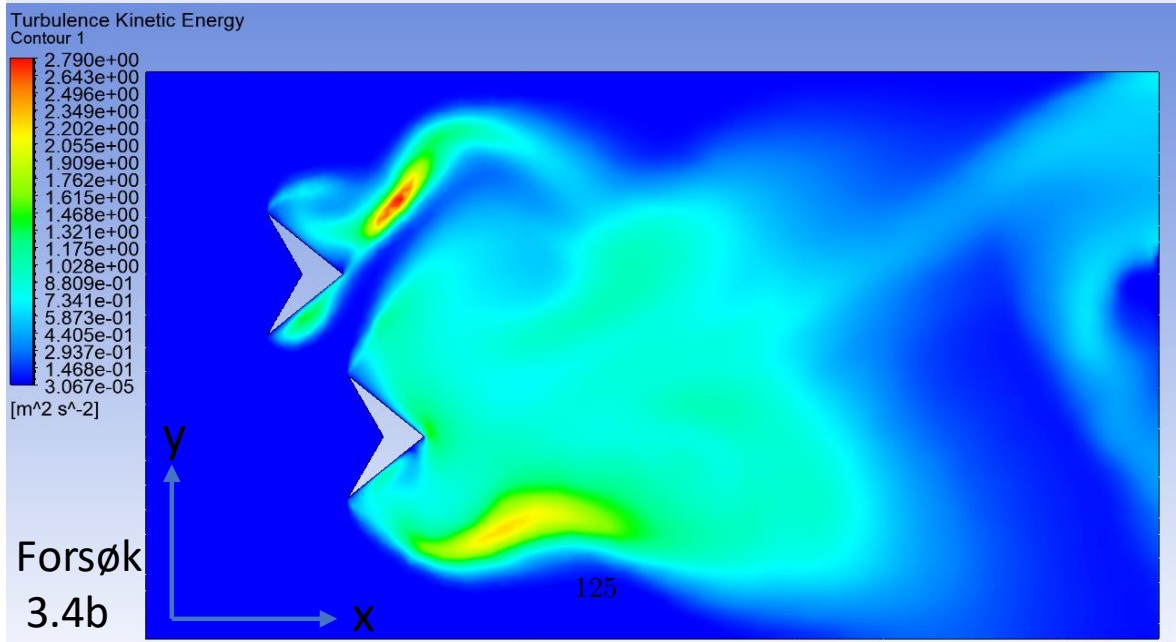
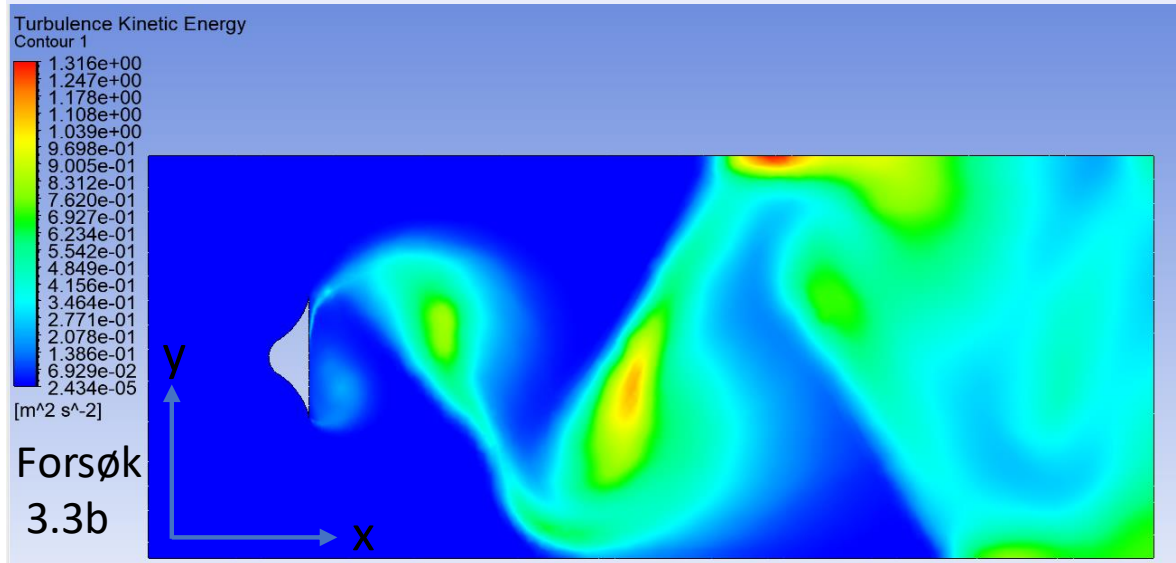
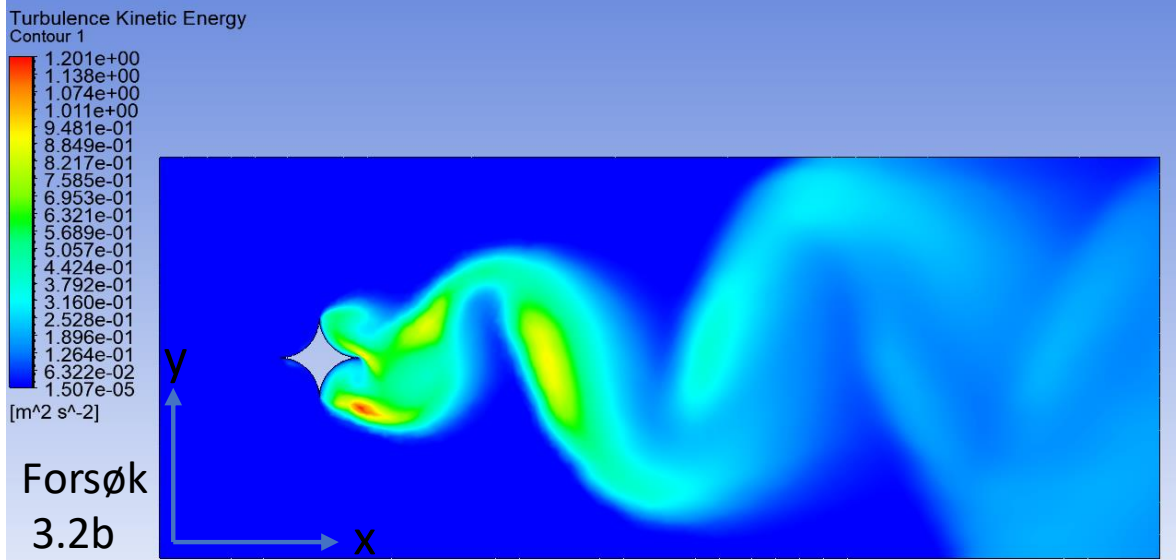


[m² s⁻²]

Forsøk
3.8a

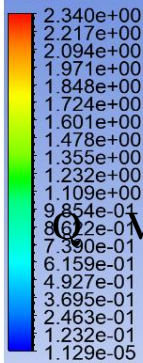






Turbulence Kinetic Energy

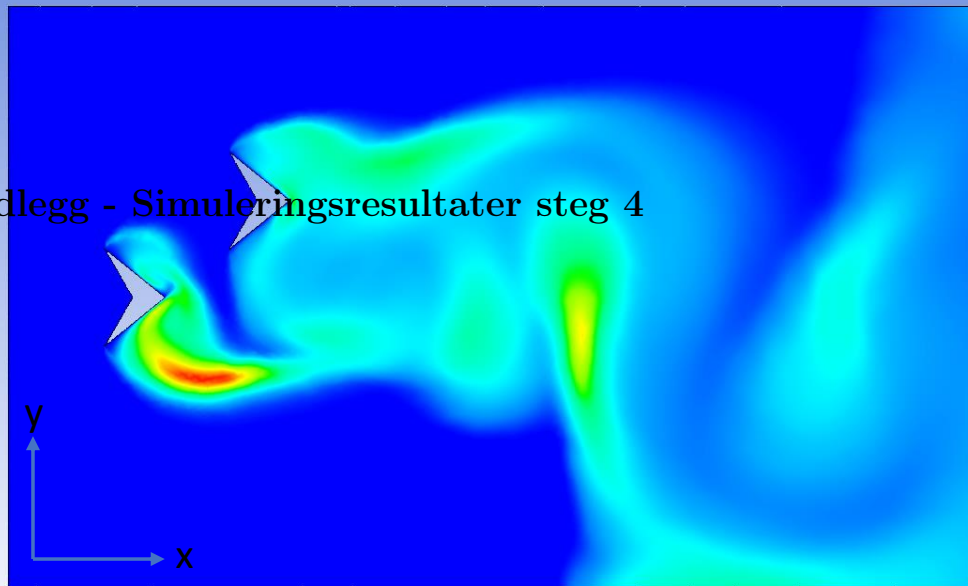
Contour 1



[m² s⁻²]

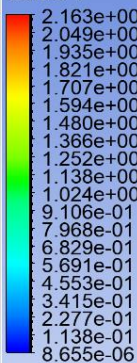
Forsøk

4.1



Turbulence Kinetic Energy

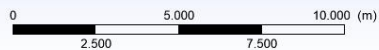
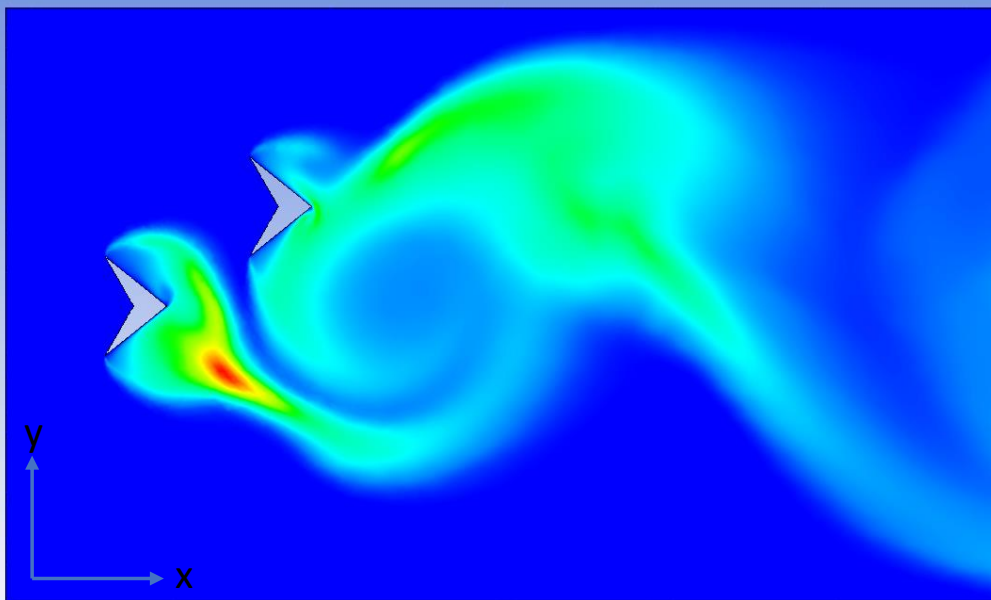
Contour 1



[m² s⁻²]

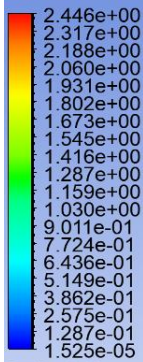
Forsøk

4.2



Turbulence Kinetic Energy

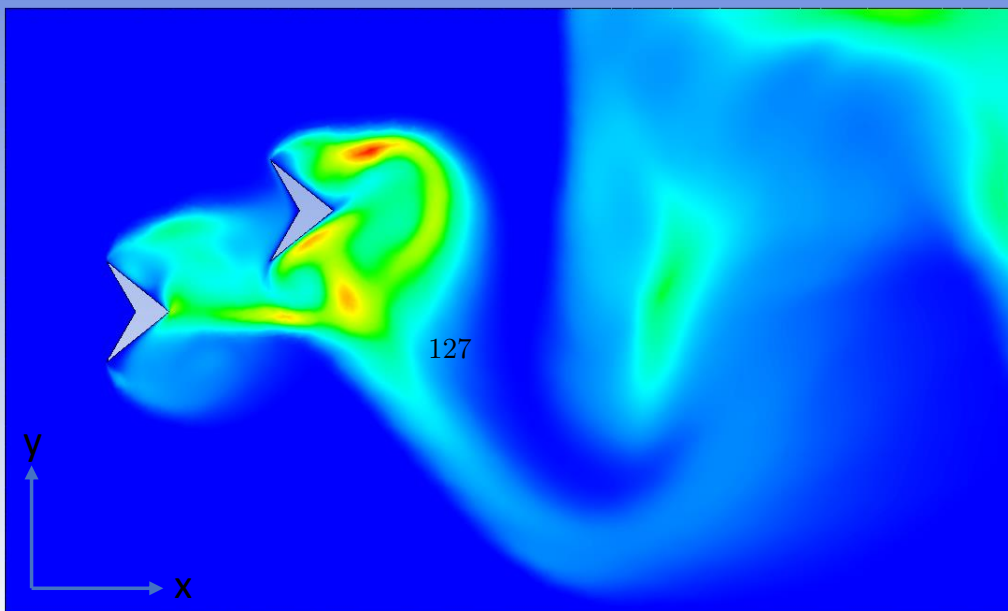
Contour 1



[m² s⁻²]

Forsøk

4.3

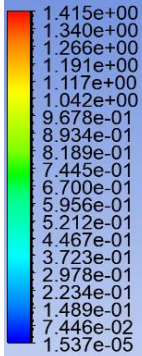


Vedlegg - Simuleringsresultater steg 4

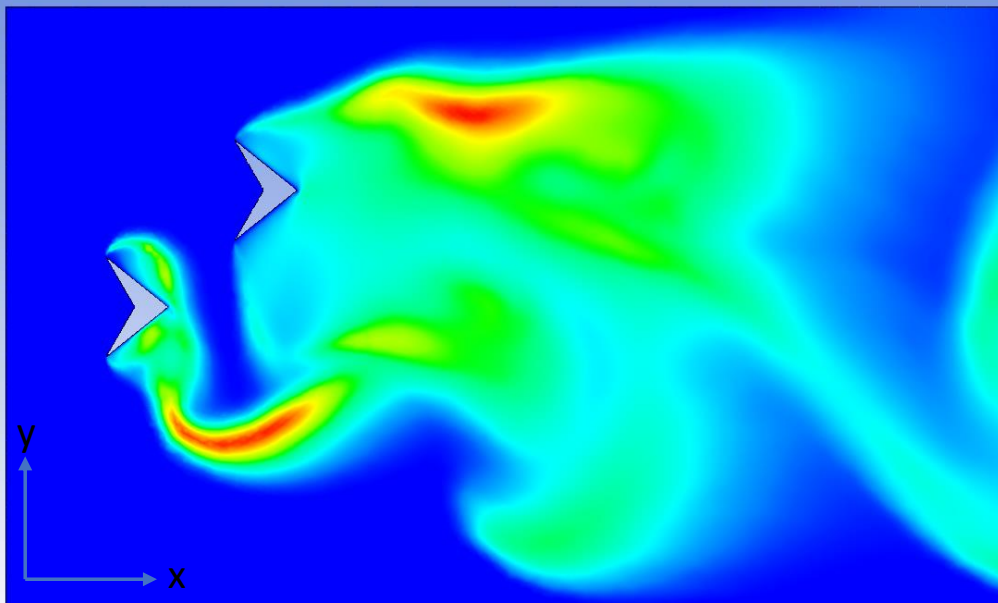
127

Turbulence Kinetic Energy

Contour 1



[m² s⁻²]



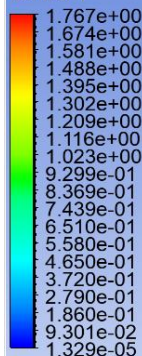
Forsøk

4.4

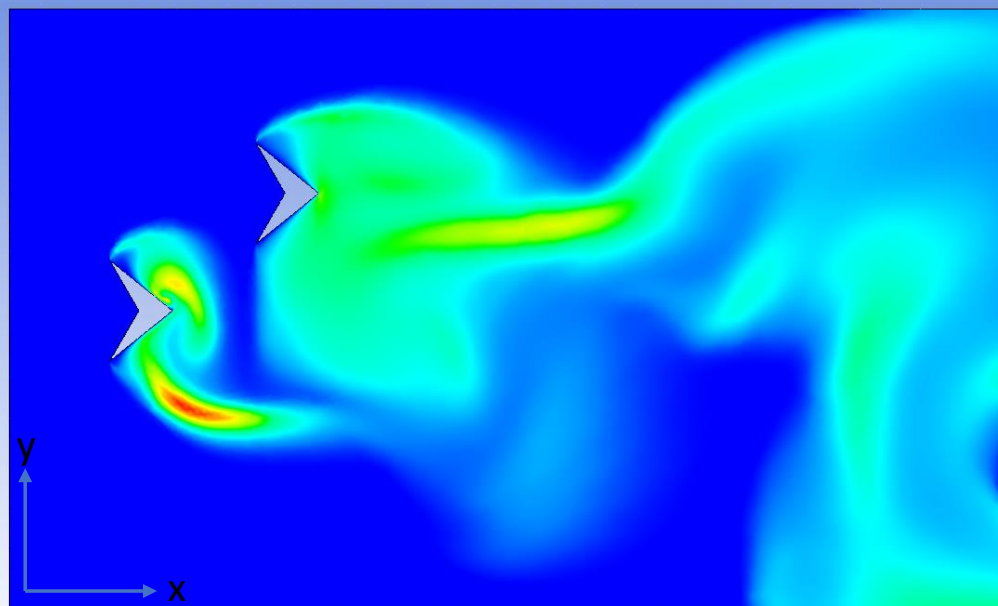


Turbulence Kinetic Energy

Contour 1



[m² s⁻²]



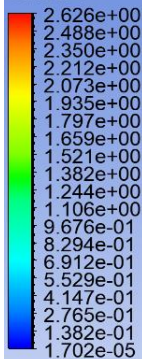
Forsøk

4.5

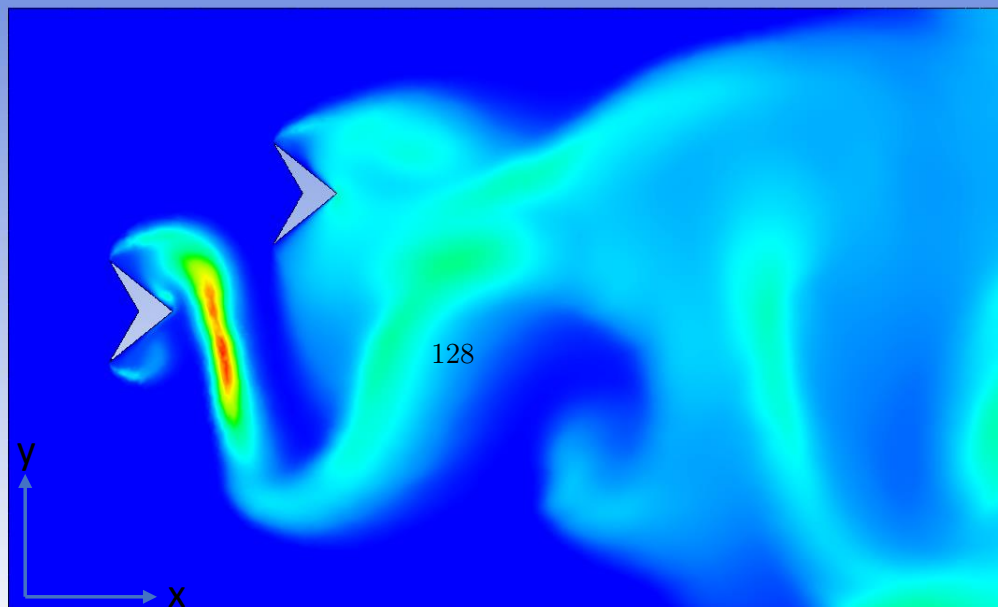


Turbulence Kinetic Energy

Contour 1



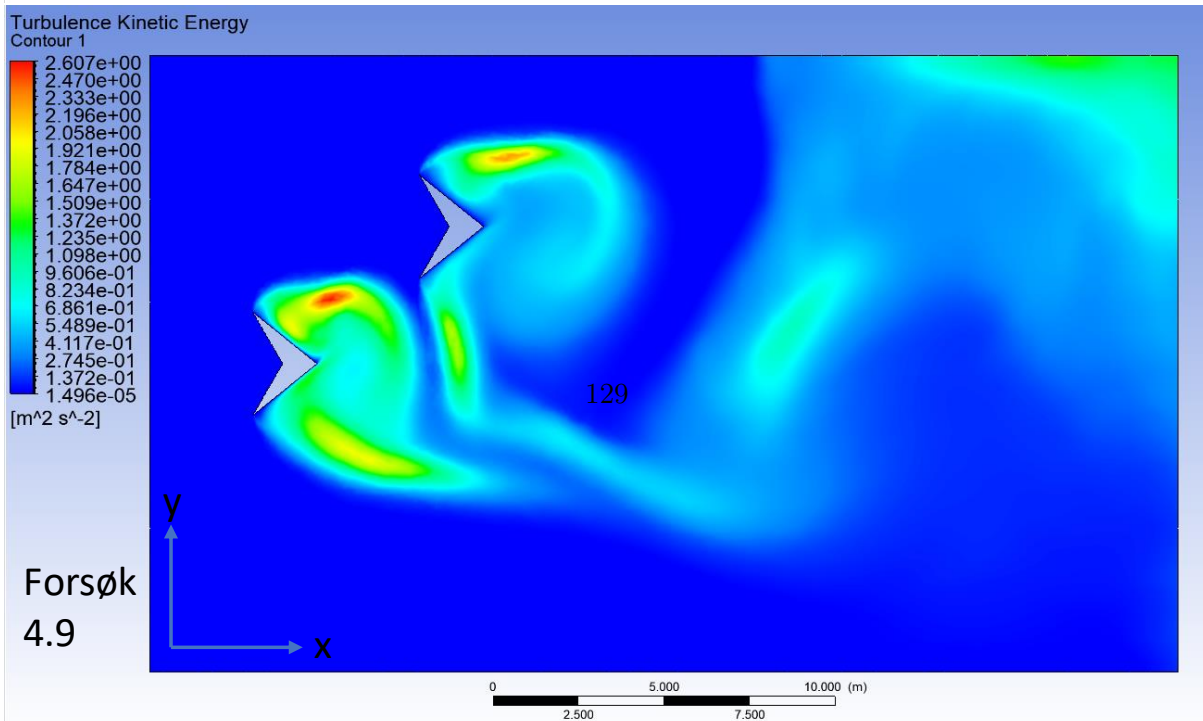
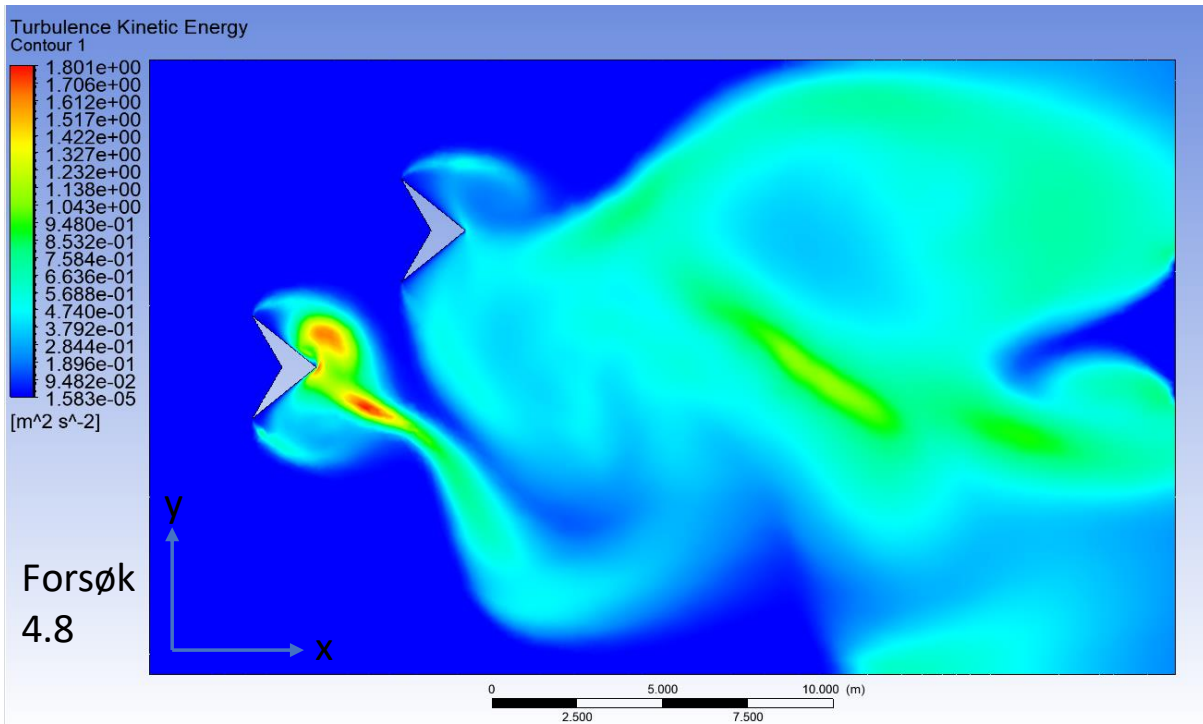
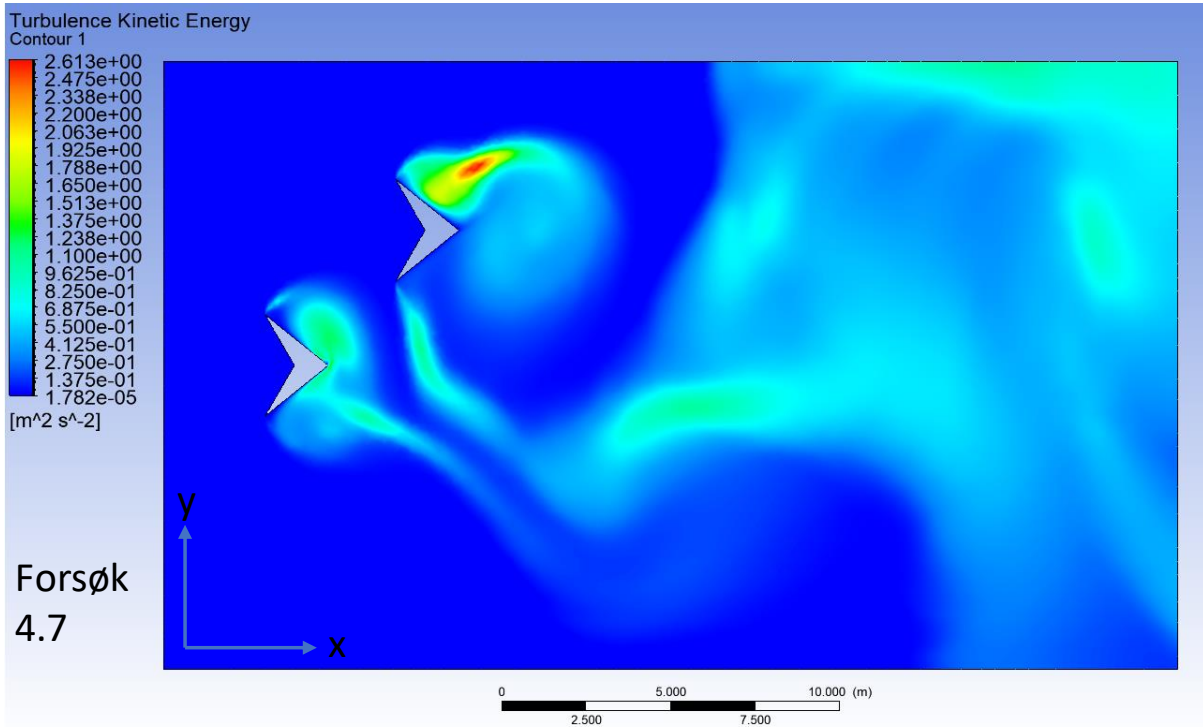
[m² s⁻²]



Forsøk

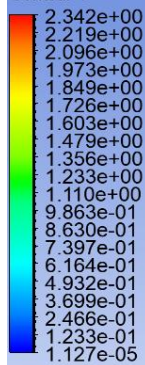
4.6



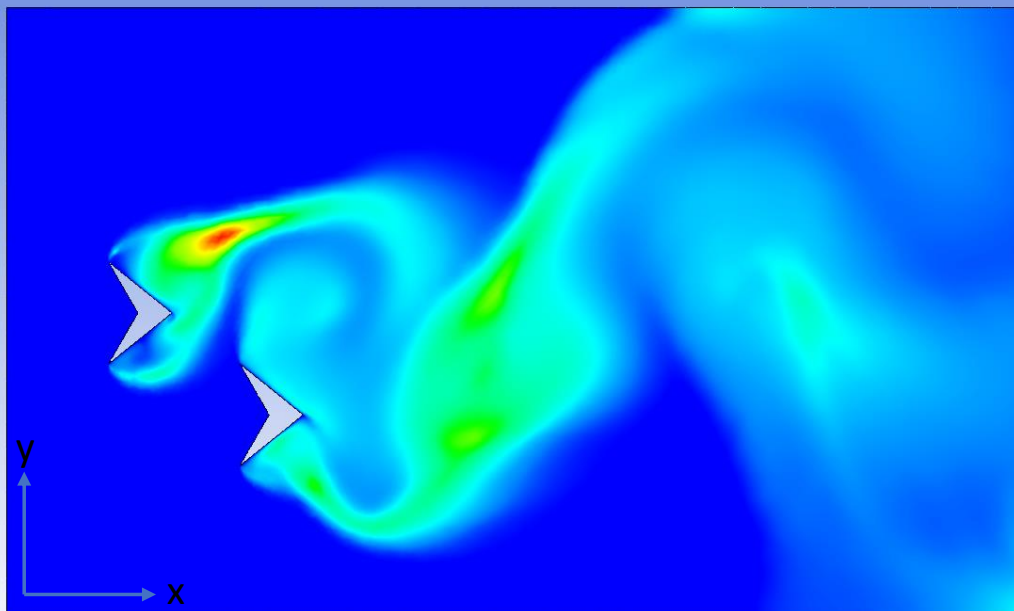


Turbulence Kinetic Energy

Contour 1



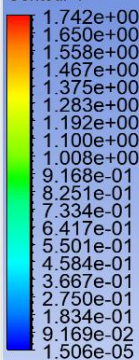
[m² s⁻²]



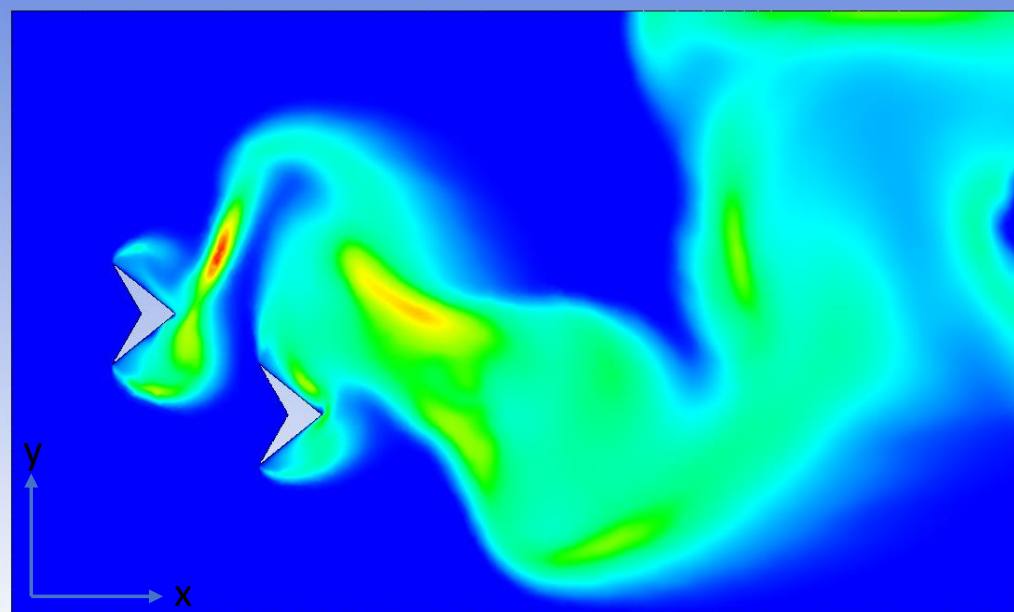
Forsøk
4.10

Turbulence Kinetic Energy

Contour 1



[m² s⁻²]



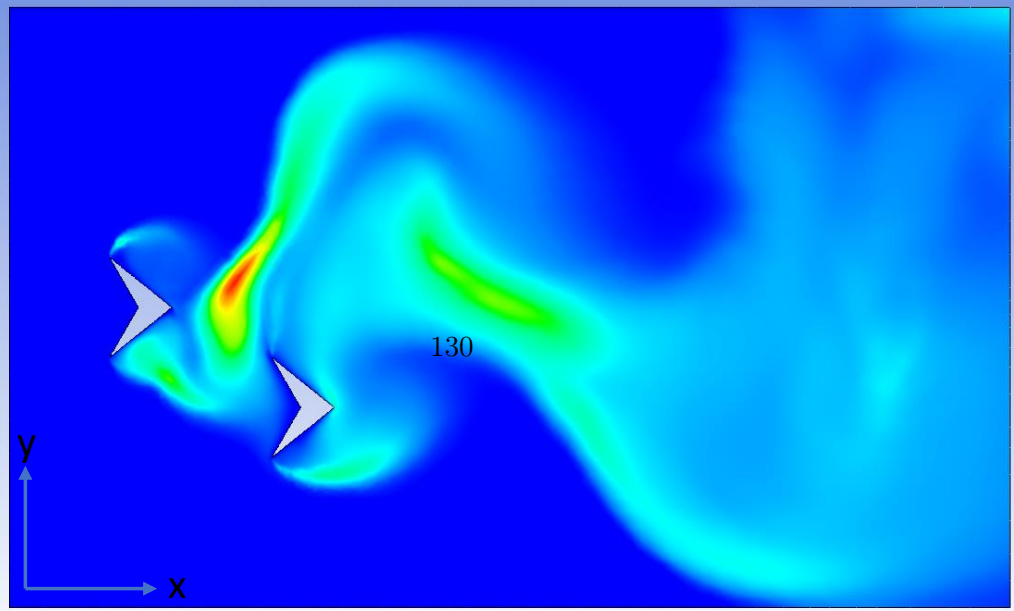
Forsøk
4.11

Turbulence Kinetic Energy

Contour 1



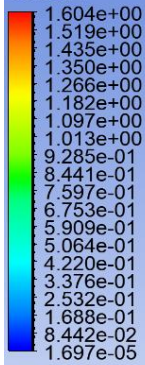
[m² s⁻²]



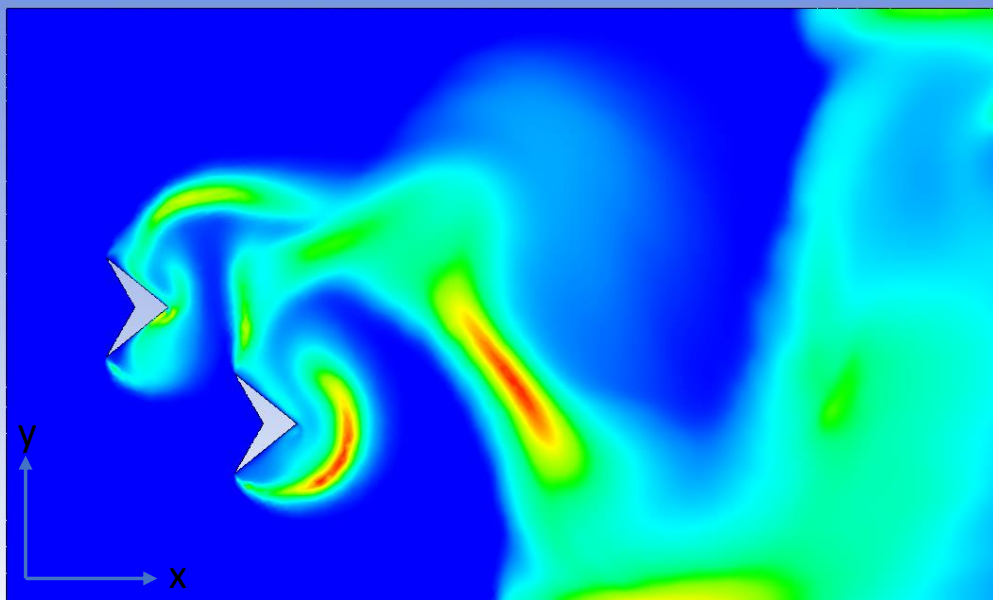
Forsøk
4.12

Turbulence Kinetic Energy

Contour 1



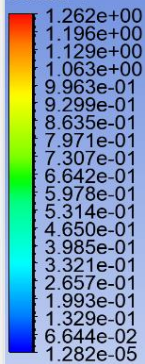
[m² s⁻²]



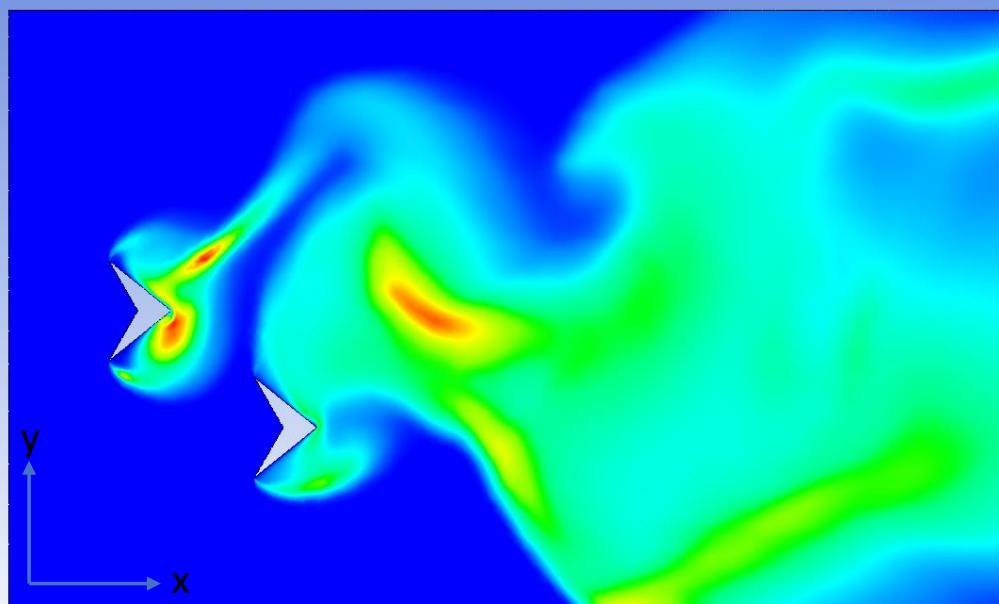
Forsøk
4.13

Turbulence Kinetic Energy

Contour 1



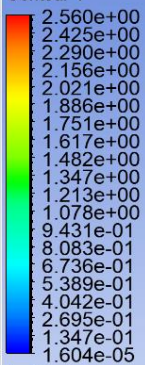
[m² s⁻²]



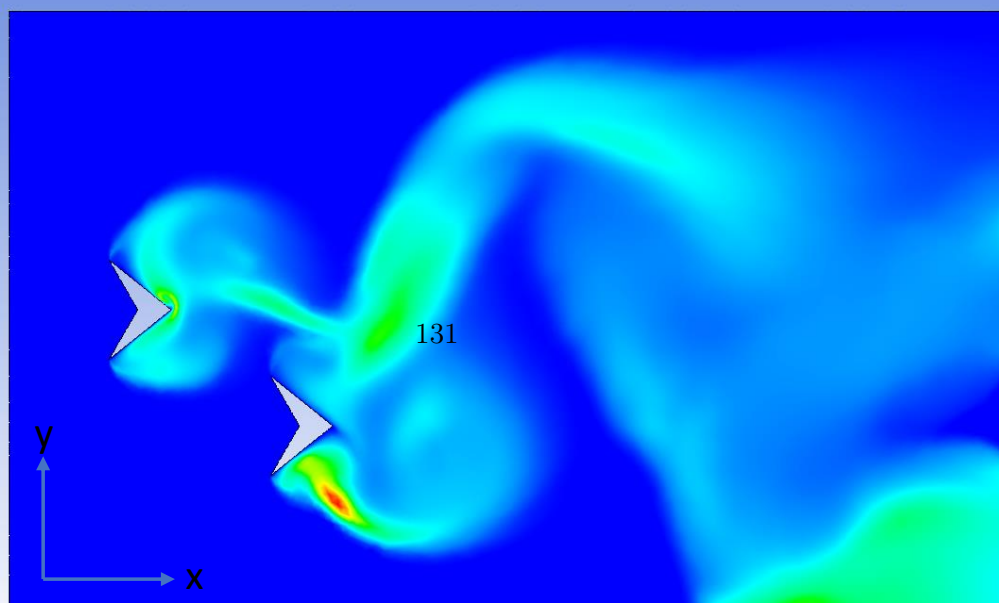
Forsøk
4.14

Turbulence Kinetic Energy

Contour 1



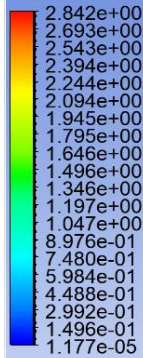
[m² s⁻²]



Forsøk
4.15

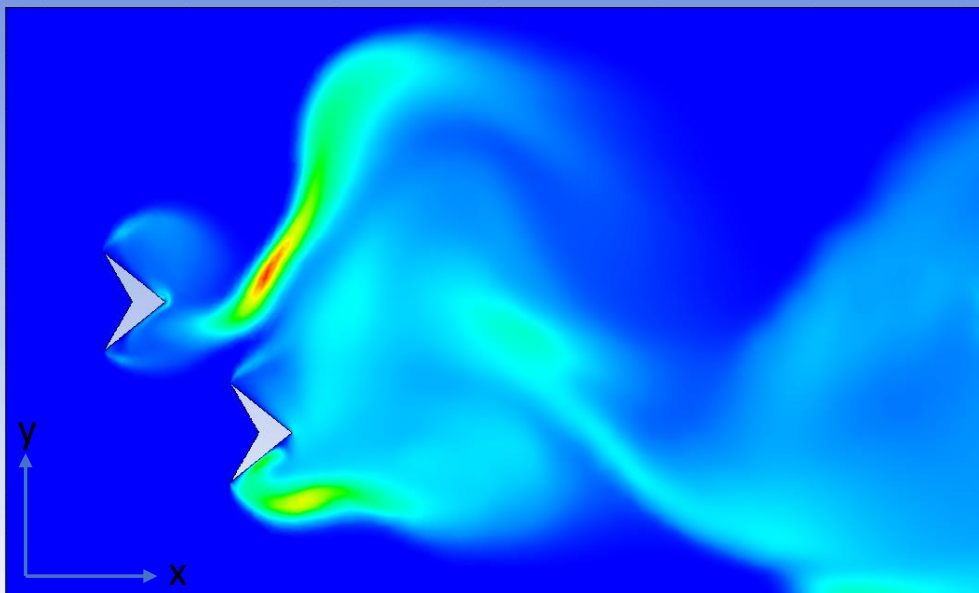
Turbulence Kinetic Energy

Contour 1



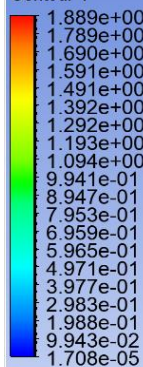
[m² s⁻²]

Forsøk
4.16



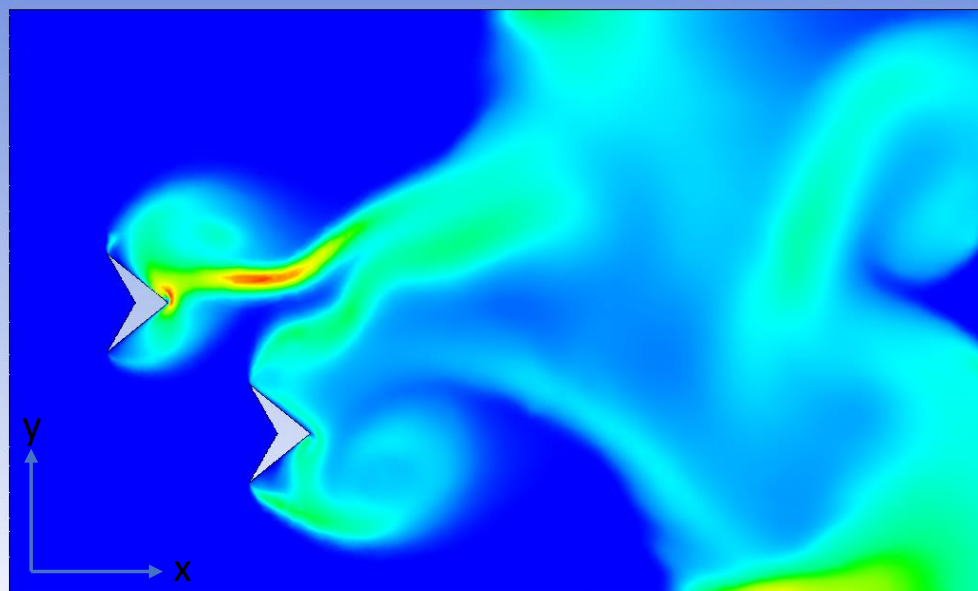
Turbulence Kinetic Energy

Contour 1



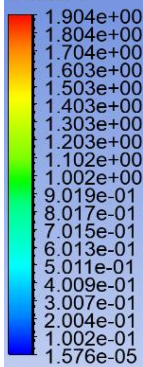
[m² s⁻²]

Forsøk
4.17



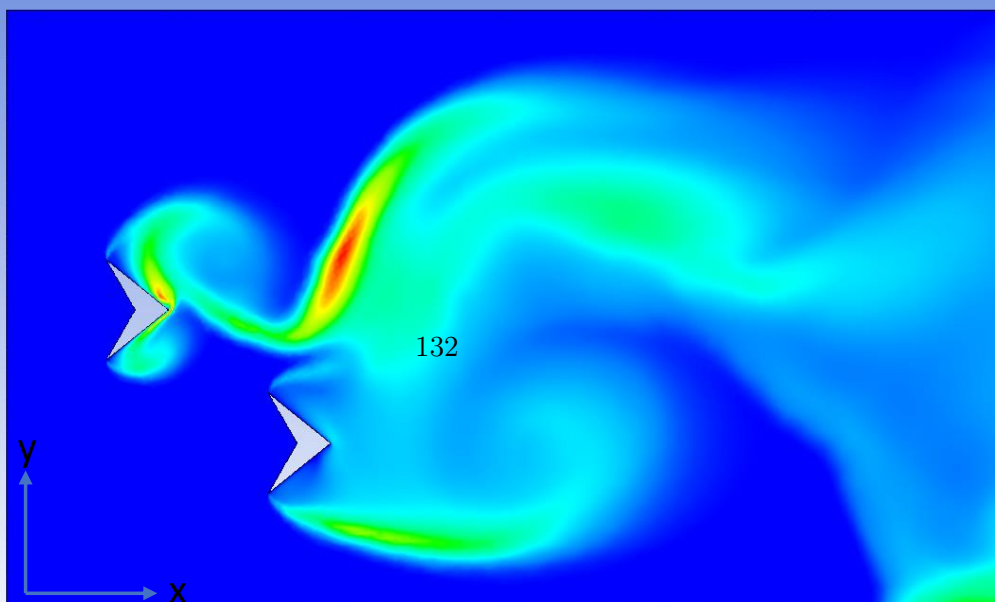
Turbulence Kinetic Energy

Contour 1



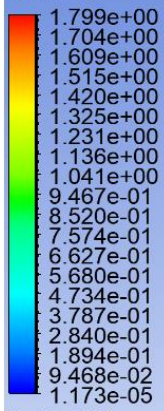
[m² s⁻²]

Forsøk
4.18



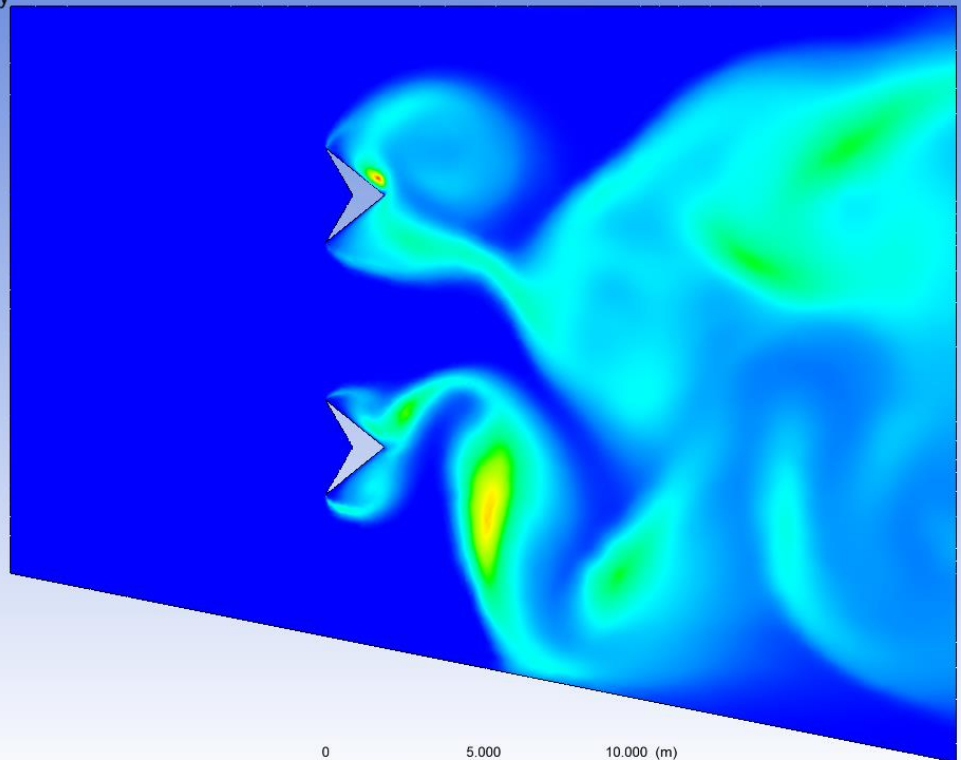
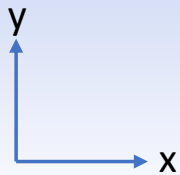
R Vedlegg - Simuleringsresultater steg 5

Turbulence Kinetic Energy
Contour 1

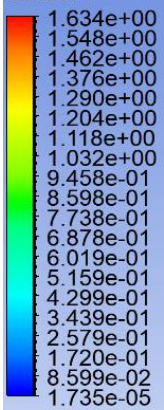


[m² s⁻²]

Forsøk 5.1

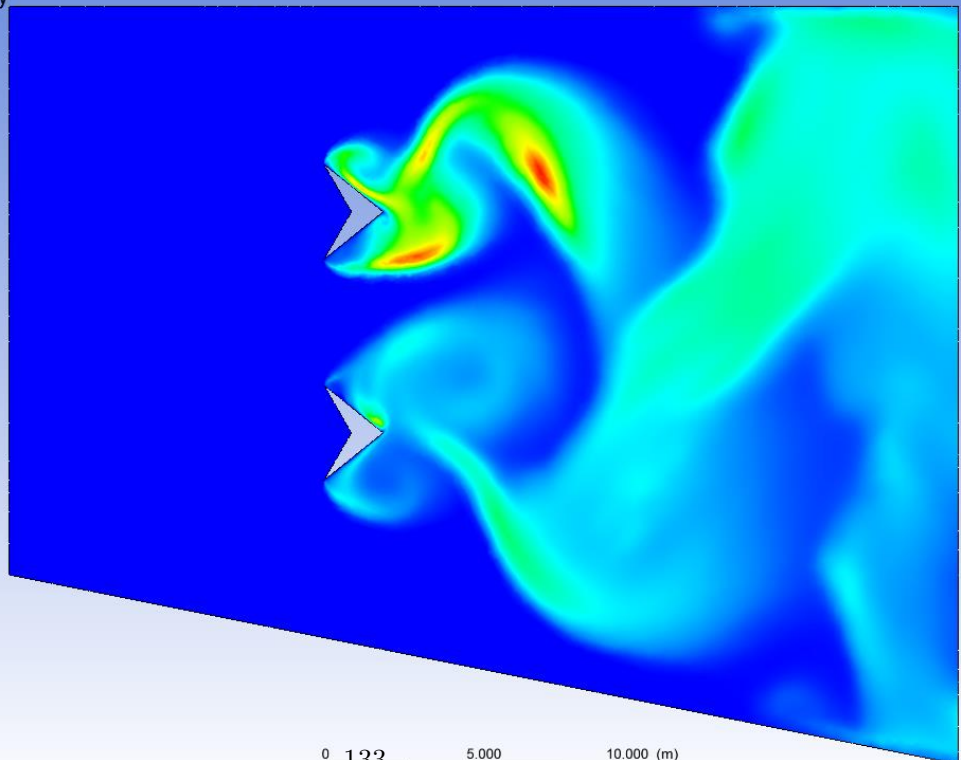
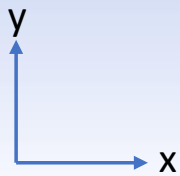


Turbulence Kinetic Energy
Contour 1

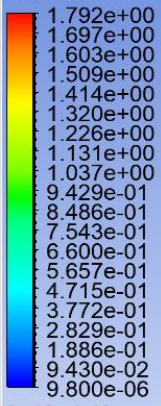


[m² s⁻²]

Forsøk 5.2

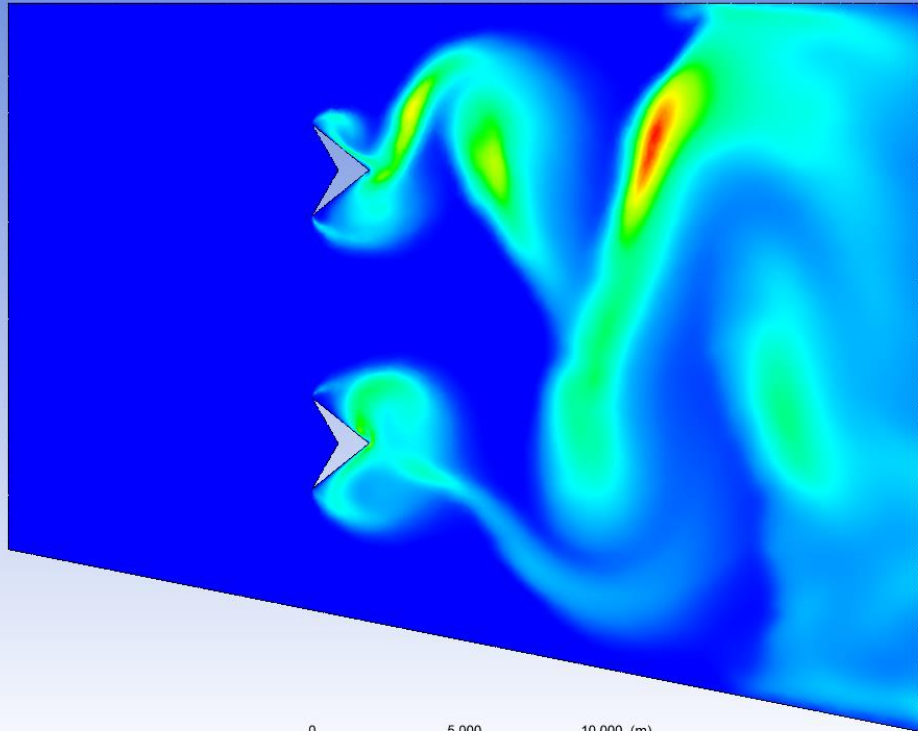
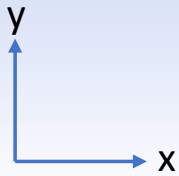


Turbulence Kinetic Energy
Contour 1

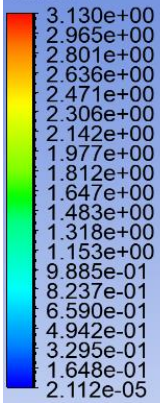


[m² s⁻²]

Forsøk 5.3

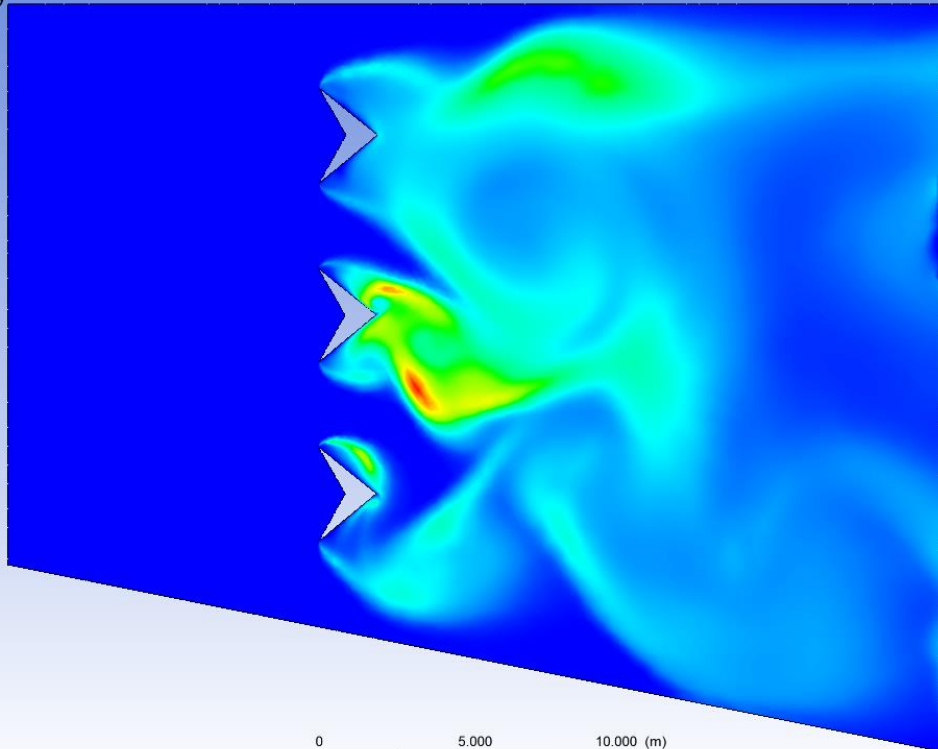
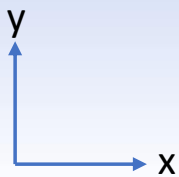


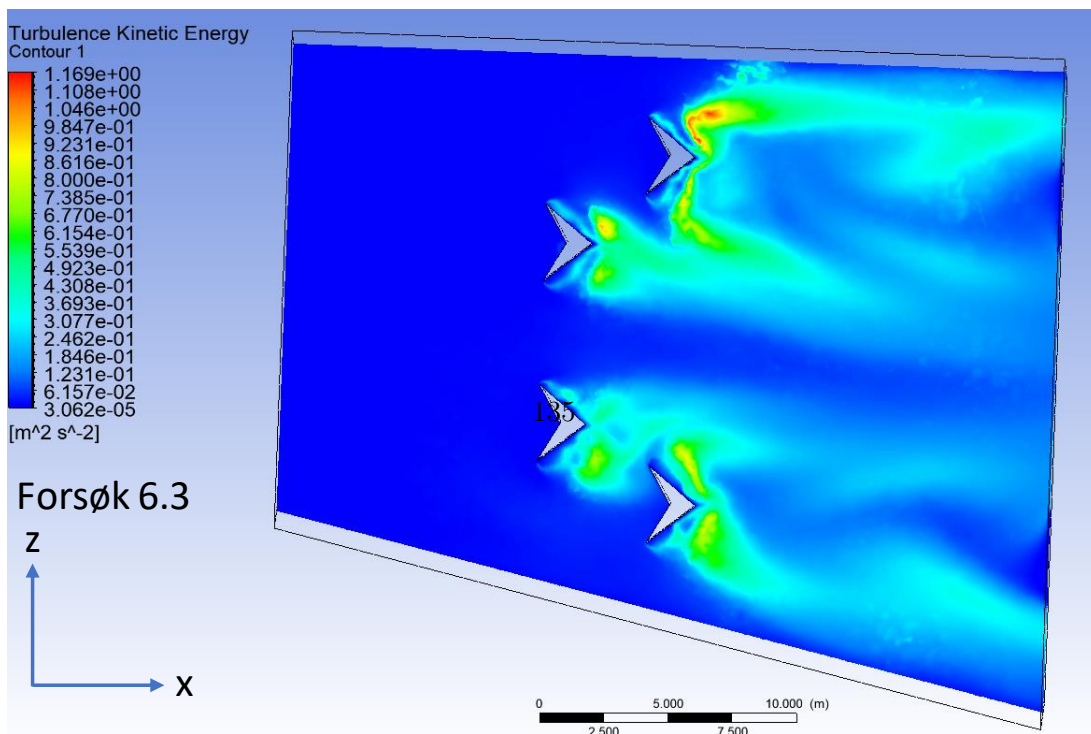
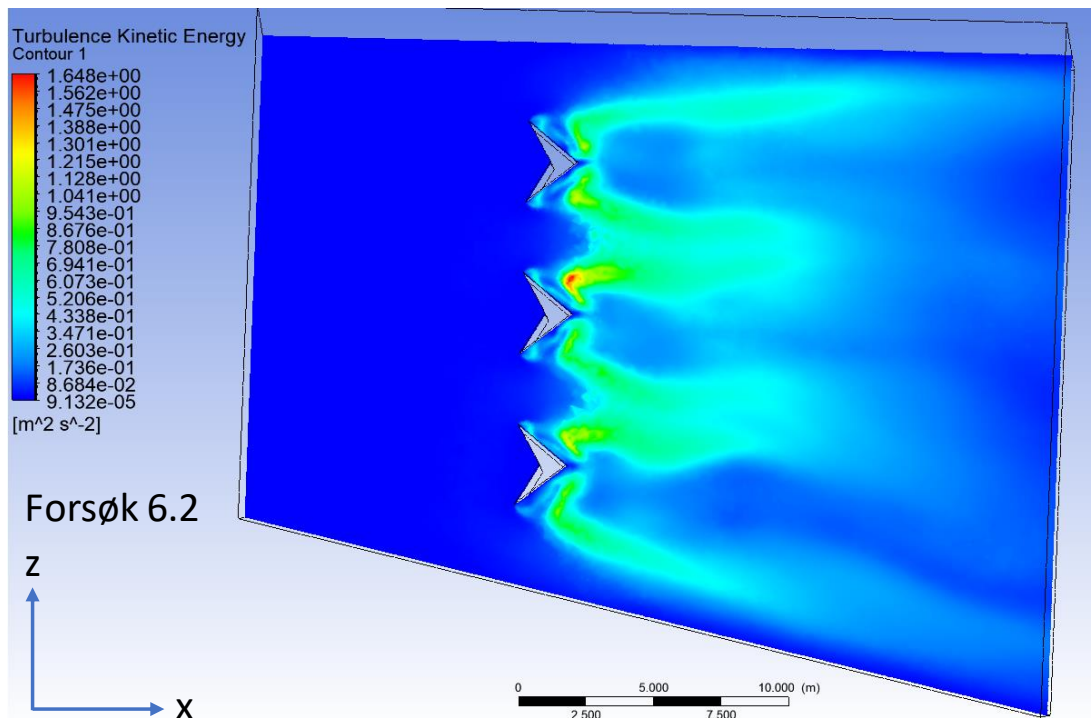
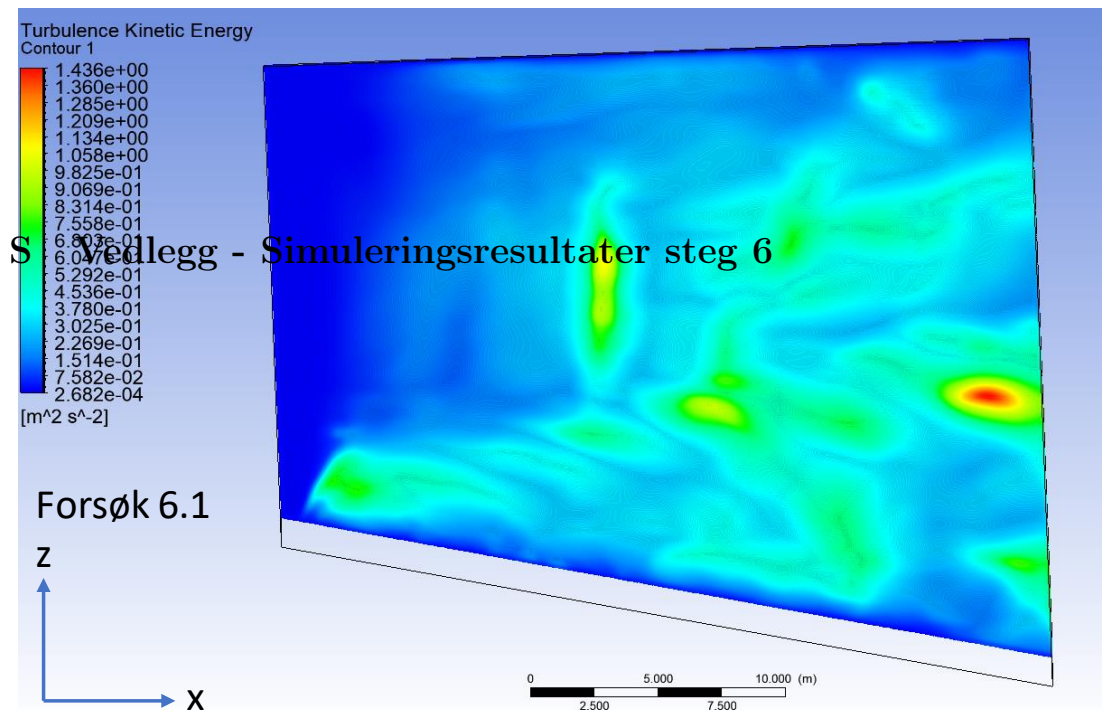
Turbulence Kinetic Energy
Contour 1



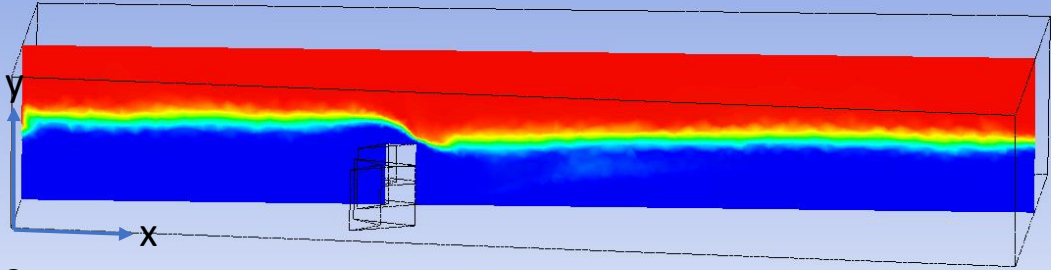
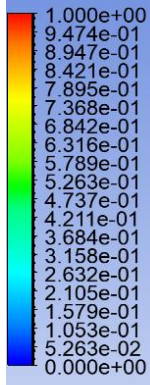
[m² s⁻²]

Forsøk 5.4



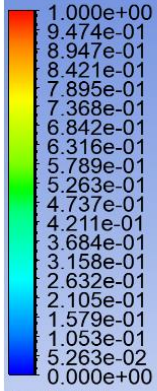


Phase 1. Volume Fraction
Contour 1

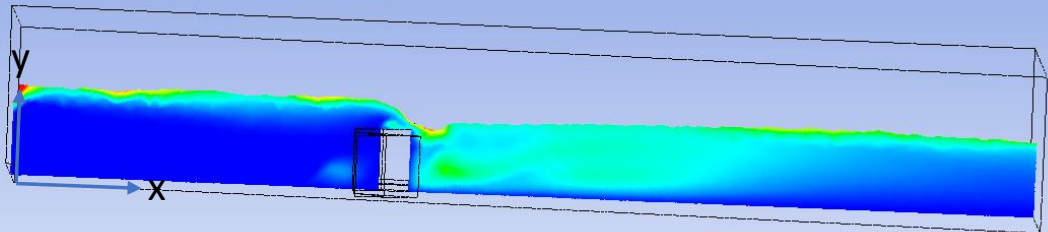


Forsøk 6.2

Turbulence Kinetic Energy
Contour 1

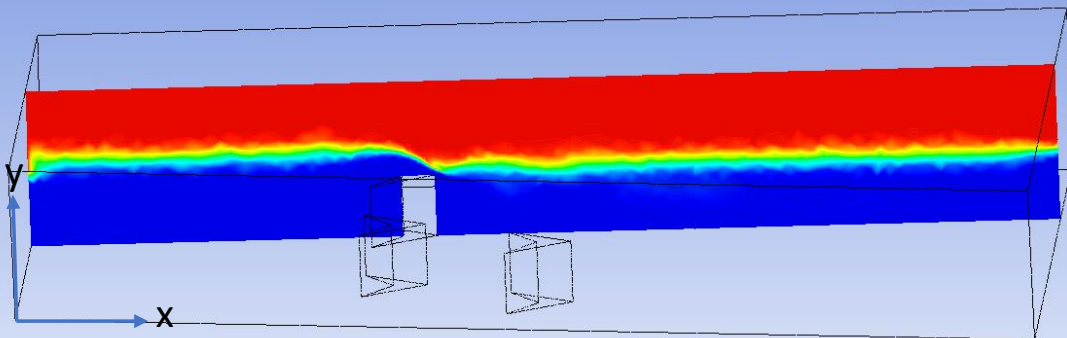
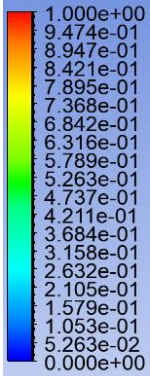


[m² s⁻²]



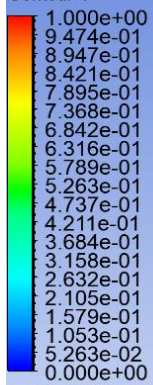
Forsøk 6.2

Phase 1. Volume Fraction
Contour 1

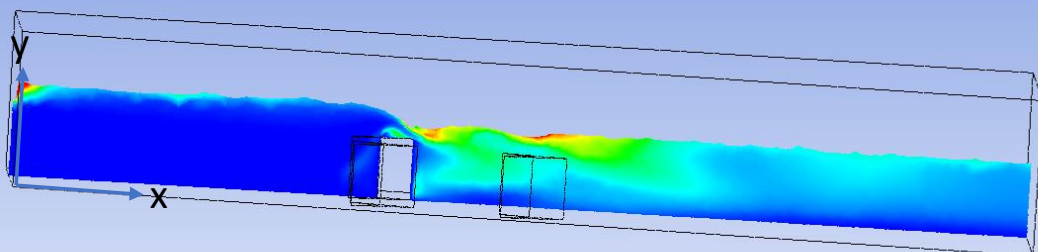


Forsøk 6.3

Turbulence Kinetic Energy
Contour 1



[m² s⁻²]



Forsøk 6.3

