

Nils Reidar Bøe Olsen

Numerisk modellering av kapasitet på flomløp - et litteraturstudium

ISBN 978-82-7598-094-4

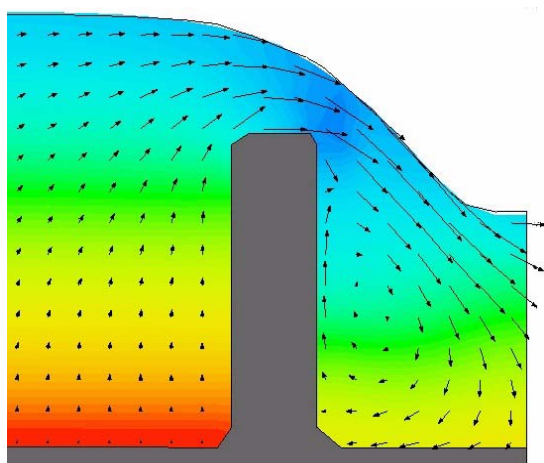
Trondheim, Desember 2015

NTNU

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi

Institutt for vann -og miljøteknikk



Numerisk modellering av kapasitet på flomløp
- et litteraturstudium

Oppdragsgiver:

Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE)

Vestre Rosten 81

7075 Tiller

Kontakt: Grethe Holm Midttømme

Utførende:

Institutt for vann- og miljøteknikk, NTNU

7491 Trondheim

Prosjektleder: Nils Reidar Bøe Olsen

Rapport: B1-2015-4

Sammendrag

Det er gjort et litteraturstudium på numerisk modellering av flomløp, med hensyn på hvilken nøyaktighet som kan oppnås og hvilke krav som kan stilles til slike beregninger. Først er ca 30 artikler om beregning av flomløpskapasitet gjennomgått, der en har sett på hvilke nøyaktigheter som er oppnådd. Mange av studiene har resultater som avviker under 5 % fra målinger. Men dette er vanligvis relativt enkle geometrier. Mer komplekse geometrier har ofte større avvik. Dette skyldes sannsynligvis at behovet for gridoppløsning er mye større for en kompleks geometri enn for en enkel geometri. To beregninger på lukkede flomløp gav 0-20 % avvik på vannføringskapasiteten, sammenlignet med fysiske modellforsøk. Med begrenset kapasitet på regneressursene vil en kompleks geometri ofte ha for få gridceller til at resultatene blir gode. Hvis det oppstår luftinnblanding vil dette også kunne redusere nøyaktigheten på resultatene.

Numerisk strømningsmekanikk forkortes ofte CFD (Computational Fluid Dynamics). En kort beskrivelse av de mest brukte CFD programmene for flomløpsberegninger er gitt. Det mest brukte programmet i verden er FLOW-3D, som er benyttet i ca. halvparten av alle studiene. Det nest mest internasjonalt populære er FLUENT. I Norge er programmene FLOW-3D, STAR-CCM+, CFX og OpenFOAM brukt. OpenFOAM skiller seg ut ved å være gratis med åpen kildekode, mens de andre programmene er relativt dyre. Det antas at bruken av OpenFOAM vil øke over tid.

Det finnes en del internasjonal litteratur om anbefalinger for hvordan CFD beregninger skal gjennomføres. Disse kalles "best practice guidelines". De fokuserer ofte på ett bestemt tema, for eksempel marine applikasjoner eller vindstrømninger. Noe av denne litteraturen er gjennomgått for hvilke deler som kan være nyttige for flomløpsberegninger. Her er det gitt råd om feilkilder i CFD beregninger, gridoppløsning, parameter tester, opplæring av personell etc.

Mange av de tekniske utfordringene med å få nøyaktige resultater fra en CFD beregning er luftinnblanding, komplekse geometrier og stor ruhet i forhold til størrelsen på gridcellene. Problemet med komplekse geometrier vil sannsynligvis løse seg av seg selv siden regnekraften på datamaskinene raskt øker over tid. De to andre problemene anbefales det at man ser nærmere på i fremtidige forskningsprosjekter. Imidlertid er den sannsynligvis viktigste årsaken til feil og usikkerheter i CFD resultater manglende kompetanse hos de som utfører beregningene.

Forord

I de senere årene har jeg flere ganger blitt kontaktet av NVE med spørsmål om nøyaktigheten av CFD beregninger for kapasitet på flomløp. Norske konsulentfirmaer ønsker å gjøre slike beregninger og å få de godkjent av NVE. Spørsmålet er om de er nøyaktige nok til dampsikkerhetsvurderinger. På denne bakgrunnen har NVE gitt meg i oppdrag å lage dette litteraturstudiet om flomløpsberegninger, der nøyaktigheten av resultatene er vurdert mot målinger.

Numerisk strømningsmekanikk er et fagfelt som har hatt en stor utvikling i de siste 40 årene. Mulighetene til å løse Navier-Stokes ligninger numerisk er i økende grad kommet på grunn av utviklingen i regnehastigheten på datamaskinene. Dagens superdatamaskiner, slik som Vilje maskinen ved NTNU, kan ha 23 000 kjerner, og en regnekapasitet som er over 5 000 ganger større enn en vanlig PC. Databaserte beregningsverktøy har i økende grad blitt tatt i bruk i de fleste ingeniørgrener. For eksempel er styrkeberegninger med elementmetoden helt vanlig i disse dager, selv om det også eksisterte fysiske modeller for styrkedimensjonering av for eksempel hvelvdammer for mange år siden. Det er ingen tvil om at en gang i fremtiden så vil numeriske strømningsberegninger ha erstattet fysiske modellforsøk for praktiske konsulentoppgaver innen vassdragshydraulikk. Et mer interessant spørsmål er hva dataprogrammene kan brukes til i dag? Hvilke typer flomløpsberegninger kan nå gjøres med numeriske modeller på en god nok måte? Og hvilke krav bør en stille til numeriske beregninger, for å sikre at de har et nøyaktig nok svar? Denne litteraturstudien er ment som et bidrag til diskusjonen om disse spørsmålene.

Bruk av CFD har forskjellig tradisjon innen ulike fagfelt. Innen vassdragshydraulikk er fysiske modellforsøk tradisjonelt mye brukt, og CFD er noen ganger blitt sett på som en uønsket konkurrent. Det er endel skepsis til kvaliteten av CFD resultater innen vassdragshydraulikkmiljøene i verden. Og noe av dette er med rette. Det er lett å lage fin fargegrafikk med CFD som ser plausibel ut, uten at resultatene er veldig riktige. Andre miljøer kan ha den motsatte holdningen - en overdreven tro på nøyaktigheten av CFD resultater. En mellomting mellom disse holdningene er antageligvis fornuftig.

Spørsmålet om nøyaktigheten av CFD beregninger er tidligere kommet opp innen mange andre fagfelt enn flomløpshydraulikk. Dette har ført til en rekke internasjonale rapporter om "best practice guidelines for CFD" innen disse fagfeltene. Alle disse rapportene er laget av komiteer, satt sammen av personer fra konsulentfirmaer, forskningsfirmaer og universiteter. Rapporten som foreligger her er kun laget av forfatteren. Jeg ser noen anbefalinger som opplagt vil være nyttige, og de er gitt i Kapittel 6. Andre anbefalinger er vanskelige, for eksempel krav til kompetanse for de som skal utføre CFD beregningene og kontroll av at det de gjør er riktig.

Utviklingen innen fagfeltet numerisk strømningsmekanikk går så fort og er så omfattende at det dessverre ikke er mulig å få med all relevant informasjon i denne rapporten. For eksempel er brukemanualen til STAR-CCM+ programmet på nesten 13 000 (tretten tusen) sider. Innholdet i litteraturstudien er derfor begrenset til hva som har vært mulig å få til i løpet av tidsrammen på prosjektet.

Mange av figurene i denne rapporten er laget av Master studenter ved Institutt for vann og miljøteknikk: Samuel Vingerhagen, Jens Jacobsen, Reidar Birkeland, Dag Bjørkmo, Øystein Røneid og Åne Sæter. Figuren på forsiden er laget av Jens Jacobsen. Navnet på de som har laget figurene er ellers inkludert i figurtekstene. Takk for bidragene deres. Jeg vil også gjerne takke

andre som har bidratt med hjelp: Michael Barkhudarov fra FLOW-3D har forklart meg tofasestrømning og Frieder Semler fra FLOW-3D har laget figurer fra Sysen modellen. Robert Feurich fra FLOW-3D har laget figur 2.4.1 og hjulpet til med forklaringen av falsk diffusjon. Han har også bidratt med andre positive innspill til innholdet i rapporten. Kari Bråtveit og Grethe Holm Midttømme fra NVE har gitt detaljerte forslag til forbedringer og oppretting av feil for hele rapporten. Øivind Pedersen fra Multiconsult og Samuel Vingerhagen fra SWECO har bidratt med mange konstruktive forslag til forbedringer. NTNU student Mari Vold har vært til hjelp med å rette feil i figurer, formler og tekst. Leif Lia og Jochen Aberle fra NTNU har bidratt med positive innspill. Fra Norconsult AS, har Lars Jenssen bidratt med informasjon om Sysen anlegget, samt informasjon om nøyaktighet av fysiske modeller. Olav Jørstad, Aslak Løvoll, Anders Søreide og Einar Markhus fra Norconsult AS har også bidratt med innspill til rapporten. Takk til dere alle!

Innholdsfortegnelse

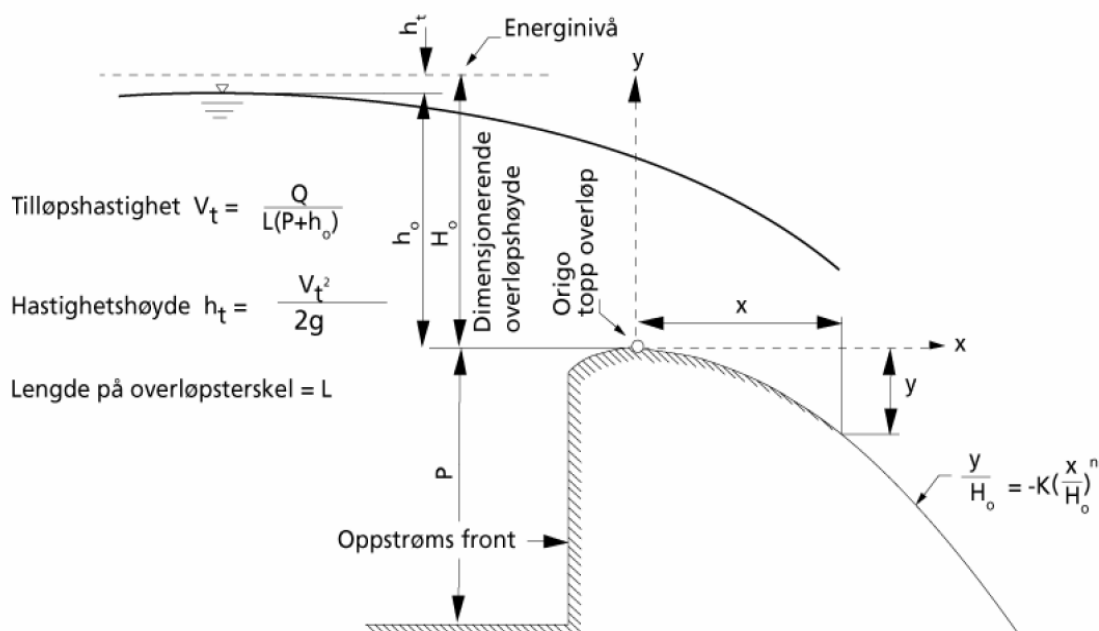
Sammendrag	2
Forord	3
Innholdsfortegnelse	5
1. Flomløpshydraulikk	7
1.1 Et standard overløp	7
1.2 Lukkede flomløp	7
1.3 Luftinnblanding	11
1.4 Hvirvler i flomløp	13
1.5 Stående bølger	14
2. Numeriske algoritmer	16
2.1 Generell beskrivelse	16
2.2 Volume Of Fluid (VOF) metode	16
2.3 Konvektive ledd	17
2.4 Falsk diffusjon	17
2.5 Turbulensmodellering	19
2.6 Drift-fluks modeller	20
2.7 Modellering av luftinnblanding	21
2.8 Modellering av ruhet	22
3. Dataprogrammer	24
3.1 FLOW-3D	24
3.2 FLUENT	25
3.3 STAR-CCM+	25
3.4 CFX	26
3.5 OpenFOAM	27
4. Eksempler på beregninger av flomløpskapasiteter med numeriske modeller .	29
4.1 Standard overløp (ogee)	29
4.2 Skarpkantede overløp og labyrintoverløp	32
4.3 Under luker	33
4.4 Bredkronede overløp og Parshall renner	35
4.5 Lukkede flomløp	37
4.5.1 Sysendammen	38
4.5.2 Dam Innerdalen	41
4.5.3 Dam Svartevatn	43

5. Retningslinjer for utførelse av CFD beregninger	48
5.1 Internasjonale "best practice" retningslinjer	48
5.2 Feil og usikkerheter i CFD beregninger	49
5.3 Parametertester	49
5.4 Konvergensfeil	50
5.5 Diskretiseringsfeil	51
5.6 Geometri og grid	52
5.7 Grensebetingelser	56
5.8 Turbulensmodell	57
5.9 Brukerfeil	58
5.10 Feil i programvaren	59
6. Oppsummering og anbefalinger	61
6.1 Oppsummering av nøyaktighet for CFD beregninger	61
6.2 Generelle anbefalinger	61
6.3 Anbefalinger for hvilke program som kan brukes til flømløpsberegninger .	62
6.4 Sammenligning med enkle formler og standard overløp	63
6.5 Anbefalinger for videre arbeide	64
6.6 Fysiske vs. numeriske modeller	65
7. Referanseliste	67
Appendiks 1. Tabell med data for undersøkt litteratur	74
Appendiks 2. Friksjonstapsberegninger for Sysen flømløpet	76
Appendiks 3. Forskningsprosjekt i USA på modellering av luftinnblanding	77

1. Flomløpshydraulikk

I dette kapittelet beskrives klassisk hydraulikk for standard overløp og for lukkede flomløp. Det er også tatt med underkapitler om ruhet og luftmedrivning, siden dette påvirker kapasiteten til lukkede flomløp.

1.1 Et standard overløp



Figur 1.1.1 Definisjonsskisse av parametrene for et standard overløp (NVE, 2005)

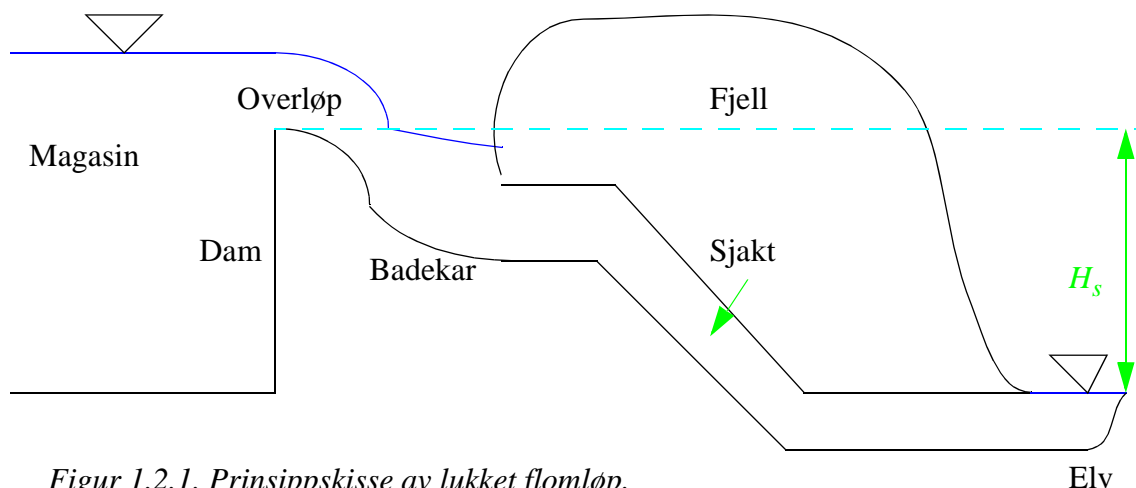
Vi definerer et standard overløp fra skissen i Fig. 1.1.1. På engelsk kalles dette for et “Ogee” overløp. Et standard overløp vil ha en vannføringskapasitet, Q , gitt ved overløpsformelen:

$$Q = CLH_o^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

Der H_o er høydedifferansen mellom energilinjen oppstrøms overløpet og toppen av overløpsterskelen, og L er lengden av overløpet på tvers av strømrretningen. C er overløpsfaktoren. Overløpsfaktoren er spesifikk for geometrien av overløpet. Den finnes oftest fra tabeller og litteratur for standard overløp. For ikke-standard overløp kan C faktoren finnes ved fysiske modellforsøk. Men den kan også finnes ved numeriske modeller. Dette er et viktig tema i denne rapporten.

1.2 Lukkede flomløp

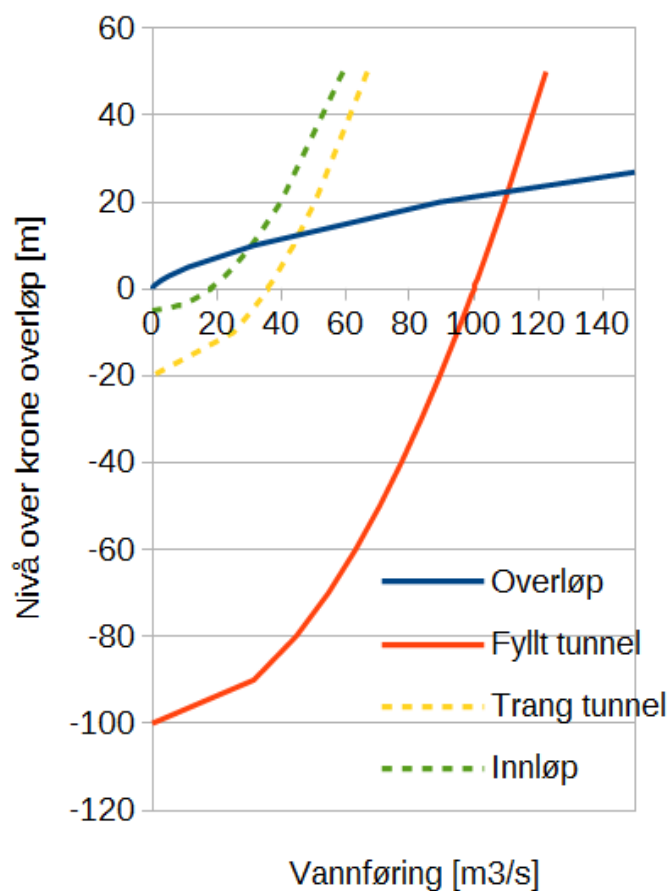
Lukkede flomløp består oftest av en terskel som kan være et standard overløp, og deretter fører en samlekanal vannet inn i en tunnel som ofte inkluderer en skrå sjakt. Fig. 1.2.1 viser en prinsippskisse for et typisk lukket overløp:



Figur 1.2.1. Prinsippskisse av lukket flomløp.
Fritt vannspeil er gitt med mørkeblå farge.

Høydeforskjellen mellom toppen av overløpet og elven der vannet renner ut er lik H_s . Blaisdell (1952) gir en veiledning for hvordan hydraulikken i et slikt system blir. Han gir også retningslinjer for hvordan man skal beregne kapasiteten på det lukkede flomløpet. Blaisdell (1952) ser på både lukkede flomløp, kulverter og andre lignende avløpskonstruksjoner. For et generelt tilfelle vil en vannstands-vannføringskurve for et slikt system bestå av fire deler (Figur 1.2.1)

Figur 1.2.2. Eksempel på kapasitetskurver for fire forskjellige begrensende vannførings situasjoner.



1. Den første delen (blå linje i Fig. 1.2.2) gjelder for lave vannføringer og følger stort sett formen til et standard overløp (Ligning 1). Vannmengden som går igjennom tunnelen er relativ lav, og det er overløpsterskelen som begrenser kapasiteten på systemet.

2. En relativ trang innløpsgeometri fra badekaret til avløpstunnelen er den begrensende faktoren for vannføringen (grønn linje i Fig. 1.2.2). Dette kunne også oppstå hvis en stor steinblokk falt ned over innløpet til tunnelen. Da ville falltapet som oppstår begrense kapasiteten i systemet.

3. Samletunnelen mellom badekaret og sjakta begrenser vannføringen (gul linje i Fig. 1.2.2). Dette skjer når denne tunnelen har betydelig høyere friksjonstap enn resten av systemet. Dette kan for eksempel skje hvis tverrsnittsarealet av denne tunneldelen er vesentlig mindre enn resten av tunnelsystemet. Dette er vanligvis ikke tilfelle for lukkede flomløp i Norge. En kunne også tenke seg at et stort ras i denne tunneldelen ville føre til at energitapet her ble veldig høyt.

4. Energitapet i tunnelsystemet fra magasinet til utløpet begrenser vannføringen (rød kurve i Fig. 1.2.1). Denne situasjonen oppstår når tunnelen går full. Det er da kapasiteten på tunnelen som er begrensende på kapasiteten til flomløpet. Denne kurven vil vanligvis gi maksimal vannføring som kan taes gjennom et lukket flomløp. I en slik situasjon kan en bruke Energiligningen til å finne vannføringen, sammen med Darcy-Weissbach sin formel og singulærtapsformler:

$$H_o + H_s = \left(\sum f \frac{L_t}{D} + \sum K \right) \frac{U^2}{2g} \quad (2)$$

Her er H_s lik høydeforskjellen mellom terskelen og utløpet av flomløpstunnelen (Fig. 1.2.1). Moodys friksjonsfaktor er gitt som f , lengden av tunneldelen er L_t , tunnelens diameter er D og singulærtapskoeffisientene er gitt som K . Friksjonstapene må summeres opp over alle tunneldelene. Singulærtapene må også summeres opp over innløpstap, utløpstap, ekspansjonstap, tap i svinger etc. Vi kan løse ligningen mhp Q , slik som Ligning 1:

$$Q = AU = 3.14 \times 0.25 \times D^2 \sqrt{\frac{(H_o + H_s) 2g}{\left(\sum f \frac{L_t}{D} + \sum K \right)}} \quad (3)$$

Denne ligningen vises i den røde kurven i Fig. 1.2.2.

Et eksempel: På flomløpet til Sysendammen er H_s lik 84 meter, mens H_o ikke kan bli mer enn 2 meter før vannstanden går over tetningskjernen på fyllingsdammen. Det betyr at kapasiteten for denne situasjonen i liten grad vil være en funksjon av H_o . På en kapasitetskurve vil dette bety en nesten vertikal linje. Observasjoner fra fysiske modellforsøk støtter dette. Ved full tunnel vil vannstanden i magasinet kunne stige over overløpsterskelen uten at dette fører til nevneverdig økning av vannføringen i flomløpet. Vannføringen fra ligning (3) vil derfor være en maksimal vannføring for et lukket flomløp. Høyere vannføringer vil føre til overtopping av dammen. En fysisk eller numerisk modell for kapasiteten til et lukket flomløp må derfor kunne finne parametrene i ligning (3). Dette betyr i praksis friksjonstapene og singulærtapene.

Både Ligning (1) og (3) vil være nyttige for å finne ut om resultatene fra en fysisk eller numerisk modell er omtrentlige riktige. For et lukket flomløp med gitte geometriske dimensjoner og Manning-Strickler tall vil en kunne beregne friksjonstapet direkte. Dette er gjort i Appendiks II for Sysen flomløpet. Med et antatt Manning-Strickler tall på 33, utgjør friksjonstapet halvparten av

det totale energitapet. Det man da i praksis finner med den fysiske modellen er singulærtapene, dvs. K' ene i ligning (3).

Merk også at hele kapasitetsberegningen for et lukket flomløp er relativt følsomt for det valgte Manning-Strickler tallet. Hvis en velger et Manning-Strickler tall på 24 i stedet for 33, får en omtrent doblet friksjonstapet i systemet. Birkeland (2008) beregnet et Manning-Strickler tall på 24 for Sysen tunnelen med Rahms metode. Som vist i Appendix II er nok dette en for lav verdi, men det understreker at det er endel usikkerheter i bestemmelse av friksjonsfaktoren for råsprengte tunneller.

Blaisdell (1952) gir også retningslinjer for hvordan en skal beregne trykket i det lukkede flomløpet. Dette er viktig for å unngå kavitasjon:

Blaisdell (1952): Pressures close to absolute zero imply that cavitation may take place which, if sufficiently severe, may result in the complete destruction of the spillway.

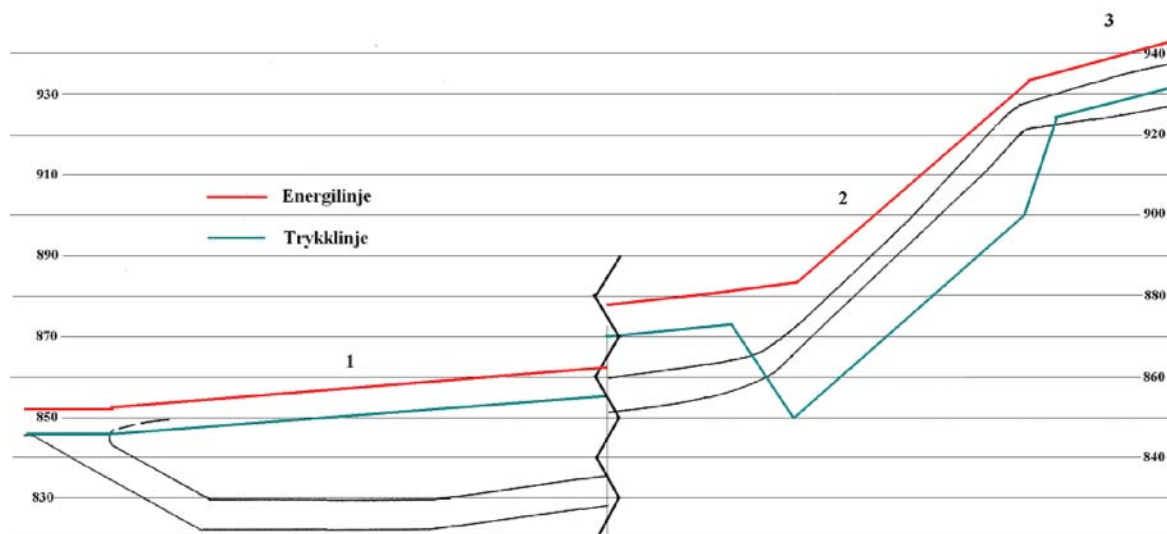
Falvey (1990) beskriver en rekke flomløp som har blitt ødelagt av kavitasjon, også lukkede flomløp. Dette har skjedd på flere dammer i USA, bl. a. Hoover dammen. Den mest spektakulære kavitasjonsskaden var på det lukkede flomløpet på Glen Canyon dammen. Her ble det under en flom i 1983 erodert gjennom armert betong og ned i fjellet under. Den største dybden av erosjonsgroper var 11 meter.

Store eroderte groper kan forårsake økte singulærtap i flomløpet. Kavitasjonsskader kan også tenkes å løsne store stenblokker fra tunnelen. Dette kan redusere tverrsnittsarealet lenger nedstrøms og gi ytterligere singulærtap. Absolutte trykk under null vil også direkte påvirke vannføringskapasiteten i tunnelen.

En fysisk modell vil ikke alltid påvise problemet med for stort undertrykk, hvis en ikke spesielt ser etter dette og måler trykket. I en fysisk modell vil det nesten aldri bli et trykk under minus 10 meter vannsøyle. Det betyr at vi nesten aldri vil få trykk under absolutt nulltrykk i den fysiske modellen. Men hvis vi skalerer et negativt trykk fra modellen til prototypen, så vil det i enkelte tilfeller kunne være mer enn minus 10 meter vannsøyle i prototypen. Dette vises i Figur 1.2.3, fra det lukkede flomløpet til Sysendammen. Her ser vi at trykklinjen (blå linje) ligger ca 20 meter under tunnelen i skråsjakta. Dette betyr at det der blir ca 10 meter lavere trykk enn absolutt nulltrykk. Dette kan ikke forekomme fysisk.

For å hindre kavitasjon og for ikke å overpredikere vannføringskapasiteten til en lukket flomløp har enkelte fysiske modellstudier tilført luft nederst i sjakta, via for eksempel en ventil (Røneid og Sæter, 2007; Birkeland, 2008). En slik løsning vil være en konservativ antagelse i tilfeller der en kan få ufysiske absolutte trykk. Imidlertid vil det også føre til lavere vannføringskapasitet i systemet.

Merk at Ligning 3 ikke vil gjelde hvis det er lufting i sjakta, eller hvis det blir lavere trykk enn absolutt nulltrykk i deler av flomløpet. Vannhastighetene og vannføringen i tunnelen er en funksjon av trykkdifferansene. En fysisk modellstudie med ufysiske lave trykk vil derfor overpredikere vannføringskapasiteten til et lukket flomløp. Den røde kurven i Fig. 1.2.2 vil da ligge for langt til høyre.



Figur 1.2.3 Trykk og energilinjer for det lukkede flomløpet ved Sysendammen (Birkeland, 2008). De sorte linjene er tunnelen. Tallene på vertikal akse er meter høyde over havet.

1.3 Luftinnblanding

Ved lave vannføringer vil kapasitetskurven til et lukket flomløp være gitt av ligning (1). For høye vannføringer vil kurven følge ligning (3). For vannføringer nær maksimalvannføringen (ligning 3), vil kapasiteten til flomløpet avvike noe fra ligning (1).

En prosess som påvirker kapasitetskurven er luftmedrivning. Større hvirvler dannes oftest ved bunnen/veggen av en kanal/sjakt, og de turbulente hvirvlene transporteres mot overflaten. Hvis de er sterke nok til å overvinne overflatespenningen, vil de kunne hvirvle vannpartikler opp over overflaten og ta med seg luftbobler ned under vannspeilet. Store hvirvler kan transportere luftboblene langt nedover i vannmassene. Faktorer som påvirker luftmedrivningen er derfor: overflatespenningen, luftboblenes størrelse og størrelsen på de turbulente hvirvlene.

Luftinnblandingen fører til at kapasiteten til et lukket flomløp vil bli redusert. Luften opptar et visst volum i vann/luft blandingen. Dette luftvolumet vil fortrenge vannet og føre til at mindre vann vil transporteres.

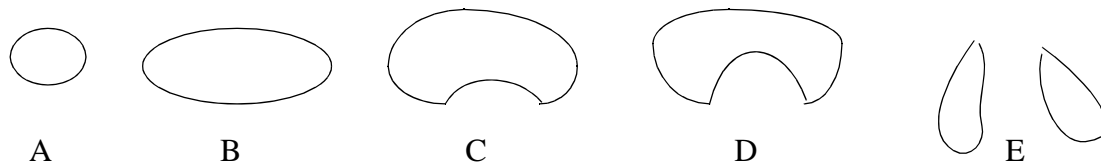
Under luftmedrivningen vil luftkonsentrasjonen i vannet variere over dybden. Der en har en tilnærmet uniform strømning vil det være minst luftkonsentrasjon nær bunnen og høyest luftkonsentrasjon nær overflaten. Fordelingen av luftkonsentrasjonen fører til at den effektive tettheten av vann/luft blandingen varierer over dybden. Dette fører igjen til at turbulensen dempes. I en numerisk modell for luft/vann må denne dempingen taes hensyn til.

Grunnen til at en får så lave trykk i trykksjaktta er at arealet i trykksjaktta er mindre enn i tunnelene. Derved blir også friksjonstapet i trykksjaktta det dominerende friksjonstapet i systemet. En utvidelse av tverrsnittsarealet i trykksjaktta vil både gi et mindre totalt energitap, større vannføringskapasitet og mindre risiko for kavitasjon i systemet. Dette vil derfor være et meget gunstig tiltak der en har kapasitetsproblemer i lukkede flomløp.

Et problem er at luftboblene brytes opp når deres størrelse overstiger en viss verdi i forhold til vannets viskositet og overflatespenning. Dette er vist i Fig. 1.3.1. Hua og Lou (2007) studerte dette fenomenet ved å slippe luftbobler opp gjennom et vertikalt rør der vannhastigheten var null. De fant at boblefasongen og oppdelingen av boblene var en funksjon av partikkel Reynolds tallet og Bond tallet definert som:

$$Re^* = \frac{\rho g D^{\frac{1}{2}} D^{\frac{3}{2}}}{\mu} \quad Bo^* = \frac{\rho g D^2}{\sigma} \quad (4)$$

D er boblediameteren, μ er viskositeten til vannet, σ er overflatespenningen og ρ er vannets tetthet. Hvis en boble er liten vil den ikke forandre form eller brytes opp. Dette er illustrert i Fig. 1.3.1A. Hvis den er større, vil den forandre fasong når den stiger opp i røret, og bli flatere. Dette er vist i Fig. 1.3.1 B. Den vil så få en form som vist i Fig. 1.3.1 C og D. Hvis størrelsen er stor nok i forhold til viskositet og overflatespenning, vil boblen brytes i flere mindre bobler, som vist i Fig. 1.3.1 E. Her er både partikkel Reynolds tallet og Bond tallet over 200.



Figur 1.3.1. Bobler som stiger i et rør. A er en liten boble. B er en stor boble som dannes, og som forandrer form til C, D og til slutt brytes den opp i flere deler som vist i E.

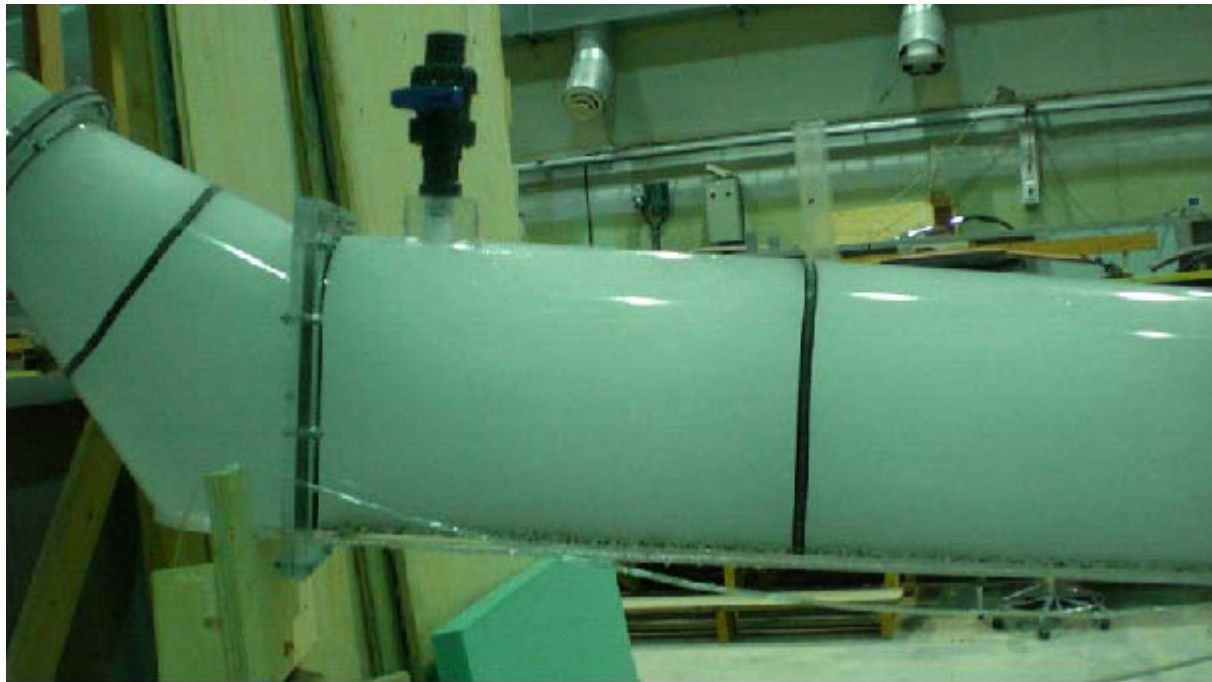
Dette er en av årsakene til at man kan få skaleringsproblemer ved luftinnblanding i fysiske modellforsøk. Boblene kan i mindre grad brytes opp i modellforsøket enn i prototypen, siden viskositeten og overflatespenningen er de samme i prototypen og den fysiske modellen.

Merk at studien som er referert her omhandler bobler i stille vann. Når vannet har en hastighet og turbulens, vil prosessen bli mer komplisert. En mer detaljert studie av luftmedrivning i overløp er gitt av Falvey (1980).

I følge Chanson (2009) blir luftinnblandingen i en fysisk modell som er skalert etter Froude lov-en kraftig underestimert i forhold til prototypen. Dette kommer av forholdene beskrevet over. En numerisk modell vil i prinsippet ikke ha disse skaleringsproblemene. Verdien av overflatespenningen kan gis som inngangsdata til den numeriske modellen. En kan også spesifisere en luftboblestørrelse som vil være annerledes enn den en får i en fysisk modell. Dette vil imidlertid kreve at en vet hvordan luftboblestørrelsen skal skaleres, og at en har kvantitative formler for dette. På det nåværende tidspunkt er det fremdeles endel forskningsarbeide før man er kommet så langt.

Luftinnblanding ble undersøkt i det første fysiske modellforsøket på lukkede flomløp som ble gjort ved NTNU på Dam Innerdalen (Røneid og Sæter, 2007). Her ble det tilsatt såpe i vannet for å se hvordan overflatespenningene påvirket vannføringskapasiteten. En forskyvning av vannføringskurven ble observert, men den var ikke veldig stor. Et spørsmål her er hvor mye såpe

som ble tilsatt, og om mer såper ville føre til større forskyvning av vannføringskurven. En reduksjon av overflatespenningen ble ikke undersøkt i de etterfølgende studiene av lukkede flomløp ved NTNU.



Figur 1.3.2 Lengdesnitt av en detalj i laboriemodellen for Sysen (Birkeland, 2008). Ventilen på toppen kan åpnes slik at luft kan komme inn. En blanding av luft og vann strømmer i modellen.

1.4 Hvirvler i flomløp

Hvirvler kan oppstå ved vanninntak, men også i forbindelse med flomløp. Fysiske modeller er ofte brukte for å studere slike strømmingstyper og å designe flomløpene slik at hvirvler ikke oppstår. Et eksempel er flomløpet på Folsom dammen i USA, som ble undersøkt i en fysisk modellstudie (Cox og Huff, 2010). Her ble det observert hvirvler ved inngangen til flomløpet. Noen av disse reduserte kapasiteten på flomløpet, mens andre førte til en ikke-stasjonær strømning (bulking), som gjorde at det oppstod ekstra belastning på lukene. For å hindre hvirvlene, ble det lagt inn en helning på øverste delen av oppstrøms side av overløpsdammen. Også sideveggene på området som førte vann inn til flomløpet ble utformet hydraulisk jevnt, slik at sidehvirvler ikke oppstod.

Det er også funnet endel litteratur fra flomløp i Kina som beskriver hvirvler i flomløp. Wang og Chen (2009) beskriver en fysisk modellstudie av flomløpet på Yutang dammen i Kina. Her er vannhastighetene oppstrøms overløpet ganske store, opp til 5 m/s. I det originale designet var det laget en ledevegg som skulle lage gode innstrømningsforhold til flomløpet. Det fysiske modellforsøket viste at det allikevel ble dannet hvirvler oppstrøms flomløpet. En lengre ledevegg med forbedrede hydrauliske egenskaper ble foretatt etter modellforsøket, som skulle minske problemene med hvirvlene. Wang og Jiang (2010) beskrev hvirvler ved flomløpsinntaket på dammen til Xiluodu vannkraftverk i Kina. Her ble hvirvlene også undersøkt i en fysisk modellstudie.

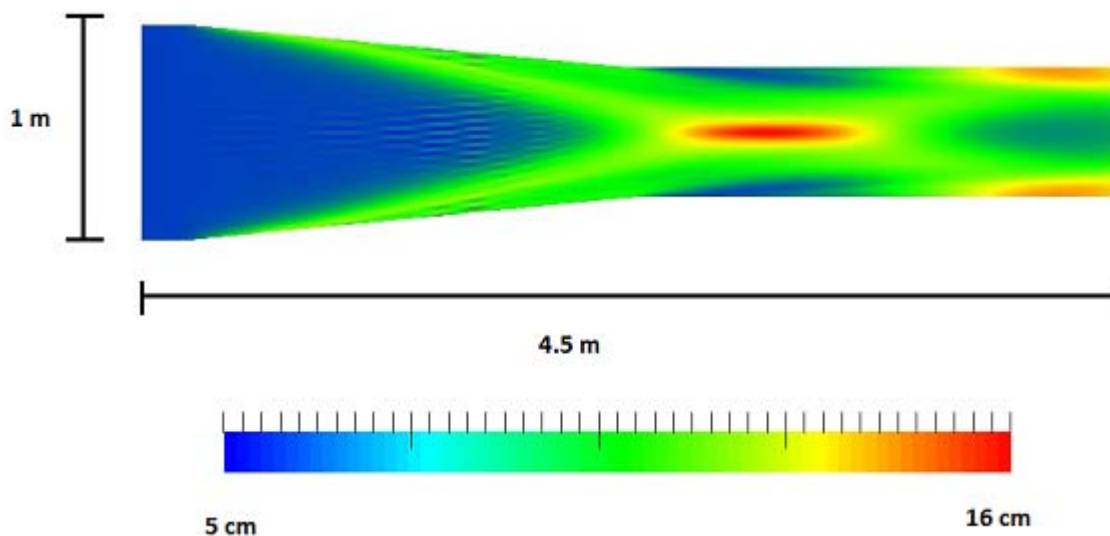
Det finnes mange eksempler på litteratur om numerisk modellering av hvirvler i forbindelse med vanninntak. Numerisk modellering av hvirvler i et flomløp er gitt av Andersson et al (2013), som modellerte flomløpet på Hölje dammen i Klaraelven i Sverige. Her ble det gjort et fysisk modellforsøk, og også en modellering med programmet CFX. Hvirvelen oppstod ved strømning rundt en dampilar, under en overløpsluke. Hvirvelen var synlig på bilder fra både laboriemodellen og grafikk fra CFD programmet. Utover dette ble det ikke gjort noen målinger av hastigheter eller vannivåer i hvirvelen i den fysiske modellen. Det er derfor vanskelig å si eksakt hvor nøyaktig hvirvelen ble beregnet.

Det er funnet endel litteratur på CFD modellering av hvirvler, for eksempel Suerich-Gulick et al (2006) og Lucino et al (2010). Her er det viktig å huske på at hver hvirvel må løses opp med endel celler. Hvis en hvirvel er mindre enn noen få celler i størrelse kan det hende at den ikke vil vises i en CFD beregning.

1.5 Stående bølger

Etter vannet har passert overløpet, går det ofte over i en bratt kanal der det oppstår overkritisk strømning. Det klassiske vannstandsspranget oppstår der overkritisk strømning møter underkritisk strømning i et basseng nedstrøms dammen. Imidlertid kan det også oppstå stående bølger dersom det for eksempel er svinger i kanaler med overkritisk strømning. Bølger kan også oppstå dersom det er andre konstruksjoner i kanalen som bryter med strømmingen.

Vannstanden i en kanal kan endres som følge av at en stående bølge delvis følger strømmetningen og delvis går på tvers av denne. Et eksempel er vist i figurene under. Her kommer overkritisk vann fra en kanal inn til en kontraksjon. Dette fører til at det dannes skrå bølger som treffer hverandre midt i kanalen. Eksempelet er tatt fra en studie der resultatene fra et CFD program ble sammenlignet med målinger fra en fysisk modellstudie (Krüger og Olsen, 2001).



Figur 1.5.1 Kanalen med innsnevring sett ovenfra. Vann med overkritisk strømning kommer inn fra venstre. Fargene viser vannstanden. (Krüger og Olsen, 2001)

Merk at det er nødvendig med en god del celler for å kunne løse opp bølgen som oppstår. I studien til Krüger og Olsen (2001) var geometrien ganske enkel: det var bare to knekk i sidene på en rett kanal. Dette ble allikevel løst opp med 40x120 celler. Andersson et al (2013) observerte også stående bølger nedstrøms et overløp, men kun i en fysiske modellstudie. Beregningene med en CFD modell av samme flomløpet gav ingen bølger. Andersson et al (2013) antok at dette kom av at gridet som ble brukt var for grovt.

Det er også verd å merke seg at det kan godt kan oppstå luftmedrivning i stående bølger. Hvis vannet fortsetter i et lukket flomløp etter den stående bølgen, kan dette føre til at luft bringes inn i tunnelen, som igjen kan føre til minsket kapasitet i systemet.

2. Numeriske algoritmer

2.1 Generell beskrivelse

De numeriske algoritmene deler fluidvolumet i tredimensjonale celler. I hver celle løses Navier-Stokes ligninger med en turbulensmodell for å finne vannhastighetene og turbulensen. Navier-Stokes ligninger er en vektorligning, slik at en får ut tre hastigheter i de tre dimensjonene. I tillegg beregnes trykket og turbulensparametre i hver celle.

Navier-Stokes ligninger har flere ledd, og nøyaktigheten i modelleringen av disse vil påvirke resultatene. I hovedsak er det fire ledd: et tidsledd, et konvektivt ledd, et trykkledd og et turbulensledd. I en generell strømnings situasjon vil det ofte være det konvekitive leddet og turbulensleddet som i størst grad påvirker nøyaktigheten av en stasjonær løsning av ligningssystemet. Det turbulente leddet kalles også et Reynolds-spennings ledd.

Alle dataprogrammene som er blitt benyttet til flomløpsberegninger er basert på kontroll-volum metoden. Det finnes numeriske programmer basert på elementmetoden, men siden disse ikke er benyttet til flomløpsberegninger, vil teorien i denne rapporten bygge på kontroll-volum metoden.

2.2 Volume Of Fluid (VOF) metode

De første CFD programmene ble utviklet for geometrier der en ikke hadde en fri overflate. Å beregne beliggenheten av den frie overflaten er derfor en spesiell utfordring for en CFD modell. Det finnes flere forskjellige tilnæringer til problemet, men VOF metoden er den vanligste og mest brukte metoden for å beregne beliggenheten av det frie vannspeilet. Metoden brukes av alle kommersielle CFD programmer og også OpenFOAM. Prinsippet går ut på å modellere en blanding av luft og vann. Mengdefraksjonen av vann i blandingen kalles α , som er "Volume Of Fluid". I en celle der det bare er vann er α lik 1. En celle som bare består av luft har α en verdi på 0. Der en har 30 % vann og 70 % luft er α lik 0.3. Variasjonsområdet for α blir derfor mellom 0 og 1.

Den klassiske metoden for å finne α består i at man løser en transient konveksjonsligning:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + U_j \frac{\partial \alpha}{\partial x_j} = 0 \quad (5)$$

Her er U_j fluidhastigheten i j retningen. I en tredimensjonal beregning vil j være 1, 2 eller 3. I forhold til løsningen av Navier-Stokes ligninger har vi matematisk sett innført en ny variabel, α , og vi trenger da denne fjerde ligningen for å løse det totale ligningssettet.

Noen dataprogrammer gir brukeren et valg om man vil modellere de to fasene separat eller som en fluid. Hvis en velger en fluid, vil både luft og vann ha samme hastighetsvektor i en celle. En to-fluid modell vil beregne en hastighetsvektor for luften og en annen for vannet i samme cellen. Normalt brukes en en-fluid modell, og dette er en rimelig antagelse. Alle beregningene med

FLOW-3D som refereres i denne rapporten bruker en en-fluid modell. Denne tilnærmingen kalles ofte for en drift-fluks modell, se kap. 2.6 for mer detaljer.

Ligningen over brukes for en standard VOF metode. Det går an å legge til flere ledd for å få økt nøyaktighet. Dette beskrives senere.

Når en beregner en kapasitetskurve må en gi inn enten vannføringen eller vannstanden. Den andre parameteren blir da beregnet av programmet. Hvilken parameter som bør gis inn avhenger av hvilket program en bruker og hvilken løsningsstrategi som velges. Olsen (2015) gav for eksempel inn en vannføring til OpenFOAM, og fikk beregnet vannstanden oppstrøms overløpet. Jacobsen (2008) gav inn vannstanden oppstrøms og nedstrøms overløpet til FLOW-3D programmet, som beregnet vannføringen inn og ut av geometrien. Det gjorde også Turan et al (2008) med FLUENT.

2.3 Konvektive ledd

De konvektive leddene i Navier-Stokes ligninger beskriver impulsen som kommer av den gjennomsnittlige vannhastighetsdifferansen over cellen. Impulsleddet er ofte dominerende i strømretningen. Det konvektive leddet i VOF ligningen er gitt som:

$$U_j \frac{\partial \alpha}{\partial x_j} \quad (6)$$

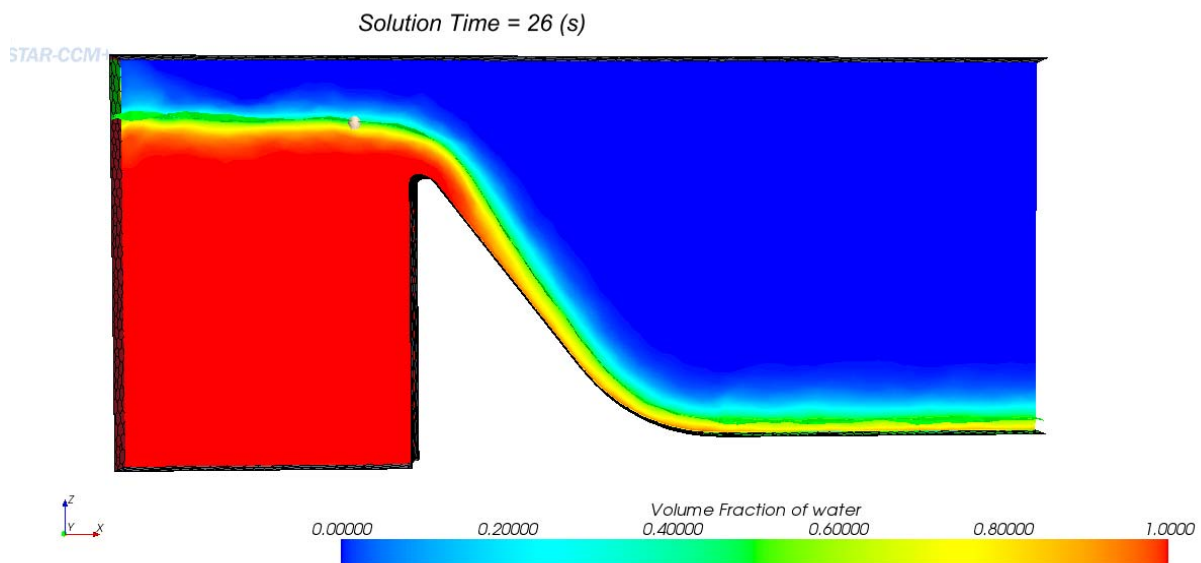
I kontroll-volum metoden bestemmes den konvektive fluksen på grensen mellom to celler. En må da interpolere den ukjente variabelen, α , fra sentrum av cellene til grensen mellom cellene. Det finnes mange forskjellige interpoleringsmetoder. En kan benytte oppstrøms metoder, som legger mer vekt på verdier fra oppstrøms celle. Det har også noe å si hvor mange celler en bruker i interpoleringen. I en første ordens metode brukes kun en celle. I en andre ordens metode brukes to celler etc. Den enkleste og mest stabile metoden er en første ordens oppstrøms metode. Denne metoden fører imidlertid ofte til mye falsk diffusjon (se neste kapittel). De to mest brukte andre ordens metodene er et sentralt skjema og andre ordens oppstrøms metode. Den sentrale metoden krever små tidskritt for å være stabil. Det finnes også høyere ordens metoder, for eksempel QUICK skjemaet, som er en tredje ordens oppstrøms metode. WENO metoden er en 7. ordens metode.

Merk at disse diskretiseringsmetodene virker kun på det konvektive leddet. Kvaliteten til løsningen av det totale ligningssettet vil også påvirkes av hvor nøyaktig man løser de andre leddene.

2.4 Falsk diffusjon

Falsk diffusjon kommer av at det konvektive leddet i Navier-Stokes ligninger ikke er helt nøyaktig modellert. Man må gjøre en interpolering av verdiene fra sentrum av cellene til veggene mellom cellene. Denne interpoleringen vil ikke alltid bli helt eksakt. Spesielt der gridcellene er relativt store i forhold til gradientene, vil det forekomme avvik. De beregnede gradientene vil bli mindre enn det som er riktig, noe som vil virke som om det er ekstra mye diffusjon tilstede. Fenomenet kalles derfor falsk diffusjon.

Falsk diffusjon kan forekomme med alle variable: Hastigheter, konsentrasjoner, turbulens og også i beregningen av luftfraksjonen i VOF metoden. Det vil være svært store gradienter i volumfraksjonen mellom der det er vann og der det er luft. Hvis vi i virkeligheten ikke har noen lufttinnblanding, vil vannoverflaten representere en brå gradient der fraksjonen går fra høyeste verdi ($\alpha=1$) til laveste verdi ($\alpha=0$) over en avstand på under en millimeter. Oftest er grid-cellene mye større enn dette, og da vil falsk diffusjon gjøre at volumfraksjonen diffunderer i overflaten. I resultatene fra de numeriske beregningene vil dette se ut som om det blandes inn luft, selv om det i virkeligheten ikke er lufttinnblanding. Dette vises i Fig. 2.4.1. Problemet her er at en har en kombinasjon av at cellene er relativt store og at de er polyhedrale i form. Dette kan observeres i figuren hvis man ser nøye på oppstrøms grense. De polyhedrale cellene vil ha flere sider som danner en ugunstig vinkel med hastighetsvektorene. Dette skaper falsk diffusjon.



Figur 2.4.1 Lengdeprofil av et flomløp modellert med STAR-CCM+ programmet. Rødt er vann mens blå farge er luft. Merk at det er ganske store områder der det er en blanding av luft og vann. Dette skyldes falsk diffusjon. Spesielt oppstrøms overløpet skal det ikke være lufttinnblanding, og vannspeilet skal være flatt (Figur: R. Feurich).

For å modellere store gradienter riktig, kan en bruke høyere ordens metoder for å diskretisere det konvektive leddet. Dette vil gi noe høyere gradienter enn lavere ordens metoder, men det er allikevel ikke sikkert at all falsk diffusjon forsvinner. Andre metoder for å hindre falsk diffusjon er å minske gridstørrelsen, eller å legge gridlinjene i strømretningen. Siden det oftest ikke er muligheter for å ha gridceller i størrelsesorden 1 mm, er løsningen med å legge gridet lags strømlinjene ofte den viktigste metoden for å minske falsk diffusjon. Gridlinjene må da ligge langs en forventet vannoverflate. Heksahedrale gridceller er da nødvendige (Feurich og Olsen, 2012).

+Det finnes numeriske metoder som gjør overgangen mellom luft og vann skarpere. Hovedprinsippet bak disse metodene er å introdusere et ekstra konvektivt ledd i spredningslikningen, med en fluidhastighet som peker mot den beregnede overflaten. Definisjonen av overflaten er oftest der luftfraksjonen er 50%. I STAR-CCM+ (CD-adapco, 2015, s. 5123) gir brukeren inn en "sharpening factor", C_α , mellom 0 og 1, som multipliseres med det ekstra konvektive leddet.

En C_α faktor på 0 gir ingen effekt, og en verdi på 1 gir maksimal effekt. Man må her prøve seg fram med forskjellige verdier.

STAR-CCM+ har også en drift-fluks modell (CD-adapco, 2015, s. 4763). Brukeren må da gi inn en funksjon for drift-fluks hastigheten.

Merk at både drift-fluks modellen og "sharpening" modellen er ikke-konservative. Dette betyr at ved å bruke modellene vil det kunne oppstå kontinuitetsdefekter for vann/luft strømmen. Kontinuitetsdefekter betyr at vann forsvinner eller kommer til, slik at for eksempel mengden vann inn til geometrien ikke er lik vannmengden som strømmer ut. Dette er ikke gunstig ved beregning av vannføringskurven, da en ønsker å være sikker på at den benyttede/beregnete vannføringen er korrekt.

2.5 Turbulensmodellering

En turbulensmodell er et sett med matematiske ligninger som beskriver turbulensen i vannet eller blandingen luft/vann. Den mest brukte modellen er k -epsilon modellen, som bruker to differensialligninger for å bestemme en turbulent viskositet. Den ene ligningen er for turbulent kinetisk energi: k . Den andre er for dissipasjon av k , kalt epsilon. Den turbulente viskositeten som beregnes fra k og epsilon brukes så i Reynolds-stress leddet i Navier-Stokes ligninger.

Turbulensen og turbulensmodellen vil i varierende grad påvirke hastighetsfeltet i en strømning. I en overløpsberegning vil ofte det konvektive leddet være større enn Reynolds stress leddet, så i første omgang kan en tenke seg at turbulensmodellen ikke har en stor betydning. Imidlertid vil modellen ha stor innvirkning når friksjonstap og singulærtap i et lukket flomløp beregnes. Den største betydningen vil være i modellering av luftinnblanding. Luftboblene vil stige oppover i vannmassen, og mekanismen som dytter de nedover er turbulente hvirvler. Årsaken til at det blir luftmedrivning er at turbulensen er så stor at luftboblene blir blandet nedover i vannmassene. Det er derfor svært viktig for en tofaseberegning av luft og vann at turbulensen blir riktig modellert.

En standard k -epsilon modell vil vanligvis gi relativt gode svar for en enfasestrømning eller situasjoner der en har to separate faser som ikke blandes. En tofasestrømning med blanding av luft og vann er imidlertid mye mer komplisert. Vertikale tetthetsgradienter vil i luft/vann blandingen dempe turbulensen. Et eksempel er en turbiditetsstrøm i en renne, beregnet av Olsen og Tesaker (1995). Her varierte tettheten til vann/sediment blandingen med en faktor 2 i overgangen mellom rent vann og turbiditetsstrømmen. Imidlertid ble den beregnede turbulente viskositeten her dempet med flere størrelsesordner. I en luft/vann blanding vil tetthetsforskjellen mellom luft og vann være en faktor 1000. Dempningen av turbulensen vil dermed være meget stor.

Numerisk modellering av turbulensdemping pga tetthetsgradienter krever spesielle turbulensmodeller. Disse har ofte flere empiriske koeffisienter som må kalibreres. Dette er et relativt komplisert tema.

Det mest brukte alternativet til k -epsilon modellen er k -omega modellen. Dette er også en to-lignings modell, og den har derved omtrent samme nøyaktighet og krav til regneressurser som k -epsilon modellen. En alternativ modell er en Reynolds-spennings modell, som bruker flere ligninger og er mer komplisert. Den vil kunne gi bedre løsninger for enkelte strømningssituasjoner. Alle dataprogrammene nevnt i kapittel 3 har mange turbulensmodeller, og det er relativt

lett å forandre en input-fil slik at en annen modell brukes. Dette kan og bør gjøres der en ønsker å undersøke effekten av turbulensmodellen på resultatene.

Turbulensmodellene som er beskrevet over er bygd på en Reynolds midlet versjon av Navier-Stokes ligninger. Dette betyr at hastighetene i hver celle er gjennomsnittshastigheter over tid. Og at turbulensen blir beregnet med turbulensmodellen. Et alternativ til denne tilnærmingen er å beregne de turbulente hvirvlene direkte i gridet. Dette krever imidlertid et meget fint grid, og er pr. i dag for beregningskrevende for praktiske formål. Det brukes imidlertid innen forskning på strømningsmekanikk. Når datamaskinkapasiteten øker i fremtiden, kan en tenke seg at denne metoden også kan brukes til praktiske formål. En vil da få en mer nøyaktig beregning av turbulensen i strømmingen. Disse metodene kalles Direkte simulering av turbulens, Storskala eddysimulering og Detached eddy simulering.

2.6 Drift-fluks modeller

I kap. 2.2. ble det beskrevet to måter å beregne fluidhastighetene på. Den mest kompliserte metoden er å bruke en to-fluid modell der Navier-Stokes ligninger løses både for luft og vann i hver celle. En får derved beregnet stigehastigheten til luftboblene, siden både lufthastighetsvektoren og vannhastighetsvektoren blir beregnet. Dette krever imidlertid svært mye regnekraft. Metoden er hittil ikke brukt til flomløpsberegninger. En vanlig forenkling er at man modellerer en blanding av luft og vann, og at denne blandingen sees på som kun en fluid, med kun en hastighetsvektor i hver celle. Dette krever imidlertid at man tar hensyn til at de to fasene ikke har helt lik hastighet, for eksempel at luftboblene har en stigehastighet i vannet. En slik tilnærming kan kalles for en drift-fluks modell.

En drift-fluks modell løser en ligning for en konsentrasjon eller en fraksjon, og har med et ledd som tar hensyn til at partikler/bobler har annen synke/stigehastighet enn resten av fluidet. Et typisk eksempel er en ligning for konsentrasjonen, c , av suspenderte sedimenter (Ligning 7) eller luftfraksjonen, α i VOF metoden (Ligning 8):

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_j \frac{\partial c}{\partial x_j} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + U_j \frac{\partial \alpha}{\partial x_j} + w \frac{\partial \alpha}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \alpha}{\partial x_j} \right) \quad (8)$$

Variabelen Γ , er turbulent diffusivitet. Drift-fluks leddet er det tredje leddet på venste side av likhetstegnet.

De to ligningene er like, det eneste som skiller de er hva den ukjente er og fall/stige hastigheten, w , for partiklene/boblene. For sedimenttransport har vi en negativ stigehastighet mens for luftbobler er stigehastigheten positiv. Fallhastigheten for sedimenter er relativt godt kjent via fysiske modellforsøk. Problemet med stigehastigheten for luftbobler er i første rekke knyttet til hvor store luftboblene er. Gitt størrelsen, finnes det formler for å finne for stighastigheten.

2.7 Modellering av luftinnblanding

En modellering av luftinnblanding vil måtte baseres på en ligning for luftkonsentrasjonen i vannet eller volumfraksjonen vann i gridet. Således er VOF metoden et godt utgangspunkt. En må ta hensyn til følgende fenomener:

1. Turbulensen må nå et visst nivå før overflatespenningene brytes og innblanding av luft starter.
2. En må kunne beregne hvor store luftboblene blir for å kunne beregne deres stigehastighet. En må også kunne beregne når og hvordan luftboblene brytes opp.
3. For å beregne mengden vann i luften over vannspeilet, må en ha en formel for dette. (Vannspeilet kan defineres der volumfraksjonen $\alpha = 0.5$)
4. En må ta hensyn til turbulensens effekt på volumfraksjonen, dvs. innblandingen av luftbobler (siste ledd i ligning 7).
5. En må kunne beregne riktig turbulens, inkludert dempingen av turbulensen som funksjon av tetthetsvariasjonen i luft/vann blandingen
6. En må ha en metode for å redusere mengden falsk diffusjon slik at den ikke har vesentlig betydning for resultatene.

Nesten ingen av programmene som brukes i dag tar hensyn til alle disse fenomenene på en nøyaktig måte. FLOW-3D tar hensyn til flest fenomener, men for eksempel luftboblestørrelsen må gies av brukeren som en konstant verdi. Det er også usikkert hvor nøyaktig punkt 5 og 6 er løst. FLOW-3D bruker et ortogonalt grid, som vil gi mye falsk diffusjon dersom gridet for eksempel står 45 grader på strømrretningen i en sjakt. På den andre siden har FLOW-3D diskretiserings skjemaer som er laget for å gi minst mulig falsk diffusjon.

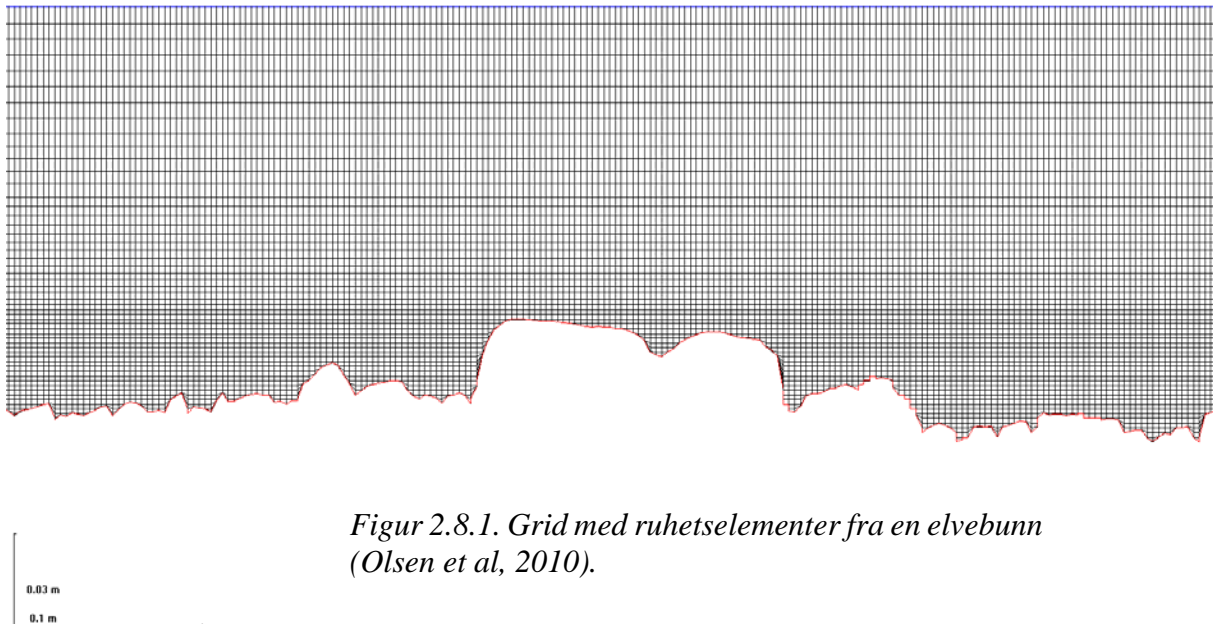
Det er mulig å ta hensyn til at vann/luft blandingen har varierende tetthet, men medrivningsprosessen av luft er komplisert å modellere. En volume of fluid metode vil gi en luftkonsentrasjon mellom 0 og 100 % nær overflaten på grunn av falsk diffusjon, slik at det ser ut som en har luftmedrivning selv om den ikke er der i virkeligheten. Dette er vist i Fig. 2.4.1. Merk at en kan ha et overløp som vist i figuren i en skala tilsvarende en liten fysisk modell. Da vil en ikke få noe luftinnblanding, selv om resultatene i Fig. 2.4.1 gir dette. Hvis en modellerer et overløp med prototype størrelse og får resultatene i Fig. 2.4.1, kan dette virke som et rimelige svar selv om luftinnblandingen her skyldes falsk diffusion og ikke en fysisk prosess.

Når en skal beregne et fritt vannspeil, ønsker en ofte at flest mulig celler skal enten ha 100 % vann eller 100 % luft. En ønsker derfor minst mulig diffusjon i beregningene. Derfor vil en ofte bruke et høyere ordens skjema, som muliggjør en beregning av brattere gradienter i luftkonsentrasjonen.

2.8 Modellering av ruhet

Alle CFD programene beskrevet i denne rapporten er laget for å regne på glatte overflater. For å ta ruhet med i betraktningen, må en forandre vegglovene, slik at friksjonen mellom vannet og veggen øker. Dette er vanligvis mulig i de fleste CFD programmer. Hva som kan kreve noe arbeid er å få programmene til å modellere en ruhetsfaktor som kan ha forskjellige verdier på forskjellige steder i flomløpet. Men det bør også være mulig i de fleste CFD programmer.

Når man løser opp vannhastighetsfeltet i et grid, vil en ha en viss cellestørrelse mot veggene. Et problem kan da være at ruheten blir større enn tykkelsen på cellene. Dette finnes det i dag ikke noen god løsning på. Hvis en har et veldig fint grid, kan en løse opp ruhetselementene i gridet. Dette er vist i Fig. 2.8.1



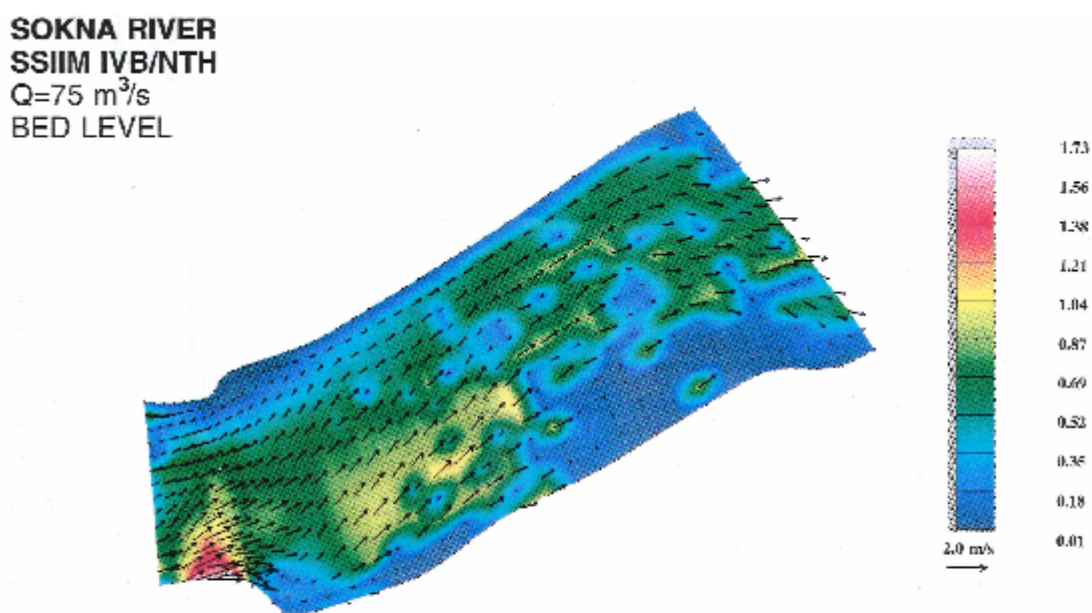
Figur 2.8.1. Grid med ruhetselementer fra en elvebunn (Olsen et al, 2010).

Et så fint grid vil imidlertid kreve veldig stor regnekapasitet i tre dimensjoner. Gridet i Fig. 2.8.1 er tredimensjonalt og har ca 70 millioner celler. Beregningstiden var her uker på superdatamaskinen ved NTNU.

Problemet kommer hvis ruheten er vesentlig større enn cellestørrelsen, men det allikevel ikke er nok celler til å løse opp hvert enkelt ruhetselement. Det er mulig å tenke seg at ruhetselementene vil påvirke flere celler ut fra veggen i form av en kraft. En numerisk metode basert på dette konseptet gav lovende resultater for en strekning av elven Sokna (Olsen og Stokseth, 1995), som vist i Fig. 2.8.2. Imidlertid er ikke teknologien implementert som standardmetode i de kommersielle programmene som er beskrevet i denne rapporten. Dette krever også relativt detaljerte data for ruhetens topografi. Et typisk problem vil være en kanal eller tunnel i råspregt fjell. Inngangsdata for en slik beregning vil kunne komme fra en laserscanning.

Maksimal vannføringskapasitet for et lukket flomløp vil følge Ligning 3. Hvis friksjonsfaktoren (og derved friksjonstapet) er forhåndsbestemt fra empiriske formler, vil hovedhensikten med en CFD modell være å finne singularitapene i systemet. Dette vil være likt med en fysisk modell-

studie. Spørsmålet er da hvordan ruheten i en råsprenget tunnel påvirker et singulærtap. Vil en ekspansjon i et rør med stor ruhet gi et forskjellig singulærtap i forhold til et glatt rør med samme dimensjoner? Hvis singulærtapet er uavhengig av ruheten, så vil problemet med ruhet i forhold til gridcellestørrelse være mindre viktig. En kan da modellere singulærtapene med en veggruhet som er så lav at den ikke skaper problemer for CFD modellen. Men hvis ruheten har endel å si for singulærtapene, er det nødvendig å utvikle metoder for å kunne inkludere stor ruhet i et grid med små celler. Størrelsen av singulærtap vil avhenge av hvor store resirkulasjonssonene er, og hver resirkulasjonssone trenger et visst antall celler for å kunne bli beregnet riktig. Det kan da oppstå en situasjon der cellene blir små i forhold til ruheten av tunnelen. Dette er et tema der det er behov for mer forskning.



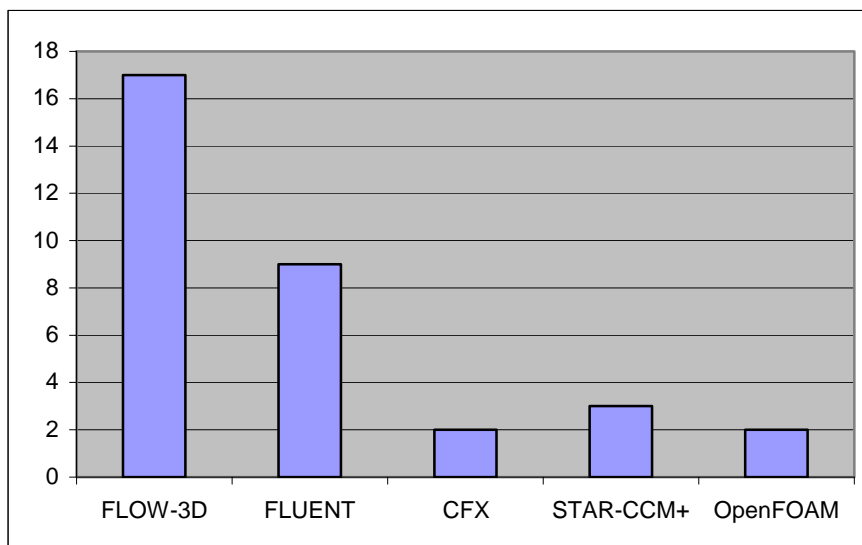
Figur 2.8.2 Hastighetsfelt ved bunnen i en strekning av elven Sokna (Olsen og Stokseth, 1995). Fargene viser hastigheten, der rød er stor hastighet og blå er lav hastighet. I de mørkeblå områdene er det store steiner som gjør at hastigheten der blir veldig liten.



3. Dataprogrammer

I dette kapittelet er det gitt en beskrivelse av dataprogrammer som kan beregne flomløpskapasitet. Dette er programmene FLOW-3D, FLUENT, CFX, STAR-CCM+ og OpenFOAM. Alle dataprogrammene løser Navier-Stokes ligninger med en turbulensmodell i tre dimensjoner. En VOF metode blir brukt for å finne den frie vannoverflaten. Alle programmene utenom OpenFOAM er kommersielle, dvs. en lisens kreves kjøpt. Lisensen er relativt dyr og kan komme opp i flere hundre tusen NOK pr. år. OpenFOAM er gratis med åpen kildekode.

Antall dataprogrammer som er referert i denne rapporten er gitt i Figur 3.1.



Figur 3.1 Antall studier med forskjellige CFD programmer om flomløp beskrevet i denne studien

Alle programmene beskrevet er såkalte "general purpose" programmer. Dette betyr at de kan brukes til mange forskjellige strømningsberegninger: elvehydraulikk, flomløp, strømning rundt fly, strømning i motorer og turbiner, ventilasjon i bygninger, to og trefasestrømning etc. Det finnes også CFD programmer som er skreddersydd for hydrauliske beregninger, for eksempel Telemac, Delft3D og Mike3. Disse programmene er imidlertid oftest basert på en antagelse om hydrostatisk trykk i vertikal retning. De kan da ikke brukes til å beregne overløpskoeffisienter uten kalibrering. Det er ikke funnet tidsskriftartikler der slike programmer er brukt til flomløpsberegninger.

3.1 FLOW-3D

FLOW-3D er det mest brukte programmet for flomløpsberegninger. Omtrent halvparten av alle referansene i litteraturstudien er beregnet med FLOW-3D. Programmet var tidlig ute med fokus på hydrauliske problemstillinger, og allerede på IAHR konferansen i London i 1995 viste de resultater fra beregning av en Parshall renne.

FLOW-3D skiller seg fra de andre CFD programmene ved at det bruker et ortogonalt grid i form av en boks. En kompleks geometri vil bli modellert ved å blokke ut celler samtidig med at noen celler vil bli kuttet. En kan koble flere ortogonale bokser sammen for å modellere en kompleks geometri, men boksene må stå vinkelrett på hverandre. Dette gjør at når man for eksempel skal modellere 45 graders sjakter, så vil gridlinjene og strømrretningen stå 45 grader på hverandre (Jacobsen, 2008). Dette er maksimalt ugunstig med hensyn på falsk diffusjon. I kapittel 5 i denne rapporten er det referert anbefalinger om hvordan grid skal lages. Her anbefales det at det lages heksahedrale celler langs randen av et grid, som følger randen (Fig. 5.6.1). Dette er ikke mulig med FLOW-3D, men det er mulig med alle de andre programmene beskrevet i denne rapporten.

Det strukturerte ortogonale gridet gjør det imidlertid relativt enkelt å definere geometrien og grensebetingelsene for et gitt flomløp. På grunn av denne gridoppbygningen er programmet det enkleste å bruke av alle programmene nevnt i denne rapporten. Dette kan ha bidratt til den relativt store populariteten innen vassdragshydraulikk. FLOW-3D har også markedsført seg mer mot vannbransjen enn de andre programmene beskrevet i denne rapporten. Det er gjort flere tilpasninger av programmet til vannstrømningproblemer enn de andre programmene. Det har bl. a. en empirisk formel for luftinnblanding der gridet er relativt grovt i forhold til luftkonsentrasjonsgradienten.

Det finnes kompetanse på bruk av FLOW-3D for overløpsberegninger i dag i norske konsulentfirmaer.

3.2 FLUENT

FLUENT ble kjøpt opp av firmaet ANSYS i 2006, og blir derfor også kalt ANSYS FLUENT. I det videre vil programmet bare bli kalt FLUENT. Programmet er det mest brukte "general-purpose" programmet for CFD beregninger i verden. I likehet med alle slike programmer har det også en VOF algoritme og muligheter for å beregne tofasestrømning med luft og vann. Siden programmet generelt er så populært, er det også mye brukt innen internasjonal vannbransje. Ca 30 % av alle flomløpsberegningene fra litteratursøket er gjort med FLUENT. Alle disse er publisert etter 2007, noe som tyder på at programmet har økende popularitet innen dette fagfeltet.

FLUENT sin Theory Guide (2013), side 472, beskriver konveksjons-diffusjonslikningen for volumfraksjonen for VOF metoden. Her er det med et diffusivt ledd. FLUENT kan bl. a. bruke FOU, SOU eller QUICK skjemaet for å diskretisere det konvektive leddet i VOF ligningen. QUICK er et tredje ordens oppstrøms skjema. FLUENT kan også bruke en kombinasjon mellom VOF og en Level-set metode for å finne beliggenheten av fri overflate. Dette kan gi økt nøyaktighet.

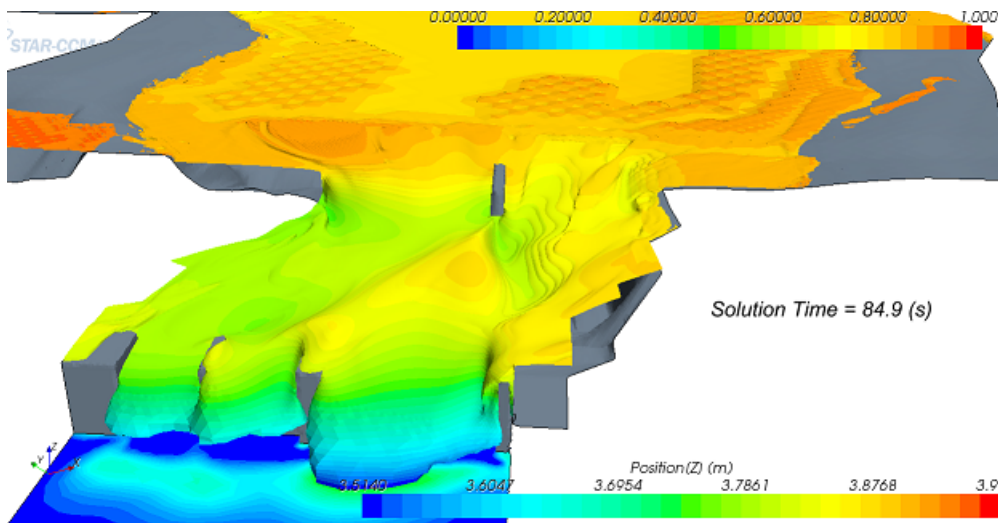
Siden FLUENT er så populært, vil det sannsynligvis finnes kompetanse på bruk av programmet i Norge. Men det er ikke funnet opplysninger om bruk av FLUENT til flomløpsberegninger i Norge.

3.3 STAR-CCM+

STAR-CCM+ er laget av firmaet CD-Adapco. Programmet ble lansert i 2004 som en oppgradering til CD-Adapco sitt tidligere program STAR-CD. STAR-CCM+ er det viktigste alterna-

tivet til ANSYS-gruppen når det gjelder generelle CFD programmer med avanserte grid. Dette er en av grunnene til at Institutt for Vann og miljøteknikk ved NTNU har brukt programmet i noen år. STAR-CCM+ har blitt brukt av flere PhD og Master studenter i forbindelse med tofasestrømning, modellering av inntak og sandfang. Det er enda ikke publisert artikler der STAR-CCM+ er testet ut på flomløp og sammenlignet med gode målinger, men det arbeides med dette på NTNU (Pedersen og Rüther, 2016).

Feurich og Olsen (2012) brukte STAR-CCM+ til å beregne vannspeilet oppstrøms Sarpfossen, der strømmingen var overkritisk. Dette er imidlertid ikke en vanlig flomløpskonstruksjon, fordi strømmingen er overkritisk oppstrøms dammen, og vannstanden over overløpet vil derfor ikke kontrollere vannføringskapasiteten. Nøyaktigheten på den beregnede vannlinjen var heller ikke veldig god. Dette kan bl. a. skyldes luftmedrivning, som ble observert i den fysiske modellen og som er vanskelig å modellere numerisk. Det ble brukt opp til 11 millioner celler, og beregningstiden var flere uker på en PC. Det ligger mer informasjon på web-siden: <http://folk.ntnu.no/nilsol/cases/sarpfossen/>



Figur 3.3.1. 3D figur av resultatene fra beregning av strømmingen over flomlukene i Sarpfossen (Feurich og Olsen, 2012).

Vingerhagen og Olsen (2012) brukte også STAR-CCM på et lukket flomløp ved Dam Innerdalen. Geometrien fra laboratorieforsøkene var dessverre usikker, så det er vanskelig å vite om det var overensstemmelse med geometrien i laboratoriet og i den numeriske modellen. Det er derfor vanskelig å vurdere nøyaktigheten av resultatene fra den numeriske modellen.

Flere MSc og PhD studenter fra Institutt for Vann og miljøteknikk ved NTNU har brukt STAR-CCM+, og disse nå jobber i norske konsulentfirmaer/NVE/vannkraftfirmaer. Det finnes derfor kompetanse i Norge for bruk av programmet til vannfaglige problemstillinger. Utenfor Norge/NTNU ser det ikke ut til at STAR-CCM+ er blitt brukt til å beregne flomløp.

3.4 CFX

CFX ble i 2003 kjøpt opp av ANSYS, som også senere kjøpte FLUENT. Programmet kalles derfor også ANSYS CFX, men i det følgende vil programmet bli kalt CFX. CFX blir regnet som

meget bra spesielt på modellering av strømming i roterende maskiner, for eksempel pumper og turbiner.

CFX ble brukt av Andersson et al (2013) til å beregne hastighetsfeltet oppstrøms lukene til dammen ved Höljes magasin i Klaraelven. Det ble gjort målinger av vannlinjene på tvers av strømrretningen oppstrøms lukene, og disse ble relativt godt modellert. Andersson et al (2013) estimerte et avvik på mellom 1 og 8 % på vannføringen i forskjellige luker i dammen. CFX er også blitt brukt til å beregne strømming i det lukkede flomløpet på Svartevannsdammen, se Kap. 4.5.3. Den tredje studien som er funnet med CFX er gjort av Yuce et al (2015), der strømming over et skrått rør ble modellert.

Det finnes i dag kompetanse på bruk av CFX i flere norske konsulentfirmaer.

3.5 OpenFOAM

OpenFOAM er et akronym for "Open source Field Operation And Manipulation". Programmet ble laget av Henry Weller fra Imperial College i London på 1980 tallet. Det ble lansert som åpen kildekode i 2004, med en forretningsmodell der inntektene til firmaet som vedlikeholder programmet kommer av support i stedet for lisensavgift. Siden den gang har dette firmaet blitt kjøpt opp og solgt av Silicon Graphics. Også flere andre firmaer er opprettet som selger support for OpenFOAM.

Siden OpenFOAM har åpen kildekode, betyr dette at programmet er gratis og at alle kan laste ned kildekoden og forandre denne. Dette er en stor fordel i forhold til de andre programmene, da lisensutgifter kan utgjøre betydelige beløp. En åpen kildekode kan også utvikles videre av forskere, slik at en PhD student kan lage nye algoritmer for programmet. Dette er vanskelig med et kommersielt program. Med nye algoritmer kan en gjøre mer avansert forskning enn om en må bruke allerede eksisterende metoder som er laget av andre. Programmet er derfor meget populært i akademiske miljøer som driver internasjonalt ledende forskning innen numerisk strømningsmekanikk.

OpenFOAM har tidligere vært relativt vanskelig å bruke, men i de siste årene er det gjort mange forbedringer mhp installasjon, grafisk brukergrensesnitt og plattform. OpenFOAM kjører i utgangspunktet kun på Linux, men flere firmaer har laget Windows versjoner, som er relativt lette å installere. Grafiske brukergrensesnitt for OpenFOAM er også laget, og flere firmaer selger støtte for OpenFOAM til en mye lavere pris en kostnaden for en lisens til de kommersielle programmene. Internasjonalt finnes det også flere kurs på OpenFOAM. OpenFOAM er allikevel noe vanskeligere å bruke enn de kommersielle konkurrentene, spesielt når det gjelder generering av gridet. Men det gir generelt sett like nøyaktige resultater som de andre programmene, og har omtrent lik regnetid.

Silicon Graphics, som bl. a. har levert den nyeste tungregnemaskinen ved NTNU, estimerte i 2011 at OpenFOAM var det nest mest brukte programmet i verden for tredimensjonale numeriske strømningsberegninger. Firmaer som Deltares i Nederland og Bundesanstalt für Wasserbau i Tyskland har siste året betydelig økt antall ansatte som arbeider med OpenFOAM. Forskningsavdelingen til vannkraftfirmaet Hydro Quebec bruker også OpenFOAM.

OpenFOAM er også brukt til å beregne strømming over overløpskonstruksjoner. Olsen (2015) beregnet strømming over et V-overløp, og fikk gode resultater for overløpskoeffisienten og

vannlinjen over flomløpet. Jacobsen (2014) fikk rimelige resultater for en standard overløpsdam. Det ligger også endel resultater fra bruk av OpenFOAM til overløpsberegninger på web-siden: <http://folk.ntnu.no/nilsol/cases/openfoam/>.

OpenFOAM er siden 2015 blitt brukt i øvinger i 4. klasse faget TVM 4155 Numerisk Modellering og Hydraulikk ved Institutt for Vann og miljøteknikk ved NTNU. Det er da brukt til å beregne et overløp. En Windows versjon brukes. Programmet brukes også av flere andre institutter på NTNU, bl. a. Institutt for Energi og Prosessteknikk og Institutt for Marin Teknikk. Maskiningeniøravdelingen ved Chalmers i Sverige har et spesielt stort miljø på OpenFOAM.

Selv om kommersielle koder i seg selv er enklere å bruke enn OpenFOAM, vil lisensprogrammene som følger med de kommersielle kodene kunne medføre problemer. Enkelte lisensprogrammer har brukermanualer på over 50 sider, og det kan tar betydelig tid å sette seg inn i disse og vedlikeholde lisensen. Her har OpenFOAM enda en fordel ved at de indirekte resurskostnadene med lisensene heller ikke er til stede.

På grunn av den store populariteten i akademiske miljøer og ingen lisenskostnader, antas det at OpenFOAM vil i økende grad bli brukt til flomløpsberegninger de kommende årene. Programmet er bare brukt i 5 % av alle referansene om flomløp i litteraturstudien, men disse referansene er kommet de siste to årene.

4. Eksempler på beregninger av flomløpskapasiteter med numeriske modeller

En oppsummering av litteraturen som er funnet på flomløpsberegninger er gitt i Appendix 1. Artikler som fokuserer på flomløp er fordelt i fem kapitler:

1. Standard overløp
2. Skarpkantede overløp og labyrintoverløp
3. Under luker
4. Bredkronet overløp
5. Lukket flomløp

Merk at dette kapittelet ikke omhandler all litteratur innen fagfeltet. Det er bare tatt med de artiklene som ble funnet i løpet av tiden som var til rådighet i denne studien.

Når resultatene fra den numeriske modellen sammenlignes med målinger, så er alle målingene hentet fra fysiske modeller. Det er ikke funnet noen målinger fra prototype overløp.

4.1 Standard overløp (Ogee)

Med standard overløp menes her det som på engelsk kalles "ogee type" overløp, og som er vist i Figur 1.1.1. Geometrien på overløpet følger kurven i Fig 1.1.1 som beskriver en parabel.

Den første artikkelen som beskriver modellering av et slikt flomløp er Savage og Johnson (2001), som brukte FLOW-3D til å beregne vannlinjer over flomløpene. De gjorde også fysiske modellforsøk, og sammenlignet disse med resultatene fra de numeriske beregningene. Her ble en vannstand oppstrøms overløpet gitt inn som en grensebetingelse, og vannføringen ble beregnet. Avvikene lå under 1 % ved simuleringer der vannføringen lå innenfor 20 % av dimensjonerende vannføring for konstruksjon av overløpet. En slik vannføring skal normalt gi null trykk over terskelen på overløpet. Ved lavere vannføringer økte avviket, til maksimalt 12 % der vannføringen var 10 % av designvannføringen. Årsaken til avviket er ikke gitt, men det er mulig at dette kommer av at gridoppløsningen ved lavere vannføringer blir lavere enn ved høyere vannføringer. Savage og Johnson (2001) brukte to grid med 160x50 og 320x100 celler i horisontal og vertikal retning. Designhøyden på overløpet var $H_d = 301$ mm. Med det finere gridet var cellestørrelsen 12 mm, og det var da ca 17 celler over dybden i kritisk snitt. Den laveste vannføringen hadde en H_o på 7 % av designhøyden, som blir 21 mm, eller 14 mm i kritisk snitt. Savage og Johnson (2001) brukte et finere grid på de lavere vannføringene, med 7.6 mm størrelse. Allikevel blir det bare omtrent to celler i dybden ved kritisk snitt. Dette er så lav oppløsning at det kan være årsak til avviket.

Chandler et al (2003) modellerte flomløpet ved Wivenhoe dammen i Australia. Dammen er 2.3 km lang og 50 meter høy, og er bygget for bl. a. å forsyne byen Brisbane med drikkevann. Flomløpskapasiteten på dammen ble designet med FLOW-3D for å redusere kostnadene i planleggingsprosessen. Kostnadene med å bruke CFD modellen var satt til 50 000 AUS \$, mens det ble antatt at et fysisk modellforsøk ville koste 200-250 000 AUS \$. Chandler et al (2003) gir ingen informasjon om gridet som ble brukt i den numeriske beregningen. Siden det ikke er sammenlignet med målinger, vet vi ikke hvor nøyaktige resultatene ble.

Ho et al (2003) brukte FLOW-3D til å modellere flere flomløp. Ett flomløp var et standard overløp, som ble modellert i 2D. Et grid med 95x98 celler ble brukt, med en foretting av gridlinjene nær oppstrøms side og over toppen av overløpet. Resultatene viste ganske store avvik sammenlignet med tall fra design manualen fra USACE: 12-16 % avvik på gjennomsnittlig vannføring. Ho et al (2003) mente at avviket skyldes at de hadde brukt et ikke-viskøst, laminært fluid i den numeriske modellen. De mente også at det høye avviket kunne skyldes at de brukte glatte veggløper, mens i virkeligheten var overflaten ru. Imidlertid ble vannlinjene over overløpet ganske bra: bedre enn 5 % avvik på dybden. Ho et al (2003) fortsatte med å modellere et idealisert overløp med et brokar i 3D. Her ble resultatene for vannføringen mye bedre: mellom 0.1 og 3.7 % avvik. Vannstanden ble også ganske bra, men ikke like bra som 2D beregningene. I tillegg til disse idealiserte modellgeometriene, ble to andre flomløp modellert: Buffalo Dam og Hume Dam i Australia. Avvikene for beregnede vannføringer lå her innenfor ca 3 % av målinger fra fysiske modellforsøk.

Gessler et al (2005) modellerte et fritt overløp på en hvelvdam med FLOW-3D, og sammenlignet resultatene med et fysisk modellforsøk. Avviket på kapasitetskurve var mellom 1 og 5 %. Det ble i studien antatt at nøyaktigheten på det fysiske modellforsøket var omtrent 3 %. Det ble observert variasjoner i det beregnede vannspeilets beliggenhet i magasinet på ca 15 cm (prototype). Gridstørrelsen ble variert mellom 378 000 og 13 millioner celler. Den minste vertikale cellestørrelsen over overløpet var mellom 15 og 30 cm når prototypen ble modellert. Vannspeilets høyde over toppen av overløpet var mellom 0.8 og 3 meter, slik at selv på de laveste vannføringene var det flere celler i vertikal retning over toppen av overløpet.

Dargahi (2006) modellerte et standard overløp med FLUENT. Han oppnådde et avvik på vannføringen mellom 1.6 og 2.9 % sammenlignet med laboratorieforsøk. Avviket på målt vannstand lå på mellom null og pluss/minus 4 %. Dargahi (2006) målte også hastighetsprofiler, og disse stemte meget bra med beregnede verdier. Det ble utført tester på gridoppløsningen ved å forfine gridet i hver av de tre retningene hver for seg. Det ble da funnet at løsningen kun var følsom for gridoppløsning i y-retningen (vertikal). En test med antall celler i y-retningen på 60 og 120 celler gav en forskjell på vannføringen på 0.15 %. Det ble da konkludert med at løsningen var praktisk talt griduavhengig. Gridet inneholdt ca 300 000 celler.

Johnson og Savage (2006) modellerte to standard overløp med litt forskjellig geometri på oppstrøms side av overløpet. Vannstanden nedstrøms ble variert også innenfor områder der den påvirkede kapasiteten på overløpet (dykket overløp). FLOW-3D programmet ble brukt og verifisert mot laboratorieforsøk. Avviket mellom målt og beregnet vannføring var mellom -0.4 % og 2.8 %. Vannlinjen over overløpet ble ikke målt, men trykket langs et profil over toppen av overløpskonstruksjonen ble målt. Figurene som viser beregnede trykk sammen med verdiene fra laboratoriet har god overensstemmelse. Det ble ikke gitt noen informasjon om gridstørrelser.

Turan et al (2008) brukte FLUENT til å beregne et overløp i tilknytning til en fisketrapp. Overløpet var utformet med en standard ogee form, men sett ovenfra var terskelen en halvsirkel. Nivået på oppstrøms vannstand ble gitt til programmet, som regnet ut vannføringen. Turan et al (2008) sammenlignet resultatene med fysiske modellforsøk i skala 1:24. Det ble brukt hybrider av strukturerte og ustrukturerte grid med ca 1 og 2 millioner celler. Figurer som viser beregnede og observerte vannlinjer faller sammen. Avviket er ca 5 % for det fine gridet. Det er også gitt Kapasitetskurvene viser maksmalt avvik på 1-2 % mellom målinger og beregninger. I tillegg er det gitt målte og beregnede trykkverdier. Disse faller også sammen. Turan et al (2008) testet også å sette en luke på overløpet, slik at vannet går over luken og faller ned på andre siden der

det dannes en luftflomme. Målte og beregnede verdier av vannlinjene for dette oppsettet stemte også bra overens.

Chanel (2008) gjorde sin MSc oppgave på å modellere tre flomløp i Canada med FLOW-3D. Enkelte av resultatene ble publisert av Chanel og Doering (2008). Flomløpene på de tre dammene Wuskwatim, Limestone og Conawapa ble modellert. Modelleringen ble gjort ved å gi inn oppstrøms og nedstrøms vannivå, og så la programmet beregne vannføringen. Det ble brukt to grid med kubiske gridceller, som hadde størrelse 0.5 og 1 meter. Det ble simulert 7-9 forskjellige vannstander for hver av de tre dammene. Avvikene mellom beregnede og målte vannføringer lå mellom 0.1 og 24.4 %. Det dårligste resultatet med 24 % avvik kom for den laveste vannstanden for Conawapa overløpet. Med et grid som hadde kubiske celler med størrelse 0.5 meter var det ikke mer enn ca 3 vannfylte celler over overløpet. Dette er relativt få celler, og kan være en årsak til avviket. Chanel (2008) modellerte også med et grovere grid med 1 m celler, og fikk da et mindre avvik, på 21.9 %. Imidlertid var dette kun en av 24 simuleringer. De andre 23 beregningene med andre vannstander og geometrier hadde alle avvik under 12 % av vannføringen. Chanel (2008) sammenlignet også beregnede og målte vannlinjer over overløpet. Fra figurene ser det ut som om dette stemmer innenfor marginer på noen prosent.

Kökpınar et al (2012) beregnet strømmingen over flomløpet på Kavsak dammen i Tyrkia med FLOW-3D. Dette ble sammenlignet med et fysisk modellforsøk, og en fikk i snitt et avvik på vannføringen på 3.2 %. Vannspeilet over flomløpet ble også sammenlignet med målinger. I figuren virker det som om avviket er mindre enn 5 % for mye av vannlinjen. Etter overløpet er det et vannstandssprang, og da er avviket mye større. Et vannstandssprang er mye vanskeligere å modellere enn et overløp, bl. a. pga luftmedrivning. Så et stort avvik her er ikke uventet. Et grid med 6.2 millioner celler ble brukt, hvorav 4.4 millioner var aktive.

Rahimzadeh et al (2012) brukte FLUENT til å beregne strømming over et idealisert overløp. I stedet for et vanlig "ogee" parabelprofil, var toppen av overløpet utformet som et segment av en sirkel. Dette hadde en radius på 15.2 cm i laboratoriemodellen som ble brukt til å teste resultatene. Rahimzadeh et al (2012) brukte forskjellige turbulensmodeller, og fant noe forskjell i hastigheter og trykk ettersom hvilken modell de brukte. Beliggenheten av det beregnede vannspeilet var imidlertid uavhengig av hvilken turbulensmodell som ble brukt. Parameter tester for forskjellige gridstørrelser ble utført, og det endelige gridet hadde ca 200 000 celler.

Daneshkhah og Vosoughifar (2012) brukte FLUENT til å beregne strømmingen over et standard overløp med forskjellige turbulensmodeller. Et ikke-ortogonalt grid med kvadrilaterale celler ble brukt, laget med en metode som heter "paving". Avviket mellom målte og beregnede vannføringer var mellom 10 og 11 % for de forskjellige turbulensmodellene.

Jacobsen (2014) modellerte flomløpet på Rifle Creek dammen i Australia med OpenFOAM. Det ble gjort en test av et standard 2D overløp der en sammenlignet OpenFOAM resultatene med standard overløpsformler og resultater fra FLOW-3D. Fire vannstander over overløpet ble beregnet med OpenFOAM, og avviket var mellom 0 og 3.5 % i forhold til en fysisk modell. Rifle Creek dammen ble modellert med et todimensjonalt grid med 650 000 celler. Gridet hadde en forfining i områder med store gradienter og langs vannoverflaten i magasinet.

Kanyabujinja (2015) modellerte to standard overløp med litt forskjellige geometrier. Programmet FLUENT ble brukt. Både et 2D og et 3D grid ble brukt, med triangulære celler i 2D og kvadrilaterale celler i 3D. Det ble forsøkt å bruke tetrahedrale celler i 3D, men dette førte til divergens av løsningen. Det tredimensjonale gridet hadde en cellediameter på 20 mm, mens det

todimensjonale gridet hadde cellestørrelse på gjennomsnittlig 4 mm. Avviket på beregnet og målt vannføring var mellom 4 og 12 % for den todimensjonale beregningen, og mellom 3 og 7.4 % for den tredimensjonale beregningen. Alle avvikene var positive, dvs. den numeriske modellen gav alltid høyere vannføring enn den fysiske modellen. Vannstandene i et lengdeprofil av modellen var også beregnet og målt, og figurene viser et avvik på opptil 40 % i ett punkt nedstrøms overløpet. Det ble i tillegg målt og beregnet trykk over overløpet, som viste noe avvik. Figurene i rapporten viser ganske stor diffusjon av VOF verdien oppstrøms overløpet, tilsvarende Fig. 2.4.1. Beregningstiden med FLUENT var over en måned for en dynamisk simulering på fem minutter.

Yuce et al (2015) brukte CFX til å beregne strømning over et overløp som var utformet som en liggende sylinder. Denne var montert i en kanal med en skrå vinkel på hovedstrømretningen. Et grid basert på tetrahedrale celler var brukt, som var adaptivt nær vannoverflaten. Parametre som beskriver gridet er gitt, samt en vurdering av dets kvalitet. Mange fargefigurer er presentert, men ingen tabeller/figurer med målte og beregnede vannspeil eller vannføringer er gitt. Det er derfor ikke mulig å vurdere nøyaktigheten av resultatene.

Pedersen og Rüther (2016) arbeider med å modellere et standard overløp med STAR-CCM+. Et viktig element i studien er å se på hvordan nedstrøms vannivå påvirker overløpskapasiteten, og hvordan den numeriske modellen klarer å beregne en slik situasjon. Foreløpige resultater viser et maksimum avvik på 8.5 % på kapasitetskurven i forhold til målinger fra en fysisk modell. Mer detaljerte målinger og beregninger er under utførelse.

4.2 Skarpkantede overløp og labyrintoverløp

Skarpkantede overløp defineres ved at selve overløpet er en vertikal metallplate som vannet strømmer over. På nedstrøms side av metallplaten dannes det en luftlomme. Hvis en ser i strømretningen, kan en ha både rektangulære og trekantformede overløp. Trekantformede skarpkantede overløp brukes ofte i målekasser i hydrauliske laboratorier.

Savage et al (2004) modellerte et labyrintoverløp med FLOW-3D. Dette var en av de tidligste CFD modelleringene av overløp, og et labyrintoverløp har en nokså kompleks geometri. Det ble også gjort et fysisk modellforsøk samtidig. I begge tilfellene modellerte en to sykler av V-formene i overløpet. Et nøstet grid ble brukt for å gi finere celler over overløpskanten. Det ble gjort griduavhengighetstester ved å starte med et grovt grid, og så forfine det til resultatene ble de samme. Savage et al (2004) fant at det resulterende gridet da hadde ca 10 celler mellom toppen av overløpet og vannflaten. Avvikene mellom beregnede og målte vannføringer var mellom null og 15 % (10 % på beregning av H). En sammenlignet også vannføringskurvene fra laboratorieforsøket mot empiriske formler for labyrintoverløp, og fikk da et mye større avvik enn med den numeriske modellen.

Abd El-Hady Rady (2011) modellerte et skarpkantet rektangulært overløp med FLOW-3D. Siden dette programmet bruker et ortogonalt grid, var det spesielt godt egnet til slike geometrier. Gridcellene kan følge veggen på overløpet uten å kuttes. Resultatene fra beregningene var vannføringer med ca 3 % avvik sammenlignet med modellforsøk. Artikkelen beskriver VOF metoden, der en ligning gies for volumfraksjonen. Denne inneholder ikke et diffusivt ledd. Et grid med ca 41 000 celler ble brukt.

Aydin og Emiroglu (2013) modellerte et labyrintoverløp på siden av en rett kanal. CFD programmet FLUENT ble brukt. C -faktoren i overløpsformelen ble bestemt for 12 forskjellige utforminger av geometrien på labyrintoverløpet, og en rekke forskjellige vannføringer for hver geometri. Vinklene i overløpet ble variert, sammen med vanddybden oppstrøms overløpet og bredden av kanalen. Grid med mellom 290 000 og 640 000 celler ble brukt. De målte C -faktorene ble plottet som funksjon av vanddyden, og en regresjonslinje ble laget. Gjennomsnittlig avvik mellom beregnet og målte C -faktorer var på ca 11 %. Aydin og Emiroglu (2013) brukte 40 indre iterasjoner pr. tidssteg, og forsikret seg om at residualene gikk ned med minst tre størrelsesordner for hvert tidssteg. De beregnet også griduavhengighet ved å sammenligne resultatene for tre grid med forskjellig antall celler.

Duru (2014) brukte FLOW-3D til å modellere et skarpkantet overløp som en del av sin MSc oppgave. På en valgt geometri fikk han et avvik på vannføringen på 0.06 % for det fineste gridet (4 mm celler). Han gjorde også en gridstudie, og med bare en økning til 6 mm celler økte avviket på vannføringen til 2.33 %. Med 10 mm celler var avviket 12 %. Beregningstiden med det fineste gridet var 32 timer, mens på det mellomste gridet var det bare 2.3 timer. Det groveste gridet hadde en beregningstid på 15 minutter. Dette viser at det er helt nødvendig å gjøre en parameter-test på gridet i en CFD beregning. Det viser også at en kan få resultater med rimelige regneressurser, men at disse kan være meget unøyaktige. Duru (2014) gjorde også en beregning det vannet strømmet både over og under en luke. Her ble avviket mellom målte og beregnede vannføringer 1.2 - 7 %. Duru (2014) undersøkte også hvordan turbulensmodellen påvirket resultatene ved også å teste en RNG modell i tillegg til k -epsilon modellen. Dette gav ikke vesentlig forskjellige resultater, noe som også er observert i andre studier med fritt overløp.

Den siste parameteren Duru (2014) undersøkte hvor mye av geometrien oppstrøms overløpet som må modelleres i de numeriske modellen. Beregningstiden for regneprogrammet øker med størrelsen av geometrien. Høyden på overløpet som ble testet var 15 cm, og i standardberegningen med 0.26 % avvik på vannføringen var lengden av oppstrøms kanal 2.5 m. Tester ble også gjort med 1.5 meter og 1.0 meter. Dette gav en økning av avviket til 1.7 og 1.8 %. Beregningstiden med 1 meters lengde gikk ned fra 32 timer til 10 timer.

4.3 Under luker

Mange flomløp består delvis av luker som kan åpnes under flommer. Segmentluker kan løftes opp, slik at vannet strømmer under luka.

Teklemariam et al (2002) brukte FLOW-3D til å beregne vannføringskapasiteten for flomløpet ved Conawapa dammen, i et prosjekt for Manitoba Hydro i Canada. Her løftes en segmentluke, og vannet strømmer under luken. Luken er helt åpen og berører ikke vannoverflaten. To vannføringer ble beregnet, som begge stemte innenfor 1.5 % avvik i forhold til resultater fra fysiske modellforsøk. Det er ikke gitt detaljer om gridoppløsning etc.

Feurich og Rutschmann (2005) brukte FLOW-3D til å beregne kapasiteten til flomløpet på Merowe dammen i Sudan. Her var segmentluker montert over et vanlig overløp. Lukene var åpne under flommen som ble modellert. Resultatene ble sammenlignet med et fysisk modellforsøk utført ved Universitetet i Innsbruck. Vannføringen ble gitt inn til dataprogrammet, som beregnet vannstanden oppstrøms dammen. Avviket mellom beregnet og målt vannstand var mellom 0.7 og 4.3 prosent for et grovt grid, og mellom 0.7 og 1.2 % for et fint grid. Det grove gridet hadde

104 000 celler, mens det fine gridet hadde 323 000 celler. Beregningstiden var mellom 12 og 15 timer på en PC.

I tillegg til å modellere vanlige overløp, beregnet også Chanel og Doering (2008) strøming under luker for tre flomløp med forskjellige geometrier. FLOW-3D ble brukt, og nøyaktigheten på resultatene var i samme størrelsesorden som beregningene uten luker. Avviket på vannføringskurven var mellom +3 til -8 %, avhengig av P/H_d forholdet (som er definert i Fig. 1.1.1). Det ble brukt kubiske celler i både vanlige grid og nøstede grid. De vanlige gridene hadde celler med størrelse 1 m og 0.5 m. De nøstede gridene hadde celler med størrelser mellom 0.125 meter og 1 meter. Chanel og Doering (2008) gir en tabell med beregnede avvik for en gitt lukehøyde på en av dammene. Da er avviket mellom målte og beregnede vannføringer mellom 8.0 og 9.8 % for det grove gridet, mens det fine gridet har avvik på mellom 0.2 og 1.9 %. Chanel (2008) oppgir at med vanlige grid som ikke er nøstede er avviket mellom 13 og 17 % for celler med 1 meter størrelse, mens for celler med 0.5 meter størrelse er avviket mellom 14 og 16%. Det er tydelig at nøyaktigheten på resultatene var svært avhengige av gridoppløsningen.

Li et al (2011) brukte Fluent til å regne på en relativ kompleks geometri av Canton Dam i USA. Programmet FLUENT ble brukt, der en VOF metode ble benyttet for å finne det frie vannspeilet. I dammen er det to flomløp: et med luker og et standard overløp. Begge flomløpene ble modellert i samme gridet, samtidig med at strømmingen i en del av magasinet ble modellert. Også deler av elven nedstrøms dammen ble modellert. Beregningene ble verifisert med en fysisk modellstudie, men kun hastigheter og trykk i enkelte punkter i magasinet oppstrøms overløpene ble brukt for sammenligningen. Her ble avviket mellom målte og beregnede vannhastigheter under 10 %. Det ble brukt et grid på 1.3 millioner celler. Dette var relativt grovt tatt i betraktning av geometrien var veldig kompleks med mange luker. For eksempel ble en lukeåpning modellert med kun 12 celler på tvers av strømmingen. Figurer av gridet viser brokar som ble modellert med kun tre celler på tvers av strømmingen. Beregningstiden på en konfigurasjon av geometri/vannføring var mellom tre og fire uker på en arbeidsstasjon med Xeon 3.4 GHz prosessor. Dette var sannsynligvis årsaken til at en ikke kunne bruke et finere grid.

Andersson et al (2013) beregnet strømmingen i flomløpet ved Høljes magasin i Sverige. Programmet CFX ble benyttet. Gridet ble laget av tetrahedrale celler med et lag med prismeceller langs veggene/bunnen av geometrien. I en tester for gridkonvergens ble det brukt mellom 1.5 og 8.8 millioner noder. To strømmingssituasjoner ble modellert: En med strømming under en luke, og en annen med åpne luker. For det siste tilfelle, strømmet vannet gjennom tre luker. Vannføringen gjennom disse ble målt i en fysisk modellen og sammenlignet med beregningene. Avviket var mellom 1 og 8 % når en brukte k -epsilon turbulensmodellen. Med en Reynolds stress modell gikk maksimalt avvik ned fra 7.9 % til 6.9 %. Andersson et al (2013) sammenlignet også målte og beregnede vannnivåer i to tverrprofiler nedstrøms overløpskronen. Maksimalt avvik var her ca 30 %, mens mesteparten av profilet har et avvik på 5-10 %. Beregningstiden på en 40 kjerners datamaskin var 2-3 dager når man brukte en Reynolds stress modell. Denne trengte lenger beregningstid enn k -epsilon modellen.

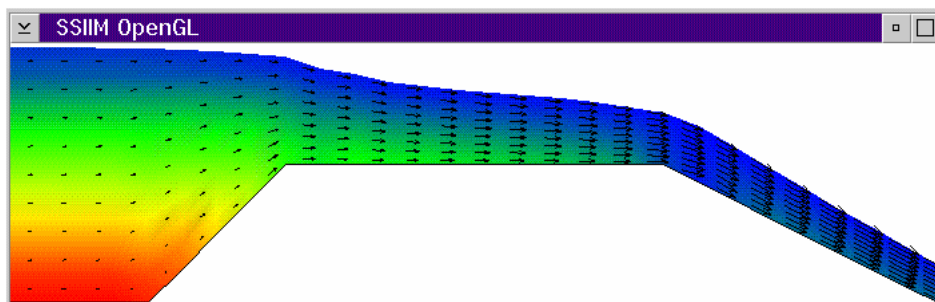
Andersson et al (2013) gjorde flere tester for gridkonvergens. En av testene var å beregne en Grid Convergence Index (GCI) for flere grid med forskjellige størrelser. En valgte da ut et tverrprofil nedstrøms overløpskronen, og interpolerte der et hastighetsprofil på tvers av strømmen i de samme punktene med de forskjellige gridene. Forskjellen i verdiene ble så beregnet. Gjennomsnittlig avvik mellom det fineste og det nest fineste gridet var på ca 3 %. For det grovste gridet var avviket på 7.1 %. Maksimum avvik i ett punkt var på 32 %. Dette var et punkt ved veggen.

Andersson et al (2013) gjorde også en test for gridkonvergens ved å estimere volumet av celler som hadde en blanding av luft og vann mellom 10 og 90 %. Hvis det ikke er luftinnblanding, så skal alle cellene enten ha 100 % vann eller 100 % luft. At det eksisterer celler med både luft og vann må komme av falsk diffusjon, som igjen må komme av et for grovt grid. Andersson et al (2013) delte så volumet av disse cellene på overflatearealet av gridet sett ovenfra. Dette gav en gjennomsnittlig tykkelse på det diffuse laget. En verdi på 3.9 mm ble funnet. Dette kan sees i forhold til tykkelsen på overflathinnen.

4.4 Bredkronede overløp, flomløpskanaler og Parshall renner

Hargreaves et al (2007) brukte Fluent til å beregne strømning over en firkantet boks i en renne. Boksen dekket hele bredden av renna, og var 0.7 m høy og 0.5 m lang. Geometrien lignet på et bredkronet overløp som vist i Fig. 4.4.1, men de skrå veggene oppstrøms og nedstrøms overløpet var vertikale. Beregningene ble gjort både i to og tre dimensjoner. Først ble seks forskjellige vannføringer beregnet i to dimensjoner og testet mot resultatene fra et fysisk modellforsøk. Avvikene lå da under 1 %. I den todimensjonale modellen hadde da RNG turbulensmodellen blitt brukt som standard. To andre turbulensmodeller ble også testet på den høyeste vannføringen: k -epsilon modellen og en Reynolds stress modell. Disse gav henholdsvis 2.2 % og 2.0 % avvik. Det ble også gjort en modellering med RNG modellen i et 3D grid, og dette gave 0.4 % avvik. Lengdeprofiler av vannlinjen over overløpet ble også beregnet og sammenlignet med målte verdier. Her fikk en maksimale avvik på ca 10 %. Variablene som ble sammenlignet var lengdeprofiler av vannspeilet, lengdeprofiler av trykket og vertikale profiler av vannhastigheten på flere steder. Avviket mellom målte og beregnede vannnivåer var under 10 %, og i de fleste punktene var avviket under 5 %. Gridet som ble brukt hadde opp til ca 28 000 celler i 2D. Det tredimensjonale gridet var grovere, men hadde 162 500 celler.

Haun et al (2011) modellerte også et bredkronet overløp som var nokså likt det som er vist i Fig. 4.4.1. De brukte programmene FLOW-3D og SSIIM 2, og gjorde beregningene i to dimensjoner (en celle i bredden). Resultatene ble sammenlignet med fysiske modellforsøk. Oppstrøms vannnivå ble beregnet med et avvik på mellom 1 og 3.5 %, og C -faktoren ble beregnet med et avvik på mellom 0.8 og 4.6 %. Beregningene med FLOW-3D ble gjort med 2D grid som hadde mellom 6 000 og 12 000 aktive celler. Beregningstiden på det fineste gridet var da ca 15 minutter på en 3GHz PC med en kjerne. Haun et al (2011) gjorde også beregningene med et 3D grid, men resultatene ble de samme som i 2D.



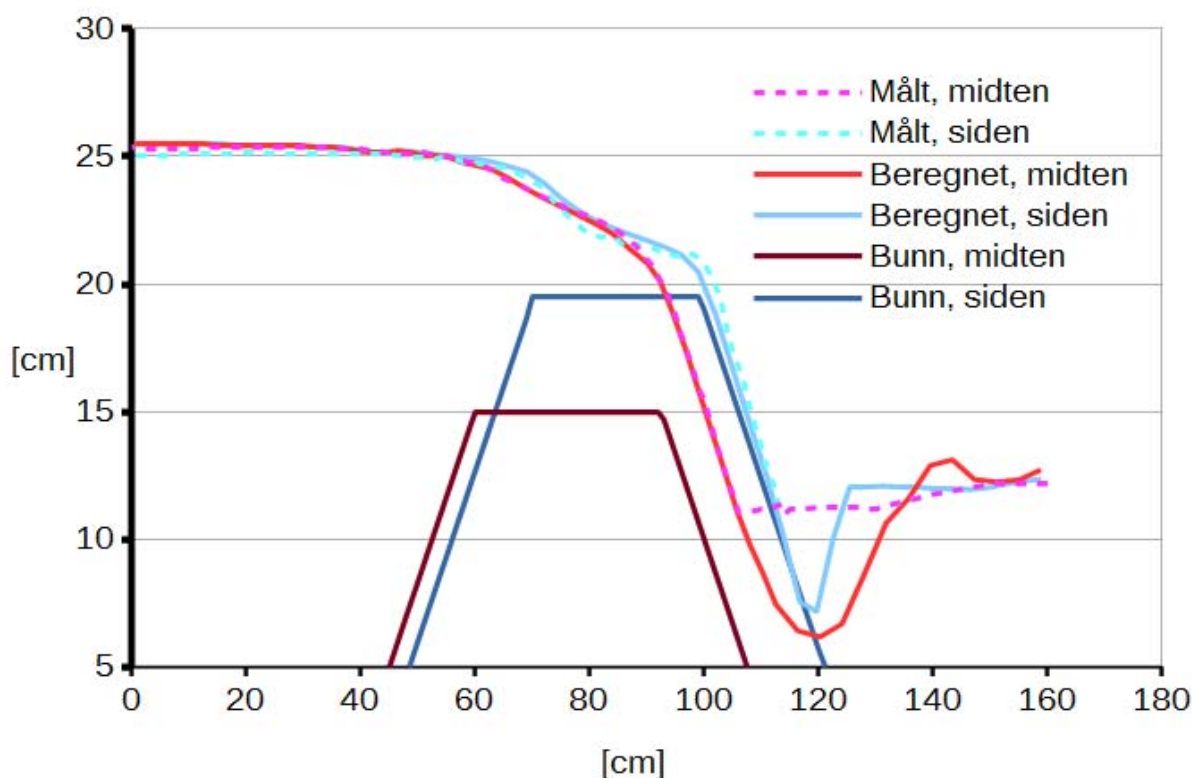
Figur 4.4.1 Modellering av bredkronet overløp, der fargene viser trykket. Rødt er stort trykk og blått er lavt trykk.

I tillegg til rene overløp, har FLOW-3D også blitt brukt til å beregne vannføringskurven for versjoner av Parshall renner (Temeepattanapongsa et al, 2013). I denne studien ble det laget generelle formler for vannføringen som funksjon av rennegeometrien. Her ble CFD resultatene brukt for geometrier der en ikke hadde målinger fra laboratoriet. I alt ble 51 rennegeometrier beregnet, mens resultatene ble sammenlignet med fysiske modellforsøk for 18 av disse. Gjennomsnittsfelen på vannføringene mellom målte og beregnede verdier var 3 %. En hadde da kuttet ut beregninger som viste mer enn 5 % avvik mellom inn og utstrømmende vannføring.

Savage et al (2014) brukte også FLOW-3D til å beregne Parshall renner. Parshall rennene blir her hevdet å kunne bestemme vannføringen med et avvik på 3-5 % (USB, 2001). Tre forskjellige geometrivariasjoner ble modellert. En griduavhengighetstest ble gjort, der kriteriet var at forskjellen i beregnet trykk ved 90 % av målepunktene skulle være mindre enn 1 %. Dette gav et grid på 209 000 celler. Vannstanden ble målt i flere punkter langs et lengdeprofil i geometrien, og sammenlignet med beregnede verdier for 21 kombinasjoner av geometri/vannføring. Maksimale avvik på vannstanden i ett punkt var på 16 %. Vannføringen i en Parshall renne blir beregnet fra målt vannstand i ett punkt. Maksimale avvik på vannstanden i dette punktet for de 21 situasjonene var 9 %. Dette tilsvarer et avvik på vannføringen på 14 %. De fleste av de beregnede strømnings situasjonene lå imidlertid godt innen for dette avviket.

Mohammadpour et al (2015) brukte FLOW-3D til å beregne vannføringen over et overløp med en flomløpskanal ved Kheir Abad Dam i Iran. Et ustrukturert grid med heksahedrale celler ble benyttet. Resultatene ble sammenlignet med målinger fra en fysisk modell. Fem vannføringer ble beregnet og målt, og resultater ble presentert for gjennomsnittlig vanndybde i kanalen, vannføring, vannhastighet og trykk. Avviket på vannføringen lå mellom 5 og 14 % på den største og henholdsvis minste vannføringen. Avviket på gjennomsnittlig vanndybde lå på mellom 11 og 17 %. Dette var ikke maksimalt avvik i ett punkt i kanalen, men gjennomsnittlig avvik i 14 punkter langs overløpet og kanalen. Den numeriske modellen overpredikerte vanndybden systematisk. Det er mulig at avviket skyldes et grovt grid, men det er ikke gitt noen informasjon om gridstørrelse i artikkelen. Det er heller ikke utført grid sensitivitetstester. En annen mulig årsak til feilkilden kan være at den valgte ruheten på veggen av modellen ikke var helt korrekt. Mohammadpour et al (2015) inkluderte ligningen for VOF fraksjonen i artikkelen, og den inneholdt ikke et diffusivt ledd.

Olsen (2015) brukte OpenFOAM til å beregne strømmingen over et bredkronet v-overløp. Overløpet hadde et V-formet tverrprofil, der overløpskronen var lavere midt på overløpet enn på sidene. Vannføringen ble gitt inn i programmet, som beregnet vannlinjen over overløpet. Vannlinjen i to lengdeprofiler er gitt i Fig. 4.4.2. Vi ser at avviket mellom målte og beregnede nivåer på vannlinjen ikke er mer enn noen millimeter. Men siden vanndybden på siden av overløpet kun er noen millimeter, blir det prosentvise avviket ganske stort. Avviket langs senterlinjen er i snitt ikke mer enn 4.5 %. Merk at den beregnede og målte vannstanden oppstrøms overløpet ikke her helt identisk, avviket var på 1.6 mm, eller ca 1.6 %. Dette betyr at det også vil være ca 2 % avvik mellom beregnet og målt C-faktor for overløpet. Mer informasjon om denne beregningen inkludert måledata og geometri/STL fil er gitt på web-siden: <http://folk.ntnu.no/nilsol/cases/vweir/>.



Figur 4.4.2. Lengdeprofiler av vannlinjer over et v-formet oveløp. Beregningene er utført med OpenFOAM (Olsen, 2015). Strømretningen er fra venstre mot høyre.

4.5 Lukkede flomløp

Lukkede flomløp brukes mer i Norge enn i de fleste andre land. Et lukket flomløp består ofte av en fast overløpsterskel, en samlekanal (badekar) og en tunnel. Tunnelen har ofte flere grener fra samlekanalen. Disse grenene kommer sammen til en tunnel. Vannet blir så ofte ført nedover i en skrå sjakt, og en har deretter en lengre horisontal tunnel som fører vannet ut i en elv. Kapasiteten til et lukket flomløp begrenses av oppstrøms terskel for lave vannføringer, og kapasiteten til sjakt/tunnel ved høye vannføringer. Ved lave vannføringer og et standard overløp, kan en bruke overløpsformelen (Ligning 1) til å beregne kapasiteten. Dette vil vanligvis gi et godt svar. På høye vannføringer vil sjakt og tunnel gå fulle, og vi vil ikke lenger ha friskeilstrømning der. Kapasiteten er da en funksjon av høydeforskjellen mellom vannspeilet i magasinet og vannspeilet i elven nedenfor. Denne høydeforskjellen kan ofte være to størrelsesordner større enn vannstanden over overløpet. En meter økt vannspeil i magasinet vil derfor føre til svært liten økning i kapasiteten på flomløpet. Vannstand-vannføringskurven for denne situasjonen vil derfor være nesten vertikal, se for eksempel Fig. 1.2.2. En slik situasjon vil være ugunstig for sikkerheten til dammen, da vannføringen gjennom flomløpet øker svært lite ved økende vannstand i magasinet. Damsikkerhetsforskriftene tillater heller ikke at sjakt/tunnel går fullt ved dimensjonerende vannføring/flom. Et viktig spørsmålet er derfor: Ved hvilken vannføring/vannstand vil en ikke lenger få fritt vannspeil gjennom tunnelen/sjakten?

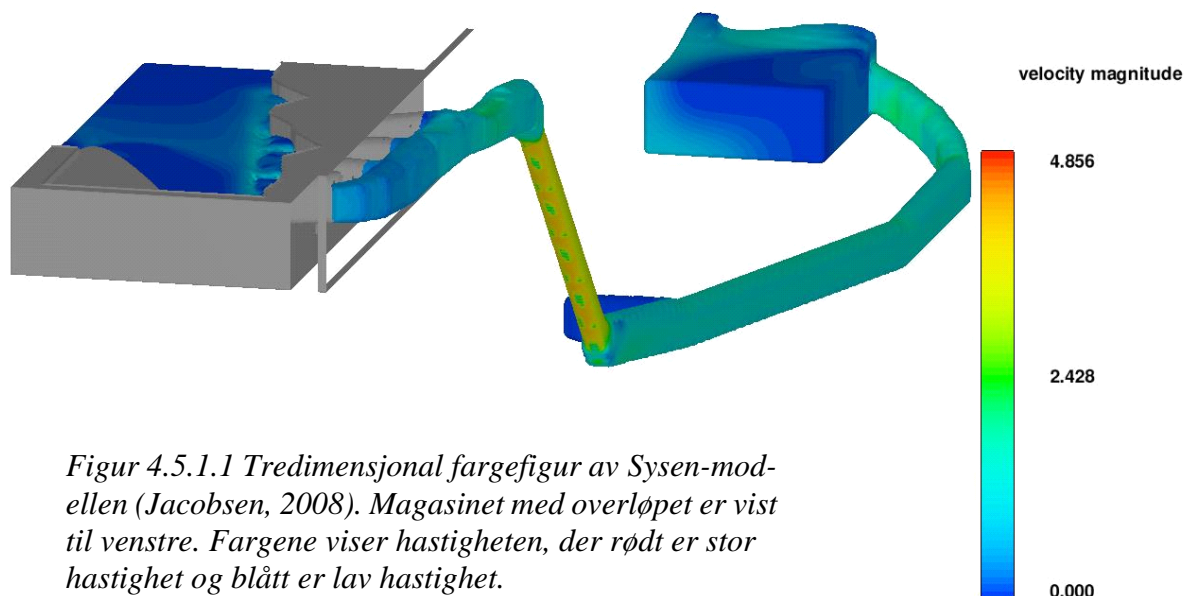
Et problem her er fenomenet luftmedrivning og luftinnblanding, som beskrevet i Kap. 1.3 og 2.7. Vann har en overflatespenning som demper både turbulens og prosessen som blander inn luft. Først når turbulensen er så stor at overflatespenningen brytes, vil det bli blandet inn luftbobler. Siden overflatespenningen for vann er lik i prototypen og laboriemodellen, vil den fysiske modellen underestimere turbulensmengden som må til for å få luftinnblanding. Luftboblene som dannes i vannet vil heller ikke skalere linært med modellen, så boblene vil stige relativt raskere i en fysisk modell enn i en prototype. Disse to effektene gjør at en prototype sjakt vil ha større luftkonsentrasjoner enn en laboratoriesjakt, selv om en bruker Froude sin modell til skaleringen (Chanson, 2000; Chanson et al, 2000).

Luften kan påvirke kapasiteten på tunnelen på flere måter. En innblanding av for eksempel 30 % luft vil føre til at vannføringskapasiteten reduseres til ca 70 %, så lenge fluidhastigheten er den samme.

Til nå er det i Norge modellert tre lukkede flomløp med CFD: Sysendammen, Innerdalen og Svartevassdammen. Hver av disse tre beregningene er beskrevet i et underkapittel.

4.5.1 Sysendammen

Sysendammen er en fyllingsdam som ligger på vestsiden av Hardangervidda. Den demmer opp Sysenvatnet som brukes som vannkraftmagasin. Dammen har et lukket flomløp. Dette ble i 2008 undersøkt i en fysisk modell i laboriet ved NTNU (Birkeland, 2008). Samtidig ble flomløpet modellert med FLOW-3D programmet (Jacobsen, 2008).



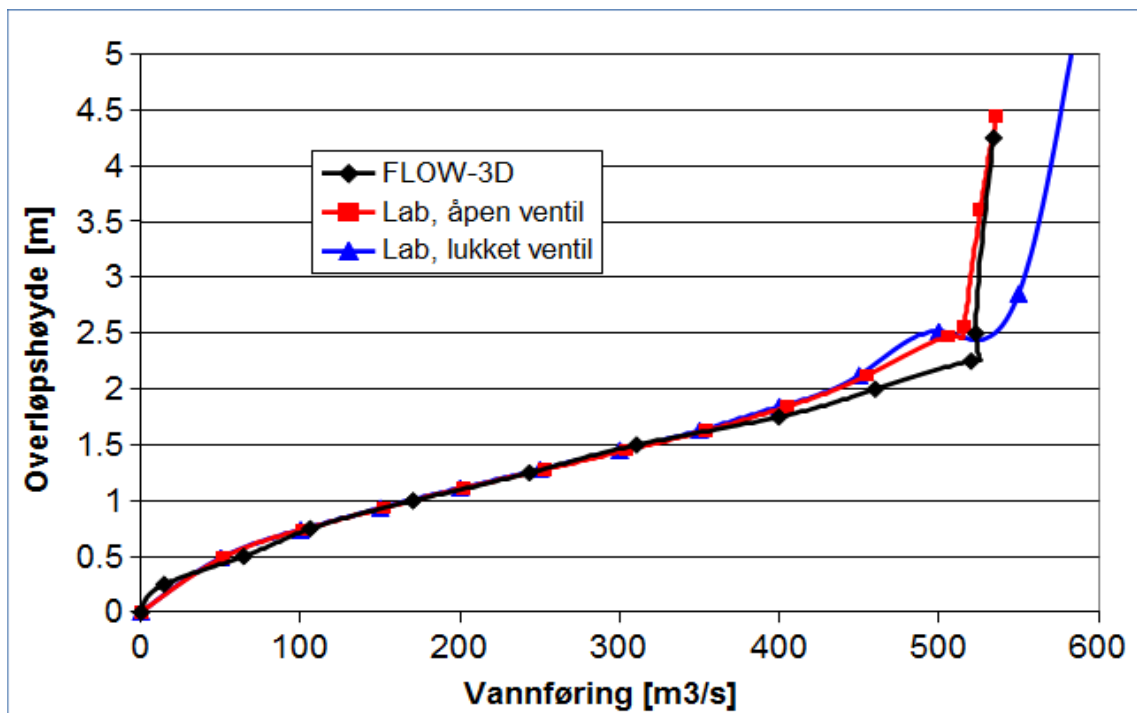
Figur 4.5.1.1 Tredimensjonal fargefigur av Sysen-modellen (Jacobsen, 2008). Magasinet med overløpet er vist til venstre. Fargene viser hastigheten, der rødt er stor hastighet og blått er lav hastighet.

En drift-fluks metode ble brukt i FLOW-3D, der luftkonsentrasjonen ble beregnet med en differensialligning som beskrevet i Kap. 2. FLOW-3D fant tidssteget automatisk basert på Courant

tallet. Et andre ordens oppstrøms TVD skjema ble brukt til diskretisering av det konvekktive ledet. Denne metoden er en av de bedre når det gjelder å få minst mulig falsk diffusjon.

Området rundt overløpskronen ble modellert med forskjellige grid. Denne simuleringen var likt et standard overløp. Så lenge tunnelen ikke fyltes, og vannivået nedstrøms overløpskronen ikke påvirket kapasiteten, så gav disse beregningene riktig kapasitetskurve på lave vannføringer. På høyere vannføringer ble hele tunnelsystemet modellert, som vist i Fig. 4.5.1.1. Her ble fem blokker brukt. FLOW-3D bruker en blanding mellom Dirichlet (gitte verdier) og Neumann (gitte gradienter, ofte nullgradient) grensebetingelser mellom blokkene.

Den fysiske modellen viste (Fig. 1.2.3) at det kunne oppstå et stort undertrykk i sjakten i det lukkede flomløpet. Dette er ikke fysisk mulig. For å hindre undertrykket ble det laget en ventil i bunnen av sjakta, der det kunne suges inn luft. Det fysiske modellforsøket gav derfor to kapasitetskurver: en med åpen og en med lukket ventil. De numeriske beregningene modellerte ikke ventilen, slik at den eneste luften som ble tatt med inn i systemet kom fra oppstrøms ende. Dette tilsvarte en situasjon med en lukket ventil i den fysiske modellstudien. Den beregnede og de to målte kapasitetskurvene er gitt i Fig. 4.5.1.2.



Figur 4.5.1.2 Kapasitetskurver for flomløpet på Sysendammen: Målt (rød, blå) og beregnet (sort) kurve.

Kurven viser at beregningene stemmer meget bra for vannføringer under ca. 350 m³/s. På vannføringer på ca 500 m³/s har en det største avviket på ca 10 %. Ved de høyeste beregnede vannstandene på 4.5 m er avviket på 7 %.

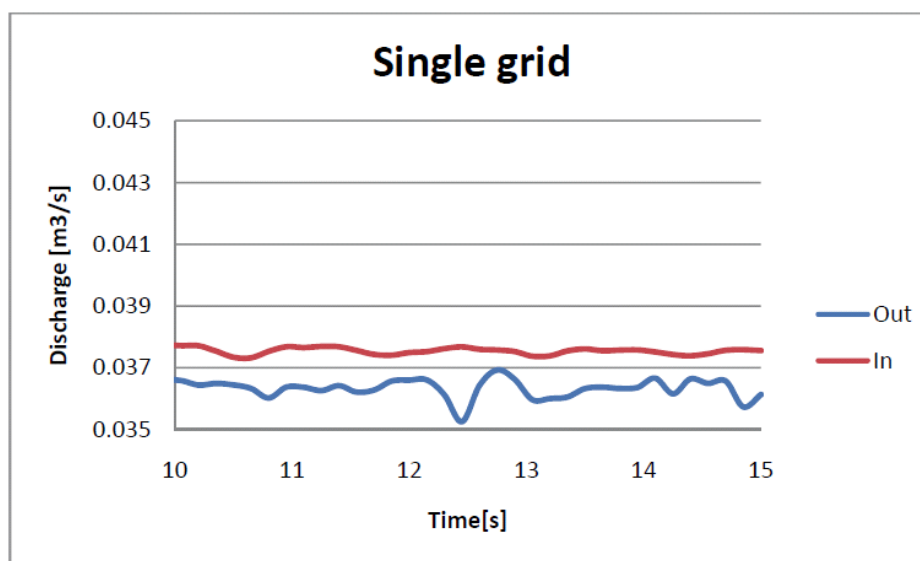
Jacobsen (2008) bemerket av badekaret i flomløpssystemet ikke hadde helt riktig geometri, og at dette kunne være en årsak til avvik. For vannføringer i området 300-500 m³/s, kan en årsak kan være at luftmedrivningen og luftkonsentrasjonene ikke er riktige. Siden luftkonsentras-

jonene ikke ble målt i den fysiske modellen, var det ikke mulig å finne ut av om dette var årsaken til avvikene.

Jacobsen (2008) pekte også på at det kunne være usikkerheter i ruheten som ble brukt i den numeriske modellen. Gummilister ble limt på innsiden av rørene i den fysiske modellen. Det er da tilfeldig om en list havner i et område med stor eller lav hastighet der en har ikke-uniform strømning. Der det er endringer i tverrsnittet, for eksempel på bunnen av sjakta, vil en få høye hastigheter langs bunnen og lavere hastigheter langs toppen av tunnelen. Er listen i et område med stor hastighet vil en få større tap enn om den er i et område med lav hastighet.

Det ble ikke foretatt noen tester av gridoppløsningen for hele tunnelsystemet fordi det ikke var praktisk mulig å forfine gridet pga lange beregningstider. Overgangen mellom skråsjakta og nedstrøms tunnel er en ekspansjon der tverrsnittsarealet dobles, samtidig som at retningen på tunnelen endres 45 grader. Det er sannsynlig at her er det et stort singulærtap, og antall gridceller på tvers av strømningen her var bare 8. Sannsynligvis ville en fått et mer nøyaktig beregnet falltap med flere celler.

Jacobsen (2008) påpekte også at et problem med FLOW-3D beregningene var at vannføringen inn og ut av den numeriske modellen ikke alltid var den samme. Dette ble også observert av Teemeepattanapongsa et al (2013), som ikke brukte beregninger der avviket mellom disse størrelsene ble for stor. Fig. 4.5.1.3 viser at avviket kunne ligge i størrelsesorden 5 %. Jacobsen (2008) brukte en midlet verdi av inn og utstrømmende vannføring.



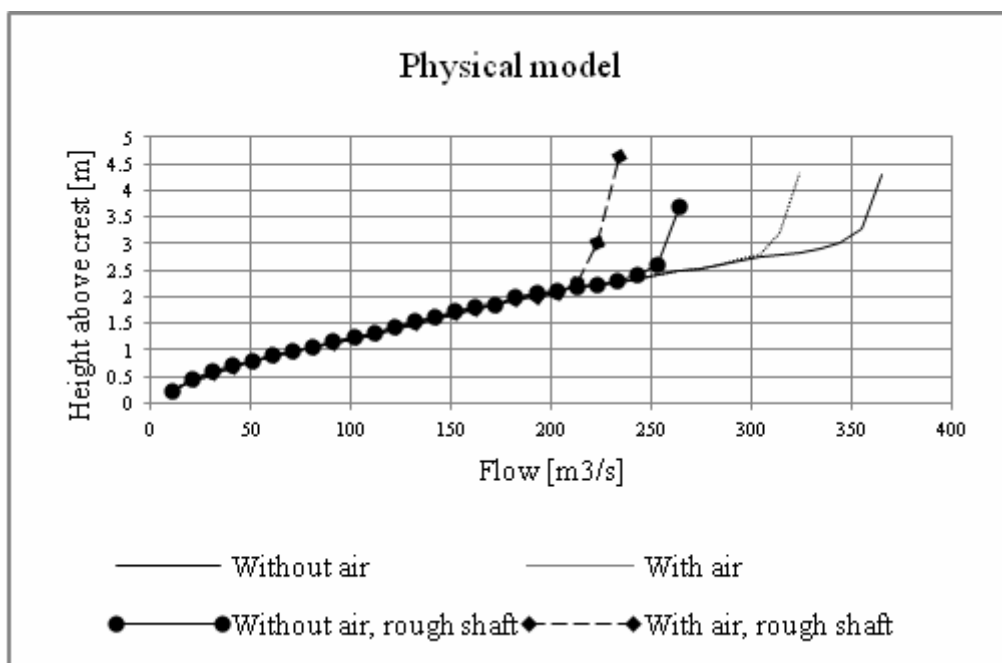
Figur 4.5.1.3 Eksempel på numerisk beregnet vannføring inn og ut av flomløpet på Sysendammen, der FLOW-3D er benyttet (Jacobsen, 2008).

En fordel med den numeriske modelleringen av Sysendammen var at den pågikk samtidig med laboratorieforsøket. Derved kunne alle data for geometri som manglet i tegningene hentes fra laboratoriemodellen. De andre to numeriske beregningene av lukkede flomløp hadde ikke denne fordelen.

4.5.2 Dam Innerdalen

Innerdalsdammen ligger på grensen mellom kommunene Tynset og Rennebu. Det lukkede flomløpet ble i 2007 undersøkt med en fysisk modellstudie i laboratoriet ved NTNU (Røneid og Sæter, 2007). Dette var ett av de første modellforsøkene med lukket flomløp på Vassdragslaboratoriet ved NTNU. Før år 2000 ble slike forsøk gjort på SINTEF-NHL. I laboratorieforsøket ble det undersøkt endel interessante temaer som det ikke ble sett på i senere modellforsøk, bl. a. hvordan overflatespenninger, ruhet og luft påvirker flomløpskapasiteten. Figur 4.5.2.1 viser noen resultater fra laboratorieforsøket, der ruheten og mengden luft inn til tunnelen fra en lufteventil er variert.

Laboratoriemodellen ble laget av plastrør, og var derved hydraulisk glatt. For å modellere en råsprengt tunnel, ble det lagt inn sparkelmasse på innsiden av rørene, sammen med 4-6 mm stein. Dette tilsvarte antatt ruhetsstørrelse i prototypen.



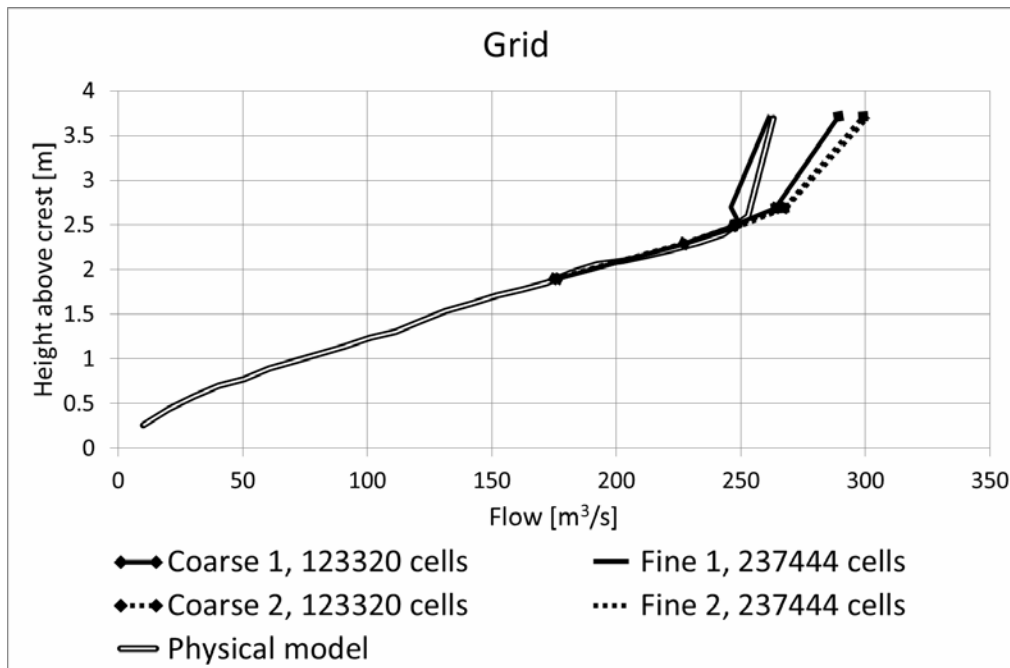
Figur 4.5.2.1. Kapasitetskurver for flomløpet på Dam Innerdalen med parametertester.

For å motvirke undertrykk i systemet, ble det lagt til lufting i den fysiske modellen, via en ventil. Resultatene i Fig. 4.5.2.1 viser effekten av både lufting og ruhet. For lave vannføringer er det overløpet ved magasinet som bestemmer kapasiteten, og resultatene er derfor uavhengig av ruhet og luftmedrivning i sjakta. Men for store vannføringer vil luftinnblanding og ruhet bety mye. Dette er fordi kapasiteten til systemet begrenses av energitapet i tunnelen. Energitapet består av friksjonstap og singularøstap, og ruheten har mye å si på friksjonstapet. Luftingen har også mye å si, delvis fordi undertrykket gjør at en får større trykkgradienter i strømrørningen, og dermed større vannhastighet. Men luftinnblandingen fører også til at det effektive arealet for vannstrømmen blir mindre, som fører til lavere vannføring.

Røneid og Sæter (2007) undersøkte effekten av å bryte overflatespenningene ved å bruke en viss mengde såpe i vannet. Kapasitetskurven med og uten såpe ble presentert, som viste at en fikk

ca 4 % mindre maksimalvannføring med såpe i vannet. Såpemengden ble ikke variert, så det kan hende at mer såpe ville gitt større avvik.

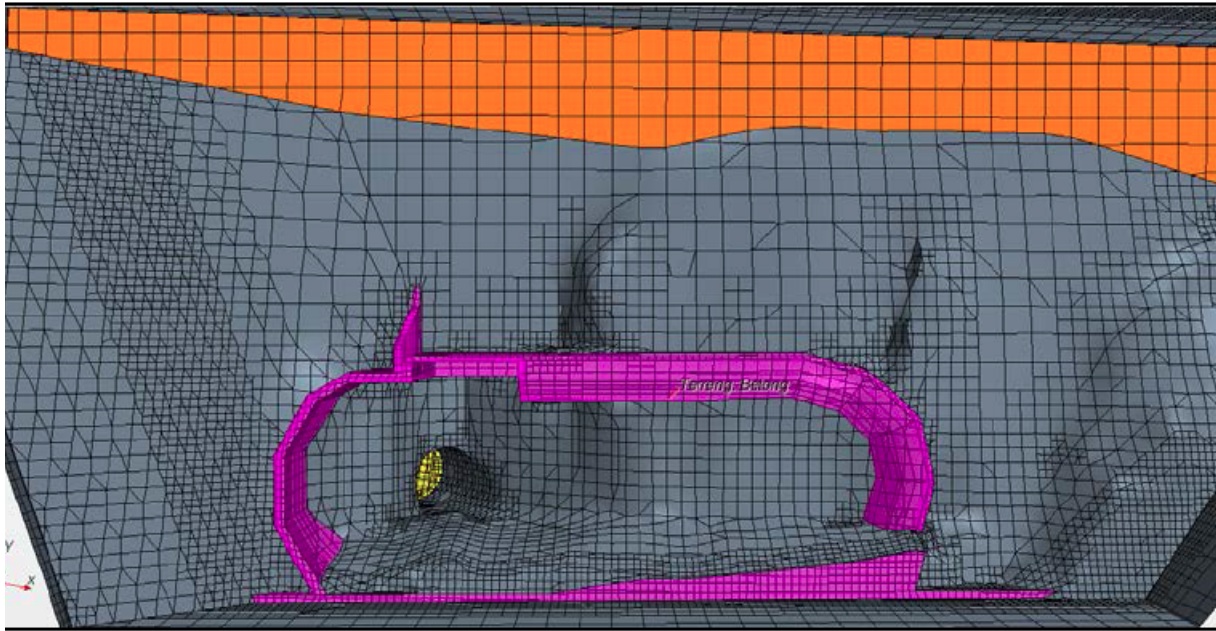
Flomløpet på Dam Innerdalen ble modellert med STAR-CCM+ av Vingerhagen (2011), som undersøkte bl. a. hvordan resultatene fra flomløpsberegningen påvirkes av beregningsgridet og turbulensmodellen. Resultatene er vist i Fig. 4.3.2.2. Det er brukt et fint og et grovere grid rundt en tverrsnittsutvidelse for avløpstunnellen. Dette gav to grid med henholdsvis 2.4 og 1.2 millioner celler. Simulering 1 er beregnet med k -epsilon turbulensmodellen, mens simulering 2 er beregnet med k -omega modellen.



Figur 4.5.2.2. Sensitivitetstest for grid og turbulensmodell. 1 er k -epsilon modellen, 2 er k -omega modellen (Vingerhagen, 2011).

De numeriske beregningene gav alle meget gode resultater for vannføringer som var så lave at det var overløpet som bestemte kapasiteten. Ved de høyeste vannføringene der tunnelene var fylte, fikk en forskjellig resultat ettersom hvilke parametre som ble brukt.

K -omega modellen gav samme resultat for et fint og et grovt grid, mens k -epsilon modellen gav forskjellig resultat for det fine gridet. I en utvidelse i en tunnel vil det ofte oppstå resirkulasjonssoner som fører til singularøstap. Størrelsen på resirkulasjonssonen som blir beregnet med en numerisk modell vil kunne være avhengig av gridstørrelse, diskretiseringsskjema og turbulensmodell. Jo større resirkulasjonssonen er, jo større blir singularøstapet.



Figur 4.5.2.3. Tredimensjonal figur av flomløpet på Dam Innerdalen sett ovenfra. Betongoverløpet har fiolett farge, mens fjellet har grå farge (Vingerhagen, 2011).

Vingerhagen (2011) testet også hvordan tidssteget påvirket resultatene. Han modellerte tre forskjellige konfigurasjoner av ruhet og lufting via ventil. I alle tilfellene varierte den maksimale vannføringen med tidssteget. Det minste tidssteget gav lavest kapasitet på flomløpet.

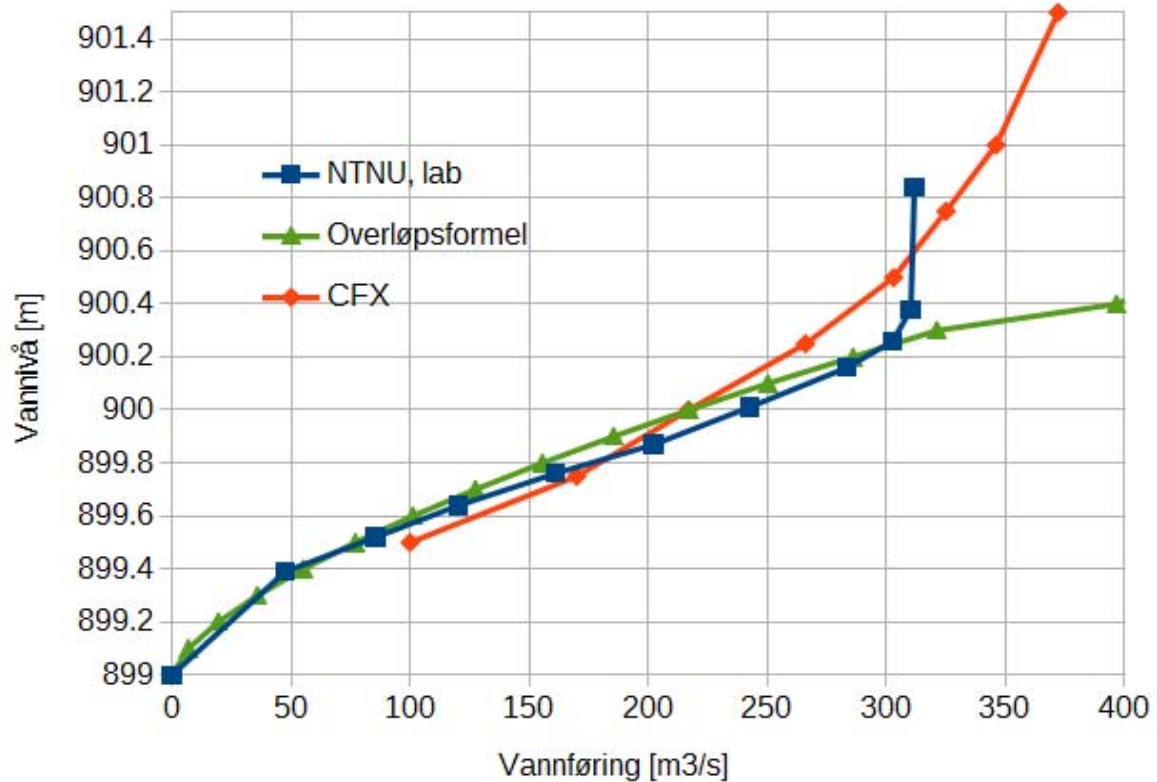
Den numeriske modelleringen av Dam Innerdalen ble gjort i 2011, fire år etter at de fysiske modellforsøket hadde blitt gjort. Modellen var da revet i laboratoriet, noe som førte til at alle data måtte taes fra tegninger og rapporten fra forsøket. Dessverre var geometrien på innløpet til sjakta ikke godt nok dokumentert til at man kunne gi inn nøyaktig geometri i den numeriske modellen. I den fysiske modellen var det også satt på et vertikalt rør ved utløpet. Dette var det ikke oppgitt noe lengde på. Røret kan øke den totale tilgjengelige energihøyden, H_y , i formel 3, Fig. 1.2.1. Sammenligningen med kurven for fysisk modell i Fig. 4.5.2.2 er derfor noe usikker.

4.5.3 Dam Svartevatn

Dam Svartevatn ligger i Sira vassdraget, som er bygget ut av Sira-Kvina kraftselskap. Kapasiteten på det lukkede flomløpet ble beregnet av Markhus og Venås (2010). Disse beregningene er ble gjort to år før det ble utført et fysisk modellforsøk ved NTNU (Bjørkmo, 2012) på samme flomløp.

Det kommersielle CFD programmet CFX ble brukt til beregningene. Det ble modellert med en standard Volume of Fluid metode. Et beregningsnett på 1.5 millioner celler ble brukt, som er omtrent det samme som Li et al (2011). Beregningstiden var ca ett døgn. Gridet bestod av en blanding av tetrahedrale og heksahedrale celler, med finere oppløsning over overløpet. Det ble brukt et tidsskritt på 0.1 sek, og 3 indre iterasjoner pr. tidsskritt. Det var ikke oppgitt noen parameterterter på grid eller tidsskritt.

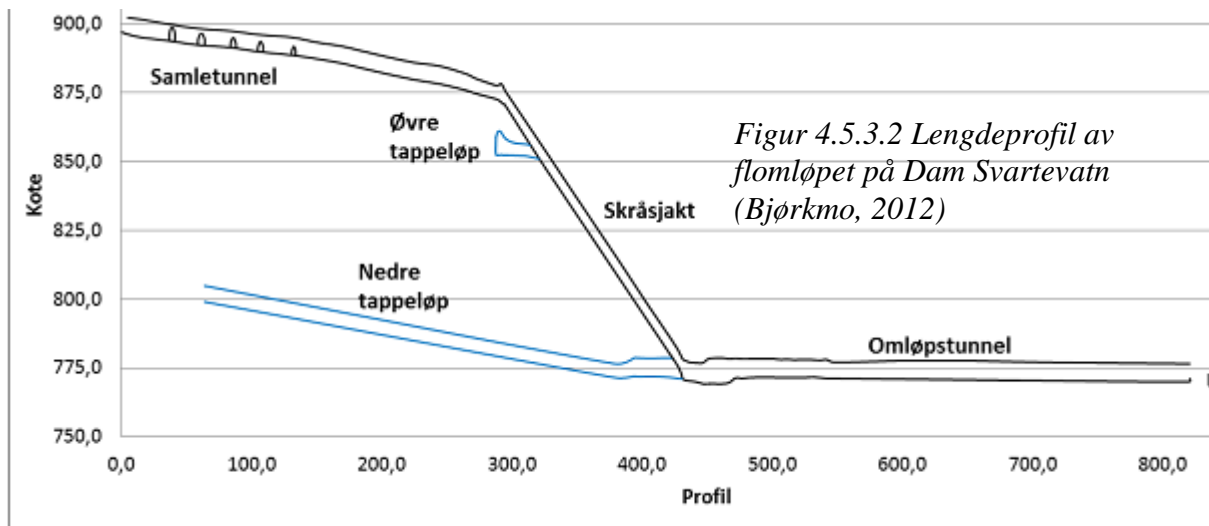
Figur 4.5.3.1 viser kapasitetskurvene som er målt og beregnet med CFX, sammen med resultatene fra overløpsformelen (Ligning 1). Vi ser at det er noe avvik, med overpredikering av kapasiteten under 200 m³/s, og underpredikering fra 200 til 300 m³/s. Med vannføringer over 310 m³/s viste det fysiske modellforsøket at sjakten fyltes og at kapasiteten derfor ikke økte vesentlig med økende vannstand. Dette fenomenet er ikke replisert i den numeriske modellen.



Figur 4.5.3.1. Kapasitetskurver for overløpet ved Dam Svartevatn.

I motsetning til beregningen av flomløpet på Sysendammen og Dam Innerdalen, ble ikke hele flomløpet for Dam Svartevatn modellert. Gridet i den numeriske modellen dekket kun området fra magasinet til ca 30 meter nedenfor den nederste grentunnelen fra badekaret. Den modellerte strekningen var da ca 150 meter, mens total lengden av tunnelen er over 800 meter (Fig. 4.5.3.2). Problemet med en slik CFD beregning er hva en skal velge som nedstrøms grensebetingelse. I slike tilfeller kan man velge å bruke null-gradient som grensebetingelse. Da antar man at trykket i vannet nedstrøms området man beregner ikke påvirker resultatene. Dette vil kun være riktig når tunnelen ikke går full.

Når tunnelen går full på de høyeste vannføringene, vil Ligning 3 gjelde. Når ikke hele tunnelen modelleres vil friksjonstapene ikke bli riktige på disse vannføringene. En vil også mangle viktige singulærtap, K , i Ligning 3. Høydeforskjellen, H_s , i ligning 3 vil også bli veldig mye mindre enn den korrekte verdien. Det er derfor ikke å forvente at resultatene fra CFD modellen gir riktige svar for de høyeste vannføringene.



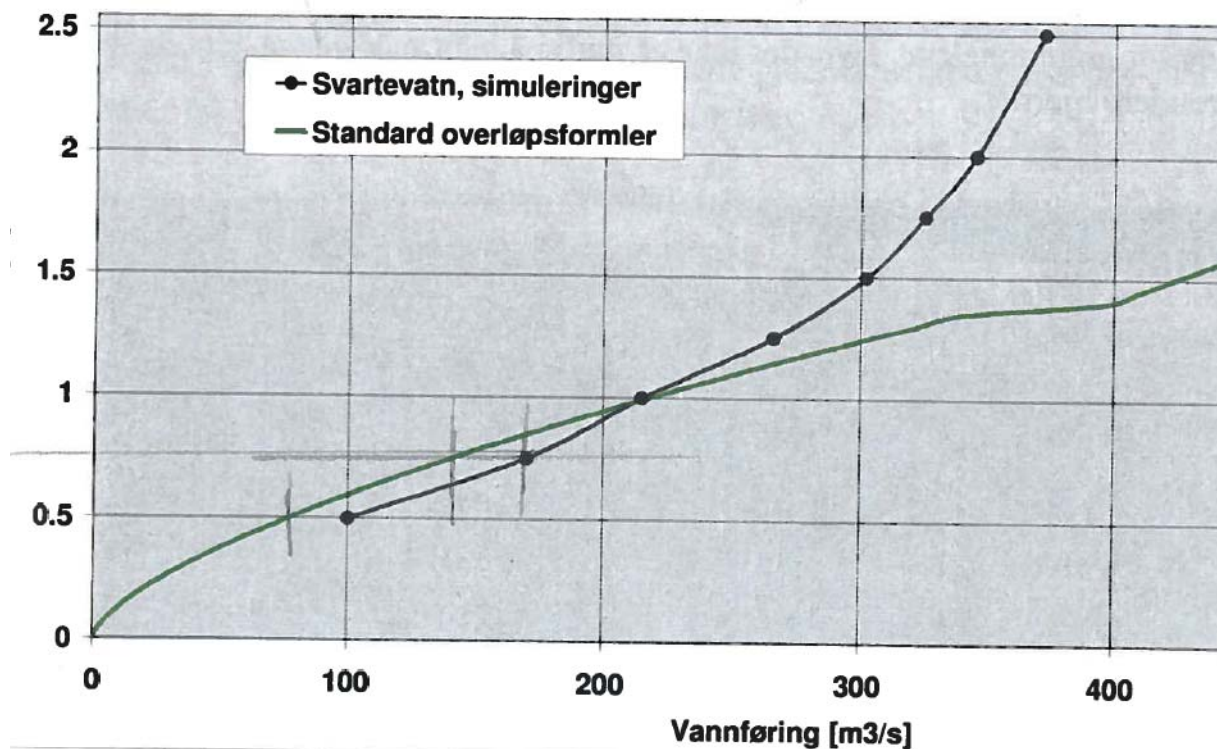
Figur 4.5.3.2 Lengdeprofil av flomløpet på Dam Svartevatn (Bjørkmo, 2012)

Før CFD beregningen ble det derfor gjort en håndregning på maksimalkapasiteten til flomløpet, med en antatt ruhet. Dette gav en vannføringskapasitet på $370 \text{ m}^3/\text{s}$. Man antok derfor en grensebetingelse med nedstrøms null-gradient, og gjorde CFD beregninger opp til en vannføring på $370 \text{ m}^3/\text{s}$. Dette resulterte i kapasitetskurven i Fig. 4.5.3.1. I rapporten fra CFD beregningene står det: "I simuleringene ble det antatt at tunnelsystemet nedstrøms enden på datamodellen ikke legger begrensninger for den totale kapasiteten til tunnelen. Det er derimot usikkert om denne antagelsen er riktig for de høyeste vannstandene som er testet".

Etter at resultatene fra CFD modellen (Fig. 4.5.3.1) forelå, ble det gjort en ny vurdering av friksjonsfaktorer og maksimal kapasitet på flomløpet, basert på håndregning (Ligning 3). Her ble maksimalkapasiteten på flomløpet funnet å være $300 \text{ m}^3/\text{s}$. I den endelige rapporten ble kapasitetskurven derfor endret slik at maksimal vannføring var $300 \text{ m}^3/\text{s}$. Den fysiske modellen gav en maksimal vannføringskapasitet på $310 \text{ m}^3/\text{s}$.

Resultatene fra CFD modellen for de laveste vannføringene har et relativt stort avvik i forhold til den fysiske modellen og overløpsformelen. Dette kan sees i mer detalj på Fig. 4.5.3.3, som er hentet fra rapporten fra CFD beregningene. For en vannstand på 0.5 m over overløpskronen gir overløpsformelen $77 \text{ m}^3/\text{s}$. Det fysiske modellforsøket (Fig. 4.5.3.1) gir $79 \text{ m}^3/\text{s}$. CFD beregningene gir en vannføring på $100 \text{ m}^3/\text{s}$, noe som er et avvik på ca 20 %.

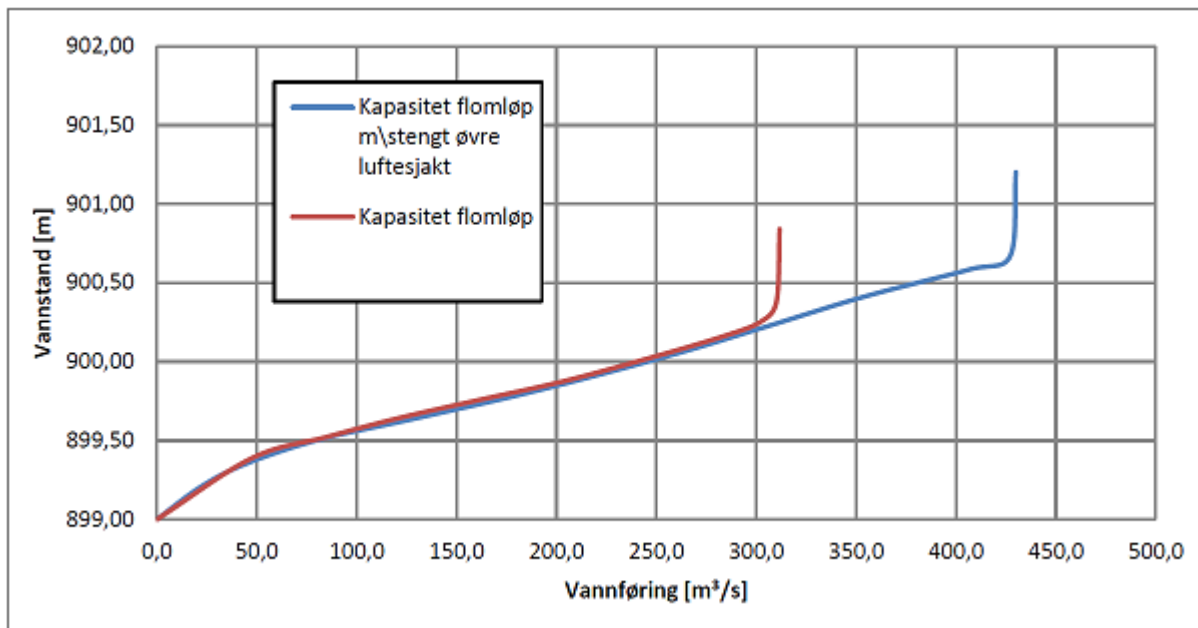
Avvikene på lave vannføringer skyldes sannsynligvis unøyaktigheter i den numeriske modellen. Cellene som er vist i figuren fra CFD rapporten er ganske store over overløpet. Det er mulig at dette er en av årsakene til avviket. I den endelige kapasitetskurven ble det sett bort i fra CFD resultatene for de laveste vannføringene, og overløpsformelen (Ligning 1) ble brukt i stedet. CFD resultatene ble derfor kun brukt ved vannføringer mellom 200 og $300 \text{ m}^3/\text{s}$. Utenom dette området ble resultater fra håndregninger (Ligning 1 og 3) brukt.



Figur 4.5.3.3. Kapasitetskurve for Dam Svartevatn (Markhus og Venås, 2010)

I Fig. 4.5.3.1 ser vi at det også er avvik mellom resultatene fra CFD modellen og den fysiske modellen for vannføringer mellom $200 \text{ m}^3/\text{s}$ og $300 \text{ m}^3/\text{s}$. Dette avviket kan ha flere årsaker. Det ble gjort en laserscanning av tunnelen etter CFD beregningen, men før det fysiske modellforsøket. Det fysiske modellforsøket hadde derved en mer nøyaktig geometri enn hva som var tilgjengelig for den numeriske modellen. Endringer i geometrien, spesielt tverrsnittsarealet av tunnelene, vil påvirke kapasiteten på flomløpet. Andre mulige årsaker til avviket kan være gridstørrelsen, usikkerhet i modellering av luftinnblanding, og at luftinnblandingen er forskjellig i modellskalaen i forhold til prototypen.

Den fysiske modellstudien gjort ved NTNU (Bjørkmo, 2012) inneholder også endel andre interessante forsøk. I likhet med de fysiske modellene av Dam Innerdalen og Sysen, har Bjørkmo (2012) testet innsuging av luft i bunnen av sjakten av flomløpet. Maksimal kapasitet på systemet uten lufting er $430 \text{ m}^3/\text{s}$, mens med lufting er den $310 \text{ m}^3/\text{s}$ (Fig. 4.5.3.4). Dette er en forskjell på ca 30 %. Det viser at luftforhold kan ha stor betydning for kapasiteten på lukkede flomløp.



Figur 4.5.3.4. Kapasitetskurver for flomløpet ved Dam Svartevatn fra fysiske modellforsøk (Bjørkmo, 2012).

5. Retningslinjer for utførelse av CFD beregninger

Det er i dag mulig å kjøpe et 3D dataprogram og å utføre CFD beregninger uten å ha detaljert kjennskap til strømningsmekanikk, hydraulikk eller numerikk. En kan allikevel få produsert tredimensjonale fargefigurer som kan virke plausible. Imidlertid kan resultatene ha en altfor dårlig nøyaktighet i forhold til hva som vil være nødvendig i forhold til sikkerhetskrav. For å få resultater med god kvalitet er det nødvendig med kunnskap og erfaring innen fagfeltet, samt at man har gode rutiner for kontroll av usikkerhet. Litteratur som handler om denne problemstillingen er beskrevet i de følgende underkapitlene.

5.1 Internasjonale "best practice" retningslinjer

Flere internasjonale ekspertkomiteer har laget "best practice guidelines" for hvordan CFD beregninger bør utføres. Noen er generelle, mens andre er spesifikke for enkelte fagfelt eller dataprogrammer. Ekspertkomiteene er ofte nedsatt av EU eller andre organisasjoner.

ERCOFTAC (European Research Community on Flow, Turbulence and Combustion) laget i år 2000 rapporten "Best Practice Guidance for CFD", som er den første og klassiske teksten om dette temaet. Retningslinjene er generelle, men fokuserer på industriell CFD. Mer spesifikke retningslinjer for spesielle problemstillinger er senere blitt laget av andre komiteer. Eksempler på rapporter er:

- Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment
- Best practice guidelines for turbomachinery CFD
- Best practice guidelines for marine applications of CFD
- Computational Fluid Dynamics Best Practice Guidelines for Dry Cask Applications
- Best Practice: Scale-Resolving Simulations in ANSYS CFD
- The development of a framework for CFD validation and best practice: The QNET-CFD knowledge base.
- QNET-CFD as a framework for enhancing quality and trust in computational wind engineering

Fullstendige referanser på disse rapportene er gitt i referanselisten.

Det er dessverre ikke funnet noen publikasjoner om "best practice" på modellering av flomløp, noe som kunne vært nyttig for norsk vannkraftbransje. Men det foreligger en rapport på marine applikasjoner (MARNET, 2007). Denne er mer detaljert og omfattende enn de fleste av de andre rapportene som går på spesifikke temaer. Modellering av marine konstruksjoner har også endel til felles med modellering av flomløp i og med at det er vann som modelleres, og at en har en fri overflate med luft. For eksempel, brukes VOF metoden for begge fagfeltene. MARNET (2007) rapporten er også fritt tilgjengelig på Internett som PDF fil, mens ERCOFTAC rapporten må kjøpes som en papirbok fra Storbritannia. I de følgende underkapitlene vil en referere anbefalingene fra disse to rapportene.

5.2 Feil og usikkerheter i CFD beregninger

ERCOFTAC (2000) beskriver de viktigste usikkerhetene i en CFD beregning som:

1. Modellfeil
2. Diskretiseringsfeil
3. Konvergensfeil
4. Avrundingsfeil
5. Usikkerheter i input-data og grensebetingelser
6. Brukerfeil
7. Feil i dataprogrammet

Modellfeil er at en ikke bruker de riktige ligningene som beskriver et problem. Et eksempel at man bruker 2D ligninger for et tredimensjonalt problem. Diskretiseringsfeil oppstår når man transformerer differensialligninger til algebraiske ligninger som datamaskinen kan løse. Dette vil for eksempel være at man bruker en første ordens metode for et konvektivt ledd, der en høyere ordens metode vil være mer nøyaktig.

Konvergensfeil oppstår når man løser ligninger iterativt, og man ikke gjør nok iterasjoner. Avrundingsfeil forekommer ikke på moderne datamaskiner hvis en bruker 64 bits flyttall i CFD programmet. Feil i grensebetingelser forekommer mye oftere. For eksempel at man ikke bruker riktig vannføring, ruheten ikke er korrekt eller at geometrien ikke stemmer helt.

Brukerfeil kommer av at brukeren ikke har nok kunnskap og erfaring med numerisk modellering, hydraulikk eller det dataprogrammet som brukes, og dermed gjør feil.

5.3 Parametertester

Alle feilene og usikkerhetene beskrevet i Kap. 5.2 må tas med i betraktning når nøyaktigheten av resultatene fra en CFD beregning skal vurderes. Det finnes forskjellige metoder og strategier for dette, som blir diskutert i de videre kapitlene. En ofte brukt metode er å gjøre en parametertest. Da endres en av parametrene i input-filen, og hele den numeriske beregningen kjøres om igjen. En sammenligner så de nye resultatene med resultatene fra den originale beregningen. Hvis det er lite avvik tyder dette på at parameteren har lite å si for resultatene. Hvis det er stort avvik betyr dette at parameteren betyr mye for resultatene.

Det bør lages en liste over hvilke parametre som brukes i beregningen, og hvilke verdier disse har. Alle parametre som det knytter seg usikkerhet til bør testes med en parametertest. Parameteren varieres da innen sannsynlige verdier, og en ser hvilken effekt dette har på resultatene. Et eksempel på en parameter som kan og bør testes er friksjonsfaktoren. En kan også variere hvilke numeriske algoritmer som brukes. Forskjellige turbulensmodeller og diskretiseringskjemaer for det konvekitive leddet i Navier-Stokes ligninger kan testes.

Parametertester er enkle å utføre. I praksis er det bare å forandre et tall i en input-fil, eller klikke på en knapp i et grafisk brukergrensesnitt. Imidlertid tar hver parametertest endel regnetid. Her er det gunstig å ha flere parallelle datamaskiner slik at en kan gjøre flere tester samtidig.

Den viktigste parameteren som påvirker resultatene i en klassisk CFD beregning er størrelsen på gridcellene. Litteraturstudien viser at nøyaktigheten på beregningsresultatene ofte er avhengig av antall celler som blir brukt i forhold til hvor kompleks geometrien er. Et 2D standard overløp har relativt enkel geometri, og kan således beregnes med en nøyaktighet på under noen prosent på en PC i løpet av noen timer. Har man en stor og kompleks geometri med mange endringer i topografi og et relativt grovt grid, kan en få et avvik på over 20-30 % i forhold til målinger selv om beregningstiden er flere uker. Det anbefales derfor å gjøre gridavhengighetstester for å se hvordan den numeriske løsningen er avhengig av gridstørrelsen.

5.4 Konvergensfeil

Alle CFD programmene løser Navier-Stokes ligninger iterativt. Man starter med å gi initielle verdier for alle variable. Ofte vet en ikke de initielle verdiene på forhånd, og da kan en for eksempel gjette på null hastigheter. Når ligningene løses iterativt betyr dette at man for hver iterasjon kommer nærmere det riktige svaret. Når svaret blir bra nok, sier man at løsningen har konverget. Hvis man ikke itererer mange nok ganger, blir løsningen ikke helt riktig. Vi får da en konvergensfeil. Et viktig spørsmål blir da hvor mange ganger man trenger å iterere før løsningen er god nok, og hvordan dette kan bestemmes.

Et viktig begrep i denne sammenhengen er et residual. Dette er et estimat på hvor stor feil som er igjen etter en iterasjon. Residualet vil som oftest synke etter hver iterasjon. Det kan da defineres et konvergenskriterium, som sier at løsningen er konverget når residualet er under en viss verdi.

ERCOFTAC (2000) og MARNET (2002) starter sine beskrivelser av konvergens med å påpeke de forskjellige definisjonene som finnes på et residual, noe som følgelig også vil påvirke konvergenskriteriet. Residualet kan være et gjennomsnitt over alle cellene, eller det kan være maksimalverdien i cellene i gridet. Residualet er som oftest en dimensjonsløs størrelse, laget ved å dividere med en karakteristisk verdi. Den karakteristiske verdien kan for eksempel være en av verdiene i innstrømningsområdet, som er gitt av CFD brukeren. En kan også skalere residualet i første iterasjon til 1.0. Hvilke valg som programmet gjør her vil i stor grad påvirke absoluttverdien til residualet, hvilket konvergenskriterium som velges og hvor mange iterasjoner en trenger for å oppnå konvergens. Hvis en starter med et hastighetsprofil som er nokså riktig, og hastighetene i innstrømningsområdet er ganske store, vil et residual skalert med innstrømmende hastighet være relativt lite. Hvis en bruker for eksempel at konvergenskriteriet er 0.001, vil en ikke trenge så mange iterasjoner for konvergens. Hvis en skalerte residualet til 1.0 ved første iterasjon vil en muligens trenge flere iterasjoner før konvergens.

ERCOFTAC (2000) og MARNET (2002) anbefaler at CFD brukeren gjør seg kjent med hvordan residualet defineres for programmet som brukes, og også konvergenskriteriet. Og at konvergensen vurderes ut i fra dette.

Definisjonen av konvergens kan bli forskjellig om en gjør en stasjonær eller en transient beregning. Tidlige CFD beregninger som ble gjort for 20 år siden var ofte stasjonære, da en hadde begrenset regnekapasitet. I de senere årene er det blitt mulig å lage svært fine grid, og da kan en få muligheter til å løse opp hvirvler i gridet. Dette betyr at en kan få ikke-stasjonære beregninger der hastigheten forandrer seg hele tiden. Løsningen vil derfor ikke gi en stasjonær situasjon med lave residualer. Et moderne CFD program vil kunne beregne de ikke-stasjonære hvirvlene i gridet, og derved få en riktig løsning. Konvergens er imidlertid et problem. CFD programmer

som bruker et visst antall indre iterasjoner pr. tidssteg vil da kunne bruke et konvergenzkriterium at residualen for eksempel skal gå ned en størrelsesorden pr. tidssteg. Aydin og Emiroglu (2013) brukte et kriterium der residualen måtte gå ned minst tre størrelsesordner pr. tidssteg.

ERCOFTAC (2000) og MARNET (2002) gir en rekke anbefalinger om residualer og konvergens. Man kan for eksempel undersøke hvordan relaxeringsfaktorer og tidssteg påvirker residualene i parametertester. Flere CFD programmer har mulighet til å vise romlig fordeling av residualene, og her da kan man identifisere problemområder. I disse områdene kan man måtte forbedre gridet, hvis man har problemer med konvergens. Initiale verdier av hastigheter kan også ha noe å si. Ofte bør man starte med lave verdier. For høye initiale verdier kan gjøre at løsningen ikke konvergerer.

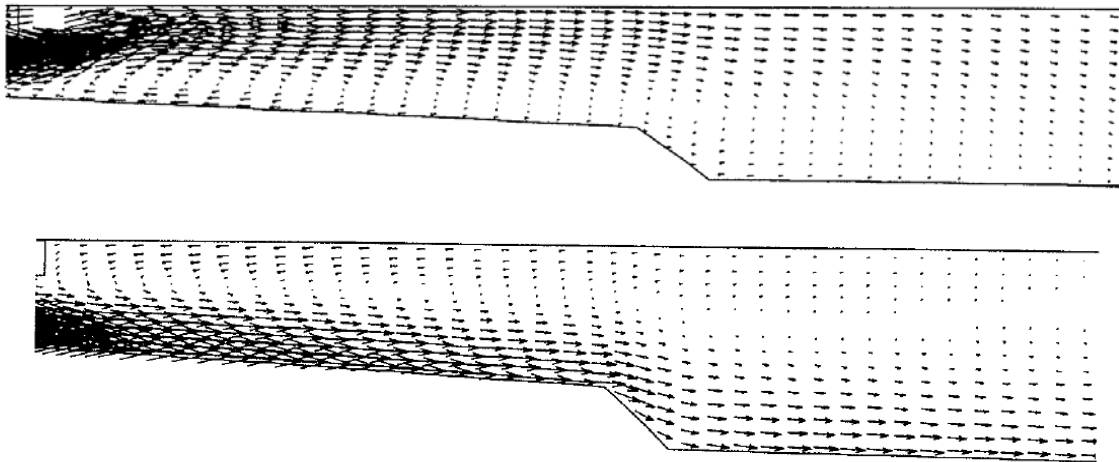
ERCOFTAC (2000) peker spesielt på at man bør kontrollere globale parametre. Et typisk eksempel er kontinuitet av vann. Noen numeriske algoritmer garanterer ikke kontinuitet, noe som betyr at mengden vann inn til geometrien ikke nødvendigvis er lik mengden vann ut. Noe vann kan forsvinne eller komme til under beregningen. Enkelte CFD programmer bruker en skalert kontinuitetsdefekt til å beregne et residual for trykkleddet i Navier-Stokes ligninger. I dette tilfellet betyr et lavt residual at en også er garantert god kontinuitet. For andre programmer er det nødvendig å kontrollere forskjellen mellom vannmengden inn og ut, og sjekke at differansen er innenfor nøyaktighetskravene. Denne kontrollen kommer da i tillegg til konvergenzkriteriet.

Merk at det finnes CFD programmer som ikke har mål på om lokal kontinuitet er oppfylt. Dette betyr at en kan få en løsning der global kontinuitet er oppfylt, mens i noen celler eller deler av gridet er lokal kontinuitet ikke oppfylt. Her må brukeren undersøke i hvilken grad kontinuitetsligningen brukes av programmet, om programmet bruker et residual basert på kontinuiteten i alle cellene. En bør også undersøke erfaringen som eksisterer når det gjelder testing av programmet mot målinger.

5.5 Diskretiseringsfeil

Diskretiseringsfeil oppstår når en skal løse de partielle differensialligningene numerisk. Det finnes mange forskjellige diskretiseringsfeil. Hvert ledd i Navier-Stokes ligninger diskretiseres med ulike algoritmer, som har forskjellig nøyaktighet. MARNET (2002) deler diskretiseringsfeilene i to: Romlige feil og tidsavhengige feil. Romlige feil er stor sett diskretisering av det konvektive leddet, som er beskrevet i kapittel 2. ERCOFTAC (2000) og MARNET (2002) anbefaler at man ikke bruker første ordens skjema, utenom ved starten av beregningen. De anbefaler at 2. ordens skjema brukes ved den endelige løsningen. ERCOFTAC (2000) mener det kan aksepteres å bruke 1. ordens skjema for turbulensvariablene. ERCOFTAC (2000) og MARNET (2002) anbefaler også at diskretiseringen undersøkes i en parametertest for gridet, ved at en gjør beregningene på grid med forskjellig oppløsning.

Aryal (2000) modellerte Khimti sandfanget i Nepal som en del av sin MSc oppgave. Her brukte han både et første ordens oppstrøms skjema og et andre ordens oppstrøms skjema.



Figur 5.5.1 Lengdeprofiler av beregnede hastighetsvektorer for Khimti sandfang i Nepal. Øverste figur er beregnet med et første ordens oppstrøms skjema, mens nederste figur er beregnet med et andre ordens oppstrøms skjema.

Resultatene er vist i Fig. 5.5.1. Her ser vi at første ordens skjema gir at hovedstrømmen i ekspansjonen inn til sandfanget går langs overflaten, og at en resirkulasjonssone oppstår langs bunnen. Løsningen som bruker andre ordens oppstrøms skjema viser at hovedstrømmen går langs bunnen, og en har en resirkulasjonssone ved overflaten. De to skjemaene gir et helt forskjellig strømningsbilde i sandfanget. Målinger fra en fysisk modell tilsier at første ordens skjemaet gir det riktige strømningsbildet. I en ekspansjonssone vil en kunne få flere løsninger av Navier-Stokes ligninger, og et andre ordens oppstrøms skjema kan overpredikere resirkulasjonssoner. Det anbefales derfor å gjøre beregninger med begge skjemaene. Hvis de viser samme strømningsmønster, vil sannsynligvis andre ordens skjemaet være mest riktig.

Merk at det er veldig sjelden av en får forskjellige strømningsmønster med de to skjemaene. Men et slikt fenomen har blitt observert i ekspansjonsområder der tverrsnittsarealet utvider seg i strømrretningen. Det skal da lite til for å flytte vannstrømmen fra den ene siden til den andre.

ERCOFTAC (2000) og MARNET (2002) gir også anbefalinger for diskretiseringen av tidsleddet i Navier-Stokes ligninger. Her anbefaler de at det bør brukes en andre ordens metode. Det anbefales også at man undersøker hvordan tidsskrittets lengde henger sammen med Courant kriteriet. Courant kriteriet betyr at tidsskrittet ikke skal være større enn at en fluidpartikkel strømmer gjennom en hel celle i løpet av tidsskrittet. Det anbefales også å alltid undersøke hvordan tidssteget størrelser påvirker resultatene. Dette gjøres som en parameter-test der en gjør flere beregninger med forskjellige tidsskritt og sammenligner resultatene.

5.6 Geometri og grid

Alle programmene beskrevet i Kap. 4 bruker i prinsippet samme fremgangsmåte for å modellere en kompleks geometri. En bruker for eksempel et DAK program til å tegne geometrien, som så skrives ut som en STL fil. Denne filen beskriver flere flater i rommet. STL filen kan importeres i CFD programmet, som så lager gridet inne i volumet begrenset av STL filen.

MARNET (2002) gjør oppmerksom på flere problemer som kan oppstå i denne prosessen. For eksempel kan STL filen ha hull, der flaten ikke er definert. Dette kan skape problemer for gridgenereringsprogrammet. En må også huske på at tegningene av en geometri ikke alltid stemmer med virkeligheten. En elv i løsmasser kan for eksempel forandre seg over tid. Det er heller ikke sikkert at en vannkrafttunnell er bygd helt eksakt etter tegningene. Usikkerheter i geometrien kan også taes med i en parametertest, der en beregner med variasjoner i overflaten på gridet.

Hvis en skal modellere en naturlig elv eller en råsprengt tunnel/kanal, så vil geometrien være relativt kompleks. Antall punkter som er brukt til å lage STL filen vil påvirke nøyaktigheten av hvordan geometrien blir representert. Dette må taes med i vurderingen av nøyaktigheten til resultatene fra en CFD beregning.

Riktig valg av grid er ofte sett på som den viktigste parameteren for å få resultatene fra en CFD beregning nøyaktige nok. Gridet deler vannvolumet i celler, der en løser Navier-Stokes ligninger. For hver celle får en derfor tre hastighetskomponenter, trykk og turbulensvariabler. Et av hovedproblemene er at gridet må kunne løse opp de viktigste gradientene i strømmingen, noe som betyr at det må være mange nok celler til dette. Nøyaktigheten på løsningen blir vanligvis bedre hvis man bruker flere celler enn få celler. Regnetiden vil imidlertid øke med antall celler. Et hovedspørsmål når man vurderer resultatene fra en CFD beregning er derfor: Er det nok celler i gridet?

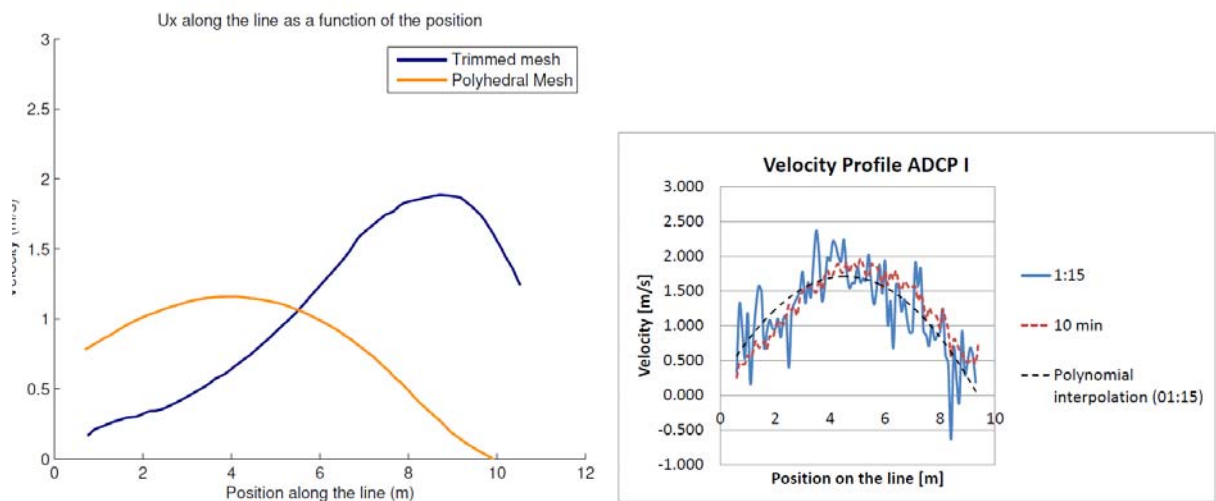
ERCOFTAC (2000) og MARNET (2002) anbefaler begge å vurdere dette spørsmålet med en studie for gridavhengighet. En gjør da beregningen med flere forskjellige grid med varierende antall celler og sammenligner resultatet. Hvis resultatene blir like, er løsningen griduavhengig.

Et ofte forekommende problem i en gridavhengighetsstudie oppstår når man har brukt maksimal regnekapasitet på det gridet en har gjort hovedberegningen med, og at det derfor er vanskelig å lage gridet finere. ERCOFTAC (2000) og MARNET (2002) anbefaler da å forsøke å gjøre lokale forfininger av gridet der det er store gradienter. Eventuelt kan man også lage gridet grovere. Det er også mulig i mange programmer å bruke forskjellige typer grid. Rusten (2012) modellerte sandfanget på Tonstad kraftstasjon med to forskjellige grid: ett basert på polyhedrale celler og ett baser på heksahedrale celler. Resultatene er vist i Fig. 5.6.1.

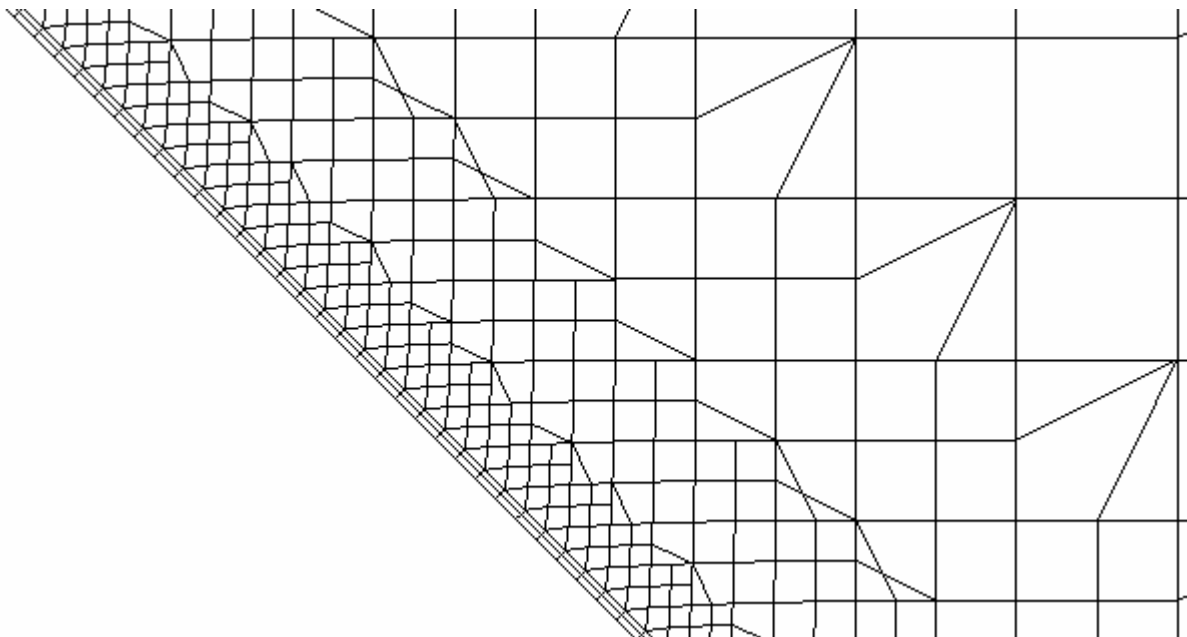
Fig. 5.6.1 viser at en kan får to helt forskjellige svar avhengig av hvilket grid en bruker. Dette er egentlig to forskjellige løsninger av Navier-Stokes ligninger, litt tilsvarende det vi ser i Fig. 5.5.1. Rusten (2012) gjorde gridsensitivitetstester med det polyhedrale gridet, og brukte fire grid med cellestørrelser 0.25, 0.5, 1 og 3 meter. Merk at sandfanget på Tonstad er ca 10 meter bredt, så selv det grovste gridet inneholdt endel celler på tvers av strømreringen.

Hvis gridet er for grovt, vil dette føre til falsk diffusjon, som gjør at de beregnede gradientene blir mindre enn i virkeligheten. En test for falsk diffusjon er å bruke høyere ordens skjemaer for det konvektive leddet i Navier-Stokes ligninger. Dette vil alternativt også kunne si noe om gridet er for grovt.

ERCOFTAC (2000) og MARNET (2002) har også en rekke detaljerte anbefalinger om hvordan gridet bør lages. Dette inkluderer bl. a. ekspansjonsforhold mellom gridceller, aspektforhold av gridceller, skjevhet av gridlinjer, ikke-ortogonalitet, lokal forfining av grid, bruk av hex/tet celler nær veggene, økning av antall celler ved store gradienter og sammensetning av forskjellige grid i områder med høye gradienter. For nærmere beskrivelser henvises det til disse rapportene.



Figur 5.6.1. Hastighetsprofiler på tvers av strømretningen i Profil 1 i Tonstad sandfang (Rusten, 2012). Høyre figur er målte verdier, mens de to profilene i venstre figur er beregnede hastigheter. I beregningene er to forskjellige grid brukt: et grid basert på polyhedrale celler, og et grid basert på heksahedrale celler der en har brukt trimmede celler langs kanten (slik som i Fig. 5.6.2).



Figur 5.6.2 Detalj av grid ved vegg. Merk at det lages kvadrilaterale celler som er parallele med vegg. Dette i tråd med anbefalingene fra ERCOFTAC (2000).

Tester for griduavhengighet

Det finnes flere tester for griduavhengighet. Målet er å si noe om hvor mye falsk diffusjon det er i gridet, og å tallfeste den medfølgende usikkerheten som en funksjon av gridstørrelsen.

En populær test er å beregne en Grid Convergence Index (GCI), som er et mål på feilen beregnet med grid av forskjellige størrelser. Celik et al (2008) har en detaljert beskrivelse av fremgangsmåten, der en bruker to forskjellige grid, Grid 1 og Grid 2. Grid 1 er det fineste gridet, og Grid 2 er det groveste. Etter å ha gjort den numeriske beregningen med de to gridene, må en velge seg ut en karakteristisk variabel som er viktig for resultatet. Dette kan være en for eksempel en vannndybde, vannhastighet eller vannføring. Vi kaller den karakteristiske variabelen for f , og interpolerer denne variabelen til ett eller flere punkter som ligger på samme sted i de to gridene. Forskjellen mellom verdien av f i Grid 1 og Grid 2 for dette punktet kalles e_{12} . Dette blir estimater for forskjellen i løsningen for de forskjellige gridene.

Løsningen må også skaleres mot en karakteristisk cellestørrelse, h . Celik et al (2008) anbefaler følgende formel for h i et tredimensjonalt grid med M celler der hver celle har volum V :

$$h = \left(\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M V_j \right)^{\frac{1}{3}}$$

Denne parameteren vil være forskjellig for de to gridene, så en kan gi den en indeks som tilsvare gridet. Det fineste gridet vil ha en parameter h_1 og det groveste h_2 . Merk at parameteren vil ha enhet meter i et metrisk system.

GCI er en dimensjonsløs størrelse som sier noe om hvor griduavhengig løsningen er. I en situasjon der Grid 1 er finest og Grid 2 er grovere, blir parameteren beregnet med formelen:

$$GCI^{21} = \frac{1.25e^{21}}{r^{21} - 1}$$

Her er

$$e^{21} = \left| \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Phi_1} \right|$$

og

$$r^{21} = \frac{h_2}{h_1}$$

Hvis for eksempel det fineste gridet på et overløp gir en vannføring på $56 \text{ m}^3/\text{s}$ og et grid som har dobbelt så store celler gir $57 \text{ m}^3/\text{s}$, får vi:

$$r^{21} = \frac{h_2}{h_1} = \frac{\left(\frac{1}{M_2} \sum_{j=1}^{M_2} V_j \right)^{\frac{1}{3}}}{\left(\frac{1}{M_1} \sum_{j=1}^{M_1} V_j \right)^{\frac{1}{3}}} = \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{2}{1} \right)^{\frac{1}{3}} = 1.26$$

Summen av volumene for de to gridene blir like, derfor kanselleres summeleddene med volumene i ligningen over. Svaret settes inn i ligningen for GCI indeksen:

$$CGI^{21} = \frac{1.25 \left| \frac{56 - 57}{56} \right|}{1.26 - 1} = 0.086 = \underline{\underline{8.6 \%}} \text{ avvik.}$$

Celik et al (2008) gir metoder for å finne GCI indeksen, men ikke hvilke verdier som er akseptable.

GCI indeksen er bare en av mange metoder for å estimere griduavhengighet. Celik et al (2008) gir også en annen metode basert på tre grid med forskjellig størrelse.

Et problem med både GCI testen og griduavhengighetstester generelt er at de er utviklet for relativt enkle geometrier. De fleste CFD programmene er laget innen maskinfag, der en har glatte grenser som er flate eller krummet langs en kurve. Geometrien blir derfor lik for to grid med forskjellig størrelse. Når en skal modellere en naturlig elv, er bunnen på elven mye mer kompleks. Ved tilpasning av gridet til bunnen, vil geometrien endre seg om en lager grid med forskjellig oppløsning. Svaret på en griduavhengighetstest sier derfor ikke bare noe om hvor mye falsk diffusjon det er, men også hvor godt man løser opp ruhetsselementer langs elvebunnen. Selv om man bruker en identisk lik geometri/STL fil for bunnen for de to gridene, vil ujevnhetenene i bunnen gjøre at cellene ikke vil fordele seg likt rundt steiner etc. på bunnen. Dette kan føre til forskjellig resultat på to grid som er litt forskjøvet fra hverandre, selv om de har samme oppløsning.

5.7 Grensebetingelser

Ikke-korrekte grensebetingelser kan ofte være årsaken til usikkerheter og feil i resultater fra CFD beregninger. Dette skyldes oftest brukerfeil.

ERCOFTAC (2000) gir råd om grensebetingelser. Disse trengs for alle variable på alle grensene til gridet. Man kan dele grensebetingelsene i fire typer: Innstrømning, utstrømning, vegger og symmetriplan. Vi har her antatt at den frie overflaten modelleres med VOF metoden, ellers ville den fri overflaten krevd en femte grensebetingelse. ERCOFTAC (2000) gir først noen generelle råd som omfatter en parametertest av alle usikre grensebetingelser. De merker seg også at de fleste CFD programmer har default grensebetingelser for mange parametre. Dette betyr at programmet bestemmer grensebetingelsen. Her må en lese manualen og være sikker på at en har den grensebetingelsen som en ønsker. Man må også merke seg at de forskjellige programmene kan ha forskjellige default verdier. Dette er viktig å huske hvis man har lært seg ett program og skal gjøre beregninger med et annet.

Vanligvis brukes null-gradient som grensebetingelse i utstrømningsområder, og dette er som oftest en problemfri metode. Men man må da huske på at utstrømningsområdet legges i et område der det ikke er returstrømning, slik at man i virkeligheten ville hatt både inn og utstrømning på denne grensen. Hvis en skal simulere et tunnelsystem, så må en også forvise seg om at en har riktig trykk i utstrømningsområdet. Her bør en velge utstrømning i friluft. Hvis en har nedstrøms grensebetingelse inne i en tunnel, må en finne ut av hvilket trykk som bør settes der.

I innstrømningsområdet må en gi verdier for hastigheter og turbulensvariable. Ofte vil CFD programmet ha default formler for turbulensen til fluidet som strømmer inn i området, og disse vil kunne være forskjellige fra program til program. For en flomløpsmodellering vil innstrømning-

sområdet oftest være i magasinet. Her er det vanligvis ikke så viktig hva turbulensen er, siden den er nokså lav. Men det er veldig viktig å gi inn riktig vannføring eller vannstand her.

Modellering av faste vegger gjøres normalt med vegglover. En antar da at hastighetsprofilen fra sentrum av veggcellen til veggen følger et logaritmisk profil. Fra dette kan man utlede en skjærspenning som legges inn som et negativt kildeledd i Navier-Stokes ligninger. Alle CFD programmene i denne rapporten bruker glatte vegglover som default verdi. For å spesifisere en ru vegg må brukeren definere dette i programmet, sammen med en ruhetsstørrelse. Som nevnt i kapittel 3, så vil ruheten og veggloven kun direkte påvirke den cellen som grenser til veggen. Hvis ruhetshøyden er 20 cm, og cellene er 5 cm høye, så vil i teorien ruheten kunne påvirke 4 celler. Men det negative kildeleddet fra veggloven påvirker kun cellen på veggen som er 5 cm høy. Her må brukeren av CFD programmet gjøre en vurdering av størrelsen på ruheten i forhold til cellestørrelsen.

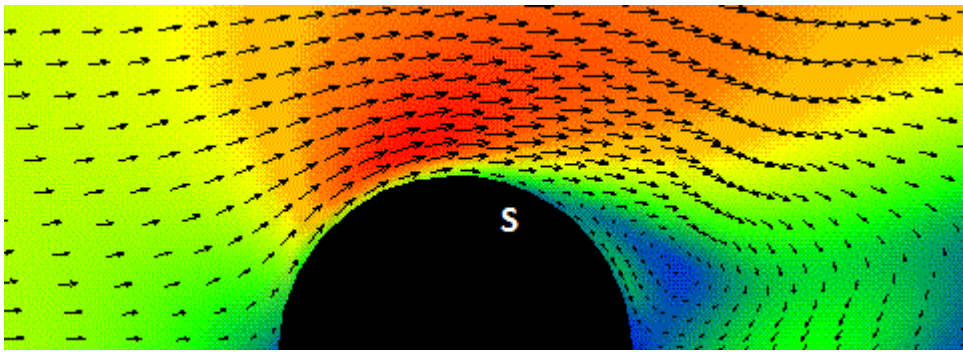
Et annet mulig problem kan være at ruheten varierer romlig i flomløpet. For eksempel kan betongkonstruksjoner har lavere ruhet enn råsprengt fjell. Her må man kunne gi inn til programmet forskjellig ruhet på de forskjellige delene av flomløpet.

5.8 Turbulensmodell

Både ERCOFTAC (2000) og MARNET (2002) inneholder relativt omfattende retningslinjer og råd angående turbulensmodellen som brukes i CFD beregninger. Turbulens kan modelleres på mange måter, men for ingeniørmessige formål vil det mest være aktuelt å løse Navier-Stokes ligninger som er Reynolds-midlet. Dette betyr at turbulensen tas hensyn til med en modell som er et sett med ekstra ligninger. Det mest brukte ligningssettet er k -epsilon modellen. Her brukes to ligninger til å finne turbulent kinetisk energi, k , og epsilon, som er dissipasjon av k . Det er få grunner til å bruke enklere modeller, og mer kompliserte modeller vil ofte enten være lite testet (Reynolds stress modeller) eller de trenger veldig stor regnekraft (LES, DES).

Et alternativ til k -epsilon modellen er k -omega modellen. Det finnes også vanligvis varianter av disse modellene i de aktuelle CFD programmene. Og det er ganske enkelt for en bruker å velge en alternativ modell ved å forandre en parameter i en input-fil. En parameter-test på turbulensmodellen kan og bør gjøres når man ønsker å finne ut av hvordan denne påvirker resultatene fra CFD beregningen.

ERCOFTAC (2000) gir råd om hvor k -epsilon modellen vil kunne gi dårlige resultater. Som nevnt i kap. 3, så vil tetthetsgradienter pga luft/vann blandingen måtte modelleres med tilleggsledd som demper turbulensen. K -epsilon modellen vil også overpredikere turbulensen i enkelte tilfeller, for eksempel i stagnasjonssoner, separasjonssoner og området der resirkulasjonssoner slutter (reattachment areas). Dette gjør at for eksempel resirkulasjonssoner bak en sirkulær sylinder blir mindre i beregningen enn i virkeligheten. De vil også starte mer nedstrøms på sylindren enn i virkeligheten.



Figur 5.7.1. Strømning rundt en sylinder. Fargene viser hastigheten, der rødt er stor hastighet og blått er lav hastighet. Bokstaven S peker på separasjonsområdet (Olsen og Melaaen, 1996).

Siden resirkulasjonssonen blir beregnet mindre enn den egentlig er, vil også hvirveldannelsen bak sylinderen bli underpredikert av k -epsilon modellen.

Noen av artiklene i litteraturstudien har variert turbulensmodellen i beregninger av overløp. Konklusjonen er at variasjoner av k -epsilon og k -omega modellene stort sett gir omtrent like resultater. Men merk at dette kun gjelder over overløp der en har fritt vannspeil og det er lite energitap. I en flomløpstunnel der friksjonen mot veggen er viktig, og en også har signifikante lokale energitap, vil valg av turbulensmodell ha mye større innvirkning på resultatene.

5.9 Brukerfeil

CFD er relativt komplisert og krever mye brukerkunnskap for å kunne gi gode resultater. ERCOFTAC (2000) sier: "Innen CFD spiller den menneskelige faktor en viktig rolle, og resultatene kommer for en stor del an på kompetansen og ekspertisen til brukeren". MARNET (2002) sier det sterkere: "Det er verdt å ta med noen ord om dette (brukerfeil) pinelige aspektet ved CFD, fordi det er den viktigste årsaken til usikkerheten i CFD resultater". De lister også opp flere faktorer som bidrar til brukerfeil:

- Mangel på oppmerksomhet på detaljer, slurv, likegyldighet og tabber
- For optimistisk og ukritisk bruk av CFD, takket være lett tilgjengelige kommersielle CFD programmer, med interaktive grafiske brukergrensesnitt, samt overbevisende og forførende fargegrafikk og animasjoner.
- Mangel på erfaring, slik at CFD brukeren ikke forstår de tekniske vanskelighetene i programmet, eller er uvitende om at kritisk informasjon ikke er til stede
- Mangel på kjennskap til CFD programmet som brukes, og antagelsen om at default parametre i dette programmet er likt med et annet program som brukeren kjenner bedre.

Både ERCOFTAC (2000) og MARNET (2002) siterer forsøk på å lage et kvalitetssikringssystem for CFD beregninger. Her blir det påpekt at selv med et kvalitetssikringssystem kan CFD beregninger bli helt gale, mens beregninger med god kvalitet kan gjøres uten et kvalitetssikringssystem. Med andre ord, er det usikkert hvor nyttig et kvalitetssikringssystem vil være.

ERCOFTAC (2000) gir råd om opplæring av CFD brukere. I tillegg til opplæring innen fluidmekanikk, numerisk modellering og hydraulikk, må brukeren ha opplæring på det CFD pro-

grammet som skal brukes. En opplæring av brukeren bør videre inkludere beregninger av flomløp der en kan sammenligne de beregnede resultatene med målinger. Denne må også inkludere parameter tester, gridtester etc. utført på flomløp.

Direkte råd til CFD brukeren før og under en beregning gies også av ERCOFTAC (2000). Før en starter prosjektet bør en tenke igjennom om en trenger å bruke CFD, eller om deler av arbeidet kan gjøres med andre metoder. En bør også tenke igjennom hvilke krav en har til nøyaktighet på resultatene. Sensitivitetstester kan planlegges på forhånd. Et veldig viktig poeng er å vurdere hvor stor regnekapasitet en har til rådighet i forhold til hvor stort/fint beregningsgrid som er nødvendig. Hvis nødvendig beregningsgrid er større enn regnekapasiteten, må en bruke andre metoder for å finne de ønskede resultatene, for eksempel en fysisk modell.

ERCOFTAC (2000) gir lange lister for å sjekke brukerfeil i CFD programmer. Dette inkluderer en vurdering om default-verdiene som programmet bruker er riktige, for eksempel grensebetingelser. Et eksempel er at de aller fleste CFD programmene bruker glatte vegger som default. De fleste prototype flomløpsgeometrier vil ha en ru vegg. Et annet punkt på listen er å vurdere advarsler (warnings) fra programmet, om at noe kan være galt. Er disse forstått, og behandlet på en god måte?

En av fordelene med CFD teknologien er at det er relativt lett å lage grafikk med resultatene. Dette bør utnyttes av brukeren. ERCOFTAC (2000) anbefaler å lage figurer av alle parametre som kan brukes til å vurdere nøyaktighetene av resultatene. Eksempler som vil være relevant for flomløp er gridet, residualene, hastighetsfeltet, VOF fraksjonen (α) og trykket. Parametrene kan plottes i lengdeprofiler, for eksempel, som vist i Fig. 1.2.3. Spesielt viktig er det å lage figurer av områder der det kan bli spesielle problemer, for eksempel der en mistenker at det kan bli kavitasjon, eller der det er vanskelig å lage gridet.

5.10 Feil i programvaren

Et kommersielt dataprogram kan inneholde 0.1 feil pr. 1000 linjer kode i det ferdige produktet etter testing (McConnell, 2004). Et moderne CFD program vil inneholde flere millioner linjer med kildekode. Det vil derfor alltid være noen feil i CFD programmer. Når et dataprogram brukes til en spesiell type problemstillinger, vil brukerne oppdage feil og programmererne vil rette de opp. Etter mye bruk innen dette temaet, vil derfor et CFD program inneholde færre feil for slike beregninger. Mens kombinasjoner av algoritmer som sjelden brukes (eller aldri har vært brukt før) har større sjanser for å inneholde feil.

ERCOFTAC (2000) og MARNET (2002) gir flere råd om hva som bør gjøres for å redusere feil i programvaren. Det bør finnes en rekke standard tester som kan kjøres for hver gang en lager en ny versjon av programmet. Disse testene må inneholde målte verdier som resultatene kan testes mot. Dette er en relativt omfattende og dyr operasjon, noe som betyr at den oftest bare blir benyttet av de største firmaene som lager CFD programmer. CFD programmer som lages av enkeltpersoner vil oftest ikke ha gjort en slik testing av ressursmessige årsaker. Slike programmer vil da inneholde mange flere feil. Dette tilsier at en bør bare bruke de største og mest kjente programmene til flomløpsberegninger. De viktigste er nevnt i kapittel 4.

ERCOFTAC (2000) og MARNET (2002) gir også råd til hvordan en bruker skal forholde seg til feil i CFD program. Innenfor sine anvendelser bør også brukeren ha en database med forskjellige testkjøringer som kan verifiseres mot målinger. Alle CFD programmene beskrevet i

Kapittel 4 er laget generelle, og de kan brukes for veldig mange forskjellige strømningssituasjoner. Det er derfor ikke nødvendigvis sannsynlig at et program har flomløp i sin test-portefølje. Når CFD programmet brukes utenfor området det er testet for, så økes muligheten for at det er feil i programmet. For flomløpsberegninger i Norge ville det vært en fordel om en database for slike beregninger fantes.

Et annet nyttig råd fra MARNET (2002) er å rapportere feil til de som lager programmet, slik at feilen kan rettes opp. Dette er nyttig både for den som finner feilen og for andre brukere som modellerer tilsvarende problemstillinger.

ERCOFTAC (2000) anbefaler at CFD programmene inneholder advarsler som gies til brukeren når det er sannsynlig at noe kan gå galt. Dette gjelder for eksempel kontroll av gridcellegeometri eller konflikter mellom ruhet og gridstørrelser. Mange CFD firmaer har fulgt disse rådene, men det er allikevel opp til brukeren av CFD programmet å se advarslene, forstå de, og å gjøre de nødvendige endringene i grid/input data for løse problemene. ERCOFTAC (2000) påpeker at dette ikke alltid skjer, noe som er en kilde til feil og usikkerhet i resultatene fra CFD beregninger.

Alle programmene beskrevet i denne rapporten bruker samme fremgangsmåten for å lage geometrien, som er definert ved en STL fil. Generering av denne filen er ofte mye av arbeidet med å lage input-data til den numeriske modellen. Hvis en har gjort dette for ett CFD program, kan en bruke den samme STL filen på et annet program. Gjør en samme beregningen med to forskjellige CFD programmer og en får samme svar, vil sannsynligheten for at feil i programmene påvirker resultatene være veldig lav. Bruk av to CFD programmer er derfor en god metode for å utelukke effekt av programfeil. Ulempen er at en må ha lisens og kunnskap om bruk av to forskjellige CFD programmer. Det finnes imidlertid norske konsulentfirmaer som har dette. Hvis ett av programmene er OpenFOAM, får en bare lisenskostnadene for det andre programmet. Merk at det går an å transformere grid laget av et kommersielt program til et format som OpenFOAM kan bruke (Rusten, 2012). Om ikke metoden brukes for alle beregninger, så kan den benyttes der en har mistanke om feil i programmet.

Merk at feil i STL filene ikke vil kunne påvises med denne metoden. Også feil i inngangsdata eller at gridet er for grovt vil heller ikke kunne påvises.

6. Oppsummering og anbefalinger

Oppsummering av litteraturstudien er gitt i dette kapitlet. I tillegg er det gitt endel anbefalinger om videre arbeide modellering av flomløp.

6.1 Oppsummering av nøyaktighet for CFD beregninger

Kapasiteten på standard (ogee) overløp, skarpkantede overløp og bredkronede overløp vil oftest kunne beregnes med en nøyaktighet på noen få prosent med standard CFD programmer, så lenge brukeren har tilstrekkelig kompetanse. Hovedutfordringen er å ha god nok oppløsning på gridet, med nok celler. Dette kan kreve lange beregningstider på kompliserte 3D flomløp. I tilfeller med meget kompliserte geometrier kan beregningstiden bli så lang at det ikke er praktisk mulig å utføre CFD beregningen.

Maksimal kapasitet av lukkede flomløp som er fylt med bare vann (ikke luft) kan sannsynligvis også beregnes relativt nøyaktig, gitt at ruheten på veggene kan modelleres riktig. Her knytter det seg noe usikkerhet til hva som skjer der nødvendig cellestørrelse er vesentlig mindre enn ruhetselementene. Det er ikke gjort omfattende tester av dette, noe som bør gjøres før man kan være sikker på nøyaktigheten av slike beregninger.

Lukkede flomløp har som oftest lufttinnblanding. Det gjelder også modellering av bratte kanaler nedstrøms overløp. Det er funnet artikler der lufttinnblanding har blitt beregnet for trappeoverløp (Valero og Bung, 2015; Meireles et al, 2014). De beregnede profilene av luftkonsentrasjonen har ganske store avvik i forhold til målingene. Fysikken og de numeriske algoritmene for lufttinnblanding er veldig komplekse. Det er ikke funnet grunnlag for å si at modellering av lufttinnblanding i flomløp kan beregnes nøyaktig med numeriske modeller i dag. Dette er et tema som krever mer forskning.

6.2 Generelle anbefalinger

Kan numeriske modeller beregne flomløpskapasitet for flomløpstype XX med god nok nøyaktighet? Dette er et viktig spørsmål innen damsikkerhet, der et dambrudd vil få store konsekvenser. Her kan NVE stille krav til at det må dokumenteres at flomløpstype XX er beregnet tidligere med numeriske modeller, og en har fått gode nok resultater sammenlignet med målinger. Det bør også vurderes hvor mange slike gode beregninger man bør kreve. Hvis en har fått dårlige resultater i en beregning, må det gjøres en kvalifisert vurdering av mulige feilkilder.

Et annet spørsmål er hvor nøyaktig en vannføring skal kunne beregnes. Hvilket krav skal det stilles til avviket mellom målt og beregnet verdi? Her kan man kanskje gjøre en vurdering i forhold til nøyaktigheten på alternative løsninger, i første rekke fysiske modeller. Men dette er opp til myndighetene å avgjøre.

ERCOFTAC (2000) laget en sjekklister med retningslinjer for hvordan CFD beregninger skal gjøres ("best practice"). Denne listen på 13 sider gir konkrete anbefalinger når det gjelder spørsmålene som ble referert i kapittel 5.

Tre store tekniske problemer med å bruke CFD beregninger til flomløp er luftmedrivning, ruhet/friksjon i råsprenge fjell og nok antall celler for komplekse geometrier. De to førstnevnte temaene vil kunne inngå i fremtidige forskningsprosjekter. Sistnevnte problem kommer av at alle geometriendringer i en konstruksjon krever et visst antall celler. Når de blir mange detaljer, blir behovet for celler ganske stort. Det kan bli større enn kapasiteten på de tilgjengelige data-maskinene. Et eksempel er overløpet til Degevassdammen, som det er bygget en laboratoriemodell av ved NTNU. Her er det brukt et labyrintoverløp med 20 tenner. Hvis hver tann modelleres med 50 celler på tvers av strømrretningen, blir det 1000 celler i lengderetningen over damkronen. I tillegg til resten av geometrien. Hvis en bruker 500 celler i den andre retningen, og 30 celler i dybden, vil en få 15 millioner celler. Og dette er bare for magasinet og overløpet. Dette er et lukket flomløp, slik at en i tillegg kan få hele tunnelen hvis den skal modelleres. En kan se for seg et behov på 30-50 millioner celler. Med parametertester etc. er dette ikke praktisk mulig å beregne med dagens (2015) PC'er.

Den viktigste årsaken til feil og usikkerhet i CFD beregninger er kompetansen til brukeren. Det er viktig at personell som skal gjøre CFD beregninger har kunnskap og erfaring innen numerisk strømningsmekanikk. Det er nødvendig at den teoretiske kompetansen på strømningsmekanikk og numerikk er til stede, slik at en vurdering av styrke/svakheter med de forskjellige algoritmene kan gjøres. Det er også nødvendig at de som skal gjøre beregningene har kunnskap om flomløpshydraulikk, slik at de kan vurdere riktigheten av resultatene.

Mange CFD programmer oppdateres ofte med nye algoritmer. Det er da nødvendig for brukeren å sette seg inn i disse, og følge med på hva som skjer av oppretting av feil i programmet. Å følge med på erfaringene som andre har gjort innen fagfeltet er også nyttig.

Innenfor mange fagfelt er kravet til nøyaktighet av en CFD beregning ikke så stor. Om for eksempel hastigheten på luften et sted inne i en bil blir underpredikert med 20 % under beregning av bilens ventilasjonssystem, så vil systemet allikevel fungere rimelig bra. Det samme kan sies ved strømningsberegningen i et vannrensebasseng. Men hvis kapasiteten av et flomløp blir underpredikert med 20 %, kan det føre til at en dam går til brudd under en flom. Dette har mye større konsekvenser. Personell som gjør CFD beregninger innen flomløpshydraulikk må derfor ha forstått at nøyaktighetskravet er større her enn i mange andre tilfeller.

Rent konkret anbefales det at personell bør ha formell utdanning innen fagfeltet, både numerisk modellering, hydraulikk og kunnskap om bruk av programmet som benyttes. De bør også ha tidligere erfaring med tilsvarende beregninger, der resultatene er sammenlignet med målinger (se kap. 6.4). Dette vil gjøre det mulig å vurdere nøyaktigheten av resultatene.

En vurdering av nødvendig kompetanse for personell som gjør CFD beregninger av flomløp kan være lik vurderingen for andre fagfelt. I Norge har vi i dag en godkjenningssordning for rådgivere innen flere fagfelt iht damsikkerhetsforskriftene.

6.3 Anbefalinger for hvilke program som kan brukes til flomløpsberegninger

Det bør stilles en rekke krav til programvaren som skal brukes for flomløpsberegninger:

1. Programmet må løse Navier-Stokes ligninger i tre dimensjoner.
2. Programmet må ha algoritmer for å beregne fri overflate, noe som i praksis betyr en volume of fluid metode.

3. Programvaren må ha flere turbulensmodeller og flere diskretiseringskjema
4. Programmet må kunne bruke ru vegglover, med en romlig fordelt ruhet
5. Programmet må ha blitt brukt på flomløp før, og med godt dokumenterte resultater
6. Det må være mulig å kjøpe støtte/support for programmet
7. Programvaren testes på en systematisk måte

Disse kriteriene betyr at en kun kan bruke programmer som er laget store kommersielle firmaer. I praksis betyr dette en kun bør bruke de kommersielle 3D CFD programmene FLOW-3D, FLUENT, CFX, STAR-CCM+, samt OpenFOAM.

I denne rapporten er det ikke foretatt noen vurderinger av hvilket av de fem CFD programmene som er best til overløpsberegninger. Det er pekt på styrke og svakheter med enkelte programmer. Men det kan hende at enkelte CFD programmer vil gi bedre resultater enn andre og/eller mye kortere beregningstid. Dette går det an å teste systematisk i et forskningsprosjekt.

FLOW-3D er i dag det mest brukte CFD programmet til flomløpsberegninger. Det har også flest algoritmer spesialtilpasset problemstillinger som er relevante for slike beregninger. Programmet OpenFOAM er gratis og viser økt bruk i mange organisasjoner som arbeider med vannfaglige problemstillinger, inkludert NTNU.

6.4 Sammenligning med enkle formler og standard overløp

Fagfeltet numerisk strømningsmekanikk utvikler seg hele tiden, og stadig nye algoritmer kommer til. Det er derfor vanskelig å gi et sett med programmer og algoritmer som bør brukes i en flomløpsberegning, og som vil bli uforandret over tid.

For enkle standardoverløp finnes det god dokumentasjon på kapasiteten. Dette gir en unik mulighet til å teste numeriske modeller og nye algoritmer. Her er det en mulighet til å stille krav til at et spesielt program med bestemte parametre/algoritmer skal testes ut på et enkelt overløp som en del av godkjenningen av en flomløpsberegning. Dette vil vise nøyaktigheten av programmet/algoritmene/parameterene.

Den mest effektive metoden for å teste om et CFD med gitte input-parametre og spesifikke algoritmer gir riktige svar for et flomløp er å gjøre en beregning av et standard overløp der en har en kjent vannføringskurve. Her kan en sammenligne den beregnede kapasitetskurven med resultatene fra overløpsformelen (Ligning 1). Avviket vil direkte fortelle hvor nøyaktige de numeriske beregningene er. Det anbefales at en beregning av kapasitetskurven for en ny geometri ledsages av resultatene for en kjent geometri, der beregningsprogram og alle andre parametre er like for de to beregningene. En sammenligner så resultatene fra den kjente geometrien med overløpsformelen.

Wendelboe (2015) fra FLOW-3D laget et flytskjema for anbefalt fremgangsmåte for en generell CFD beregning. Dette kan oversettes til en liste med gjøremål for en CFD beregning av et gitt flomløp, kalt A. Dette forutsetter at man har et lignende flomløp fra før, kalt B, med målte verdier for vannføringen. En starter så med dette kjente flomløpet.

1. Lag et grovt grid av flomløp B og enklest mulige grensebetingelser og algoritmer (første ordens skjema, for eksempel).

2. Kjør beregningen og se hva som skjer. Hvis programmet krasjer eller resultatene ser uriktige ut, gå tilbake til punkt 1 og gjør forbedringer. Hvis resultatene ser ok ut, gå til punkt 3.
3. Test parametre og forskjellige algoritmer på dette gridet. Se om beregningen er sensitiv for ruhet, diskretiseringmetoder, turbulensmodeller, grensebetingelser etc. Hvis det dukker opp uforutsette problemer, kan man måtte gå tilbake til punkt 1. Når alle testene er gjort, gå til punkt 4.
4. Gjør gridet finere med de mest aktuelle parametrene fra punkt 3. Hvis det dukker opp problemer, så må input parametre og/eller grid endres. Når en har fått et rimelig svar, gå til punkt 5.
5. Sammenlign resultatene fra beregningen i punkt 4 med de målte verdiene. Hvis det er avvik, gå tilbake til punkt 3, eventuelt til punkt 1. Når resultatet er godt nok, gå til punkt 6.
6. Gjør beregningen av flomløp A med samme gridoppløsning og parametre som flomløp B. Resultatene må sjekkes for å se om de er rimelige. Hvis en får resultater som ser ut som om de ikke er riktige, eller at beregningen krasjer, må en utføre en tilsvarende prosedyre som for flomløp B.
7. Gjør parametertester på de vanligste usikre faktorene i beregningen av flomløp A, og se hvordan de slår ut på resultatet.
8. Wendelboe (2015) anbefaler at alle resultatene lagres og at denne erfaringen inngår i kompetanseoppbyggingen til den personen/det firmaet som utfører CFD beregningen.

En kommentar til punkt 1. En veldig vanlig nybegynnerfeil i CFD beregninger er at gridet lages altfor fint i starten. Dette fører til lange beregningstider for å finne feil som ellers kunne blitt oppdaget hurtigere. Prosjektet tar dermed mye lenger tid enn nødvendig.

Metoden gitt her vil fungere så lenge en har målinger fra et flomløp som er nokså likt det en skal beregne. Imidlertid er det ikke sikkert at slike data finnes. Hvis en skal simulere en flomløpsgeometri som er relativt kompleks, kan det hende at CFD resultatene har store avvik i forhold til de riktige verdiene. Det er derfor ønskelig at det finnes data for mer kompliserte flomløp, og at dette blir studert nærmere.

Det er mulig å legge til rette for at flomløpsberegninger blir mer nøyaktige. Man kan lage en database med flomløpsgeometrier og måleresultater. Denne kan brukes til opplæring av CFD ingeniører og til å teste CFD programmer. Man kan også teste CFD programmer på flomløpsgeometrier der det finnes gode målinger fra laboratoriet. Resultatene og input-filene fra dette arbeidet kunne inngå i databasen og brukes av alle som arbeider med dette. På denne måten vil man kunne heve kompetansen på bruk av CFD programmer til flomløpsberegninger.

6.5 Anbefalinger for videre arbeide

En anbefaling for videre arbeide er at det utføres flere laboratorieforsøk av mer kompliserte flomløp. Her er det ikke nok å finne en kapasitetskurve, en må også måle profiler av vannhastigheter, trykk, turbulens og luftkonsentrasjoner for de mest kompliserte geometriene. En må også dokumentere geometrien nøyaktig, og lage for eksempel STL filer som lett kan brukes til

å lage geometrien i CFD programmene. Disse dataene anbefales gjort tilgjengelige for konsulenter og andre firmaer i vannkraftbransjen i Norge.

For lukkede flomløp og luftinnblanding må det muligens gjøres ytterligere forsknings/utviklingsarbeide innen numeriske algoritmer for å få modellert luftinnblanding riktig. FLOW-3D benytter en formel for luftinnblanding ved store gradienter i luftkonsentrasjonen. Det kan hende at denne bør forbedres. Forbedret formelverk for oppbrytning av store luftbobler er også et tema for videre forskningsarbeide.

En god modellering av turbulens er viktig for beregninger av blandinger av luft/vann. Spesielt hvordan turbulensen og den turbulente diffusjonsfaktoren i VOF ligningen endres som funksjon av tettheten i vertikal retning. Dette er også et sentralt tema for videre forskning.

I råsprenge tunneller er det store ruhetselementer i form av ujevnt fjell. Dette medfører usikkerheter. En usikkerhet er knyttet til hvordan ruheten påvirker friksjonen på veggene i tunnelen. En CFD modell trenger en friksjonsfaktor for å ta hensyn til skjærspenningen nær tunnelveggen. Det totale energitapet er imidlertid en sum av friksjonstap og singularertap i tunnelen. Appendix 2 viser at singularertap kan være halvparten av det totale energitapet. CFD modellen må derfor også kunne beregne singularertapene. Erfaring viser at nøyaktigheten på en singularertapsberegning for en stor del er avhengig av gridoppløsningen (Olsen og Oldervik, 1995). Et potensielt problem kan være at nødvendig cellestørrelse blir så liten at den er mye mindre enn ruheten på veggen. Dette kan skape numeriske problemer. Det anbefales derfor at dette undersøkes nærmere. En løsning på problemet kan være å bruke negative kildeledd i celler som er delvis fylt med ruhetselementer (Olsen og Stokseth, 1995).

6.6 Fysiske vs. numeriske modeller

Et sentralt spørsmål for vannkraftbransjen og NVE er om man skal bruke en fysisk eller en numerisk modell til å gjøre en flomløpsberegning. Begge metodene har sine fordeler og ulemper.

Kostnadene med en numerisk modell er ofte vurdert som lavere enn en fysisk modell. Gessler (2005) vurderte kostnadsforholdet til å være ca 1:4. Men dette kommer an på hvilke krav som stilles til den numeriske modellstudien. Arbeidet kan bli mer omfattende og kostbart hvis det kreves griduavhengighetsstudier, studier med mange andre parametertester, sammenligningsstudier med målte geometrier og bruk av to forskjellige dataprogrammer for å sikre seg mot programmene. Kostnaden på en fysisk modell vil også variere etter hvor nøyaktig resultat man ønsker.

En numerisk modell vil måtte gjøre en rekke tilnærmelser i algoritmene som brukes, som introduserer feilkilder. Dette problemet finnes ikke i en fysisk modell. En fysisk modell har imidlertid skalaproblemer, for eksempel med luft og overflatespenninger. Dette er et mindre problem i en numerisk modell.

En fysisk modell vil også ha endel andre usikkerheter, avhengig av hvordan den blir bygd. Ved Vassdragslaboratoriet ved NTNU er fysiske modeller av tunnelene i flomløp modellert med rør som har konstant tverrsnitt. Ruheten blir modellert med gummi/pleksiglass ringer som settes på innsiden av rørene. Begge disse tilnærmingene vil medføre unøyaktigheter i forhold til prototypen. I tillegg kommer unøyaktigheter ved omregning av ruhet til ring størrelse og avstand mellom ringene. En laserscanning av en tunnel vil kunne gi mer nøyaktige geometriske data til en

CFD modell enn en fysisk modell som er bygget på denne måten. Det eksisterer imidlertid teknologi der en målt punktsky brukes av en laser og skjærer ut en plastmodell av en mer korrekt tunnelgeometri. Denne teknologien er imidlertid hittil ikke tatt i bruk til modellering av tunneller ved Vassdragslaboratoriet ved NTNU. Metoden vil sannsynligvis øke kostnadene i forbindelse med den fysiske modellstudien.

Det knyttes også usikkerheter til hvor store friksjonsfaktorene blir i råsprengte tunneller. Dette påvirker både fysiske og numeriske modeller.

En numerisk modell gir verdier for alle parametrene over hele geometrien, for eksempel hastigheter og trykk. I en fysisk modell må dette måles. Dette kan bare gjøres i enkelte punkter, men medfører da ekstra kostnader. Det krever også kompetanse. I fysiske modeller for flomløp i Norge måles oftest kun vannstand og vannføring for å få kapasitetskurven.

En annen fordel med en numerisk modell er at man kan finne tilbake gamle datafiler og resultater for beregninger som er gjort flere år tilbake. En fysisk modell rives etter bruk, og hvis det er usikkerheter om hvordan geometrien var eller det mangler målinger, så kan man ikke få tak i denne informasjonen.

7. Referanseliste

Abd El-Hady Rady, R. M. (2011), 2D-3D Modeling of Flow Over Sharp-Crested Weirs, Journal of Applied Sciences Research, Vol. 7, No. 12, pp 2495-2505. Download from <http://www.flow3d.com/wp-content/uploads/2014/08/2D-3D-Modeling-of-Flow-Over-Sharp-Crested-Weirs.pdf>

Andersson, B., Andersson, R., Håkansson, L., Mortenssen, M., Sudiyo, R. og van Wachem, B. (2011), Computational Fluid Dynamics for Engineers, Cambridge University Press. ISBN: 9781107018952.

Andersson, A. G., Andreasson, P. og Lundström, T. S. (2013), CFD-Modelling and Validation of Free Surface Flow during Spilling of Reservoir in Down-Scale Model, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics , Vol. 7, Issue 1, pp. 159-167.

Aryal, P. J. (2000), CFD modelling of flow pattern in the sand traps of Khimti hydropower plant. MSc thesis D1-2000-6, Department of Hydraulic and Environmental Engineering, The Norwegian University of Science and Technology.

Aydin, M. C. og Ozturk, M. (2009), Verification and validation of a computational fluid dynamics (CFD) model for air entrainment at spillway aerators, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 36, No. 5, pp 826-836.

Aydin, M. C. og Emiroglu, M. E. (2013), Determination of capacity of labyrinth side weir by CFD, Flow measurements and instrumentation, Vol. 29, pp 1-8.

Baranya, S., Olsen, N. R. B., Stoesser, T. og Sturm, T. (2012), Three-dimensional RANS modeling of flow around circular piers using nested grids, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, Vol. 6, Issue 4, pp 648-662.

Birkeland, R. (2008), Modellstudie av flomløpet på dam Sysenvatn. Ruhet, ras og luftlommers betydning for kapasiteten, MSc oppgave, Insittutt for vann og miljøteknikk, NTNU.

Bjørkmo, D. (2012), Svartevassdammen - Modellforsøk for undersøkelse av kapasitet til flomløp og tappeløp, NTNU MSc Oppgave.

Blaisdell, F. W. (1952), Hydraulics of Closed Conduit Spillways, Part I. Theory and Its Application, University of Minnesota, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, USA, Technical Paper No. 12, Series B.

Bråtveit, K. og Olsen, N. R. B. (2015), Calibration of Horizontal Acoustic Doppler Current Profilers by Three-dimensional CFD Simulations, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics.

Bråtveit, K., Bruland, A. og Brevik, O. (2016), The long-term stability of selected Norwegian hydropower tunnels subjected to hydropeaking, Journal of Tunnelling and Underground Space Technology. Akseptert artikkel, under trykking.

CD-adapco (2015), User Guide, STAR-CCM+ version 10.02.

Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., Coleman, H. og Raad, P. E. (2008), Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications, Transactions of the ASME, Vol. 130, pp 078001-1 - 078001-4.

CFD-Online, Best practice guidelines for turbomachinery CFD, http://www.cfd-online.com/Wiki/Best_practice_guidelines_for_turbomachinery_CFD.

Chandler, K., Gill, D., Maher, B., Macnish, S. og Roads, G. (2003), Coping with probable maximum flood - an alliance project delivery for Wivenhoe Dam. Proceedings of the 43rd ANCOLD Conference, Hobart, Tasmania, pp. 332-349.

Chanel, P. G. (2008), An Evaluation of Computational Fluid Dynamics for Spillway Modeling, MSc Thesis, University of Manitoba, Canada.

Chanel, P. G. og Doering, J. C. (2008), An Evaluation of Computational Fluid Dynamics for Spillway Modeling, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 35, pp 1481-1485.

Chanson, H. (2009), Turbulent air-water flows in hydraulic structures: dynamic similarity and scale effects, Environmental Fluid Mechanics, Vol. 9, pp 125-142.

Chanson, H. (2000), Characteristics of Skimming Flow over Stepped Spillways. Discussion. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 126, No. 11, pp. 862-865.

Chanson, H., Yasuda, Y. og Ohtsu, I. (2000), Flow resistance in skimming flow: A critical review, In: Hydraulics of Stepped Spillways, Minor & Hager (eds), Balkema, ISBN 90 5809 135 X.

Daneshkhah, A. og Vosoughifar, H. (2012), Solution of Flow Field Equations to Investigate the Best Turbulent Model of Flow over a Standard Ogee Spillway in Finite Volume Method, First International Conference on Dams and Hydropower, Teheran, Iran.

Darghai, B. (2006), Experimental Study and 3D Numerical Simulations for a Free-Overflow Spillway, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 132, No. 9, pp 899-907.

Duru, A. (2014), Numerical modelling of contracted sharp crested weir, MSc thesis, Middle East Technical University, Turkey.

Ettema, R., Arndt, R., Roberts, P. and Wahl, T. (2000), Hydraulic Modelling - Concepts and Practice, American Society of Civil Engineers Manuals and Report on Engineering Practice, No. 97.

Falvey, H. T. (1980), Air-Water Flow in Hydraulic Structures, Engineering Monograph. No. 41, US Bureau of Reclamation.

Falvey, H. T. (1990), Cavitation in Chutes and Spillways, Engineering Monograph No. 42, US Bureau of Reclamation.

Feurich, R. og Rutschmann, P. (2005), Efficient design optimization and investigation by combining numerical and physical models. Proceedings of the 32nd Congress of the International Association of Hydraulic Engineering and Research, Seoul, pp. 490-500.

Feurich, R. og Olsen, N. R. B. (2012), Finding free surface of supercritical flows-numerical investigation, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, Vol. 6, Issue 2, pp 307-315.

Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H. og Carissimo, B. (2007), Best Practise Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment, COST action 732, COST Office, Brussels, Belgium.

Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H. og Carissimo, B. (2010), The Best Practice Guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment : an outcome of COST 732, The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010), Chapel Hill, North Carolina, USA.

Fu, X. L., Li, D. og Zhang, X. F. (2010), Simulations of the three-dimensional total dissolved gas saturation downstream of spillways under unsteady conditions, Journal of Hydrodynamics, Vol. 22, Issue 4, p 598-604.

Gessler, D. og Rasmussen, B. (2005) Before the flood. Desktop Engineering Magazine, October. <http://www.deskeng.com/articles/aaabhe.htm>.

Gessler, D. (2005) CFD Modeling of Spillway Performance, World Water and Environmental Resources Congress, Anchorage, Alaska, United States.

Hargreaves, D. M., Morvan, H. P. og Wright, N. G (2007), Validation of the Volume of Fluid Method for Free Surface Calculation: the Broad-Crested Weir, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, Vol. 1, No. 2, pp 136-146.

Haun, S., Olsen, N. R. B. og Feurich, R. (2011), Numerical modelling of flow over a trapezoidal broad-crested weir, Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, Vol. 5, Issue 3, pp 397-405.

Hirt, C. W. og Nichols, B. D. (1981), Volume of fluid (vof) method for the dynamics of free boundaries. Journal of Computational Physics, Vol. 39, No. 1, pp 201-225.

Hirsch, C. (2006), The Development of a Framework for CFD Validation and Best Practice: The QNET CFD Knowledge Base, Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 19, No. 2.

Ho, D., Boyes, K., Donohoo, S. og Cooper, B. (2003), Numerical flow analysis for spillways. Proceedings of the 43rd ANCOLD Conference, Hobart, Tasmania, pp. 227-237.

Hong, S.-W., Lee, I.-B. , Lee, K.-Y., Kim, H.-D., Seo, I.-H., Hwang, H.-S., Bitog, J.P., Kwon, K.-S., Kwon, S.-H. og Shin, M.-H. (2011), CFD analysis on the performance of an overturnable water gate for reservoir spillway, Applied Engineering in Agriculture, Vol. 27, Issue 5, pp 719-728.

Hua, J. og Lou, J. (2007), Numerical simulation of bubble rising in viscous liquid, *Journal of Computational Physics*, Vol. 222, pp 769–795.

Jacobsen, F. (2014), Rifle Creek Dam DIY Physical Modelling, 5th International Symposium on Hydraulic Structures, Brisbane, Australia.

Jacobsen, J. (2008), Three-dimensional numerical modelling of water flow at the spillway of dam Sysenvatn, Master oppgave, Insittutt for Vann og miljøteknikk, NTNU.

Jacobsen, J. og Olsen, N. R. B. (2010), 3D numerical modelling of the capacity for a complex spillway, *Water Management*, Vol. 163, Issue WM6, pp. 283-288.

Johnson, M. C. og Savage, B. M. (2006), Physical and Numerical Comparison of Flow over Ogee Spillway in the Presence of Tailwater, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, Vol. 132, No. 12, pp. 1363-1367.

Kanyabujinja, P. N. (2015), CFD Modelling of Ogee Spillway Hydraulics and Comparison with Physical Model Tests, MSc Thesis, Stellenbosch University, South Africa.

Keller, R. J. og Rastogi, A. K (1975) Prediction of flow development on spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 101, Issue 9, pp. 1171-1184.

Kökpınar, M. A., Kumcu, S. Y. og Guler, I. O. (2012) Comparison of physical modeling and CFD simulation of flow over spillway in the Kavsak Dam, IAHR European Congress, München, Tyskland.

Krüger, S. and Olsen, N. R. B. (2001), Shock-wave computations in channel contractions, XXIX IAHR Congress, Beijing, China.

Lauder, B. E., og Sharma, B. I. (1974), Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc, *Letters in Heat and Mass Transfer*, Vol. 1, Issue 2, pp. 131-138.

Li, S., Cain, S., Wosnik, M., Miller, C., Kocahan, H. og Wyckoff, R. (2011), Numerical modeling of probable maximum flood flowing through a system of spillways, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 137, Issue 1, pp 66-74.

Liu, T. og Yang, J. (2014), Three-dimensional computations of water-air flow in a bottom spillway during gate opening, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 8, Issue 1, pp 104-115.

Lucino, C., Liscia, S. og Duró, G. (2010), Vortex detection in pump sumps by means of CFD, XXIV Latin American Congress on Hydraulics, Punta del Este, Uruguay.

Lv, X., Zou, Q. og Reeve, D. (2011), Numerical simulation of overflow weirs using a hybrid level set/VOF method, *Advances in Water Resources*, Vol. 34, Issue 10, pp 1320-1334.

Mahaffy, J. (2010), Development of best practice guidelines for CFD in nuclear reactor safety, *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 42, No. 4.

Markhus, E. og Venås, B. (2010), Svartevatn CFD-simuleringer av overløp, NORCONSULT oppdrag 5009186, Sira-Kvina Vassdraget, Flomberegning, Bilag 79.

MARNET (2002), Best Practice Guidelines for Marine Applications of Computational Fluid Dynamics, <https://pronet.atkinsglobal.com/marnet/guidelines/guide.html>.

McConnell, S. (2004), Code Complete, A Practical Handbook of Software Construction, 2nd Edition. Redmond, Wa., Microsoft Press, <http://www.stevemccconnell.com/cc.htm>.

Meireles, I. C., Bombardelli, F. A. og Matos, J. (2014) Air entrainment onset in skimming flows on stepped spillways: an analysis, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 52, No. 3, pp 375-385.

Menter, F. (2001), CFD Best Practice Guidelines for CFD Code Validation for Reactor-Safety Applications, European Commission, Key Action: Nuclear Fission, Contract No. FIKS-CT-2001-00154.

Menter, F. R. (2012), Best Practice: Scale-Resolving Simulations in ANSYS CFD, ANSYS Inc.

Mohammadpour Zalaki, S., Fathian, H., Zalaghi, E. and Hormozi, F. K. (2015), Investigation of hydraulic parameters and cavitation in Kheir Abad flood release structure, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 42, pp 213-221.

NVE (2005), Retningslinjer for flomløp, <http://www.nve.no/no/Sikkerhet-og-tilsyn1/Dam-sikkerhet/Regelverk/Retningslinjer/>.

Olsen, N. R. B. og Oldervik, O. (1995), Three-dimensional numerical modeling of water flow through a gate plug, IAHR 26. Kongress, London.

Olsen, N. R. B. and Stokseth, S. (1995), Three-dimensional numerical modeling of water flow in a river with large bed roughness, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 33, No. 4., pp. 571-581.

Olsen, N. R. B. and Melaaen, M. C. (1996), Three-dimensional numerical modelling of vortex shedding behind circular cylinders, 2nd. International Conference on Modelling, Testing and Monitoring for Hydro Powerplants", Lausanne, Switzerland.

Olsen, N. R. B. og Kjellesvig, H. M. (1998), Three-dimensional numerical flow modelling for estimation of spillway capacity, *Journal of Hydraulic Research*, Issue 5, pp. 775-784.

Olsen, N. R. B., Aberle, J. and Koll, K. (2010), Resolving large bed roughness elements with an unstructured hexahedral grid, *RiverFlow 2010*, Braunschweig, Germany.

Patankar, S.V. (1980), *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill Book Company, New York.

Pedersen, Ø. og Rütther, N. (2016), Numerical modelling of submerged flow over ogee weirs, *RiverFlow 2016*, New Orleans, USA.

Rahimzadeh, H., Maghsoodi, R., Sarkardeh, H. og Tavakkol, S. (2012), Simulating flow over circular spillways by using different turbulence models, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 6, Issue 1, pp 100-109.

- Roache, P. J. (1994), A method for uniform reporting of grid refinement studies, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 116, pp 405-413.
- Rusten, E. (2012), Numerical modelling of the Tonstad sand trap with OpenFOAM, Prosjektoppgave, Institutt for vann og miljøteknikk, NTNU.
- Rüther, N., Jacobsen, J., Olsen, N. R. B. og Vatne, G. (2010), Prediction of the three dimensional flow field and bed shear stresses in a regulated river in Mid-Norway, *Hydrology Research*, Vol, 41, No. 2, pp. 145-152.
- Røneid, Ø. og Sæter, Å. (2007) Dam Innerdalen - Hydraulisk analyse og modellforsøk av flomløp og tappeløp, Master Oppgave, Institutt for Vann og miljøteknikk, NTNU, D1-2007-16.
- Savage, B. M. og Johnson, M. C. (2001), Flow over ogee spillway: Physical and numerical case study, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, Issue 8, pp. 640-649.
- Savage, B. M., Frizell, K. og Crowder, J. (2004), Brains versus Brawn: The Changing World of Hydraulic Model Studies, ASDSO 2004 Annual Conference Proceedings. <http://www.flow3d.com/home/resources/bibliography/water-environmental-bibliography>.
- Savage, B. M, Heiner, B. og Barfuss, S. L. (2014), Parshall flume discharge correction coefficients though modelling, *Water Management*, Vol. 167, Issue WM5, pp 279-287.
- Schlichting, H. (1979), *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Stamou, A. I., Chapsas, D. G. og Christodoulou, G. C. (2008), 3-D numerical modelling of supercritical flow in gradual expansions, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 46, No. 3, pp. 402-409.
- Suerich-Gulick, F., Gaskin, S., Villeneuve, M., Holder, G. og Parkinson, E. (2006), Experimental and numerical analysis of free surface vortices at a hydropower intake, The 7th Int. Conf. on Hydroscience and Engineering (ICHE-2006), Philadelphia, USA
- Teklemariam, E., Korbaylo, B. W., Groeneveld, J. L. og Fuchs, D. M. (2002) Computational fluid dynamics: diverse applications in hydropower project's design and analysis. Proceedings of the CWRA 55th Annual Conference, Winnipeg, pp. 1-20.
- Temeepattanapongsa, S, Merkley, G. P., Barfuss, S. L. og Smith, B. L. (2013), Generic Free-Flow Rating for Cutthroat Flumes, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 139, Issue 7, pp 727-735.
- Tritthart, M., og Gutknecht, D. (2007), Three-dimensional simulation of free-surface flows using polyhedral finite volumes, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, Vol. 1, Issue 1, pp 1-14.
- Turan, C., Carrica, P., Lyons, T., Hay, D., and Weber, L. (2008), Study of the free surface flow on an ogee-crested fish bypass." *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 134, No. 8, pp 1172-1175.

USBR (U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation) (2001) Water Measurement Manual, 3rd edn. U. S. Government Printing Office, Washington, DC, USA.

Valero, D. og Bung, D. B. (2015), Hybrid Investigation of Air Transport Process in Sloped Stepped Spillway Flows, IAHR Congress, de Hague, the Netherlands.

Vingerhagen, S. (2011), Numerisk modellering av overløpet på Innerdalen vannkraftdam, Master oppgave, Institutt for vann og miljøteknikk, NTNU.

Vingerhagen, S. og Olsen, N. R. B. (2012), 3D numerical modelling of the capacity for a partially pressurized spillway, IAHR European Conference, Munich, Germany.

Wang, J. og Chen, H. (2009), Experimental study of eliminating vortices along guide wall of bank spillway, Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS.

Wang, Y. og Jiang, C. (2010), Investigation of the Surface Vortex in a Spillway Tunnel Intake, Tsinghua Science and Technology, Vol. 15, No. 5, pp 561-565.

Waterson, (2010), QNET-CFD as a framework for enhancing quality and trust in computational wind engineering. The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010), Chapel Hill, North Carolina, USA

Wendelboe, J. (2015), Use of FLOW-3D for modelling Dams, Spillways, and Related Hydraulic Control Structures, FLOW-3D Webinar, 7. May 2015.

WF Atkins Consultants (2002), MARNET CFD, Best practise guidelines for marine applications of computational fluid dynamics, <https://pronet.atkinsglobal.com/marnet/publications/bpg.pdf>.

Ying, X. og Wang, S. S. Y. (2010), Evaluation of 2D shallow-water model for spillway flow with a complex geometry, Journal of Hydraulic Research, Vol. 48, Issue 2, pp 265-268.

Yuce, M. I., Al-Babely, A. A. H. og Al-Dabbagh, M. A. (2015), Flow simulation over oblique cylindrical weirs, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 42, pp 289-407.

Appendiks 1. Tabell med data for undersøkt litteratur

Avviket i tabellen er gitt i forhold til målte verdier fra et fysisk modellforsøk.

År	Forfattere	Type overløp	Avvik, C-faktor/ vannføring (%)	Avvik, vannivå over overløpet	Program
1998	Olsen/Kjellesvig	Bredkronet	< 1	< 3 %	SSIIM 1
2001	Savage/Johnson	Standard	1-12	Ikke målt	FLOW-3D
2002	Teklemariam et al	Under luke	1.5	Ikke målt	FLOW-3D
2003	Chandler et al	Standard	Ikke målt	Ikke målt	FLOW-3D
2003	Ho/Boyes/Donohoo/ Cooper	Standard (2D)	12-16 (2D) 0-4 (3D)	< 5 % < 10 %	FLOW-3D
2004	Savage/Frizell /Crowder	Labyrint	< 15	Ikke målt	FLOW-3D
2005	Gessler	Standard	5	Ikke målt	FLOW-3D
2005	Feurich/ Rutschmann	Under luke	1-2	Ikke målt	FLOW-3D
2006	Dargahi	Standard	1.6-2.9	0-4 %	FLUENT
2006	Johnson/Savage	Standard delvis dykket	0.4-2.8	Ikke målt	FLOW-3D
2007	Hargreaves/Morvan/ Wright	Bredkronet	2.2 (2D) 0.4 (3D)	< 10 %	FLUENT
2008	Turan/Carrica/Lyons/ Hay/Weber	Standard	1-2	< 5 %	FLUENT
2008	Chanel/Doering	Standard	1-24	< 5 % (3 figs)	FLOW-3D
2008	Chanel/Doering	Under luke	3-8	Ikke målt	FLOW-3D
2009	Aydin/Ozturk	Luftinnblanding	Ikke målt	Ikke målt	FLUENT
2010	Jacobsen/Olsen	Lukket flomløp	0-10	Ikke målt	FLOW-3D
2010	Markhus/Venås	Lukket flomløp	0-20	Ikke målt	CFX
2011	Li/Cain/Wosnik/Mil- ler/Cocahan/Wyckoff	Kompleks	Ikke målt	Ikke målt	FLUENT

2011	Haun/Feurich/ Olsen	Bredkronet	0.8-4.6 (2D og 3D)	Ikke data	FLOW-3D/ SSIIM 2
2011	Abd El-Hady Rady	Skarpkantet	< 3	Ikke målt	FLOW-3D
2012	Rahimzadeh/Magh- soodi/Sarkardeh/ Tavakkol	Sirkelform	Ikke målt	noen pros- ent?	FLUENT
2012	Kökpinar/Kumcu/ Guler	Standard	2.3-3.7	ca 5 %	FLOW-3D
2012	Feurich/Olsen	Sarpfossen/ Naturlig elv	Ikke målt/ beregnet	0-100 %	STAR-CCM+
2012	Vingerhagen/Olsen	Lukket flomløp	Usikker geometri	Usikker geometri	STAR-CCM+
2012	Daneshkhah/ Vosoughifar	Standard	10-11	Ikke vist	FLUENT
2013	Andersson/Andreas son/Lundstrøm	Under luke	1-8	< 30 %	CFX
2013	Temeepattanapongsa et al	Parshall renner	3, snitt	Ikke målt	FLOW-3D
2013	Aydin/Emiroglu	Labyrint	11, snitt	Ikke målt	FLUENT
2014	Duru	Skarpkantet	0.26-7	Ikke målt	FLOW-3D
2014	Jacobsen	Standard	ikke målt	0-3.5%	OpenFOAM
2014	Savage/Heiner/ Barfuss	Parshall	0-14	0-16 %	FLOW-3D
2015	Olsen	Bredkronet	2	4.5 % (snitt)	OpenFOAM
2015	Kanyabujinja	Standard	4-12 (2D) 3-7.4 (3D)	< 40 %	FLUENT
2015	Mohammedpur/ Fathian/Zalaghi/Hor- mozi	Standard	5-14	11.4-16.8 % (gjennom- snitt i kanal)	FLOW-3D
2016	Pedersen/Rüther	Standard, delvis dykket	< 8.5	ikke målt enda	STAR-CCM+

Appendiks 2. Friksjonstapsberegninger for Sysen flomløpet

Det er gjort overslagsberegninger for hvor stort friksjonstapet er for Sysen flomløpet. En har her hentet data fra Birkeland (2008) (Tabell 5 og 7) som har gitt tverrsnittsarealer, hydraulisk radius og lengder av de forskjellige delene av det lukkede flomløpet. Det er i tabellen under antatt at vannføringen er 500 m³/s, som er tilnærmet maksimal vannføring, samt at Manning-Strickler tallet er 33.

Navn	Grentunnel	Samletunnel	Sjakt	Vannlås	Totalt
Tverrsnittsareal [m ²]	22	68	22	46	
Hydraulisk radius [m]	1.24	2.18	1.32	1.85	
Lengde [m]	30	120	90	335	575
Hastighet [m/s]	5.7	7.4	23	11	
Friksjonstap [m]	0.7	2.1	29	16	48

Den totale høydeforskjellen mellom overløpskronen og utløpet er 84 meter (Birkeland, 2008), hvis vi regner at vannstanden står i taket på tunnelen ved utløpet. Dette betyr at friksjonstapet utgjør 57 % av det totale energitapet i flomløpet.

Hvis en i stedet bruker et Manning-Strickler tall på 24, som Birkeland (2008) vurderte på bakgrunn av Rahms metode, blir friksjonstapet 90 meter. Dette er mer enn tilgjengelig energihøyde. Dette betyr at en slik friksjonsfaktor vil være for lav.

Det største singulærtapet kommer der vi har en ekspansjon. Dette vil være mellom sjakta og vannlåsen. Hvis vi antar at singulærtapet kan beregnes med formelen:

$$h_s = \frac{(U_{sjakt} - U_{vannlas})^2}{2g}$$

Får vi et singulærtap på 7.3 meter her. Utløpstapet fra vannlåsen kan blir ca 6 meter ved en brå ekspansjon. Disse to singulærtapene vil tilsammen utgjøre 13 meter.

Appendiks 3. Forskningsprosjekt på numerisk modellering av luftinnblanding.

US Bureau of Reclamation (<http://www.usbr.gov/research/projects/detail.cfm?id=9509>)

Comparison of physical observations and simulations of air entrainment

Project ID: 9509

Principal Investigator: [James Higgs](#)

Research Topic: Water Operation Models and Decision Support Systems

Funded Fiscal Years: [2014](#) and [2015](#)

Keywords: air entrainment, air bulking, cfd, numerical modeling, scale effects, uncertainty, sensitivity

Research Question

Analyses of two-phase flows (air and water mixtures) are necessary for proper design of penstocks, pipelines, spillways and other hydraulic structures. These analyses, which are frequently needed in Reclamation, often require time consuming calculations, very conservative assumptions, and sometimes physical modeling to properly design and size air vents and other system features. The development of a computational tool to estimate air demand would be very valuable for Reclamation.

Computational Fluid Dynamics (CFD) modeling generally costs about one third the cost of a physical hydraulic model. Scale effects of size and water temperature is problematic in physical models, while in CFD air entrainment routines may need calibration or a sensitivity study on input variables.

Questions:

*Can existing CFD software be used to accurately model two-phase flows for Reclamation application?

*Can existing two-phase flow codes and routines written by previous Reclamation researchers (Monograph 42) be accurately applied through more modern software?

*Can flow turbulence and air bulking reactions be simulated in three dimensions (3D) using numerical modeling to adequately plan for air bulking within Reclamation infrastructure (i.e. sizing air vents on penstocks) for operations and maintenance and for designing new structures?

*What are the issues and uncertainties inherent in determining the potential for CFD modeling of air bulking in turbulent flows?

*Would existing numeric modeling systems, such as FLOW-3D, be robust and accurate enough to simulate air bulking to answer Reclamations needs?

*Do study results provide confidence for CFD modeling of air entrainment cause by turbulence?

*What is the cost/benefit of CFD and WS77? (WS77 is the code used in Monograph 42, Cavitation in Chutes and Spillways, 1990.)

Need and Benefit

The accuracy of the various Computational Fluid Dynamics (CFD) codes used on Reclamation Projects is always a consideration. Errors from small to large may lead to damaging the infrastructure, additional costs due to over design. Reclamation has several needs for needing to model air entrainment in various systems. These include:

- Air content can reduce cavitation damage in hydraulic turbines (>>>renewable energy<<<), pumps, energy dissipators, high velocity spillway flows, and valves.
- Water treatment where air is needed to sustain microorganisms for water purification (Advanced Water Treatment).
- Overtopping of spillways due to a higher water surface caused by air bulking.
- Air entrainment may change effectiveness of energy dissipators.
- CFD simulation of changes in the effective viscosity of air-water mixtures and sublayer thickness can that have a substantial reduction of friction factor (Chanson, Drag reduction in open channel flow by aeration and suspended load, Journal of Hydraulic Research, Jan 2010)
- Design engineers require knowing inlet capacity to pipes and tunnels. A hydraulic jump and associated air demand and bulking of the flow can impact the capacity.

Contributing Partners

None

Research Products

Hardcopy of PAP series report (posted at http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/pubs/index.cfm).

Hardcopy of Technical session presentation(s).

Professional paper(s) or presentations(s).

This information was last updated on January 31, 2015

[Contact the Research and Development Office](#) with questions or comments about this page