

Verifisering av inntakshydraulikk i grunt inntaksmagasin for småkraftverk med bruk av CFD-verktøy

Åsmund Hasaas

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: Juni 2012

Hovedveileder: Leif Lia, IVM

Medveileder: Hanne Nøvik, IVM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for vann- og miljøteknikk



MASTEROPPGAVE VÅR 2012

Student: Åsmund Hasaas

Tittel: VERIFISERING AV INNTAKSHYDRAULIKK I GRUNT
INNTAKSMAGASIN FOR SMÅKRAFTVERK MED BRUK AV CFD-
VERKTØY

Title: Verification of intake hydraulics in a shallow intake pond for
small hydro power plant with CFD models

1 INNLEDNING

Et velfungerende inntak til et vannkraftverk er en forutsetning for vellykket drift. Hovedutfordringene med å skape gode inntaksløsninger for grunne inntak til småkraftverk er drivgods, løv, is (sarr og isgang), luftmedrivning, sedimenter og hydrauliske forhold generelt. Det er svært utfordrende å løse alle utfordringene i et inntak med lite dyp og kraftig innstrømning. En utforming tilpasset forholdene på stedet er derfor svært viktig. Det finnes svært mange ulike inntaksprinsipp som benyttes per i dag, noen gode og noen mindre gode. Flere inntak må bygges om etter kun et par års drift på grunn av for store drifts- og vedlikeholdsproblemer. Både private initiativ og større aktører kommer med nye løsninger til utprøving. NTNU Vassdragslaboratoriet ønsker å kunne hjelpe til med videreutvikling, verifisering og innovasjon innenfor dette fagområdet.

2 BAKGRUNN

Det er ønskelig å finne ut om aktuelle problemer ved småkraftverksinntak kunne vært forutsett ved å analysere strømningsforhold i inntaksmagasin beregnet med tredimensjonale beregningsprogrammer, computational fluid dynamics (CFD). Som beregningseksempel for denne masteroppgaven er det valgt Juvfossen kraftverk, eid av Tafjord Kraft AS. Det 7 MW småkraftverket ble satt i drift i 2008. Det er i ettertid oppdaget problemer med både sedimenter, luftmedrivning og drivgods foran inntaket. Problemene fører til økt tidsbruk til

drift- og vedlikehold og til redusert elektrisitetsproduksjon. Tafjord Kraft AS ønsker å forbedre inntaket dersom det kan gjøres på en rimelig måte.

Høsten 2011 ble det gjennomført feltmålinger av strømningsforholdene i inntaksmagasinet til Juvfossen kraftverk. Målingene ble gjennomført og dataene postprosessert som en del av prosjektoppgaven ‘ Feltmåling av strømningsforhold i inntaksmagasin til småkraftverk’, skrevet av Åsmund Hasaas, 2011. Data fra feltmålingene skal benyttes til å sammenlikne beregnede strømningsforhold i numeriske modeller.

3 PROBLEMSTILLING

Denne masteroppgaven har to hoveddeler. Den første delen er å sette opp en CFD – modell og vurdere om den er egnet til å beskrive strømningsforholdene i det grunne inntaksmagasinet til Juvfossen kraftverk. Den andre delen er å finne ut om en analyse av strømningsforholdene i inntaksmagasinet kan benyttes til å vurdere funksjonen til inntakskonstruksjonen til Juvfossen kraftverk. For å kunne vurdere om metoden med å benytte strømningsforhold beregnet med CFD-modeller er generelt anvendelig til å vurdere et inntaksmagasin før det bygges, må modellen lages for et så stort område slik at øvre grensebetingelse er upåvirket av inntaksmagasinet nedstrøms.

Den første delen av oppgaven innebærer å lage en 3D-tegningen av geometrien til inntaksmagasinet, basert på skannede og innmålte data, og av inntakskonstruksjonene, basert på 2D-tegninger. Tegningen skal gjøres om til .stl-filer som kan importeres til CFD-programmet Star CCM+. Grid må lages. Det må vurderes hvor sensitiv modellen er for cellestørrelsen i gridet, tidsskritt lengden, ruhetsverdier på bunnen og for input-verdier for hastighetsfeltet i oppstrøms ende av modellen. Et standard modelloppsett med standard verdier skal benyttes, men det må gjøres en vurdering av betydningen av benyttet vannoverflatemodell, turbulens modell, wall treatment (y^+), om det er 1. eller 2. ordens løsning av Navier-Stokes likning og benyttede ‘relaxation’-faktorer. Benyttet beregningstid for hver simulering må dokumenteres. Beregnede hastighetsfelt og strømningsforhold skal sammenliknes med innmålte verdier fra feltarbeid. Feilkilder må synliggjøres og vurderes. Dersom det blir tid, kan det modelleres ulike utforminger av inntakskonstruksjonen.

Den andre delen av oppgaven går på å vurdere strømningsforholdene i inntaksmagasinet til Juvfossen kraftverk opp mot registrerte driftsproblem ved inntakskonstruksjonen. Det skal registres hvordan flytende og suspendert drivgods oppfører seg og eventuelt akkumuleres, hvor sedimenter legger seg og hvor og når det oppstår luftvirvler og luftmedrivning. Strømningsforholdene skal vurderes med økende detaljeringsnivå, fra gjennomsnittshastigheter, til hastighetsfelt, Reynoldstall og Froudetall, turbulensnivåer og til virvlingstall. Luftvirvler er for kompliserte til at de skal modelleres i denne oppgaven. Det skal likevel gjøres en vurdering av om strømningsbildet i en større skala vil kunne beskrive opprinnelsen til problemet med luftmedrivning. Det skal vurderes hvordan de beregnede strømningsforholdene egner seg for analyse av funksjonen til inntakskonstruksjonen i forhold til de målte og visuelt observerte strømningsforholdene.

4 MÅL

Målet med masteroppgaven er å vurdere om numerisk modellering med CFD er egnet til å beregne strømningsforhold i et grunt inntaksmagasin for småkraftverk. Derneft er målet å vurdere om driftsproblemer med et inntak til et småkraftverk kan forutsees ved å analysere beregnede strømningsforhold i inntaksmagasinet. Resultatene skal være av slik kvalitet at de kan publiseres i tidsskrift. Oppgaven skal inneholde vurdering av feilkilder og sensitivetsanalyse av parametere i CFD-modellen. Oppgaven skal konkludere på om arbeidet har vært vellykket, og om det bør gjøres videre arbeider.

5 KONTAKTPERSONER

NTNU Leif Lia, professor (formell veileder)
 Hanne Nøvik, stipendiat (biveileder)

Tafjord Kraft AS Perry Åse

Diskusjon med og bidrag fra kollegaer og medarbeidere ved NTNU, SINTEF, Tafjord Kraft AS og eventuelt andre kraftselskap er anbefalt. Bidrag som inngår i oppgava skal alltid refereres til på rett vis.

5 RAPPORTFORMAT, REFERANSER OG ERKLÆRING

Oppgaven skal skrives i et tekstbehandlingsprogram og figurer, tabeller, foto etc. skal være av god rapportkvalitet. Rapporten skal inneholde et sammendrag, en innholdsliste, liste over figurer og tabeller, en litteraturliste og opplysninger om andre relevante referanser. Oppgaven skal leveres i A4 format som .pdf-fil i DAIM og trykkes i tre eksempler som leveres til faglærer/institutt.

Sammendraget skal ikke overskride 450 ord og skal være egnet for elektronisk rapportering.

Masteroppgaven skal ikke leveres senere enn mandag 11. juni 2012.

Trondheim, 12. januar 2012

Leif Lia
Professor

Hanne Nøvik
Stipendiat

Sammendrag

I denne masteroppgaven har inntaksmagasinet til Juvfossen kraftverk, ved Stranda på Sunnmøre blitt modellert med CFD programmet STAR-CCM+. Modelleringen er gjort for å se om strømningsmønsteret i inntaksmagasinet kan gjenskapes, og om det er mulig å forutse driftsproblemer. Strømningsfeltet fra CFD modellen av inntaksmagasinet er sammenliknet mot feltmålinger for både $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$ og $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$

Geometrien til selve inntaksmagasinet har blitt skannet med en laserskanner. Geometrien til elven som renner inn i inntaksmagasinet er oppmålt til cirka 55 meter oppstrøms inntaksmagasinet med GPS punktmålinger. Demning og inntakskonstruksjon er tegnet i AutoCAD i 3D fra byggetegningene. Geometrien har blitt inndelt i flere forskjellige regioner for å kunne sette forskjellige grensebetingelser.

Modellen har blitt kjørt med vann og luft med VOF til å beregne vannflaten, og kun med vann. Hvor robust modellen er, har blitt undersøkt ved at det har blitt kjørt med forskjellige innstillinger for ruhet, cellestørrelse, tidsskritt, 1. og 2. ordens diskretiserings skjema for tid, 1. og 2. ordens oppstrøms skjema og vannet har kommet inn i hele eller deler av modellen.

Modellen som er kjørt med VOF klarte ikke å gjenskape strømningsforholdene, mens modellkjøringene som ble utført med kun vann klarte gjenskape hovedstrømningene i inntaksmagasinet relativt bra. Modellen er sensitiv for geometrien i elven oppstrøms, men er ikke spesielt sensitiv for parametere som ruhet, cellestørrelse osv.

Modellen viser tydelig konsentrasjonen av hastigheten i inntaksmagasinet. Andre parametere som skjærspenning mot bunnen, TKE og virvlingstall, vil kunne gi nyttig informasjon om strømningsforholdene og gi en god pekepinn på om inntaket vil fungere som planlagt.

Abstract

In this thesis, the shallow intake reservoir to Juvfossen power plant on Starnda in Sunnmøre in the Norwegian northwest coast have been modeled by using the CFD software STAR-CCM+. The modeling is done to see if the flow pattern in the intake reservoir can be recreated, and if it is possible to anticipate operational problems. The flow pattern from the CFD model was compared to field measurements in the intake reservoir for both the discharges of $2.2 \text{ m}^3/\text{s}$ and $7.9 \text{ m}^3/\text{s}$.

The geometry of the intake reservoir has been scanned with a laser scanner. The geometry of the river which flows into the intake reservoir is measured approximately 55 meters upstream the intake reservoir with GPS point measurements. The dam and intake structure was designed in AutoCAD in 3D from the construction drawings. In STAR-CCM+ the geometry has been divided into various regions in order to set different boundary conditions.

The model has been run with water and air with VOF to calculate the water surface, and only with water. How robust the model is, has been examined by different runs with different settings for roughness, cell size, time step, 1. and 2. order discretization scheme of time, 1 and 2 order upstream scheme and the water has come into the whole or parts of the model.

The model that was ran with VOF, was unable to reproduce the flow conditions, while the models that runs were performed using only water could reproduce the main trends in the intake reservoir relatively good. The model is sensitive to the geometry of the upstream river, but is not particularly sensitive to parameters such as roughness, cell size, etc.

The model clearly shows the concentration of velocity in the inlet reservoir. Other parameters such as shear stress at the bottom, TKE and vorticity, could provide useful information about flow conditions and provide a good indication of whether the intake will work as planned or not.

Forord

Denne masteroppgaven er siste ledd i sivilingeniørutdanningen ved NTNU og instituttet for vann- og miljøteknikk, og levers våren 2012.

Grunnlaget for oppgaven ble lagt i høst da jeg utførte feltarbeid ved inntaksmagasinet til Juvfossen kraftverk. Videre i våres har det blitt svært mange frustrerte timer foran PC skjermen og et CFD program som ikke nødvendigvis gjør akkurat som brukeren vill at det skal gjøre. Mot slutten av perioden fikk jeg like vell produsert resultater, som har ført til en litt hektisk innsjutt på oppgaven.

Jeg vil takke Leif Lia som har vært hovedveileder, for at han har vært på kontoret når jeg har hatt behov for noen å diskutere med. Jeg vil rette en ekstra takk til Hanne Nøvik som har vært min biveileder, og som var med til Juvfossen for å samle inn data. Hanne har vært ekstremt positiv til prosjektet og min løsning av det, gjennom hele perioden. Hun har også gitt den oppbackingen jeg har trengt i tunge stunder.

Jeg vil også takke min kjære Linn Halvorsen som har støttet meg gjennom denne perioden. Det rettes også en takk til alle medstudentene på Verkstedloftet for hyggelige stunder, faglige og ikke-faglige diskusjoner.

Perry Aase og Tafjord Kraft må også få en stor takk for å stille opp med Juvfossen som test case og være behjelpelig både under og etter feltarbeid.

Trondheim 18. juni 2012

Åsmund Hasaas

Innholdsfortegnelse

Sammendrag.....	V
Abstract	VII
Forord.....	IX
Vedleggsoversikt.....	XIII
Figurliste.....	XIV
Tabelliste	XVI
1 Innledning.....	1
2 Teori	5
2.1 Vannstrømning	5
2.2 Computational Fluid Dynamics (CFD)	6
2.2.1 Grid.....	6
2.2.2 Turbulensmodeller	8
2.2.3 Stabilitet og konvergens	10
2.2.4 Tidsskritt lengde	10
2.2.5 Ruhet i STAR-CCM+.....	10
2.2.6 Volume Of Fluid	11
2.3 Driftsproblemer	12
2.4 Feilkilder i CFD.....	14
3 Metode.....	17
3.1 Feltmåling.....	17
3.2 Geometri	18
Oppsett av grid, cellyper og cellestørrelser	21
3.3 Modelloppsett	22
3.3.1 Grensebetingelser	22
3.3.2 Tidskritt	25
3.4 Krav til stabil løsning	25
3.5 Uthenting av resultater.....	26
4 Resultat.....	29
4.1 Modellkjøringsresultater.....	29
4.2 Resultater av sensitivitetsanalysen	40
4.2.1 Sammenlikning av ruhet.....	42
4.2.2 Sammenlikning av cellestørrelse.....	43

4.2.3	Sammenlikning av turbulensmodell.....	44
4.2.4	Sammenlikning av hastighetsfordeling inn i modell.....	45
4.2.5	Sammenlikning av 1.- og 2. ordens diskretiserings skjema for tid	46
4.2.6	Sammenlikning av tidssteg.....	47
4.2.7	Sammenlikning av oppstrøms skjema.....	48
4.2.8	Sammenlikning av geometriens påvirkning	49
4.3	Enkle beregninger.....	50
4.4	Resultater til analyse av driftsproblemer	50
4.4.1	Hastigheten.....	51
4.4.2	Skjærspenning mot bunn	52
4.4.3	Turbulent kinetisk energi	53
4.4.4	Virvlingstall.....	54
5	Diskusjon.....	55
5.1	Faseinndeling.....	55
5.2	Sammenlikningsgrunnlag	56
5.3	Geometriens påvirkning	56
5.4	Prediksjon av driftsproblemer	57
6	Konklusjon	59
7	Kilder.....	60
	Vedlegg A: Matlabskript.....	61
	Vedlegg B: TKE tabell for 2,2 m ³ /s og 7,9 m ³ /s.....	70

Vedleggsoversikt

Vedlegg A: Matlabskript

Vedlegg B: ADV måling fra felt

Figurliste

Figur 1 Oversiktskart.....	2
Figur 2 Nedslagsfelt Juvfossen kraftverk.....	3
Figur 3 Eksempel på hovedtyper av grid i STAR-CCM+. Tetraedrisk til venstre, polyedriske i midten og trimmer til høyre.	7
Figur 4 Prinsippskisse for orden av diskretisering, vist i 2D.	7
Figur 5 Shields diagram	13
Figur 6 Flyfoto av inntaksmagasinet til Juvfossen kraftverk med plassering av tverrsnitt, demning, inntakskonstruksjon og definisjon av hvilke siden "høyre elvebredd" er.	17
Figur 7 Taggete overflate ved steinplastring i STAR-CCM+	19
Figur 8 Jevn overflate etter omtegning av griddet i STAR-CCM+.....	19
Figur 9 Inntaksmagasinet til Juvfossen kraftverk nedtappet for rensk av sedimenter i kanal ved inntaket.....	20
Figur 10 Oversikt over inndelte regioner i modell.....	20
Figur 11 Utsnitt av skråfjell med 0,20 m celler, fra felt og 0,30 m celler.....	21
Figur 12 Illustrasjon av ruheten på elve- og magasinbunn. Støvvålsålen er 0,31 m lang.....	23
Figur 13 Strømning på overflaten av inntaksmagasinet i felt	31
Figur 14 Strømlinjer med bakevje modellkjøring 9	31
Figur 15 Jevnt fordelt strømlinjer fra modellkjøring 1.....	31
Figur 16 Fargeplott av tverrsnitt 1 med 7,9 m ³ /s.....	32
Figur 17 Fargeplott av tverrsnitt 2, 7,9 m ³ /s	33
Figur 18 Fargeplott av tverrsnitt 3, 7,9 m ³ /s	34
Figur 19 Fargeplott tverrsnitt 1, 2,2 m ³ /s	35
Figur 20 Fargeplott av tverrsnitt 2, 2,2 m ³ /s	36
Figur 21 Fargeplott tverrsnitt 3, 2,2 m ³ /s	37
Figur 22 Maksimal- og minimal hastighetskonsentrasjon for modellkjøring 9 i ikke-stasjonær vannstrømning i CDF-modellen.....	38
Figur 23 Oppsummering av sensitivitetsanalysen.....	40
Figur 24 Sammenlikning av ruhetens påvirkning på vannhastigheten i tverrsnitt 1,2 og 3 ved 7,9m ³ /s og 2,2 m ³ /s.....	42
Figur 25 Sammenlikning av cellestørrelsens betydning for vannhastigheten.....	43
Figur 26 Sammenlikning av turbulensmodellens betydning for vannhastigheten	44
Figur 27 Sammenlikning for hastighetsfordelingens inn i modellen betydning for vannhastigheten	45
Figur 28 Sammenlikning for diskretiseringsskjemas betydning for vannhastigheten	46
Figur 29 Sammenlikning av tidsskrittets betydning for hastigheten.....	47
Figur 30 Sammenlikning av betydningen av orden til turbulensmodell	48
Figur 31 Fargeplott av vannhastigheten for modellkjøring 9 inn i inntaksmagasinet 0,30 m under overløpsterskelen.....	49
Figur 32 Fargeplott av vannhastigheten for modellkjøring med endret geometri inn i inntaksmagasinet 0,30 m under overløpsterskelen.....	49
Figur 33 Fargeplott av hastigheten for 7,9 m ³ /s	51
Figur 34 Fargeplott av hastigheten for 2,2 m ³ /s	51
Figur 35 Fargeplott av skjærspenning mot bunnen for 7,9 m ³ /s	52

Figur 36 Fargeplott av skjærspenning mot bunnen for 2,2 m ³ /s	52
Figur 37 Fargeplott av TKE for 7,9 m ³ /s	53
Figur 38 Fargeplott av TKE for 2,2 m ³ /s	53
Figur 39 Fargeplott av virvlingstall for 7,9 m ³ /s.....	54
Figur 40 Fargeplott av virvlingstall for 2,2 m ³ /s.....	54
Figur 41 Moldskreddøla med snø og is under oppmåling. Foto: Perry Aase.....	57
Figur 42 Oversiktsbilde over oppsamling av løv og kvist, samt områder med grove- og finere bunnpartikler	58

Tabelliste

Tabell 1 Vannføringen i de tre tverrsnittene etablert i inntaksmagasinet.....	18
Tabell 2 Oversikt over ruhet på de forskjellige overflatene	22
Tabell 3 Falltap over varegrind	25
Tabell 4 Tidsbruk og RMKA verdier for stabile modellkjøringer	30
Tabell 5 TKE verdier fra felt og verdier som er hentet ut fra STAR-CCM+ ved 7,9 m ³ /s.....	39
Tabell 6 TKEverdier fra felt og hentet ut fra STAR-CCM+ ved 2,2 m ³ /s.....	39
Tabell 7 Enkle beregnede verdier.....	50

1 Innledning

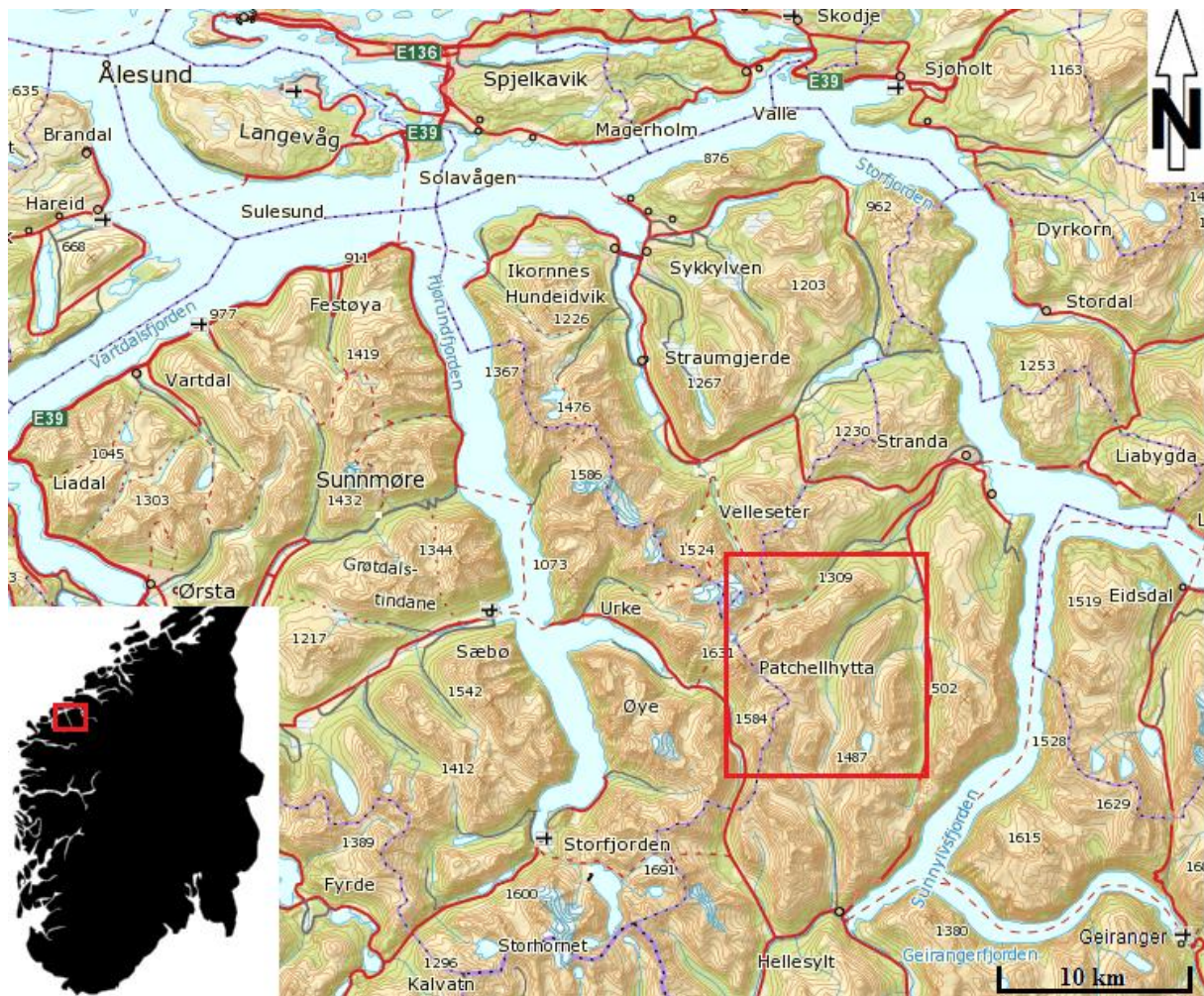
De siste fem årene har det årlig blitt bygget 30 – 40 nye småkraftverk i Norge. Antallet vil trolig også være økende frem mot år 2020, som følge av at det nå blir innført grønne sertifikater. For at de nye kraftverkene skal kunne ha en vellykket drift, må inntaket være velfungerende. Det å få til et velfungerende inntak er en utfordring, fordi det på grunn av inntak vil kunne oppstå problemer med drivgods, is, luftmedrivning, sedimenter og hydrauliske forhold generelt.

Det finnes i dag forskjellige inntaksløsninger og prinsipper for utforming av inntaket, som benyttes når kraftverksprosjekter utvikles. Hvert inntak er unikt på grunn av terreng- og innstrømningsforhold, og kan ikke direkte overføres til andre prosjekter. Noen av utformingene er svært gode, mens andre er mindre gode. Enkelte av løsningene er så dårlige at inntakene til kraftverkene må bygges om etter kun få års drift, på grunn av store drifts- og vedlikeholdsproblemer.

For å kunne planlegge et velfungerende kraftverksinntak, ville det vært interessant å se om problemer kunne vært forutsett ved bruk av en computational fluid dynamics (CFD) modell. Som et testtilfelle i denne oppgaven er det brukt Juvfossen kraftverk som er eid av Tafjord Kraft AS. Juvfossen er et anlegg med kjente driftsproblemer, og Tafjord Kraft AS var villige til å tilrettelegge for datainnsamling i inntaksmagasinet.

Formålet med masteroppgaven er å sette opp en CFD-modell av inntaksmagasinet til Juvfossen kraftverk og sammenlikne modellen med resultater fra feltmålinger. Feltemålingene er utført og postprosessert som en del av prosjektoppgaven "Feltemåling av strømningsforhold i inntaksmagasin til småkraftverk", skrevet av undertegnede. Videre er det blitt sett på om strømningsforholdene som fremkommer av CFD modellen kan brukes til å forutse de driftsproblemer som er registrert ved Juvfossen kraftverk.

Juvfossen kraftverk ble satt i drift i 2002. Kraftverket ligger i Stranda kommune på Sunnmøre i Møre og Romsdal fylke, se oversiktskart i Figur 1. Kraftverket tar vannet fra elva Moldskreddøla. Det er installert to Francisturbiner med en slukeevne på $2,4 \text{ m}^3/\text{s}$ hver og en installert effekt på $2 \times 3,5 \text{ MW}$. Brutto fallhøyde er 172 meter, og nedslagsfeltet er på ca. 34 km^2 . Vannveien består av 400 meter tunnel og 700 meter nedgravd rørgate. Midlere årlig produksjon ligger på 24 GWh, fordelt på 16,4 GWh i sommerhalvåret og 7,6 GWh på vinterhalvåret. Kraftverkets plassering, inntak og nedslagsfelt er vist i Figur 2.



Figur 1 Oversiktskart

Juvfossen kraftverk har problemer med virveldannelse og luftmedrivning ved inntaket. Det legger seg drivgods på inntaksrista og det legger seg sedimenter i en utsprengt kanal like oppstrøms inntaksrista. Tafjord Kraft AS opplyser at kanalen må renskes cirka en gang hvert tredje år og at steinstørrelse er i størrelsesorden fra håndballer til golfballer. Det antas at grus og sand legger seg i tunnelen.

Nedslagsfeltet til Juvfossen kraftverk er Strandamolskredalen, Tverrdalen og Vatnedalen, se Figur 2. Terrenget er bratt, og det er tydelige spor i fjellsidene etter både snø- og løsmasseskred. Det er et lokalt masseuttak i en moreneforekomst like oppstrøms inntaksmagasinet. Grove steiner blir fra dette masseuttaket dumpet ned en skråning mot elva. Elva graver i morenemasser i yttersvinger. Det ble observert glattskurte steiner på elvbunnen som vitner om massetransport. Vegetasjonen er stort sett løvtrær med hovedvekt av bjørk, men også innslag av or. Tregrensa ligger på ca. 600 meter.

2 Teori

2.1 Vannstrømning

Vannets bevegelse i en elv kan beskrives på flere måter, og med forskjellig nøyaktighetsnivå.

Stasjonær eller ikke-stasjonær

Vannstrømmen i en elv kan være stasjonær eller ikke-stasjonær. Ved stasjonær strømning endrer ikke vannstanden seg, og strømningsbildet er uforandret over tid. Ikke-stasjonær strømning kjennetegnes ved at vannstanden endres eller at strømningsbildet varierer med for eksempel virvler eller bølger.

Gjennomsnittshastighet og hastighetsfordeling

For å beskrive hastigheten på vannet kan man benytte gjennomsnittshastigheten.

Gjennomsnittshastigheten i en elv er gitt ved:

$$V = \frac{Q}{A}$$

hvor Q er vannføringen i elva og A er arealet av vannstrømmen. En mer nøyaktig måte å beskrive strømningen på er å beskrive hastighetsfordelingen. På grunn av friksjonen fra elvebunn og kantene av elva, vil hastigheten være lavere der vannstrømmen er i kontakt med en overflate. Hastigheten kan også være konsentrert i deler av tverrsnittet på grunn av endring i geometri.

Under- og overkritisk strømning

Den samme vannføringen kan strømme underkritisk eller overkritisk. Strømningen er avhengig av forskjellig vanddyp, bunnhelning og forhold opp- og nedstrøms det stede vannføringen observeres. Ved underkritisk strømning er det gravitasjonskreftene som dominerer, mens det for overkritisk strømning er treghetskrefter som dominerer. Froude tall kan brukes til å vurdere skille mellom de to strømningsformene. Froude tall er gitt ved:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \left(\frac{A}{B}\right)}}$$

V er hastigheten, g er tyngdens akselerasjon, A er arealet av vannstrømmen og B er bredden av den frie vannoverflaten (Chanson, 2004). Hvis Froude tallet er større enn en, er strømningen overkritisk. Er Froude tallet under en, er strømningen underkritisk.

Laminær og turbulent strømning

Strømmer vannpartiklene i parallelle sjikt, er strømmen laminær. Beveger partiklene seg i uregelmessige baner, er strømningen turbulent. Strømmen sies å være turbulent når Reynolds tall er større enn 12 500. Reynolds tall er gitt som:

$$Re = \frac{V \times L}{\nu}$$

V er vannhastigheten, L er lengde (for eksempel vanddybde) og ν er væskens kinematiske viskositet (for vann, cirka 10^{-6} m²/s) (Chow, 1959).

Virvling

Virvling er relatert til mengden av "sirkulasjon" i en væske, eller hvor mye et element av væska spinner. Den gjennomsnittlige virvling, ω_{snitt} , i en liten region av strømning er lik sirkulasjonen, Γ , rundt grensen av det lille området, dividert med arealet, A , av den lille regionen:

$$\omega_{snitt} = \frac{\Gamma}{A}$$

(Clancy, 1975)

2.2 Computational Fluid Dynamics (CFD)

CFD er en del av fluidmekanikk som bruker numeriske metoder og algoritmer for å løse og analysere problemer hvor væske er involvert. Ved hjelp av dagens kraftige datamaskiner kan man simulere løsninger av væskers samspill og bevegelse langs overflater, gitt ved randbetingelser. De fleste CFD programmer løser Navier-Stokes likning i hver celle i et grid, som geometrien er delt opp i.

En rekke CFD program finnes i dag, både med lisens og som gratis programvare. Instituttet for vann og miljøteknikk ved NTNU har per i dag lisens på CD-adapcos STAR-CCM+. Dette er et program som kan brukes til å løse problemer med strømning av væsker og fast stoff, varmetransport og spenninger.

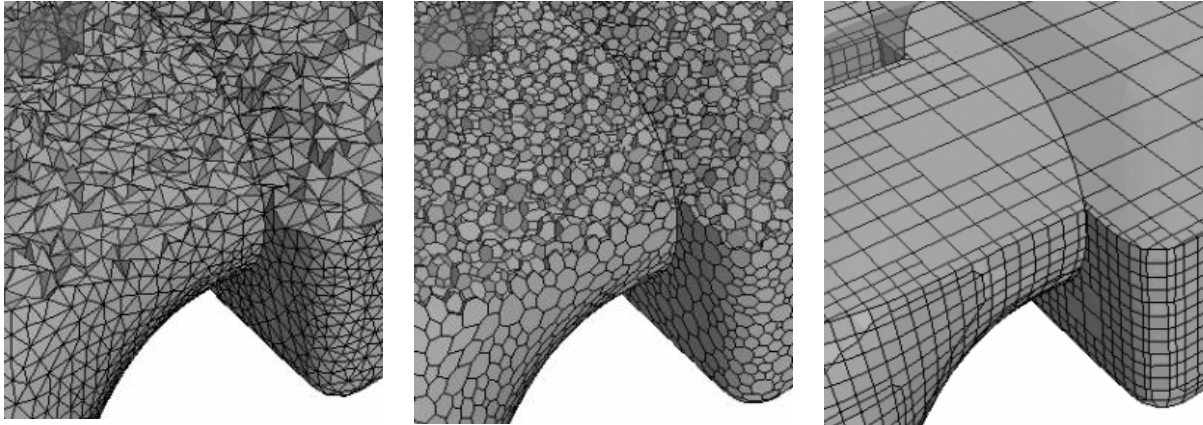
2.2.1 Grid

Et av de grunnleggende prinsipper i CFD, er å dele væskegeometrien inn i celler. I hver slik celle blir så likningene løst. Gridet er en samling av celler og er kjennetegnet av cellenes struktur og oppbygging.

I STAR-CCM+ er det mulig å bruke tre hovedtyper av gridgeneratorer. De tre hovedtypene er:

- Polyedriske grid
- Tetraedriske grid
- Trimmer grid

Eksempler på slike grid er gitt i Figur 3.

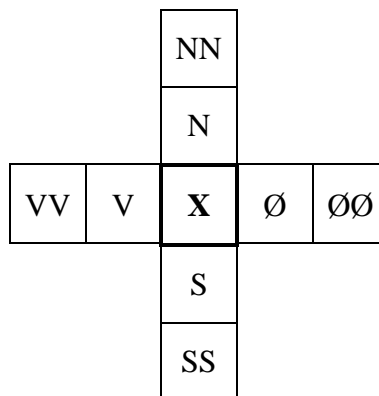


Figur 3 Eksempel på hovedtyper av grid i STAR-CCM+. Tetraedrisk til venstre, polyedriske i midten og trimmer til høyre.

Et tetraedrisk grid kommer raskets til en løsning, og bruker mindre minne for et gitt antall celler enn polyedriske- og trimmer celler gjør. Det trengs derimot 6 – 8 ganger så mange celler for å få en like nøyaktig løsning som for grid av polyedriske- eller trimmer celler. Grid med polyedriske- eller trimmer celler vil gi best nøyaktighet (STAR-CCM+, 2012). Polyedriske grid er laget ved å slå sammen tetraedriske celler. Som det fremgår av Figur 3, har et polyedrisk grid vanskeligheter med å lage en jevn overflate, slik som et trimmer grid klarer.

Diskretisering

Diskretisering er å omgjøre en partiell differensialligning til en ny likning der variabelen i en celle er en funksjon av variablene i nabocellene. Den nye funksjonen kan sees på som et vektet snitt av nabocellen. Hva slags orden en diskretisering har, er avhengig av hvilke naboceller som blir brukt. Et 1. ordens diskretiseringsskjema vil i 2D bruke nabocellene som er nord (N), sør (S), øst (Ø) og vest (V) for seg selv (X), se Figur 4. I et 2. ordens diskretiseringsskjema, vil cellene som ligger nord, sør, øst og vest for disse igjen (NN, SS, ØØ, VV for den aktuelle cellen X) også bli brukt for å fastsette verdien i cella. I 3D vil det i tillegg bli brukt verdier som er over og under, henholdsvis O, OO, U og UU.



Figur 4 Prinsippkisse for orden av diskretisering, vist i 2D.

Oppstrøms skjema

I et grid som ikke beveger på seg er verdien i cellen gitt i midten av cellen. Når en endeligvolum metode benyttes, må verdier på cellekantene beregnes. For et oppstrøms skjema, vil cellene som ligger oppstrøms benyttes. 1. ordens oppstrøms skjema benytter en celle oppstrøms, mens 2. ordens oppstrøms skjema benytter to celler oppstrøms.

2.2.2 Turbulensmodeller

I STAR-CCM+ har man mulighet til å benytte seg av tre hovedtyper for å modellere turbulens. Dette er

- Reynolds-Averaged Navier-Stokes ligninger (RANS) modeller
- Stor virvel simulering (Large Eddy simulation) (LES)
- Separat virvel simulering (Detached eddy simulation) (DES)

De fleste modeller blir utført med RANS (STAR-CCM+, 2012). LES bruker et svært fint grid og bruker kun turbulensmodeller på de små virvlene (Olsen, 2011). DES er en kombinasjon av RANS og LES. Denne modellen krever ikke-stasjonær strømming og krever også at gridet er svært tett og nøyaktig (STAR-CCM+, 2012). På grunn av det tette gridet krever LES og DES stor beregningskapasitet, og blir derfor ikke brukt i denne oppgaven.

RANS likninger

Navier-Stokes likning beskriver vannhastighetene. Likningen er utledet med bakgrunn i kraftlikevekten på et lite element med vann i laminær strømming:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-P \delta_{ij} + \rho \nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right)$$

Når strømmingen er turbulent, blir hastigheten delt opp i en gjennomsnittshastighet U og en variabel u , for å behandles i Navier-Stokes ligning. u er differansen mellom den aktuelle hastigheten og gjennomsnittshastigheten (Olsen, 2011). Reynolds spenningsledd må løses for å bruke denne tilnærmingen. Reynolds spenningsledd er gitt ved:

$$-\rho \overline{u_i u_j}$$

Det er to måter å løse spenningsleddet i STAR-CCM+. Dette er:

- Virvel viskositetsmodeller
- Reynolds spenningstransportmodell

Virvel viskositetsmodeller

I disse modellene blir Reynolds spenningsledd modellert som funksjon av hovedstrømmene (STAR-CCM+, 2012). Oftest er det Boussinesq tilnærming som blir brukt (Olsen, 2011). Boussinesq tilnærming er gitt som:

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \rho \nu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

ν_T er turbulent virvelviskositet, U er gjennomsnittshastighet og k er den turbulente kinetiske energien (TKE) definert som

$$k \equiv \frac{1}{2} \overline{u_i u_j u_k} \quad (3)$$

Videre er δ_{ij} Kronecker delta som er 1 hvis $i=j$ (Olsen, 2011).

I STAR-CCM+ kan man bruke tre forskjellige modeller for å estimere Reynolds spenningsledd. Dette er:

- Spallart-Allmaras modell
- k-epsilon modell
- k-omega modell

Spalart-Allmaras turbulens

Denne modellen løser en konveksjon-diffusjonslikning for virvelviskositeten, hvor de forskjellige leddene tar hensyn til forskjellige fysiske fenomener (Olsen, 2011). Modellen egner seg for forhold der bunnlagene ligger sammen. Hvis det er en separasjon, er denne svak (STAR-CCM+, 2012).

k-epsilon turbulens

Modellen løser to partiell differensiallikninger, en for TKE og en for dissipasjonen av turbulent kinetisk energi, ϵ (Olsen, 2011). Modellen egner seg godt for problemer med kompliserte sirkulasjonssoner. Videre er modellen et godt kompromiss mellom å være robust, hvor mye dataressurser som blir brukt og nøyaktighet. (STAR-CCM+, 2012).

k-omega turbulens

Denne modellen løser i likhet med k-epsilon modellen to partiell differensiallikninger, hvor TKE regnes ut likt. ω – leddet er definert som den spesifikke dissipasjonsraten gitt ved

$$\omega \sim \frac{\epsilon}{k}$$

(STAR-CCM+, 2012)

2.2.3 Stabilitet og konvergens

Løsningen av RANS likningen er en iterativ prosess. En starthastighet blir gitt, og en rekke iterasjoner blir utført for å komme frem til en riktigere hastighet for den angitte cellen. I en slik prosess må et kriterium være satt for å avgjøre om løsningen har konvergert. Et slikt mål kan blant annet være residualer. Residualene er et mål på hvor stor forskjell det er mellom hastigheten i den aktuelle iterasjonen og den riktige hastigheten. En lav verdi av residulen indikerer at løsningen er konvergert (Olsen, 2011).

2.2.4 Tidsskritt lengde

Når alle regneoperasjoner er utført i en celle for et gitt tidspunkt, må alle regneoperasjonene gjentas for neste tidsskritt. Hvor lang tid det er mellom disse tidsskrittene, avgjøres med tidsskritt lengden.

Courant–Friedrichs–Lewy tallet er deffinert som:

$$C = \frac{u_x \Delta t}{\Delta x} + \frac{u_y \Delta t}{\Delta y} + \frac{u_z \Delta t}{\Delta z}$$

$u_{x,y,z}$ er hastigheten i henholdsvis x, y og z retning. $\Delta x, y, z$ er cellestørrelsen i x-, y-, og z-retning, mens Δt er tidsskritt lengden. Hvis Courant–Friedrichs–Lewy tallet er større enn 1.0, vil en vannpartikkel passere forbi en celle uten at den har vært innom cellen i tidsteg i eller $i-1$ (Courant et al., 1956).

2.2.5 Ruhet i STAR-CCM+

For å beregne bunnens innvirkning på strømmingene, må man i STAR-CCM+ angi om veggen er glatt eller ru. For en glatt overflate setter programmet alle parametere den trenger selv. For en ru overflate må brukeren oppgi den ekvivalente ruhetshøyden av steinstørrelsen, r . r brukes for å regne ut R^+ , som igjen brukes til å beregne ruhetsfunksjonen f (STAR-CCM+, 2012). R^+ er gitt som:

$$R^+ = \frac{ru^*}{\nu}$$

ν er den kinematiske viskositeten for væsken og u^* er normal skjærhastighet mot bunnen gitt ved:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$

ρ er væskens tyngdetetthet og τ_w er skjærspenningen. Ved å sette overflaten til å være glatt, settes $f = 1$. Ellers er f gitt som:

$$f = \left\{ \begin{array}{l} \left[B \left(\frac{R^+ - R_{glatt}^+}{R_r^+ - R_{glatt}^+} \right) + CR^+ \right]^a \quad \text{for } R_{glatt}^+ < R^+ < R_{ru}^+ \\ B + CR^+ \quad \text{for } R^+ > R_{ru}^+ \end{array} \right\}$$

hvor a er:

$$a = \sin \left[\frac{\pi}{2} \frac{\log\left(\frac{R^+}{R_{glatt}^+}\right)}{\log\left(\frac{R_{ru}^+}{R_{glatt}^+}\right)} \right]$$

og standardverdiene for de andre koeffisientene er

$$B = 0 \quad C = 0,253 \quad R_{glatt}^+ = 2,25 \quad R_{ru}^+ = 90$$

(STAR-CCM+, 2012).

Ruhetsfunksjonen blir brukt til å beregne hastighetsfordelingen i det logaritmiske laget:

$$u_{turb}^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(E' y^+)$$

(STAR-CCM+, 2012)

hvor $\kappa = 0,42$ og u er hastigheten i cella som ligger inntil veggen. Ellers er

$$E' = \frac{9}{f} \quad \text{og} \quad u^+ = \frac{u}{u^*}$$

(STAR-CCM+, 2012)

I det laminære sjiktet blir hastigheten videre modellert som:

$$u_{lam}^+ = y^+$$

hvor

$$y^+ = \frac{y u^*}{\nu}$$

y er avstanden fra veggen til sentrum av cella som ligger inntil veggen (STAR-CCM+, 2012). Hvis $y^+ < R^+$ blir R^+ satt automatisk av STAR-CCM+ lik y^+ . Dette betyr at den ekvivalente ruhetshøyden r ikke kan være større enn halve cellestørrelsen i programmet. Større ruhet må modelleres som en del av hovedgeometrien.

2.2.6 Volume Of Fluid

I en modell som kjøres med både vann og luft, må en algoritme finne grensen mellom vann og luft. I et fast grid, vil noen celler være helt fylt med vann og noen helt fylt med luft. De resterende cellene vil kun delvis være fylt med vann. Den mest brukte algoritmen for å finne grensen på vannoverflaten kalles Volume Of Fluid (VOF), metoden bruker en variabel kalt volume og fluid, og variabelen er definert som:

$$F = \frac{V_V}{V_L + V_V}$$

V_V er volumet fylt med vann i en celle og V_L er volumet fylt med luft i en celle. $F = 1$ hvis cellen er fullstendig fylt med vann, og $F = 0$ hvis den er fullstendig fylt med luft.

VOF forholdet blir beregnet ut fra å løse konveksjon-diffusjon likningen:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + U_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial F}{\partial x_i} \right)$$

2.3 Driftsproblemer

Ved kraftverksanlegg kan det oppstå problemer ved driften. Problemene som relaterer seg til vassdragsdelen av driften, kan deles i fire hoveddeler. Hoveddelene er virveldannelser med mulighet for luftinnsug, sedimenttransport, drivgods og is. Ved Juvfossen kraftverk er det problemer med sedimenter som legger seg i front av inntaksristen, drivgods som bidrar til falltap over inntaksristen og virveldannelser som suger luft. Det vil i følgende kapittel være en kort beskrivelse av de tre hovedtypene av driftsproblemer ved Juvfossen kraftverk.

Virveldannelser og luftinnsug

Geometrien i inntaksmagasinet og utformingen av inntakskonstruksjonen kan føre til strømningsforhold i inntaksmagasinet som induserer virvler. Strømningsforholdene som skaper virvler er i hovedsak usymmetrisk tilstrømning mot inntaket, usymmetrisk hastighetsfordeling eller hindringer i tilstrømningsområdet.

Hva slags problemer som virvlene skaper, er avhengig av størrelsen. Små virvler på vannoverflaten vil ikke ha noen påvirkning på kraftverket. Virvler som er så store at de drar med seg drivgods til inntaksgrinden, kan føre til at denne tetter seg raskere enn om det ikke hadde blitt dratt drivgods ned. Store virvler som drar med luft inn i inntaket kan føre til økt fare for kavitasjon i turbin, økt falltap på grunn av luftlommer i tilløpstunnel/rør, eller fare for komprimering som unnslipper i en ukontrollert luftutblåsning (Lia og Jenssen, 2003).

Drivgods

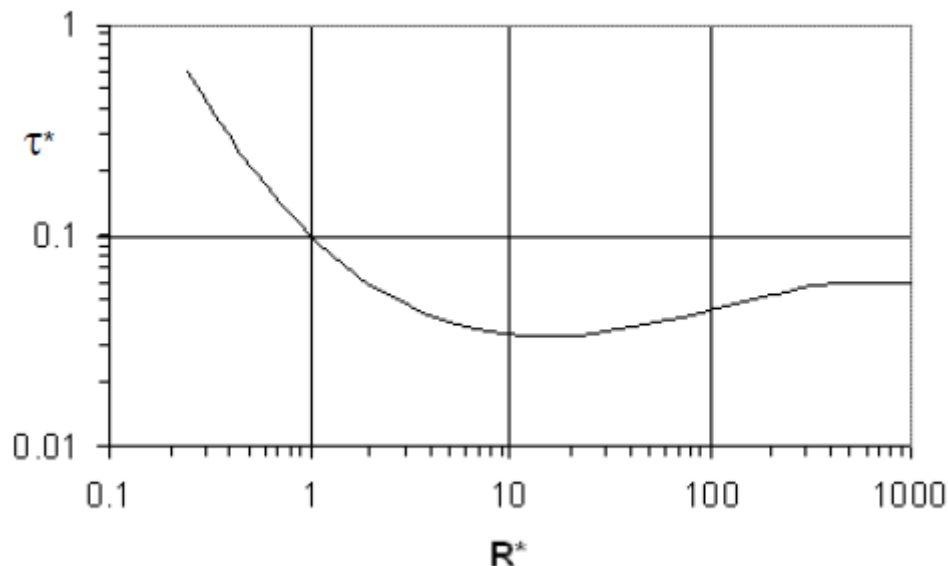
Det vil under vanlig vannføring i elver, og spesielt under flom, være transport av drivgods. Drivgods fra naturen kan være løv, gress, mose, kvist eller trær. Menneskeskapt drivgods kan være alle former for søppel som for eksempel plastposer, plastkanner og byggematerialer.

Drivgods kan legge seg på inntaksgrinda og tette hele- eller deler av den. Tetting av inntaksristen fører til økt falltap og tapt produksjon. Delvis tetting fører til høyere hastighet på vannet i det området som ikke er tett, noe som igjen kan føre til vibrasjoner og fare for utmattelsesbrudd. I tillegg til tapt produksjon, må det også brukes ressurser for å rense vekk drivgods fra inntaksristen (Lia og Jenssen, 2003).

Sedimenttransport

Sedimenttransport er transporten av masser i elva. Massene kan være fra store steiner i bratte elver, til sand og silt i rolig strømmende elver. Sedimenttransporten kan skje enten ved at massene er suspendert i vannmassen, eller at de beveger seg langs bunnen av elva.

Partikkeldiameteren på massene på bunnen av elva og skjærspenninga langs bunnen, vil avgjøre om det er bevegelse eller ikke. Om det er bevegelse kan avgjøres ut fra Shields diagram, Figur 5.



Figur 5 Shields diagram

Verdien på den horisontale aksene er Reynold's tall i grensesiktet, gitt ved:

$$R^* = \frac{u_* d}{\nu} = \frac{d \sqrt{\frac{\tau}{\rho_v}}}{\nu}$$

hvor u_* er skjærhastigheten, d er partikkeldiameteren, ν er den kinematiske viskositeten til vann og ρ_v er vannets tyngdetetthet. Den kritiske skjærspenningen som skal til for at en partikkel med diameter d beveger på seg, finnes da som:

$$\tau_c = \tau^* g d (\rho_s - \rho_v)$$

Hvor g er tyngdens akselerasjon, ρ_s er partikkelens tyngdetetthet og τ^* finnes fra Shields diagram.

Problemene som følger med sedimenttransport kan være oppfylling og redusjon av magasinivolum, inntakskonstruksjonen fylles med sedimenter, vannveien fylles av sedimenter og tetter eller fører til økt falltap på grunn av økt hastighet og slitasje på turbin, flomløp og luker (Lia og Jenssen, 2003).

2.4 Feilkilder i CFD

I CFD modellering finnes det flere usikkerhetsmomenter. The European Research Community on Flow, Turbulence and Combustion (ERCOFTAC) har publisert "Best Practice Guidelines for CFD" hvor feilene er klassifisert i følgende liste (Olsen, 2011):

1. Modelleringsfeil
2. Feil i de numeriske tilnærmingene
3. Feil på grunn av at løsningen ikke har nådd en komplett konvergens
4. Avrundingsfeil
5. Feil i grensebetingelser og input data
6. Menneskelige feil på grunn av uerfaren bruker
7. Feil i programkoden

Modelleringsfeil er feil som introduseres når den virkelige verden modelleres med matematiske formler. Slike feil er for eksempel at det brukes endimensjonal formler når det er tredimensjonale effekter som påvirker resultatet.

Feil på grunn av de numeriske tilnærmingene er ofte introdusert når formlene diskretiseres. Falsk diffusjon er for eksempel en typisk feil i den numeriske tilnærmingen.

Det blir mange ganger brukt en iterativ solver på likningene. Enkelte ganger kan en løsning som ikke har blitt konverget bli brukt. Dette kan være tilfellet hvis feil konvergenskriteriet blir brukt. Det kan også være at konvergens i en tidsavhengige beregning ikke nås får hvert tidsskritt.

Avrundingsfeil er på grunn av begrensinger i nøyaktigheten i mikroprosessorer i datamaskinen. Nå brukes programmer med 64 bits flyttalls nummer med 12 siffrers nøyaktighet. Avrundingsfeil blir derfor nå sjeldent et problem.

Feil i grensebetingelsene er en av de mest vanlige problemene i CFD modellering. Når det beregnes strømming i kompliserte geometrier må gridet følge vannflata og geometrien fullstendig. Dette kan enkelte ganger være vanskelig. Det kan også være problemer med å bestemme grensebetingelser på for eksempel ruheten.

Menneskelige feil på grunn av uerfarenhet er ofte et problem. Erfaring med CFD modellering er sjeldent, og det er lett å velge feil blant de mange parameterne og algoritmene som finnes.

Det vil alltid være feil i programkoden på ethvert program. Det finnes et estimat på at det er en feil i programkoden for hver 1000 -10 000 linje med kode i kommersielle programmer. Et typisk CFD program har mellom 100 000 og 1 million linjer med kode. Det er derfor sannsynlig at det finnes et rimelig antall med feil i programkoden (Olsen, 2011).

3 Metode

Det er satt opp en numerisk modell av inntaksmagasinet til Juvfossen kraftverk. Programmet som er brukt er STAR-CCM+. Det blir i metodekapittelet først gitt en oppsummering av hvordan feltresultatene har blitt innhentet. Videre er det beskrevet hvordan modellen er satt opp og arbeidet med, for å få modellen til å kjøre stabilt. For å kunne benytte seg av en CFD modell til å vurdere om det planlagte inntaket fungerer, må det kunne benyttes et oppsett med standardverdier. På en modell som kjører stabilt, er det mulig å gjøre en sensitivitetsanalyse for å se hvor stor påvirkning endringen av enkeltparametere har på resultatet.

3.1 Feltnmåling

I forbindelse med prosjektoppgaven "Feltnmåling av strømningsforhold i inntaksmagasin til småkraftverk", ble det etablert tre faste tverrsnitt for måling av vannhastighetene. Tverrsnitt 1 ble satt like oppstrøms området elva kommer inn i inntaksmagasinet, tverrsnitt 2 ble satt cirka midt i inntaksmagasinet mens tverrsnitt 3 ble satt like ved inntakskonstruksjonen.

Plasseringen er vist i Figur 6.



Figur 6 Flyfoto av inntaksmagasinet til Juvfossen kraftverk med plassering av tverrsnitt, demning, inntakskonstruksjon og definisjon av hvilke siden "høyre elvebredd" er.

Under feltnmålingene ble det brukt en ADCP måler. Måleren var montert på et flytebrett som ble trukket over elva med et tau. Tauet var festet i de samme trærne og boltene for målingene under begge vannføringene. Flytebrettet ble dratt over hvert tverrsnitt åtte ganger for hver vannføring. Flytebrettet ble dratt over tverrsnittene med en jevn hastighet som var lavere enn vannhastigheten i det aktuelle snittet. På starten og slutten av hver slik passering av elva ble flytebrettet stående i ro i minst 10 sekunder for å samle data. Gjennomsnittet av GPS posisjonen for hver slik start og stopp for begge vannføringer, har blitt brukt til å plassere tverrsnittene riktig i den numeriske modellen.

I prosjektoppgaven "Feltnmåling av strømningsforhold i inntaksmagasin til småkraftverk", ble det laget et MATLAB skript som satt gjennomsnittshastigheten fra de åtte målingene i celler på 0,25 m x 0,25 m over tverrsnittene. Vannføringen som ble målt i de tre forskjellige tverrsnittene er gitt i Tabell 1.

Tabell 1 Vannføringen i de tre tverrsnittene etablert i inntaksmagasinet

Vannføring	Tverrsnitt 1 [m ³ /s]	Tverrsnitt 2 [m ³ /s]	Tverrsnitt 3 [m ³ /s]	Gjennomsnitt [m ³ /s]
Høy	7,5	8,3	8,0	7,9
Lav	2,2	2,3	2,2	2,2

Selve målingene, og flytting av oppsettet fra tverrsnitt til tverrsnitt tok tid. Som Tabell 1 viser, er ikke den samme vannføringen målt i de tre tverrsnittene. Gjennomsnittet av vannføringene har derfor blitt brukt som vannføring i STAR-CCM+.

I inntaksmagasinet til Juvfossen kraftverk har det blitt tatt ADV målinger ved tverrsnitt 1 og i området rett oppstrøms varegrind. På grunn av vanskeligheter med å bestemme nøyaktig hvor målingen ble utført, var det ikke mulig å måle de samme stedene på høy og lav vannføring. Hver måling tok 3 minutter med logging av data ved 25 Hz.

3.2 Geometri

Importerings

For å kunne opprette en numerisk modell av inntaksmagasinet måtte det utføres en detaljert oppmåling av geometrien i felt. Inntaksmagasinet til Juvfossen kraftverk har blitt skannet med en laserskanner. I bunnen av inntaksmagasinet var det vann under skanningen.

Laserskanneren kunne ikke skanne gjennom vannet, og geometrien i det vannfylte området har derfor blitt kartlagt ved hjelp av punktmålinger med GPS. Det har også blitt tatt punktmålinger med GPS i elva fra inntaksmagasinet og ca. 55 meter oppstrøms, frem til et lite stryk. Innmålingen av elva oppstrøms inntaksmagasinet er gjort for at simuleringen av vannstrømmen som kommer inn i magasinet ikke skal være påvirket av magasin vannstanden. Dataene fra laserskanneren har blitt importert som punkter til Autocad Civil 3D 2012 med 0,20 m oppløsning. Punktmålingene fra GPS har også blitt importert i samme tegning.

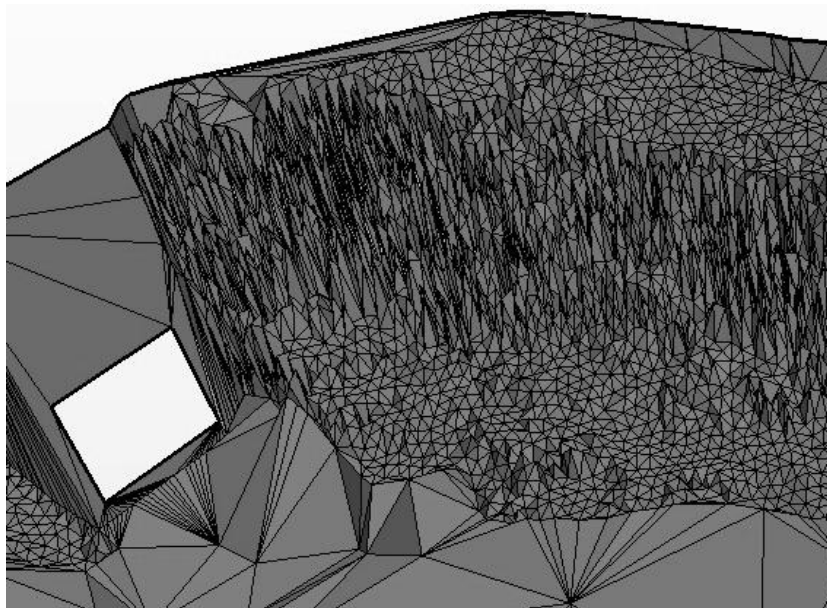
I AutoCad har det blitt generert en terrengmodell med overflate fra terrengmålingene. Demningen og inntakskonstruksjonen har blitt tegnet om til 3D tegninger fra konstruksjonstegningene som ble brukt til bygging av demningen og inntakskonstruksjonen. 3D tegningene har blitt plassert i deres opprinnelige plassering i terrenget i AutoCad ved å bruke GPS målingspunkter på konstruksjonene i felt. Terrengmodellen og 3D tegningen har til slutt blitt brukt for å danne en "avstøpning" av geometrien til inntaksmagasinet og elva som har blitt eksportert som .stl fil til STAR-CCM+.

Punktmålingene som er lastet inn i AutoCad er x- og y-koordinater oppgitt i UTM32V, mens z-koordinat er angitt med høyde over havet. På grunn av at STAR-CCM+ ikke takler et stort antall siffer på koordinatene ble et nytt koordinatsystem med origo i UTM32Vkoordinat (389679.68, 8902585.45, 384.50) etablert. Videre er x-aksen dreiet 79° mot vest slik at akse ligger parallelt med inntaksrista med y-aksen normalt ut i magasinet. Dreiningen er gjort for at gridet som senere blir generert i STAR-CCM+ skal bli tegnet vinkelrett på inntaket og dermed

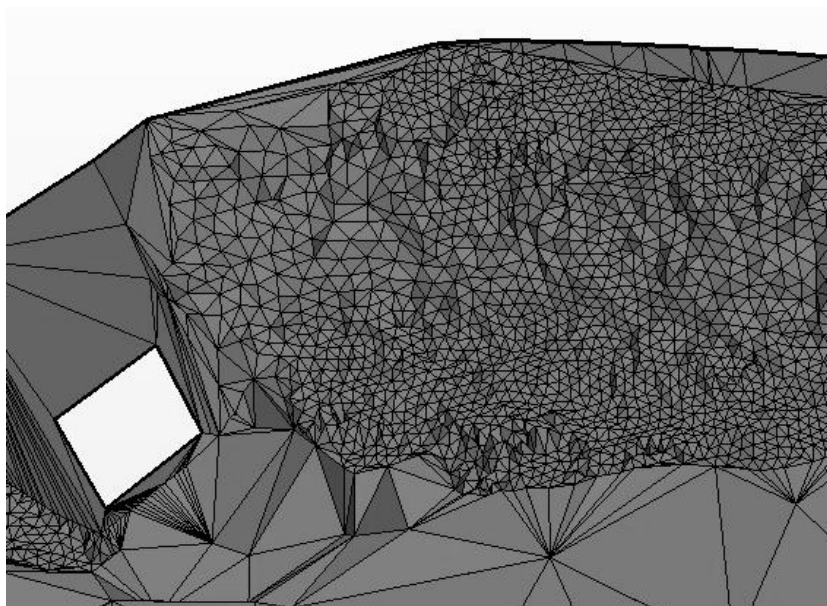
innstrømningen her. Hele modellen må ligge i positiv kvadrant for å kunne kjøre uten problemer i STAR-CCM+.

Bearbeiding av geometrimodell

AutoCad hadde problemer med å lage et grid uten at overflaten ble svært ujevn med spisse tagger. Den ujevne overflaten var spesielt et problem i områdene hvor overflaten var tilnærmet vertikal. Et eksempel på et slikt område er steinplastringen like oppstrøms inntaket og er vist i Figur 7. Store problemområder ble markert, og griddet ble generert på nytt gjennom funksjoner i STAR-CCM+. I enkelte problempunkt ble spisspunktet flyttet i z-retning til snitthøyden av de tre omkringliggende punktene. Området fra Figur 7 er vist i Figur 8 etter behandlingen.



Figur 7 Taggete overflate ved steinplastring i STAR-CCM+



Figur 8 Jevn overflate etter omtegning av griddet i STAR-CCM+

Inndeling av regioner

Ved å tegne opp og avgrense områder i STAR-CCM+ har overflaten blitt inndelt i forskjellige regioner. De inndelte regionene er:

Demning	Steinplastring
Elv	Strand
Inntak	Elv inn
Inntak sjakt	Overløp ut
Inntakskonstruksjon	Sjakt ut
Magasinbunn	Minstevassføring ut
Rist inntak	Inntak topp
Skråfjell	Topp



Figur 9 Inntaksmagasinet til Juvfossen kraftverk nedtappet for rensk av sedimenter i kanal ved inntaket



Figur 10 Oversikt over inndelte regioner i modell

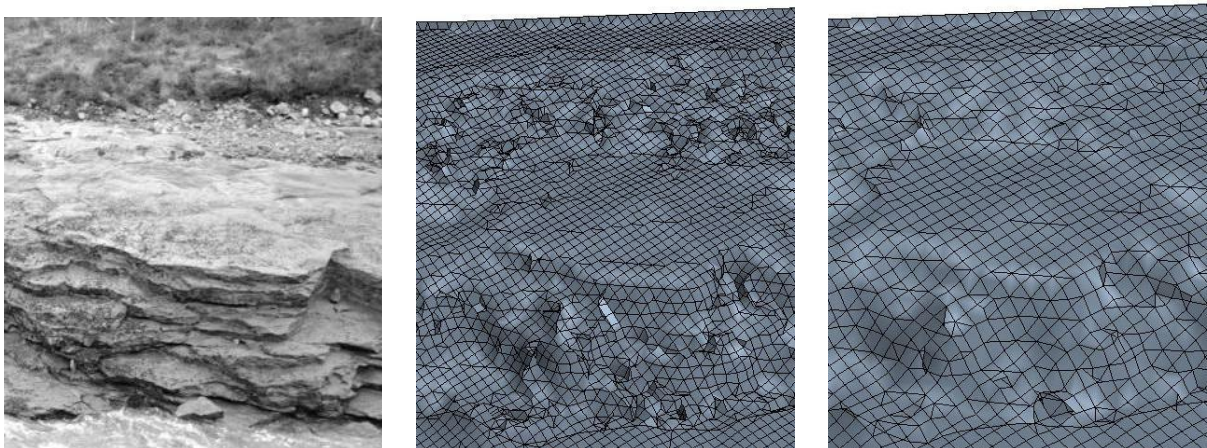
Plassering av de viktigste regionene er vist i Figur 10. De sorte strekene angir grensen mellom regionene. Som det fremkommer av Figur 9, er det en annen ruhet på skråfjellet i den venstre delen av inntaksmagasinet enn det er på steinplastringen på den høyresiden av inntaksmagasinet. Inndelingen er gjort for å kunne sette forskjellige grensebetingelser i forskjellige deler av modellen. Figur 9 og Figur 10 gir også en sammenlikning av den virkelige geometrien og geometrien i modellen.

For å kunne se på forhold over varegrinda ved inntaket, ble modellen importert som to ulike "blokker". Geometrien av inntaksmagasinet, demning og ytre deler av inntakskonstruksjonen er importert som en blokk, mens det indre inntaket med sjakt har blitt importert som en annen blokk. Den indre delen av inntaket blir referert til som "inntak" og består av inntakskonstruksjonen i form av konus, lukeføringer og området før sjakta. "Inntakskonstruksjon" er den delen av inntaket som er ut i inntaksmagasinet.

Oppsett av grid, celletyper og cellestørrelser

Modellen har blitt satt opp med flere forskjellige innstillinger med hensyn på gridtype og cellestørrelse.

Under oppsett av CDF-modellen har det blitt forsøkt forskjellige innstillinger for oppsett av gridet før simuleringene har startet. Det har blitt lagt vekt på at det totale antall celler skal være minst mulig, uten at det skal gå på bekostning av geometrien. Under en prøve – og feile prosess har man kommet frem til at det ikke bør kjøres simuleringer med mindre enn 0,20 m cellestørrelser. Figur 11 viser deler av geometrien med en cellestørrelse på henholdsvis 0,20 m og 0,30 m mot hvordan det virkelig er i felt. Som det fremkommer av figuren blir skarpe kanter mer avrundet med celler på 0,30 m. STAR-CCM+ har derfor blitt satt til å generere et grid med minimum 0,20 m celler nær overflater samt at cellestørrelsen på celler som er lagt fra en overflate kan være opp til 0,40 m.



Figur 11 Utsnitt av skråfjell med 0,20 m celler, fra felt og 0,30 m celler.

Under kjøring med volum of fluid (VOF) bør man ha minst tre celler fullstendig fylt med vann over bunn for å få regnet vannivået riktig (STAR-CCM+, 2012). I modellkjøringer hvor det ble kjørt på $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$ og deler av vannet skulle gå i overløp, har det derfor blitt laget i et avgrenset område på $0,8 \text{ m} \times 0,8 \text{ m}$ langs hele terskel hvor cellestørrelsen har vært satt til

0,05m. Å lage et finere grid over terskelen er gjort fordi den kritiske vanndybden over terskelen er avgjørende for å få riktig vannstand oppover i magasinet og elven. På grunn av at hovedstrømmen bør gå mest mulig normalt på cellene (Olsen, 2011), har gridet blitt tegnet parallelt med overløpet når deler av vannstrømmen skal i overløp. Det er vurdert som viktigere å få riktig strømningsbilde over tersklene, for å få riktig vannivå i magasinet fremfor strømmingen inn i konusen på inntaket.

I tillegg til å kjøre modellforsøk med trimmerceller har det blitt utført modellkjøringer med trimmerceller med prismelag nær bunn og polyedriske celler. Endring av celletype er gjort for å se om det har innvirkning på strømningsmønsteret i modellkjøringene med VOF oppsett.

For å redusere antall celler i modellen ble områder som ikke kom til å være i kontakt med vann fjernet. Fjerning av land og senkning av modellens tak til 0,70 meter over terskelhøyden er eksempler på slike områder. Reduksjonen førte til 36 400 færre 0,20 m celler, en reduksjon på cirka 8 %.

3.3 Modelloppsett

Alle modellene har blitt kjørt med RANS, som er beskrevet i teorikapittelet. Videre har k- ϵ hovedsakelig blitt brukt som turbulensmodell. k- ϵ modellen egner seg godt for situasjoner med kompliserte sirkulasjonssoner. Videre er modellen et godt kompromiss mellom å være robust, hvor mye dataressurser som blir brukt og nøyaktighet (STAR-CCM+, 2012). k- ω turbulensmodell har også blitt brukt for å se om endring av turbulensmodell har påvirkning for resultatet.

3.3.1 Grensebetingelser

Modellkjøringene har blitt utført med forskjellige grensebetingelser på overflatene.

Ruhet

Det har hovedsakelig blitt sett på tre forskjellige ruhetsinnstillinger. Disse er definert videre som "høy", "normal" og "glatt".

Tabell 2 Oversikt over ruhet på de forskjellige overflatene

Overflate	Høy [m]	Normal [m]	Glatt [m]
Demning	0,01	0,01	0,01
Inntak	0,01	0,01	0,01
Inntakskonstruksjon	0,01	0,01	0,01
Inntak sjakt	0,10	0,10	0,10
Elv	0,10	0,10	Glatt
Magasinbunn	0,10	0,10	Glatt
Skråfjell	0,10	0,01	Glatt
Steinplastring	0,10	0,07	Glatt
Strand	0,10	0,03	Glatt

Som beskrevet i teorikapitelet, kan ruheten kun settes til halve cellestørrelsen i STAR-CCM+. Det vil med andre ord ikke være mulig å få modellen til å kjøre med høyere ruhet enn 0,10 m for 0,20 m celler. Tabell 2 viser ruheten satt på de forskjellige overflatene.

Betongkonstruksjonene har i alle hovedoppsettene fått en ruhet på 0,01 m. Ruheten er satt fordi betongen blir sett på som relativt glatt. Det er også mer interessant å se på hvor mye

ruheten som anslås i felt har å si for den numeriske løsningen. Sjakta er råsprengt, og ruheten ble her satt til 0,10 m for alle modellkjøringene. Strømningen i sjakta har trolig ikke innvirkning på hvordan strømningsbildet i magasinet blir.

Ved "høy" ruhet har resten av overflatene fått en ruhet til maks, 0,10 m. Ved "glatt" kjøring har overflatene i magasinområdet, utenom betongkonstruksjonene og sjakta, blitt satt til "glatt". Programmet vil regne normale vegglover, men bruker ikke ruhetsfunksjonen.

I modellforsøk kjørt med "normal", har ruheten for overflatene blitt satt til en ruhet som er tilnærmet lik forholdene i felt.



Figur 12 Illustrasjon av ruheten på elve- og magasinbunn. Støvvelsålen er 0,31 m lang.

Figur 12 viser et representativt bilde av steinstørrelsen på bunnen av elva og magasinet der det ikke var vann ved nedtapping. Det har også blitt observert enkeltsteiner som er vesentlig større en man kan se av Figur 12. Steinene har vært opp mot 0,40 m i diameter. På grunnlag av steinstørrelsen ble ruheten i elva og magasinbunnen under "normal" ruhet satt til 0,10 m.

Figur 11 viser at skråfjellet har en glatt overflate, og at det ved 0,20 m celler klarer å fange opp de geometriske endringene av fjellkantene. For at ruheten skal være i forhold til hverandre i magasinindelen, har ruheten blitt satt til 0,01 m for skråfjellet.

Deler av "strandoverflaten" sees til høyre i Figur 9. Sedimentene er i hovedsak i sand med innslag av større stein. Enkelte av disse steinene blir fanget opp av selve geometrien. Ruheten er på bakgrunn av dette satt til 0,03 m.

Figur 10 viser at deler av geometrien til steinplastringen gjengitt. For å kompensere for at sprekkene mellom plastringssteinen ikke kommer med i overflategeometrien, blir ruheten her satt til 0,07 m.

Inn- og utstrømning

Vannføringen inn og ut av modellen bestemmes ved å sette en konstant hastighet over hele, eller deler av grenseflaten. Vannføringen beregnes i STAR-CCM+ som en sum av masse over grenseflaten, og hastigheten endres til ønsket vannføring er oppnådd for modellkjøringen. I felt kommer hovedandelen av vanninnstrømningen på den venstre siden av et lite stryk hvor den numeriske modellen starter. Det er derfor kun venstre halvdel som har blitt kjørt med hastighetsfordeling inn. Vannhastigheten er satt lik over den delen av tverrsnittet vannet har kommet inn.

For alle modellkjøringer ble det satt en negativ hastighet ut av grenseflaten "minstevassføring ut" for å slippe ut minstevassføringen på 0,15 m³/s. Vannmengden som kjøres ut i "sjakt ut" har i alle modellkjøringer blitt bestemt ut fra å sette en bestemt vannhastighet ut. Under kjøring med $Q = 2,20 \text{ m}^3/\text{s}$ inn i modellen har det blitt kjørt 2,05 m³/s ut av sjakta til kraftverket. For $Q = 7,90 \text{ m}^3/\text{s}$ inn har det i sjakta blitt tatt ut 4,8 m³/s og dermed 2,95 m³/s i "overløp ut". Vannmengden som går i sjakt har blitt bestemt ut fra produksjonsdata fra kraftverket for de aktuelle dagene når feltmålingene er utført.

Modellen har blitt kjørt med både luft og vann med VOF for å beregne hvor vannoverflaten lå, og kun med vann. For å få vannet ut av modellen etter terskelen har grensebetingelsen på "overløp ut" blitt satt som trykkutløp med 0,0 Pa som mottrykk og som hastighetsinnløp med negative hastigheter for modellkjøringene med luft og vann. For modellkjøring med bare vann ble det kun kjørt med negative hastigheter. Grensebetingelsen for taket av modellen ble satt til trykkutløp under kjøring med luft og vann. For modellkjøring med kun vann ble grensebetingelsen for taket satt til symmetriplan. Løsningen av en symmetrilinjeberegning vil i praksis bli den samme som om man hadde speilet gridet om en symmetriakse, som da er vannflaten. Det ble ikke utført vannlinjemålinger under feltarbeid. Taket ble derfor senket til nivå hvor VOF hadde regnet ut vannlinjen til å være for de to vannføringene. Skal et prosjektert anlegg simuleres før det bygges, vil det heller ikke være noe vannlinjemåling å gå utifra.

For å få inntaksristens påvirkning på strømningsforholdene, har inntaksristen blitt satt opp som en porøs gjennomstrømningsflate som tillater trykkforskjell. Det er valgt for å få modellert falltapet over varegrinden. Innstillingene som trengs for gjennomstrømningsflate er porøsiteten av den, samt α og β . Porøsiteten er:

$$\text{porøsitet} = \frac{\text{lysåpning}}{c/c \text{ stav}} = \frac{27\text{mm}}{35\text{mm}} = 0,77$$

α og β benyttes når falltapet over gjennomstrømningsflaten skal regnes ut. Sammenhengen mellom falltapet og α og β er:

$$\Delta p = \rho(\alpha|\bar{v}_R| + \beta)|\bar{v}_R|$$

(STAR-CCM+, 2012)

Ved å anta at det ikke er et laminært bidrag, kan β sløyfes. $|\bar{v}_R|$ er absolutt brutto hastighet og ρ er vannets tyngdetetthet. Alle simuleringer har blitt kjørt med $\alpha = 2,7$. Dette gir:

Tabell 3 Falltap over varegrind

$Q_{\text{kraftverk}} [\text{m}^3/\text{s}]$	$A_{\text{konus}} [\text{m}^2]$	$ \bar{v}_R [\text{m/s}]$	$\Delta p [\text{Pa}]$ ([mVS])
2,05	4,84	0,43	499 (0,05)
4,80	4,84	1,01	2 754 (0,28)

3.3.2 Tidskritt

Når tidsskritt lengden skulle fastsettes, ble det hovedsakelig sett på at Courant–Friedrichs–Lewy tallet ikke skal overstige 1.0 i større- eller viktige områder i modellen. Det har også blitt kjørt med 1.- og 2. ordens diskretiseringsskjema for å se om endring av orden på skjem har utslag på resultatet.

3.4 Krav til stabil løsning

Modellkjøringene har blitt lagret automatisk hver 2500. iterasjon. Residualene har blitt regnet ut som differansen mellom summen av hastighetene i tverrsnitt 1, 2 og 3 etter hver lagring og summen av hastighetene i tverrsnitt 1, 2 og 3 etter lagringen før, delt på totalt antall målepunkt i tverrsnittene multiplisert med en karakteristisk hastighet. Den karakteristiske hastigheten settes ofte som hastigheten ved innløpet (Olsen, 2011). Hastigheten inn varierer etter vannføring og om det er i hele eller halve tverrsnittet hastighetsfordelingen kommer inn. For enkelthetsskyld er den karakteristiske hastigheten satt til 1.0 m/s. Residualene blir dermed dimensjonsløse.

$$r = \frac{\sum_1^n |U_i - U_{i-2500}|}{n \times 1.0 \text{ m/s}}$$

U er hastigheten normalt på tverrsnitt 1, 2 og 3 og n er antall målepunkt.

Under modellkjøring med væske og vann har alle simuleringer blir kjørt med initialvannstand til overløpsterskelen. For å avgjøre om løsningen har blitt stabil, har modellen blitt kjørt til residualene er mindre enn 10^{-2} samtidig som summen av massestrømningen er null og at massestrømmen har vært null over en periode på 500 iterasjoner. For modellkjøring som er kjørt med kun vann er det bare residualkravet som har vært avgjørende. Massestrømmen har vært null fra første iterasjon.

3.5 Uthenting av resultater

Fra feltmålingene har hastighetene blitt samlet i celler på 0,25 m x 0,25 m. For sammenlikning har det i STAR-CCM+ blitt satt opp et nett med målepunkter med cirka 0,25 m x 0,25 m avstand. De tre tverrsnittene har fått hvert sitt lokale koordinatsystem med y-akse normalt på tverrsnittet med positiv retning i elvens strømningsretning. Det har for hver 2500. iterasjon blitt laget en tabell med verdier for hastighetsvektorer i i , j , k retning i det lokale koordinatsystemet, hastighetens absoluttverdi, virvlingstall, turbulent kinetisk energi og plasseringen av målepunktets plassering i det globale STAR-CCM+ koordinatsystemet. Et MATLAB skript har blitt utviklet for å hente og etterbehandle disse dataene. MATLAB skriptet ligger i vedlegg A. I skriptet lages det fargeplott for de tre tverrsnittene som kan sammenliknes med fargeplottene fra feltmålingene. Sammenlikning av fargeplottene vil kunne vise hvordan hastighetsfordelingen blir modellert i forhold til hvordan den er målt i felt.

For i tillegg til en visuell sammenlikning, har tverrsnittene blitt snittet i dybden for å kunne tallfeste avviket nærmere. Tverrsnitt 1 er snittet i 1 meter under vannflaten, mens tverrsnitt 2 og 3 er snittet i 2 meter under vannflata. Snittingen i dybden på 2 meter er gjort for å komme i tilnærmet lik høyde som midt i inntakskonusen.

Oppsettene for de ulike modellkjøringene er presentert i

. Kjøringene har blitt utført både for $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$ og for $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$, med varierende kombinasjoner av parameterne beskrevet i dette kapitlet.

Modellkjøring	Q [m^3/s]	Vann&Luft (VL) eller kun vann (V)	Celle størrelse (ekstra v. overløp) [m]	Antall celler	Turbulensmodell, oppstrøms skjema	Diskretiserings skjema for tid	Del av grenseflate inn i modell, Hastighet [m/s]	Grensebetingelse tak	Grensebetingelse overløp Hastighet [m/s]	Ruhet	Tidsskrit [s]
1	7,9	VL	0,20 (0,05)	439 322	k- ϵ 2.ord.	1. ord.	Hel	Trykk	Trykk	Høy	0,1
2	7,9	VL	0,20 (0,05)	596 145	k- ϵ 2.ord.	1. ord.	Hel 1,8213	Trykk	Trykk	Høy	0,1
3	7,9	VL	0,20 (0,55)	376 094	k- ϵ 2.ord.	1. ord.	Hel 1,7750	Trykk	Hast. - 2,0	Høy	0,1
4	7,9	V	0,20	263 543	k- ϵ 2.ord.	1. ord.	Hel 2,5800	Sym.	Hast. - 2,0	Høy	0,1
5	7,9	V	0,20	263 543	k- ϵ 2.ord.	1. ord.	Hel 2,5800	Sym.	Hast. - 2,0	Nor.	0,1
6	7,9	V	0,20	263 543	k- ϵ 2.ord.	1. ord.	Halv 5,1459	Sym.	Hast. - 2,0	Nor.	0,1
7	7,9	V	0,30	99 623	k- ϵ 2.ord.	1. ord.	Hel 2,639	Sym.	Hast. - 2,0	Nor.	0,1

8	7,9	V	0,20	263 543	k-ω 2.ord	1. ord.	Hel 2,580	Sym.	Hast. - 2,0	Nor.	0,1
9	7,9	V	0,20	263 543	k-ε 2.ord.	2. ord.	Hel 2,580	Sym.	Hast. - 2,0	Nor.	0,1
10	7,9	V	0,20	263 543	k-ε 2.ord.	1. ord.	Hel 2,580	Sym.	Hast. - 2,0	Nor.	1,0
11	7,9	V	0,20	263 543	k-ε 2.ord.	1. ord.	Hel 2,580	Vegg, friksj.fri	Hast. - 2,0	Nor.	1,0
12	7,9	V	0,20	263 543	k-ε 1.ord.	1. ord.	Hel 2,580	Sym.	Hast. - 2,0	Nor.	0,1
13	2,2	VL	0,20 (0,10)	439 322	k-ε 2.ord.	1. ord.	Halv 1,053	Trykk	Trykk	Høy	0,1
14	2,2	V	0,20	254 788	k-ε 2.ord.	1. ord.	Hel 0,903	Sym.	-	Høy	0,1
15	2,2	V	0,20	254 788	k-ε 2.ord.	1. ord.	Hel 0,903	Sym.	-	Nor.	0,1
16	2,2	V	0,20	254 788	k-ε 2.ord.	1. ord.	Halv 2,038	Sym.	-	Nor.	0,1
17	2,2	V	0,30	80 862	k-ε 2.ord.	1. ord.	Hel 0,9032	Sym	-	Nor.	0,1
18	2,2	V	0,20	254 788	k-ω 2.ord.	1. ord.	Hel 0,903	Sym.	-	Nor.	0,1
19	2,2	V	0,20	254 788	k-ε 2.ord.	2. ord.	Hel 0,903	Sym.	-	Nor.	0,1
20	2,2	V	0,20	254 788	k-ε 2.ord.	1. ord.	Hel 0,903	Sym.	-	Nor.	1,0
21	2,2	V	0,20	263 543	k-ε 2.ord.	1. ord.	Hel 0,903	Vegg, friksj.fri	-	Nor.	0,1
22	2,2	V	0,20	263 543	k-ε 1.ord.	1. ord.	Hel 0,903	Sym.	-	Nor.	0,1
23	7,9	V	0,20 (NY)	264 732	k-ε 2.ord.	2. ord.	Hel 2,580	Sym.	Hast. - 2,0	Nor.	0,1
24	7,9	V	0,20	263 543	k-ε 2.ord.	1. ord.	Hel 2,580	Sym.	Hast. - 2,0	Nor.	0,1
25	2,2	V	0,20	263 543	k-ε 2.ord.	1. ord.	Hel 2,580	Sym.	Hast. - 2,0	Nor.	0,1

4 Resultat

Bemerkning: Under bearbeiding av sensitivitetsanalysen, ble det funnet ut at vannstrømningen i CFD-modellen har vært ikke-stasjonær. At strømmingen har vært ikke-stasjonær ble funnet ut kort tid før innleveringsfristen, og måten resultatene har blitt presentert på, har ikke blitt endret på grunn av funnene. Det gjøres derfor oppmerksom på at resultatene fra felt er snittverdier, mens verdier fra CFD-modell er momentanverdier. I slutten av den første delen av resultatkapittelet blir det presentert to plott fra to forskjellige tidspunkt. I diskusjonskapittelet blir konsekvensen av den ikke-stasjonære strømmingen i CFD-modellen diskutert grundig.

Resultatkapittelet blir delt i fire hoveddeler. I kapittel 4.1 vil resultater som brukes i diskusjonen om inntaksmagasinet lar seg modellere med i en CFD modell bli presentert. I 4.2 blir det presentere resultater fra sensitivitetsanalysen. Kapittel 4.3 blir resultater av enkle verdier, som kan regnes for hånd, presentert. I det siste delen blir resultater som vil bli brukt til diskusjon om en CFD modell kan brukes til å forutse driftsproblemer.

4.1 Modellkjøringsresultater

Tabell 4 viser hvor mange iterasjoner som skulle til for å tilfredsstillere residualkravet, hvor lang tid hver modellkjøring har kjørt i modelltid, samt hvor lang tid det har tatt å tilfredsstillere residualkrevet i CPU tid. Videre viser tabellen rotmiddelkvadratavviket (RMKA) for de tre forskjellige tverrsnittene og den normerte RMKA verdien (NRMKA). I den siste kolonnen er den vektete summen av NRMKA verdiene oppgitt. NRMKA verdiene har blitt vektet ut i fra av at tverrsnittene er mer interessante jo nærmere man kommer inntaket. Tverrsnitt 1 har derfor fått en vektig på 0,8, tverrsnitt 2 har fått en vektig på 1,0 og tverrsnitt 3 har fått en vektig på 1,2. Modellkjøringene har blitt kjørt på en Dell Optiplex 980 med en Intel Core i7 CPU på 3,07 GHz. Datamaskinen opererer med 64-bits operasjonssystem med 16 GB ram. Under modellkjøring har det blitt brukt 7 kjerner på CPU, og datamaskinen har ikke blitt brukt til andre oppgaver under simuleringene.

RMKA er regnet ut som:

$$RMKA = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{1,i} - x_{2,i})^2}{n}}$$

hvor $X_{1,i}$ er hastigheten fra feltmålingene, og $X_{2,i}$.

NRMKA er regnet ut som:

$$NRMKA = \frac{RMKA}{\bar{x}}$$

hvor \bar{x} er snitthastigheten for feltmålingene i den snittede dybden for hvert tverrsnitt.

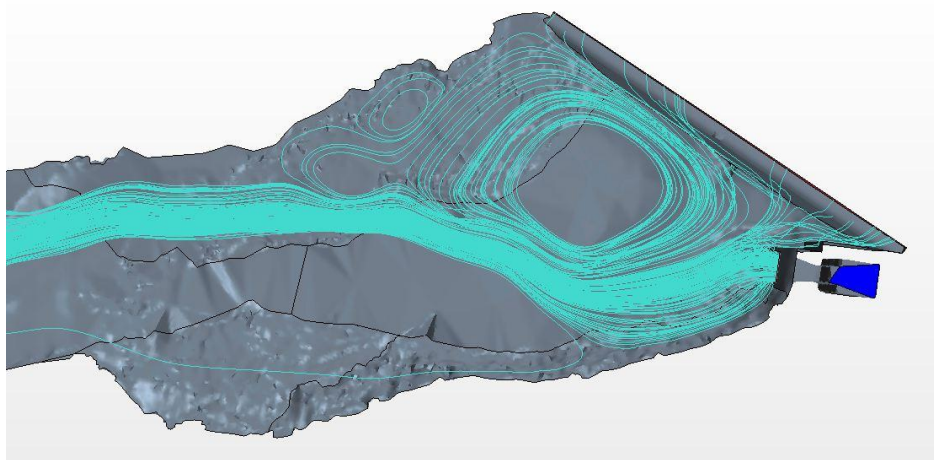
Tabell 4 Tidsbruk og RMKA verdier for stabile modellkjøringer

Modellkjøring	Iterasjoner før stabil løsning	Modellens tid [tt:mm:ss]	Fysisk brukt CPU tid [tt:mm:ss]	RMKA [m/s] Tverrsnitt 1	NRMKA [-] Tverrsnitt 1	RMKA [m/s] Tverrsnitt 2	NRMKA [-] Tverrsnitt 2	RMKA [m/s] Tverrsnitt 3	NRMKA [-] Tverrsnitt 3	Vektet sum Norm. RMKA [-]
1	22500	00:12:23	14:10:46	0,21	0,60	0,21	0,80	0,16	0,68	2,10
2	22500	00:12:23	18:35:14	0,23	0,63	0,22	0,76	0,16	1,11	2,60
3	12500	00:06:49	21:32:29	0,25	0,68	0,27	0,95	0,19	1,24	2,98
4	40000	00:22:06	10:30:23	0,54	1,44	0,32	1,12	0,16	1,02	3,50
5	25000	00:13:43	05:50:17	0,53	1,39	0,34	1,23	0,14	0,90	3,42
6	20000	00:11:07	04:39:23	0,58	1,49	0,26	0,93	0,18	1,20	3,56
7	20000	00:11:07	02:13:00	0,62	1,63	0,27	0,78	0,17	1,09	3,39
8	15000	00:08:20	03:50:55	0,58	1,52	0,29	1,05	0,17	1,09	3,57
9	42500	00:23:37	09:59:46	0,43	1,12	0,33	1,21	0,13	0,80	3,07
10	7500	00:41:40	01:46:50	0,58	1,54	0,30	1,07	0,17	1,11	3,63
11	15000	00:08:20	04:09:20	0,55	1,47	0,26	0,93	0,16	1,05	3,37
12	42500	00:23:37	11:21:18	0,55	1,45	0,34	1,22	0,10	0,66	3,17
13	12500	00:06:50	07:58:51	0,10	1,04	0,28	0,85	0,04	0,99	2,87
14	30000	00:12:25	07:32:09	0,24	2,23	0,05	0,60	0,06	1,53	4,22
15	32500	00:13:27	08:16:20	0,17	1,61	0,07	0,82	0,07	1,54	3,96
16	27500	00:11:28	07:06:03	0,26	2,46	0,06	0,71	0,07	1,61	4,61
17	30000	00:12:30	02:45:11	0,21	1,97	0,05	0,54	0,07	1,65	4,10
18	65000	00:27:05	14:08:27	0,21	1,98	0,08	0,96	0,08	1,93	4,86
19	30000	00:12:30	11:09:00	0,26	2,43	0,10	1,22	0,06	1,49	4,95
20	7500	00:31:15	01:58:00	0,19	1,76	0,05	0,53	0,08	1,81	4,11
21	42500	00:17:43	10:53:02	0,23	2,17	0,08	0,59	0,07	1,57	4,21
22	32500	00:13:33	08:15:56	0,17	1,62	0,12	1,41	0,35	1,53	4,54
23	27500	00:15:17	07:53:50	0,17	0,46	0,29	1,04	0,30	1,93	3,72
24	Ikke stabil løsning									
25	Ikke stabil løsning									

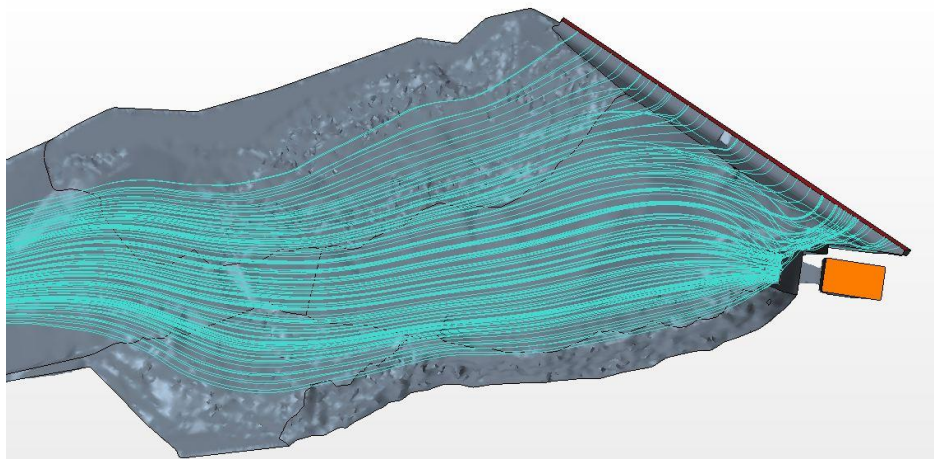
Strømlinjene til modellkjøring 1 er vist i Figur 15. Som figuren viser, går strømlinjene jevnt fordelt og rett gjennom inntaksmagasinet. Strømlinjene til modellkjøring 9 er vist i Figur 14. Alle simuleringer som er utført med VOF har et liknende strømlinjebilde som vist i Figur 15, mens de simuleringer som er utført kun med væske har et strømlinjebilde som likner på strømlinjene i Figur 14. Figur 13 viser strømmingen som er i felt ved en vannføring på 7,9 m³/s. Pilen indikerer hvordan vannstrømmen kommer inn i en høyresving for å legge seg rundt om i en venstresving og en bakevje.



Figur 13 Strømning på overflaten av inntaksmagasinet i felt



Figur 14 Strømlinjer med bakevje modellkjøring 9

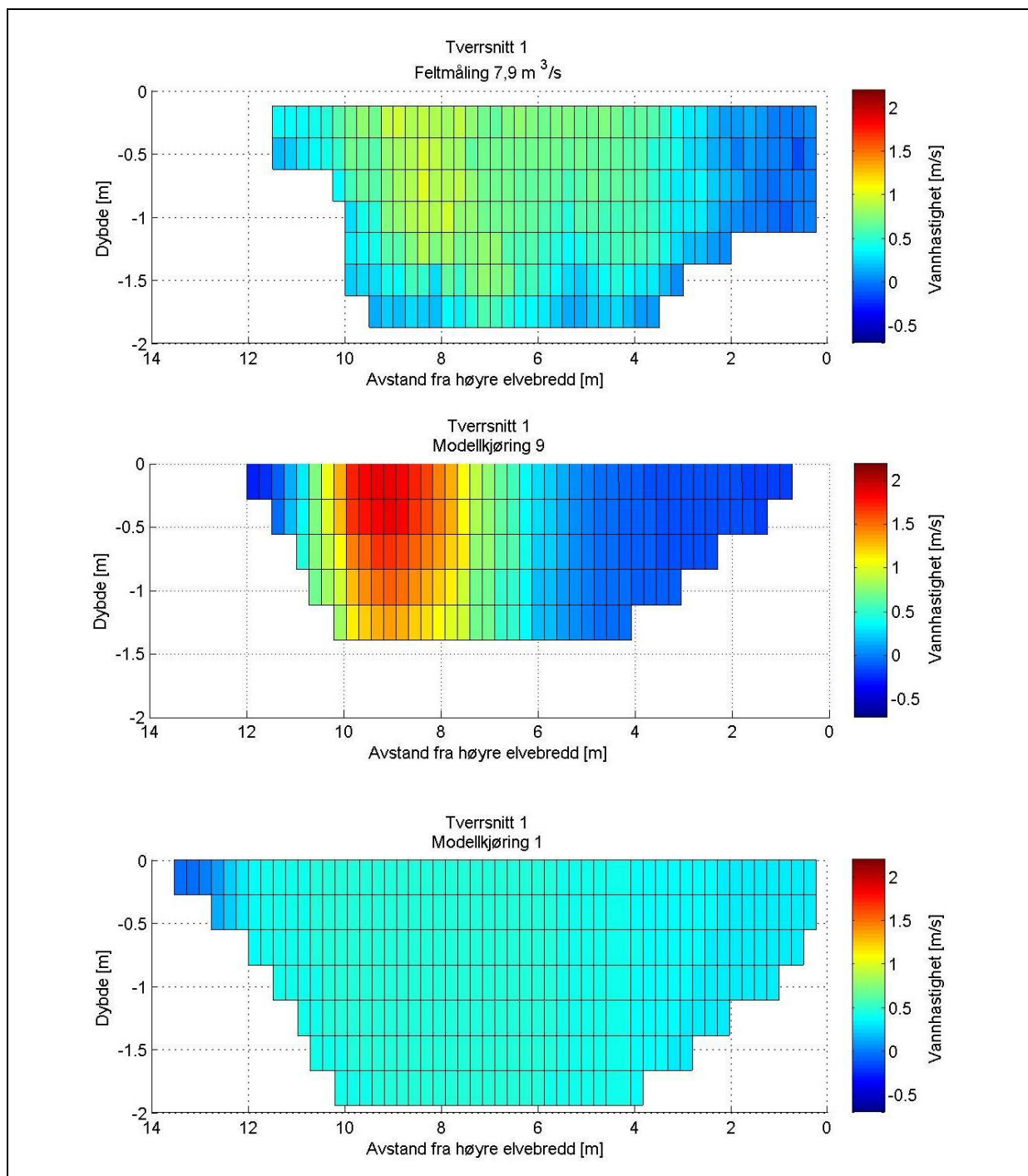


Figur 15 Jevnt fordelt strømlinjer fra modellkjøring 1

Det vil videre bli presentert tre fargeplott fra hvert tverrsnitt. Først for kjøringene med $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$, for så $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Plottene blir presentert med feltmålingen for tverrsnittet øverst, før modellkjøringene med lavest vektet NRMKA verdi for modellkjøring med kun vann og VOF. Plottene er med $0,25 \text{ m} \times 0,25 \text{ m}$ celler og har lik fargeskala for vannhastigheten for lik vannføring.

Tverrsnitt 1; 7,9 m³/s

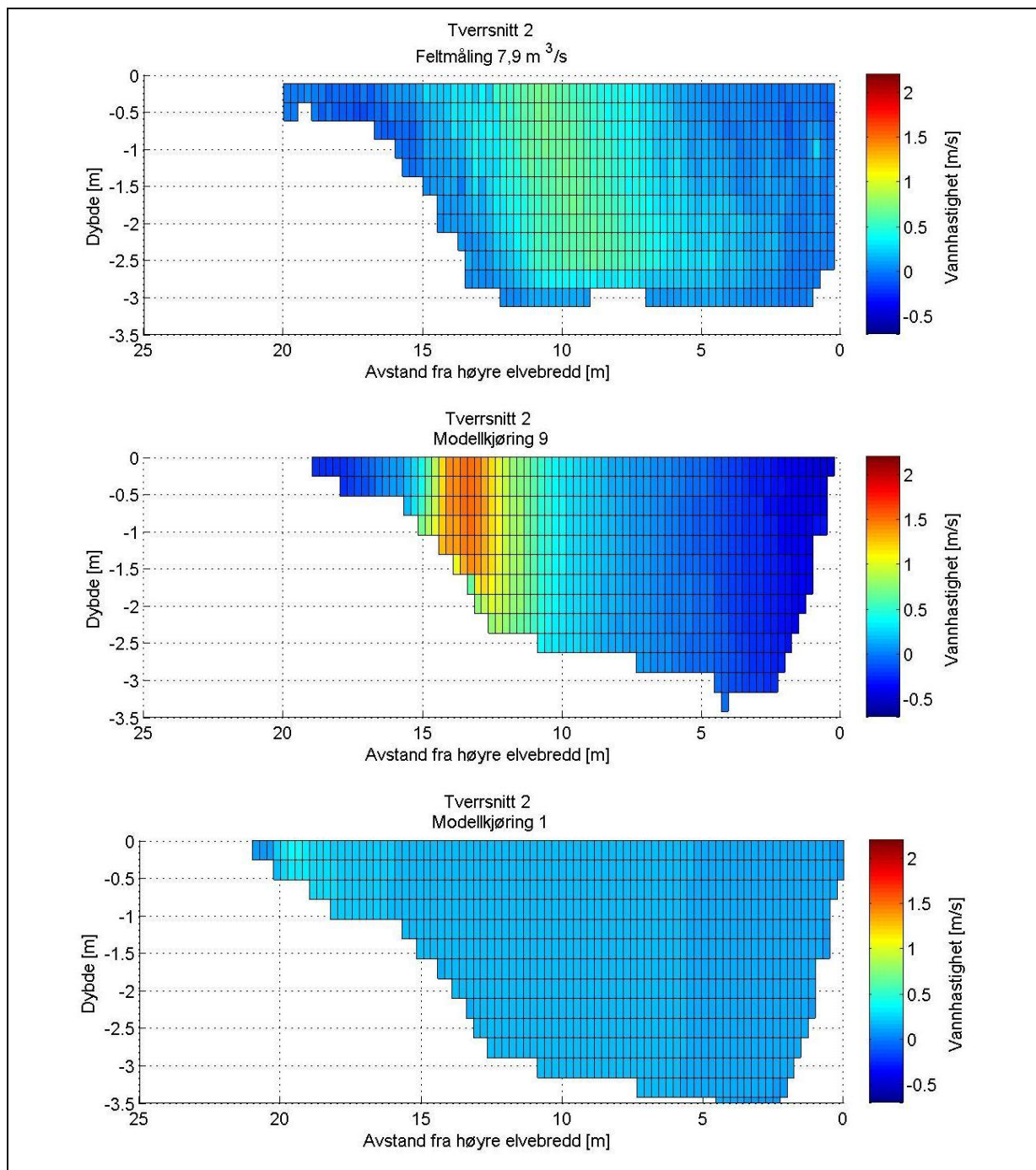
Figur 16 viser at feltmålingen har en jevn fordeling av hastighetsfeltet over tverrsnittet. Hovedvekten av strømmingen ligger i den venstre delen av tverrsnittet, med en maks hastighet på cirka 1,0 m/s. Det er en liten tilbakestrømning med en svak negativ hastighet ved den høyre elvebredden. For modellkjøring 9 er strømmingen konsentrert i den venstre delen av tverrsnittet. I den konsentrerte hastighetsfordelingen er det en makshastighet på cirka 1,7 m/s. Videre er det en større andel av tverrsnittet på den høyre siden som har negativ vannhastighet, og denne har en større negativ hastighet. Modellkjøring 1 har en jevn hastighetsfordeling. Modellkjøring 9 er grunnere enn feltmålingen.



Figur 16 Fargeplott av tverrsnitt 1 med 7,9 m³/s.

Tverrsnitt 2; 7,9 m³/s

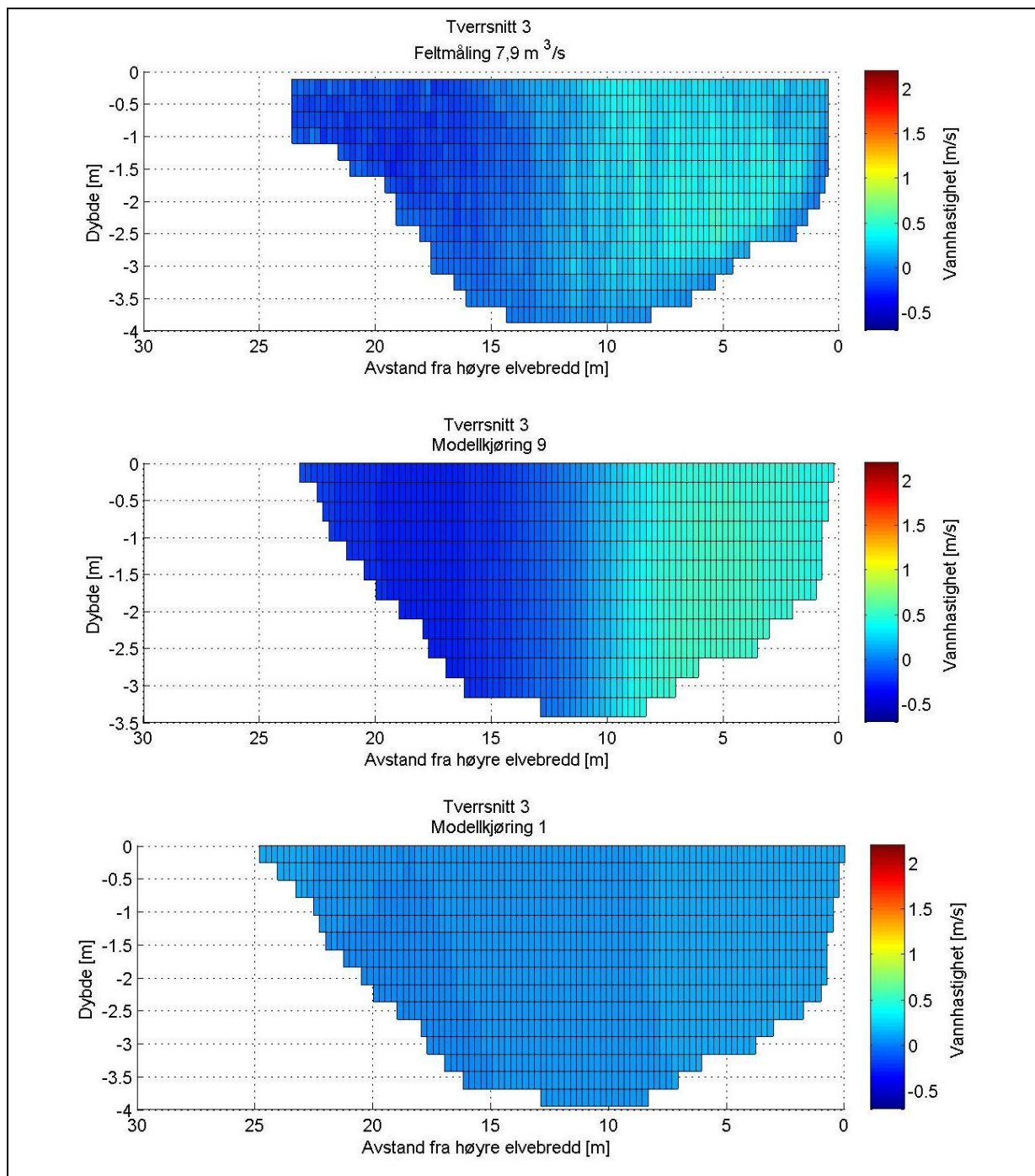
Som Figur 17 viser, ser man at feltmålingen har en jevn fordeling av hastighetsfeltet over tverrsnittet. Det er en konsentrasjon av strømmingen som ligger langs den skrånende venstredelen av tverrsnittet. De høyeste hastighetene for feltmålingene ligger på rundt 0,75 m/s mens de for modellkjøring 9 er opp mot 1,5 m/s. For modellkjøring 9, er strømmingen også her konsentrert i den venstre delen av tverrsnittet, men mer vertikalt enn hva feltmålingen viser. Det er en andel av tverrsnittet på den høyre siden av modellkjøring 9 som har negativ vannhastighet. Modellkjøring 1 har en jevnt fordelt hastighetsfordeling, med en makshastighet på cirka 0,4 i en liten del på venstresiden av tverrsnittet.



Figur 17 Fargeplott av tverrsnitt 2, 7,9 m³/s

Tverrsnitt 3; 7,9 m³/s

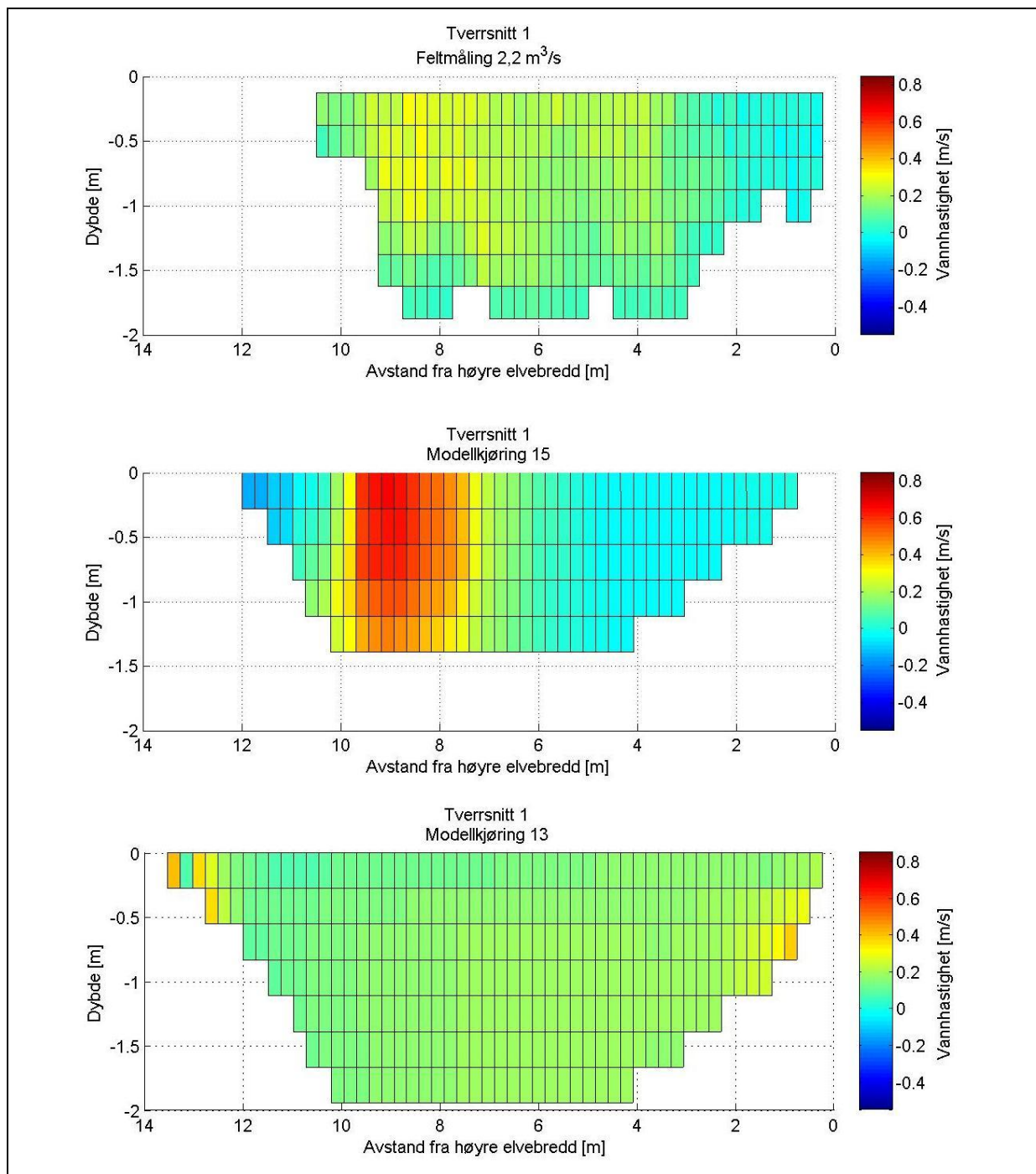
Hastighetsfordelingen er tilnærmet lik for både feltmålingen og modellkjøring 9 i Figur 18. Modellkjøring 1 har også her en jevnt fordelt hastighetsfordeling. Modellkjøring 9 har en tydeligere negativ hastighet på den venstre siden av tverrsnittet enn det feltmålingen viser.



Figur 18 Fargeplott av tverrsnitt 3, 7,9 m³/s

Tverrsnitt 1; 2,2 m³/s

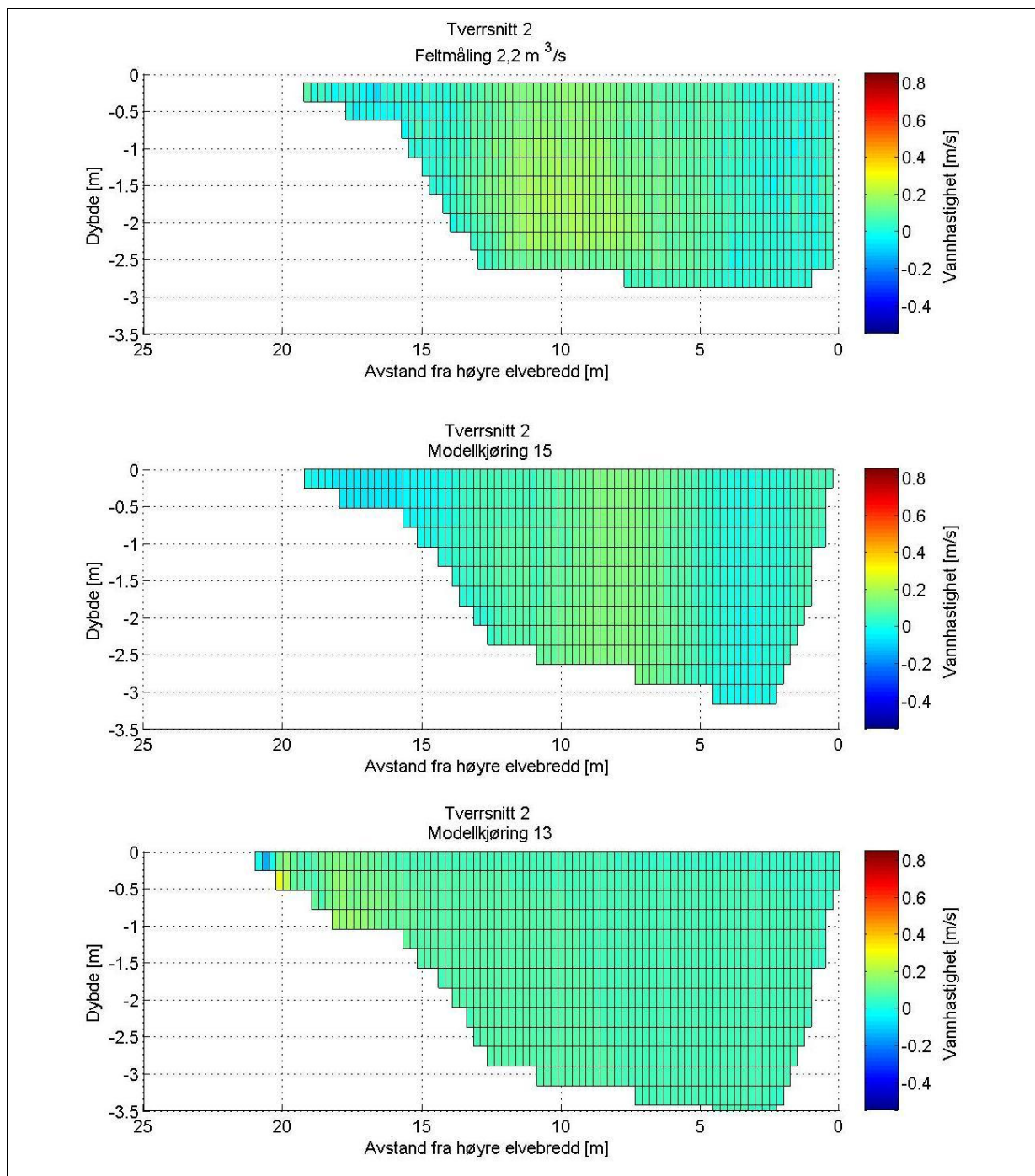
Figur 19 viser på lik måte som tverrsnitt 1 med 7,9 m³/s at feltmålingen har en jevn fordeling av hastighetsfeltet over tverrsnittet. Hovedvekten av strømmingen ligger til venstre i tverrsnittet men mangler den negative hastigheten i høyre siden. Makshastigheten er på cirka 0,3 m/s. Modellkjøring 15 viser at strømmingen er konsentrert i den venstre delen av tverrsnittet med en makshastighet på cirka 0,6 m/s. Videre er det en andel av tverrsnittet på den høyre siden som har en svak negativ vannhastighet. Modellkjøring 13 har en jevnt fordelt hastighetsfordeling, med en liten konsentrasjon av litt høyere hastighet på begge sider av tverrsnittet.



Figur 19 Fargeplott tverrsnitt 1, 2,2 m³/s

Tverrsnitt 2; 2,2 m³/s

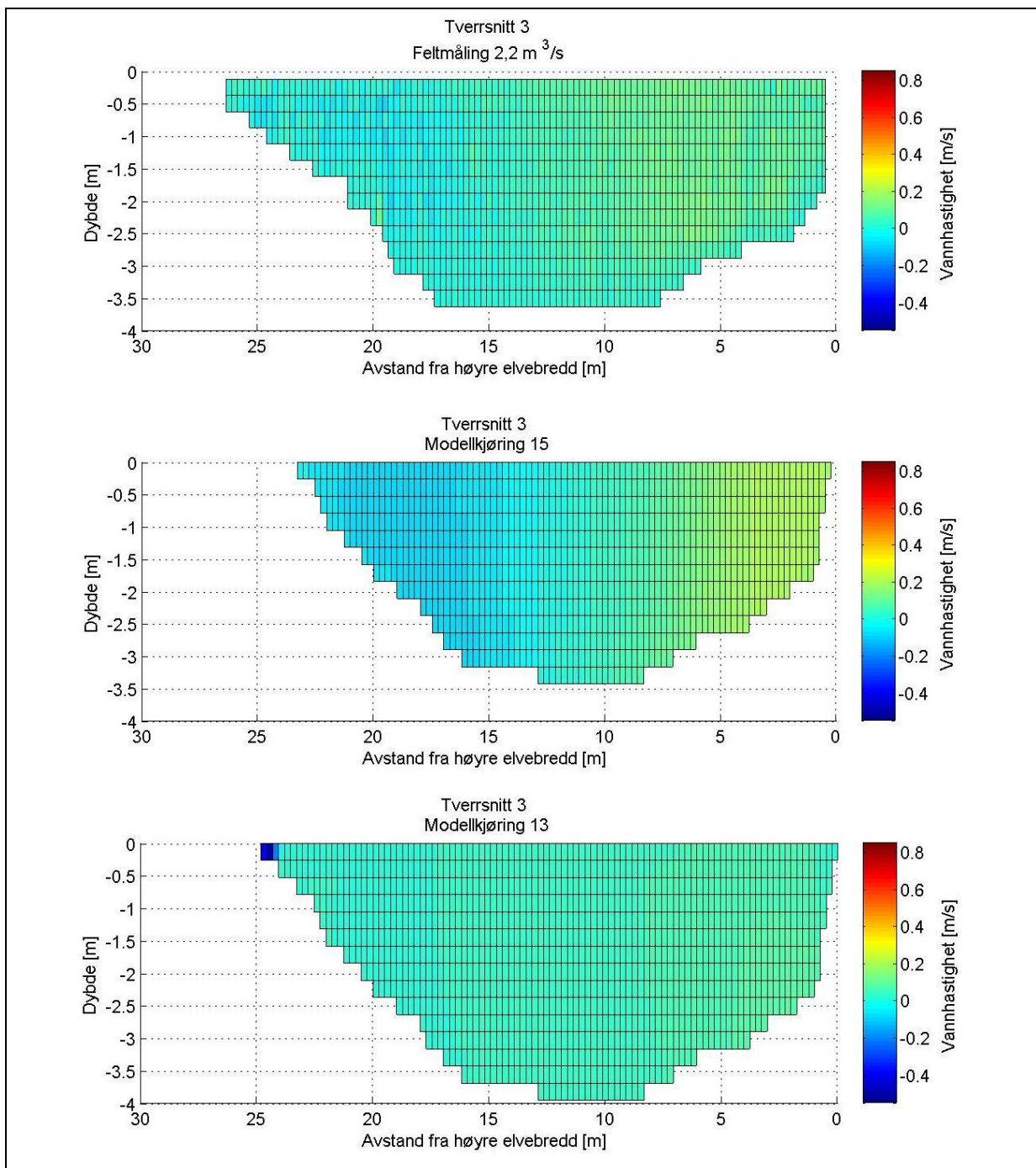
Hastighetsfordelingen har en svak konsentrasjon i feltmålingen i Figur 20. Modellkjøring 15 har også en svak konsentrasjon i et likt område, men feltmålingen viser en litt større konsentrasjon. Modellkjøring 13 har derimot den jevne hastighetsfordelingen som alle de andre tverrsnittene kjørt med VOF.



Figur 20 Fargeplott av tverrsnitt 2, 2,2 m³/s

Tverrsnitt 3; 2,2 m³/s

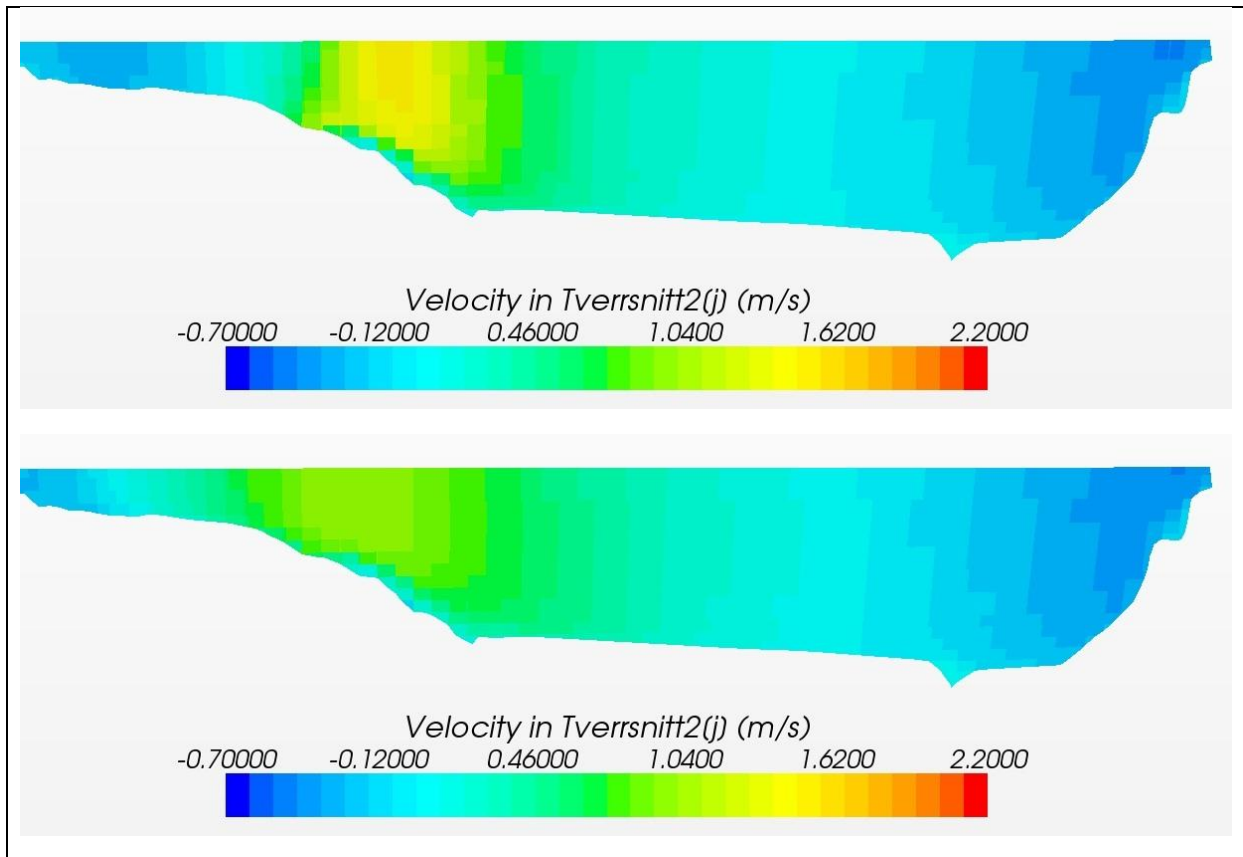
Feltemålingen i Figur 21 en svak antydning til å ha positive hastigheter i den høyre delen av tverrsnittet, og en svak negativ hastighet på den venstre siden av tverrsnittet. Modellkjøring 15 har en tydeligere konsentrasjon av hastighetene i den høyre og den venstre delen av tverrsnittet, enn det feltemålingen har. Modellkjøring 13 har nok en gang en jevnt fordelt hastighetsfordeling, men har noen celler helt øverst til venstre med en betydelig større negativ hastighet enn andre deler i tverrsnittet.



Figur 21 Fargeplott tverrsnitt 3, 2,2 m³/s

Tverrsnitt 2; 7,9 m³/s Ikke-stasjonær strømning

Figur 22 viser hvordan konsentrasjonen av vannhastigheten har endret seg i tverrsnitt 2. Det øverste bildet av tverrsnitt 2 viser en tydelig konsentrering av hastighetsfordelingen, med en maksverdi på cirka 1,5 m/s. Etter 360 iterasjoner, eller 12 sekunder i modelltid, viser det nederste bildet at hastigheten har blitt utjevnet. Makshastigheten er nå cirka 0,8 m/s.



Figur 22 Maksimal- og minimal hastighetskonsentrasjon for modellkjøring 9 i ikke-stasjonær vannstrømning i CDF-modellen.

TKE verdier fra felt og CFD-modell

Det er for tre av modellkjøringene plukket ut den turbulente kinetiske energien (TKE) for vannføring på 7,9 m³/s i Tabell 5 og for 2,2 m³/s i Tabell 6. Resultatet fra de andre kjøringene er vist i vedlegg B. Verdiene for TKE er ekstremt høye for VOF kjøringene, men treffer bedre for kjøringene gjort kun med vann. Enkelte av punktene har et avvik på over 100 % i forhold til den målte verdien i felt ved en vannføring på 7,9 m³/s. Målepunkt "Inntak 1" har bare -11 % avvik i modellkjøring 5, mens det har -119 % avvik i modellkjøring 6.

Tabell 5 TKE verdier fra felt og verdier som er hentet ut fra STAR-CCM+ ved 7,9 m³/s

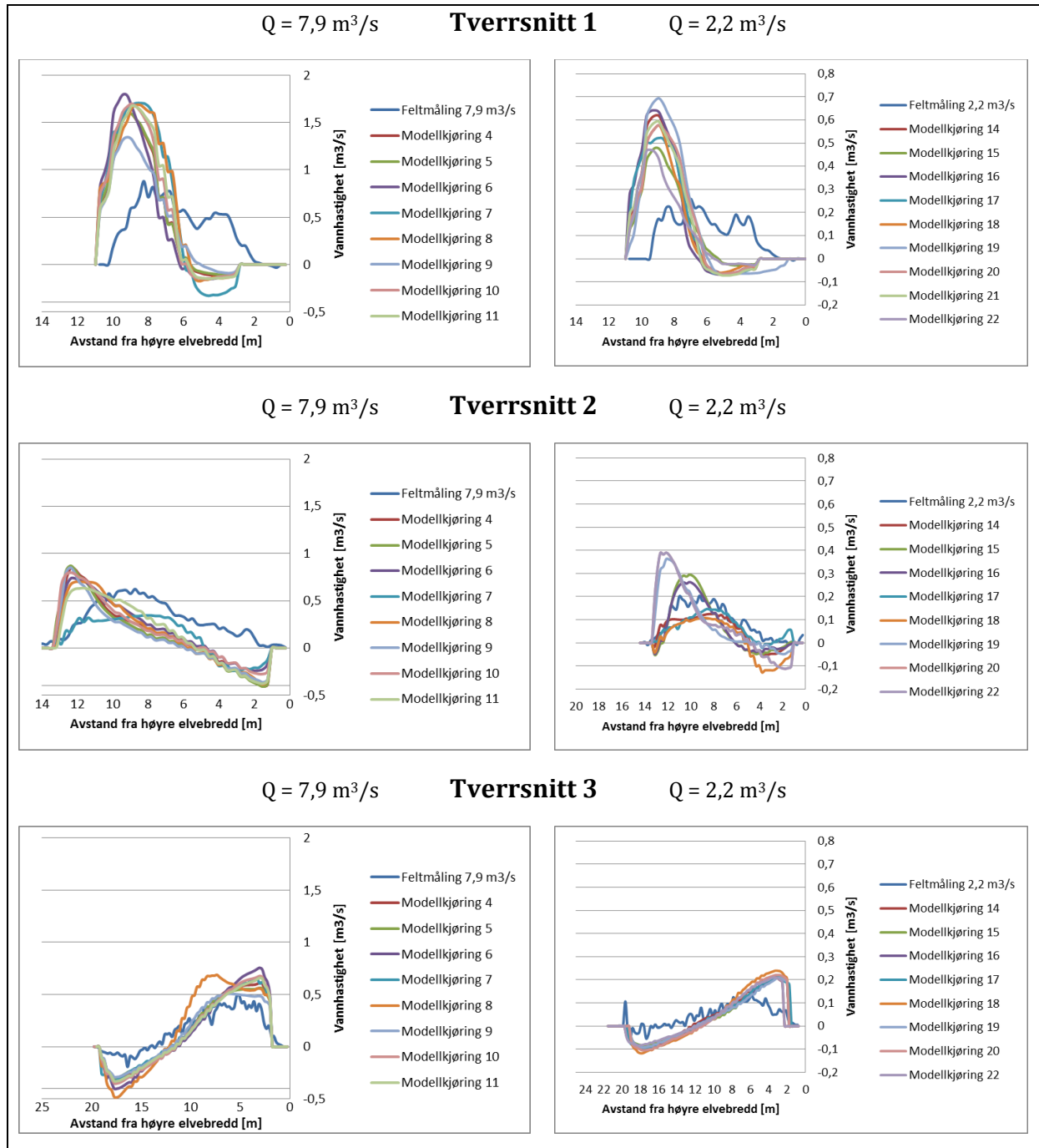
7,9 m ³ /s	TKE i felt [cm ² /s ²]	Modellkjøring 3		Modellkjøring 5		Modellkjøring 6	
		TKE [cm ² /s ²]	%- feil	TKE [cm ² /s ²]	%- feil	TKE [cm ² /s ²]	%- feil
Tverrsnitt 1	228	78000	-34300 %	13	94 %	24	90 %
Tverrsnitt 2	208	73000	-31900 %	226	1 %	173	24 %
Tverrsnitt 3	221	61000	-26900 %	499	-120 %	927	-307 %
Inntak 1	264	62000	-27500 %	252	-11 %	498	-119 %
Inntak 2	209	96000	-42400 %	202	11 %	368	-62 %
Inntak 4	305	328000	-144400 %	69	70 %	88	61 %
Inntak 5	223	302000	-132800 %	109	52 %	94	59 %
Inntak 6	397	42000	-18600 %	222	2 %	533	-134 %

Tabell 6 TKEverdier fra felt og hentet ut fra STAR-CCM+ ved 2,2 m³/s

2,2 m ³ /s	TKE i felt [cm ² /s ²]	Modellkjøring 13		Modellkjøring 15		Modellkjøring 18	
		TKE [cm ² /s ²]	%- feil	TKE [cm ² /s ²]	%- feil	TKE [cm ² /s ²]	%- feil
Tverrsnitt 5	34	13000	-40700 %	3	90 %	3	91 %
Tverrsnitt 6	30	24000	-70600 %	5	84 %	3	91 %
Tverrsnitt 7	17	33000	-97400 %	30	13 %	10	72 %
Tverrsnitt 8	44	25000	-75800 %	28	18 %	37	-8 %
Inntak 7	13	27000	-79500 %	28	17 %	17	50 %
Inntak 8	87	31000	-92300 %	46	-35 %	14	58 %
Inntak 9	8	29000	-85800 %	17	51 %	13	60 %
Inntak 10	7	50000	-147200 %	16	52 %	12	66 %
Inntak 11	11	37000	-109500 %	7	79 %	4	87 %
Inntak 12	9	39000	-114600 %	5	85 %	3	91 %

4.2 Resultater av sensitivitetsanalysen

I Figur 23, er hastighetene plottet i grafer for de forskjellige modellkjøringene som er utført. I tverrsnitt 1 er det snittet i dybden -0,5 under vannoverflaten, mens det for tverrsnitt 2 og 3 er snittet i dybden -2,0 meter under vannoverflaten.



Figur 23 Oppsummering av sensitivitetsanalysen

Som figuren viser ligger alle modellkjøringene stort sett likt i tverrsnitt 1 for både vannføringen på $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$ og $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Modellkjøring 7 skiller seg ut ved $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$, ved at denne har en større negativ hastighet på cirka $-0,4 \text{ m/s}$ i den høyre delen av tverrsnittet. Alle modellkjøringene har en høyere maksverdi enn feltmålingene i tverrsnitt 1. Alle modellkjøringene har også en negativ hastighet, noe feltmålingene ikke har.

Feltemålingen har en maksverdi på cirka $0,9 \text{ m/s}$ for $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$, mens den laveste maksverdien for modellkjøring er på cirka $1,4 \text{ m/s}$. Den maksimale hastigheten for modellkjøringene er på cirka $1,7 \text{ m/s}$. Modellkjøringene også mer konsentrert i den venstre delen av tverrsnittet. For $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$ har feltemålingen en maksimal hastighet på cirka $0,25 \text{ m/s}$. Modellkjøringen har en maksverdi mellom cirka $0,45 \text{ m/s}$ og $0,7 \text{ m/s}$.

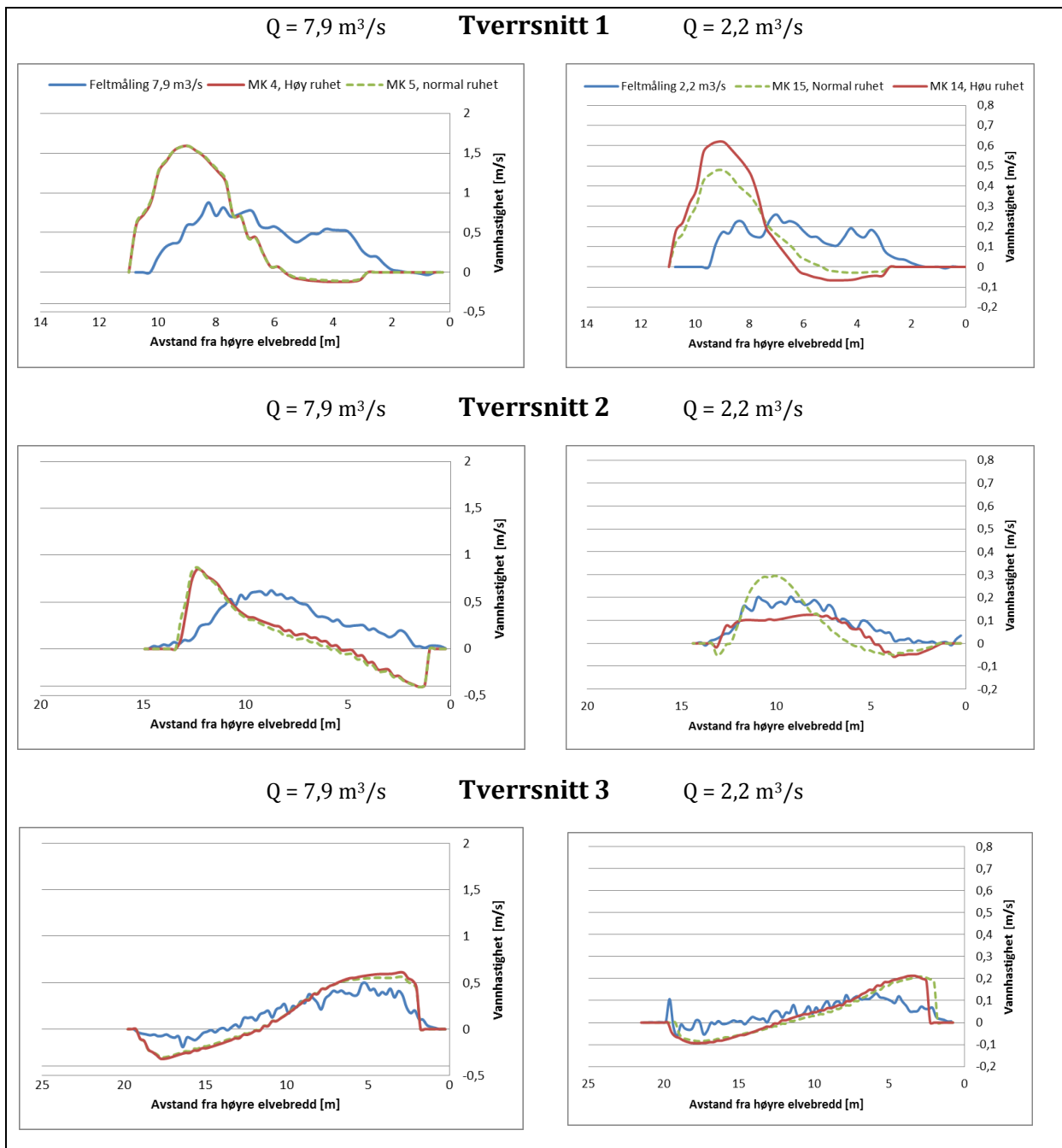
I Tverrsnitt 2 er det en samling av modellkjøringene for $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$. Det er kun modellkjøring 7 som skiller seg ut. Modellkjøring 7 har $0,30 \text{ m}$ celler. For $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$ er det en større spredning av hastighetene i tverrsnittet for de forskjellige modellkjøringene. Modellkjøring 19 og 22 ligger tilnærmet likt i den venstre del av tverrsnittet, med en høyere hastighet enn de andre modellkjøringene og feltmålingene. Modellkjøring 22 har også en høyere negativ hastighet like ved den høyre elvebredden. Videre ligger modellkjøring 15 og 16 samlet og har en høyere hastighet enn feltemålingen. Resten av modellkjøringene har en hastighet som er lavere enn feltemålingen, hvor modellkjøring 18 utpeker seg med en høyere negativ hastighet enn i de andre modellkjøringene. Den negative hastigheten er størst på den høyre siden av tverrsnittet.

Alle modellkjøringer har en tilnærmet lik hastighetsfordeling i tverrsnitt 3 med $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$. For $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$ er det bare modellkjøring 8 som skiller seg ut. Ellers har modellkjøringene for $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$ lik hastighetsfordeling som for $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$, med positiv hastighet i den høyre delen av tverrsnittet og negativ hastighet i den venstre delen. For $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$ har feltemålingen en maks hastighet på cirka $0,5 \text{ m/s}$, mens den maksimale hastigheten for modellkjøringene er på cirka $0,7 \text{ m/s}$. Den største negative hastigheten for feltemålingen er på cirka $-0,2 \text{ m/s}$ mens den for modellkjøringen er $-0,6 \text{ m/s}$.

Det blir videre presentert grafer for sammenlikning av ulike parameteres påvirkning på hastighetsfordelingen. For vannføringen på $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$ har det videre blitt brukt modellkjøring 5 som referansegraf, mens det har blitt brukt modellkjøring 15 som referansegraf for $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Dette er på grunn av at det er dette modelloppsettet man trolig ville valgt ut fra befarings i felt og som er de anbefalte innstillingene som blir valgt automatisk i STAR-CCM+.

4.2.1 Sammenlikning av ruhet

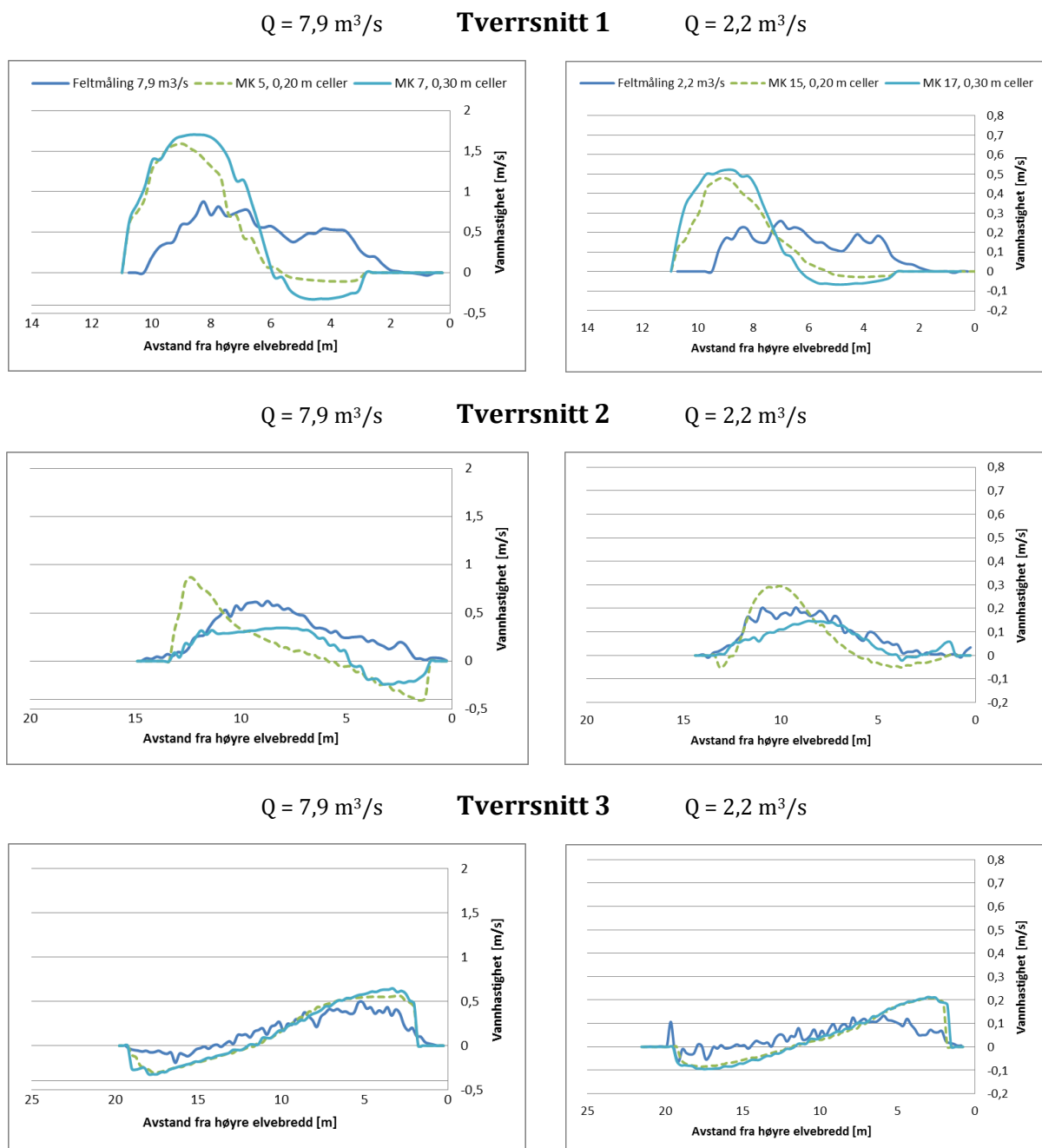
Figur 24 viser at ruheten gir lite forskjell på hastighetsfordelingen for $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$, mens det er forskjell på resultatet for $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$ i tverrsnitt 1 og 2. Modellkjøringen med høy ruhet gir en makshastighet som er cirka $0,1 \text{ m/s}$ høyere enn modellkjøring med normal ruhet i tverrsnitt 1. I tverrsnitt 2 har modellkjøring med normale ruheten cirka $0,2 \text{ m/s}$ høyere hastighet enn modellkjøring med høy ruhet. Modellkjøring med høy ruhet har en hastighetsfordeling som likner mer på feltmålingen enn det modellkjøring med normal ruhet har.



Figur 24 Sammenlikning av ruhetens påvirkning på vannhastigheten i tverrsnitt 1,2 og 3 ved $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$ og $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$

4.2.2 Sammenlikning av cellestørrelse

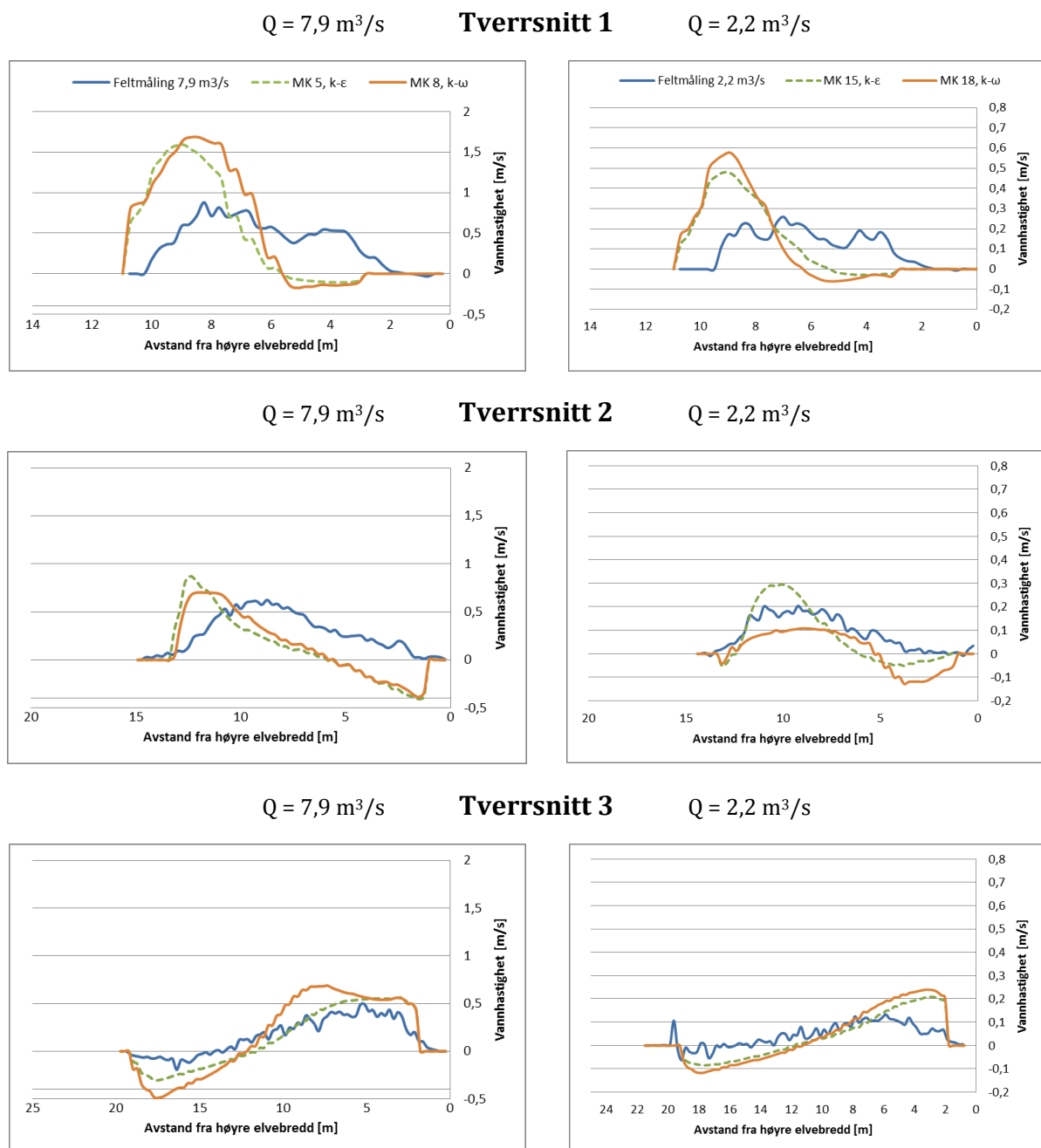
Figur 25 sammenlikner cellestørrelsens betydning for hastighetsfordelingen. I tverrsnitt 1 har modellkjøringen med 0,20 m celler en spissere topp for makshastigheten enn det modellkjøringen som har 0,30 m celler har. Modellkjøringen med 0,30 m celler har også en større andel av tverrsnittet med negativ hastighet. For $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$ har modellkjøringen med 0,30 m celler en maksimal negativ hastighet på cirka $0,4 \text{ m/s}$ mens modellkjøringen med 0,20 m har en maksimal negativ hastighet på cirka $0,1 \text{ m/s}$. For tverrsnitt 2 med $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$ har modellkjøringen med 0,20 m en spissere hastighetstopp for både den maksimale positive- og negative hastigheten enn den mer avrundede formen hastighetsfordelingen til modellkjøringen med 0,3 m har. I tverrsnitt 3 har de to modellkjøringene en tilnærmet lik fordeling.



Figur 25 Sammenlikning av cellestørrelsens betydning for vannhastigheten

4.2.3 Sammenlikning av turbulensmodell

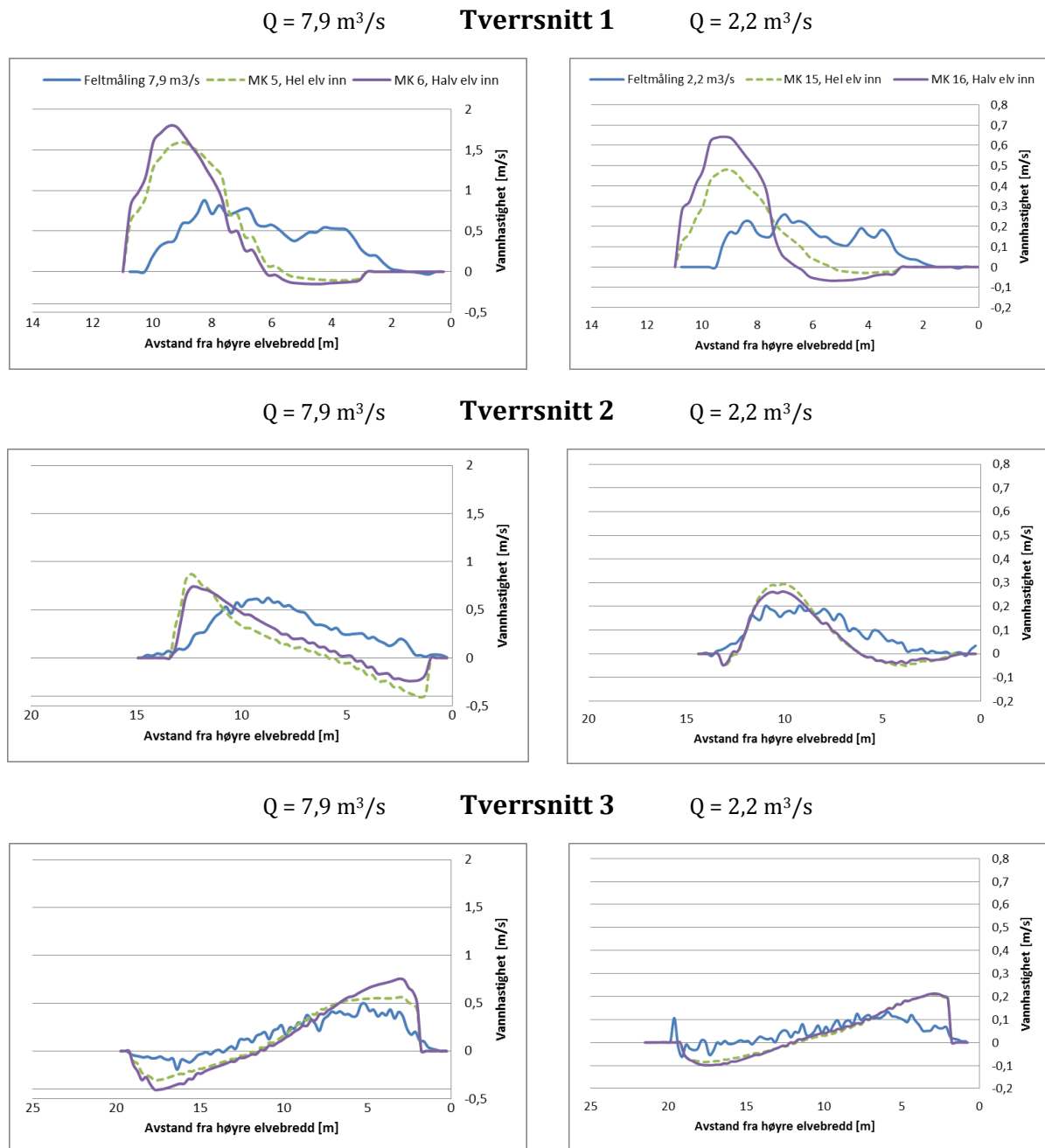
Figur 26 viser at modellkjøringen med $k-\omega$ følger modellkjøringen med $k-\epsilon$ for tverrsnitt 1 og 3 for $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Den maksimale positive hastigheten er cirka $0,1 \text{ m/s}$ høyere for modellkjøringen med $k-\omega$ enn modellkjøringen med $k-\epsilon$ i tverrsnitt 1. I tverrsnitt 2 med $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$ har hastighetsfordelingen en spissere topp for modellkjøringen med $k-\epsilon$ enn det modellkjøringen med $k-\omega$ har. Den maksimale positive hastigheten for $k-\epsilon$ er også $0,2 \text{ m/s}$ høyere enn for $k-\omega$, mens den maksimale negative hastigheten er cirka $0,1 \text{ m/s}$ lavere for $k-\omega$ enn $k-\epsilon$. For $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$ er gir $k-\omega$ en bredere positiv hastighetsfordeling enn det $k-\epsilon$ gjør i tverrsnitt 1. For tverrsnitt 3 har modellkjøringen med $k-\omega$ en bredere positiv hastighetsfordeling enn $k-\epsilon$ har. Den maksimale negative hastigheten er cirka $0,2 \text{ m/s}$ lavere enn $k-\epsilon$.



Figur 26 Sammenlikning av turbulensmodellens betydning for vannhastigheten

4.2.4 Sammenlikning av hastighetsfordeling inn i modell

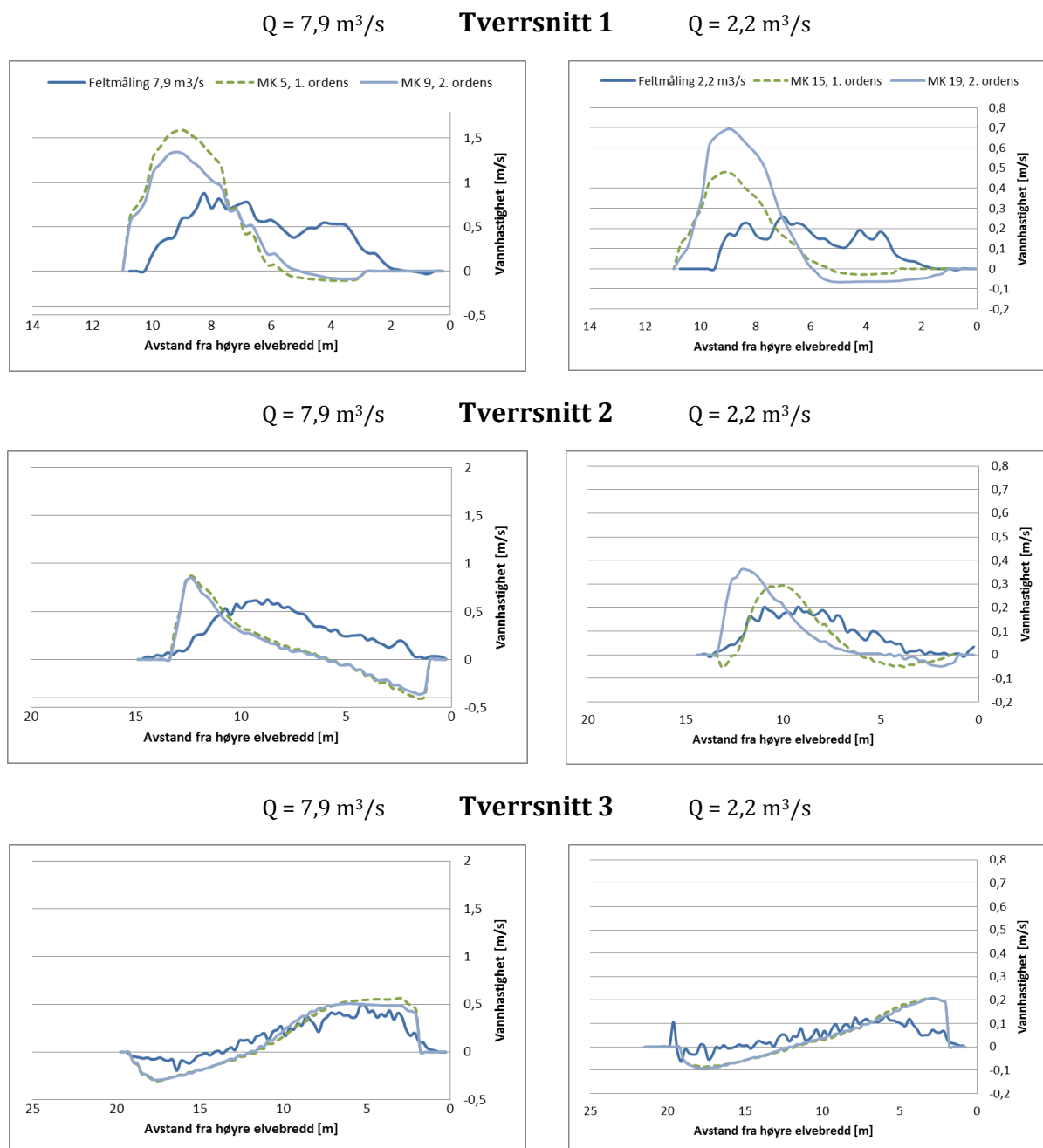
Modellkjøringene hvor vannføringen har kommet inn i modellen gjennom hele eller halve tverrsnittet er gitt i Figur 27. I tverrsnitt 2 og 3 følger hastighetsfordelingene hverandre, mens det i tverrsnitt 1 er en høyere maksimal hastighet for modellkjøringen med halv elv inn, enn det hel elv inn gir. Forskjellen er på cirka 0,15 m/s for både 7,9 m³/s og 2,2 m³/s.



Figur 27 Sammenlikning for hastighetsfordelingens inn i modellen betydning for vannhastigheten

4.2.5 Sammenlikning av 1.- og 2. ordens diskretiseringsskjema for tid

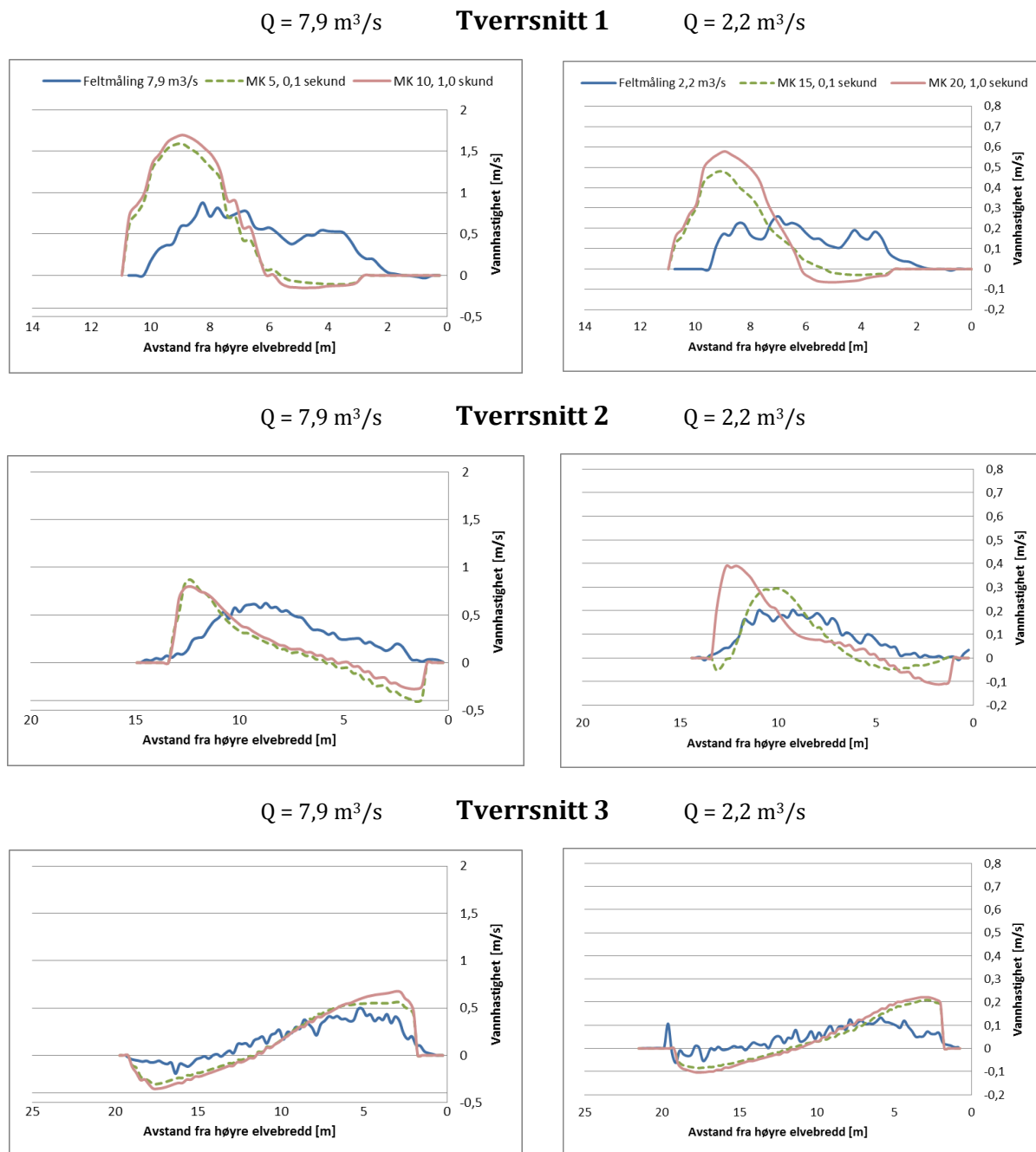
Figur 28 viser at hastighetsfordelingen følger modellkjøringene med 1. og 2. ordens diskretiseringsskjema hverandre for de to vannføringene i alle tverrsnitt bortsett fra for 2,2 m³/s i tverrsnitt 2. I tverrsnitt 2 ligger hastighetstoppen for modellkjøringen med 1. ordens et par meter nærmere midten enn det modellkjøringen med 2. ordens. I Tverrsnitt 1 er den maksimale positive hastighetsfordelingen cirka 0,2 m/s høyere for modellkjøringen med 1. ordens enn for modellkjøringen med 2. ordens for 7,9 m³/s. For 2,2 m³/s er det modellkjøringen med 2. ordens diskretiseringsskjema som ligger cirka 0,2 m/s over toppen til modellkjøringa med 1. ordens.



Figur 28 Sammenlikning for diskretiseringsskjemas betydning for vannhastigheten

4.2.6 Sammenlikning av tidssteg

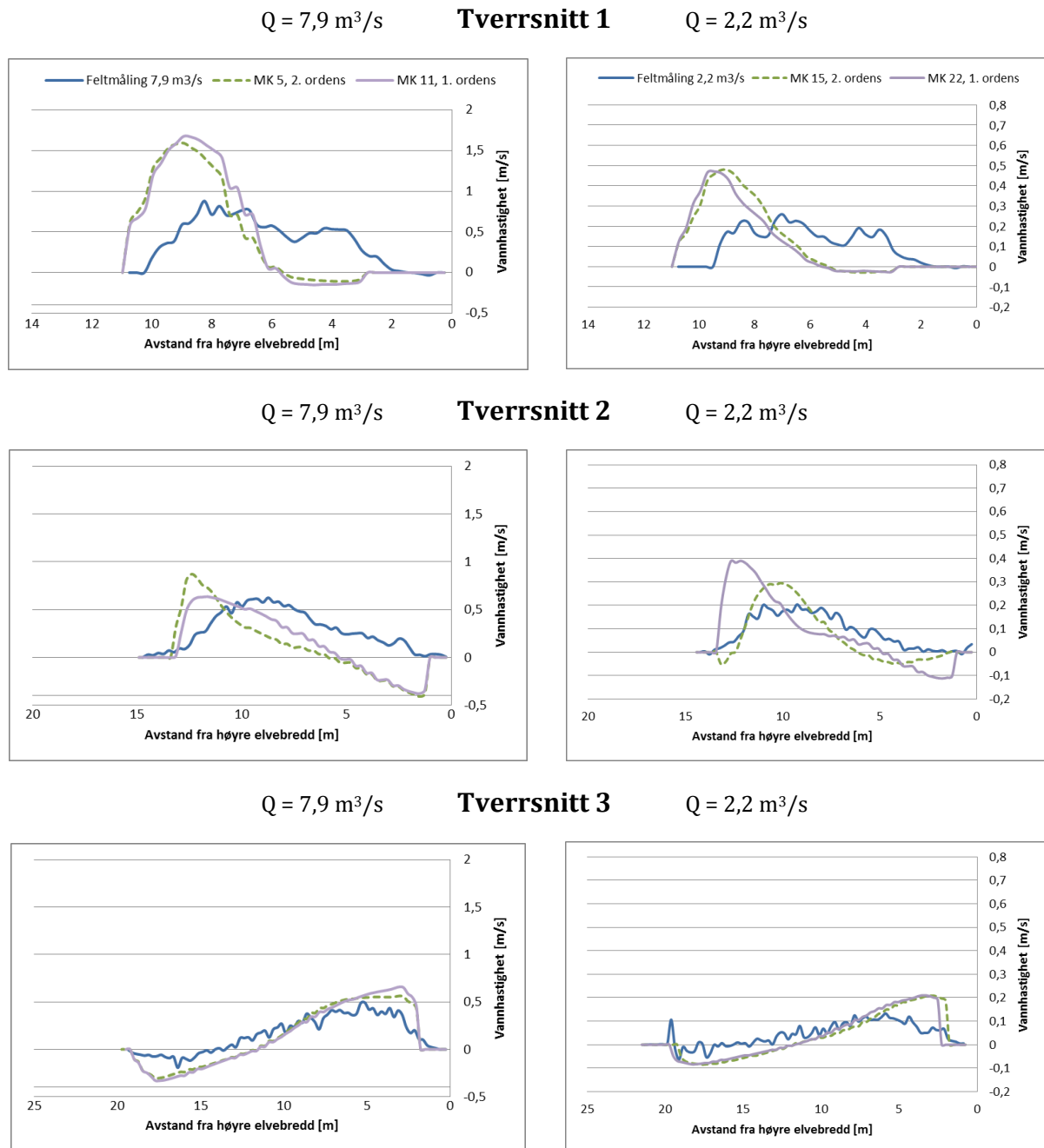
Hastighetsfordelingen til modellkjøringene med 0,1 s og 1,0 s i Figur 29, viser at modellkjøringene med 0,1 s og 1,0 s følger hverandre for $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$ i alle tverrsnitt. I tverrsnitt 2 for $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$ ligger hastighetstoppen for modellkjøringen med 1,0 s tidssteg et par meter nærmer midten enn det modellkjøringen med 0,1 s tidssteg gjør, og den maksimale hastigheten er cirka 0,1 m/s lavere. I Tverrsnitt 1 er den maksimale positive hastighetsfordelingen cirka 0,1 m/s høyere for modellkjøringen med 1,0 s enn for modellkjøringen med 0,1 s.



Figur 29 Sammenlikning av tidsskrittets betydning for hastigheten

4.2.7 Sammenlikning av oppstrøms skjema

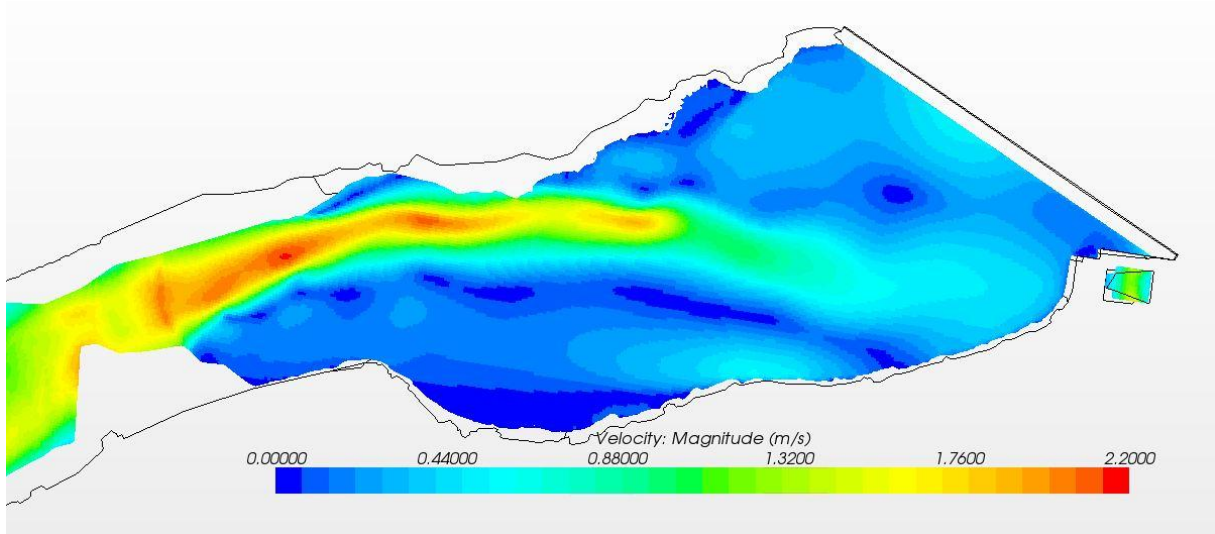
Figur 30 viser at hastighetsfordelingen til 1. ordens og 2. ordens oppstrøms skjema følger følger hverandre for både $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$ og $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$. Det er kun i tverrsnitt 2 for $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$ at hastighetstoppen for modellkjøringen med 2. ordens ligger et par meter nærmere midten enn det modellkjøringen med 1. ordens gjør. Den maksimale hastigheten er cirka $0,1 \text{ m/s}$ lavere for 2. ordens enn 1. ordens.



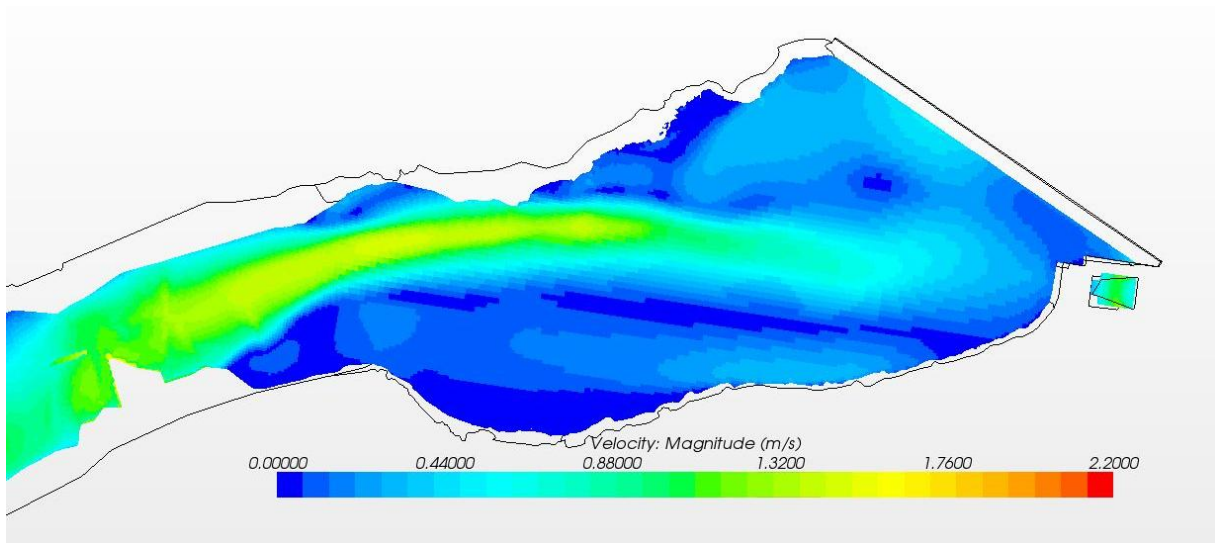
Figur 30 Sammenlikning av betydningen av orden til turbulensmodell

4.2.8 Sammenlikning av geometriens påvirkning

Konsekvensen av å endre litt på geometrien i elven oppstrøms, er vist i Figur 31 og Figur 32. Figur 32 viser tydelig lavere makshastighet. Konsentrasjonen av vannhastigheten blir også rettet mer ut mot demningen.



Figur 31 Fargeplott av vannhastigheten for modellkjøring 9 inn i inntaksmagasinet 0,30 m under overløpsterskelen.



Figur 32 Fargeplott av vannhastigheten for modellkjøring med endret geometri inn i inntaksmagasinet 0,30 m under overløpsterskelen

4.3 Enkle beregninger

For å kunne se på om en CFD-modell kan gi bedre grunnlag for å forutse driftsproblemer, må det også sees på hva som enkelt kan beregne selv.

Tabell 7 Enkle beregnede verdier

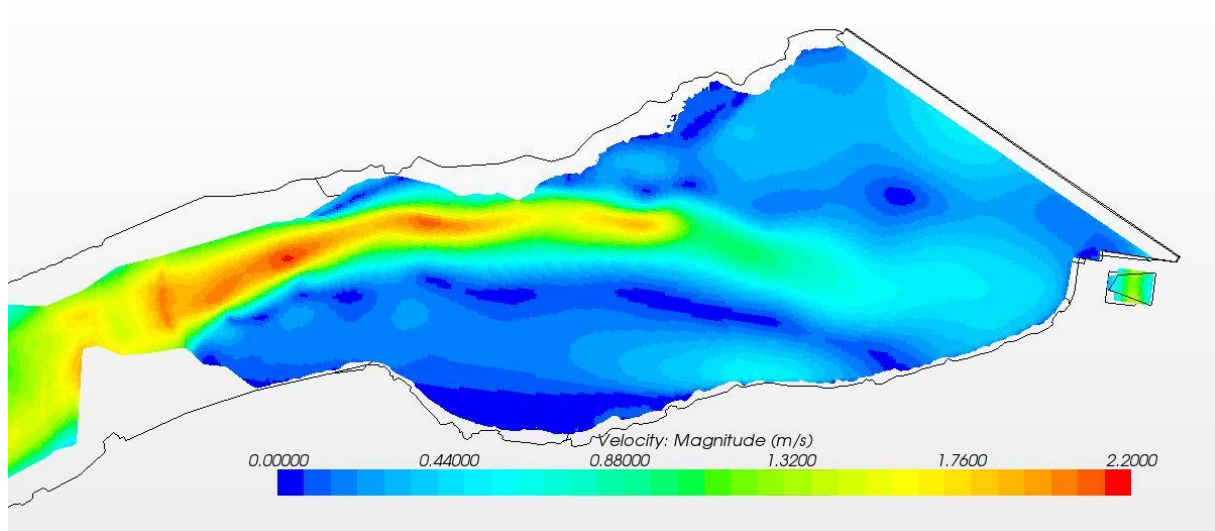
	Q [m ³ /s]	A [m ²]	V[m/s]	Fr	Re
Tverrsnitt 1	2,2	17,2	0,13	0,04	195 000
	7,9	17,2	0,46	0,13	690 000
Tverrsnitt 2	2,2	45,4	0,05	0,01	125 000
	7,9	45,4	0,17	0,04	425 000
Tverrsnitt 3	2,2	72,3	0,03	0,01	105 000
	7,9	72,3	0,11	0,02	385 000

4.4 Resultater til analyse av driftsproblemer

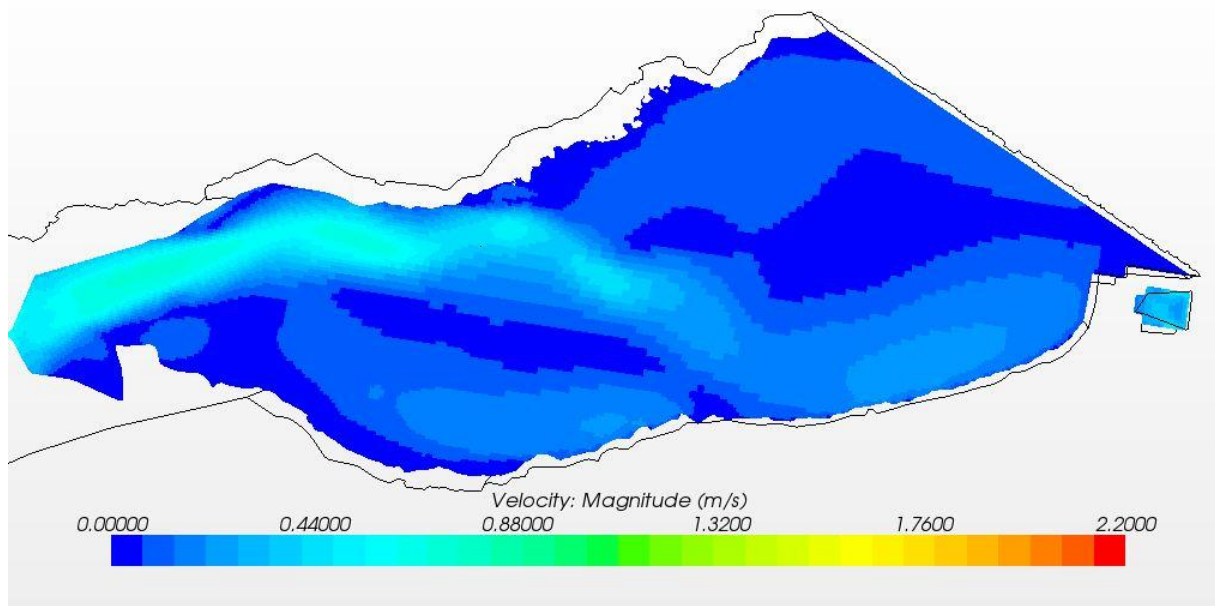
Det blir videre presentert fargeplott for vannhastighet, skjærspenning mot bunn, TKE og virvlingstall for inntaksmagasinet i et snitt i vannmassen 0,80 m over taket i inntakskonusen. Taket på inntakskonusen ligger 1,30 m under overløpsterskelen Fargeplottene blir presentert fra modellkjøring 9 ved 7,9 m³/s og modellkjøring 15 ved 2,2 m³/s.

4.4.1 Hastigheten

Det er tydelig at hastigheten er høyere og mer konsentrert lengre inn i magasinet for vannføringen på $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$ enn $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$



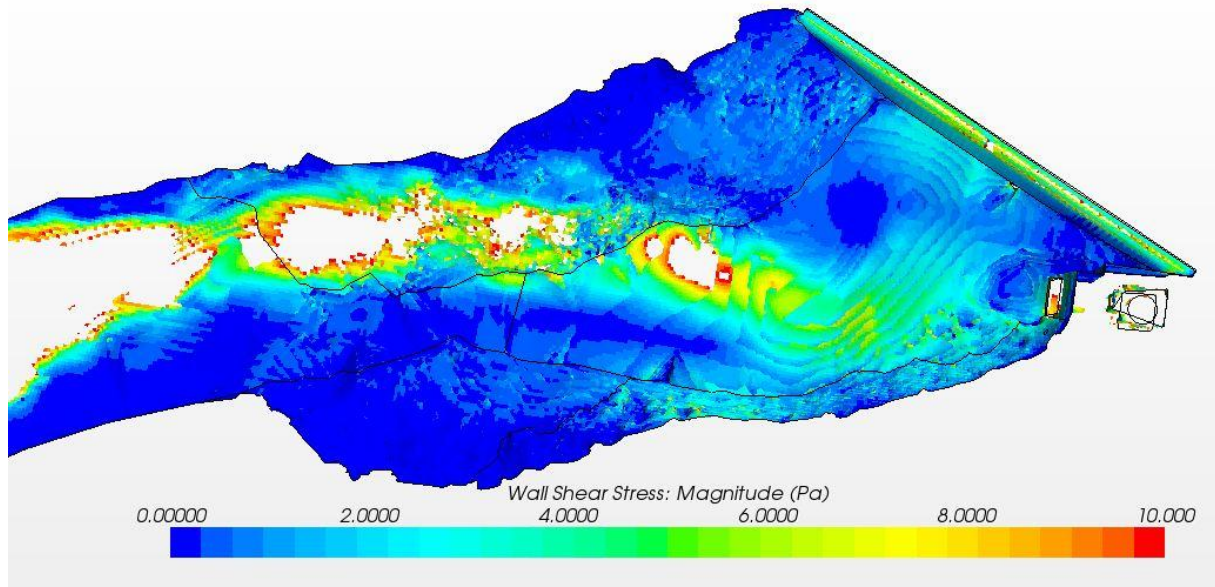
Figur 33 Fargeplott av hastigheten for $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$



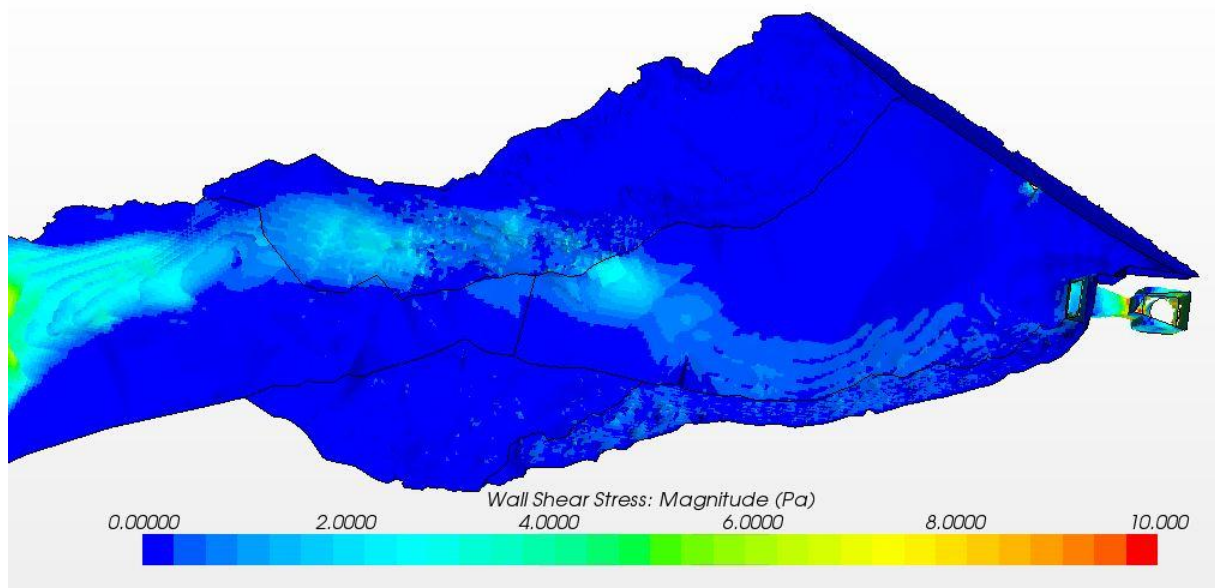
Figur 34 Fargeplott av hastigheten for $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$

4.4.2 Skjærspenning mot bunn

Skjærspenningen er tydelig større mot bunnen for $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$. I områdene der det er hvitt med en rød kant rundt har en skjærspenning som er større enn 10 Pa . I følge Shields diagram vil partikler med en størrelse på 10 mm bli erodert ved $9,7 \text{ Pa}$.



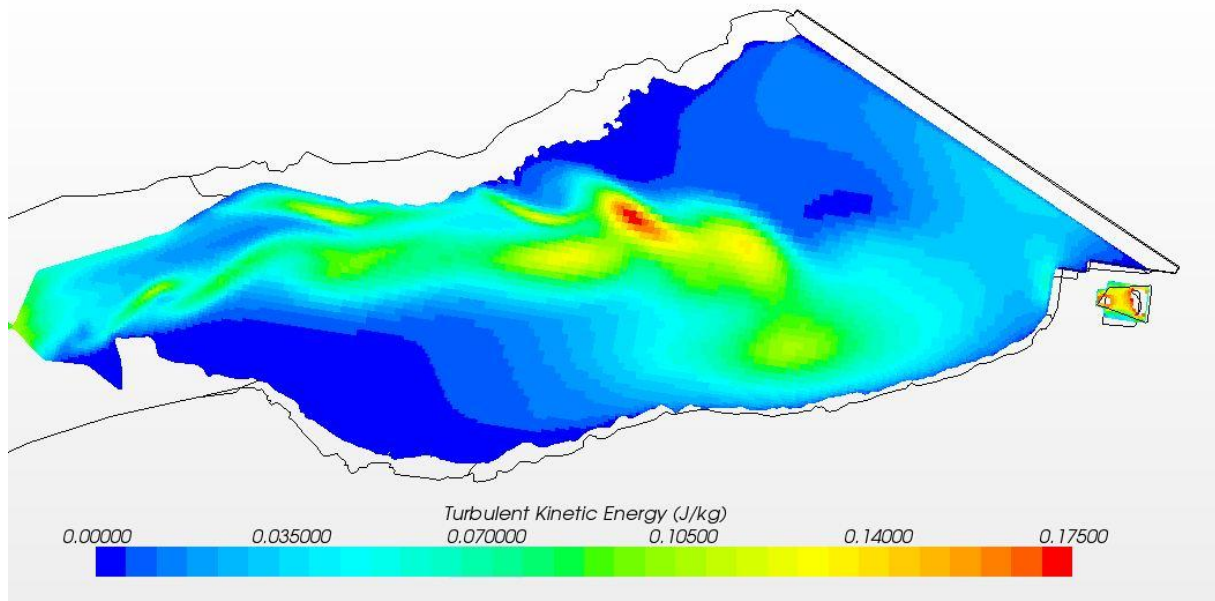
Figur 35 Fargeplott av skjærspenning mot bunnen for $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$



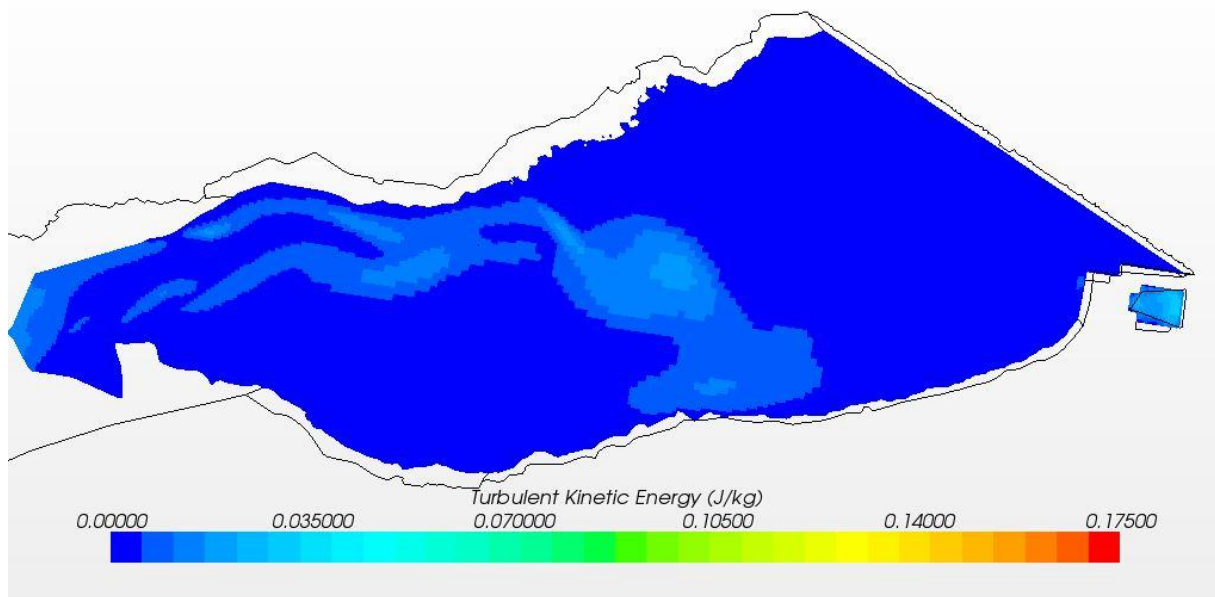
Figur 36 Fargeplott av skjærspenning mot bunnen for $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$

4.4.3 Turbulent kinetisk energi

Den turbulente kinetiske energien er mye høyere for $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$ enn for $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Ved $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$ er det også en noe høyere verdi lokalt i front av inntaket.



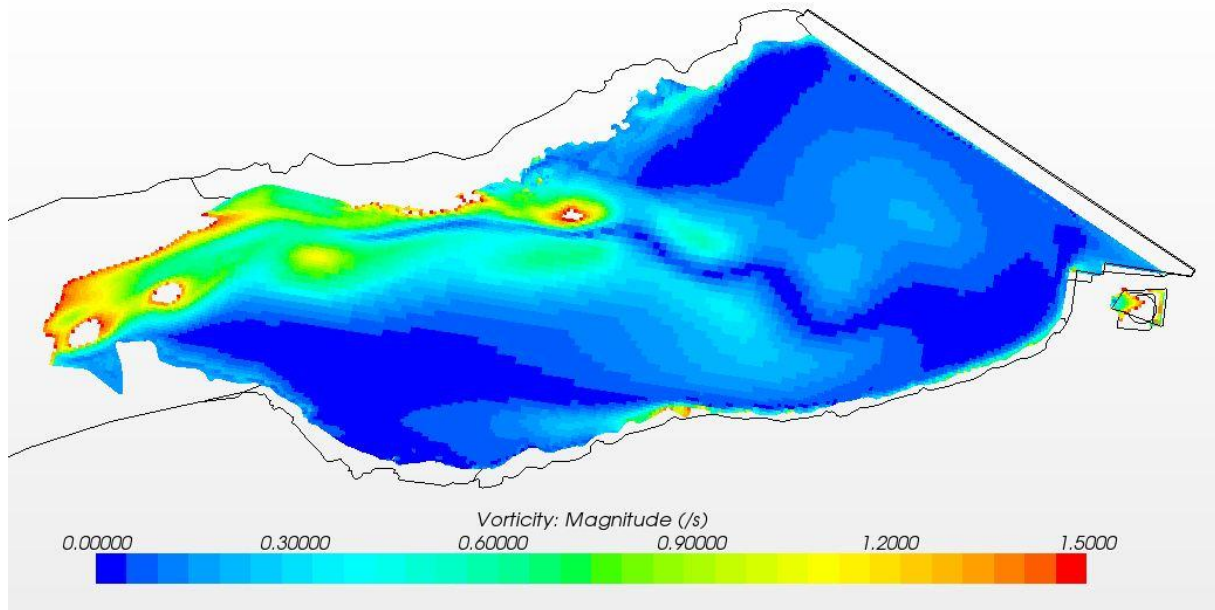
Figur 37 Fargeplott av TKE for $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$



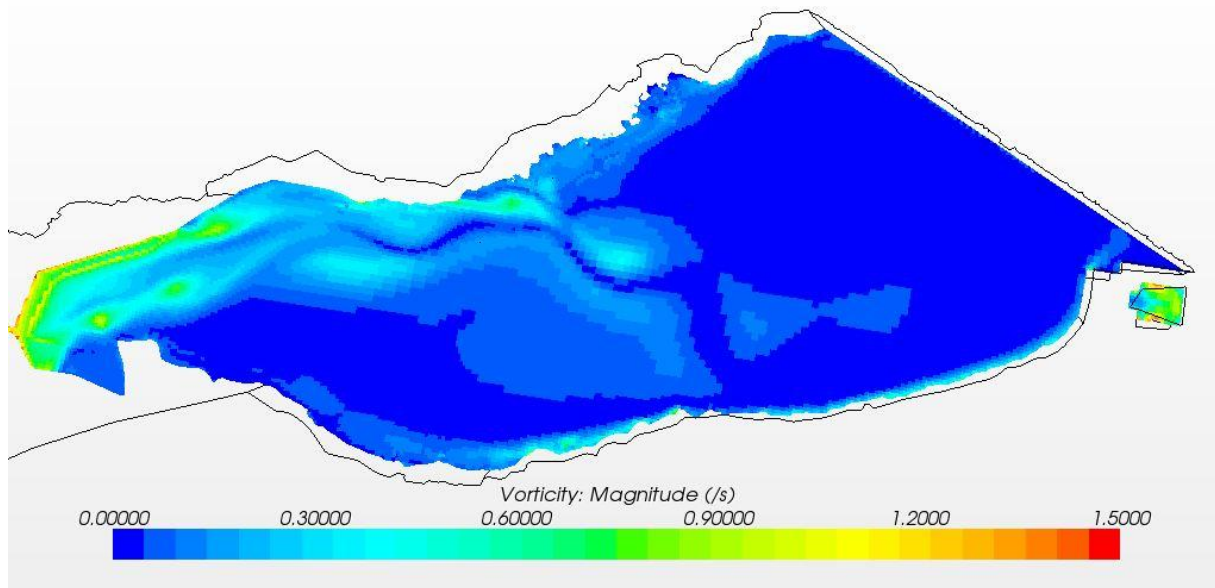
Figur 38 Fargeplott av TKE for $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$

4.4.4 Virvlingstall

Virvlingstallet er større for $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$ enn for $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$ og virvlingstallene er større inn mot inntaket.



Figur 39 Fargeplott av virvlingstall for $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$



Figur 40 Fargeplott av virvlingstall for $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$

5 Diskusjon

Det blir her først diskutert om strømningsforholdene i inntaksmagasinet til Juvfossen kraftverk kan simuleres i en CFD modell, og hvor sensitiv denne er for forskjellige parameter. Senere blir det diskutert om driftsproblemene kan predikeres.

5.1 Faseinndeling

Modellkjøring 1, 2, 3 og 13 er alle kjørt med både vann og luft, og det er brukt VOF for å beregne vannoverflaten. Tabell 4 viser at modellkjøring 1, 2, 3 og 13 alle har NRMKA verdier på under 3. Hvis strømlinjene i felt fra Figur 13 sammenliknes med Figur 15, kan det sees at modellkjøringene som er utført med VOF ikke klarer å gjenskape strømningsforholdene. At strømmingene ikke blir gjenskapt i modellen slik som i som i felt, kan også sees i fargeplottene i Figur 16 til Figur 21. Fargeplottene fra felt viser en konsentrasjon av strømmingen i deler av tverrsnittene, mens det for modellkjøringene med VOF er en jevn fordeling. Det ble forsøkt å gjøre endringer i grensebetingelsene, uten at endringene hadde innvirkning på resultatet.

Tabell 5 og Tabell 6 viser at avviket fra målingene i felt er ekstremt store for modellkjøringene med VOF. Videre har modellkjøringene som kun er kjørt med vann enkelte målingspunkt som ikke har store avvik fra feltmålingene. Enkelte andre av målepunktene har en %-vis feil på nærmer 100 %. Feilen kan være på grunn av at programmet regner feil, eller at plasseringen av målepunktet i modellen ikke er likt som det ble tatt i felt. Feilplassering er en stor sannsynlighet, når punktene er plassert i modellen fra cirka meters presisjon og bilder under vann. Det ble allikevel ikke så store utslag ved å flytte på punktet litt i modellen, som modellkjøringene med eller uten VOF.

Det er vanskelig å komme med noe god forklaringer på hvorfor modellkjøringene med VOF modellerer inntaksmagasinet med uniform strømming uten å gjenskape hastighetskonsentrasjonen fra feltmålingen. STAR-CCM+ er et komplisert program å lære seg, og bruke. Det er ikke umulig at det kan være brukerfeil med i bildet. Det ble allikevel gjennomført flere modellforsøk med kun vann som ga konsentrasjon av hastigheten. Problemet kan derfor ligge i algoritmene programmet bruker for og regner med VOF.

Vannlinjeberegningene utført ved VOF virker å være riktige. Det er ikke utført målinger i felt som kan verifisere vannhøyden, men en beregning med overløpsformelen gir tilnærmet lik vannhøyde over terskelen. Hvis vannlinjen feil estimeres med 0,01 m, blir arealet av tverrsnitt 2 kun 0,2 m² større. Arealandringen utgjør igjen en forskjell på 0,0008 m/s i snittvannføring i tverrsnittet ved en vannføring 7,9 m³/s. Det anses derfor ikke som kritisk for å få riktige hastigheter.

5.2 Sammenlikningsgrunnlag

Da det ble jobbet med analysen på oversikten fra sensitivitetsanalysen i Figur 23, ble det gjort noen interessante funn. For Tverrsnitt 1 og 3 følger de forskjellige modellkjøringene hverandre, med lik plassering av hastighetstoppene og fordelingen av hastigheten forøvrig. I tverrsnitt 2 for $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$ er det en større spredning av resultatene. Både med hensyn til plassering av topper og hastighetsfordelingen. Allikevel følger enkelte av modellkjøringene hverandre med topper på like steder. Det ble utført en rask analyse av modellkjøringene, ved å kjøre en modellkjøring for $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$ og $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$ hvor det ble tatt ut bilde hvert sekund i modelltid. Ut fra bildene ble det observert at den maksimale hastigheten for de forskjellige tverrsnittene endret seg, både i styrke og plassering. Endringene foregikk i sykluser på mellom 8 – 12 sekunder i modellert tid. Det ble også tatt stikkprøver på enkelte av de andre modellkjøringene for å verifisere at svingningene var tilstede også her, noe de var.

Feltmålingene som ble utført med ADCP tok lang tid. Resultatene fra hvert trekk over elven, ble også snittet med de andre målingene som ble tatt for den samme vannføringen i de enkelte tverrsnittene. En sammenlikning av momentanverdier fra en CFD-modell og snittede verdier fra felt, vil ikke gi et riktig bilde av om modellen klarer nøyaktig å gjenskape strømningsforholdene i felt. Det har ikke vært tid til å samle data fra svingningene i CFD-modellen for å ta gjennomsnittshastighetene, for en bedre sammenlikning med ADCP målingene. Med $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$ i tverrsnitt 2 i Figur 23 vises både modellkjøringene med den maksimale hastighetstoppen, den minimale hastighetstoppen og overgangen mellom dem. Antagelig vil ikke et gjennomsnitt over tiden ligge så langt bort fra modellkjøringene 15 og 16.

5.3 Geometriens påvirkning

Hastighetsfordelingene i fargeplottene i Figur 16 til Figur 21 viser at det er en for stor hastighet i de to øverste tverrsnittene for alle modellkjøringene med kun vann. I tverrsnitt 3 ser det mer ut til at modellen klarer å få et hastighetsfelt som likner det som ble målt i felt. Videre viser Figur 23 at det kun er modellkjøring 9 med $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$ som treffer hastighetstoppen. De andre modellkjøringene har en høyere hastighet. Tendens er derimot at jo lengre inn i inntaksmagasinet, jo mer roer hastighetstoppen seg. I tverrsnitt 1 er hastigheten over 2 ganger så høy for de modellerte som for den som er målt i felt for $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$. For $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$ er hastigheten for enkelte av modellkjøringene 3 ganger så høys om feltmålingene.

Kartleggingen av geometrien til inntaksmagasinet ble utført med laserskanninga i oktober, med lite vannføring og uten snø i terrenget. Det ble på et senere tidspunkt funnet ut at det ville være av interesse å kunne modellere en del av elva oppstrøms inntaksmagasinet.

Punktmålingen i elva ble derfor utført i januar. Som Figur 41 viser, var det snø og is på elva når det ble utført GPS oppmålingen av geometrien. Isen førte til at tettheten og plasseringen av punktmålingene ikke ble optimal for å beskrive geometrien nøyaktig. Som Figur 31 og Figur 32 viser, har endringen av geometrien påvirkning på hastigheten inn i inntaksmagasinet.



Figur 41 Moldskreddøla med snø og is under oppmåling. Foto: Perry Aase

På grunn av at STAR-CCM+ ikke kan regne med større ruhet enn halve cellehøyden, må den delen av geometrien som har større ruhet en halve cellehøyden dokumenteres nøye. I Figur 24 observeres det at ruheten har svært lite betydning for $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$ mens det har en påvirkning for $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Dette skyldes trolig at det med $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$ er så mye energi i vannet at ruheten har liten påvirkning på resultatet. De fleste driftsproblemer oppstår når det er større hastighet på vannet. Det ser derfor ut til at det kan holde med et kvalifisert anslag på ruhet for å få modellert vannstrømmen riktig.

For modellkjøringene med forskjellige fordeling av hastigheten i innløpet til modellen, viser Figur 27 at det er kun er forskjell i tverrsnitt 1 med $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Modellkjøringen med høyere hastighet i den ene halvparten av tverrsnittet, gir høyere hastighet i tverrsnitt 1, men har en tilnærmet lik hastighetsfordeling med modellkjøringen som har vanninnstrømning i hele elvens innløp i modellen. Det ser derfor ikke ut til å ha noen betydning hvordan vannet sendes inn for den lave vannføringen. For $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$ har det en påvirkning ved at det er en høyere topp for modellkjøringen med bare vannhastighet gjennom halve elvetverrsnittet for tverrsnittene.

Det har kun blitt sett på to forskjellige cellestørrelser. Selv om modellkjøringen med $0,20 \text{ m}$ celler klarer å beskrive geometrien bedre, som vist i Figur 11, er det ikke store utslag mellom de to modellkjøringsresultatene. De små utslagene av cellestørrelse, ruhet og hvordan vannet kommer inn i modellen, kan tyde på at det er den grove utformingen av geometrien som har mest å si på resultatet. Ved å gjøre GPS punktmåling nøyaktig på strategiske steder, kan trolig punktmålinger være en god tilnærming.

5.4 Prediksjon av driftsproblemer

En erfaren vassdragsingeniør kan ved hjelp av enkle formler og befaring av områder som egner seg til plassering av et kraftverksinntak, danna seg et bilde av hvordan strømmingen vil oppstå. Som fargeplottene for hastigheten i Figur 33 og Figur 34, kan en CFD-modellering gi en bedre oversikt over hvordan vannhastighetene er inn i inntaksmagasinet enn ved en

beregning av gjennomsnittshastighet. CFD-modellen kan gi en indikasjon på i hvilke retning hastighetskonsentrasjonene er. På Figur 33 ser vi at hastighetskonsentrasjonen er rettet rett mot inntakskonstruksjonen.

Figur 35 og Figur 36 viser en oversikt over hvor i inntaksmagasinet skjærspenningen er størst. Her vil det kunne oppstå lokal erosjon og sedimentering der skjærspenningene er mindre. Ved vanlig håndregning vil det kunne forutses om det blir erosjon på en større skal på bakgrunn av bunnhelning og dybde.

Figur 42 viser at det ligger dunger med løv og kvist i deler av magasinet. Av Figur 14 fremkommer det også at det er en bakevje i den øvre høyre del av inntaksmagasinet. I øvre høyre del av inntaksmagasinet ligger det en stor dunge. I Figur 42 er det også mulig å se at det er et skille mellom finere og grovere masser på bunnen. Skille går like ved flytebrettet. På venstresiden av inntaksmagasinet er det grovere materialer. Fordelingen av størrelsen på massene passer godt med hvor stor skjærspenningen er fra Figur 34.



Figur 42 Oversiktsbilde over oppsamling av løv og kvist, samt områder med grove- og finere bunnpartikler

Fargeplott over TKE verdiene i inntaksmagasinet, kan si noe om hvor urolig strømmingene er i inntaksmagasinet. Det må kunne anta at drivgods holder seg suspendert lengre i et inntaksmagasin som har en høy TKE enn et med lav TKE verdi. Figur 37 viser at er det mye større TKE for $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$ enn det er i Figur 38 for $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figur 39 og Figur 40 viser hvor store virvlingstall det på de forskjellige stedene i inntaksmagasinet. Store virvlingstall sier noe om hvor mye et element av væska spinner. Det vil trolig være større sannsynlighet for å få indusert virvler og luftmedrivning i magasin der virvlingstallene er høye.

6 Konklusjon

CFD-modellen av inntaksmagasinet til Juvfossen kraftverk klarer å gjenskape strømningsbilde i grove trekk. Modellen er svært følsom for om den blir kjørt med luft og vann, eller kun med vann. Det er kun modellkjøringer som er utført med kun vann som har klart å gjengi strømningsforholdene. Geometrien oppstrøms inntaksmagasinet har påvirkning på strømningsbildet. CFD-modellen er ellers relativt robust, og det er kun små utslag på hvilke cellestørrelse, ruhet og hvordan vannet slippes inn i modellen. Modellen er mer robust for modellkjøringen utført med $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$ enn for $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Modellen gir verdifull informasjon om strømningsforholdene inn i inntaksmagasinet. Ved vurdering av muligheten til driftsproblemer, er det tydelig forskjell på strømningsbildet, TKE, skjærspenning mot bunnen og virvlingstall for en vannføring på $7,9 \text{ m}^3/\text{s}$ og $2,2 \text{ m}^3/\text{s}$. Det må innhentes flere verdier fra andre inntaksmagasin for å kunne gi noen grenser på hva som er kritiske tall for de forskjellige nøkkelverdiene.

Forslag til videre forskning

Det bør bli utført en bedre kartlegging av geometrien oppstrøms inntaksmagasinet til Juvfossen kraftverk, for å se om en bedre geometri av elva kan føre til en bedre gjenskapning av hastighetsfordelingen i inntaksmagasinet. Gjennomsnittshastighetene fra CFD-modellen bør beregnes, for å kunne gjøre en grundigere vurdering mellom modellerte og feltmålinger. Eventuelt må det brukes måter å måle momentanhastighetsfordelingen i felt. Det bør undersøkes flere inntaksmagasin. Både de som har, og de som ikke har problematiske strømningsforhold, med CFD-modeller for å se om det er en sammenheng mellom parametere som virvlingstall, TKE og skjærspenning langs bunnen.

7 Kilder

- CHANSON, H. 2004. *The hydraulics of open channel flow: an introduction*, Oxford, Elsevier Ltd.
- CHOW, V. T. 1959. *Open-channel hydraulics*, Caldwell, New Jersey, The Blackburn Press.
- CLANCY, L. J. 1975. *Aerodynamics*, London, Pitman Publishing Limited.
- COURANT, R., FRIEDRICHS, K. & LEWY, H. 1956. On the partial difference equations of mathematical physics. *AEC Research and Development Report*. New York.
- LIA, L. & JENSSEN, L. 2003. *Grunne inntak*, Oslo, Norges vassdrags- og energidirektorat.
- OLSEN, N. R. B. 2011. Numerical Modelling and Hydraulics.
- STAR-CCM+ 2012. *User Guide STAR-CCM+ 6.06.011*.

Vedlegg A: Matlabskript

```
%Program er laget av Åsmund Hasaas som en del av masteroppgaven
%"Verifisering av inntakshydraulikk i grunt inntaksmagasin for småkraftverk
%med bruk av CFD-verktøy" Programmet henter ut data dra STAR-CCM+
%og benhadler disse for å kunne sammenlikne hastighetsverdier med
feltverdier

antallFiler= input('Hvor mange tabeller har blitt laget totalt i hvert
tverrsnitt? ');
antallIterasjoner=input('Hvor mange iterasjoner har det blitt gjort totalt?
');
deltaIterasjon= 2500;

%henter inn verdier fra tabeller for de forskjellige tverrsnitt
for k = 1:1:antallFiler
    CS1filename = sprintf('CS1KjoringNI%d.csv', k);
    CS1fil= csvread(CS1filename,1,1);
    antallPunktCS1=length(CS1fil);
    for j=1:1:9
        for i=1:1:antallPunktCS1
            CS1matrise(k,i,j)=CS1fil(i,j);
        end
    end

    CS2filename = sprintf('CS2KjoringNI%d.csv', k);
    CS2fil= csvread(CS2filename,1,1);
    antallPunktCS2=length(CS2fil);
    for j=1:1:9
        for i=1:1:antallPunktCS2
            CS2matrise(k,i,j)=CS2fil(i,j);
        end
    end

    CS3filename = sprintf('CS3KjoringNI%d.csv', k);
    CS3fil= csvread(CS3filename,1,1);
    antallPunktCS3=length(CS3fil);
    for j=1:1:9
        for i=1:1:antallPunktCS3
            CS3matrise(k,i,j)=CS3fil(i,j);
        end
    end

end
%avstand fra tverrsnittsorigo fra STAR-CCM
for k=1:1:antallFiler
    for i=1:1:antallPunktCS1      %X1      X2      Y1      Y2
        CS1matrise(k,i,j+1)=sqrt((28.2-CS1matrise(k,i,7))^2+(71.8-
CS1matrise(k,i,8))^2);
    end
    for i=1:1:antallPunktCS2      %X1      X2      Y1      Y2
        CS2matrise(k,i,j+1)=sqrt((31.2-CS2matrise(k,i,7))^2+(45.2-
CS2matrise(k,i,8))^2);
    end
    for i=1:1:antallPunktCS3      %X1      X2      Y1      Y2
        CS3matrise(k,i,j+1)=sqrt((36.5-CS3matrise(k,i,7))^2+(29.4-
CS3matrise(k,i,8))^2);
    end
end
```

```

CS1=zeros(antallFiler,57,9,10); %matrise med (antall tabeller, antall
noder i x-retning, antall noder i Y-retning, antall koolonner i tabell fra
STARCCM)
CS2=zeros(antallFiler,88,19,10); %matrise med (antall tabeller, antall
noder i x-retning, antall noder i Y-retning, antall koolonner i tabell fra
STARCCM)
CS3=zeros(antallFiler,103,19,10); %matrise med (antall tabeller, antall
noder i x-retning, antall noder i Y-retning, antall koolonner i tabell fra
STARCCM)

CS1dybde=unique(CS1matrise(1, :, 9));
CS1nrN=length(CS1dybde);

CS2dybde=unique(CS2matrise(1, :, 9));
CS2nrN=length(CS2dybde);

CS3dybde=unique(CS3matrise(1, :, 9));
CS3nrN=length(CS3dybde);

for k=1:antallFiler
    for n=1:1:CS1nrN
        for i=1:1:57
            CS1(k,i,n,1)=CS1dybde(1,n);
        end
    end
end

%Fyller resten av matrise CS1
for k=1:1:antallFiler
    for n=1:1:CS1nrN;
        jj=1;
        for i=1:1:antallPunktCS1
            if CS1matrise(k,i,9)==CS1(k,1,n,1)

                CS1(k,jj,n,2)=CS1matrise(k,i,10); %setter inn
distanse fra origo i kolonne 2
                CS1(k,jj,n,3)=CS1matrise(k,i,1); %setter inn i-
hastighet i kolonne 3
                CS1(k,jj,n,4)=CS1matrise(k,i,2); %setter inn j-
hastighet i kolonne 4
                CS1(k,jj,n,5)=CS1matrise(k,i,3); %setter inn k-
hastighet i kolonne 5
                CS1(k,jj,n,6)=CS1matrise(k,i,4); %setter inn
hastighetslengden i kolonne 6
                CS1(k,jj,n,7)=CS1matrise(k,i,5); %setter inn
vorticity i kolonne 7
                CS1(k,jj,n,8)=CS1matrise(k,i,6); %setter inn TKE i
kolonne 8
                CS1(k,jj,n,9)=CS1matrise(k,i,7); %setter inn X i
kolonne 9
                CS1(k,jj,n,10)=CS1matrise(k,i,8); %setter inn Y i
kolonne 10
            end
        end
    end
end

```



```

                                jj=jj+1;
                                end
                                end
                                end
                                end

%Setter dybden i cellene for CS2
for k=1:1:antallFiler
    for n=1:1:CS2nrN
        for i=1:1:88
            CS2(k,i,n,1)=CS2dybde(1,n);
        end
    end
end

%Fyller resten av matrise CS2
for k=1:1:antallFiler
    for n=1:1:CS2nrN;
        jj=1;
        for i=1:1:antallPunktCS2
            if CS2matrise(k,i,9)==CS2(k,1,n,1)

                                CS2(k,jj,n,2)=CS2matrise(k,i,10);%setter inn
distanse fra origo i kolonne 2
                                CS2(k,jj,n,3)=CS2matrise(k,i,1); %setter inn i-
hastighet i kolonne 3
                                CS2(k,jj,n,4)=CS2matrise(k,i,2); %setter inn j-
hastighet i kolonne 4
                                CS2(k,jj,n,5)=CS2matrise(k,i,3); %setter inn k-
hastighet i kolonne 5
                                CS2(k,jj,n,6)=CS2matrise(k,i,4); %setter inn
hastighetslengden i kolonne 6
                                CS2(k,jj,n,7)=CS2matrise(k,i,5); %setter inn
vorticity i kolonne 7
                                CS2(k,jj,n,8)=CS2matrise(k,i,6); %setter inn TKE i
kolonne 8
                                CS2(k,jj,n,9)=CS2matrise(k,i,7); %setter inn X i
kolonne 9
                                CS2(k,jj,n,10)=CS2matrise(k,i,8); %setter inn Y i
kolonne 10

                                jj=jj+1;
                                end
                                end
                                end
                                end

%setter dybden for CS3
for k=1:1:antallFiler
    for n=1:1:CS3nrN
        for i=1:1:103
            CS3(k,i,n,1)=CS3dybde(1,n);
        end
    end
end

%Setter inn resten av matrise CS3
for k=1:1:antallFiler

```

```

for n=1:1:CS3nrN;
    jj=1;
    for i=1:1:antallPunktCS3
        if CS3matrise(k,i,9)==CS3(k,1,n,1)

                CS3(k,jj,n,2)=CS3matrise(k,i,10);%setter inn
distanse fra origo i kolonne 2
                CS3(k,jj,n,3)=CS3matrise(k,i,1); %setter inn i-
hastighet i kolonne 3
                CS3(k,jj,n,4)=CS3matrise(k,i,2); %setter inn j-
hastighet i kolonne 4
                CS3(k,jj,n,5)=CS3matrise(k,i,3); %setter inn k-
hastighet i kolonne 5
                CS3(k,jj,n,6)=CS3matrise(k,i,4); %setter inn
hastighetslengden i kolonne 6
                CS3(k,jj,n,7)=CS3matrise(k,i,5); %setter inn
vorticity i kolonne 7
                CS3(k,jj,n,8)=CS3matrise(k,i,6); %setter inn TKE i
kolonne 8
                CS3(k,jj,n,9)=CS3matrise(k,i,7); %setter inn X i
kolonne 9
                CS3(k,jj,n,10)=CS3matrise(k,i,8); %setter inn Y i
kolonne 10

                jj=jj+1;
        end
    end
end

j=0;

%regner ut residualene
for k=2:1:antallFiler
    for i=1:1:antallPunktCS1
        j=j+abs(CS1matrise(k,i,5)-CS1matrise(k-1,i,5));
    end

    j=(j/antallPunktCS1);

    for i=1:1:antallPunktCS2
        j=j+abs(CS2matrise(k,i,5)-CS2matrise(k-1,i,5));
    end

    j=(j/antallPunktCS2);

    for i=1:1:antallPunktCS3
        j=j+abs(CS3matrise(k,i,5)-CS3matrise(k-1,i,5));
    end

    j=(j/antallPunktCS3);

    residual(k)=j;
end

```

```

plotResidual=zeros (antallFiler,2);

for k=1:1:antallFiler

    plotResidual(k,2)=residual(k);
    plotResidual(k,1)=(k-1)*deltaIterasjon;

end

plot(plotResidual(:,1),plotResidual(:,2))
ylabel('Residual ');
xlabel('Iterasjon ');
title('Residual [-]');

%Hastighetsmatrise

fortsett=1;

Iterasjoner= input('Etter hvor mange iterasjoner vil du se på? ');
kjoring=input ('Hvilke kjøring er dette? ');
TittelNavn= input('Diagramtittel i tillegg til "Tverrsnitt #"? ','s');

ItFraTabell=Iterasjoner/deltaIterasjon + 1;

    for A=1:1:CS1nrN
        for B=1:1:56
            CS1Xoo(A,B)= CS1(ItFraTabell,B,A,2);
            CS1Zoo(A,B)= CS1(ItFraTabell,1,A,1);
            CS1Uoo(A,B)= CS1(ItFraTabell,B,A,4);
        end
    end

    A=1;
    CS1Xo=zeros (CS1nrN,56);
    CS1Zo=zeros (CS1nrN,56);
    CS1Uo=zeros (CS1nrN,56);
    for i=CS1nrN:-1:1
        if CS1Xoo(i,1)==0

            else
                for B=1:1:56
                    CS1Xo(A,B)=CS1Xoo(i,B);
                    CS1Zo(A,B)=CS1Zoo(i,B);
                    CS1Uo(A,B)=CS1Uoo(i,B);
                end
                A=A+1;
            end
        end

    CS1Xrett=sort (CS1Xo(1,:), 'descend');

    for i=CS1nrN:-1:1
        flytt=1;
        B=56;

```

```

while flytt~=0
    flytt=0;
    if CS1Xo(i,1)==0

        elseif B==0

            else
                for BB=56:-1:1

                    if CS1Xo(i,BB)~=CS1Xrett(1,B)
                        flytt=flytt+1;
                        else
                            CS1X(i,B)=CS1Xrett(1,B);
                            CS1Z(i,B)=CS1Zo(i,BB);
                            CS1U(i,B)=CS1Uo(i,BB);
                        end

                    end
                B=B-1;
            end
        end
    end

dim=size(CS1X);
A=dim(1,1);
B=dim(1,2);
for i=1:1:A
    for j=1:1:B
        CS1X(i,j)=CS1Xrett(1,j);
        CS1Z(i,j)=CS1Zo(i,1)-(max(CS1Zo(1,:)));
        if CS1U(i,j)==0
            CS1U(i,j)=NaN;
        end
    end
end
CS1plottStaaende=FigurStaaendeCS1(CS1X,CS1Z,CS1U,TittelNavn);

print(CS1plottStaaende, '-djpeg', ['Tverrsnitt1_kjoring'
num2str(kjoring)]);

for A=1:1:CS2nrN
    for B=1:1:88
        CS2Xoo(A,B)= CS2(ItFraTabell,B,A,2);
        CS2Zoo(A,B)= CS2(ItFraTabell,1,A,1);
        CS2Uoo(A,B)= CS2(ItFraTabell,B,A,4);
    end
end

A=1;
CS2Xo=zeros(CS2nrN,88);
CS2Zo=zeros(CS2nrN,88);
CS2Uo=zeros(CS2nrN,88);

for i=CS2nrN:-1:1
    if CS2Xoo(i,1)==0

        else

```

```

        for B=1:1:88
            CS2Xo(A,B)=CS2Xoo(i,B);
            CS2Zo(A,B)=CS2Zoo(i,B);
            CS2Uo(A,B)=CS2Uoo(i,B);
        end
        A=A+1;
    end
end

CS2Xrett=sort(CS2Xo(1,:), 'descend');

for i=CS2nrN:-1:1
    flytt=1;
    B=88;
    while flytt~=0
        flytt=0;
        if CS2Xo(i,1)==0

            elseif B==0

            else
                for BB=88:-1:1

                    if CS2Xo(i, BB)~=CS2Xrett(1,B)
                        flytt=flytt+1;
                    else
                        CS2X(i,B)=CS2Xrett(1,B);
                        CS2Z(i,B)=CS2Zo(i, BB);
                        CS2U(i,B)=CS2Uo(i, BB);
                    end

                end

                B=B-1;
            end
        end
    end
end
dim=size(CS2X);
A=dim(1,1);
B=dim(1,2);
for i=1:1:A
    for j=1:1:B
        CS2X(i,j)=CS2X(1,j);
        CS2Z(i,j)=CS2Zo(i,1)-(max(CS2Zo(1,:)));
        if CS2U(i,j)==0
            CS2U(i,j)=NaN;
        end
    end
end
end

CS2plottStaaende=FigurStaaendeCS2(CS2X,CS2Z,CS2U,TittelNavn);
print(CS2plottStaaende, '-djpeg', ['Tverrsnitt2_kjoring'
num2str(kjoring)]);

for A=1:1:CS3nrN
    for B=1:1:102
        CS3Xoo(A,B)= CS3(ItFraTabell,B,A,2);
        CS3Zoo(A,B)= CS3(ItFraTabell,1,A,1);
        CS3Uoo(A,B)= CS3(ItFraTabell,B,A,4);
    end
end

```

```

end

A=1;
CS3Xo=zeros (CS3nrN,103);
CS3Zo=zeros (CS3nrN,103);
CS3Uo=zeros (CS3nrN,103);
for i=CS3nrN:-1:1
    if CS3Xoo(i,1)==0

    else
        for B=1:1:102
            CS3Xo(A,B)=CS3Xoo(i,B);
            CS3Zo(A,B)=CS3Zoo(i,B);
            CS3Uo(A,B)=CS3Uoo(i,B);
        end
        A=A+1;
    end
end

CS3Xrett=sort (CS3Xo(1,:), 'descend');

for i=CS3nrN:-1:1
    flytt=1;
    B=102;
    while flytt~=0
        flytt=0;
        if CS3Xo(i,1)==0

        elseif B==0

        else
            for BB=102:-1:1

                if CS3Xo(i,BB)~=CS3Xrett(1,B)
                    flytt=flytt+1;
                else
                    CS3X(i,B)=CS3Xrett(1,B);
                    CS3Z(i,B)=CS3Zo(i,BB);
                    CS3U(i,B)=CS3Uo(i,BB);
                end

            end

            B=B-1;
        end
    end
end

dim=size (CS3X);
A=dim(1,1);
B=dim(1,2);
for i=1:1:A
    for j=1:1:B
        CS3X(i,j)=CS3X(1,j);
        CS3Z(i,j)=CS3Zo(i,1)-(max (CS3Zo(1,:)));
        if CS3U(i,j)==0
            CS3U(i,j)=NaN;
        end
    end
end
end

```

```
CS3plottStaaende=FigurStaaendeCS3(CS3X,CS3Z,CS3U,TittelNavn);  
print(CS3plottStaaende, '-djpeg', ['Tverrsnit3_kjoring'  
num2str(kjoring)]);
```

Vedlegg B: TKE tabell for 2,2 m³/s og 7,9 m³/s

ADV 7,9 m ³ /s	ADV i felt [cm ² /s ²]	Modellkjøring 1 [cm ² /s ²]		Modellkjøring 2 [cm ² /s ²]		Modellkjøring 3 [cm ² /s ²]		Modellkjøring 4 [cm ² /s ²]		Modellkjøring 5 [cm ² /s ²]		Modellkjøring 6 [cm ² /s ²]	
Tverrsnitt 1	228	13000	-5695 %	11000	-4900 %	78000	-34300 %	13	94 %	13	94 %	24	90 %
Tverrsnitt 2	208	28000	-12509 %	29000	-12700 %	73000	-31900 %	204	10 %	226	1 %	173	24 %
Tverrsnitt 3	221	27000	-12153 %	27000	-11900 %	61000	-26900 %	491	-116 %	499	-120 %	927	-307 %
Inntak 1	264	30000	-13341 %	38000	-17000 %	62000	-27500 %	283	-24 %	252	-11 %	498	-119 %
Inntak 2	209	41000	-18215 %	46000	-20200 %	96000	-42400 %	211	7 %	202	11 %	368	-62 %
Inntak 4	305	42000	-18696 %	53000	-23300 %	328000	-144400 %	60	74 %	69	70 %	88	61 %
Inntak 5	223	40000	-17801 %	44000	-19500 %	302000	-132800 %	99	57 %	109	52 %	94	59 %
Inntak 6	397	6000	-2764 %	25000	-11200 %	42000	-18600 %	278	-22 %	222	2 %	533	-134 %

ADV 7,9 m ³ /s	ADV i felt [cm ² /s ²]	Modellkjøring 7 [cm ² /s ²]		Modellkjøring 8 [cm ² /s ²]		Modellkjøring 9 [cm ² /s ²]		Modellkjøring 10 [cm ² /s ²]		Modellkjøring 11 [cm ² /s ²]		Modellkjøring 12 [cm ² /s ²]	
Tverrsnitt 1	228	37	84 %	21	91 %	14	94 %	15	93 %	16	93 %	11	95 %
Tverrsnitt 2	208	302	-33 %	408	-79 %	208	9 %	233	-2 %	482	-112 %	209	8 %
Tverrsnitt 3	221	446	-96 %	355	-56 %	729	-220 %	749	-229 %	421	-85 %	430	-89 %
Inntak 1	264	247	-8 %	209	8 %	263	-15 %	292	-28 %	300	-32 %	193	15 %
Inntak 2	209	170	25 %	152	33 %	219	4 %	206	9 %	212	7 %	178	22 %
Inntak 4	305	91	60 %	52	77 %	77	66 %	55	76 %	60	74 %	106	53 %
Inntak 5	223	116	49 %	93	59 %	124	46 %	91	60 %	94	59 %	109	52 %
Inntak 6	397	245	-8 %	249	-9 %	206	9 %	358	-57 %	312	-37 %	163	28 %

ADV 2,2 m3/s		Modellkjøring 13 [cm ² /s ²]		Modellkjøring 14 [cm ² /s ²]		Modellkjøring 15 [cm ² /s ²]		Modellkjøring 16 [cm ² /s ²]		Modellkjøring 17 [cm ² /s ²]		Modellkjøring 18 [cm ² /s ²]	
Tverrsnitt 5	34	13000	-40700 %	3	92 %	3	90 %	3	92 %	1	97 %	3	91 %
Tverrsnitt 6	30	24000	-70600 %	4	88 %	5	84 %	4	88 %	3	90 %	3	91 %
Tverrsnitt 7	17	33000	-97400 %	22	35 %	30	13 %	23	34 %	17	50 %	10	72 %
Tverrsnitt 8	44	25000	-75800 %	42	-24 %	28	18 %	43	-25 %	39	-16 %	37	-8 %
Inntak 7	13	27000	-79500 %	31	10 %	28	17 %	32	7 %	29	14 %	17	50 %
Inntak 8	87	31000	-92300 %	51	-48 %	46	-35 %	50	-45 %	44	-30 %	14	58 %
Inntak 9	8	29000	-85800 %	16	52 %	17	51 %	17	50 %	17	49 %	13	60 %
Inntak 10	7	50000	-147200 %	15	56 %	16	52 %	16	53 %	17	51 %	12	66 %
Inntak 11	11	37000	-109500 %	7	78 %	7	79 %	7	79 %	10	70 %	4	87 %
Inntak 12	10	39000	-114600 %	4	88 %	5	85 %	5	87 %	7	79 %	3	91 %

ADV 2,2 m3/s	ADV i felt [cm ² /s ²]	Modellkjøring 19 [cm ² /s ²]		Modellkjøring 20 [cm ² /s ²]		Modellkjøring 21 [cm ² /s ²]		Modellkjøring 22 [cm ² /s ²]	
Tverrsnitt 5	34	3	92 %	2	95 %	3	92 %	2	94 %
Tverrsnitt 6	30	4	87 %	3	91 %	5	86 %	2	93 %
Tverrsnitt 7	17	31	8 %	11	68 %	33	3 %	11	68 %
Tverrsnitt 8	44	60	-76 %	20	42 %	24	31 %	39	-13 %
Inntak 7	13	31	8 %	40	-18 %	40	-18 %	22	36 %
Inntak 8	87	51	-51 %	57	-68 %	58	-72 %	41	-20 %
Inntak 9	8	16	53 %	21	40 %	21	39 %	12	65 %
Inntak 10	7	15	57 %	16	52 %	15	55 %	15	55 %
Inntak 11	11	7	79 %	7	80 %	7	80 %	8	77 %
Inntak 12	10	3	90 %	4	88 %	4	89 %	6	83 %

