

3D NUMERISK MODELLERING AV DELER AV VANNVEGEN TIL TONSTAD KRAFTVERK

Oddmund Brevik

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2013

Hovedveileder: Nils Reidar Bøe Olsen, IVM

Medveileder: Kari Bråtveit, IVM
Samuel Vingerhagen, IVM

Noregs teknisk-naturvitskaplege universitet
Institutt for vann- og miljøteknikk



MASTEROPPGÅVE

Student: ODDMUND BREVIK

Tittel: 3D NUMERISK MODELLERING AV DELER AV VANNVEGEN
TIL TONSTAD KRAFTVERK

1 INTRODUKSJON

Tonstad kraftverk på Tonstad i Sirdal kommune i Vest-Agder vart sett i produksjon i 1968. I første byggetrinn vart vatnet frå elva Kvina nytta. Inntaksmagasinet for kraftverket var Homstølsvatnet. To aggregat på 160MW vart installert. I andre byggetrinn vart vatnet frå Siravassdraget overført, og endå to aggregat på 160 MW installert. To nye inntaksmagasin vart inkludert i reguleringa Tjørhomvatn og Ousdalvatn, som begge regulerast i same høgde som Homstølvatn. I 1988 vart det femte aggregatet på 320 MW installert. Totalt gir dette ein samla effekt på 960 MW.

2 BAKGRUNN

Ved drift av Tonstad Kraftverk har det blitt registrert skader på turbin som følgje av sediment transport. Størst skade er registrert på turbinen knyt til aggregat nr 5. Det er knyt tvil til korleis sedimentar kan passera sandfanget, og kva reguleringssituasjonar som er årsak til sedimenttransporten. Fleire teoriar til årsak er sett fram:

- i) Kan det oppstå luftlommer ved fylling av sandfanget? Og kan desse/denne luftlommene/en medføre lokal komprimering av vassføringa, slik at vannhastigheten stig?
- ii) Kan friskeilstrømning i sandfanget oppstå ved enkelte reguleringssituasjonar, slik at vannhastigheten i sandfanget blir svært høg?
- iii) Skuldast sedimenttransporten transiente strømningsituasjonar pga. reguleringsendringar?
- iv) Kan vannhastigheter som oppstår under fylling av sandfanget medføre spyling av sandfanget? Korleis påverkar lukas posisjon ved fylling vannhastigheten over terskelen?

Sidan sediment transport gjennom turbin er medfører høge kostnader og påverkar både produksjonen og tryggleiken til anlegget er det ynskt å forstå meir om kva årsak/er som medfører skader.

I dag er det vanleg å dimensjonera sandfang ved å estimera maksimal vannhastighet vha. kontinuitetsligningen. Dvs. at ein finn gjennomsnittleg maksimale vannhastighet utan omsyn til kompleks geometri, ei heller to fase strømnig. Difor skal det i denne oppgåva nyttast eit 3D numerisk modelleringsprogram, STAR-CCM+ til å teste om det er mogleg å vurdere ei eller fleire av teoriene gitt over. STAR-CCM+ har ved tidlegare forsøk vist seg og vera eit nøyaktig verktøy til

estimering av hastighetsfelt i tre dimensjonar. Det er difor ynskt å finne ut om STAR-CCM+ er egna verky til å vurdere ein eller fleire av problemstillingane skisseret over. Til verifisering av resultatata er det viktig og samanlikna mot målingar gjort i felt. Hastighetsprofil, vassføring og trykkmålingar frå sandfanget vil vera tilgjengeleg, og skal brukast til å teste resultatata frå STAR-CCM+.

2 PROBLEMSTILLING

Deler av vannvegen knyt til Tonstad kraftverk skal modellerast vha. STAR-CCM+. Geometrien av konstruksjonen skal modellerast basert på 3D stl.filer og arbeidsteikningar. Kandidaten skal vurdere kor nøyaktig det er naudsynt å gjengi geometrien. Vidare skal kandidaten velje kva metodar og reknemodellar som ein bør nyttast.

Kandidaten står fritt til og velje kva for ein driftssituasjon, skissert i punkta i-iv) han ynskjer å undersøke. Den valg problemstillinga skal simulertast vha. STAR-CCM+, og framgongsmåten skal dokumenterast.

3 MÅL

Hovudmålsetninga med oppgåve er å teste i kva grad STAR-CCM+ er egna som verky for vurdering av ulike hydrauliske situasjonar som kan oppstå i tunnelsystemet til eit kraftverk. Konklusjonen skal innehalde kandidaten si meining om nytta av STAR-CCM+ i høve til vurdering av valte driftssituasjon. Usikkerheter knyt til dei numeriske algoritmane i modellen og input geometri skal drøftast. Oppgåva skal gi tilrådingar om bruk av numeriske modellar til vurdering av strømningsmønstra i tunnelsystem.

4 KONTAKTPERSONAR

NTNU
Nils Reidar Bøe Olsen, Professor, formell rettleiar
Kari Bråtveit, stipendiat, medrettleiar
Samuel Vingerhagen, forskingsassistent, medrettleiar

Kandidaten står fritt til å knytte kontakt med andre fagpersonar både intert og eksternt.

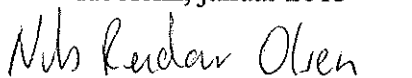
5 RAPPORTFORMAT, REFERANSAR OG ERKLÆRING

Oppgåva skal skrivast i eit tekstbehandlingsprogram slik at figurar, tabellar, foto osv. får god rapportkvalitet. Rapporten skal innehalde eit samandrag, ei innhaldsliste, ei liste over figurer og tabellar, ei litteraturliste og opplysningar om andre relevante referansar og kjelder. Oppgåva skal leverast i B5 format som pdf i DAIM og trykkast i tre eksemplar som leverast faglærer/institutt.

Samandraget skal ikkje ha meir enn 450 ord og skal være eigna for elektronisk rapportering. Masteroppgåva skal ikkje leverast seinare enn måndag 10. juni 2013.

Denne teksten skal inkluderast i oppgåva, og vil bli brukt under sensurering.

Koblenz, januar 2013



Nils Reidar Bøe Olsen
Professor

Forord

Denne rapporten vart skriven som masteroppgåve ved Noregs teknisk-naturvitskaplege universitet, Institutt for vann- og miljøteknikk.

Etter arbeidet med sandfang 3 ved Tonstad kraftverk i prosjektoppgåva hausten 2012, ville eg fortsette arbeidet i masteroppgåva. Målet med denne oppgåva var å teste det numeriske modelleringsprogrammet STAR-CCM+ opp i mot ulike teoriar som er sett fram som årsaker til skade frå sediment på turbin.

Eg vil med dette også takke personane som hjalp meg undervegs med oppgåva:

Nils Reidar Bøe Olsen
(Hovudrettleiar)

Kari Bråtveit
(Rettleiar)

Samuel Vingerhagen
(Forskningsassistent)

Trondheim, 10. juni 2013

Oddmund Brevik

Samandrag

Denne masteroppgåva handlar om bruk av numerisk modellering («*Computational Fluid Dynamics*», CFD) i høve til sandfang 3 ved Tonstad kraftverk. Oppgåva tek utgangspunkt i geometri og feltmålingar frå sandfanget. For å undersøke kva som kan vere årsaken til at sedimenttransport har skada tilhøyrande turbin, har sandfanget blitt simulert med CFD-programmet STAR-CCM+.

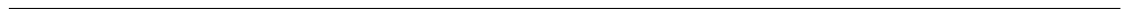
Det vert gitt ei innføring i teori om sedimenttransport og hydraulikk. Teori om CFD vert gitt saman med framgangsmåte for oppsett av modellane. Resultata vart vurdert opp mot feltmålingar frå stasjonær vassføring med «*Acoustic Doppler Current Profiler*» (ADCP), og for fylling av sandfanget i frå trykkmålingar.

Dei simulerte resultata stemmer overeins med feltmålingar. Det vert vist at «*Reynolds-Averaged Navier–Stokes*» (RANS) gjev gode resultat for stasjonær vassføring, men ikkje for svært turbulente områder. Der turbulensen er stor, stemmer simuleringar med «*Detached Eddy Simulation*» (DES) betre.

Ikkje-stasjonær simulering av fylling av sandfanget samstemmer med målingane. Det gjev best resultat om ein legg inn geometrien til heile trykksjakta. Under fylling ser det ut til at det oppstår eit vasstandssprang i sandfanget. Den maksimale farten på vatnet, og skjærspanninga langs botn av sandfanget, gjev eit potensiale for sedimenttransport av partiklar opp mot om lag 41 mm. Dette er i rett storleik i høve til skadeomfanget på turbinen.

Når luftesjakta er full av vatn, er det framleis att luftlommer oppunder taket i sandfanget. Luftlommene tilsvarar 442 m³ luft. Under fylling aukar farten til vatnet lokalt i vassflata.

Med dette som grunnlag vert det vist at CFD er eigna som verkty for å dimensjonere sandfang.



Abstract

This master thesis is about the use of «*Computational Fluid Dynamics*» (CFD) in correlation to sand trap 3 at Tonstad hydropower station. The thesis is based on the geometry and field measurements from this sand trap. To investigate the reason for damages from sediment transport at the turbin, this sand trap has been modelled with the CFD software STAR-CCM+.

It's given an introduction to theory of sediment transport and hydraulics. Theory of CFD is given together with the procedure for setting up the models. The results were evaluated against field measurements from stationary flow with «*Acoustic Doppler Current Profiler*» (ADCP), and filling of sand trap from pressure measurements.

The simulated results consistent with field measurements. It is shown that «*Reynolds-Averaged Navier–Stokes*» (RANS) gives good results for stationary flow, but not for turbulent areas. Where turbulence is large, simulations with «*Detached Eddy Simulation*» (DES) gives better results.

Unsteady simulation of filling of the sand trap accord with measurements. It gives the best result if the geometry of the entire pressure shaft is added. During filling, it appears that there is a hydraulic jump in the sand trap. The maximum speed of the water, and the shear stress along the bottom of the sand trap, gives a potential for sediment transport of particles up to about 41 mm. This is the right size in relation to the amount of damage at the turbine.

When the air shaft is full of water, there are still remaining air pockets under the roof. The air pockets is equivalent to 442 m³ air. During the filling the speed of the water increases at the water surface.

On this basis it is shown that CFD is suitable as a tool for dimensioning of sand traps.

Innhald

Side

Forord	i
Abstract	v
Samandrag	iii
Innhald	vii
Figurar	xi
Tabellar	xv
Teiknforklaring	xvii
1 Bakgrunn for prosjektet	1
1.1 Innleiing	1
1.2 Sandfanget knytt til aggregat nr. 5	7
2 Teori	9
2.1 Sedimenttransport	9
2.1.1 Grafisk utrekning av steinstorleik	9
2.1.2 Utrekning av storleiken av transportert stein	10
2.1.3 Fylt tverrsnitt	13
2.2 Vasstandssprang	13
3 CFD-modellering	15
3.1 Grid	15
3.2 Numeriske løysingsteknikkar	16
3.2.1 SIMPLE-metoda	20
3.3 Modellering av ruheit	21
3.3.1 Falltap	21
3.4 Turbulensmodellar	22
3.4.1 Reynolds-Averaged Navier–Stokes, RANS	24
3.4.2 Large Eddy Simulation, LES	26
3.4.3 Detached Eddy Simulation, DES	27
3.5 Tidsskritt og Courant-talet	30
3.6 Volume of Fluid, VOF	31
3.7 Relaksering	31
3.8 Falsk diffusjon	32
3.9 Bruk av CFD	33

3.9.1	Feilkjelder	33
3.9.2	Verifikasjon og validering	34
4	Modellering ved hjelp av STAR-CCM+	35
4.1	Ulike modellar for gridgenerering av overflata	35
4.2	Ulike modellar for gridgenerering av volumet	36
4.3	Tilleggsval for grid	37
4.4	Overlappande grid	37
4.5	Gridfeil	39
5	Numerisk modellering	41
5.1	Geometri av modellen	41
5.2	Aktuelle problemstillingar	42
5.2.1	Stasjonær simulering av stasjonær vassføring	43
5.2.2	Ikkje-stasjonær simulering av stasjonær vassføring	43
5.2.3	Fylling av sandfang med fast lukehøgde	45
5.2.4	Ikkje-stasjonær simulering av lukeheving	51
5.3	Val av grid og fysiske modellar	52
5.3.1	Grid	52
5.3.2	Fysiske modellar	52
6	Verifisering	53
6.1	Feltmåling av stasjonær vassføring	53
6.2	Feltmåling av ein fyllingssituasjon	55
7	Resultat	57
7.1	Stasjonær simulering av stasjonær vassføring med full opning på luka	58
7.1.1	Hastigheitsprofil	58
7.1.2	Vasstrykk	58
7.2	Ikkje-stasjonær simulering av stasjonær vassføring med full opning på luka	59
7.2.1	Hastigheitsprofil	59
7.2.2	Vasstrykk	64
7.3	Ikkje-stasjonær simulering av ikkje-stasjonær strøyming med 0.07 m opning på luka	65
7.3.1	Fylling av tomt sandfang	65
7.3.2	Sluttffylling	74
7.3.3	Fyllingsplott i frå alle modellane	78
8	Potensiale for sedimenttransport basert på simulerte resultat	79
8.1	Stasjonær vassføring	79
8.2	Fyllingssituasjon	80
8.3	Forslag til utbetring	81
9	Konklusjon og vidare arbeid	83

Litteratur	87
Vedlegg	89
A	Figur av heile modellen 90
B	Feltdata for oppfylling av sandfang 91
C	Produksjon og vasstand mellom 15. og 16. februar 2012 92
C.1	Feltmålingar frå ADCP II 16. februar 2012 93
C.2	Feltmålingar frå ADCP III 16. februar 2012 94
D	Resultat frå prosjektoppgåva 95
D.1	Hastigheitsprofil 95
D.2	Vasstrykk 98
D.3	Fordeling av $k-\varepsilon$ 99
E	Andre resultat frå DES-modellane 100
E.1	Vasstrykk 100
F	Andre resultat frå slutfylling 102
G	Java-script for oppstart av simuleringar 103
H	Arbeidsteikningar 105

Figurar

1.1	Skader på turbin på grunn av sedimenttransport.	1
1.2	Prinsippskisse av Tonstad kraftverk.	2
1.3	Ein scanna 3D-modell vart laga for sandfang 3. Resterande geometri vart teikna inn frå arbeidsteikningane vist i vedlegg H. Vatnet renn frå venstre mot høgre i figuren.	3
1.4	Innscanning av sandfanget og rådata dette gav.	4
1.5	Geometrien til sandfanget med plassering av dei tre ADCP-ane med tverrsnitt og kablar i mellom.	5
1.6	Plassering av dei tre ADCP-ane sett innanfrå sandfanget.	6
1.7	Utvalgt geometri og komponentar. Vatnet renn frå venstre mot høgre i figuren.	7
2.1	Hjulstrøms diagram for grense mellom erosjon og avleiring. Forenkling basert på Fergus, Hoseth & Sæterbø (2010).	10
2.2	Shields diagram for botnpartiklar (Henta frå serc.carleton.edu , 06.04.2013).	11
2.3	Teoretisk steinstorleik ut i frå farten til vatnet når erosjon inntreff.	12
2.4	Prinsippskisse av eit vasstandssprang. Basert på Chanson (2004).	14
3.1	Ekspansjons- og sideforhold mellom cellene A og B (Olsen 2011).	16
3.2	Tidsserie for farten til vatnet (U^t) med gjennomsnittleg fart U og varierende fart u (Olsen 2011).	17
3.3	Fluks for fyrste ordens oppstrøms skjema (Olsen 2011).	18
3.4	Logaritmisk profil.	21
3.5	Turbulens ved ulik tid i ei simulering med RANS ($k-\varepsilon$). Legg merke til virvelen som går frå øvre venstre del til nedre høgre kant etter kvart som simuleringa går.	23
3.6	Inndeling av celler for dei minste virvlane i DES.	29
3.7	Turbulensnivå med RANS (a) og DES (b).	29
3.8	Små opningar i geometri vil gje lokalt høgt Courant-tal. Her vist i snitt ved luka inn til sandfanget.	30
3.9	Vassflata er der VOF-verdien er 0.5.	31
3.10	Parallellitet for hastigheitsvektorar i trimmer- og polygrid har innverknad på falsk diffusjon.	33
4.1	Ulike volumgrid vist ved luka inn til sandfanget.	36

4.2	Metodikk for interpolering mellom celler i eit overlappande grid. To akseptorceller er vist med stipla linje. Ein for bakgrunnsgridet og ein for det overlappande gridet (CD-adapco 2013).	38
4.3	Cellestatus i eit overlappande grid: -2 = akseptor, -1 = akseptor nytta som donor, 0 = aktiv og 1 = inaktiv. Her vist for ein enkel modell med luke.	38
4.4	Kvaliteten av ei celle. Basert på (CD-adapco 2013).	39
4.5	Døme på dei seks gridfeila i STAR-CCM+.	39
5.1	Ny og forlenga geometri med utgangspunkt frå prosjektoppgåva. Nye delar vist i rosa. Figuren viser også plasseringa til trykkcella.	41
5.2	Forlenga geometri ved innløpet for simulering med DES.	44
5.3	Modellane med DES vart kutta ved varegrinda.	44
5.4	Detaljar av gridet ved luka og trykksjakta.	46
5.5	Detaljar av forfining av gridet for modell F1.	47
5.6	Forfining langs botn med cellestorleik 0.2 m og to prismelag for modell F2.	47
5.7	Detalj av forfining langs botn med cellestorleik 0.2 m og to prismelag ved terskel/varegrinda for modell F2.	48
5.8	Forfining av grid for hovuddelen av sandfanget i modell F3 med 0.2 m.	48
5.9	Målelinjene for fart ved terskel for modellane med fylling.	49
5.10	Detaljar av forfining av gridet saman med starthøgda for sluttfyltinga av sandfanget for modell S1.	49
5.11	Vasstandsmålinga vart gjort ved hjelp av den mørke vertikale linja midt i biletet.	50
6.1	Montering av ADCP-ane.	53
6.2	Feltmåling frå ADCP I i lengderetninga for ulike klokkeslett 16. februar 2012.	54
6.3	Feltmåling frå oppfylling av sandfanget 27.01.2012.	55
7.1	Simulert resultat i høve til feltmåling ved ADCP I i x-retning med full opning på luka for RANS og DES. Standardavvika gjeld for DES.	59
7.2	Simulert resultat i høve til feltmåling ved ADCP II i x-retning med full opning på luka for RANS og DES. Standardavvika gjeld for DES.	60
7.3	Simulert resultat i høve til feltmåling ved ADCP III i x-retning med full opning på luka for RANS og DES. Standardavvika gjeld for DES.	60
7.4	Hastigheitsvektorar i snitt ved ADCP I-III for trimmer grid med DES. Her vist for modell D1 etter 815 s. Sjå også figur 3.7b.	62
7.5	Simulert gjennomsnittleg fart i x-retning ved varegrinda for modellane D1-D3. Full opning på luka. Trimmer grid med DES.	63
7.6	Startproblem med for stort tidsskritt. Det oppstår for rask blanding fordi utrekninga «hopper» over celler.	65
7.7	Simulert resultat i høve til feltmåling for oppfylling av sandfanget 27.01.2012. Trimmer grid med $k-\varepsilon$	66

7.8	Simulert gjennomsnittleg fart i x-retning ved målelinje c for modellane F1-F3. 0.07 m opning på luka.	67
7.9	Simulert gjennomsnittleg fart i x-retning ved målelinje d for modellane F1-F3. 0.07 m opning på luka.	68
7.10	Simulert maksimal fart i x-retning ved målelinje a og b for modell F1.	69
7.11	Skjærspenninga langs botn av sandfanget for modell F1.	70
7.12	Under startfasen av fylling av sandfanget oppstår det noko som kan minne om eit vasstandssprang. Her vist for modell F2. Den tjukke linja er vassflata, tilsvarande VOF=0.5	71
7.13	Under start av fylling av sandfanget oppstår det noko som kan minne om eit vasstandssprang.	72
7.14	Hastigheitsvektorar ved varegrinda for modell F1. Den tjukke linja er vassflata, tilsvarande VOF=0.5.	73
7.15	Oppstart av modell S1 gjev ei bølge før vassflata flatar ut og fyllinga skjer jamt. Her vist etter 1.5 s simulering.	74
7.16	Utvikling av vassflata saman med hastigheitsvektorar for området der tilkomsttunnelen møter sandfanget. Når vatnet stig, fortrengast lufta slik at flatene som her er vist vert mindre. Samstundes ser ein då at farten aukar lokalt i vassflata.	75
7.17	Når fyllingskurva flatar ut i luftesjakta, er det framleis att om lag 442 m ³ luft i sandfanget.	76
7.18	Fart i sandfanget når luftesjakta går full. Den tjukke linja er vassflata, tilsvarande VOF=0.5.	76
7.19	Simulert resultat for vasstandsheving i luftesjakt og i den midtre delen. Målt relativt frå golv. Trimmer grid med $k-\varepsilon$	77
7.20	Simulert resultat i høve til feltmåling for oppfylling av sandfanget 27.01.2012. Trimmer grid med $k-\varepsilon$	78
A.1	Heile modellen av sandfanget og trykksjakta.	90
B.1	Feltdata for vasstand i sandfang 3, Tonstad, 27.01.2012 kl 08:00-12:00.	91
C.1	Produksjon og vasstand mellom 15. og 16. februar 2012. To stasjonære situasjonar for kl. 00:10-00:20 og kl. 01:15-01:25.	92
C.2	Feltemåling frå ADCP II i lengderetninga for 16. februar 2012.	93
C.3	Feltemåling frå ADCP III i lengderetninga for 16. februar 2012.	94
D.1	Resultat i høve til feltemåling for ADCP I frå prosjektoppgåva. Trimmer grid med $k-\varepsilon$	95
D.2	Resultat i høve til feltemåling for ADCP II frå prosjektoppgåva. Trimmer grid med $k-\varepsilon$	96
D.3	Resultat i høve til feltemåling for ADCP III frå prosjektoppgåva. Trimmer grid med $k-\varepsilon$	97

D.4	Variasjon av simulert vasstrykk i sandfanget for ulike celledorleikar frå prosjektoppgåva. Trimmer grid med $k-\varepsilon$	98
D.5	Turbulent kinetisk energi (k) og spreining av turbulent kinetisk energi (ε) for RANS. Trimmer grid 0.2 m celler og $k-\varepsilon$	99
E.1	Variasjon av simulert vasstrykk i sandfanget for D1-D3. Trimmer grid med DES. Den høgre y -aksen gjeld for D3.	101
F.1	Plassering av vassflata saman med farten til vatnet i x -retning etter at luftesjakta går full (694 s). Ein negativ fart tyder at vatnet går mot luka.	102

Tabellar

2.1	Minste partikkelstorleikar ut i frå farten til vatnet.	12
5.1	Oversikt over dei ulike modellane i denne oppgåva.	42
5.2	Oversikt over parametrar for DES-modellane.	43
5.3	Parametrar for målelinjene a, b, c og d.	48
7.1	Pearsons korrelasjonskoeffisient for ulike cellestorleikar frå prosjektoppgåva. Trimmer grid med $k\text{-}\varepsilon$	58
7.2	Verdiar for maksimal og gjennomsnittleg fart og standardavvik for modellane D1-D3 [m/s].	61
7.3	Pearsons korrelasjonskoeffisient for modellane D1-D3.	61
7.4	Simulert resultat for maksimal og gjennomsnittleg fart, samt standardavvik for målelinje c ved varegrinda for modellane D1-D3.	64
7.5	Simulert resultat for maksimal og gjennomsnittleg fart, samt standardavvik for målelinje c ved varegrinda for modellane F1-F3.	67
7.6	Simulert resultat for maksimal og gjennomsnittleg fart, samt standardavvik for målelinje d ved varegrinda for modellane F1-F3.	68
7.7	Simulert resultat for maksimalverdiar ved målelinjene a og b i modell F1.	69
7.8	Undersøking av strøyming i startfasen.	71
E.1	Verdiar for vasstrykket langs sandfanget i modellane D1-D3. Målt horisontalt i høgda til ADCP II og ADCP III.	100

Teiknforklaring

Forkortingar

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
CFD	Computational Fluid Dynamics
DDES	Delayed DES
DES	Detached Eddy Simulation, sjå side 27
LES	Large Eddy Simulation, sjå side 26
RANS	Reynolds-Averaged Navier–Stokes, sjå side 24
SEM	Synthetic Eddy Method
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations, sjå side 20
VOF	Volume Of Fluid, sjå side 31

Greske

α	Korreksjonsfaktor for kinetisk energi [-], $\alpha_{turbulent} \approx 1.05$
Δ	Maksimal storleik av cellene i DES, $\Delta = \max(\Delta x, \Delta y, \Delta, z)$
δ	Storleiken av grensesjiktet mot overflatar
κ	Empirisk konstant, $\kappa = 0.4$
μ_t	Turbulent skalaviskositet
ν	Kinematisk viskositet, $1.51 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ved 5°C
ρ_s	Densiteten til sand, $\rho_s \approx 2650 \text{ kg}/\text{m}^3$
ρ_v	Densiteten til vatn, $\rho_v \approx 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$

σ	Standardavvik
τ_c	Kritisk skjærspenning [N/m ²]
θ	Vinkelen mellom hastigheitsvektor og x-aksen
ε	Spreiing av turbulent kinetisk energi [m ² /s ³]

Latinske

Δt	Tidsskritt [s]
Δx_i	Storleik av celle [m]
S	Tensor for påkjenningsfart
T_t	Turbulent spenningstensor
\tilde{d}	Lengdeskala for DES
\vec{N}	Einingsvektor i retning med virvelen
<i>A</i>	Tverrsnittsareal [m ²]
<i>B</i>	Breidde [m]
<i>C</i>	Courant-talet [-]
<i>C_p</i>	Empirisk konstant i utrekning av partikkelstorleik, $C_p \approx 115 - 140$
<i>C_s</i>	Shields tal [-]
<i>C_{DES}</i>	Modellparameter i DES, < 1
<i>C_{max}</i>	Maksimalt Courant-tal [-]
<i>D</i>	Diameter [m]
<i>d</i>	Avstand frå overflate til sentrum av celle [m]
<i>d_c</i>	Kritisk partikkelstorleik [m]
<i>d_s</i>	Partikkelstorleik [m]
<i>f</i>	Friksjonsfaktor [-]
<i>Fr</i>	Froude-talet, $Fr = \frac{u}{\sqrt{g \cdot y}}$
<i>g</i>	Tyngdeakselerasjon, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$
<i>h_L</i>	Falltap [m]
<i>k</i>	Kinetisk energi

Teiknforklaring

K_α	Koeffisient for singulærtap [-]
k_s	Høgda av botnruheita [m]
L	Lengda av vassvegen [m]
L_r	Lengda til hovuddelen av det turbulente området i eit vasstandssprang [m]
p	Trykk [Pa]
Re_*	Reynoldstalet i grensesjikt [-]
U	Gjennomsnittleg fart til vatnet [m/s]
u	Farten til vatnet [m/s]
u_*	Skjærhastigheit [m/s]
y	Høgda til vatnet [m]
z	Stedshøgde [m]

Kapittel 1

Bakgrunn for prosjektet

1.1 Innleiing

Erosjon i vassdrag medfører sedimenttransport. Graden av sedimenttransport varierer mykje frå nedbørsområde til nedbørsområde. Faktorar som påverkar sedimenttransporten i eit vassdrag er i hovudsak farten og djupna til vatnet, turbulensnivå og sedimentkarakteristikk. Det sist nemnte varierer igjen med kornfordeling, permabilitet, porøsitet, form og fallhastigheit til sedimentane (Olsen 2011).

Sedimenttransport gjennom turbin kan medføre skader som kan gje høge reparasjonskostnader, og påverke både produksjonen og tryggleiken knytt til eit reguleringsanlegg. Døme på skader er vist i figur 1.1 der ein tydeleg ser skadar på turbinblada. Skadane tyder på at dei største partiklane har vore i området 20-50 mm.



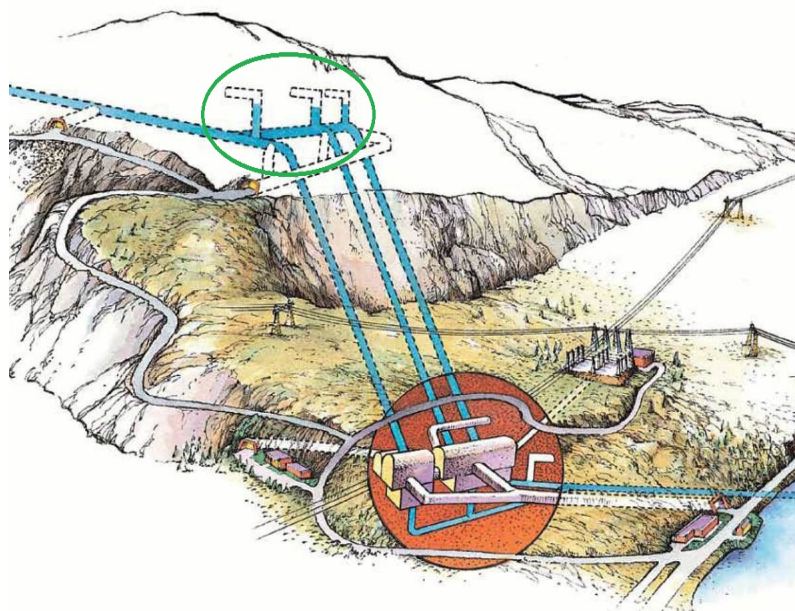
Figur 1.1: Skader på turbin på grunn av sedimenttransport.

Ved overføring av vatn til kraftproduksjon, kan sedimenter fylgje med. Sediment kan medføra auka slitasje og skader på turbinen. Det er difor naudsynt å utforme anlegga slik at størst mogleg del av sedimenta vert avsett før vatnet kjem til turbinen.

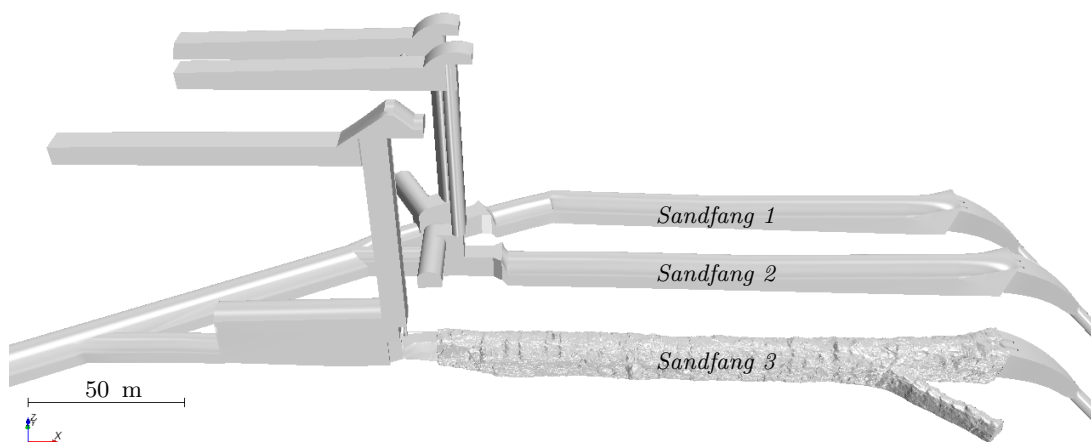
I norske vasskrafttunnelar er det vanleg å nytte delar av dei utsprengte massane som køyrebane under driving. Det er vanleg å la desse massane liggje att ved oppstart av kraftverk (Guttormsen 2006). Dette fordi det er kostbart å fjerne massane (Lysne 1986). Ved dimensjonerande fart for tunnelarealet, lik 1 m/s, vil kun små fraksjonar av steinmassane nytta til køyrebane bli erodert med trykksett tunnelsystem. Aukar ein seinare farten til vatnet i tunnelen frå dimensjonerande 1 m/s, vil ein større del av massane frå køyrebane bli transportert lenger ned i tunnelsystemet. For mange norske reguleringsystem, kan desse massane utgjera eit større potensiale for sedimenttransport, enn naturleg erosjon i vassdraget.

Det finnst ulike metodar for å redusere sedimenttransporten gjennom turbin. I denne oppgåva fokuserer ein på strøymingstilhøva i eit av sandfanga knytta til Tonstad kraftverk. Sandfanget er utforma med eit større tverrsnittsareal enn resten av tunnelen, slik at farten på vatnet går ned, og sedimenter verte avsette. Det har vore vanleg å redusere farten med 30-50 % slik at ein oppnår ein fart på mindre enn 0.6 m/s i denne konstruksjonsdelen (Lysne 1986).

Tonstad kraftverk er Noregs største kraftprodusent med 3.6 TWh. Det ligg i Sirdal kommune i Vest-Agder og er ein del av reguleringsanlegga til Sira-Kvina. I figur 1.2 er det vist ei prinsippkisse av nedre del av anlegget, medan figur 1.3 viser utforminga av svingesjakter og sandfang (grøn sirkel i figur 1.2).



Figur 1.2: Prinsippkisse av Tonstad kraftverk.

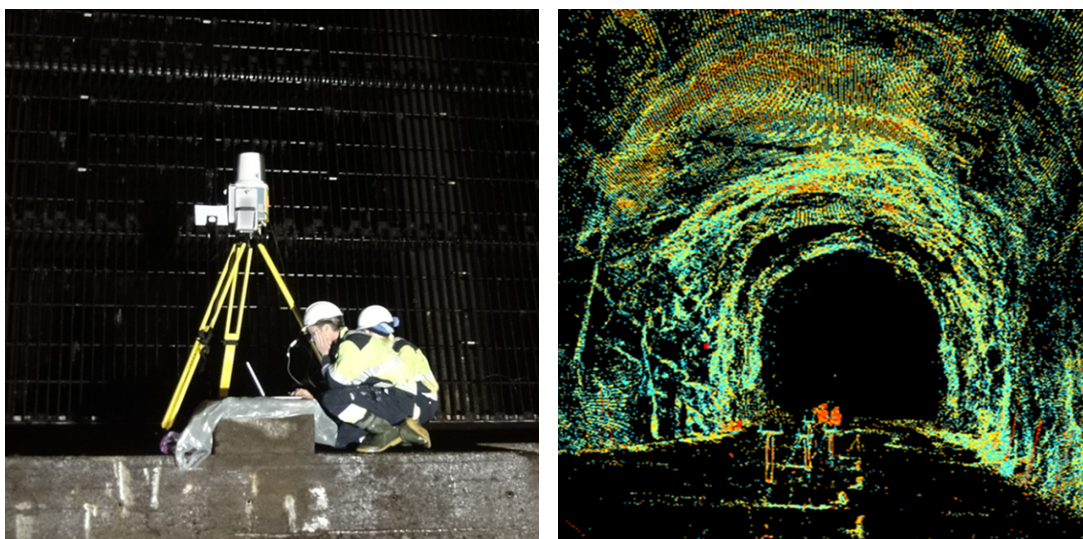


Figur 1.3: Ein scanna 3D-modell vart laga for sandfang 3. Resterande geometri vart teikna inn frå arbeidsteikningane vist i vedlegg H. Vatnet renn frå venstre mot høgre i figuren.

Per i dag eksisterer det ikkje nokon god metodikk for å vurdere hastighetsfelt som kan oppstå i ein trykksatt råsprengt kraftverkstunnel. Ein kritisk konstruksjonsdel, som til dømes eit sandfang, vert difor dimensjonert med kontinuitetslikninga og/eller etter fysiske modellforsøk.

I sandfanga vist i figur 1.3 varierer trykket med høgda i inntaksmagasina. Det kan vere mellom 38-70 mVS (0.38-0.70 MPa) under vanleg drift. Dette gjer det vanskeleg å lage eit fysisk modellforsøk. I ein fysisk modell vil det vere vanskeleg å modellere ulike driftsendringar og transiente situasjonar. I tillegg til at fysiske modellforsøk er dyre og tek mykje tid, vil det vere problem med å skalere sediment. Eit anna problem med fysisk modellforsøk er at det er vanskeleg å handtere luftinnblanding (Vingerhagen & B. Olsen 2012). Under vanleg drift er sandfanget vassfylt, noko som gjer visuell observasjon av denne delen umogleg.

Det som då er alternativet for å studere ulike strøymingsmønstre, er å ta i bruk ein tredimensjonal numerisk modell («*Computational Fluid Dynamics*», CFD). Numerisk utrekning av fart og skjærspenning kan ein koble opp mot eksisterande teori for sedimenttransport. Då kan ein vurdere korleis utforminga av sandfanget påverkar sedimenttransporten.



(a) Utstyr til scanning.

(b) Rådata i form av punktskyer.

Figur 1.4: Innscanning av sandfanget og rådata dette gav.

I denne oppgåva skal det testast om CFD er eigna til dimensjonering av ein kritisk del av ein råsprengt kraftverkstunnel. Oppgåva tek utgangspunkt i geometri og feltmålingar frå sandfang 3 ved Tonstad kraftverk. Geometrien i sandfang 3 vart scanna inn ved hjelp av 3D-scanning. Utstyr og rådata er vist i figur 1.4, medan figur 1.5 viser generert modell.

Resultatet av omgjerjing frå punktskyer i frå figur 1.4b til flater er vist i figur 1.5 og 1.6. I figur 1.5 ser ein innløpet til venstre i figuren og utløpet til høgre, samt ein del av tilkomsttunnelen nede til høgre i figuren. Ved innløpet er det ein støypt del av betong med luke. Som ein ser av figur 1.6, er resten av sandfanget råsprengt.

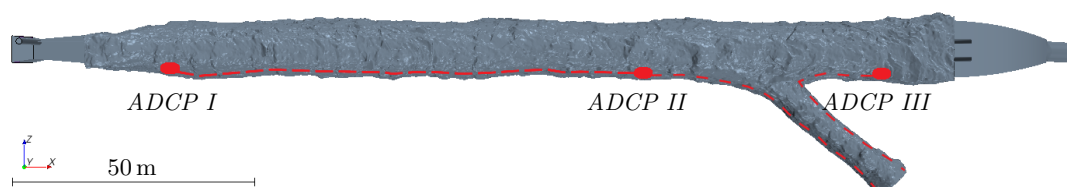
For å verifisere dei numeriske utrekningane, er det utført feltmålingar. Hastigheitsprofil frå «Acoustic Doppler Current Profiler» (ADCP) og trykkmålingar vist i vedlegg B og C vert samanlikna med simulerte resultat for å verifisere.

Sandfanget skal modellerast i CFD-programmet STAR-CCM+ 8.02.008 frå CD-adapco. STAR-CCM+ er nytta i denne oppgåva fordi den handterer eit lukka tverrsnitt og ein kan simulere interaksjon i ei to-fase strøyming (vatn-luft). Programmet har moglegheit for parallellprosessering, det vil seie oppdeling av ei oppgåve til fleire deloppgåver fordelt på fleire prosessorar. Dette gjer at ein kan ta i bruk supercomputeren Vilje. Det skal vurderast i kva grad STAR-CCM+ er eigna til å vurdere ulike hydrauliske situasjonar som kan oppstå i tunnelsystemet. Det leggst då vekt på å finne ut av spørsmål i) og iv) i frå oppgåveteksta:

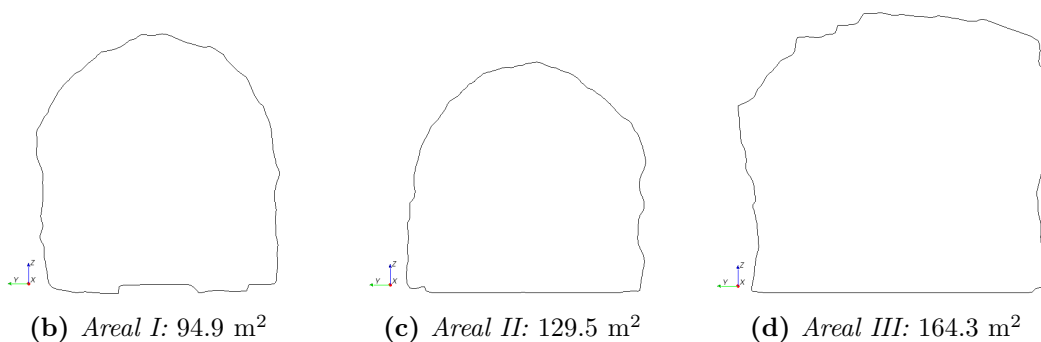
1.1. Innleiing

- i) «Kan det oppstå luftlommer ved fylling av sandfanget? Og kan desse/denne luftlommene/en medføre lokal komprimering av vassføringa, slik at vannhastigheten stig?»
- iv) «Kan vannhastigheter som oppstår under fylling av sandfanget medføre spyling av sandfanget? Korleis påverkar lukas posisjon ved fylling vannhastigheten over terskelen?»

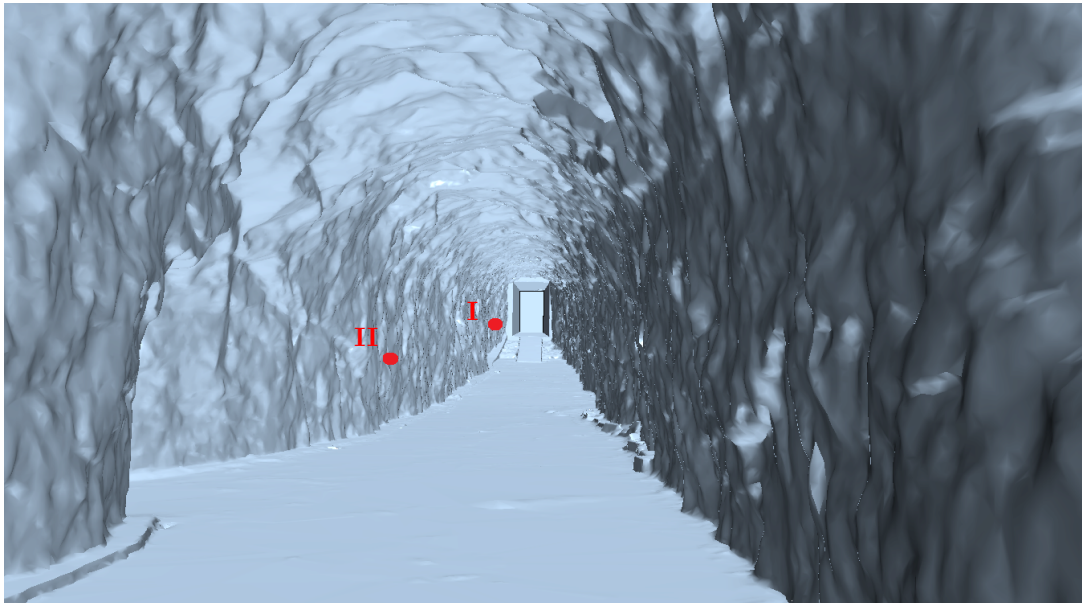
I tillegg skal det som ei vidareføring i frå prosjektoppgåva hausten 2012 undersøkast om ein «*Detached Eddy Simulation*» klarar å simulere turbulensnivået mellom luka og ADCP I ved stasjonær vassføring.



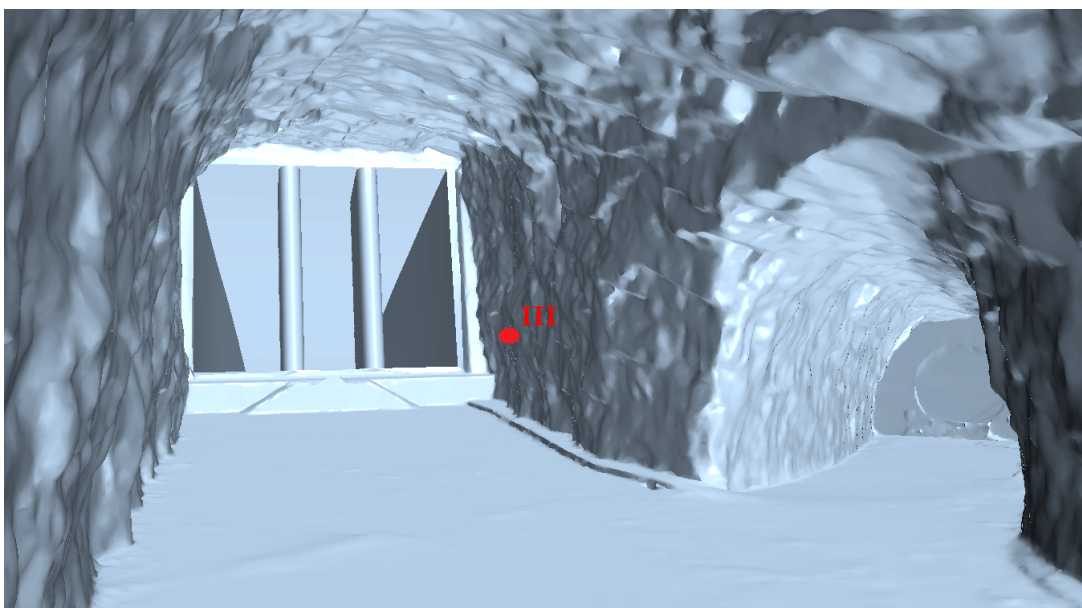
(a) Plassering av ADCP-ane. Vatnet renn frå venstre mot høgre i figuren.



Figur 1.5: Geometrien til sandfanget med plassering av dei tre ADCP-ane med tverrsnitt og kablar i mellom.



(a) ADCP I og II, sett motstrøms mot luka.

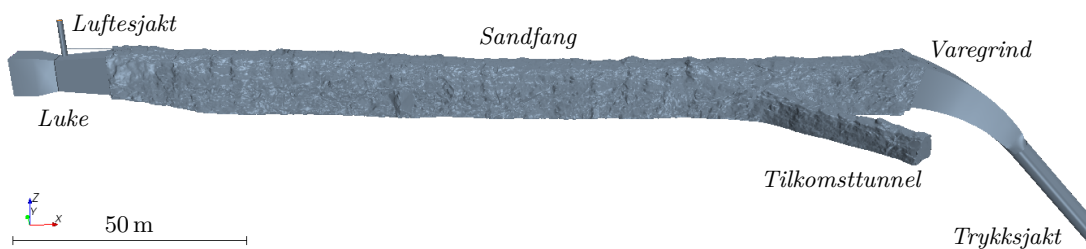


(b) ADCP III, sett medstrøms mot varegrinda og tilkomsttunnelen.

Figur 1.6: Plassering av dei tre ADCP-ane sett innifrå sandfanget.

1.2 Sandfanget knytt til aggregat nr. 5

Det er i denne oppgåva fokusert i hovudsak på sandfang 3 med nærliggande delar ved Tonstad kraftverk. Delane er vist i figur 1.7 og heile modellen er vist i vedlegg A.



Figur 1.7: Utvalgt geometri og komponentar. Vatnet renn frå venstre mot høgre i figuren.

Funksjonane til delkomponentane frå figur 1.7 er:

- Luka gjer at ein kan utføre inspeksjon og tømning av sandfanget.
- Luftesjakta justerer luftrykket i sandfanget. Dette for å unngå undertrykk ved fylling.
- Sandfanget skal stoppe sediment i vatnet, slik at desse ikkje kjem ned til turbinen.
- Tilkomsttunnelen sikrar tilkomst for å fjerne massar som sedimenterast.
- Varegrinda skal stoppe større objekt som kan komme til sandfanget. Dette er vist betre i figur 1.6b.
- Trykksjakta overfører vatnet til turbinen.

Kapittel 2

Teori

2.1 Sedimenttransport

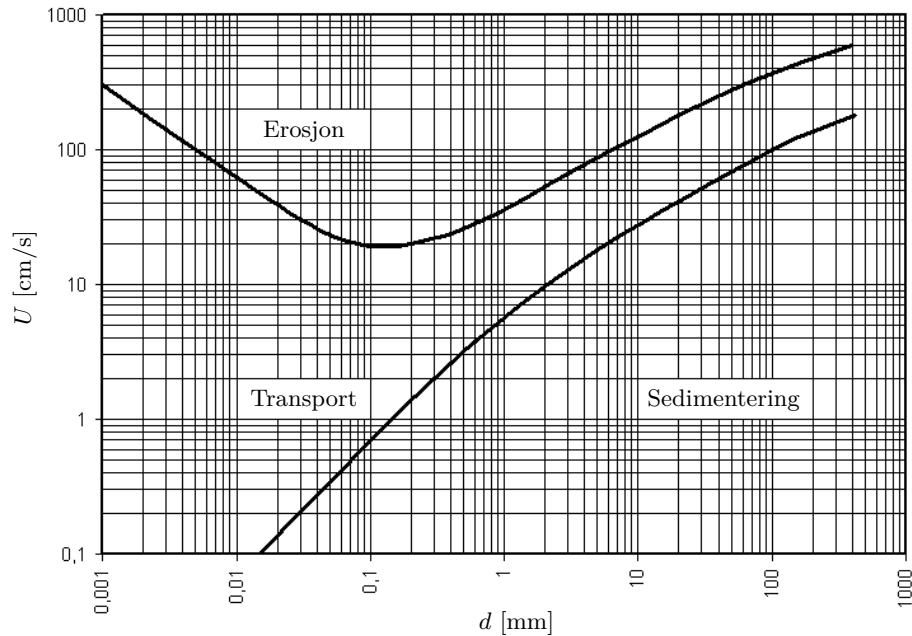
Nedbrytingsprosessen av jordoverflata på grunn av elvar, isbrear, rennande vatn, vind eller bølger kallast erosjon. Sedimenttransporten av desse partiklane kan foregå ved botntransport eller suspensjonstransport. Botntransport er materiale større enn 0.2 mm som glir og hopper langs botn. Suspensjonstransport gjeld for mindre partiklar som held seg svevande i utblanda form (Fergus et al. 2010). I tillegg finnast det oppløyst transport som det ikkje kjem til å bli nærmare gjennomgått her. Steinstorleiken som vert transportert kan ein finne grafisk og ved utrekning. Det finnast også empiriske likningar for total transport (Engelund/Hansen) og for botntransport (Meyer-Peter Müller).

2.1.1 Grafisk utrekning av steinstorleik

Hjulstrøms diagram, vist i figur 2.1, viser tre situasjonar for ulike steinstorleikar. Diagrammet gjeld for frispeilsstrøyming og gjennomsnittleg fart for eit profil. Farten vert ofte kalla for kritisk fart (Fergus et al. 2010). Den fortel om det det oppstår erosjon, sedimenttransport eller avsetting.

Byrjande erosjon skjer i det smale området for aukande fart i høgre del av figuren. På grunn av kohesive krefter mellom dei minste partiklane, krevst det større fart for minkande partikkelstorleik til venstre i diagrammet.

T.d. gjev ein steinstorleik på 20-50 mm at den gjennomsnittlege farten for erosjon er om lag 1.7-2.8 m/s.



Figur 2.1: Hjulstrøms diagram for grense mellom erosjon og avleiring. Forenkling basert på Fergus et al. (2010).

2.1.2 Utrekning av storleiken av transportert stein

Ved utrekning av partikkelstorleik når berre djup og fart i eit nivå er kjent, kan ein nytte fylgjande metode frå Fergus et al. (2010). Hastighetsfordelinga nær botn i ei turbulent friskeisstrøyming kan finnast med Keulegans formel (Fergus et al. 2010):

$$\frac{u(z)}{u_*} = 5.75 \cdot \log_{10} \left(\frac{30.2 \cdot z}{k_s} \right) \quad (2.1)$$

- u_* – Skjærhastighet [m/s]
- $u(z)$ – Farten til vatnet i høgda z [m/s]
- k_s – Høgda av botnruheita [m]
- z – Stedshøgde [m]

Kritisk skjærspenning og Shields tal finn ein med likning (2.2) - (2.3) (Fergus et al. 2010):

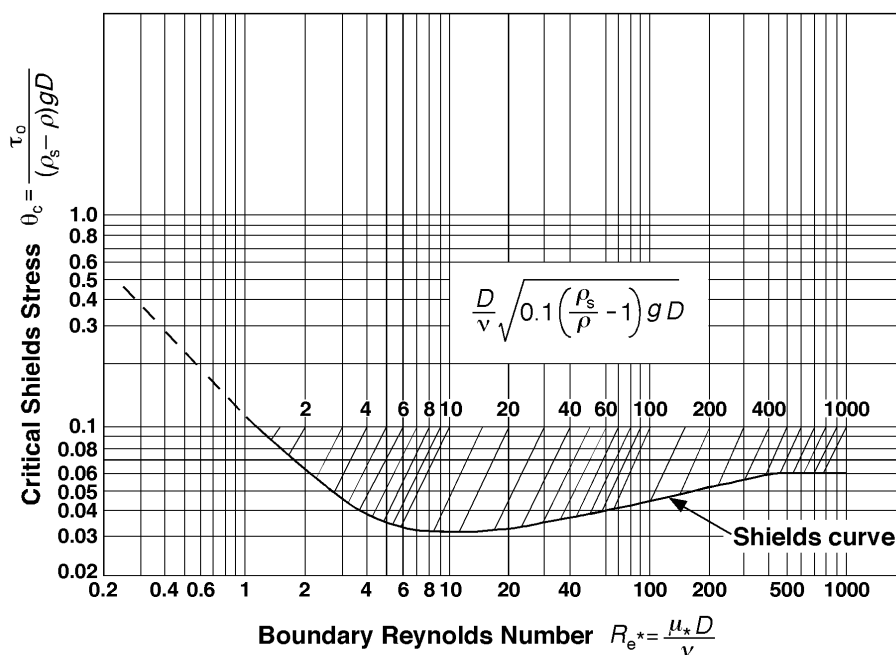
$$\tau_c = u_*^2 \cdot \rho_v \quad (2.2)$$

$$d_c = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho_v) \cdot g \cdot C_s} \quad (2.3)$$

- τ_c – Kritisk skjærspenning [N/m²]
- d_c – Kritisk partikkelstorleik [m]

2.1. Sedimenttransport

- ρ_v – Densiteten til vatn, $\rho_v \approx 1000 \text{ kg/m}^3$
- ρ_s – Densiteten til sand, $\rho_s \approx 2650 \text{ kg/m}^3$
- g – Tyngdeakselerasjon, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$
- C_s – Shields tal [-]



Figur 2.2: Shields diagram for botnpartiklar (Henta frå *serc.carleton.edu*, 06.04.2013).

Viss skjærspenninga er større enn den kritiske skjærspenninga, vil det bli erosjon. Shields diagram, vist i figur 2.2, gjev samanhengen mellom Shields tal, C_s , og Reynoldstalet i grensesjikt, Re_* . For å finne partikkelstorleiken må ein sjå på samanhengen mellom mellom C_s og Re_* frå likning (2.4) og figur 2.2:

$$Re_* = \frac{u_* \cdot d_s}{\nu} \quad (2.4)$$

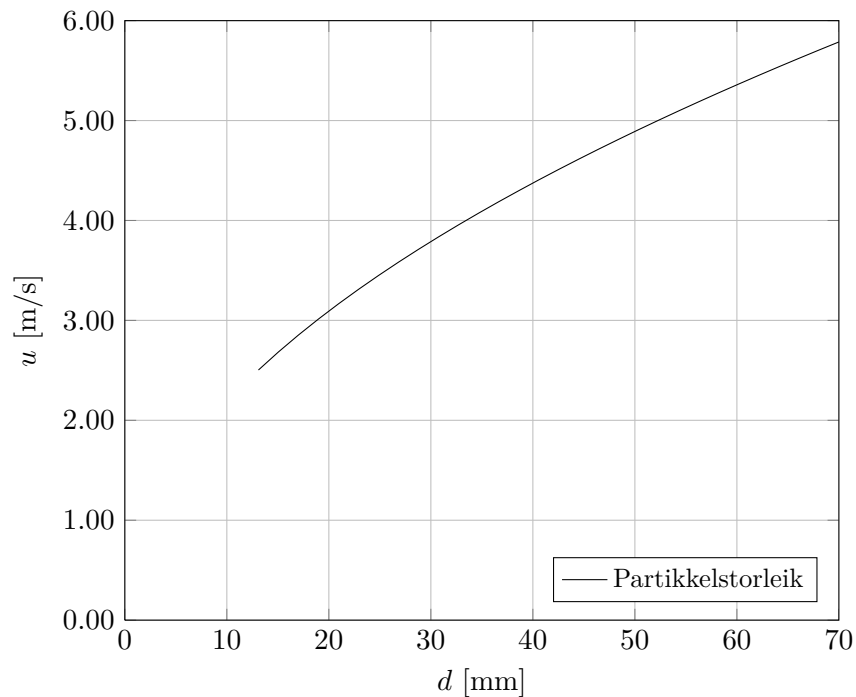
- Re_* – Reynoldstalet i grensesjikt [-]
- d_s – Partikkelstorleik [m]
- ν – Kinematisk viskositet, $1.51 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ved 5°C (Crowe 2009)

Som eit utgangspunkt, kan ein gå ut frå at $C_s = 0.06$ då det som regel er turbulent strøyming og dermed høgt Reynoldstal. Etterpå må ein sjå om overslaget er rett ved å sjekke om Re_* frå likning (2.4) er større enn 1000. Om det ikkje er tilfelle, må ein iterere

seg fram til samstemmande verdiar av C_s og Re_* slik som vist i tabell 2.1. I tabell 2.1 er det rekna ut verdiar av partikkelstorleik mot fart. Der er det gått ut frå at $k_s = 0.015$ m og $z = 3.60$ m (verdiar henta frå ADCP III i sandfanget). Eit plott av partikkelstorleik mot fart er vist i figur 2.3.

Tabell 2.1: Minste partikkelstorleikar ut i frå farten til vatnet.

C_s [-]	u [m/s]	$u(z)/u_*$	u_* [m/s]	τ_c [N/m ²]	d_c [m]	d_c [mm]	Re_* [-]
0.032	0.65	22.196	0.0293	0.858	0.0017	1.7	32
0.050	1.30	22.196	0.0586	3.430	0.0042	4.2	164
0.060	2.50	22.196	0.1126	12.686	0.0131	13.1	974
0.060	2.51	22.196	0.1131	12.788	0.0132	13.2	986
0.060	2.52	22.196	0.1135	12.890	0.0133	13.3	998
...



Figur 2.3: Teoretisk steinstorleik ut i frå farten til vatnet når erosjon inntreffer.

Ut i frå figur 2.3 gjev ein steinstorleik på 20-50 mm ei gjennomsnittleg fart på om lag 3.1-4.9 m/s. Om ein i staden kan finne τ_c direkte, til dømes frå CFD, kan ein nytte likning (2.3) direkte.

2.1.3 Fylt tverrsnitt

Lysne (1986) foreslo fylgjande likning for byrjande rørsle av sandpartiklar i fylt tverrsnitt:

$$d_c = \frac{\rho_v}{\rho_s - \rho_v} \cdot \frac{U^2}{C_p \cdot A^{1/6}} \quad (2.5)$$

- U – Gjennomsnittleg fart til vatnet [m/s]
- C_p – Empirisk konstant i utrekning av partikkelstorleik, $C_p \approx 115 - 140$
- A – Tverrsnittsareal [m²]

I utgangspunktet er $C_p = 130$, sjølv om det i etterkant er funne at den kan vere mellom 115 og 140 (Lysne 1986). Nyttar ein $C_p = 130$ og $A = 164.3 \text{ m}^2$ (tverrsnittet ved plasse- ringa til ADCP III) i likning (2.5) får ein at ein partikkel på 20 mm må ha ein fart på 3.2 m/s for å starte rørsle. Tilsvarande får ein for 50 mm ein fart på 5.0 m/s.

Overnemnte metodar, frå avsnitt 2.1.1 til dette avsnittet, viser at ein må gjere mange forenklingar i utrekninga av partikkelstorleik. Den grafiske og dei utrekna metodane gjev ikkje like resultat på grunn av at den grafiske løysingsmetoda er forenkla. Utrekna partikkelstorleik med desse metodane må difor sjåast på som eit estimat.

2.2 Vasstandssprang

Eit vasstandssprang oppstår i overgangen mellom overkritisk og underkritisk strøyming. Det vil seie der Froude-talet (Fr) går frå $Fr > 1$ til $Fr < 1$. Froude-talet er gitt som

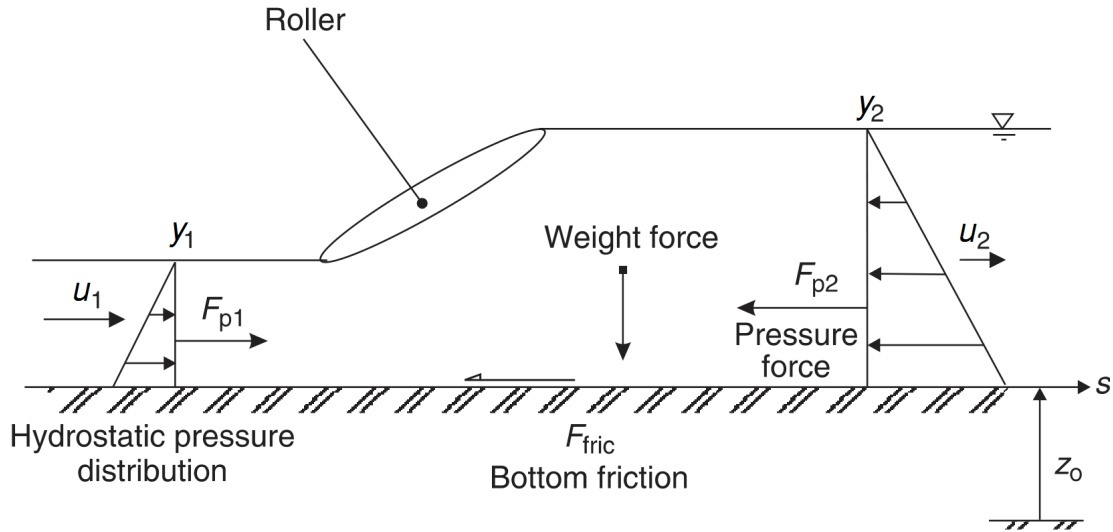
$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot A/B}} \xrightarrow{\text{Rektangulær}} \frac{U}{\sqrt{g \cdot y}} \quad (2.6)$$

- Fr – Froude-talet [-]
- B – Breidde [m]
- y – Høgda til vatnet [m]

Eit vasstandssprang ser ut som ei ståande bølge. Situasjonen er karakterisert ved ei sterk spreining av energi under svært turbulente tilhøve. Det vil vere små vassdråpar i lufta og luftinnblanding i vatnet. Som vist i figur 2.4 kallast hovuddelen av det turbulente området for «*Roller*». Lengda av dette området kan forenkla finnast ved (Chanson 2004):

$$\frac{L_r}{y_1} = 160 \cdot \tanh\left(\frac{Fr_1}{20}\right) - 12 \quad \text{for } 2 < Fr_1 < 16 \quad (2.7)$$

- L_r – Lengda til hovuddelen av det turbulente området [m]



Figur 2.4: Prinsippskisse av eit vasstandssprang. Basert på Chanson (2004).

Samanhengen mellom høgdene y_1 og y_2 for ein horisontal geometri med rektangulær og konstant breidde er gitt ved (Chanson 2004):

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 \cdot Fr_1^2} - 1 \right) \quad (2.8)$$

Likning (2.8) gjev då at

- $\frac{U^2}{gy_1} = 1 \Rightarrow$ Ikkje noko vasstandssprang
- $\frac{U^2}{gy_1} > 1 \Rightarrow$ Vasstandssprang

Energitalet i eit vasstandssprang er då gitt som (Chanson 2004):

$$\Delta H = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4 \cdot y_1 \cdot y_2} \quad (2.9)$$

Når geometrien *ikkje* er horisontal med rektangulær og konstant breidde, vert utgangspunktet feil og ein må endre på likningssettet. Ein kan då nytte energilikninga direkte (Crowe 2009):

$$\frac{p_1}{\rho_v \cdot g} + \alpha \frac{U_1^2}{2 \cdot g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho_v \cdot g} + \alpha \frac{U_2^2}{2 \cdot g} + z_2 + h_L \quad (2.10)$$

- p – Trykk [Pa]
- α – Korreksjonsfaktor for kinetisk energi [-]. For turbulent strøyming er $\alpha \approx 1.05$
- h_L – Falltap [m]

Kapittel 3

CFD-modellering

«*Computational Fluid Dynamics*» (CFD) er ei relativ ny grein innanfor mellom anna hydromekanikk. CFD nyttar numeriske metodar for å finne ei tilnærming til differensiallikningar for ulike problem. CFD-modellering starta i 1960-åra i flyindustrien, men har fått større utbreiing til andre områder frå 1990-tallet (Versteeg & Malalasekera 2007). CFD-modellering av hydrauliske problem baserer seg på løysing av Navier–Stokes sine likningar.

3.1 Grid

I CFD delast geometrien inn i fleire celler som til saman dekker ei flate. Navier–Stokeslikningane vert løyst enten i cellene eller ved grensesjiktet mellom dei. Eit grid er ei samling av slike celler og vert også kalla mesh. Desse cellene kan vere av ulik storleik og fasong. Ved tredimensjonal simulering, delast gridet opp i overflategrid og volumgrid. Det optimale er å ha eit grid som ikkje er einsformig, men som varierer slik at det er finare i områder med større variasjon frå punkt til punkt og eit grovare grid i områder med relativ liten endring (Versteeg & Malalasekera 2007).

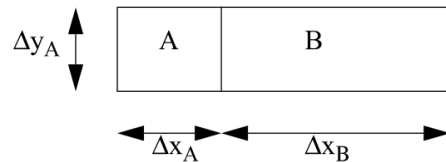
Grid kan klassifiserast etter følgande karakteristikkar (Olsen 2011):

- Form: Forma til cellene er vanlegvis tre- eller firkanta, men dei kan også vere mangekanta.
- Ortogonalitet: Om kryssande linjer står vinkelrett på kvarandre, er gridet ortogonalt. Viss dette ikkje er tilfellet, er det ikkje-ortogonalt.
- Strukturert: Viss ein kan lage ein todimensjonal tabell som definerar plasseringane til cellene i gridet, er gridet strukturert. Ellers er det ustrukturert.

- Blokkar: Ein kan binde saman fleire strukturerte grid og då vert kvar del kalla for ei blokk og heile for eit fleirblokka grid.
- Gridrørsle: Eit grid kan endre plassering undervegs i utrekninga. Dette vert kalla for eit tilpassande grid.
- Nøsta: Viss det er store endringar innanfor problemet vi ser på, kan det vere naudsynt med nøsta grid. Det vil seie at det er eit grid med mindre celler plassert inni eit grovare grid.
- Utblokking: I eit strukturert grid kan ein gjere enkelte celler inaktive. Då vert det lettare å lage strukturerte grid for ein kompleks geometri.

Eit viktig aspekt ved vurdering av ulike grid, er å sjå på kvaliteten på dei. Dette fordi nøyaktigheit og konvergens i utrekninga er avhengig av kvaliteten til gridet. Ein kan vurdere kvaliteten ut i frå avvik frå ortogonalitet og ekspansjons- og sideforhold.

Ein bør unngå å ha eit ikkje-ortogonalt grid der kryssande linjer er $<45^\circ$ eller $>135^\circ$. Eit meir ortogonalt grid gjev raskare konvergens og enkelte gonger også betre nøyaktigheit.



Figur 3.1: Ekspansjons- og sideforhold mellom cellene A og B (Olsen 2011).

Frå figur 3.1 kan ein definere ekspansjonsforholdet som $\Delta x_A/\Delta x_B$. Denne bør vere under 1.2. Om ekspansjonsforholdet er om lag 10, vil ein få veldig unaturlege resultat.

Sideforholdet definerast på liknande vis som $\Delta x_A/\Delta y_A$ og bør vere på om lag 2-3. Er det meir, i storleiken 10-50, vil det ta lang tid å oppnå konvergens. (Olsen 2011)

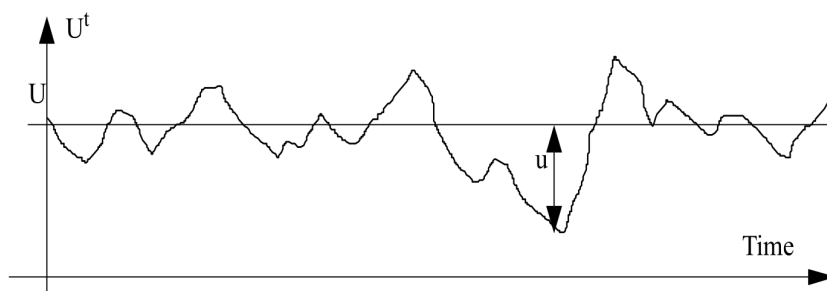
3.2 Numeriske løysingsteknikkar

Det finnast tre ulike hovudgreiner av numeriske løysingsteknikkar: Endeleg skilnad, elementmetoden og spektralmetoden («*Finite Difference*», «*Finite Element*» og «*Spectral Methods*»). Her fokuserast det på endeleg volummetode («*Finite Volume Method*»), som er ei spesiell form for utrekning ved metoda for endeleg skilnad. Dette fordi den er sentral for dei fleste etablerte CFD-program som til dømes STAR-CCM+ (Versteeg & Malalasekera 2007).

Likninga for å finne farten til vatnet er gitt ved Navier–Stokes-likningane. Dei er utleiia frå likvekt av krefter på eit lite volum av vatn i laminær strøyming (Olsen 2011):

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-P\delta_{ij} + \rho\nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (3.1)$$

Likning (3.1) dannar grunnlaget for å utvikle numeriske tilnærmingar i CFD-algoritmar. For turbulent strøyming er det vanleg å nytte Reynold sin gjennomsnittlege utgåve av likninga («*Reynolds-Averaged Navier–Stokes*», RANS). Der delast variasjonen av farten (U^t) opp i ein gjennomsnittleg fart (U) og ein varierende fart (u) slik som vist i figur 3.2.



Figur 3.2: Tidsserie for farten til vatnet (U^t) med gjennomsnittleg fart U og varierende fart u (Olsen 2011).

Ved å sette dette inn i likning (3.1), får ein Navier–Stokes-likninga for turbulent strøyming (Olsen 2011):

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-P \delta_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}) \quad (3.2)$$

Kronecker delta er $\delta_{ij} = 1$ for $i = j$ og $\delta_{ij} = 0$ viss $i \neq j$. Siste delen av likning (3.2) kan modellerast etter Boussinesq sin tilnærming, der k er den turbulente kinetiske energien og ν_T er turbulent virvelviskositet (Olsen 2011):

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \rho \nu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3.3)$$

Det siste leddet i Boussinesq sin tilnærming er ofte veldig lite i høve til resten, slik at det ofte vert neglisjert. Kombinasjon av likning (3.2) og (3.3) gjev (Olsen 2011):

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[- \left(P + \frac{2}{3} k \right) \delta_{ij} + \rho \nu_T \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \rho \nu_T \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] \quad (3.4)$$

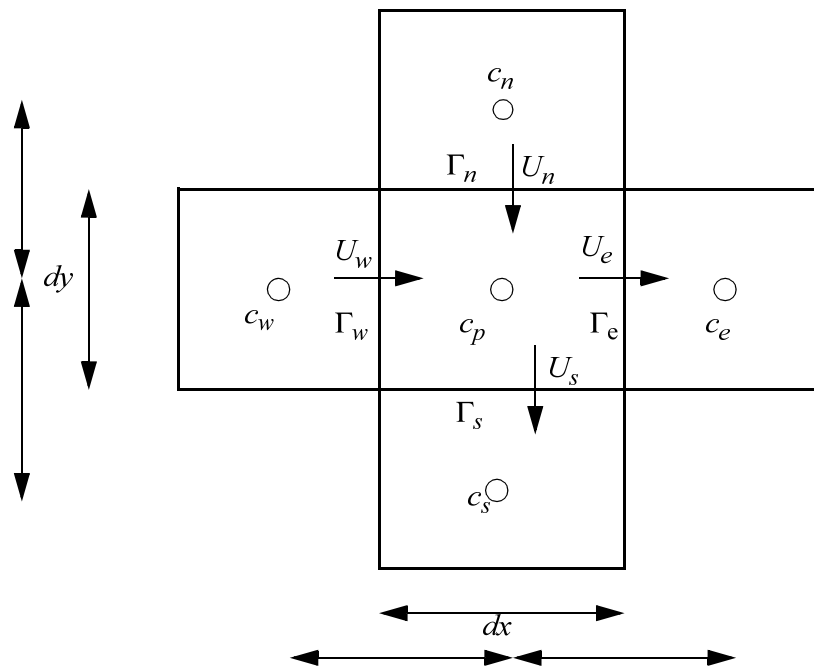
Det er verdt å merke seg at gravitasjonskrafta ikkje er inkludert i likning (3.4). I likning (3.4) er det fem ledd: Eit transient og eit konvektiv ledd på venstre sida av likninga. På høgre sida er det eit ledd med trykk/kinetisk energi, eit spreiane ledd og eit spenningsledd. Det konvektive og det spreiane leddet vert løyst med utgangspunkt i ei konvektiv-spreiane likning for farten U i vatnet (Olsen 2011):

$$\underbrace{U_i \frac{\partial U}{\partial x_i}}_{\text{Konvektiv}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \frac{\partial U}{\partial x_i} \right)}_{\text{Spreiande}} \quad (3.5)$$

$$\Gamma = \frac{\frac{F}{A}}{\left(\frac{dU}{dx} \right)} \quad (3.6)$$

Likning (3.5) vert så tatt som utgangspunkt for diskretisering. Det vil seie at den partielle differensiallikninga vert omforma til ei ny der farten i ei celle er gitt som ein funksjon av farten i nabocellene. Vi får då eit system av lineære likningar som må løysast implisitt. Altså å finne ei løysing ved å inkludere noverande tilstand og den neste. Utgangspunktet for den enklaste forma for diskretisering, fyrste ordens oppstrøms skjema, er vist i figur 3.3.

Med utgangspunkt i likning (3.5) og figur 3.3, vert den konvekktive fluksen rekna som $U \cdot A \cdot c$ for fyrste ordens oppstrøms skjema. Den spreiane fluksen vert på liknande vis rekna ut som $\Gamma \cdot A \cdot dc/dx$.



Figur 3.3: Fluks for fyrste ordens oppstrøms skjema (Olsen 2011).

Ved å sette opp likningar for fluksane F_i ($F_w = west, F_e = east, F_s = south, F_n = north$) får ein då at (Olsen 2011):

$$F_w = U_w A_w c_w + \Gamma_w \frac{A_w (c_w - c_p)}{dx} \quad (3.7a)$$

$$F_e = U_e A_e c_p + \Gamma_e \frac{A_e (c_p - c_e)}{dx} \quad (3.7b)$$

$$F_s = U_s A_s c_p + \Gamma_s \frac{A_s (c_p - c_s)}{dy} \quad (3.7c)$$

$$F_n = U_n A_n c_n + \Gamma_n \frac{A_n (c_n - c_p)}{dy} \quad (3.7d)$$

Kontinuitet gjev at

$$F_w - F_e + F_n - F_s = 0 \quad (3.8)$$

Ved å innføre vekta faktorar, a_i , for konsentrasjonsendring i cellene som ein funksjon av konsentrasjonen i nabocellene, får ein likningar for samanhengen mellom cellene (Olsen 2011):

$$a_p = \Gamma_w \frac{A_w}{dx} + U_e A_e + \Gamma_e \frac{A_e}{dx} + U_s A_s + \Gamma_s \frac{A_s}{dy} + \Gamma_n \frac{A_n}{dy} \quad (3.9a)$$

$$= a_e + a_w + a_s + a_n \quad (3.9b)$$

$$a_w = U_w A_w + \Gamma_w \frac{A_w}{dx} \quad (3.9c)$$

$$a_e = \Gamma_e \frac{A_e}{dx} \quad (3.9d)$$

$$a_s = \Gamma_s \frac{A_s}{dy} \quad (3.9e)$$

$$a_n = U_n A_n + \Gamma_n \frac{A_n}{dy} \quad (3.9f)$$

Konsentrasjonen i kvar celle er då gitt som

$$c_p = \frac{a_w c_w + a_e c_e + a_n c_n + a_s c_s}{a_p} \quad (3.10)$$

Det finnast fleire andre skjema å diskretisere etter (Olsen 2011):

- Fyrste ordens oppstrøms skjema: Dette er den enklaste varianten og baserer seg på verdien i cellene som grensar til den vi ser på, slik som vist i figur 3.3.
- Andre ordens oppstrøms skjema: Denne er på liknande vis for cellene i to lag kring den vi ser på.

- Sentralskjema: Her er utrekningane basert på interpolering mellom celler på to sider.
- Avgrensa sentraldifferensiering: Dette er ein mellomting av sentralskjema og fyrsteordens oppstrøms skjema.
- Blanding av fyrste ordens oppstrøms skjema og sentralskjema.
- Blanding av andre ordens oppstrøms skjema og sentralskjema.
- Blanding av andre ordens oppstrøms skjema og avgrensa sentraldifferensiering.

3.2.1 SIMPLE-metoda

SIMPLE («*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*») er ei numerisk prosedyre for å finne trykkfeltet for stasjonær simulering i Navier–Stokes-likningane vist i (3.1). Ein startar med å gjette trykket P^* for så å rekne ut farten U^* frå ei diskretisert Navier–Stokes-likning (Olsen 2011):

$$a_p U_{k,p}^* = \sum_{nb} a_{nb} U_{k,nb}^* + B_{u_k} - \left(A_k \frac{\partial P^*}{\partial \xi} \right) \quad (3.11)$$

der a er summen av vektingsfaktorane ($\sum_{i=1}^6 a_i$), B ein restverdi frå diskretiseringa, A_k er overflatearealet til cella i retning k og ξ er retninga av gridet. Så reknast det ut trykkkorreksjon P' frå (Olsen 2011):

$$a_p^\circ P'_p = \sum_{nb} a_{nb}^\circ P'_{nb} + b \quad (3.12)$$

Notasjonen $^\circ$ indikerar ny verdi for koeffisienten. b er avviket frå vassbalansen. Etter det finn ein korreksjon for farten U' frå (Olsen 2011):

$$U'_k = \left(\frac{A_k \partial P'}{a_p \partial \xi} \right) \quad (3.13)$$

Til slutt korrigerast utgangspunktet etter dei justerte verdiane (Olsen 2011):

$$P = P^* + P' \quad (3.14)$$

$$U_k = U_k^* + U'_k \quad (3.15)$$

Så itererast det frå likning (3.11) til (3.15) heilt til det er konvergent. Det er vanleg å multiplisere trykkkorreksjonen P' med ein relaxeringsfaktor («*relaxation coefficient*») på 0.2. Dette for å unngå ustabilitet i utrekningane, men det vil også forårsake lenger utrekningstid før konvergens er oppnådd. Om løysinga divergerar, eller ikkje konvergerar på grunn av ustabilitet, er det vanleg å minske relaxeringsfaktoren slik som vist i avsnitt 3.7.

3.3 Modellering av ruheit

I ein numerisk modell av vasstrøymen med scanna tverrsnitt, vil tverrsnittsruheita til ein viss grad vere inkludert, men produksjon av grid vil glatte ut delar av denne ruheita.

Strøymingsgradienten mot veggavheng av ruheita til overflata. Det ville krevd eit stort antall celler for å modellere gradienten skikkeleg. I staden kan ein nytte seg av vegglover som er omforma ved å integrere over cella nærast overflata for uniform strøyming og ru overflate. Då får ein det som kallast for det logaritmiske profilet til farten av vatnet (Olsen 2011):

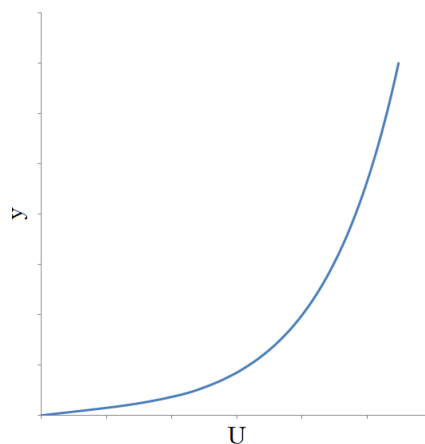
$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{30d}{k_s} \right) \quad (3.16)$$

- κ – Empirisk konstant, $\kappa = 0.4$
- d – Avstand frå overflate til sentrum av cella [m]

Skjærhastigheita u_* er gitt som (Olsen 2011):

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_v}} = \sqrt{ghI} \quad (3.17)$$

Det logaritmiske profilet er skissert i figur 3.4 ut i frå likning (3.16) og (3.17). Figuren viser at vatnet vert bremsa nær overflata av veggen på grunn av friksjon frå ruheit.



Figur 3.4: Logaritmisk profil.

3.3.1 Falltap

Etter at ruheita er funne, kan ein ut i frå målte verdiar finne falltapet. Falltapet er summen av singulærtap og friksjonstap. Singulærtap er lokale tap som kjem som fylgje av endring i geometri og er generelt på forma:

$$h_s = K_\alpha \frac{U^2}{2g} \quad (3.18)$$

- K_α – Koeffisient for singulærtap [-]

Hovuddelen av falltap kjem generelt frå friksjonstap. Ein kan rekne ut friksjonstap ut i frå Darcy-Weisbachs formel:

$$h_f = f \frac{L U^2}{D 2g} \quad (3.19)$$

f	–	Friksjonsfaktor [-]
L	–	Lengda av vassvegen [m]
D	–	Diameter [m]

Om det ikkje er eit sirkulært tverrsnitt ein ser på, kan ein nytte samanheng $D = 4 \cdot R_h$ der R_h er hydraulisk radius. Friksjonsfaktoren finn ein ut i frå ruheit og Reynoldstal, der Reynoldstalet er gitt som:

$$Re = \frac{U \cdot D}{\nu} \quad (3.20)$$

Friksjonsfaktoren f kan ein då finne ut i frå likninga til Swamee og Jain, her frå Crowe (2009):

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{k_s}{3.7 \cdot D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (3.21)$$

Likning (3.21) har ein feilmargin mindre enn 3 % samanlikna med Moody-diagrammet for $4 \cdot 10^3 < Re < 10^8$ og $10^{-5} < k_s/D < 2 \cdot 10^{-2}$ (Crowe 2009).

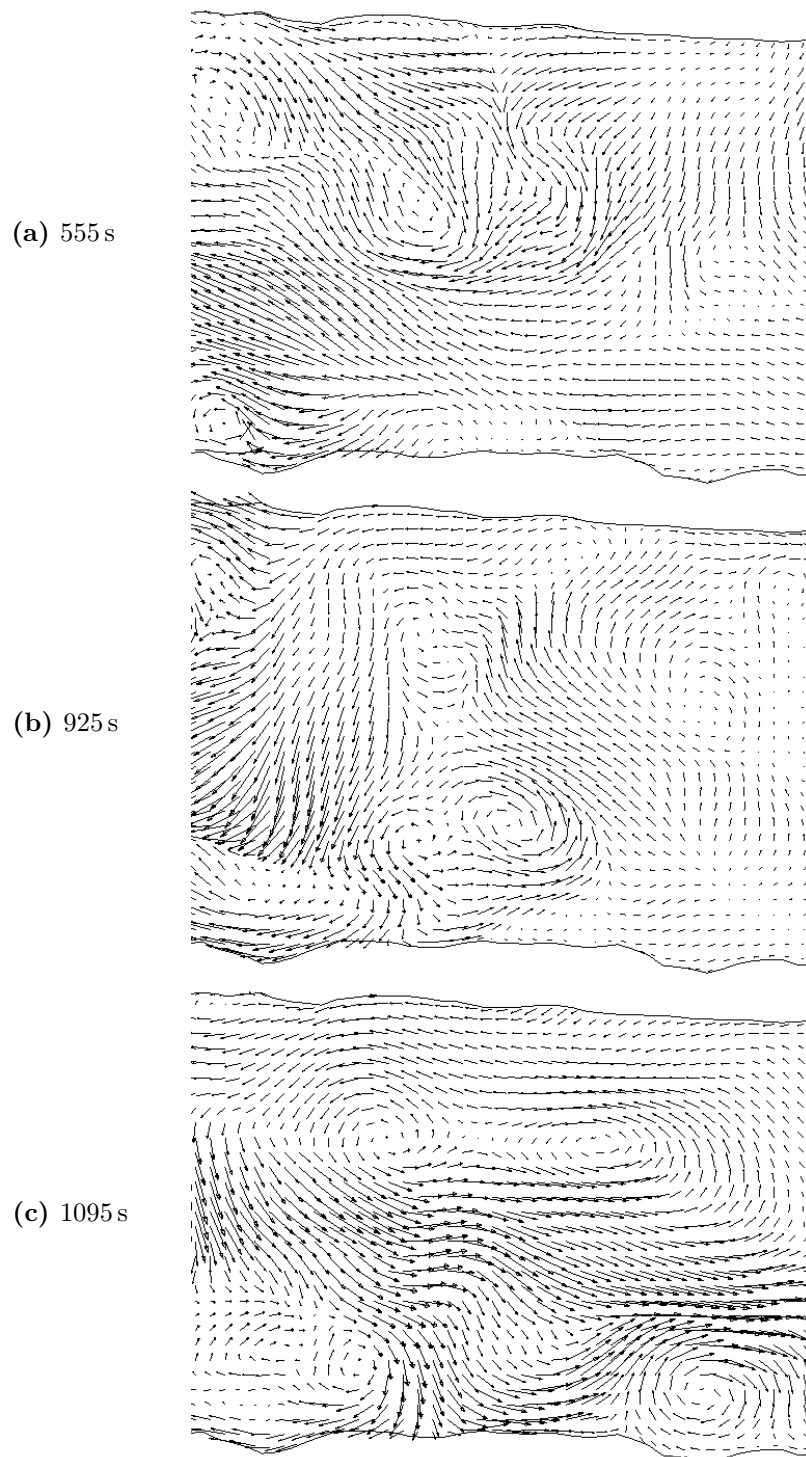
Alternativt kan ein gjere eit overslag med Bernoulli (Crowe 2009):

$$\frac{p_1}{\rho_v \cdot g} + \frac{U_1^2}{2 \cdot g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho_v \cdot g} + \frac{U_2^2}{2 \cdot g} + z_2 \quad (3.22)$$

3.4 Turbulensmodellar

For dei aller fleste praktiske føremål er strøyminga turbulent. Turbulens er kjennemerka ved at det oppstår uregelmessig fluktuasjon med høg frekvens i hovudstrøyminga slik som vist i figur 3.2. Turbulent strøyming oppstår når Reynoldstalet aukar, det vil seie at farten aukar, ut over det laminære området. Grensa er ikkje eintydig, men ligg på om lag $Re \approx 2500$ (sjå likning (3.20)).

For dei fleste simuleringar vil det vere tilfredsstillande å nytte turbulensmodellar av kategorien «*Reynolds-Averaged Navier–Stokes*» (RANS). RANS simulerer turbulensen via gjennomsnittsverdiar over tid. I figur 3.5 er det vist korleis turbulensen endrar seg med tida for RANS. Så lenge ein har ein strøymingssituasjon der ikkje store virvlar oppstår, vil denne type simulering gje tilfredsstillande resultat. Dei meir avanserte turbulensmodellane «*Large Eddy Simulation*» (LES) og «*Detached Eddy Simulation*» (DES) kan nyttast der RANS ikkje er tilstrekkeleg. Oppløysinga av gridet og tidsskritt må då vere mykje finare enn for RANS.



Figur 3.5: *Turbulens ved ulik tid i ei simulering med RANS ($k-\varepsilon$). Legg merke til virvelen som går frå øvre venstre del til nedre høgre kant etter kvart som simuleringa går.*

3.4.1 Reynolds-Averaged Navier–Stokes, RANS

«*Reynolds-Averaged Navier–Stokes*» (RANS) vert modellert ved å sette inn ein gjennomsnittleg fart (U) og ein varierende fart (u) i Navier–Stokes-likningane som forklart i avsnitt 3.2. Ein får då eit ekstra uttrykk kalla Reynolds spenningstensor som er analog med likninga for Reynolds spenning med alle ledd (CD-adapco 2013):

$$\mathbf{T}_t \equiv -\rho \overline{v'v'} = -\rho \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'w'} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Utfordringa er då korleis ein kan modellere Reynolds spenningstensor. Det er i hovudsak to tilnærmingar til dette:

- Modellar for virvelviskositet («*Eddy viscosity models*»)
- Reynolds transportmodell for spenning («*Reynolds stress transport models*»)

Modellar for virvelviskositet («*Eddy viscosity models*») nyttar tilnærminga til Boussinesq vist i likning (3.3). Ein kan finne den turbulente viskositeten frå fleire undermodellar, mellom anna k - ε , k - ω og Spalart-Allmaras. Dei to fyrste er omtala i dei neste avsnitta.

I Reynolds transportmodell for spenning («*Reynolds stress transport models*») vert transportlikningar for kvar komponent i Reynolds spenning med alle ledd løyst. Løysinga skjer gjennom ein av fylgjande tre undermodellar: *Linear Pressure Strain*, *Quadratic Pressure Strain*, *Linear Pressure Strain Two-Layer*.

k - ε

I staden for å løyse ei likning for virvelviskositet, kan ein dele opp problemet til to likningar. Den mest vanlege modellen for dette er k - ε . I denne modellen vert turbulent kinetisk energi (k [J/kg]) rekna ut i høve til spreininga av k . Spreining av turbulent kinetisk energi vert kalla ε [m^2/s^3]. k og ε har om lag lik storleiksorden (Versteeg & Malalasekera 2007). Fordelen med denne modellen er at konstantane i likningane er om lag universelle slik at ein slepp å kalibrere (Olsen 2011).

Den momentane kinetiske energien, $k(t)$, i ei turbulent strøyming er gitt som summen av den gjennomsnittlege kinetiske energien og den turbulente kinetiske energien (Versteeg & Malalasekera 2007):

$$k(t) = K + k = \frac{1}{2}(U^2 + V^2 + W^2) + \frac{1}{2}(\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}) \quad (3.24)$$

3.4. Turbulensmodellar

der U, V, W er gjennomsnittleg fart og u, v, w er varierende fart i aksane x, y, z tilsvarande figur 3.2.

Virvelviskositeten, ν_T , reknast ut i frå likning (3.25) (Olsen 2011) (Versteeg & Malalasekera 2007):

$$\nu_T = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} = c_\mu \frac{\left(\frac{1}{2}(\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2})\right)^2}{\varepsilon} \quad (3.25)$$

Turbulent kinetisk energi, k , vert modellert som (Olsen 2011):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_T \partial k}{\sigma_k \partial x_j} \right) + P_k - \varepsilon \quad (3.26)$$

der P_k er produksjon av turbulens, gitt som

$$P_k = \nu_T \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.27)$$

Spreiing av k vert kalla ε og vert modellert som (Olsen 2011):

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_T \partial \varepsilon}{\sigma_\varepsilon \partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k + C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.28)$$

Standardverdiane for parametrane i k - ε er (Versteeg & Malalasekera 2007)

$$c_\mu = 0.09 \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44 \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92 \quad \sigma_k = 1.00 \quad \sigma_\varepsilon = 1.30 \quad (3.29)$$

I modellen med k - ε vart det i utgangspunktet nytta veggfunksjonar. Den har så blitt modifisert til også å løyse det laminære undersjiktet ved lågt Reynoldstal og som to lag (CD-adapco 2013).

k - ω

Sidan k - ω også løyser to likningar, liknar den på k - ε i avsnittet over. Skilnaden er ω som reknar ut spreingsgraden per eining av turbulent kinetisk energi ($\omega \sim \varepsilon/k$). Ein fordel med denne føre k - ε er forbetra yting i grensesjikt ved ugunstige trykkgradientar og at den kan nyttast utan modifikasjon i det laminære undersjiktet. Ulempa er at den er sensitiv for friskeilsstrøyming (CD-adapco 2013).

3.4.2 Large Eddy Simulation, LES

«Large Eddy Simulation» (LES) er ei stor virvelsimulering der virvlane delast opp i store og små virvlar. Dei små er tilnærma isotropisk med universell oppførsel for høge Reynoldstal. Dei store virvlane er derimot meir anisotropisk og vert påverka av geometri, grensevilkår og krefter (Versteeg & Malalasekera 2007). LES krev finare oppløysing av gridet enn RANS. Det er avgrensa sentralfiltrering som er standard og tilrådd diskretiseringskjema for LES i STAR-CCM+ sidan dette er eit godt kompromiss mellom nøyaktigheit og robustheit (CD-adapco 2013).

Likningane som vert løyst for LES kjem frå filtrering av dei store og små virvlane. Dette i motsetnad til gjennomsnittsverdiar i RANS. Den romlege filtreringa frå filterfunksjonen $G(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \Delta)$ forgår etter likning (3.30) (Versteeg & Malalasekera 2007):

$$\bar{\phi}(\mathbf{x}, t) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \Delta) \phi(\mathbf{x}', t) dx'_1 dx'_2 dx'_3 \quad (3.30)$$

$\bar{\phi}(\mathbf{x}, t)$	–	Filtrert funksjon
$\phi(\mathbf{x}', t)$	–	Den originale, ufiltrerte funksjonen
Δ	–	Filtreringsbreidde

Dei mest vanlege filterfunksjonane i LES er (Versteeg & Malalasekera 2007):

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \Delta) = \begin{cases} 1/\Delta^3 & |\mathbf{x} - \mathbf{x}'| \leq \Delta/2 \\ 0 & |\mathbf{x} - \mathbf{x}'| > \Delta/2 \end{cases} \quad (3.31a)$$

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \Delta) = \left(\frac{\gamma}{\pi\Delta^2}\right)^{3/2} \exp\left(-\gamma \frac{|\mathbf{x} - \mathbf{x}'|^2}{\Delta^2}\right) \quad (3.31b)$$

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{x}', \Delta) = \prod_{i=1}^3 \frac{\sin[(x_i - x'_i)/\Delta]}{(x_i - x'_i)} \quad (3.31c)$$

Likning (3.31a) vert kalla «Top-hat» eller «box filter». «Gaussian filter» er likning (3.31b) der standardverdien for parameteren γ er $\gamma = 6$. I likning (3.31c) er det vist filterfunksjonen for «Spectral cutoff». Dei to siste er prioriterte i forskning (Versteeg & Malalasekera 2007).

Dei filtrerte likningane kan stokkast om til ei form som er identisk med likning (3.23), men då vil spenningstensoren \mathbf{T}_t gjelde for spenningar i underliggande grid. Tensoren vert modellert etter Boussinesq sin tilnærming, likning (3.3), på fylgjande måte (CD-adapco 2013):

$$\mathbf{T}_t = 2\mu_t \mathbf{S} - \frac{2}{3}(\mu_t \nabla \cdot \mathbf{v} + \rho k_e) \mathbf{I} \quad (3.32)$$

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) \quad (3.33)$$

\mathbf{T}_t	–	Turbulent spenningstensor
μ_t	–	Turbulent skalaviskositet
k	–	Kinetisk energi
\mathbf{S}	–	Tensor for påkjenningsfart

Ei utfordring ved LES er å sette rett strøymingstilhøve oppstrøms modellen. Ei løysing på dette er å nytte «*Synthetic Eddy Method*» (SEM) som initierer kunstige turbulensvirvlar over innløpet til modellen (CD-adapco 2013).

SEM er ei av fleire moglege modellar for å danne virvlar ved innløpet. Det turbulente området vert danna ved å superposisjonere virvlar ut i frå ei uniform sannsynsmodell. Sidan virvlane må spenne over minst to celler for å henge saman, er storleiken av gridet heilt avgjerande for turbulensnivået (CD-adapco 2013). SEM gjev berre ei tilnærming til den verkelege turbulensen, så den må utvikle seg for å få rett nivå. Utviklinga av virvlane skjer ved konveksjon medstrøms. Det må difor vere ei viss avstand mellom innløp og geometrien ein skal sjå på. Avstanden bør vere minst fem gonger så lang som høgda (CD-adapco 2013).

I LES vert det nytta ein modell i underliggande grid, Smagorinsky eller Wale, som direkte reknar ut den turbulente viskositeten. Smagorinsky er den originale modellen, men den har potensiale for signifikant overforbruk av tid til å fordele parallelle oppgåver. Difor bør ein unngå denne modellen for store modellar med kompleks geometri (CD-adapco 2013). Alternativt kan Wale-modellen nyttast. Den nyttar ei anna tensorform i fartsgradienten. Fordelen er at den ikkje treng demping nær flater, noko som gjer den betre eigna for parallellisering på komplekse geometriar (CD-adapco 2013).

3.4.3 Detached Eddy Simulation, DES

«*Detached Eddy Simulation*» (DES) er ei separert virvelsimulering som er ei blanding av RANS og LES. DES er relativt nyleg utvikla, då den fyrste gong vart nytta i 1999 (Spalart 2009). I denne modellen vert det nytta RANS i grensesjiktet mot overflatar og LES i områder med store ikkje-stasjonære virvlar. Oppløysinga av gridet treng dermed ikkje vere like fin som for ein rein LES (CD-adapco 2013). Det finnst to typar av DES for STAR-CCM+: «*SST (Menter) K-Omega Detached Eddy*» og «*Spalart-Allmaras*

Detached Eddy», der sistenemnte er tilrådd (CD-adapco 2013). For DES er det tilrådd å nytte ei blanding av andre ordens oppstrøms skjema og sentralskjema, slik som omtala i avsnitt 3.2, då den har vist seg å vere mest nøyaktig (CD-adapco 2013). DES nyttar også SEM for å danne kunstige virvlar ved innløpet.

Overgangen mellom RANS og LES kan vere problematisk med mindre separasjonen mellom dei skjer brått. Dette kan handterast ved å tilpasse geometrien, avstand til overflater og storleiken til cellene. Når ingen av desse avgrensingane er møtt, nyttar modellen RANS. Dette kan til dømes skje om gridet er for grovt. Den maksimale storleiken av cellene er gitt som $\Delta = \max(\Delta x, \Delta y, \Delta, z)$ (Spalart 2009). I situasjonar der rotasjonen til farten («*vorticity*») er retta i retning med ei av linjene i gridet, kan ein finne Δ som (Spalart 2009):

$$\Delta \equiv \sqrt{N_x^2 \Delta y \Delta z + N_y^2 \Delta x \Delta z + N_z^2 \Delta x \Delta y} \quad (3.34)$$

- Δ – Maksimal storleik av cellene i DES
- \vec{N} – Einingsvektor i retning med virvelen

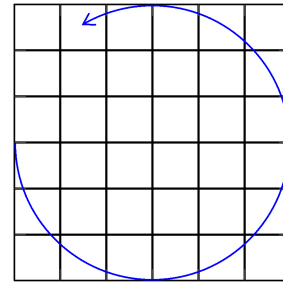
DES har sine svake sider med grid der det er celler nær overflater med like store celler som ved grensesjiktet. I slike tilfeller har det vist seg at for eit gitt grid kan DES vere mindre nøyaktig enn RANS, eller til og med for DES med grovare grid (Spalart 2009). Ein bør difor nytte isotrope celler i det generelle geometriske rommet for simuleringar med DES. Cellene bør der vere så nær kubisk som mogleg for å kunne handtere virvlane i tre dimensjonar (Keylock, Constantinescu & Hardy 2012).

Ein kan likvel nytte forfining nær overflater. Viss avstanden parallelt med overflata ($\Delta_{||}$) vert mindre enn storleiken av grensesjiktet mot overflatar (δ), kan DES få feil oppførsel (Spalart, Deck, Shur, Squires, Strelets & Travin 2006). For å løyse dette problemet, er det utvikla ein variant av DES kalla «*Delayed DES*» (DDES). STAR-CCM+ kallar denne for «*Spalart-Allmaras Detached Eddy*». DDES utnyttar at det kan vere ulikt sideforhold (figur 3.1) ved overflater. Når sideforholdet då er mykje større enn 1, vil det seie at det er eit grensesjikt. Lengdeskalaen \tilde{d} i likning (3.35) vert då forskuve oppover slik at RANS vert favorisert for dette området (Spalart et al. 2006):

$$\tilde{d} \equiv \min(d, C_{DES} \Delta) \quad (3.35)$$

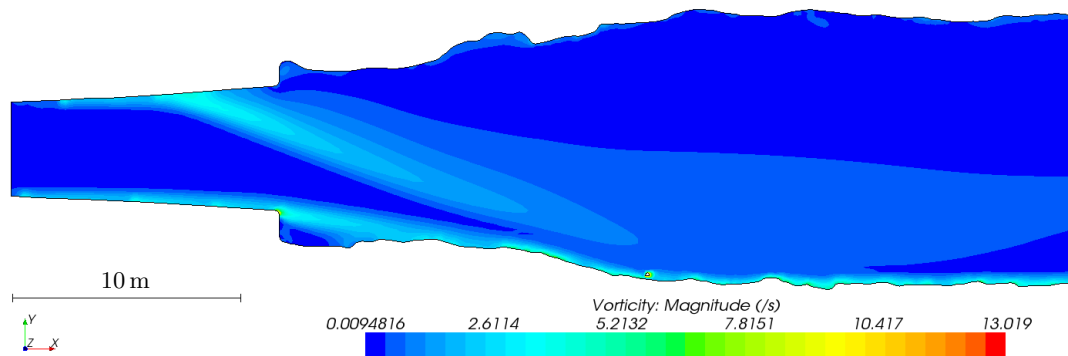
- \tilde{d} – Lengdeskala for DES
- d – Avstand frå overflate for DES
- C_{DES} – Modellparameter i DES, < 1
- Δ – Maksimal storleik av cellene i DES, $\Delta = \max(\Delta x, \Delta y, \Delta, z)$

Keylock et al. (2012) foreslår å starte ein DES-modell i frå ein konvergent RANS-modell. Sjølv om både LES og DES krev finare grid, vil vurderingar av cellestorleik frå RANS-modellar gje ein peikepinn på kva for grid ein minst må ha. Om ein kan estimere storleiken av dei minste virvlane, er det tilrådd å nytte ein cellestorleik som tilsvarar minst seks punkt i kvar retning slik som vist i figur 3.6 (Keylock et al. 2012).

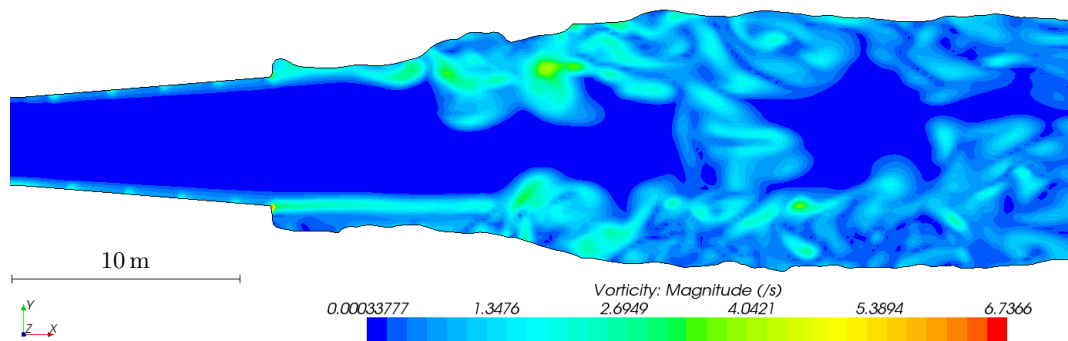


Figur 3.6: Inndeling av celler for dei minste virvlane i DES.

Virvling for RANS og DES er vist i figur 3.7. Ein ser tydeleg at turbulensnivåa er ulike grunna ulik handtering av turbulens.



(a) RANS (R1)



(b) DES (D3)

Figur 3.7: Turbulensnivå med RANS (a) og DES (b).

3.5 Tidsskritt og Courant-talet

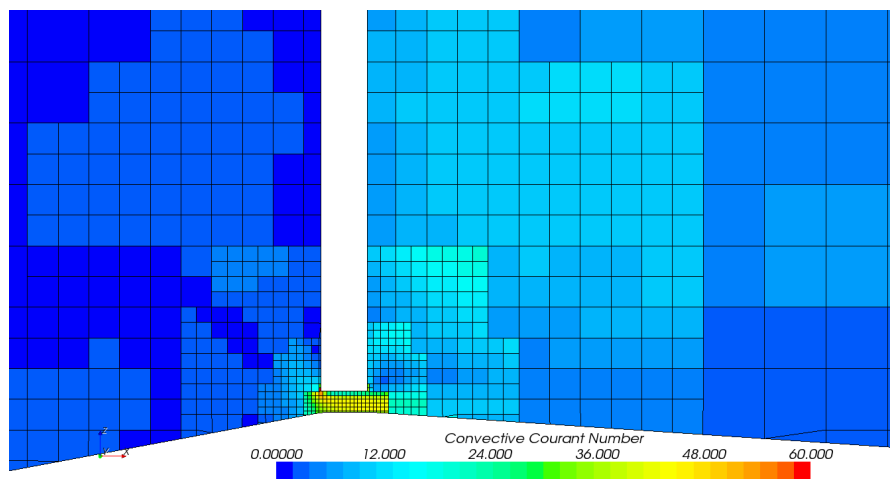
Courant-talet gjev ein verdi på samanhengen mellom fart, tidsskritt og cellestorleik. Det fortel om utrekning av løysinga går fortare enn væska slik at utrekningane «hopper» over celler og dermed gjev avvikande resultat. Courant-kriteriet for tre dimensjonar er gitt som (Courant, Friedrichs & Lewy 1967 [1928]):

$$C = \Delta t \sum_{i=1}^3 \frac{u_{x_i}}{\Delta x_i} < C_{max} \quad (3.36)$$

C	–	Courant-talet [-]
C_{max}	–	Maksimalt Courant-tal [-]
Δt	–	Tidsskritt [s]
u_{x_i}	–	Farten til vatnet [m/s]
Δx_i	–	Storleik av celle [m]

Ved simulering av ikkje-stasjonær strøyming er det vanleg å prøve og oppnå $C_{maks} = 1$ for eksplisitt løysing, medan C_{maks} kan vere større for implisitt løysing på grunn av mindre sensitivitet mot numerisk ustabilitet. Implisitt løysing er vanlegvis stabil for lokale maksimumsverdiar av C mellom 10-100 og med ein gjennomsnittsverdi på om lag 1. Det er vanleg å starte ei simulering med lågt tidsskritt, og dermed lågt Courant-tal, for så å auke etter kvart (CD-adapco 2013). I ei stasjonær RANS-simulering kan ein sette på ynskt verdi av Courant-talet. Standardverdien er 5.0 (CD-adapco 2013).

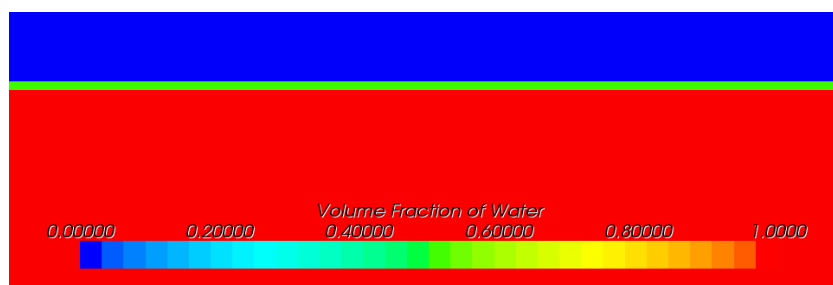
For enkelte geometriar kan det vere vanskeleg å finne ein eintydig verdi av Courant-talet. Som vist i figur 3.8 kan Courant-talet vere generelt om lag 1, men med eit lite område med mykje høgare Courant-tal.



Figur 3.8: Små opningar i geometri vil gje lokalt høgt Courant-tal. Her vist i snitt ved luka inn til sandfanget.

3.6 Volume of Fluid, VOF

«Volume of Fluid» (VOF) er ei metode for mellom anna å finne plasseringa av den frie overflata til vatnet i ein modell med luft og vatn. VOF-modellen går ut i frå at dei ulike fasene deler den same farten, trykket og temperaturen. Det vert difor løyst dei same likningane som for ein-fase strøyming, men det vert også rekna ut delen av kvar fase (CD-adapco 2013). Grensesjiktet vil vere i dei cellene som har like delar vatn og luft. Som vist i figur 3.9, tilsvarar dette ein VOF-verdi på 0.5.



Figur 3.9: Vassflata er der VOF-verdien er 0.5.

For å oppnå ei skarp grense mellom fasene, er det tilrådd å nytte andre ordens diskretiseringskjema slik som omtala i avsnitt 3.2 (CD-adapco 2013). Ved bruk av VOF er det spesielt viktig å passe på at tidsskrittet, og dermed Courant-talet, ikkje er for stort då ein kan få ei utjamna fordeling av fasene.

3.7 Relaksering

Parametrar for under-relaksering fastsett kor fort løysaren når ei løysing for ei spesiell likning. Verdien går frå 0-1 der 1 er raskast. Ideelt sett burde alle relakserande parametre settast til 1, men det vil mest sannsynlegvis føre til ustabilitet i løysaren på grunn av kompleksiteten i simuleringa (CD-adapco 2013). Verdien vert dermed sett som eit kompromiss mellom stabilitet og fart. Standardverdiane for nokre av dei viktigaste relakseringsfaktorane for denne oppgåva er (CD-adapco 2013):

- Stasjonær:
 - k - ε turbulens: 0.8
 - k - ε viskositet: 1.0

- Implisitt ikkje-stasjonær:
 - Separert strøyming:
 - * Fart: 0.8
 - * Trykk: 0.2
 - Separert VOF: 0.9
 - k - ε turbulens: 0.8
 - Spalart-Allmaras turbulens: 0.7
 - k - ε viskositet: 1.0
 - Spalart-Allmaras viskositet: 1.0

3.8 Falsk diffusjon

Falsk diffusjon er at spreinga av ein konsentrasjon eller ein fart vert modellert slik at den fordelar seg ut over eit større område enn det som verkeleg er tilfellet. Feilen skjer gjennom tilnærmingar i det konvektive leddet i diskretiseringskjema slik som nemnt i avsnitt 3.2, likning (3.5). Tilnærminga gjeld då i høvet til korleis utrekninga av parameteren på cellekantane vert rekna ut (Olsen 2011).

Falsk diffusjon oppstår der strøyminga ikkje er parallell med gridlinjene og den aukar med aukande vinkel mellom hastigheitsvektor og gridlinje (Olsen 1991). For eit todimensjonalt tilfelle kan ein rekne ut diffusjonskoeffisienten gitt av de Vahl Davis og Mallinson, her referert frå Olsen (1991):

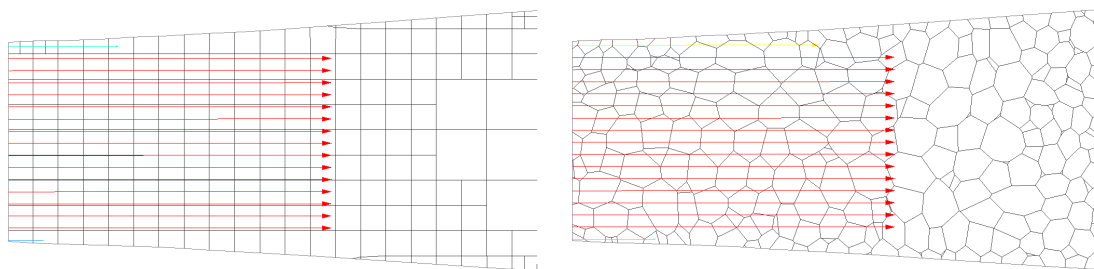
$$\Gamma_{false} = \frac{U \Delta x \Delta y \sin 2\theta}{4(\Delta y \sin^3 \theta + \Delta x \cos^3 \theta)} \quad (3.37)$$

θ – Vinkelen mellom hastigheitsvektor og x-aksen

I figur 3.10 ser ein korleis val av rett type grid innverkar på graden av falsk diffusjon.

Etter likning (3.37) er falsk diffusjonen avhengig av cellestorleik og vinkelen til strøyminga. Ein kan dermed unngå falsk diffusjon ved å (Olsen 2011):

- Rette gridet i retning med strøyminga, slik som i figur 3.10.
- Auke antall celler i gridet.
- Nytte eit høgare ordens skjema, slik som omtala i avsnitt 3.2.



(a) Parallele vektorar i trimmer grid. (b) Ikkje parallelle vektorar i polyhedral grid.

Figur 3.10: Parallellitet for hastigheitsvektorar i trimmer- og polygrid har innverknad på falsk diffusjon.

3.9 Bruk av CFD

3.9.1 Feilkjelder

Det er fleire fordelar med CFD. Ein treng ikkje tenke på skaleringsfaktorar slik ein må med fysiske modellforsøk, og med erfaring vil det ta kortare tid å få resultat med CFD enn med fysisk forsøk (Versteeg & Malalasekera 2007). Det er nokre ulemper med CFD som gjev feil i resultatata (Olsen 2011):

1. Feil i modelleringa.
2. Feil i numerisk tilnærming pga. falsk diffusjon.
3. Feil pga. ufullstendig konvergering av iterative likningar.
4. Avrundingsfeil, men i nyare datamaskiner er dette er ikkje lenger eit så stort problem.
5. Feil i grensevilkår og inndata er den mest vanlege feilen i CFD-modellering.
6. Menneskelege feil som følge av liten erfaring gjer det lett å velje feil parametrar og algoritmar.
7. Programvarefeil («bug») i programmet. Eit estimat på antallet er ein per 1000-10000 linjer kode. Med store CFD-program kan det då vere mange slike feil. Når nye funksjonar/algoritmar skal implementerast, oppstår det gjerne problem fordi dei nye koplingane kan ha uventa resultat.

I valet mellom å lage eit fysisk modellforsøk og ein CFD-modell for å løyse eit hydromekanisk problem, er dette då viktige punkt å ta med i vurderinga. CFD er oftast billigare og ein får raskare resultat enn ved fysisk modell, men problem med nøyaktigheit og verifisering gjer at ein må utføre feltmålingar eller samanliknande modellforsøk for å verifisere CFD-resultata (Versteeg & Malalasekera 2007).

3.9.2 Verifikasjon og validering

Verifikasjon er prosessen med å avgjere om modellen representerer ei nøyaktig skildring av modellen og løysinga til modellen. Under verifikasjon vert programvarefeil og menneskelege feil ignorert, medan resten av feila omtala i avsnittet over vert kvantifisert gjennom analyse av programkoda. Validering er prosessen med å avgjere i kva for grad ein modell er ein nøyaktig representasjon av den verkelege verda sett ut i frå tiltenkt bruk av modellen (Versteeg & Malalasekera 2007).

Den beste måten å teste ein CFD-modell på er å samanlikne resultata med eksperimentelle målingar. Målingane kan vere frå modellforsøk eller feltmålingar. Den vanlege måten å samanlikne på er ved å samanstille verdiar frå modell og målingar i ein graf. Viss ulikskapen mellom utrekningar frå modell og eksperimentelle målingar er tilstrekkeleg liten, vanlegvis innanfor $\pm 5\%$, er det ansett at CFD-modellen er validert (Versteeg & Malalasekera 2007).

Kapittel 4

Modellering ved hjelp av STAR-CCM+

STAR-CCM+ har innebygd funksjon for å variere storleiken av celler ut i frå geometrien. Cellene vert generert med utgangspunkt i ein valgt storleik. Den maksimale cellestorleiken vert så definert som ein viss prosent av utgangspunktet. Ein kan definere storleiken av cellene nær overflater på liknande vis, men då både for ein minimumsverdi og kva for storleik som er ynskja. Det er også mogleg å definere storleiken av dei nemte cellene til absolutte verdiar.

4.1 Ulike modellar for gridgenerering av overflata

For å lage eit grid i STAR-CCM+, har ein to val for overflata:

- «*Surface Remesher*»
- «*Surface Wrapper*»

For å forbetre kvaliteten på den eksisterande overflata, vert «*Surface Remesher*» nytta for å triangulere overflata på nytt. Verdiane for trianguleringa kan spesifiserast av brukaren. Ein får best resultat om gridet er utan slike feil som er omtala i avsnitt 4.5.

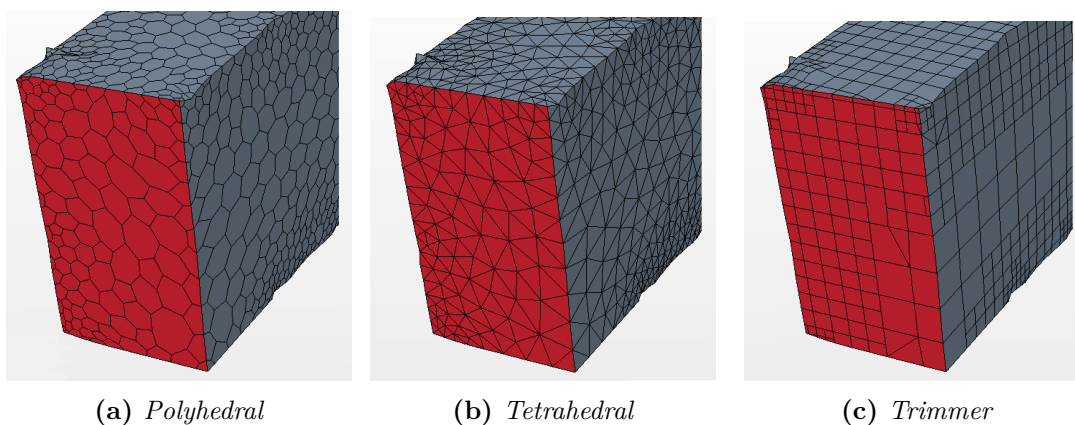
«*Surface Wrapper*» vert nytta for å reparere overflata når utgangspunktet har kryssande linjer, manglande data eller for stor grad av av detaljar. Den resulterande kvaliteten på overflata frå «*Surface Wrapper*» vil ikkje vere optimal og er dermed ikkje tilrådd. Om den vert nytta, er det i så fall saman med «*Surface Remesher*». Dette for å betre kvalitet til gridgenereringa av volumet (CD-adapco 2013).

4.2 Ulike modellar for gridgenerering av volumet

For å generere volumgrid, har STAR-CCM+ følgjande val:

- «*Advancing Layer Mesher*»
- «*Thin Mesher*»
- «*Polyhedral Mesher*»
- «*Tetrahedral Mesher*»
- «*Trimmer*»

Det er i hovudsak dei tre siste som er mest aktuelt å velje i mellom. Dømer på utsjånaden til desse tre er vist i figur 4.1.



Figur 4.1: Ulike volumgrid vist ved luka inn til sandfanget.

Informasjonen vidare i dette avsnittet er henta frå manualen til CD-adapco (2013). «*Thin Mesher*» dannar prismeforma celler, men er berre for tynne geometriar. «*Advancing Layer Mesher*» dannar prismeforma celler nær overflata og fyller den resterande geometrien med mangekanta celler.

«*Polyhedral*» (mangekanta) grid gjev ei balansert løysing for komplekse geometriar. Gridet vert laga ved å slå saman tetrahedriske celler som vert laga som ein del av prosessen. Eit slikt grid inneheld om lag fem gonger færre celler enn eit tetraedrisk grid for ei gitt overflate.

«*Tetrahedral*» grid har trekanta celler. Det er den raskaste modellen av dei nemte typene her, og nyttar minst minne for eit gitt antall celler. Den gjev difor ei effektiv løysing for komplekse geometriar, men den må ha ein god kvalitet på overflata for å kunne gje eit godt volumgrid. Kvaliteten vurderast ut i frå kriteria i avsnitt 4.

«*Trimmer*» grid har firkanta celler som i hovudsak er ortogonale. Denne typen grid gjev høg kvalitet på gridet for både enkle og komplekse geometriar med minimal skrå-

stillingsgrad. Den er uavhengig av kvaliteten til overflata og kan innrettast etter eit brukarbestemd koordinatsystem. Den kutter og trimmer kantane nær overflata. Ein kan inkludere volumkontroll for lokalt å auke eller minske densiteten til gridet ut i frå eit utval av fastsette volumformar. Trimmer grid handterer kompleks geometri på den beste måten av dei nemnte formane for grid (CD-adapco 2013). Slik som omtala i avsnitt 3.8, vil eit trimmer grid redusere graden av falsk diffusjon. I andre tilsvarende numeriske modellar har det vist seg at ortogonale celler gjev best nøyaktigheit og stabilitet (Vingerhagen & B. Olsen 2012).

4.3 Tilleggsval for grid

Etter at det er valt modell for overflata og volumet, har ein to tilleggsval:

- «*Prism Layer Mesher*»
- «*Extruder*»

«*Prism Layer Mesher*» dannar prismeforma og ortogonale celler nærast overflatene. Standardvalet er to lag med relativ storleik 33.3 % i høvet til storleiken av dei andre cellene, samt eit ekspansjonsforhold på 1.5.

«*Extruder*» gjev ortogonale celler som er utvida i lengderetninga. Den er typisk nytta ved inn- og utløp der det kan vere fordelaktig å ha celler parallelt med strøymingsretninga. I tillegg vert antall celler då redusert.

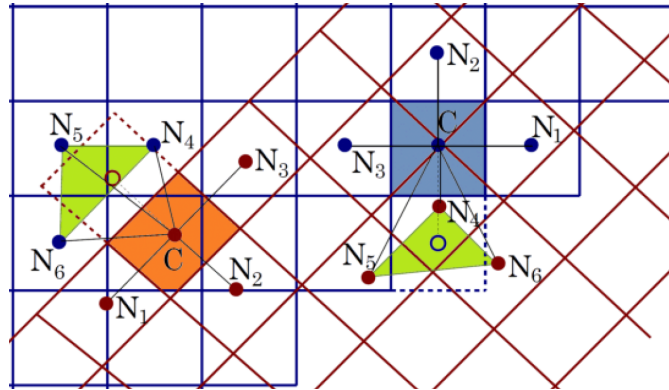
For polyhedral grid har ein i tillegg to val med «*Embedded Thin Mesher*» og «*Generalized Cylinder*». Sistenemnte har om lag lik funksjon som «*Extruder*», men dannar då sylindere med fleire kantar. «*Embedded Thin Mesher*» dannar på tilsvarende vis som «*Thin Mesher*» prismeforma celler i tynne geometriar. Føresetnaden for å nytte «*Embedded Thin Mesher*» er at den tynne geometrien er omslutta av eit anna større område (CD-adapco 2013).

4.4 Overlappande grid

Overlappande grid vert også kalla for «*Chimera*» eller «*Overset mesh*». I eit overlappande grid er cellene delt inn i aktive, inaktive og akseptorceller (CD-adapco 2013). Det er i dei aktive cellene at likningar vert løyst, medan dei inaktive cellene venter. Akseptorceller har som oppgåve å koble saman løysingane frå dei to overlappande grida.

Samankoblinga kan skje med dei ulike interpoleringsmetodane avvegd distanse, lineær og minste kvadrats metode. Den lineære interpolasjonen er meir nøyaktig enn dei to andre, men krev meir utrekningstid (CD-adapco 2013). Figur 4.2 viser metodikk for interpolering mellom celler i eit overlappande grid. Der er det vist to akseptorceller med stipla linje, ein for bakgrunnsgridet og ein for det overlappande gridet. Verdiane frå

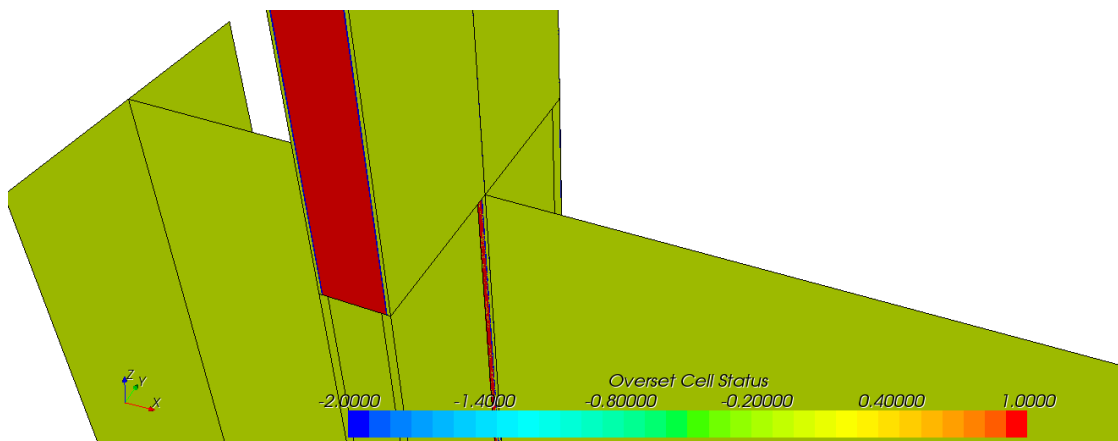
løysinga i aktive celler vert interpolert til akseptorcellene. Fordelen med overlappende grid er at ein kan simulere rørsle. Ulempa er at eit overlappende grid skalerer dårleg til parallellprosessering (Peric 2013).



Figur 4.2: Metodikk for interpolering mellom celler i eit overlappende grid. To akseptorceller er vist med stipla linje. Ein for bakgrunnsgridet og ein for det overlappende gridet (CD-adapco 2013).

For å få oversyn over kva statusen til kvar celle er, kan ein plotte statusen slik som vist i figur 4.3. Der har cellene fylgjande verdiar:

- -2: Akseptor: Celler som koplar saman løysingane.
- -1: Akseptor nytta som donor.
- 0: Aktiv: Celler det vert løyst likningar i.
- 1: Inaktiv: Ventande celler som det *ikkje* vert løyst likningar i.



Figur 4.3: Cellestatus i eit overlappende grid:
 -2 = akseptor, -1 = akseptor nytta som donor, 0 = aktiv og 1 = inaktiv.
 Her vist for ein enkel modell med luke.

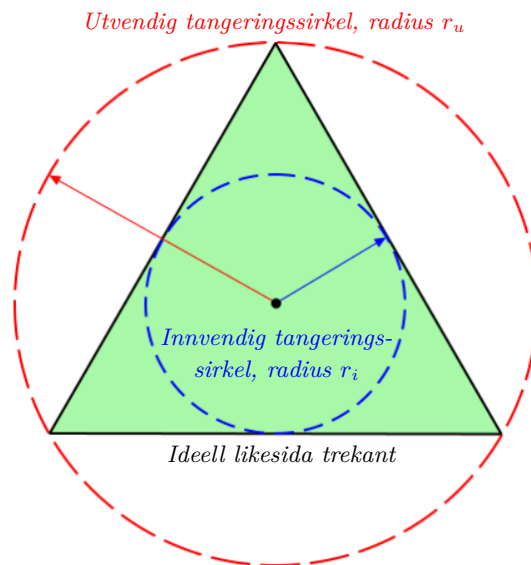
4.5 Gridfeil

STAR-CCM+ opererer med seks ulike typar feil i eit grid:

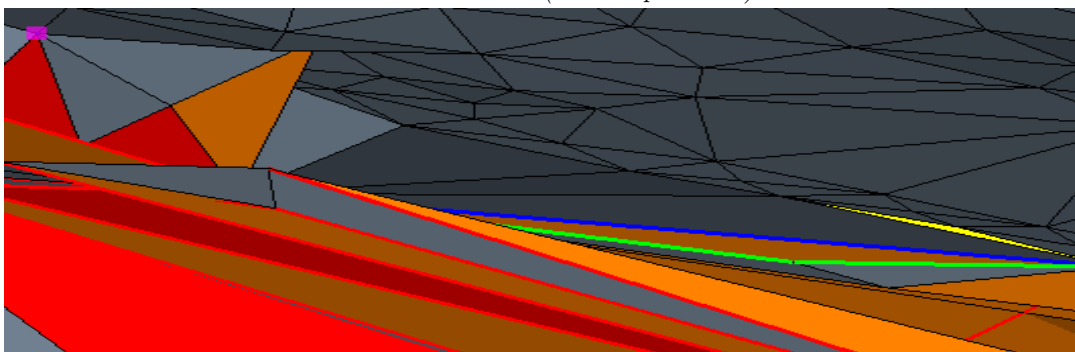
1. Celler som gjennomborar andre celler.
2. Kvalitetsfeil: Forma på overflatecellene samanlikna med ei ideell likesida trekant.
3. Celler som er for nær kvarandre.
4. Frie/opne kantar.
5. Ein kant som er delt mellom tre eller fleire celler.
6. Kun eit punkt som bind saman ei celle med ei anna.

I frå figur 4.4 vert kvaliteten av ei celle definert ut i frå innvendig og utvendig radius som $2 \cdot r_i / r_u$. Intervallet for kvaliteten er då mellom 0-1. Kvaliteten vert rekna som dårleg om den er under 0.01 (CD-adapco 2013).

Desse seks typane av feil er vist i figur 4.5. Der er feil 1 raud, 2 er gul, 3 er oransje, 4 er grønn, 5 er blå og 6 er rosa. Feil 1-3 kan reparerast automatisk i STAR-CCM+, men feil 4-6 må gjerast manuelt. Som ein ser av figur 4.5, heng feila gjerne saman og dermed tek det likevel ikkje så lang tid å gå gjennom feila som må reparerast manuelt.



Figur 4.4: Kvaliteten av ei celle. Basert på (CD-adapco 2013).

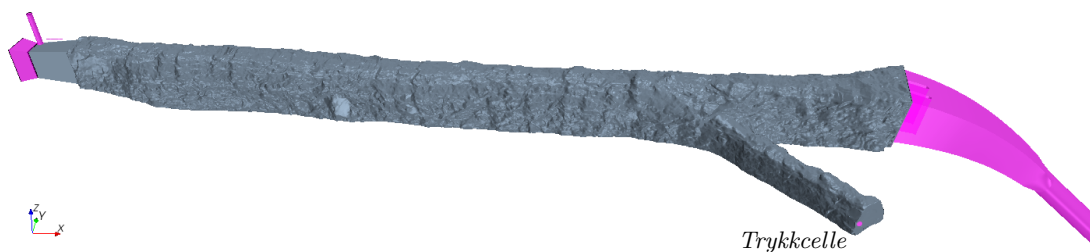


Figur 4.5: Døme på dei seks gridfeila i STAR-CCM+.

Kapittel 5

Numerisk modellering

Som ei vidareføring frå prosjektoppgåva (Brevik 2012) vart geometrien utvida før luka og etter varegrinda som vist i figur 5.1. Tilstøytande lufterøyr ved luka vart teikna inn.



Figur 5.1: Ny og forlenga geometri med utgangspunkt frå prosjektoppgåva. Nye delar vist i rosa. Figuren viser også plasseringa til trykkcella.

For denne geometrien var fylgjande situasjonar vurdert:

- Stasjonær strøyming for stabil vassføring
- Ikkje-stasjonær strøyming for stabil vassføring
- Start- og slutfase i ein fyllingssituasjon

5.1 Geometri av modellen

Utgangspunktet for oppgåva var ein scanna 3D-modell og arbeidsteikningar (vist i vedlegg H) i frå utbygginga av ekstra aggregat i 1987. Det vart nytta AutoCAD 2013 (studentversjon) for å teikne inn geometrien rundt den scanna modellen av sandfang 3. Den scanna modellen vart så sydd i saman med modellen frå AutoCAD. Dette vart gjort i STAR-CCM+, då AutoCAD godtek glepper i mellom ulike lag. Modellen er vist i

innleiinga i figur 1.3. I figur 1.7 er det vist nærmare dei ulike komponentane som vart teikna inn; utvida innløp, luke, luftesjakt, varegrind og trykksjakt. Arbeidet vart gjort for at det seinare skal kunne gjerast forsøk med alle tre sandfang og svingesjakter og samverknaden i mellom dei. For denne oppgåva var det derimot ikkje bruk for alt dette. Modellen vart kutta slik som vist i figur 5.1 og vedlegg A.

5.2 Aktuelle problemstillingar

I tabell 5.1 er det vist ei oversikt over dei ulike modellane i denne oppgåva. For å undersøke frisperilsstrøyming, og om det kan oppstå ein spyleeffekt i sandfanget under fylling, vart modellane F1-F3 laga. Underøking av om det kan oppstå luftlommer ved fylling av sandfanget vart gjort med modell S1. Vurdering av hastigheitsprofil vart gjort med modell D1-D4.

Tabell 5.1: Oversikt over dei ulike modellane i denne oppgåva.

Namn	Problemstilling	Cellestorleik [m]	Antall celler
R1	Stasjonær simulering, RANS	0.20	4 003 517
R2		0.40	1 629 578
R3		1.00	1 210 270
R4		2.00	329 975
R5		3.00	144 946
R6		5.00	52 110
D1	Ikkje-stasjonær simulering, DES	0.15	7 615 272
D2		0.20	3 244 485
D3		0.20	3 243 740
F1	Fylling av sandfang, RANS	0.80	577 898
F2		0.80 ^a	1 705 558
F3		0.80 ^b	2 926 534
S1	Sluttffylling av sandfang, RANS	0.80 ^c	1 063 424

^a Utan trykksjakt, forfining i botn.

^b Med trykksjakt, forfining mellom ADCP I-III.

^c Utan trykksjakt, forfining i tak.

5.2.1 Stasjonær simulering av stasjonær vassføring

For å samanlikne resultat frå modellane med DES, vert resultata frå prosjektoppgåva presentert og vurdert. Der vart det nytta ei stasjonær simulering med $k-\varepsilon$ og trimmer grid i ulike cellestorleikar slik som vist i tabell 5.1. Data er henta i frå prosjektoppgåva (Brevik 2012).

5.2.2 Ikkje-stasjonær simulering av stasjonær vassføring

Undersøking av strøymingstilhøva under stasjonær vassføring vil kunne vise om programmet reknar rett, og for å kunne ta ut andre hastigheitsfordelingar frå simuleringane. Dette fordi farten rett oppstrøms varegrinda og over terskel er avgjerande med tanke på å vurdere eventuell sedimenttransport til turbinen. Dei viktigaste parametrane for desse modellane er vist i tabell 5.2. Det er gått ut i frå at vatnet er 5°C.

Tabell 5.2: Oversikt over parametrar for DES-modellane.

Namn	Trykk [MPa]	Fart [m/s]	Ruheit [m]	Densitet [kg/m ³]	Dynamisk viskositet [Pa · s]
D1	0.4798	2.625	0.015	1000	1.51E-03
D2	0.4798	2.625	0.015	1000	1.51E-03
D3	0.6000	2.857	0.015	1000	1.51E-03

Grensevilkår

For modellane D1-D3 vart desse grensevilkåra nytta:

- **Innløp:** «*Velocity inlet*» med litt ulik fart slik som vist i tabell 5.2. Verdiane kjem i frå felldata.
- **Luftesjakt:** Sidan dette området er av mindre interesse for denne type simulering, vart det fjerna ned til overkant av tak slik som vist i figur 5.2.
- **Vegg:** Vegg med ruheitshøgde 0.015 m i frå prosjektoppgåva (Brevik 2012). Denne ruheita er rekna ut frå standardavviket.
- **Utløp:** «*Pressure Outlet*» med to variantar av trykk slik som vist i tabell 5.2. Dei same trykkverdiane vart også spesifisert under startverdiar for fysiske modellar. Verdiane kjem i frå felldata.

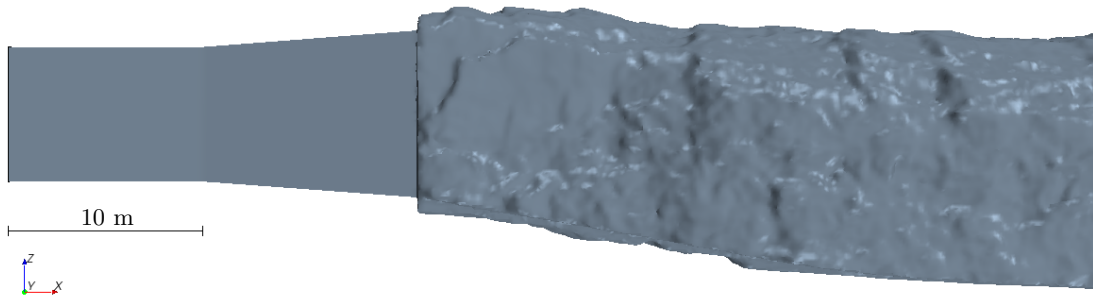
Delval

- Som nemnt i avsnitt 3.4.3, finnast det to variantar av DES. Det vart her valt «*Spalart-Allmaras Detached Eddy*» fordi dette er varianten med DDES.

- Slik som omtala i avsnitt 3.4.2 og 3.4.3 må DES ha SEM. Dette settast på under «*Physics Conditions*» for innløp, samt under startverdiar for fysiske modellar. Det vart valt «*Intensity + Length Scale*» for å enklare spesifisere SEM.

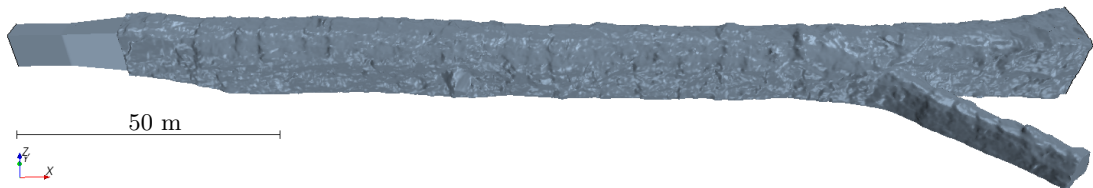
Geometri

For å oppnå eit reelt turbulensnivå med DES, vart modellen forlenga ved innløpet slik som omtala i avsnitt 3.4.2. Høgda ved luka er 7 m. Avstanden mellom nedstrøms side av luka og ADCP I er på 26.69 m. For å oppnå ein avstand som er minst fem gonger så lang som høgda, altså 35 m, vart innløpet forlenga med 10 m i negativ x-retning rekna frå oppstrøms side av luka. Dette er vist i figur 5.2.



Figur 5.2: Forlenga geometri ved innløpet for simulering med DES.

Sidan ein i desse tilfella berre er interessert i å sjå på strøymingstilhøva ved dei tre ADCP-ane og varegrinda, vart modellane D1-D3 kutta ved varegrinda. Heile geometrien for D1-D3 er vist i figur 5.3. Slik som omtala i avsnitt 3.4.3, vart modellane D1-D3 køyrt med isotrop cellestorleik for kvart forsøk.



Figur 5.3: Modellane med DES vart kutta ved varegrinda.

For at heile vassvolumet i modellen skal ha blitt påverka av turbulensen, vert resultat henta ut etter at heile vassvolumet skal ha blitt påverka av ny løysningsoppsett. Ved å anta ei gjennomsnittleg fart på 0.5 m/s og at DES-modellane er om lag 200 m lange, vart dei fyrste 400 s ikkje teke med.

5.2.3 Fylling av sandfang med fast lukehøgde

For fylling av sandfang med fast lukehøgde vart det sett på tre situasjonar:

1. Dei aller fyrste ~ 400 sekunda etter start av modellen.
2. Hovudtrends av oppfyllinga samanlikna med feltdata.
3. Sluttfylting av modellen.

Det vart laga fire modellar for dette tilfellet. Tre for fylling av sandfanget frå tom tilstand (F1-F3) og ein for å studere tilhøva ved slutten av fyllinga (S1). I sluttfasen av fyllinga er det interessant å sjå om det oppstår luftlommer oppunder taket og om dette vil endre på farten til vatnet. For desse modellane vart det nytta standardverdiar i frå STAR-CCM+, trykk på 0.60 MPa og ein ruheit på 0.015 m.

Grensevilkår

Det var vanskeleg å få desse simuleringane til å konvergera, men etter fleire justeringar vart desse grensevilkåra nytta for modellane F1-F3 og S1:

- **Innløp:** Det vart fyrst forsøkt med vanlege variantar som «*Velocity inlet*», «*Mass Flow Inlet*» og «*Pressure Outlet*», men alle divergerte. Årsaken viste seg å vere «*Supersonic Wave*». Altså at farten vart større enn lydfarten (~ 340 m/s). Med finare grid ville dette ført til sjokkbølgjer i modellen. I modellane for denne problemstillinga vart det nytta grid med for store celler til at dette vart simulert. Dermed stoppa utrekningane og programmet. Problemet vart løyst ved å bytte grensevilkåret for innløpet til «*Stagnation Inlet*» med totalt trykk på 0.60 MPa. Eit slikt innløp er velleigna for trykksett strøyming og nyttar eit imaginært kammer saman med Bernoulli, likning (3.22) (CD-adapco 2013).
- **Luftesjakt:** «*Pressure Outlet*» med volumfraksjon vatn/luft = 0/1 slik at berre luft kan passere.
- **Vegg:** Vegg med ruheitshøgde 0.015 m m i frå prosjektoppgåva (Brevik 2012).
- **Utløp:** Vegg på grunn av ein fyllingssituasjon. Dette tilsvarar lukka trykksjakt.

Delval

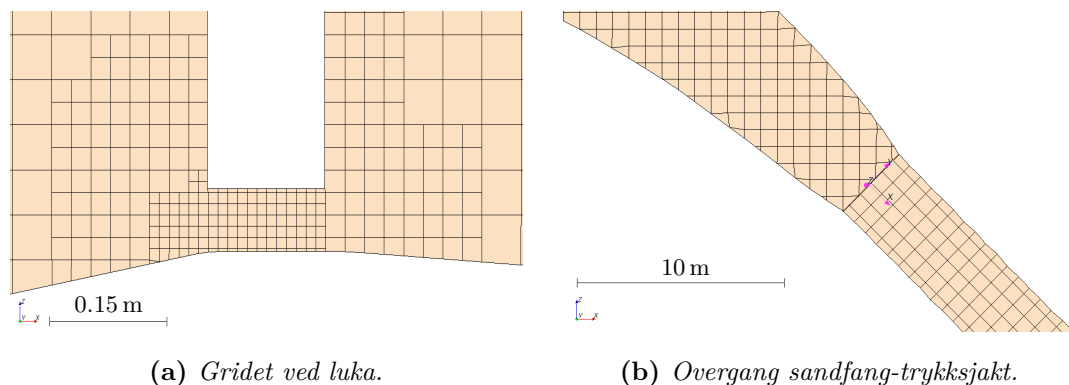
- For å finne vassflata, vart det nytta VOF. Som start vart det nytta ein funksjon («*Field Function*») som definerte at det skulle vere vassfylt på oppstrøms side av luka.
- Som turbulensmodell vart det valt ein vanleg $k-\varepsilon$ sidan $k-\omega$ er sensitiv for frispeilsstrøyming, jamfør avsnitt 3.4.1.

- Forfining av grid eit godt stykke utanfor områda det var forventta å oppstå endringar.
- Modellane nytta fyrste ordens diskretiseringsskjema, med unntak av F1 som nytta andre ordens diskretiseringsskjema. Jamfør avsnitt 3.6 om VOF.

Modellane vart satt i gang med små tidsskritt for stegvis å auke Courant-talet oppover mot $C \approx 1$ ved hjelp av Java-scriptet vist i vedlegg G.

Geometri

Fyllingsplottet vist i vedlegg B er henta frå ein fyllingssituasjon der det var uvisst kor høgt opp luka vart heva, men at høgda mest sannsynleg låg i mellom 0.05-0.10 m. Ved å prøve ulike høgder, og samanlikne i mot fyllingsplottet, vart det funne at luka vart heva opp til 0.07 m. For å modellere dette, vart det nytta ei fast lukehøgde på 0.07 m med lokal forfining av gridet under luka. Dette fordi det må minimum vere fire celler i høgda i smale parti. Lukeopninga er vist i figur 5.4a.



Figur 5.4: Detaljar av gridet ved luka og trykksjakta.

For å simulere ein fyllingssituasjon, må også trykksjakta vere inkludert. Figur av heile modellen er vist i vedlegg A. Forbetring av strøymingstilhøva i trykksjakta vart gjort ved lokalt å rotere gridet. Roteringsvinkelen vart gjort ved å definere eit lokalt koordinatsystem i retning med trykksjakta (vist i figur 5.4b). Trykksjakta vart definert som ein eigen region med samankopling («*interface*») til regionen for sandfanget. Dette for å tillate strøyming gjennom samankoplinga av typen «*In-place*». Detalj av overgangen er vist i figur 5.4b. Grunnen til at dette vart gjort, var for å minimere graden av falsk diffusjon slik som omtala i avsnitt 3.8.

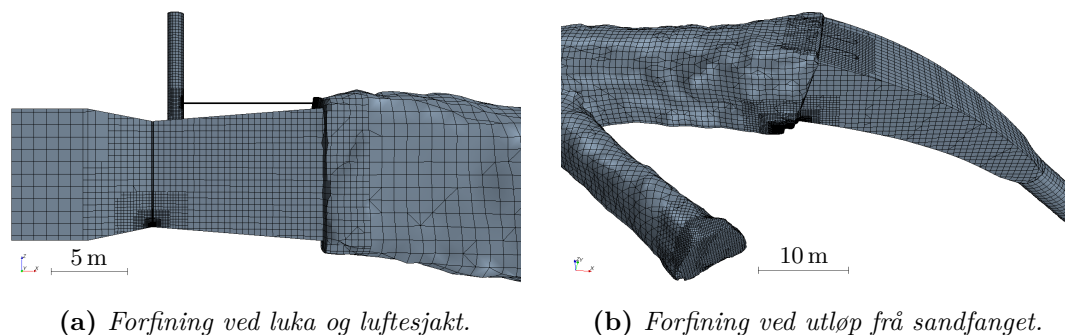
For å oppnå betre strøymingstilhøve mot luka, vart geometrien forlenga i negativ x-retning frå luka. Dette er vist til venstre i figur 5.5a.

I modellane F1-F3 og S1 var forfiningane av luftesjakta og luka lik. I den vertikale delen av luftesjakta var ein cellestorleik på 0.2 m nok til å få fram den sirkulære forma, medan

5.2. Aktuelle problemstillinger

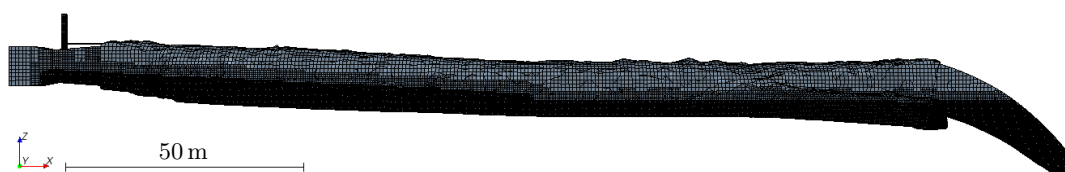
det i den horisontale delen måtte vere minst 0.025 m. For å sikre minst fire celler under luka, vart cellestorleiken der sett til 0.02 m.

Modell F1 hadde generelt 0.8 m celler i tillegg til dei nemnte lokale forfiningane ved luftesjakt og luke. Denne modellen hadde også lokale forfiningar ved tilkomsttunnel, terskel og varegrind. Dette er vist i figur 5.5. Forfiningane vart gjort for å sikre små nok celler i viktige overgangar i modellen.



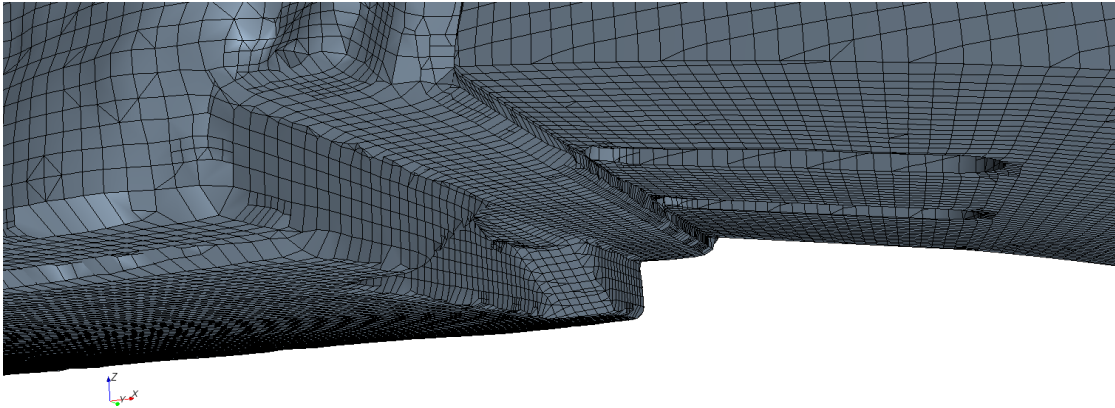
Figur 5.5: Detaljar av forfining av gridet for modell F1.

Modell F2 bygde på den fyrste modellen ved å ha forfining langs heile botn med cellestorleik 0.2 m, samt to prismelag. Dette er vist i figur 5.6. I figur 5.7 er det vist detalj av forfininga ved terskel/varegrind. For denne modellen vart hovuddelen av trykksjakt fjerna for å sjå kva for innverknad det hadde på oppfyllingsgraden.



Figur 5.6: Forfining langs botn med cellestorleik 0.2 m og to prismelag for modell F2.

Modell F3 hadde forfining av gridet i hovuddelen av sandfanget med cellestorleik 0.2 m og ellers lik som modell F1. Forfining av gridet er vist i figur 5.8. Forfininga vart gjort for å sjå om cellestorleiken ville spele inn på resultatata undervegs i oppfyllinga.



Figur 5.7: Detalj av forfining langs botn med celledimensjon 0.2 m og to prismelag ved terskel/varegrinda for modell F2.

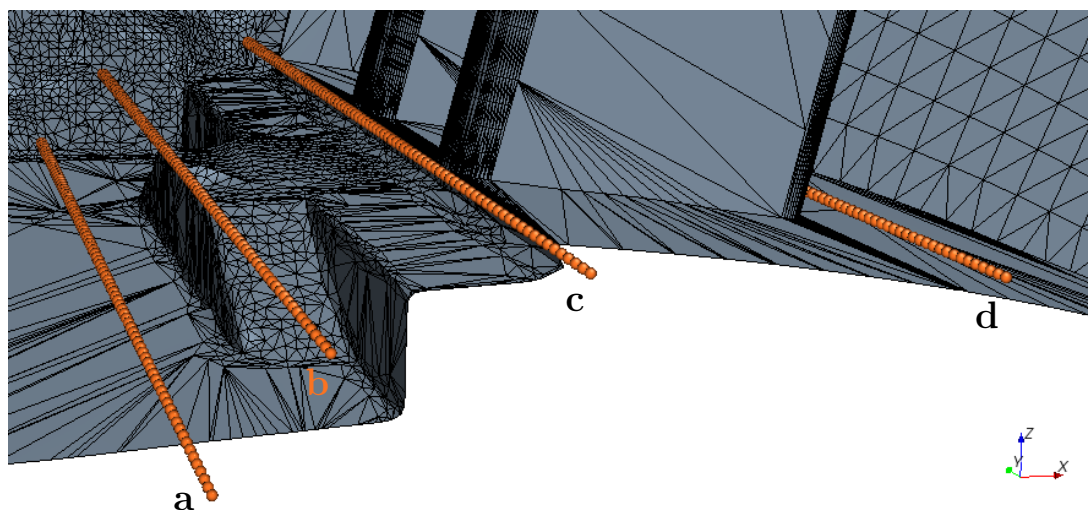


Figur 5.8: Forfining av grid for hovuddelen av sandfanget i modell F3 med 0.2 m.

I modellane vart det trekt ut hastigheitsprofil langs målelinjer nær terskelen. Plasseringa til desse er vist i figur 5.9. Tabell 5.3 viser mellom anna tverrsnittsareal og lengde av målelinjene a-d. Mykje mindre tverrsnittsareal for linje d skuldast varegrinda.

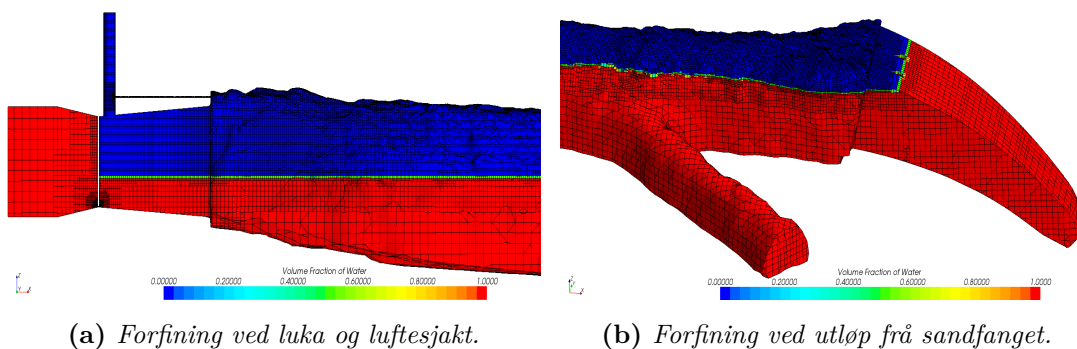
Tabell 5.3: Parametrar for målelinjene a, b, c og d.

Målelinje	Tverrsnitt [m ²]	Lengde [m]	dz [m]	Avstand frå luke [m]
a	167.90	14.50	0.30	186.41
b	164.65	14.10	1.50	187.41
c	154.60	14.17	0.60	189.91
d	100.50	11.54	0.25	195.86



Figur 5.9: Målelinjene for fart ved terskel for modellane med fylling.

I modell S1 for slutfylling var gridet i hovudsak opp-ned i høve til modell F2. S1 hadde forfining i topp av sandfanget med cellestorleik 0.2 m, samt to prismelag. For å redusere simuleringstida for fylling av sandfang og trykksjakt, vart denne modellen laga som ein overlapp i frå modellane F1-F3. Ytterlegare redusering av simuleringstida for modell S1 vart gjort ved at hovuddelen av trykksjakta vart fjerna og det vart satt på vatn til 2.3 m over botn ved luka. Dette er vist i figur 5.10.



(a) Forfining ved luka og luftesjakt.

(b) Forfining ved utløp frå sandfanget.

Figur 5.10: Detaljar av forfining av gridet saman med starthøgda for slutfyllinga av sandfanget for modell S1.

Vasstandsmåling

Vasstandsmåling i tilkomsttunnelen vart gjort ved fyrst å lage ei vertikal målelinje frå golv til tak (figur 5.11) med $n + 1 = 1001$ punkter.



Figur 5.11: Vasstandsmålinga vart gjort ved hjelp av den mørke vertikale linja midt i biletet.

Så vart det laga ein funksjon («*Field Function*») med VOF av vatn multiplisert med resultatet av likning (5.1):

$$dz = \frac{z_1 - z_0}{n} = \frac{45.61 \text{ m} - 39.79 \text{ m}}{1000} = 0.00582 \text{ m} \quad (5.1)$$

dz	–	Høgdedifferanse per punkt [m]
z_1	–	Høgde ved tak [m]
z_0	–	Høgde ved golv [m]
n	–	Antall punkter på linja, her 1000

Ein rapport med summen av funksjonen over linja i figur 5.11 vil då måle høgda til vatnet. Ved å lage monitor og plott frå rapporten, vil ein kunne lagre endringa av vasstanden i programmet for kvart tidsskritt. STAR-CCM+ lagrar maksimalt 5000 verdiar for denne typen plott. Om dette vert overstige, vil programmet fordele verdiane slik at nye verdiar likevel kjem med. Dette fører til ei lita utglattung av dei målte verdiane. Vasstandsmåling vart også gjort i luftesjakt. For modell S1 vart det i tillegg også målt vasstanden i midten av sandfanget.

5.2.4 Ikkje-stasjonær simulering av lukeheving

Heving av luke ved hjelp av Java-script

Det vart gjort forsøk på å simulere lukeheving. Fyrst vart det testa med Java-script via opptaksfunksjonen i STAR-CCM+ ved å gå eit tidsskritt, manuelt heve luka og så generere nytt grid. Java-fila kunne då modifierast til å utføre heving i den farten ein vil. Sidan sandfanget er ein stor modell (om lag 44000 m³ for heile modellen), var ulempa med denne metoda at det tok urimeleg lang tid å generere nytt grid etter kvar gong luka vart heva. Denne framgangsmåten vart difor ikkje teken med.

Neste versjon av STAR-CCM+ vil mogleggjere generering av nytt grid på supercomputer. Då vil dette vere ei meir aktuell løysingsmetode.

Sett i ettertid kunne ein fyrst ha laga ein forkorta modell, til dømes berre mellom luka og ADCP I, og utført hevinga i fastsett fart. Ved å lage ein stor blokk, og nytte den saman med operasjonen for å subtrahere bort alt som er nedstrøms ADCP I, står ein att med berre den delen nærast luka. Etter at hevinga er utført, kan ein så fjerne blokka slik at heile modellen igjen er til stades. Løysinga i frå lukehevinga vil då vere med, og ein kan så fortsette simuleringa med fast lukehøgde for heile modellen. Ulempa med dette er at ein ikkje har noko trykkplott å samanlikne i mot.

Heving av luke ved hjelp av overlappende grid

Eit anna forsøk for å få til dynamisk lukeheving var ved hjelp av overlappende grid, slik som omtala i avsnitt 4.4. Ved å bruke eit slikt grid, treng ein ikkje generere nytt grid sjølv om delar av modellen flyttar seg. Ei ulempe ved å nytte denne metoda er at modellen då ikkje skalerer seg korrekt til parallellprosessering (Peric 2013).

Ei anna ulempe med overlappende grid er at det på noverande tidspunkt er svært vanskeleg å lage ein slik modell. Dette fordi overlappende grid krev fleire enkeltlag som må passe nøyaktig saman. Til slutt vart heller ikkje denne metoda tatt med fordi geometrien er svært stor, og så mange og små celler vart for tidkrevjande å arbeide med. Metoda er heilt ny, og ein manglar difor også rettleiing ved bruk.

5.3 Val av grid og fysiske modellar

5.3.1 Grid

Val av type grid vil ha avgjerande påverknad på resultatata frå modellforsøka. Ikkje minst vil falsk diffusjon og cellestorleik vere viktig.

Det vart nytta «*Surface Remesher*» for overflategridet. Dette for å betre kvaliteten på den eksisterande overflata, slik som omtala i avsnitt 4.1.

Ut i frå avsnitt 4.2 vart det fastsett at alle modellane i tabell 5.1 skulle ha trimmer grid som volumgrid. Dette fordi denne typen grid har vist seg å vere mest numerisk stabil (Vingerhagen & B. Olsen 2012).

5.3.2 Fysiske modellar

Modellane D1-D4 vart køyrt med DES av typen «*Spalart-Allmaras Detached Eddy*». Dei nytta y^+ for handsaming av alle veggar, altså som eit logaritmisk profil (CD-adapco 2013). Densiteten vart sett som konstante verdiar, og det vart nytta separert strøyming («*Segregated Flow*») med diskretisering etter ei blanding av andre ordens oppstrøms skjema og sentralskjema.

Modellane F1-F3 og S1 vart simulert med RANS og standard turbulensmodell «*Realizable $k-\varepsilon$ Two-Layer*». Dei nytta to lags y^+ handsaming. For å modellere interaksjon mellom vatn og luft, vart det nytta multifase med VOF og separert strøyming.

Alle simuleringane nytta implisitt ikkje-stasjonær som tidsmodell.

Kapittel 6

Verifisering

6.1 Feltmåling av stasjonær vassføring

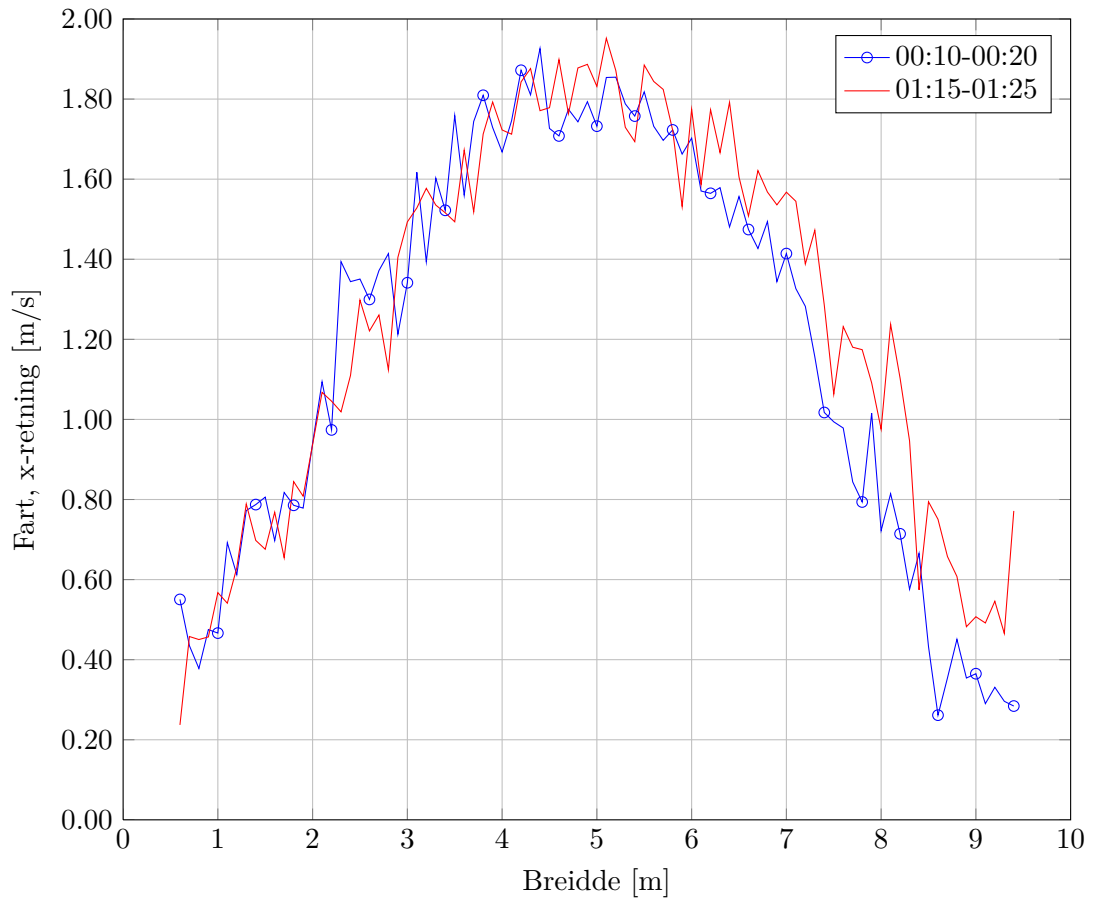
«Acoustic Doppler Current Profiler»

(ADCP) nyttar Doppler-effekten for å måle farten til vatnet ved å registrere skifte i frekvens for høge lydfrekvensar. Ekkoet frå vatnet som fer forbi vert målt via refleksjon frå suspenderte partiklar (Killingtveit & Sælthun 1995). Montering av ADCP-ane i sandfanget er vist i figur 6.1. I dei tre ADCP-ane vist i figur 1.5, er dei originale trykksensorane bytta ut til sensorar som toler eit trykk på 100 mVS.

Utgangspunktet for uttak av data frå stasjonær vassføring er vist i vedlegg C. Plott av feltdata for ADCP II og III er vist i vedlegg C.1 og C.2 for to stasjonære situasjonar kl. 00:10-00:20 og kl. 01:15-01:25. Feltdata for ADCP I for dei same klokkesletta er vist i figur 6.2.



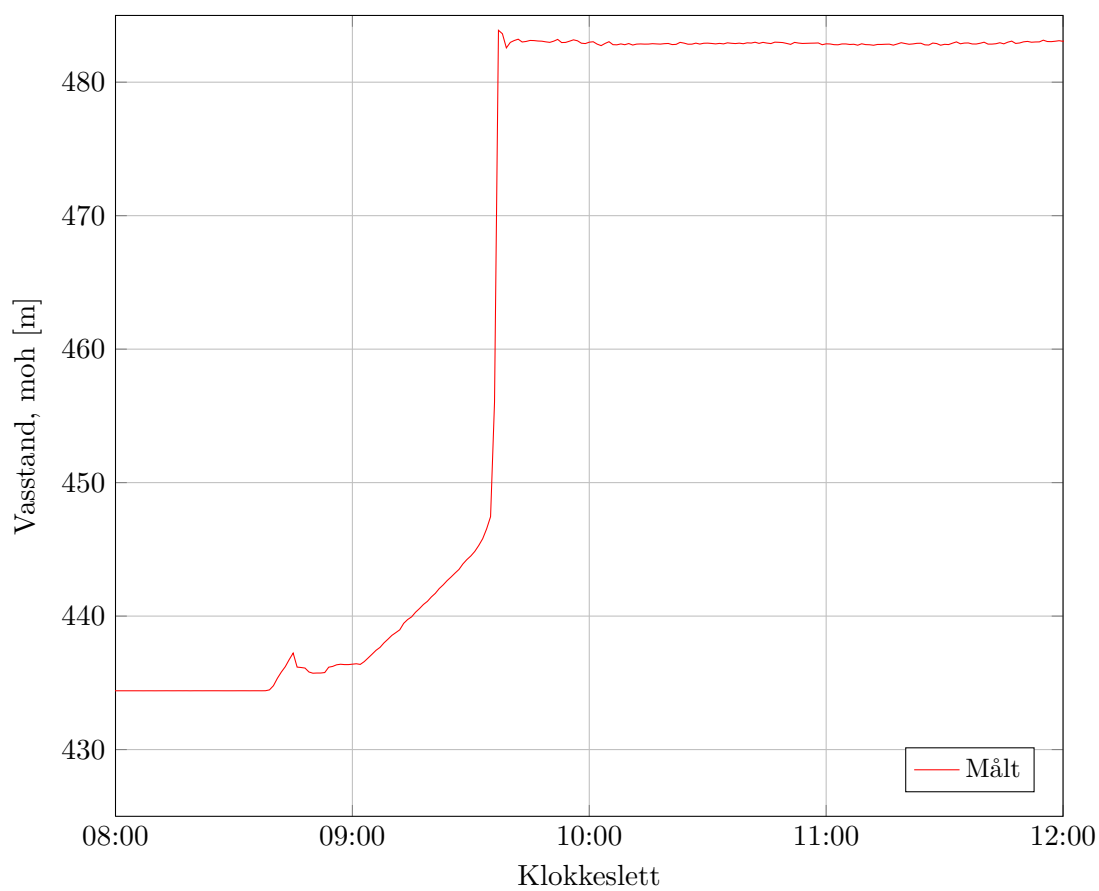
Figur 6.1: Montering av ADCP-ane.



Figur 6.2: Feltnmåling frå ADCP I i lengderetninga for ulike klokkeslett 16. februar 2012.

6.2 Feltmåling av ein fyllingssituasjon

I figur 6.3 er det vist målingar for vasstanden under fylling av sandfanget 27.01.2012. Målingane er i frå ei fylling etter at det var gjort vedlikehaldsarbeid. I vedlegg B er det vist meir detaljert.



Figur 6.3: Feltmåling frå oppfylling av sandfanget 27.01.2012.

Kapittel 7

Resultat

I dette kapitlet presenterast resultatata i frå dei ulike forsøka. For oversikt over namn og detaljar om modellane, visast det til tabell 5.1 på side 42.

For å samanlikne feltmålingane med simuleringane i modellane med full opning på luka, vart Pearsons korrelasjonskoeffisient nytta. Denne er vist i likning (7.1). Ein perfekt korrelasjon vil gje $\rho_{X,Y} = 1$.

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (7.1)$$

Samanlikning av resultat i frå fylling av sandfang vart gjort i mot feltdata i frå ein fyllingssituasjon 27.01.2012 (vist i figur 6.3 og vedlegg B). For enklare samanlikning med vasstandsmåling i tilkomsttunnelen (avsnitt 5.2.3), vart feltmålingane rekna om slik at 0 tilsvarar golvet ved tilkomsttunnelen/trykkcella frå figur 5.1.

Med unnatak av vasstandsmålingane, gav dei ulike målingane i modellane utskrift av enkeltfiler for spesifiserte tidsintervall. Handsaming av filene, samt generering av statistikk vart gjort ved hjelp av Matlab.

7.1 Stasjonær simulering av stasjonær vassføring med full opning på luka

7.1.1 Hastigheitsprofil

For å samanlikne resultat frå DES-simuleringane mot RANS, er resultatane frå prosjektoppgåva (Brevik 2012) tatt med. Der vart det nytta ei stasjonær simulering med trimmer grid og $k-\varepsilon$. Resultat av hastigheitsprofil for ADCP I-III er vist i vedlegg D.1, men også saman med DES-modellane i neste avsnitt.

Resultat av hastigheitsprofil frå prosjektoppgåva gav gode resultat i høve til feltnmålingar for ADCP II og III, men ikkje for ADCP I. Dette ser ein av dei høge verdiane av Pearsons korrelasjonskoeffisient i tabell 7.1. Ein ser at spesielt modell R4 og R5 er nær 1 for ADCP II og III.

Tabell 7.1: Pearsons korrelasjonskoeffisient for ulike cellestorleikar frå prosjektoppgåva. Trimmer grid med $k-\varepsilon$.

Trimmer, $k-\varepsilon$	ADCP I		ADCP II		ADCP III	
	00:10-00:20	01:15-01:25	00:10-00:20	01:15-01:25	00:10-00:20	01:15-01:25
R1	-0.475	-0.258	0.879	0.898	0.852	0.867
R2	-0.473	-0.258	0.711	0.739	-0.404	-0.722
R3	-0.053	-0.283	0.181	0.140	-0.145	0.674
R4	-0.354	-0.129	0.946	0.957	0.774	0.965
R5	-0.418	-0.196	0.922	0.936	0.894	0.893
R6	0.311	0.080	0.150	0.109	-0.153	0.672

7.1.2 Vasstrykk

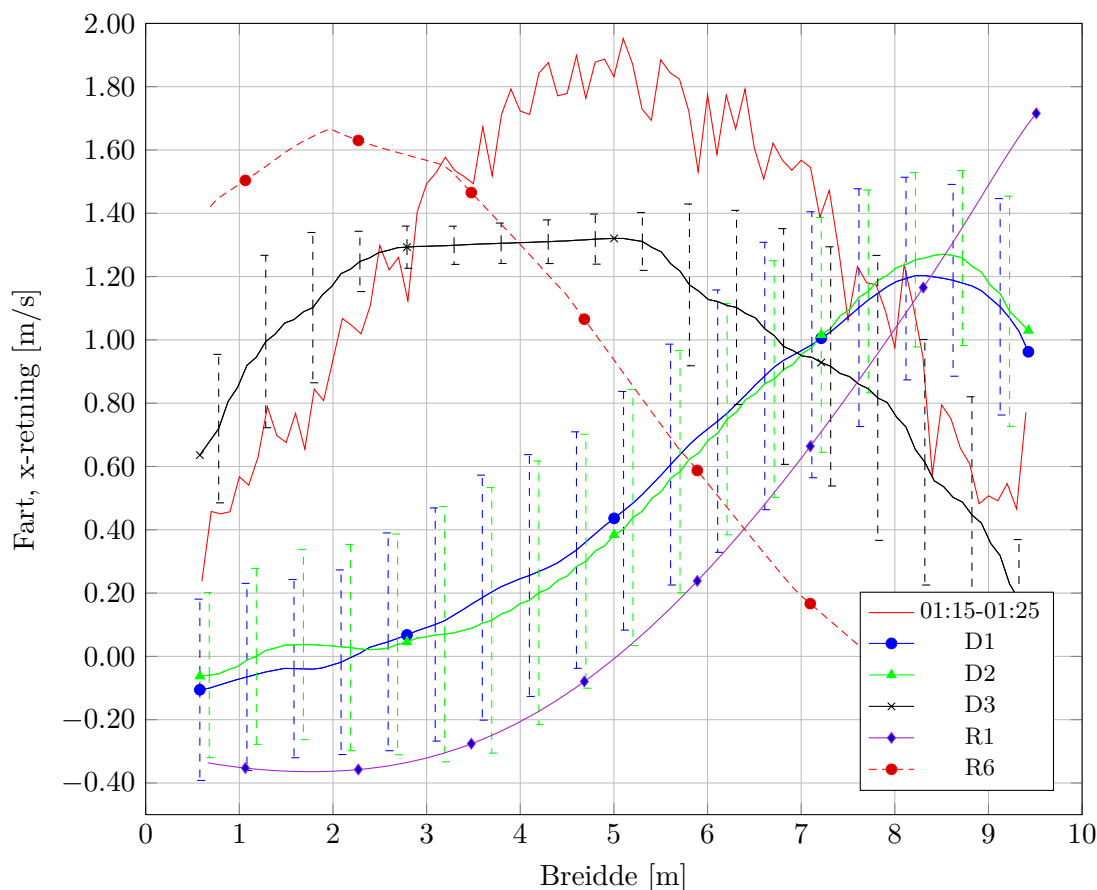
I vedlegg D.2 er det vist trykkvariasjonen langs ei linje midt i sandfanget i same høgde som ADCP II og III. Den gjennomsnittlege simulerte trykkvariasjonen mellom maksimalt og minimalt trykk er på 2829 Pa frå innløp til utløp.

7.2 Ikkje-stasjonær simulering av stasjonær vassføring med full opning på luka

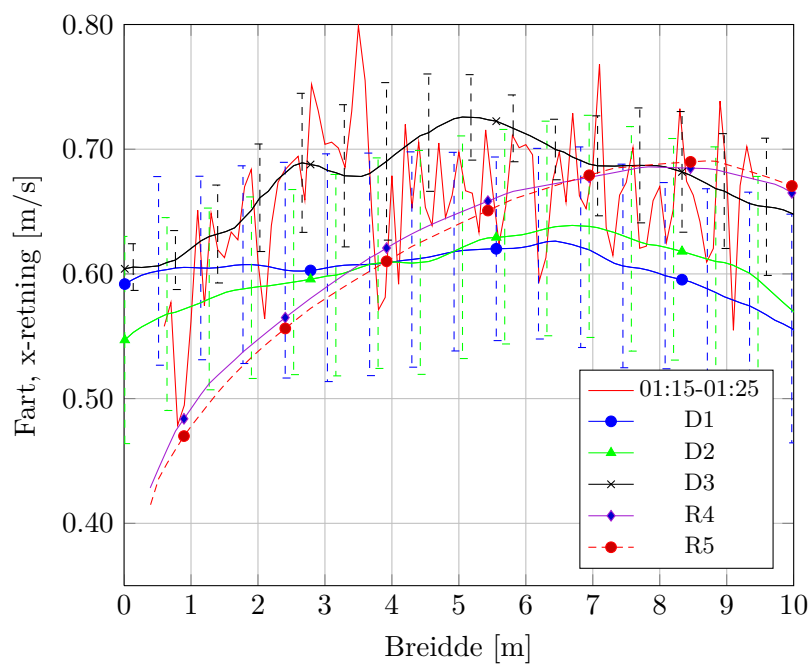
7.2.1 Hastigheitsprofil

I simuleringane som vart sendt inn til Vilje, var det fyrst problem med å skrive ut hastigheitsprofil. I staden for å skrive ut for kvart sekund, kom det filer rykkvis. Dette løyste seg ved å spesifisere at det i staden skulle skrivast ut for kvart 5.5 s. Kvar utskrift vart også forskuve med 0.5 s for å unngå opphopning ved at alle dei ulike plotta vart skrive samstundes.

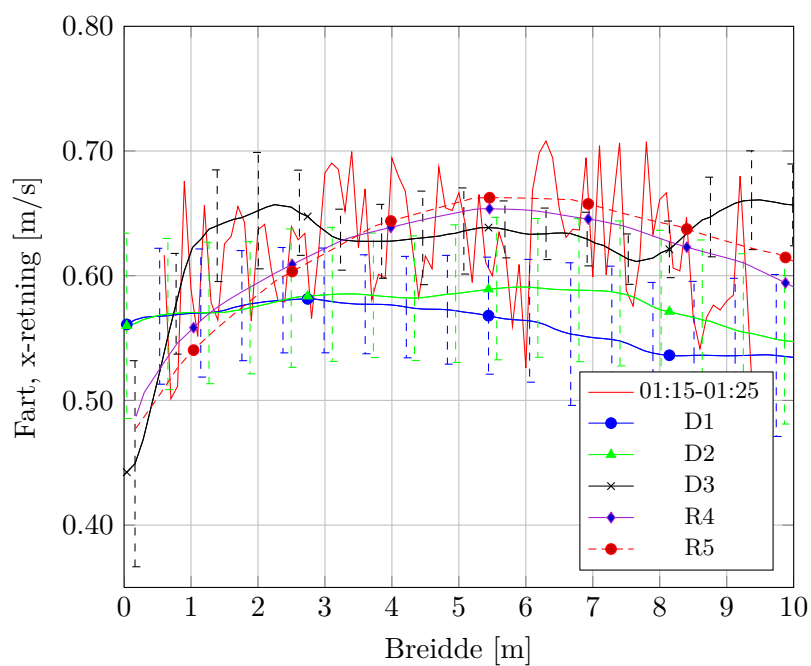
Verdiar vart henta ut etter at simuleringane hadde gått i 400 s (sjå side 44). Modellane D1 og D2 vart midla over 10 min frå data med 5.5 s intervall. Data i frå modell D3 vart skrive ut rykkvis i frå Vilje, og har dermed berre gyldige data for kvart sekund mellom 427-445 s og 933-934 s.



Figur 7.1: Simulert resultat i høve til feltmåling ved ADCP I i x-retning med full opning på luka for RANS og DES. Standardavvika gjeld for DES.



Figur 7.2: Simulert resultat i høve til feltmåling ved ADCP II i x -retning med full opning på luka for RANS og DES. Standardavvika gjeld for DES.



Figur 7.3: Simulert resultat i høve til feltmåling ved ADCP III i x -retning med full opning på luka for RANS og DES. Standardavvika gjeld for DES.

7.2. Ikkje-stasjonær simulering av stasjonær vassføring med full opning på luka

Figur 7.1-7.3 viser hastighetsprofil saman med standardavviket i frå simulering med DES. Der er også vist utvalte resultat i frå simuleringar med RANS. Maksimal og gjennomsnittleg fart er vist i tabell 7.2 saman med standardavviket. Samanlikning av farten inn i sandfanget frå tabell 5.2 mot gjennomsnittleg fart ved ADCP III, gjev ein reduksjon i underkant av 22% for alle modellane. Dette skuldast falltap og større tverrsnitt i nedre del av sandfanget.

Tabell 7.2: Verdiar for maksimal og gjennomsnittleg fart og standardavvik for modellane D1-D3 [m/s].

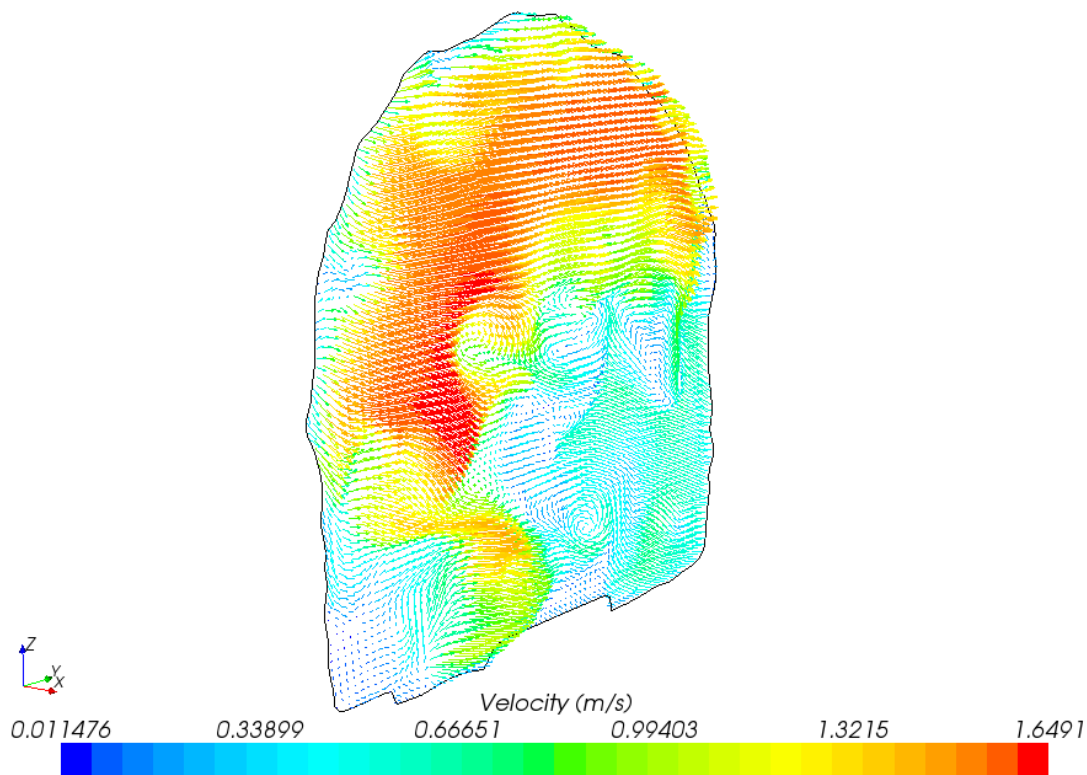
Trimmer, DES		ADCP I			ADCP II			ADCP III		
Namn	u_{max}	U	σ	u_{max}	U	σ	u_{max}	U	σ	
D1	1.82	0.52	0.356	0.89	0.60	0.083	0.72	0.56	0.053	
D2	1.72	0.51	0.351	0.92	0.60	0.084	0.82	0.57	0.059	
D3	1.52	1.02	0.220	0.80	0.67	0.042	0.74	0.62	0.035	

Tabell 7.3 viser korrelasjonen for hastighetsprofilane i frå modellane D1-D3 mot feltmålingane. Ein ser av tabellen og figur 7.1 at modell D3 treff best i høve til feltmålingane ved ADCP I. Grunnen til at D3 treff betre ved ADCP I enn D1 og D2 kan vere fordi den er midla over eit kortare tidsrom enn dei to andre, samt at målefrekvensen der var høgare. Samanlikna med resultatane i frå RANS er det framleis eit stykke att før strøymingstilhøva ved ADCP I er heilt replikert med DES. For simuleringar med DES, kan strøymingstilhøva ved ADCP I betrast ved å ta med endå meir av geometrien oppstrøms luka, slik som vist i figur 1.3. På denne måten får ein inkludert singulærtap i overgangane inn til sandfanget.

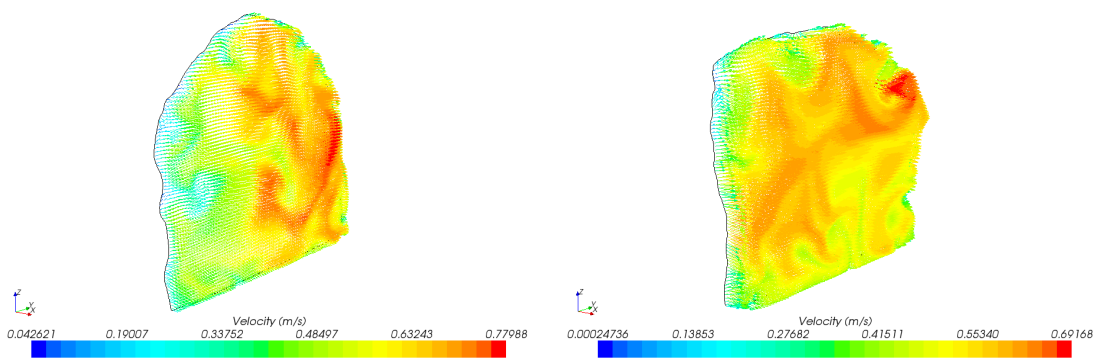
Tabell 7.3: Pearsons korrelasjonskoeffisient for modellane D1-D3.

Trimmer, DES		ADCP I		ADCP II		ADCP III	
Namn		00:10-00:20	01:15-01:25	00:10-00:20	01:15-01:25	00:10-00:20	01:15-01:25
D1		-0.209	0.026	0.514	0.482	-0.416	0.382
D2		-0.297	-0.067	0.940	0.936	0.291	0.901
D3		0.897	0.772	0.961	0.958	0.671	0.409

Av dei tre modellane er det D2 og D3 som treff best ved ADCP II og III. Dette ser ein av dei høge korrelasjonskoeffisientane i tabell 7.3 og figur 7.2-7.3. I høve til modellane med RANS, er resultatet i frå DES-modellane ved ADCP II og III jamngode. Dette kan vere fordi det er mindre turbulent strøyming i nedre del av sandfanget, noko som gjer det enklare for RANS-modellane å simulere strøyminga.



(a) Snitt ved ADCP I



(b) Snitt ved ADCP II

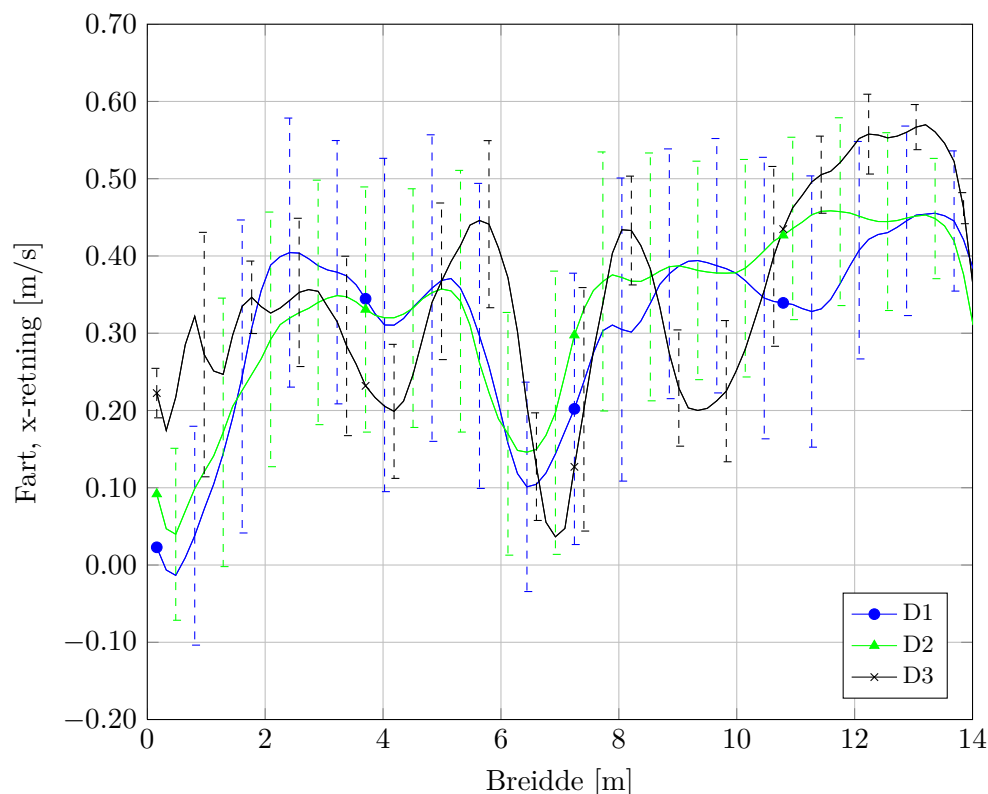
(c) Snitt ved ADCP III

Figur 7.4: Hastighetsvektorer i snitt ved ADCP I-III for trimmer grid med DES. Her vist for modell D1 etter 815 s. Sjå også figur 3.7b.

7.2. Ikkje-stasjonær simulering av stasjonær vassføring med full opning på luka

I figur 7.4 er det vist korleis turbulensen gjev varierende fart for ulike delar av tverrsnitta. Størst variasjon finn ein ved ADCP I. Ved ADCP II og III er farten mindre variert. Dette skuldast mindre turbulent strøyming i nedre del av sandfanget.

Simulert hastigheitsprofil ved varegrinda (tilsvarande målelinje c i figur 5.9, side 49) er vist i figur 7.5. Ein ser at hastigheitsprofilane til modellane D1-D3 er relativt homogene.



Figur 7.5: Simulert gjennomsnittleg fart i x-retning ved varegrinda for modellane D1-D3. Full opning på luka. Trimmer grid med DES.

For å vurdere eventuell sedimenttransport, vart det funne verdiar for maksimal fart i modellane. I tabell 7.4 er det vist maksimal og gjennomsnittleg fart, samt standardavvik for målelinje c ved varegrinda. Ut i frå kapittel 2 ser ein at farten ikkje vil medføre sedimenttransport ut over dimensjonerande storleik.

Tabell 7.4: Simulert resultat for maksimal og gjennomsnittleg fart, samt standardavvik for målelinje c ved varegrinda for modellane D1-D3.

Namn	u_{maks} [m/s]	U [m/s]	σ [m/s]
D1	0.70	0.31	0.163
D2	0.69	0.33	0.143
D3	0.66	0.34	0.085

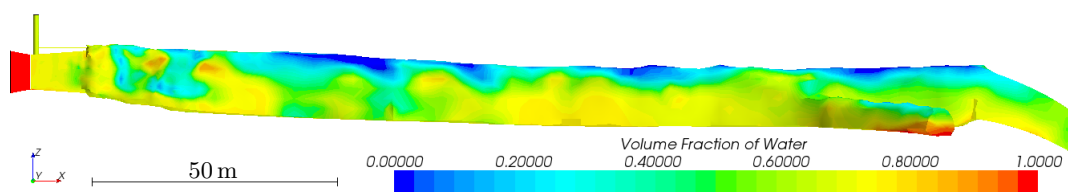
7.2.2 Vasstrykk

Simulert vasstrykk for modellane D1-D3 er vist i vedlegg E.1. Verdiane er målt langs ei linje midt i sandfanget i same høgde som ADCP II og III. For D1-D3 vart det målt at den gjennomsnittlege simulerte trykkvariasjonen mellom maksimalt og minimalt trykk var på 2677, 2764 og 3477 Pa. Dette samsvarar med resultatane i frå RANS-modellane R1-R6.

Innsatt i energilikninga (2.10) får ein at falltapet i sandfanget ligg på 6.25 m for alle modellane.

7.3 Ikkje-stasjonær simulering av ikkje-stasjonær strøyming med 0.07 m opning på luka

For denne problemstillinga var det startproblemer med simuleringa. Det vart fyrst nytta eit konstant og for stort tidsskritt. Dette gjorde at Courant-talet vart for stort og løysinga konvergente ikkje. Dette er vist i figur 7.6. Problemet vart løyst ved å ta i bruk Javascriptet vist i vedlegg G. Det gjorde at tidsskrittet auka gradvis mot eit Courant-tal lik 1 i hovuddelen av sandfanget.



Figur 7.6: Startproblem med for stort tidsskritt. Det oppstår for rask blanding fordi utrekninga «hopper» over celler.

7.3.1 Fylling av tomt sandfang

Fyllingsplott

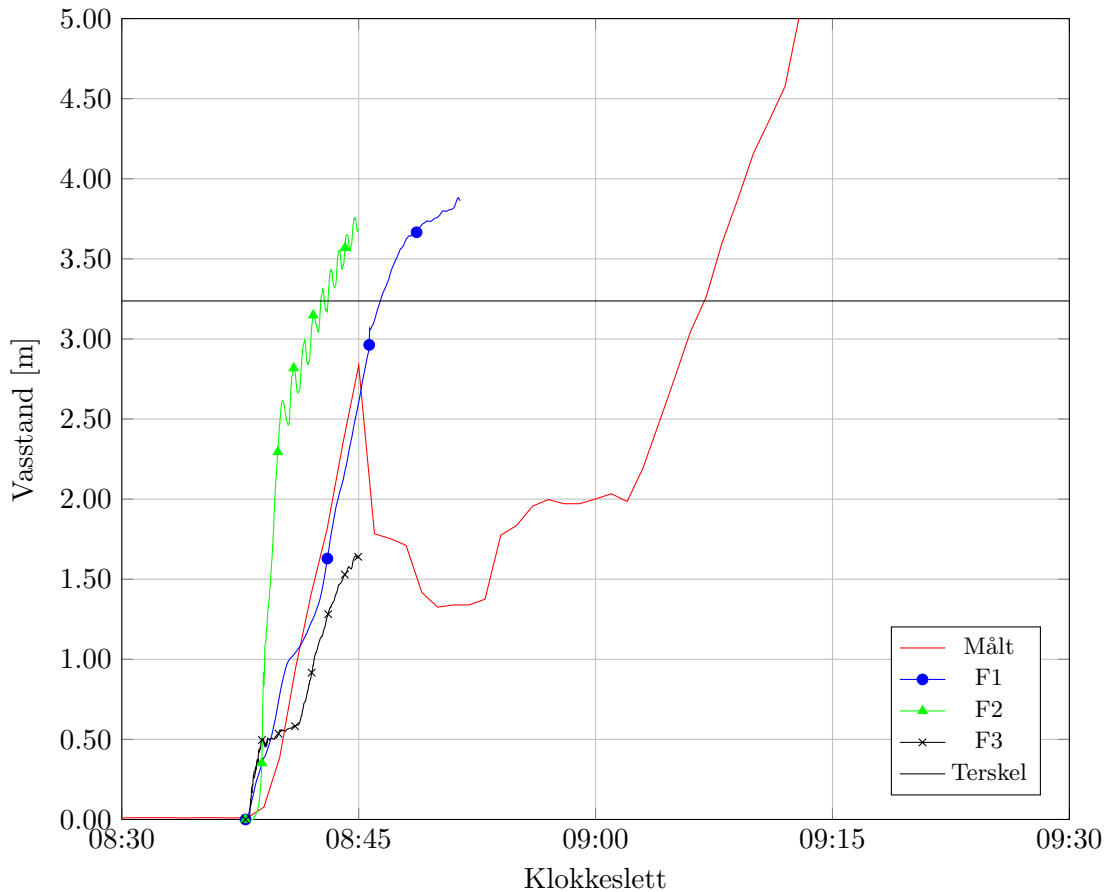
I figur 7.7 er x-aksen på simuleringa forskuve med 2270 s for å kunne samanliknast med feltdata. Toppunktet i feltmålingane skuldast at luka vart stengt kl. 08:45. Luka vart opna på nytt 3 s seinare. Dette er vist meir i detalj i vedlegg B. Målelinje og metode for registrering av simulert fylling i modellane F1-F3 er vist i figur 5.11, avsnitt 5.2.3.

Som ein ser av figur 7.7, fylgjer simuleringane hovudtrenden til feltmålingane. Resultat i frå modell F1 fylgjer feltmålingane best. Grunnen til dette kan vere at F1 var den einaste av modellane som hadde andre ordens diskretiseringsskjema. Det er mogleg dette vog opp for at modellen hadde grovare grid enn dei andre.

Med forfining langs botn, vist i figur 5.6, delvis utan trykksjakt og ellers ein lik modell som F1 - resulterte modell F2 i ei brattare fyllingskurve. Forfininga i modell F3 gav ikkje store utslag i høve til modell F1 på fyllingshastigheita, men er om lag 1.2 m unna den målte toppen.

I grafen for F3 ser ein ei utflating ved om lag 0.5 m før kurva igjen går oppover. Dette skuldast sannsynlegvis at gridet er såpass fint i denne modellen at det får med bølga som går oppstrøms rett etter at vatnet fyrste gong har treft terskelen. Modell F1 viser også denne tendensen, men i mindre grad grunna grovare grid.

F1 vart køyrt litt lenger for å sjå på utviklinga viss luka ikkje hadde blitt stengt. Ein ser av figur 7.7 at fyllinga flatar ut etter at vassflata har komme over nivået til terskelen. Vatnet fyller då opp trykksjakta.



Figur 7.7: Simulert resultat i høve til feltmåling for oppfylling av sandfanget 27.01.2012. Trimmer grid med $k-\varepsilon$.

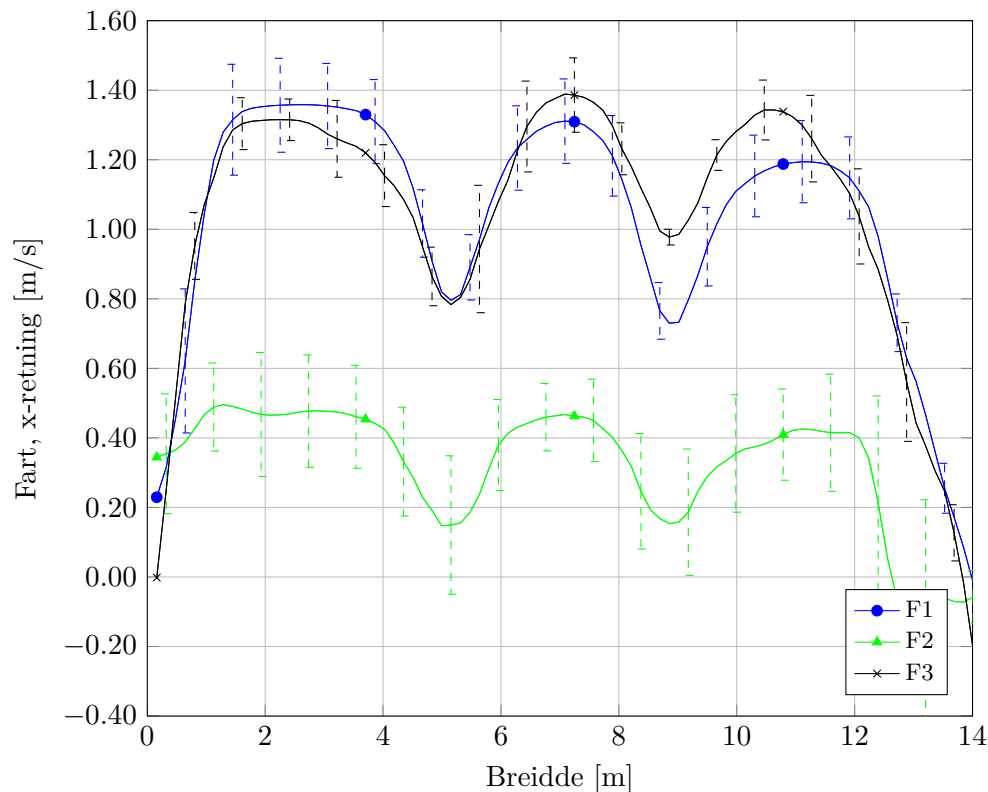
Hastigheitsprofil

I frå modellane for startfasen i ein fyllingssituasjon vart det henta ut hastigheitsprofil langs målelinjene vist i figur 5.9. Dette for å undersøke om farten til vatnet kunne vere stor nok til å gje sedimenttransport av eit visst omfang.

I figur 7.8 er det vist hastigheitsprofil for målelinje c. For at vatnet skal ha nådd fram til denne målelinja, er resultat henta ut etter at vatnet har komme dit. Data i frå fyllingsplottet i figur 7.7 viser når det skjer. Om ein ikkje filtrerer ut resultat før dette, vil verdiane gjelde for farten til lufta (sjå avsnitt 3.6).

7.3. Ikkje-stasjonær simulering av ikkje-stasjonær strøyming med 0.07 m opning på luka

Figur 7.8 viser at modell F2 nesten ikkje har komme opp til nivå med målelinje c. For dei andre modellane ser ein at farten er om lag lik.

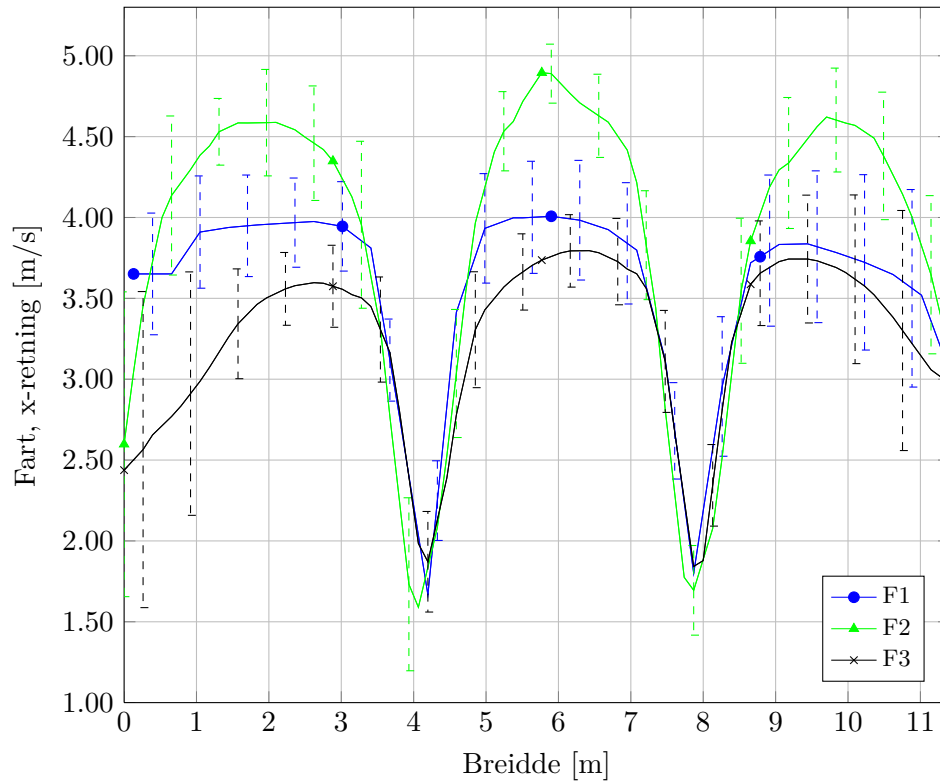


Figur 7.8: Simulert gjennomsnittleg fart i x-retning ved målelinje c for modellane F1-F3. 0.07 m opning på luka.

Maksimal fart er meir interessant i høve til sedimenttransport enn gjennomsnittet. Difor er desse verdiane vist i tabell 7.5. Med unntak av modell F2 er verdiane om lag like i dei ulike simuleringane.

Tabell 7.5: Simulert resultat for maksimal og gjennomsnittleg fart, samt standardavvik for målelinje c ved varegrinda for modellane F1-F3.

Namn	u_{max} [m/s]	U [m/s]	σ [m/s]
F1	1.80	1.03	0.119
F2	1.08	0.32	0.175
F3	1.56	1.05	0.099



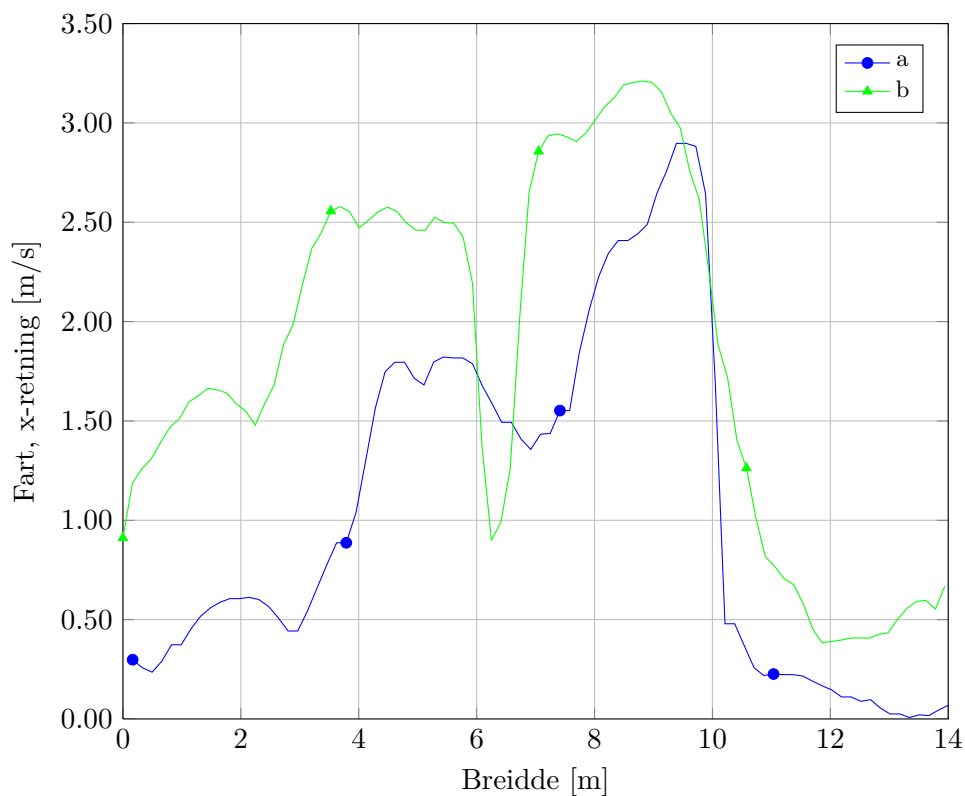
Figur 7.9: Simulert gjennomsnittleg fart i x -retning ved målelinje d for modellane F1-F3. 0.07 m åpning på luka.

Simulerte resultat i frå målelinje d er vist i figur 7.9 og tabell 7.6. Modellane samsvarar godt med kvarandre. Samanlikna med teori i frå kapittel 2, viser resultat i frå målelinje d at farten over terskelen har potensiale for å transportere store partiklar. Dette vil då seie at om partiklar fyrst kjem til terskelen, vert dei dratt med vatnet ned trykksjakta.

Tabell 7.6: Simulert resultat for maksimal og gjennomsnittleg fart, samt standardavvik for målelinje d ved varegrinda for modellane F1-F3.

Namn	u_{max} [m/s]	U [m/s]	σ [m/s]
F1	5.37	3.57	0.379
F2	5.39	3.88	0.366
F3	4.48	3.25	0.426

7.3. Ikkje-stasjonær simulering av ikkje-stasjonær strøyming med 0.07 m åpning på luka



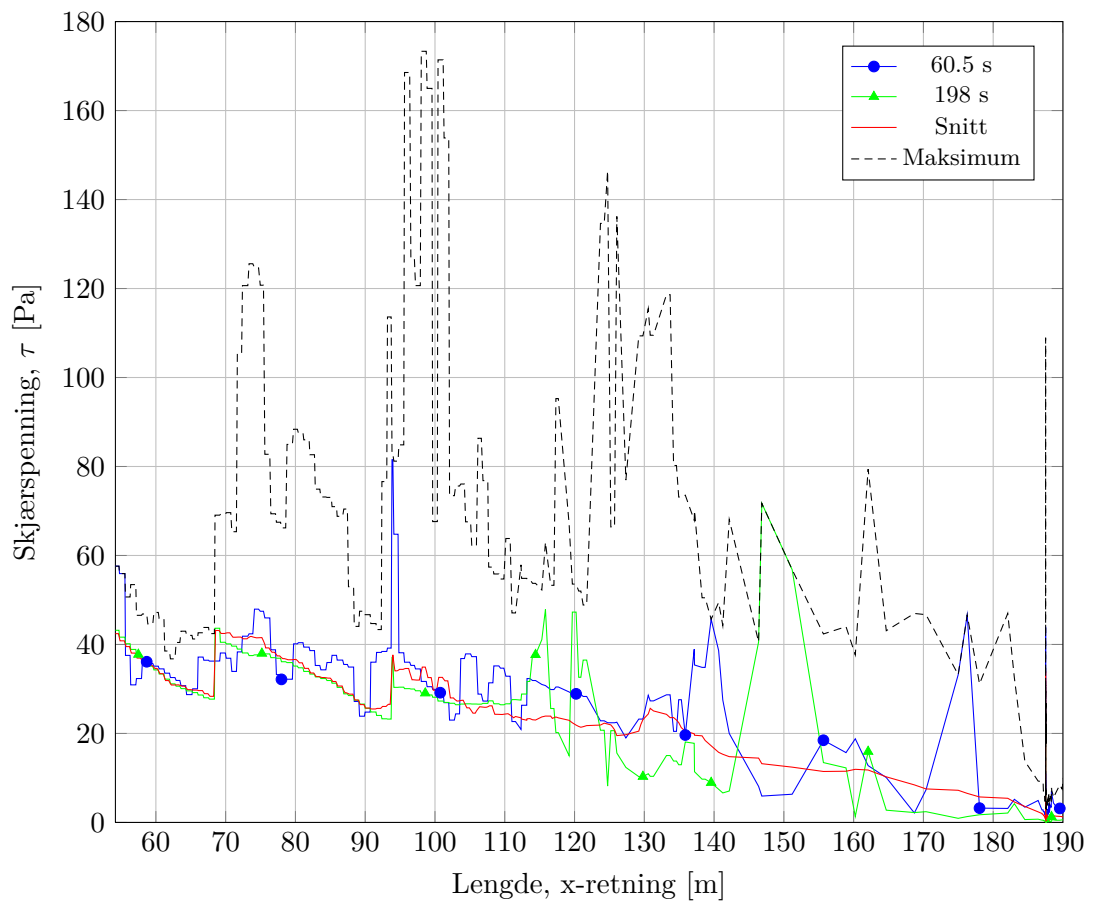
Figur 7.10: Simulert maksimal fart i x-retning ved målelinje a og b for modell F1.

I figur 7.10 og tabell 7.7 er det vist det maksimale hastighetsprofilen i frå modell F1 langs målelinjene a og b. Dette viser at farten til vatnet kan bli svært stor før terskelen.

Tabell 7.7: Simulert resultat for maksimalverdiar ved målelinjene a og b i modell F1.

Namn	u_{max} [m/s]	U_{max} [m/s]	σ [m/s]
a	2.90	1.03	0.384
b	3.21	1.81	0.503

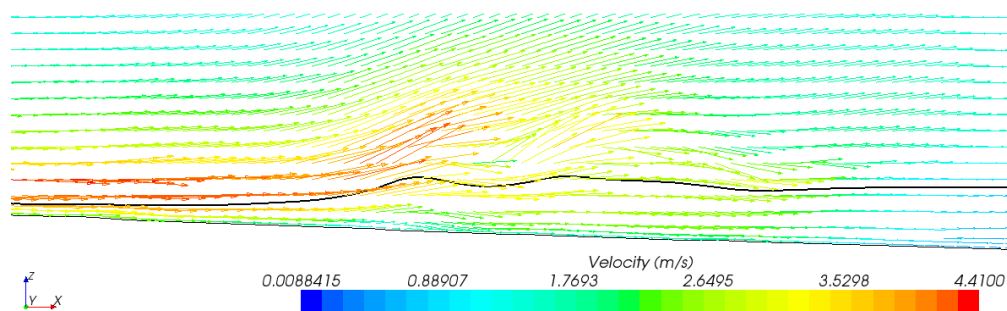
I figur 7.11 er det vist skjærspenninga langs botn av sandfanget for modell F1 ved to ulike tidspunkt. Det er også vist gjennomsnittleg og maksimal skjærspenning. Ein ser at den maksimale skjærspenninga er svært høg.



Figur 7.11: Skjærspenninga langs botn av sandfanget for modell F1.

Vasstandssprang/returbølgje

I den fyrste tida etter oppstart av ein fyllingssituasjon, oppstår det noko som kan minne om eit vasstandssprang i modellane. Tidsrommet varierer litt, men det startar etter om lag 20 s. Altså frå vatnet treff terskelen til situasjonen har stabilisert seg til ei jamn fylling. Dette er vist i figur 7.12 og 7.13.



Figur 7.12: Under startfasen av fylling av sandfanget oppstår det noko som kan minne om eit vasstandssprang. Her vist for modell F2. Den tjukke linja er vassflata, tilsvarende $VOF=0.5$

Samanlikning av figur 1.6b og figur 7.13b viser bølgja som sakte byggjer seg bakover i negativ x-retning i sandfanget. Det er då interessant å slå fast om det oppstår vasstandssprang i modellane, eller om det er snakk om returbølgje i frå vatnet som treff terskelen.

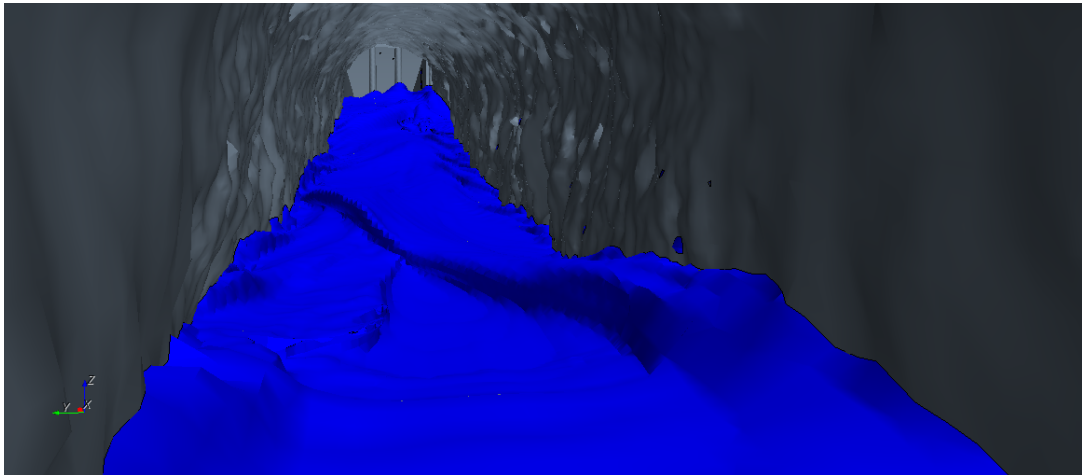
I frå avsnitt 2.2 har ein at vasstandssprang oppstår i overgangen mellom overkritisk ($Fr > 1$) og underkritisk strøyming ($Fr < 1$). Ved å måle høgdar og fart i frå dei ulike simuleringane, kan ein rekne ut Froude-talet slik som vist i likning (2.6). I tabell 7.8 er det henta ut slike verdiar. Det er forenkla ved at det er gått ut frå at tverrsnitta er om lag rektangulære i kvart snitt.

Tabell 7.8: Undersøking av strøyming i startfasen.

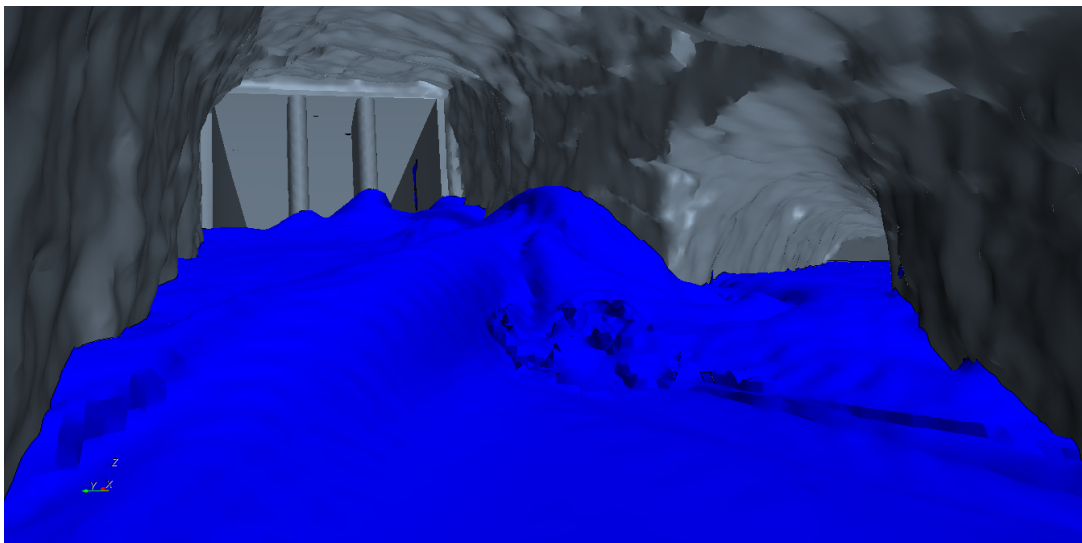
Namn	y_1 [m]	y_2 [m]	U_1 [m/s]	U_2 [m/s]	Fr_1 [-]	Fr_2 [-]
F1	0.29	1.25	0.27	0.43	0.16	0.12
F2	0.31	0.85	3.58	0.69	2.05	0.24
F3	1.22	3.39	10.23	2.84	2.96	0.49

Tabell 7.8 gjev ikkje heilt eintydig svar på om det oppstår eit vasstandssprang. Ein ser at for to av modellane, F2 og F3, går strøyminga frå overkritisk til underkritisk. Modell F1 har berre underkritisk strøyming. Grunnen til at F1 ikkje samsvarar med dei andre, kan vere på grunn av for grovt grid (sjå tabell 5.1).

Ut i frå fart, Froude-tal og høgda til vatnet er det mest sannsynleg eit vasstandssprang som vert simulert.



(a) Sett frå ADCP I.

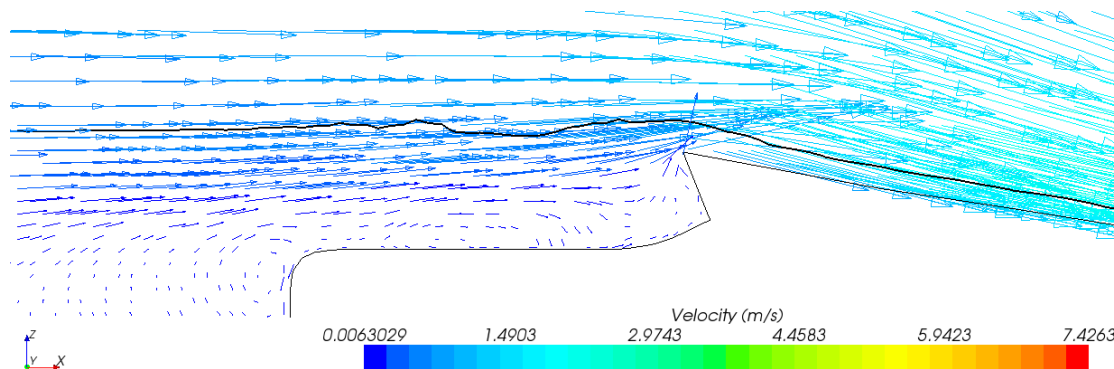


(b) Sett ved tilkomsttunnelen og varegrinda.

Figur 7.13: Under start av fylling av sandfanget oppstår det noko som kan minne om eit vasstandssprang.

Fylling av trykksjakt

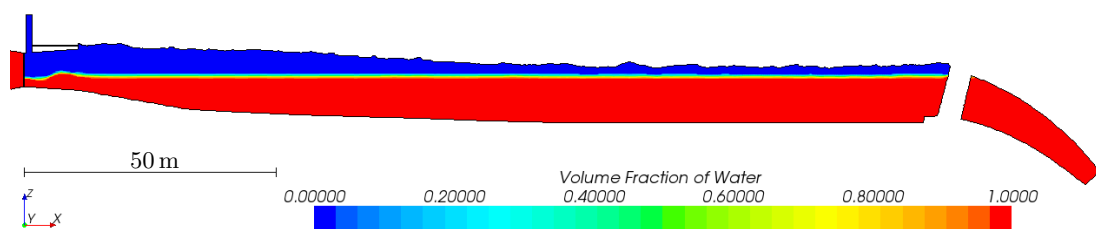
I figur 7.14 er det vist hastigheitsvektorar ved terskel/varegrinda for modell F1 i det vatnet har stige over dette nivået. F1 vart køyrt litt lenger for å sjå på utviklinga viss luka ikkje hadde blitt stengt. Ein ser at farten til vatnet er om lag 1.0 m/s.



Figur 7.14: Hastigheitsvektorar ved varegrinda for modell F1. Den tjukke linja er vassflata, tilsvarande $VOF=0.5$.

7.3.2 Slutfylling

Initiering av simuleringa av modell S1 danna fyrst ei bølge slik som vist i figur 7.15. Dette skuldast at vatnet fyrst står i ro inne i sandfanget i det simuleringa startar. For å unngå at simuleringa divergerer, vart den starta med Java-scriptet vist i vedlegg G. Ved å nytte fleire iterasjonar får STAR-CCM+ stabilisert tilhøva i sandfanget i mot vatnet som kjem gjennom luka med stor fart og trykk. Før tilhøva har stabilisert seg er farten gjennom luka 37 m/s. Etter stabilisering er farten jamt rundt 34 m/s under resten av simuleringa.

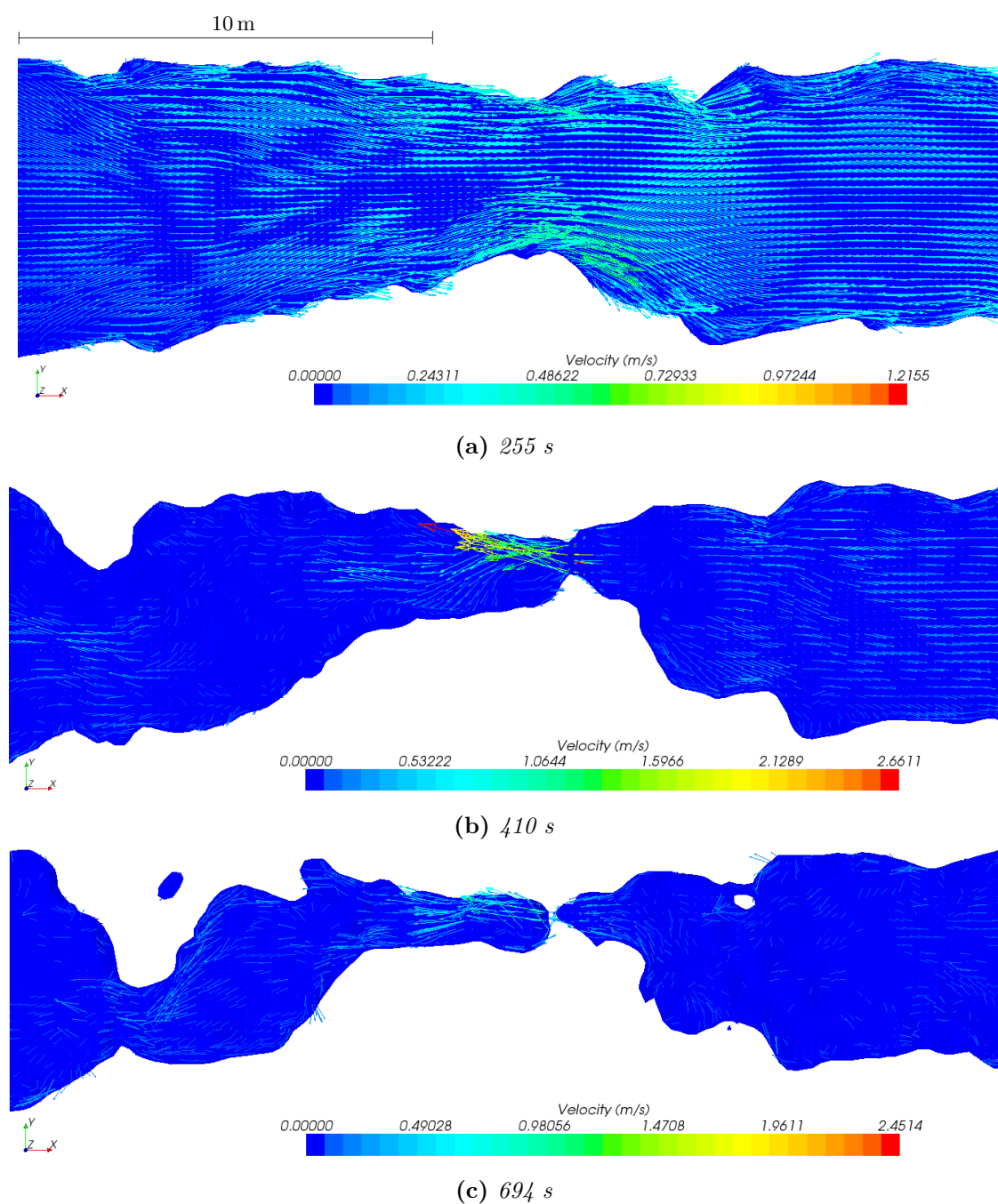


Figur 7.15: Oppstart av modell S1 gjev ei bølge før vassflata flatar ut og fyllinga skjer jamt. Her vist etter 1.5 s simulering.

Ved å lage ein figur som viser vassflata saman med hastigheitsvektorar, kan ein vurdere utviklinga av fart mot vasstand. I figur 7.16 er dette vist. Der tilsvarar dei blå flatene ein VOF-verdi på 0.5. Ein ser at etter kvart som vatnet stig vert overflatearealet mindre, og ein får lokal auke av farten i vassflata. Vidare ser ein ei blå «øy» til venstre i figur 7.16c. Dette viser at vatnet står oppunder taket i området rundt (kvitt), medan det i «øya» står ei luftlomme. På høgre side av figur 7.16c ser ein det motsette tilfellet. Der står vatnet opp til taket i den kvite «øya», medan det er vassflate og luft i området rundt (blått).

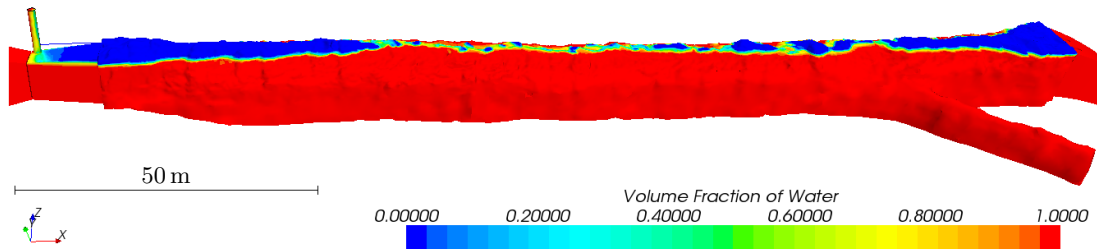
Vedlegg F viser i detalj plasseringa av vassflata saman med farten i vasskorpa for det siste tidsskrittet (694 s). Farten er målt i x-retning langs vassflata i lengderetninga, så ein negativ fart tyder då at vatnet går i mot hovudstraumen.

7.3. Ikkje-stasjonær simulering av ikkje-stasjonær strøyming med 0.07 m opning på luka



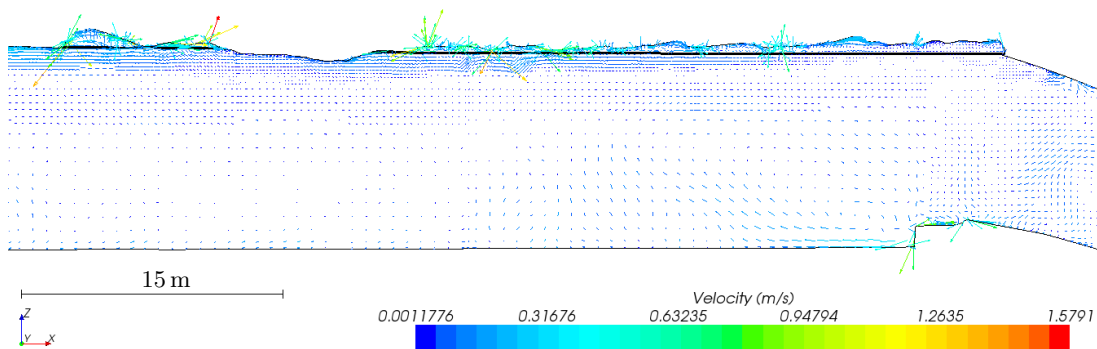
Figur 7.16: Utvikling av vassflata saman med hastigheitsvektorar for området der tilkomsttunnelen møter sandfanget. Når vatnet stig, fortregast lufta slik at flatene som her er vist vert mindre. Samstundes ser ein då at farten aukar lokalt i vassflata.

Det står att om lag 442 m^3 luft når luftesjakta har gått full og ein får utflating av oppfyllingskurva. Dette er vist i figur 7.17.



Figur 7.17: Når fyllingskurva flatar ut i luftesjakta, er det framleis att om lag 442 m^3 luft i sandfanget.

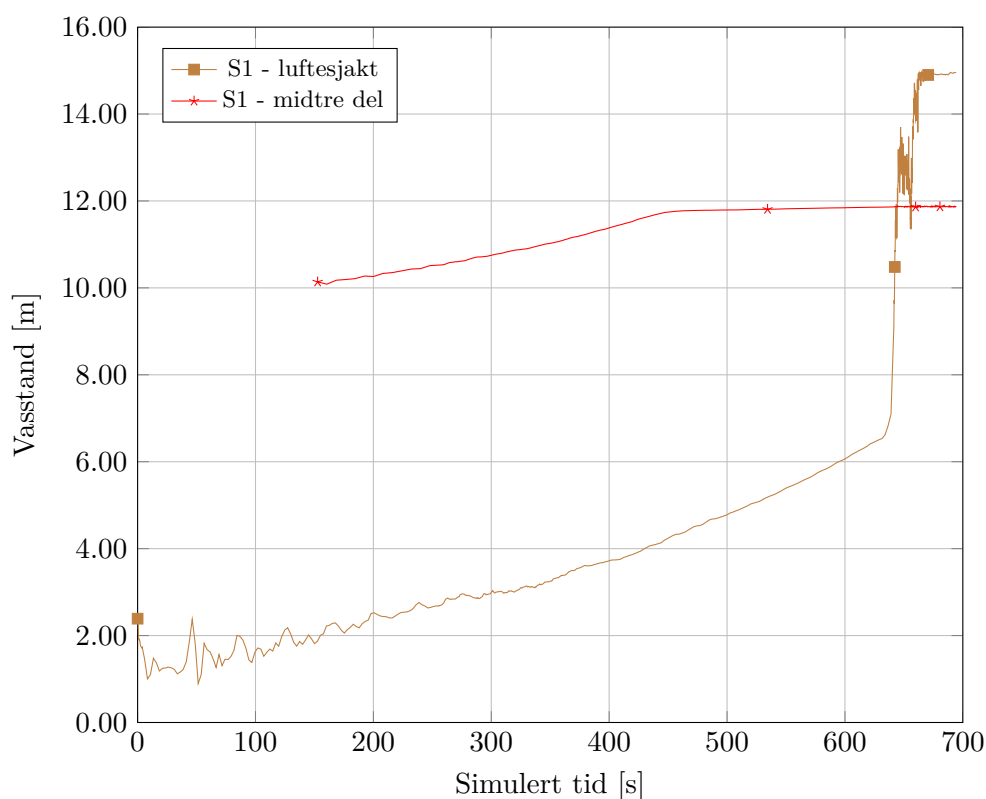
På botn av sandfanget er farten svært låg i det luftesjakta går full. Dette ser ein av figur 7.18. Samstundes ser ein av figur 7.16 og 7.18 at farten aukar oppunder taket fordi overflatearealet vert mindre. I tillegg vert luftvolumet mindre. Som vist i figur 7.17 held lufta ein passasje open for å redusere graden av komprimering.



Figur 7.18: Fart i sandfanget når luftesjakta går full. Den tjukke linja er vassflata, tilsvarande $VOF=0.5$.

Sluttfyllingsplott

Fylling av sandfanget målt i luftesjakta er vist i figur 7.19. Ein ser den karakteristiske knekken nede til høgre i grafen i det luftesjakta fyllast etter om lag 640 s. Figuren viser utflatinga av fyllingskurva i det luftesjakta går full etter om lag 665 s. I figur 7.19 er det også vist fyllingskurve for den midtre delen av sandfanget. Denne målinga vart starta litt lenger ut i simuleringa. Ein ser at fyllinga midt i sandfanget flatar ut etter om lag 600 s. Det er 40 s før luftesjakta fyllast. Dette viser at ein får ujamn fyllingsgrad i sandfanget.



Figur 7.19: Simulert resultat for vasstandsheving i luftesjakt og i den midtre delen. Målt relativt frå golv. Trimmer grid med $k-\varepsilon$.

For å kunne samanlikne resultat frå denne modellen med feltmålingar, vart starthøgda og -tida justert slik: Trykkcella i modellen er plassert i kote 42.085 m. Golvet under luftesjakta er på kote 49.13 m. Høgdedifferansen opp til golvnivået ved luftesjakta er då $49.13 \text{ m} - 42.085 \text{ m} = 7.045 \text{ m}$. Leser ut i frå grafen i figur 7.19 at ei utglatting gjev ei bølgeutslag på om lag 1.20 m ut i frå ei starthøgde på 2.39 m. Dette er vist i figur 7.15. Får då eit bølgeutslag frå topp på $2.39 \text{ m} - 1.20 \text{ m} = 1.19 \text{ m}$. Dette gjev ei starthøgde på $2.39 \text{ m} + (7.045 \text{ m} - 1.19 \text{ m}) = \underline{8.245 \text{ m}}$.

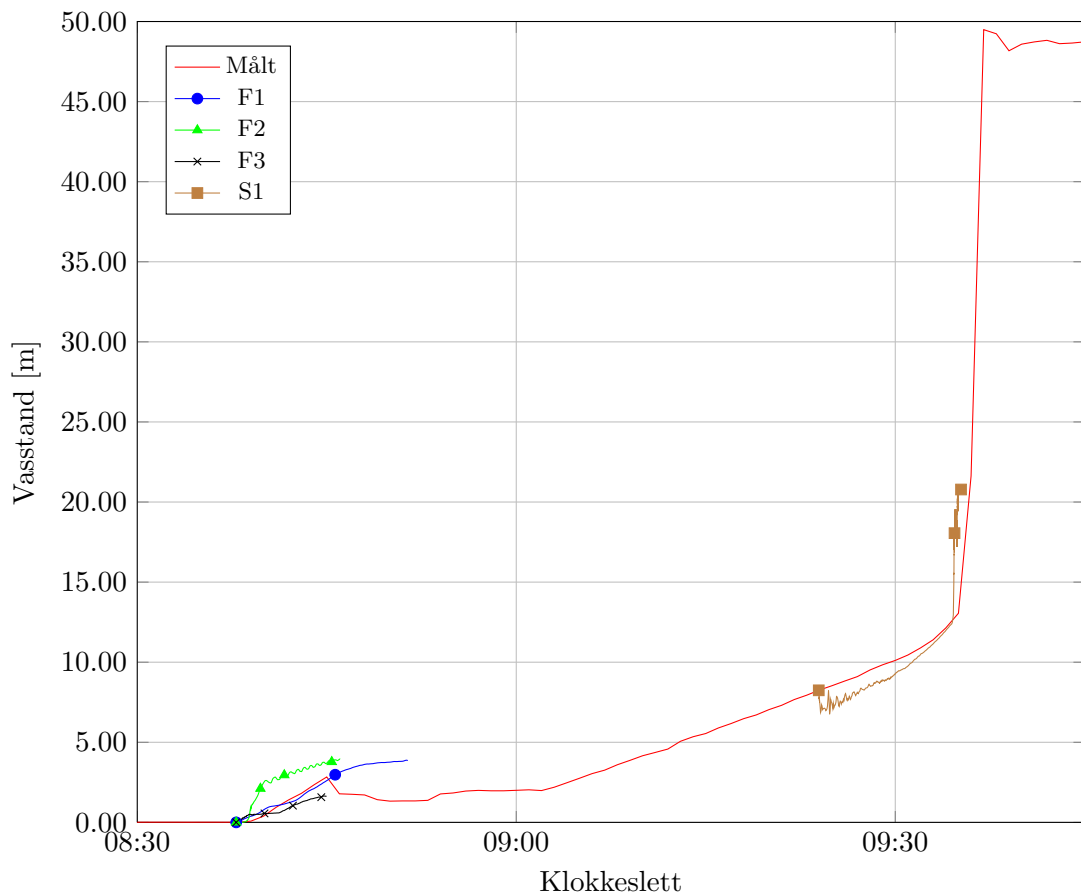
I feltmålingane tilsvarar dette ei tid på om lag

$$(8.245 \text{ m} - 7.94 \text{ m} + \frac{8.26 \text{ m} - 7.94 \text{ m}}{5040 \text{ s} - 4980 \text{ s}} \cdot 4980 \text{ s}) \cdot \frac{5040 \text{ s} - 4980 \text{ s}}{8.26 \text{ m} - 7.94 \text{ m}} = \underline{5037 \text{ s}}$$

Forskuing av grafen frå figur 7.19 med 8.245 m og 5037 s er vist i figur 7.20.

7.3.3 Fyllingsplott i frå alle modellane

I figur 7.20 er det vist resultatata frå både fylling av tomt sandfang og for sluttfyllinga saman med feltmålingane.



Figur 7.20: Simulert resultat i høve til feltmåling for oppfylling av sandfanget 27.01.2012. Trimmer grid med $k-\varepsilon$.

Ein ser at modellane samsvarar med feltmålingane. Ein ser at modell F1 og S1 har best treff. Utflating av kurva i frå modellen med sluttfylling (S1) skjer tidlegare enn for feltmålingane på grunn av kortare luftesjakt. Dette er betre vist i figur 7.19.

Kapittel 8

Potensiale for sedimenttransport basert på simulerte resultat

Som nemt i innleiinga, bør farten reduserast med 30-50 % i sandfang, slik at den ikkje overstig 0.6 m/s. Resultata vist i kapittel 7 vil her knyttast opp mot teori om sedimenttransport frå kapittel 2.

I frå resultata ser det ut til at STAR-CCM+ reknar om lag rett, men det er likevel viktig å påpeike at det er rom for feil.

8.1 Stasjonær vassføring

Både RANS og DES gjev gode resultat samanlikna med hastighetsprofilane ved ADCP II og ADCP III. Ved ADCP I treff modell R1-R6 og D1-D3 mindre godt, då med unnatak av modell D3. Grunnen til dette er mest sannsynleg at det vert initiert svært mykje turbulens i utvidinga av geometrien. Dette er vanskeleg å modellere rett.

Sidan modellane D1-D3 gjeld for ikkje-stasjonær tilstand, vart desse midla over ei viss tid for å kunne samanliknast med feltmålingane. Hastighetsprofil frå D1 og D2 vart midla over 10 min i frå data med 5.5 s oppløysing. Modell D3 vart simulert før D1 og D2, så det var då problemet med utskrift frå Vilje vart oppdaga. D3 vart midla i frå data frå kvart sekund mellom 427-445 s og 933-934 s. Som vist i tabell 7.2, er standardavviket mindre for modell D3 enn for D1 og D2. Dette viser at det er liten variasjon for tidsintervallet til D3. Vidare kan det tyde på at ein ikkje nødvendigvis må midle over det same tidsrommet som i frå feltmålingar. Problemet då er å veta om ein tek ut data i frå rett tidsrom. Med ein antatt gjennomstrøymingstid i sandfanget på om lag 400 s, er det vurdert til at dei simulerte målingane er av tilfredsstillande kvalitet.

Samanlikning av simulerte resultat frå luka til varegrinda (tabell 5.2 og 7.4) viser at reduksjonen av farta er meir enn 30-50%, og at farten er mindre enn 0.6 m/s.

Som vist i tabell 7.4, er den maksimalt oppnådde farten ved målelinje c i modellane D1-D3 om lag 0.70 m/s. Hjulstrøms diagram (figur 2.1) gjev at partiklar opp til 0.008 mm kan eroderast. Med Shields (avsnitt 2.1.2) får ein 2.4 mm. Likning (2.5) gjev ein partikkelstorleik på om lag 1 mm for byrjande rørsle av sandpartiklar i fylt tverrsnitt.

I figur 1.1 er det vist skadar på turbinblada. Skadane tyder på at dei største partiklane har vore i området 20-50 mm. Dei simulerte hastighetsprofila for ADCP II og III samsvarar godt med målte verdiar. Det er då naturleg å gå ut frå at dei simulerte resultatata ved varegrinda er i rett storleik. Utrekningane av sedimenttransporten i dette området er mykje mindre enn skadane tilseier. Skadane på turbinen kan difor ikkje skuldast sedimenttransport under stasjonær vassføring, og det ser ut til at det er fornuftig med reduksjon av farten ned til mindre enn 0.6 m/s i sandfang.

8.2 Fyllingssituasjon

Som vist i avsnitt 7.3, gjev fyllingsplotta frå simuleringane F1-F3 og S1 god korrelasjon med dei målte verdiane. Det er difor naturleg å anta at situasjonar som oppstår undervegs i simuleringane også stemmer overeins med prototypen.

I figur 7.11 er det vist skjærspenning langs botn av modell F1. Ein ser at den maksimale skjærspenninga dei siste 30 m før terskelen er tilnærma 40 Pa. Ved å gå ut frå at Shields tal er $C_s = 0.06$, gjev likning (2.3) partikkelstorleiken:

$$d_c = \frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho_v) \cdot g \cdot C_s} = \frac{40 \text{ Pa}}{(2650 - 1000) \text{ kg/m}^3 \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 0.06} \approx 41 \text{ mm}$$

For å sjekke at det var rett å gå ut frå at $C_s = 0.06$, reknar ein ut Reynoldstalet i grensesjikt. Fyrst må ein finne kva for skjærhastigheit ei skjærspenning på 40 Pa gjev. I frå likning (2.2) har ein at

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho_v}} = \sqrt{\frac{40 \text{ Pa}}{1000 \text{ kg/m}^3}} = 0.20 \text{ m/s}$$

Frå likning (2.4) har ein at Reynoldstalet i grensesjikt er gitt som

$$Re_* = \frac{u_* \cdot d_s}{\nu} = \frac{0.20 \text{ m/s} \cdot 0.041 \text{ m}}{1.51 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 5.46 \cdot 10^3$$

Sidan Reynoldstalet er større enn 1000, kan ein sette $C_s = 0.06$ slik som vist i figur 2.2. Dermed stemmer utrekninga av partiklar med storleik 41 mm.

Utrekning frå hastigheitsprofilane frå figur 7.10, eller tabell 7.7, gjev litt mindre partikkelstorleik. Via Keulegans formel (2.1) og Shield (2.3) får ein 34 og 27 mm for målelinje a og b. Ulikskapen er ikkje stor, og den kan skuldast at ein må gå ut i frå ein ruheit i utrekninga av Keulegans formel (2.1). Modellane nytta ein ruheit på 0.015 m.

Ein endar likevel opp med at partikkelstorleiken i frå simuleringane med fylling stemmer overeins med skadane vist i figur 1.1. Skadane på turbinen kan dermed skuldast sediment frå spyling av sandfanget under fyllingssituasjonar.

8.3 Forslag til utbetring

For å redusere framtidige skadar, kan ein:

1. Montere ei «tunge» ved terskel/trapp.
2. Heve terskelen.
3. Utvide sandfanget nærast varegrinda.

Punkt 1 vil vere den enklaste å gjennomføre. Ei «tunge» ved terskel/trapp vil gjere at ein oppnår virvling tilbake og ned mot botn av sandfanget. Dette vil til ein viss grad redusere sedimenttransporten.

Det andre alternativet vil kreve meir arbeid enn punkt 1, men resultatet vil vere betre. Ved å heve terskelen vil ein oppnå rolegare strøymingstilhøve nær terskelen slik at partiklar som fyrst vert spylt nedover får tid til å avsette. Ein kan med fordel utføre punkt 1 og 2 i kombinasjon.

Alternativ 3 vil vere meir kostbar enn dei to andre, men meir effektiv. Ein kan utvide sandfanget og dermed redusere farten. Dette vil vere ei meir langsiktig løysing enn dei to andre, då ein kan ta høgde for endra drift.

I tillegg til desse tre punkta, er det viktig med overvaking av sandfanget.

Kapittel 9

Konklusjon og vidare arbeid

Konklusjon

I denne oppgåva vart det testa om CFD er eigna til dimensjonering av ein kritisk del av ein råsprengt kraftverkstunnel. Det vart lagt vekt på å finne ut av spørsmål i) og iv) frå oppgåveteksta, samt ei vurdering av DES.

Det vart undersøkt om det kunne oppstå luftlommer under fylling av sandfanget og korleis dette påverkar farten til vatnet. Det vart funne at det står att om lag 442 m^3 med luft når luftesjakta går full, og det vart funne at farten til vatnet aukar.

For stasjonær vassføring gjev modellane med RANS gode resultat der det er lite turbulens. Modellane med DES får i større grad med turbulensen som oppstår mellom luka og ADCP I. Resultata i frå DES spriker litt, men det er lovande for vidare arbeid. Skadar på turbinen skuldast ikkje sedimenttransport under stasjonær vassføring.

STAR-CCM+ fungerer ganske bra for simulering av fyllingssituasjon. Ein får til godt samsvar med fyllingsplott så lenge ein tek med heile trykksjakta i modellen. Ut i frå at modell F1 med grovast grid samstemmer best med feltmålingane, er det av mindre innverknad kor små celler ein nyttar for å gjengi geometrien. Det ser ut til at det oppstår vasstandssprang under fylling. Verdiar i frå hastigheitsprofil og skjærspenning stemmer overeins med skadeomfanget som er funne på turbinen som fylgje av sedimenttransport. Vasshastigheiter som oppstår under fylling av sandfanget gjev spyling av sandfanget. Det vart funne at skjærspenninga som oppstår har potensiale til å transportere partiklar opp til 41 mm.

For å redusere framtidige skadar, kan ein:

1. Montere ei «tunge» ved terskel/trapp slik at ein oppnår virvling tilbake og ned mot botn av sandfanget.
2. Heve terskelen for å oppnå rolegare strøymingstilhøve nær terskelen, og dermed avsetting av sediment. Dette gjerne kombinert med punkt 1.

3. Utvide sandfanget nærast varegrinda for å redusere den maksimale farten til vatnet under fylling av sandfanget.

I denne oppgåva er det verifisert at CFD fungerer til å vise dei strøymingsmønster som oppstår slik geometrien er i dag. Sidan det er mogleg å endre geometrien av sandfanget i STAR-CCM+, kan ein vidare vurdere korleis ulike utformingar av denne konstruksjonsdelen resulterer i ulike strøymingsmønster. Det konkluderast med at STAR-CCM+ er eigna for dimensjonering av sandfang.

Vidare arbeid

Samanlikning av resultat ved ADCP I frå RANS og DES viser at DES nærmar seg, men at det framleis er eit stykke att før strøymingstilhøva ved ADCP I er heilt replikert med DES. For simuleringar med DES, kan strøymingstilhøva ved ADCP I betrast ved å ta med endå meir av geometrien oppstrøms luka, slik som vist i figur 1.3. På denne måten får ein inkludert singulærtap i overgangane inn til sandfanget.

I vidare arbeid med fyllingssituasjon i dette sandfanget og CFD, er det tilrådeleg å endre på geometrien. Fyrst vurdere i kva grad heving av terskel og/eller ei utstikkande «tunge» ved terskelen vil oppnå virvling tilbake og ned mot botn av sandfanget. Om dette ikkje er nok, kan ein utvide sandfanget for å vurdere kor mykje ein må utvide sandfanget for å unngå spyleeffekten ved ein fyllingssituasjon. Då enten i heile lengda eller berre i enden av sandfanget.

Vidare er det tilrådeleg å vurdere om skalering av modellen i STAR-CCM+ vil gje om lag like resultat. Då kan ein vurdere i kva for skala ein kan redusere modellen utan at det har for stor innverknad på resultata. Poenget med dette er at ein då kan redusere utrekningstida før konvergering for andre tilsvarande studiar.

For å oppnå ein meir realistisk strøymingssituasjon når luka hevast, bør ei dynamisk lukeheving vurderast. Dynamisk lukeheving ved hjelp av overlappende grid vil då vere eit alternativ. Alternativt kan ein lage ein forkorta modell ved å mellombels fjerne det meste av geometrien, for så å utføre hevinga i fastsett fart.

Litteratur

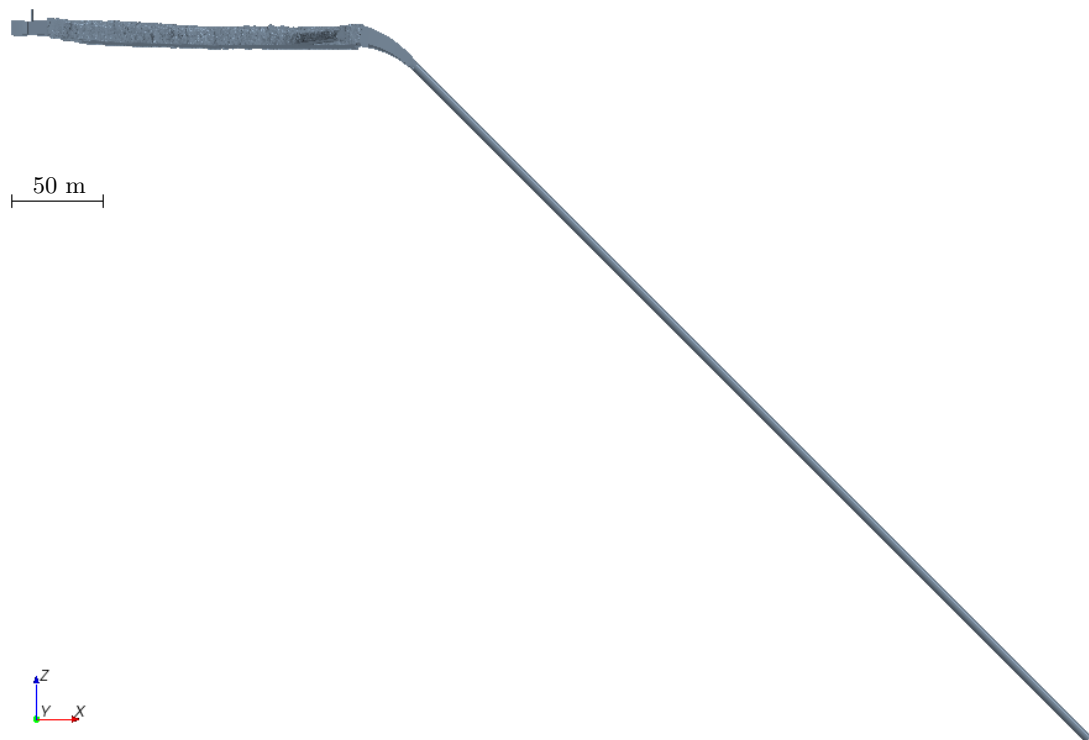
- Brevik, O. (2012), *Prosjektoppgåve: Tredimensjonal numerisk modellering av vasstrøyming i eit sandfang ved Tonstad kraftverk*.
- CD-adapco (2013), *User Guide STAR-CCM+ 8.02.008*, CD-adapco.
- Chanson, H. (2004), *The hydraulics of open channel flow: an introduction : basic principles, sediment motion, hydraulic modelling, design of hydraulic structures*, number 2nd ed., Elsevier, Amsterdam.
- Courant, R., Friedrichs, K. & Lewy, H. (1967 [1928]), *On the partial difference equations of mathematical physics*, IBM Journal of Research and Development 11 (2): 215–234.
- Crowe, C. T. (2009), *Engineering fluid mechanics*, 9th ed., si version edn, Wiley, Hoboken, N.J.
- Fergus, T., Hoseth, K. A. & Sæterbø, E. (2010), *Vassdragshåndboka*, Tapir Akademisk Forlag, Trondheim.
- Guttormsen, O. (2006), *Vassdragsteknikk: kompendium*, Tapir, Kompendieforlaget, Trondheim.
- Keylock, C. J., Constantinescu, G. & Hardy, R. J. (2012), ‘The application of computational fluid dynamics to natural river channels: Eddy resolving versus mean flow approaches’, *Geomorphology* **179**, 1–20.
- Killingtveit, A. & Sælthun, N. R. (1995), *Hydrology*, Vol. Vol. no. 7, Norwegian Institute of Technology. Department of Hydraulic Engineering, Trondheim.
- Lysne, D. K. (1986), ‘Sand in tunnels’, *Senior course in hydropower engineering. Tsinghua university, Beijing*.
- Olsen, N. R. B. (1991), *A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water intakes*, Vol. 1991:59, Institutt for vassbygging, Universitetet i Trondheim, Norges tekniske høgskole, Trondheim.

- Olsen, N. R. B. (2011), *Numerical Modelling and Hydraulics*, Department of Hydraulic and Environmental Engineering The Norwegian University of Science and Technology.
- Peric, M. (2013), Overset grids technology in star-ccm+: Current state & future developments, *in* 'STAR Global Conference 2013'.
- Spalart, P. R. (2009), *Detached-eddy simulation*, Vol. 41 of *Annual Review of Fluid Mechanics*.
- Spalart, P. R., Deck, S., Shur, M. L., Squires, K. D., Strelets, M. K. & Travin, A. (2006), 'A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities', *Theoretical and Computational Fluid Dynamics* **20**(3), 181–195.
- Versteeg, H. & Malalasekera, W. (2007), *An introduction to computational fluid dynamics*, 2nd edn, Pearson/Prentice Hall, Harlow.
- Vingerhagen, S. & B. Olsen, N. R. (2012), '3d numerical modelling of the capacity for a partially pressurized spillway', *IAHR European Conference, Munich, Germany* .

Vedlegg

Vedlegg A

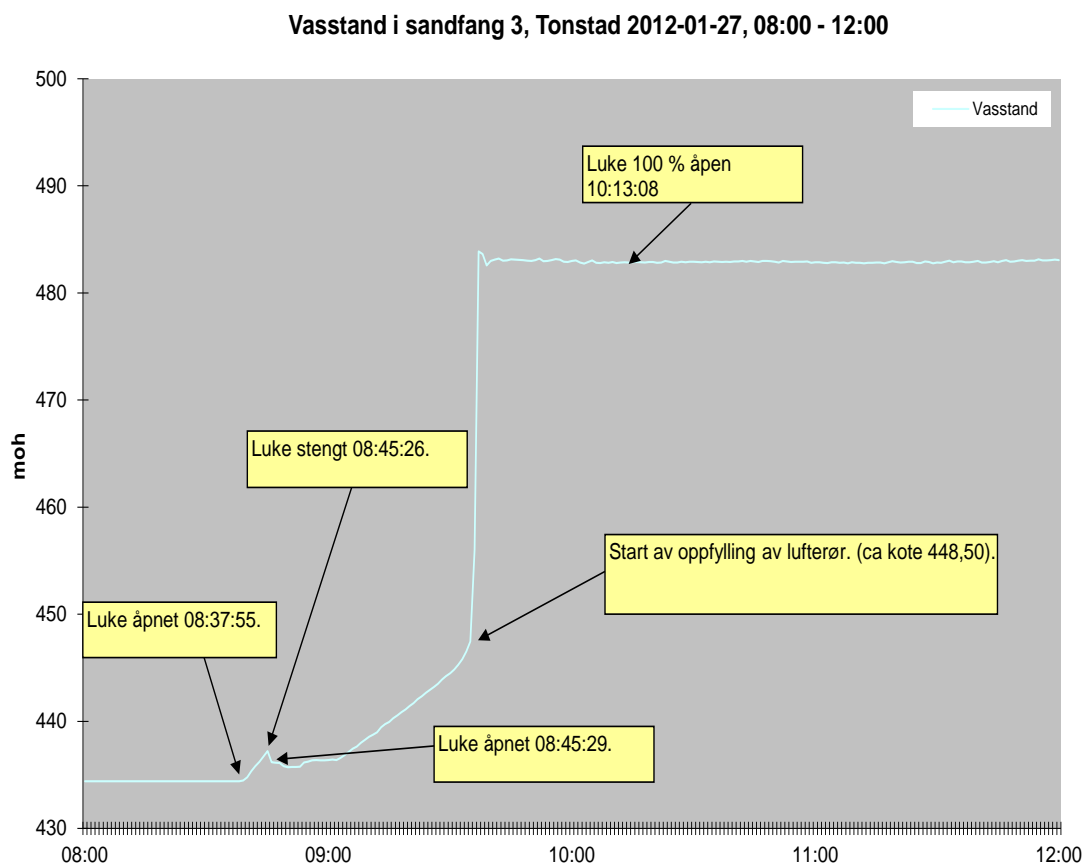
Figur av heile modellen



Figur A.1: Heile modellen av sandfanget og trykksjakta.

Vedlegg B

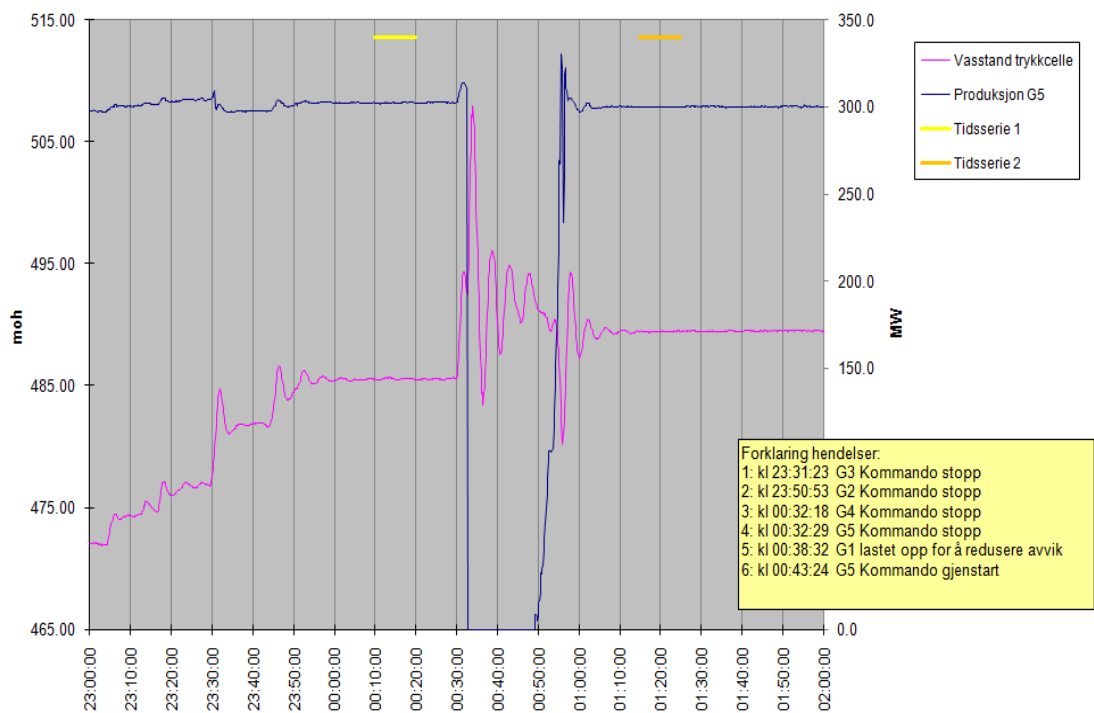
Feltdata for oppfylling av sandfang



Figur B.1: Felldata for vasstand i sandfang 3, Tonstad, 27.01.2012 kl 08:00-12:00.

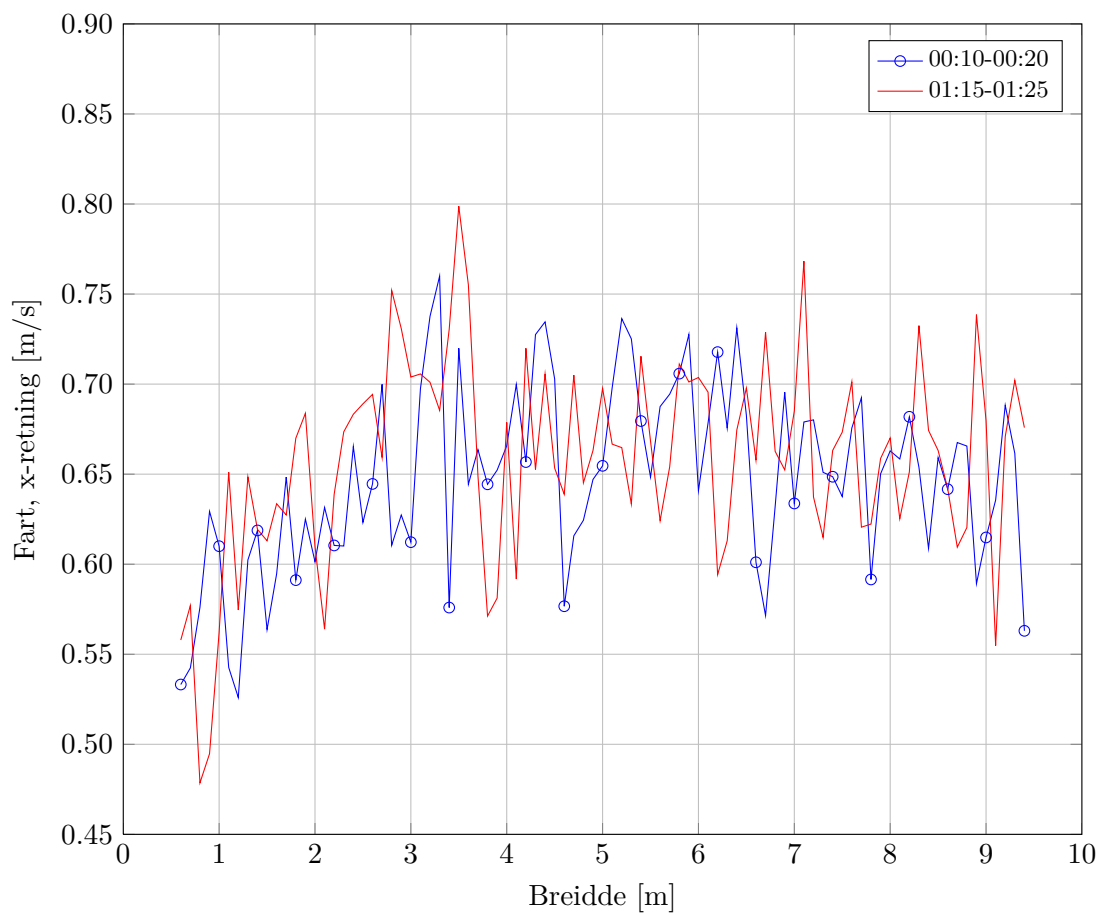
Vedlegg C

Produksjon og vasstand mellom 15. og 16. februar 2012



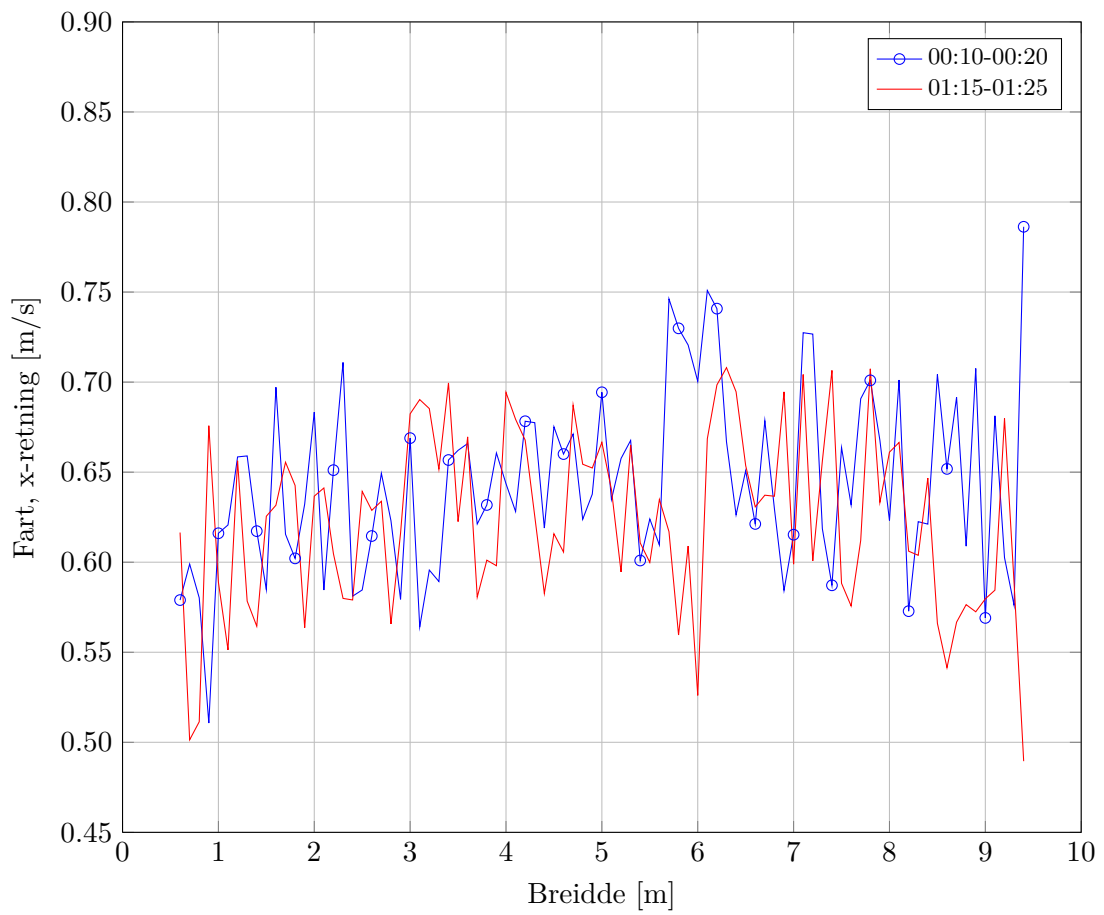
Figur C.1: *Produksjon og vasstand mellom 15. og 16. februar 2012. To stasjonære situasjoner for kl. 00:10-00:20 og kl. 01:15-01:25.*

C.1 Feltnålingar frá ADCP II 16. februar 2012



Figur C.2: Feltnåling frá ADCP II i lengderetninga for 16. februar 2012.

C.2 Feltnålingar frá ADCP III 16. februar 2012

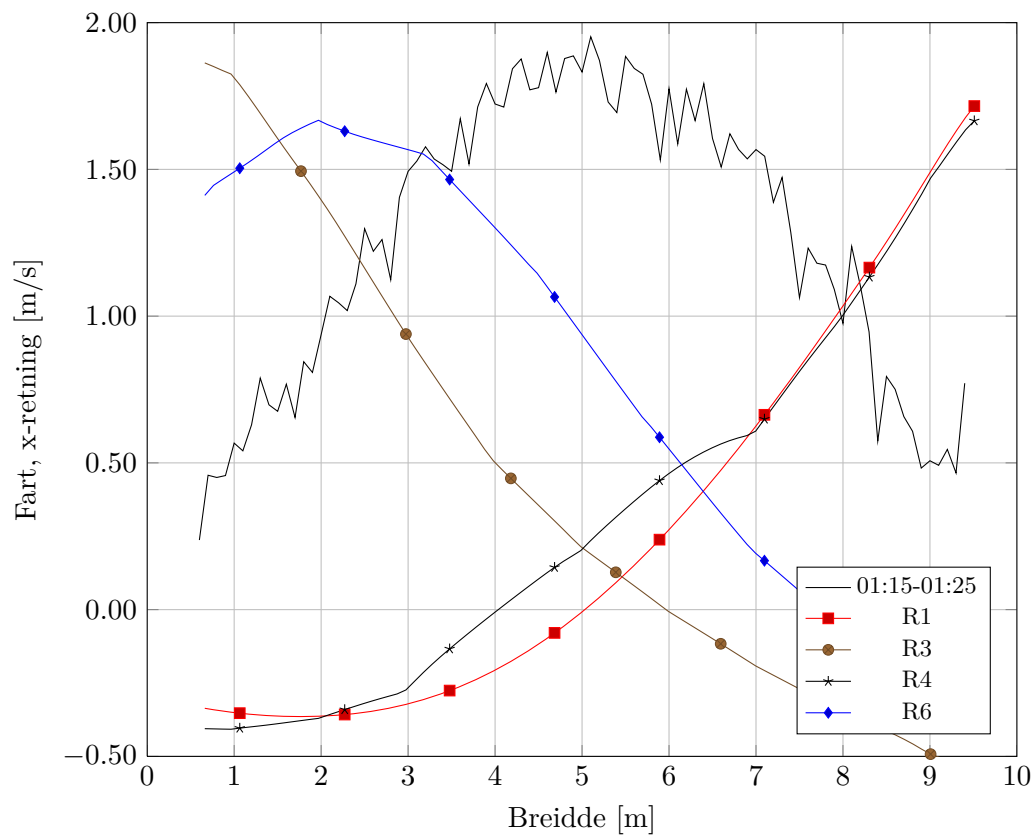


Figur C.3: Feltnåling frá ADCP III i lengderetninga for 16. februar 2012.

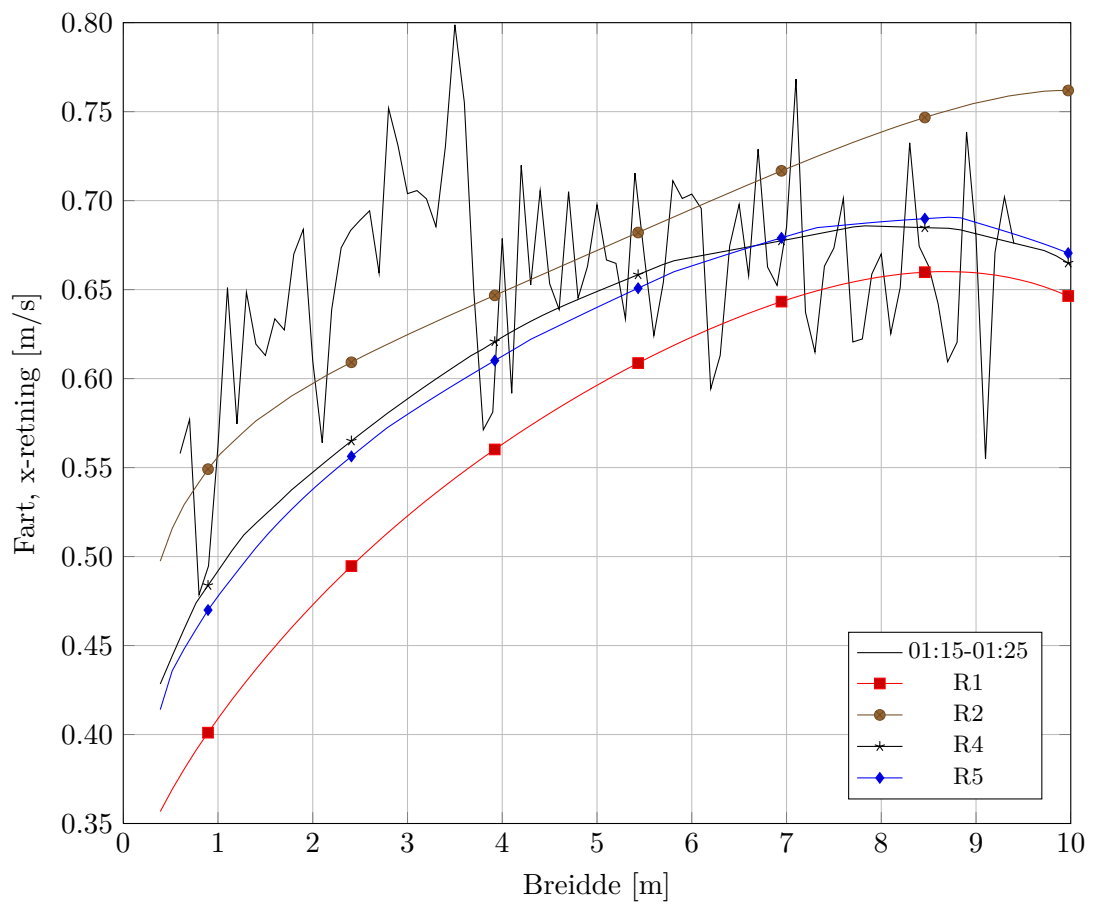
Vedlegg D

Resultat frå prosjektoppgåva

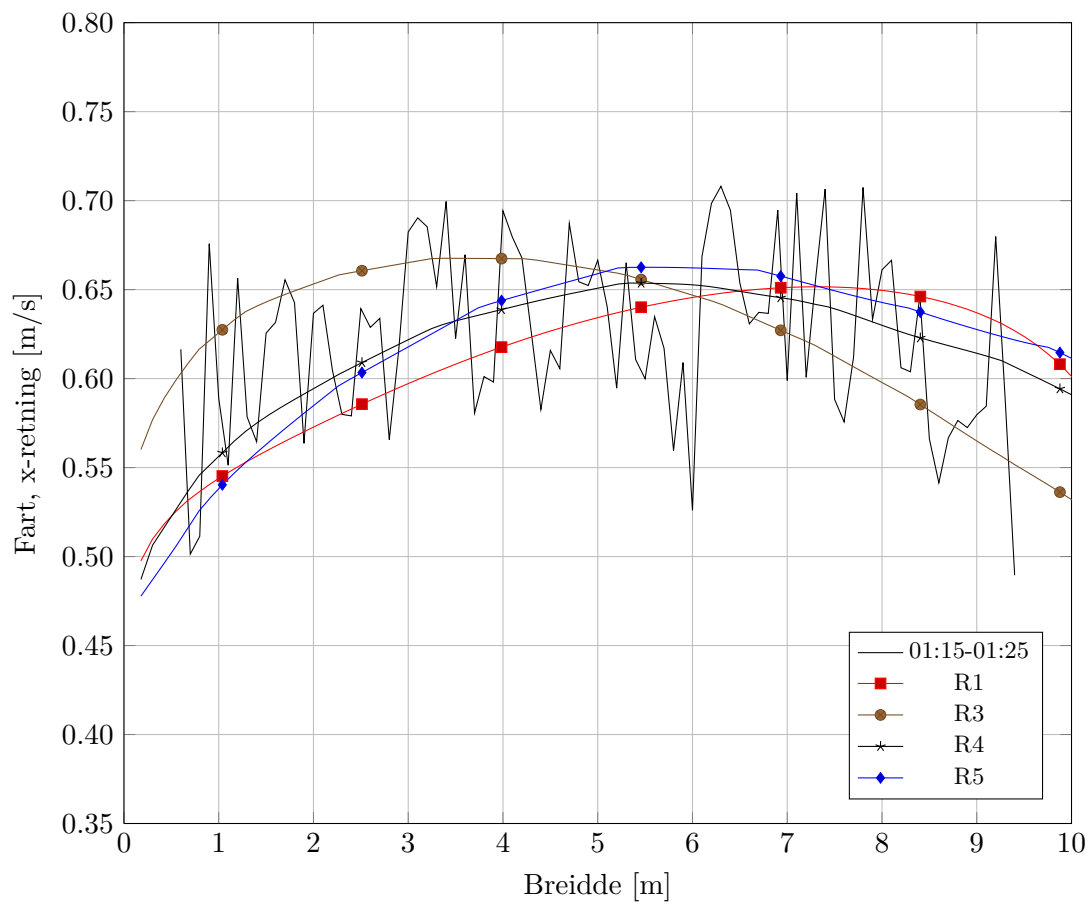
D.1 Hastigheitsprofil



Figur D.1: Resultat i høve til feltmåling for ADCP I frå prosjektoppgåva. Trimmer grid med $k-\varepsilon$.

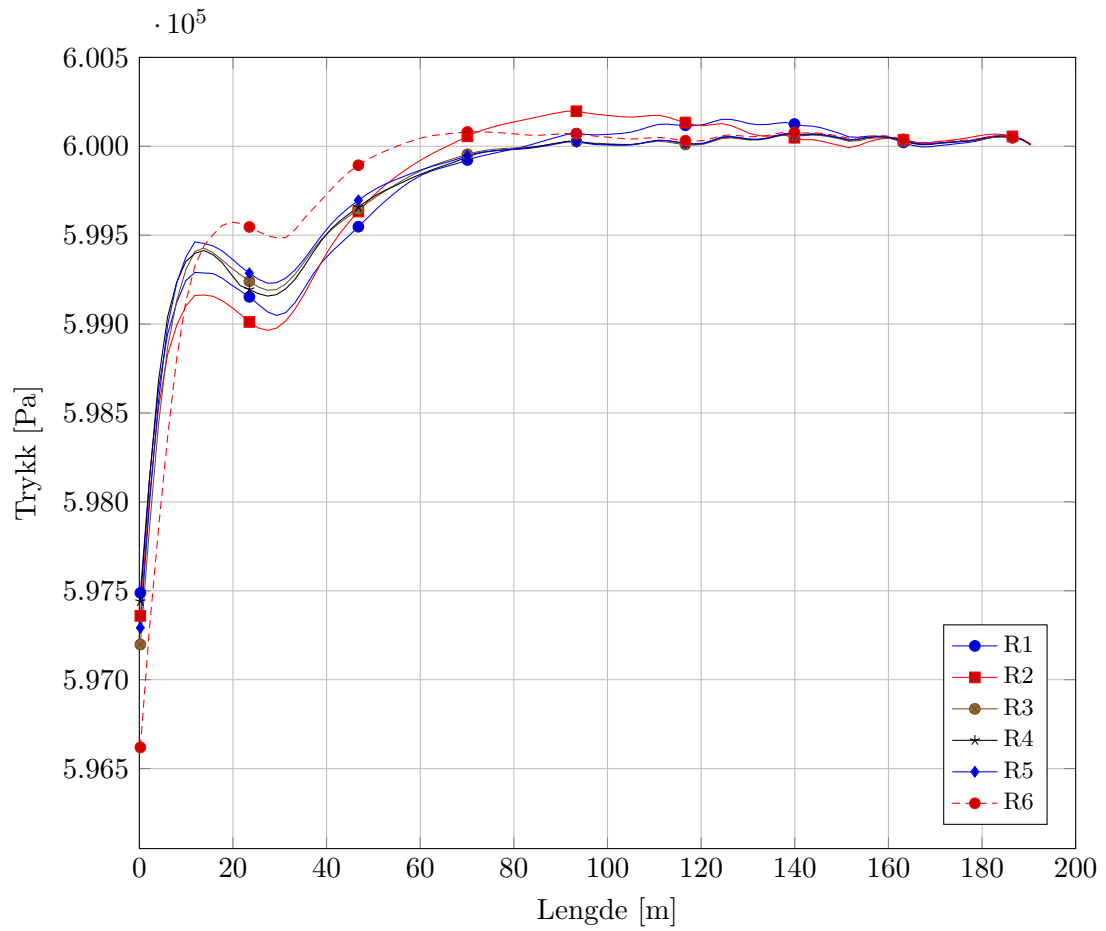


Figur D.2: Resultat i høve til feltmåling for ADCP II frå prosjektopp-gåva. Trimmer grid med $k-\varepsilon$.



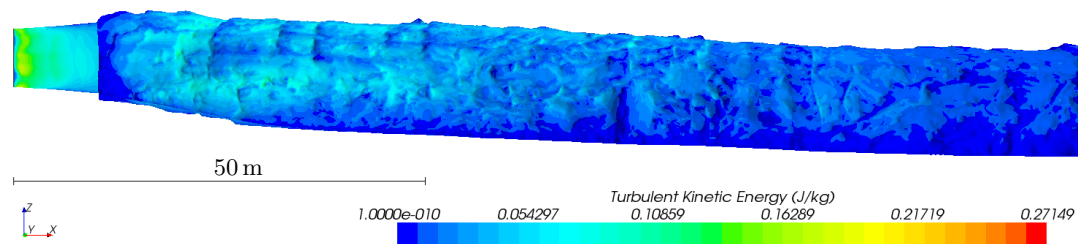
Figur D.3: Resultat i høve til feltmåling for ADCP III frå prosjektopp-gåva. Trimmer grid med $k-\varepsilon$.

D.2 Vasstrykk

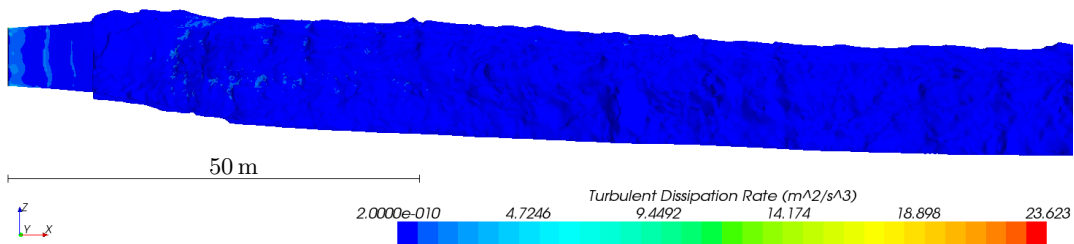


Figur D.4: Variasjon av simulert vasstrykk i sandfanget for ulike celledorleikar frå prosjektoppgåva. Trimmer grid med $k-\varepsilon$.

D.3 Fordeling av k - ϵ



(a) k (min-maks)



(b) ϵ (min-maks)

Figur D.5: Turbulent kinetisk energi (k) og spreining av turbulent kinetisk energi (ϵ) for RANS. Trimmer grid 0.2 m celler og k - ϵ .

Vedlegg E

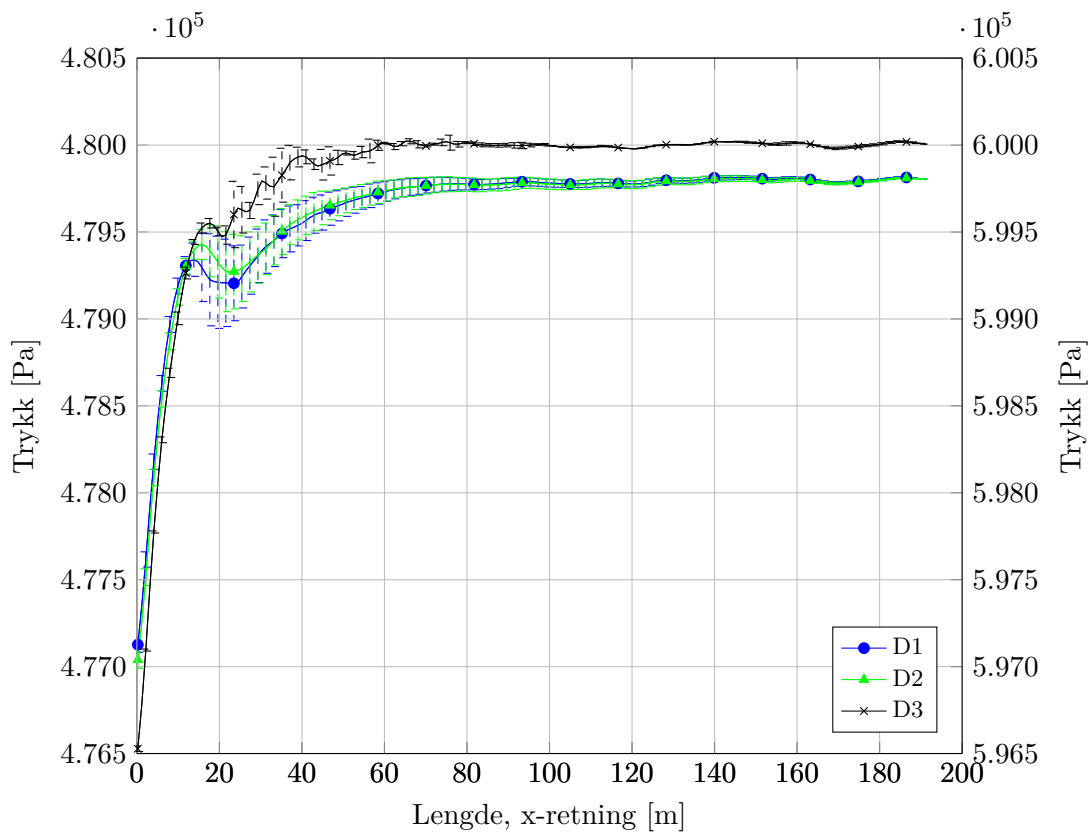
Andre resultat frå DES-modellane

E.1 Vasstrykk

Merk at den store ulikskapen av trykket for D3 skuldast grensevilkår.

Tabell E.1: Verdier for vasstrykket langs sandfanget i modellane D1-D3. Målt horisontalt i høgda til ADCP II og ADCP III.

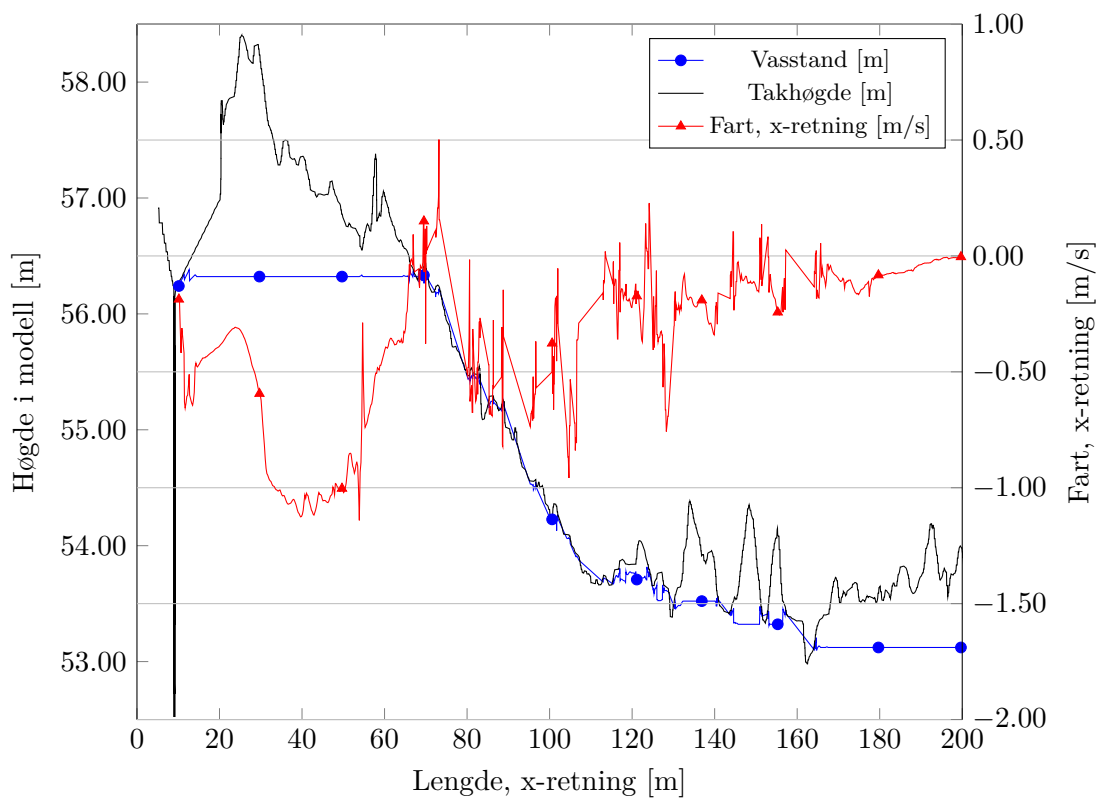
<i>Trimmer, DES</i>		Trykk [Pa]			
Namn	Min	Maks	Luke	Varegrind	Differanse
D1	477126	479814	477126	479803	2677
D2	477039	479810	477039	479802	2764
D3	596527	600023	596527	600004	3477



Figur E.1: Variasjon av simulert vasstrykk i sandfanget for D1-D3. Trimmer grid med DES. Den høgre y-aksen gjeld for D3.

Vedlegg F

Andre resultat frå slutfylling



Figur F.1: Plassering av vassflata saman med farten til vatnet i x-retning etter at luftesjakta går full (694 s). Ein negativ fart tyder at vatnet går mot luka.

Vedlegg G

Java-script for oppstart av simuleringar

Dette Java-scriptet vart nytta for å få i gang simuleringane:

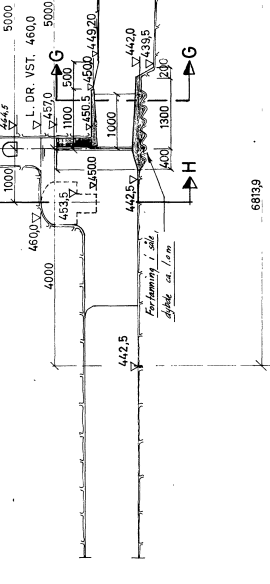
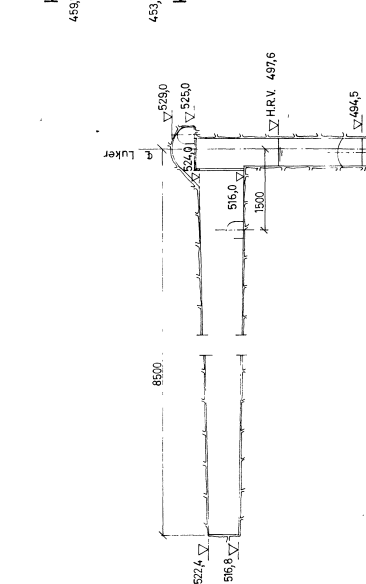
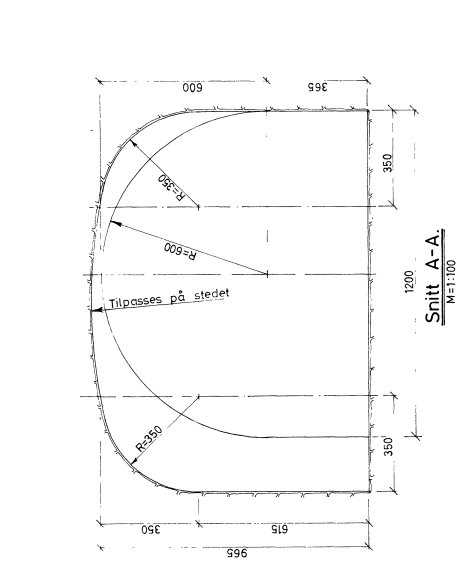
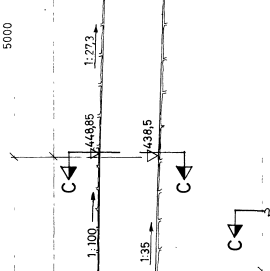
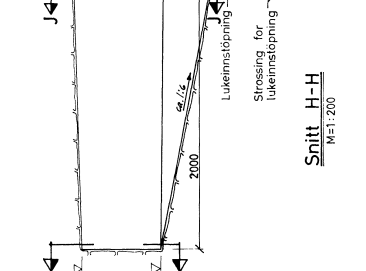
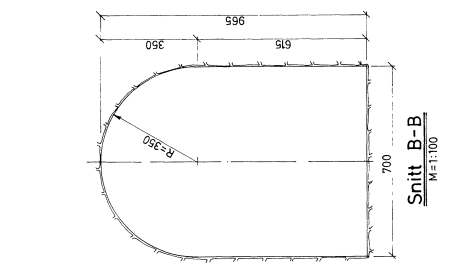
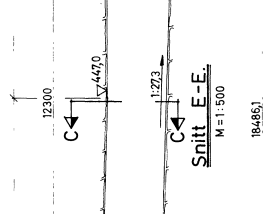
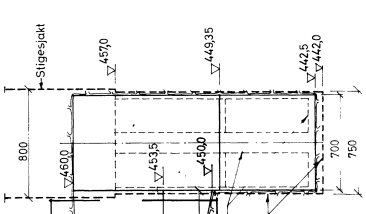
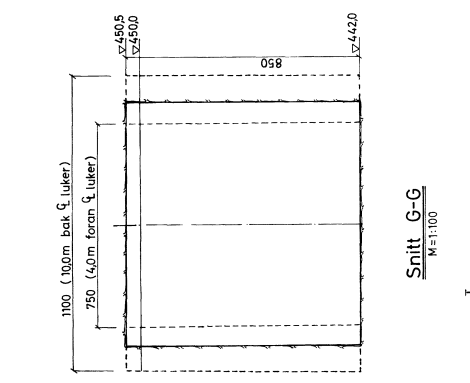
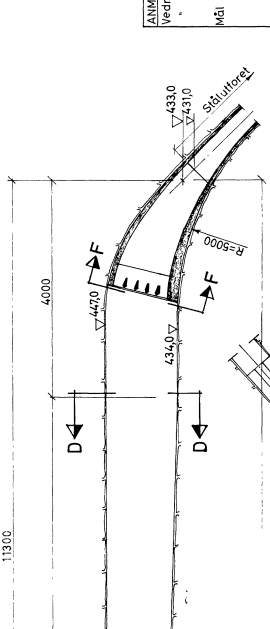
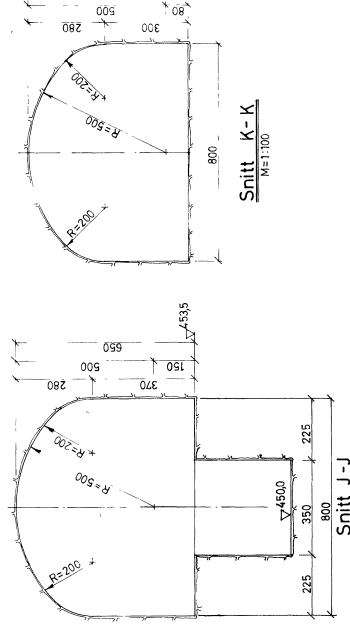
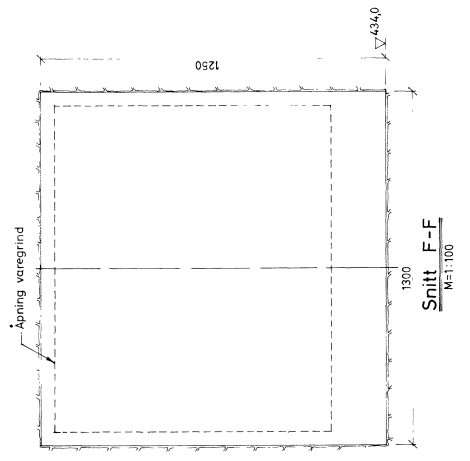
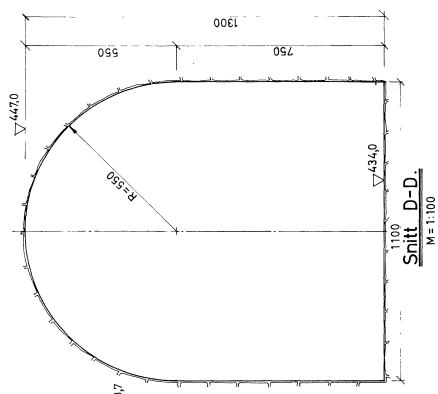
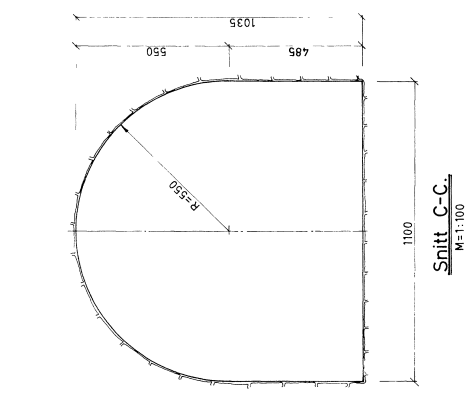
```
1 // STAR-CCM+ macro: timeStep.java
2 package macro;
3
4 import java.util.*;
5
6 import star.common.*;
7 import star.base.neo.*;
8
9 public class timeStep extends StarMacro {
10
11     public void execute() {
12         execute0();
13     }
14
15     private void execute0() {
16
17         Simulation simulation_0 =
18             getActiveSimulation();
19
20         Solution solution_0 =
21             simulation_0.getSolution();
22
23         solution_0.initializeSolution();
24
25         ImplicitUnsteadySolver implicitUnsteadySolver_0 =
26             ((ImplicitUnsteadySolver)
27                 simulation_0.getSolverManager().getSolver(ImplicitUnsteadySolver.class));
28
29         implicitUnsteadySolver_0.getTimeStep().setValue(1.0E-8);
```

```
29
30     simulation_0.getSimulationIterator().step(10);
31
32     implicitUnsteadySolver_0.getTimeStep().setValue(1.0E-7);
33
34     simulation_0.getSimulationIterator().step(9);
35
36     implicitUnsteadySolver_0.getTimeStep().setValue(1.0E-6);
37
38     simulation_0.getSimulationIterator().step(9);
39
40     implicitUnsteadySolver_0.getTimeStep().setValue(1.0E-5);
41
42     simulation_0.getSimulationIterator().step(9);
43
44     implicitUnsteadySolver_0.getTimeStep().setValue(1.0E-4);
45
46     simulation_0.getSimulationIterator().step(9);
47 }
48 }
```

Vedlegg H

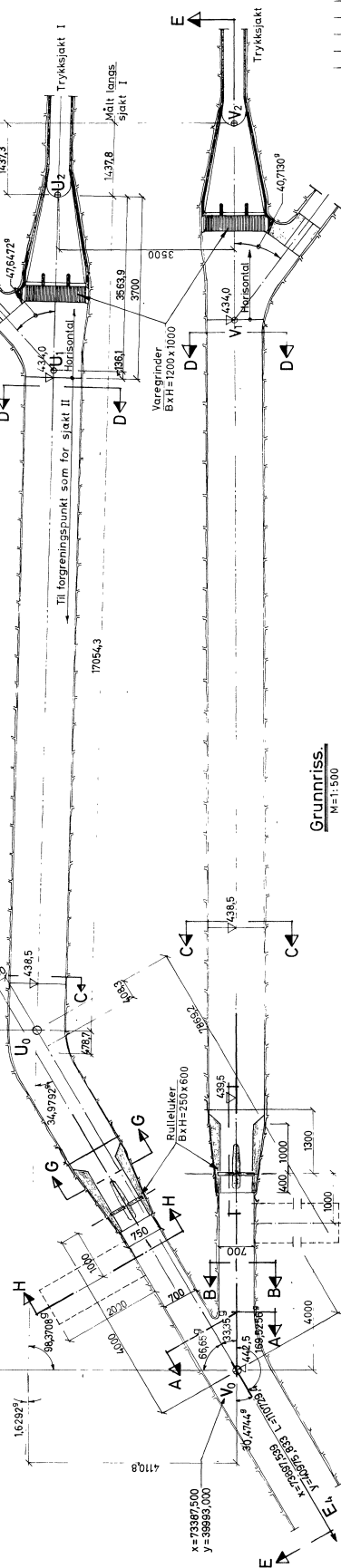
Arbeidsteikningar

Arbeidsteikningane som vart nytta for å teikne inn resterande geometri er vist på dei neste sidene.



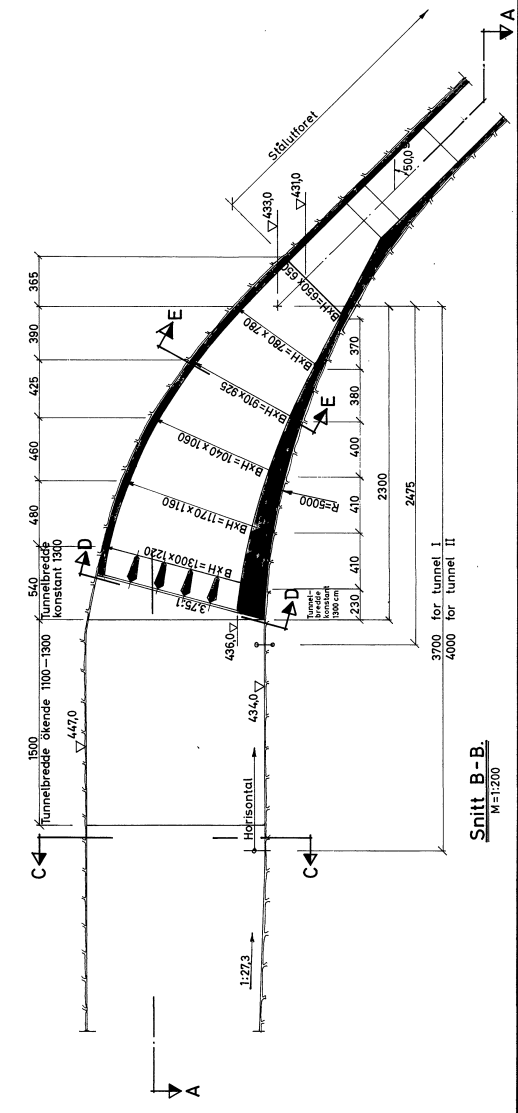
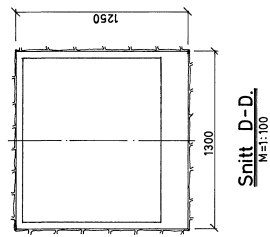
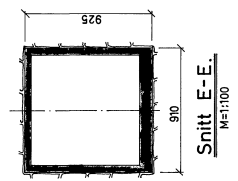
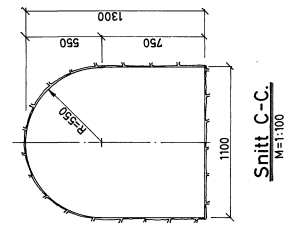
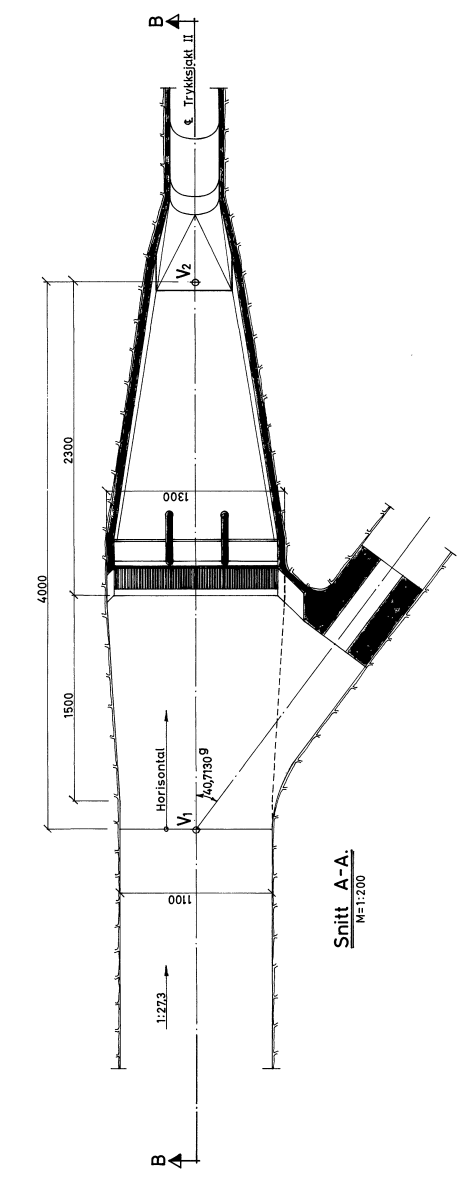
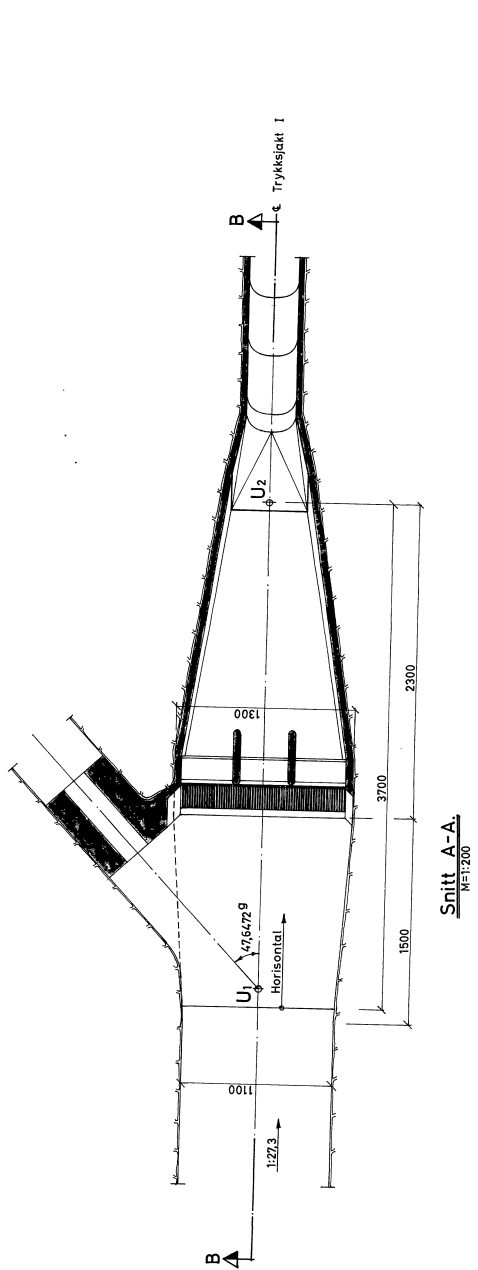
Art	Antall	Utdrag	Utdrag nr
K	1	S.R.	42
J	6	H	22.6.66
H	6	H	2.6.66
G	1	S.R.	16.11.65
F	1	S.H.	11.10.65
E	1	S.R.	16.8.65
D	1	S.R.	31.5.65
C	1	S.R.	11.5.65
B	1	S.R.	7.5.65
A	1	S.R.	7.5.65

Mål angitt i cm
 ANM: Verislag se tegn nr 327
 Vedr: slitesjakter " " " 345
 topp trykksjakter se tegn nr 350
 Mål angitt i cm



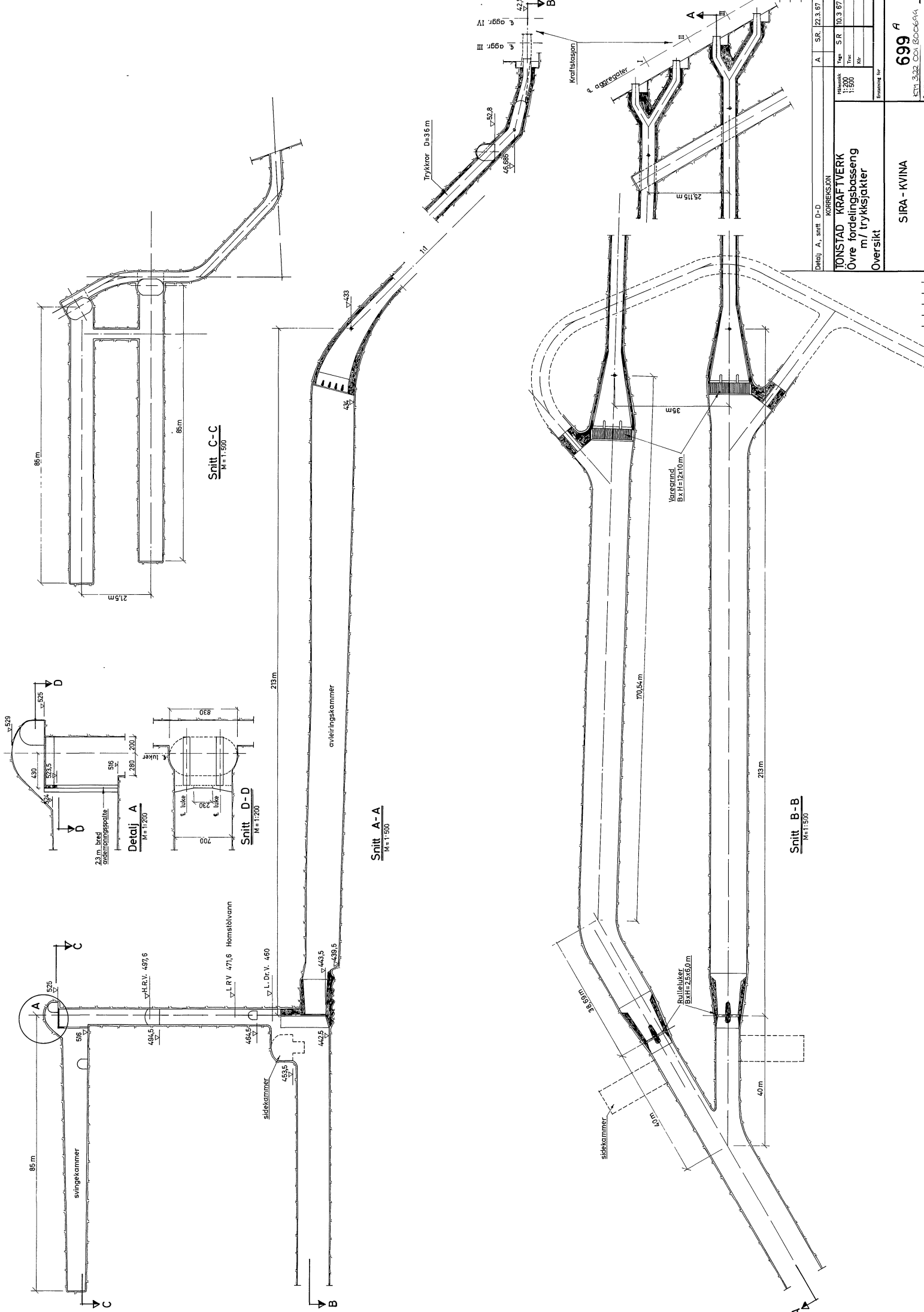
K
 325
 KTD 323.000.000.025
 ESTABLER AV

TONSTAD KRAFTVERK.
 Fordelingsbasseng og
 inntak trykksjakter.
 Plan og snitt.
 SIRA - KVINA

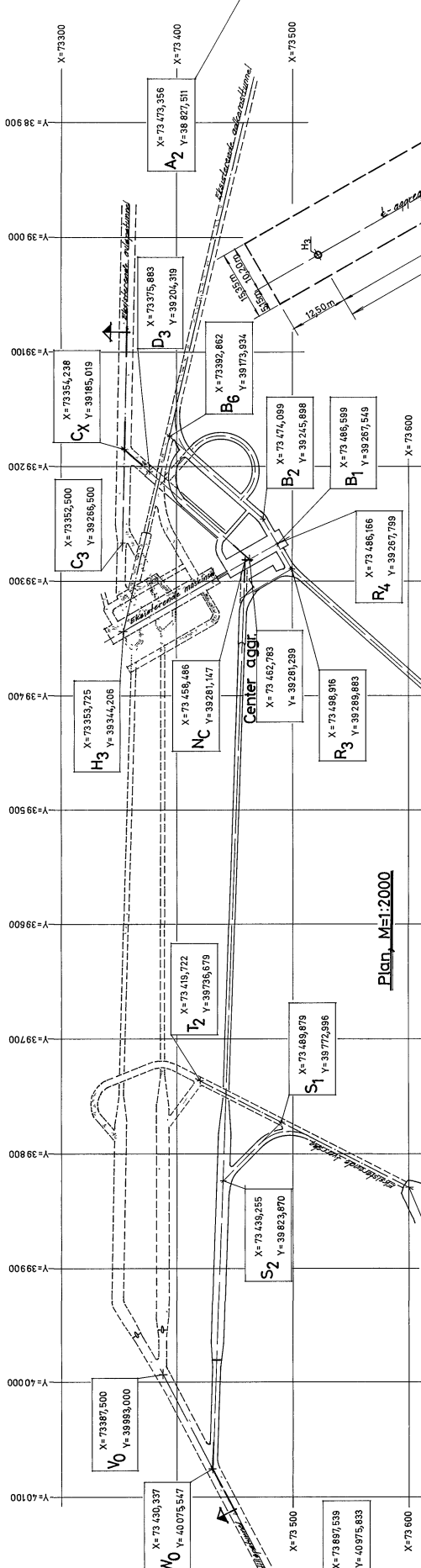


ANN: For esnitt i og vedt tunnel mellom luker og vøregrind se tegn. nr. 25 og 327.

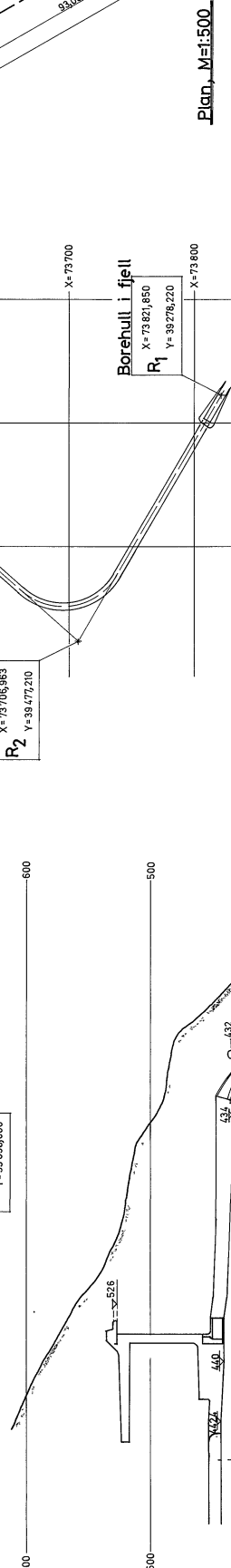
Målestokk	1:100	Tegn. S.R. 28.5.65	Tegn. 3/11	Kv. 3/11	350
	1:200				
Entenhet: for.					KT 1.333.000.600.950
TONSTAD KRAFTVERK. Topp trykksjakter. Sprengning.					SIRA - KVINA



Detalj A, snitt D-D	A	S.R.	22.3.97
KORREKSJON			
TONSTAD KRAFTVERK	Fig.	S.R.	10.3.97
Øvre forleingsbasseng	Fig.	S.R.	
m/ trykksjakter	Fig.	S.R.	
Oversikt	Fig.	S.R.	
Erstatning for			
SIRA - KVINA			699 ^A
KTY 3.322 CON. BODØ 6/94			Erstatning for

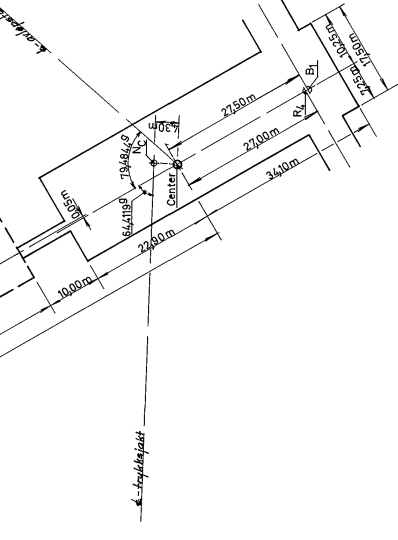


Plan, M=1:2000



Snitt A-A, M=1:2000

Plan, M=1:500



TONSTAD KR. VERK, Utvidelse
Hovedstikningsplan
Oversikt, lengdesnitt

Målestokk	Trasé #2	71 - 85
1:500	Trasé	
1:2000	RF	

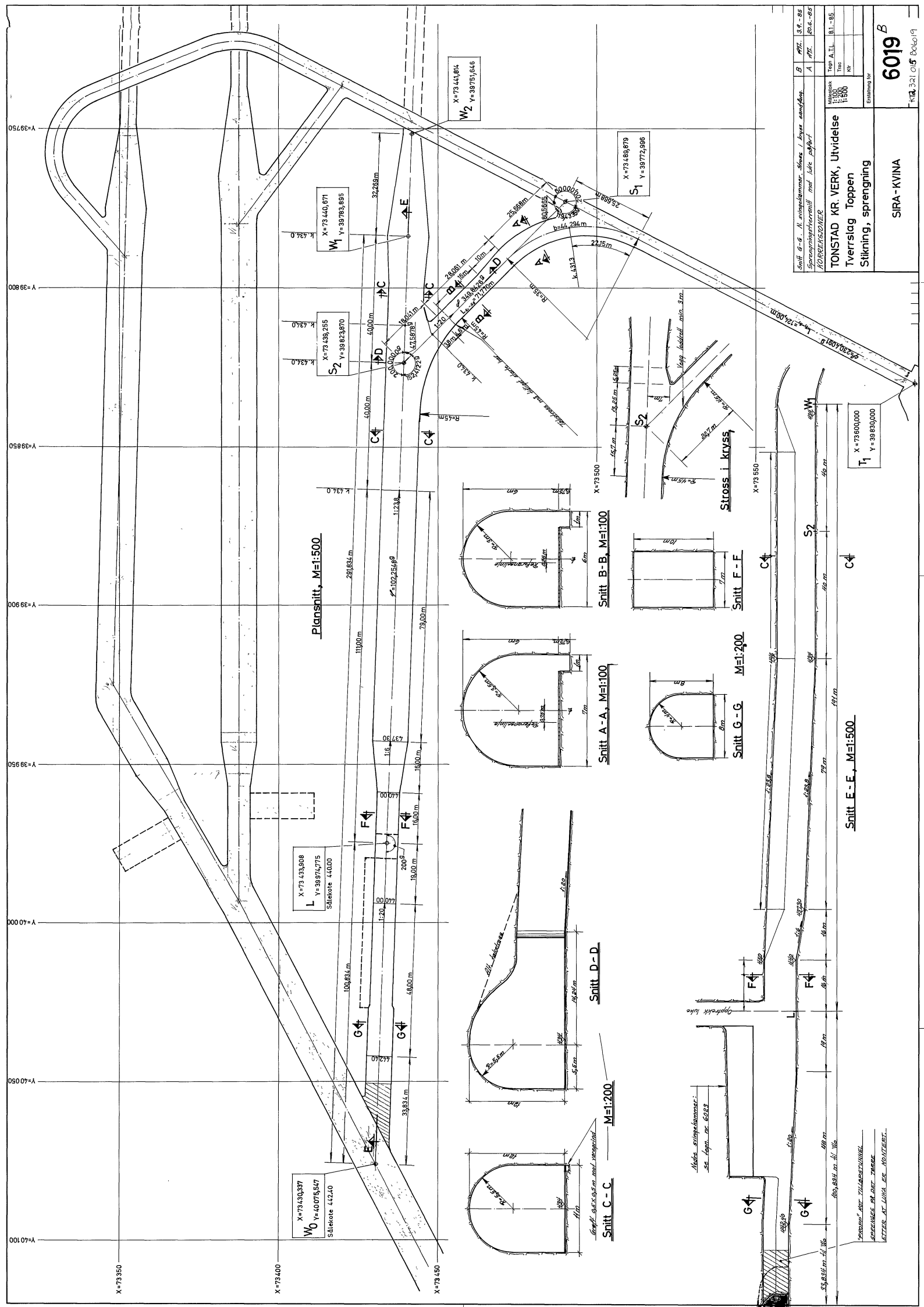
Erstatning for

6018

SIRA - KVINA

ETASER CV





Snitt G-G, N. simplekammer, stross i kryss utførelse	A	1:200	18.11.-95
Sprenghøfthetensnit med luke på øst	B	1:200	18.11.-95
FORREDESKJEMER	A	1:500	18.11.-95
Målestokk	1:500		
Tepp. A. T. I.	1:500		
Tegn. nr.	6019		
Utskrift nr.	6019 B		
Prosjekt nr.	SIRA-KVINA		
Kontrollør	SIRA-KVINA		
Utskrift nr.	6019 B		

TONSTAD KR. VERK, Utvidelse
 Tverslag Toppen
 Stikning, sprengning

6019 B

Utskrift nr. 6019 B

Plansnitt, M=1:500

X=73.433.908
 Y=39.974.715
 Slikekode 44000

X=73.433.908
 Y=39.974.715

X=73.433.908
 Y=39.974.715

X=73.433.908
 Y=39.974.715

X=73.433.908
 Y=39.974.715

X=73.433.908
 Y=39.974.715

X=73.433.908
 Y=39.974.715

Snitt E-E, M=1:500

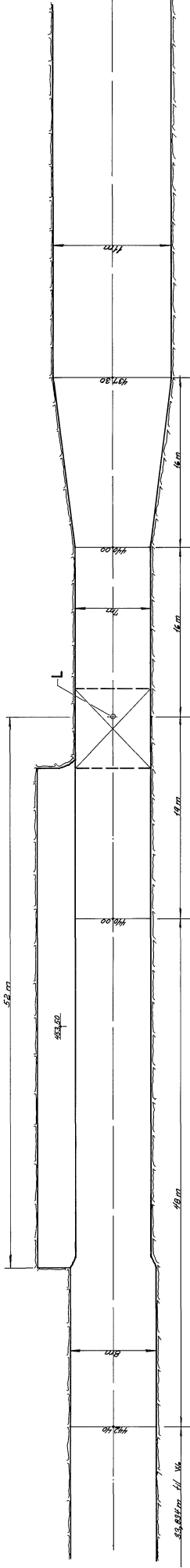
X=73.600.000
 Y=39.930.000

*Notas simplekammer:
 se tegn. nr. 6013*

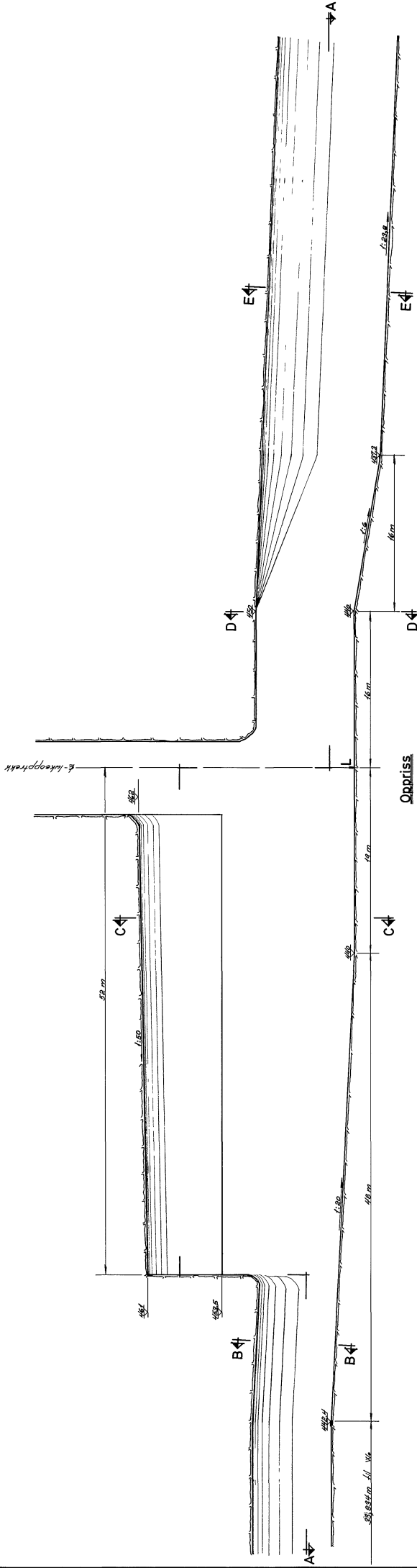
Skåpe for tilsiktskyl

Slåstøtte

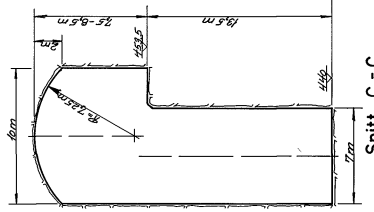
*Prosjekt nr. TILBESKILNING
 SPRENGINGEN ØST PÅ TVERRET
 LETTER AT LØVA ER MONTERET.*



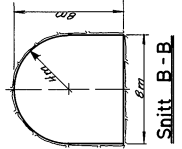
Snitt A - A



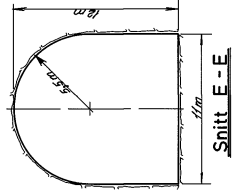
Oppriss



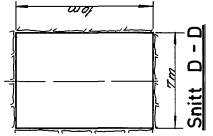
Snitt C - C



Snitt B - B

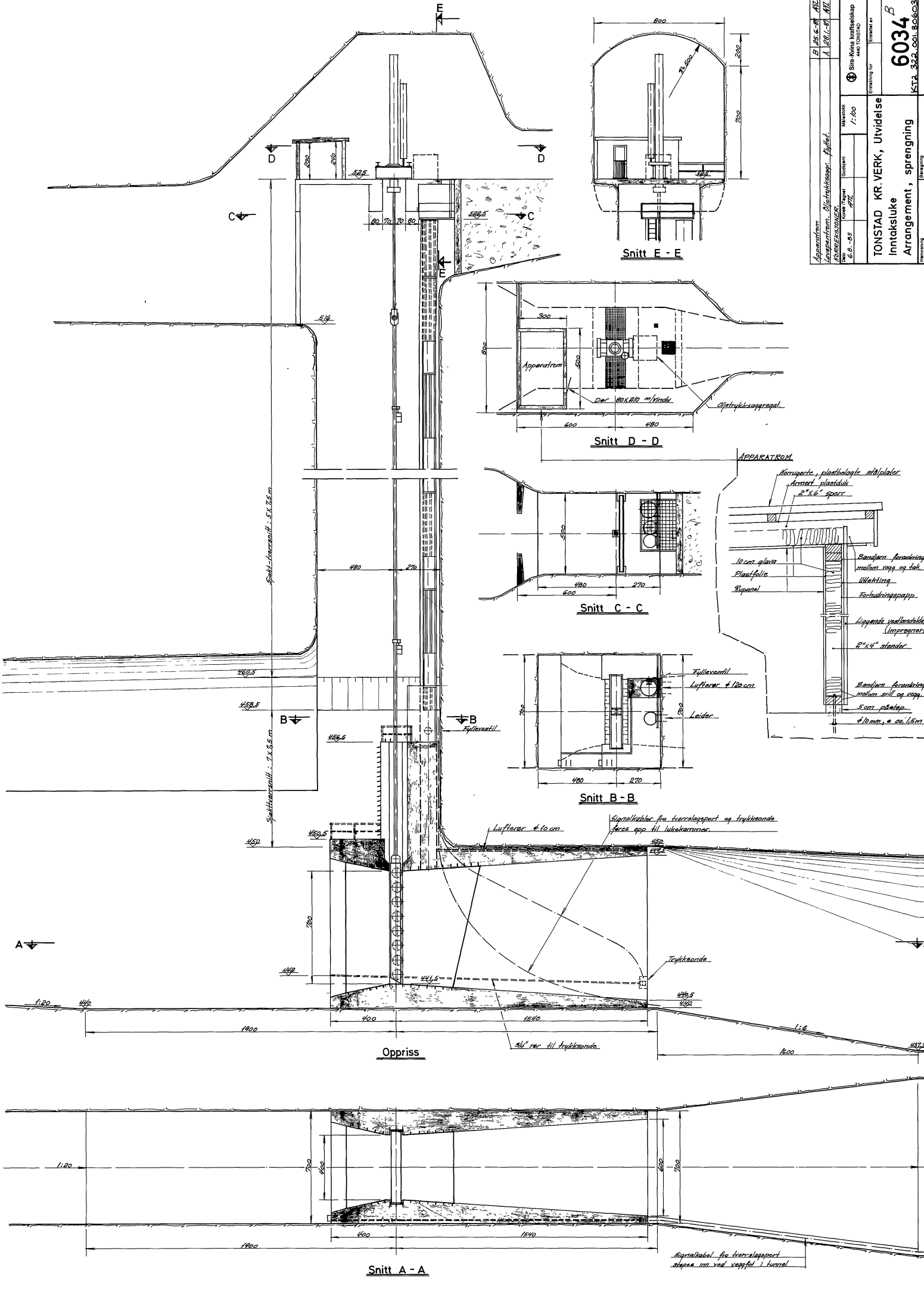


Snitt E - E



Snitt D - D

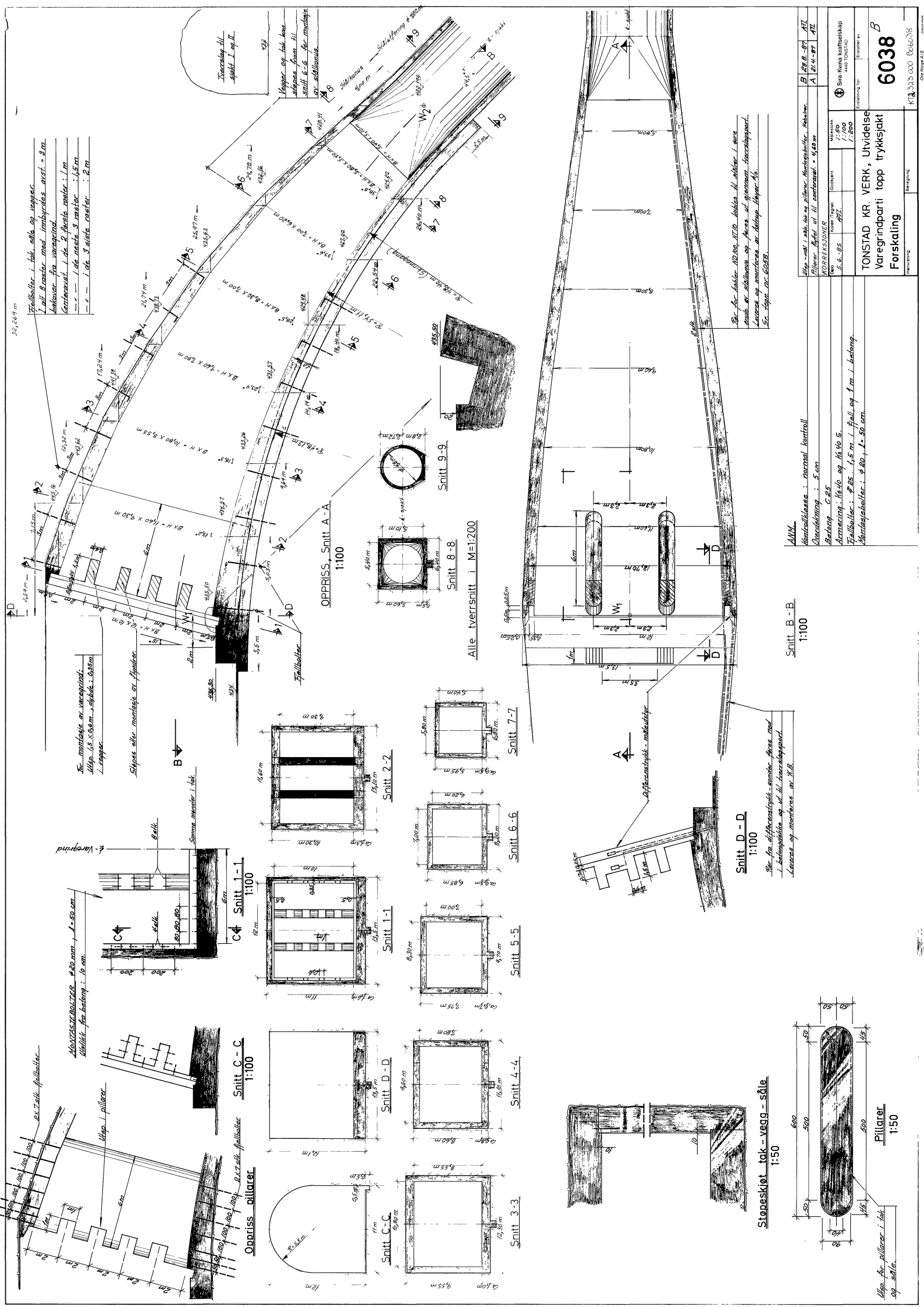
Dato	Tegn. / Tegnet	Grunnert	Målestokk	Sinningsfor	
				1:200	Blatt nr.
8.2.2022	2022			TONSTAD KR. VERK, Utvidels	
				Tiløpstunnel	
				Nedre svingekammer	
				Stikning, sprengning	
				6023	
				KT.2.22.000.8.0.6023	



Apparatrom	B 125.6-97	ATL
Apparatrom	A 126.1-97	ATL
Apparatrom	127.1-97	ATL
Apparatrom	128.1-97	ATL
Apparatrom	129.1-97	ATL
Apparatrom	130.1-97	ATL
Apparatrom	131.1-97	ATL
Apparatrom	132.1-97	ATL
Apparatrom	133.1-97	ATL
Apparatrom	134.1-97	ATL
Apparatrom	135.1-97	ATL
Apparatrom	136.1-97	ATL
Apparatrom	137.1-97	ATL
Apparatrom	138.1-97	ATL
Apparatrom	139.1-97	ATL
Apparatrom	140.1-97	ATL
Apparatrom	141.1-97	ATL
Apparatrom	142.1-97	ATL
Apparatrom	143.1-97	ATL
Apparatrom	144.1-97	ATL
Apparatrom	145.1-97	ATL
Apparatrom	146.1-97	ATL
Apparatrom	147.1-97	ATL
Apparatrom	148.1-97	ATL
Apparatrom	149.1-97	ATL
Apparatrom	150.1-97	ATL

TONSTAD KR. VERK, Utvidelse
 Intakstuke
 Arrangement, sprengning

6034 B
 KTA 302 001 816334



32,269 m
 Fallbolter i tak, søle og vegger.
 I alle 8 master med innbyttede avst. = 3 m
 behøver fra varsecapital
 Sentralt: 1 de 2 første master: 1 m
 --- 1 de neste 3 master: 1,5 m
 --- 1 de 3 siste master: 2 m

For montage av varsecapital:
 slipp 1,5 x 0,9 m - oppbehold 1,0 x 0,5 m
 i vegger.
 Slipes eller monteres av fanger.
 Samme master i tak

Trærøstehull
 skilt I og II
 Vegger og tak kan
 støttes fram til
 snitt 6-6 for montage
 av stålbein
 Stålbearbeidning
 800 m

For for holder 10 800 NCTD. holder til skilene i søle
 med av stillerene og fures ut gjennom tårnveggen.
 Løsnes og monteres av betong tårnvegg.
 Se tegning nr. 6025B

AVM.
 Kontrollklasse i normal kontroll
 Usikkerhet: 5 cm
 Bedømt C 65
 Armering: $\Phi 25$ og $\Phi 16$ to S.
 Fallbolter: $\Phi 25$, 1,5 m i fall og 1 m i betong.
 Montagebolter: $\Phi 80$, 1-20 cm.

Utsnitt: B | 22.8-87 | A71
 A | 21.4-87 | A71
 WDRREKSDNER
 5.6.83
 4971

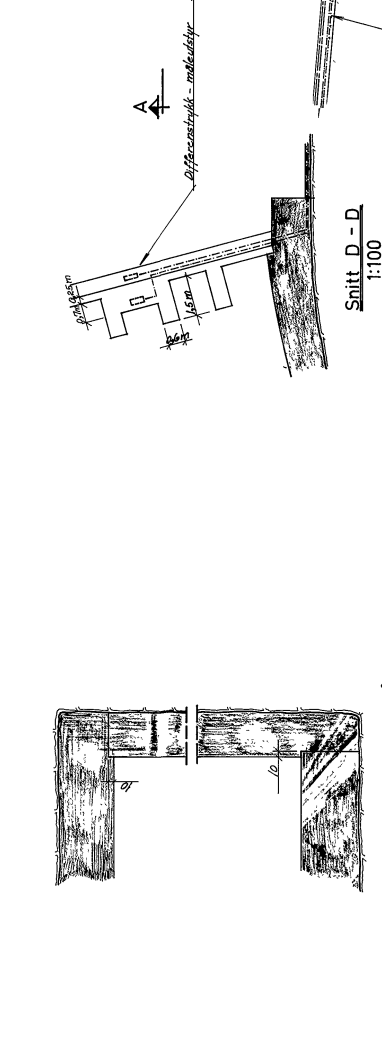
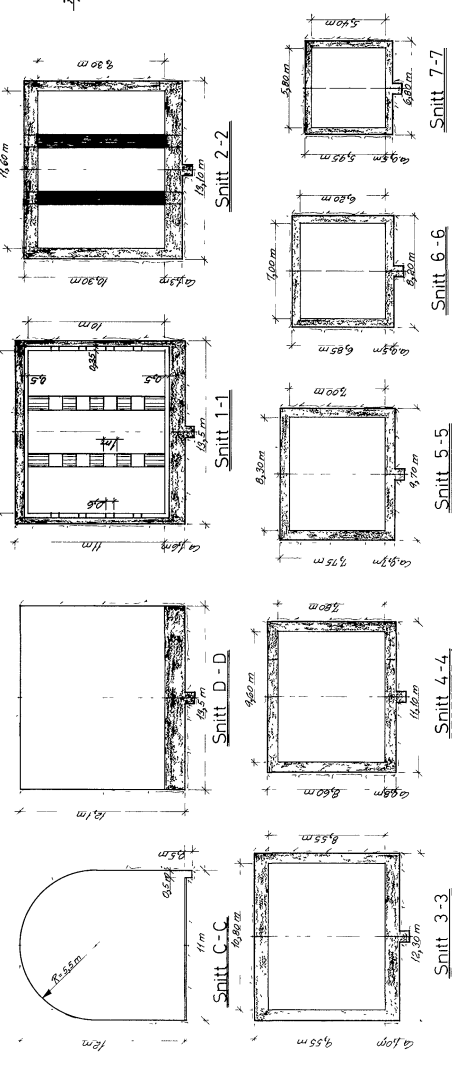
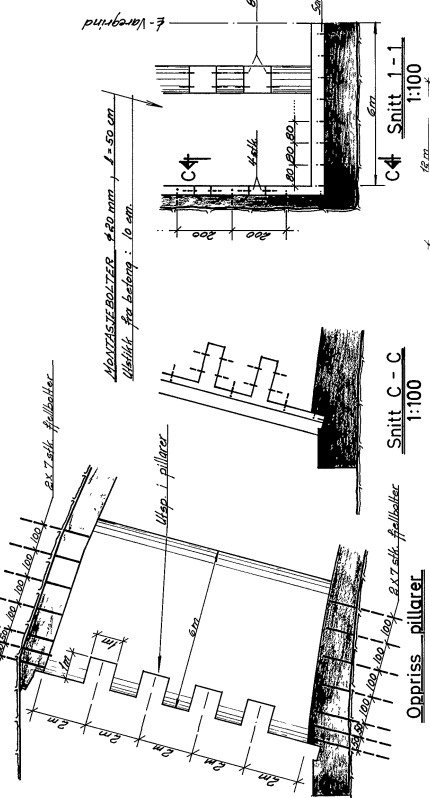
STAVANG
 1:50
 1:100
 1:200

8 Sra Kina Koffeselskap
 1440 TONSTAD
 1:200

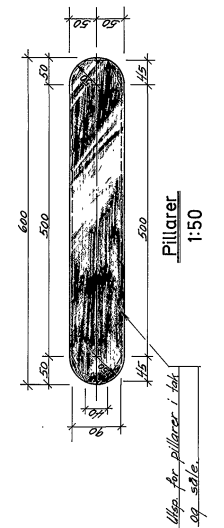
TONSTAD KR. VERK, Utvidelse
 Væregningparti topp trykksjakt
 Forskaling

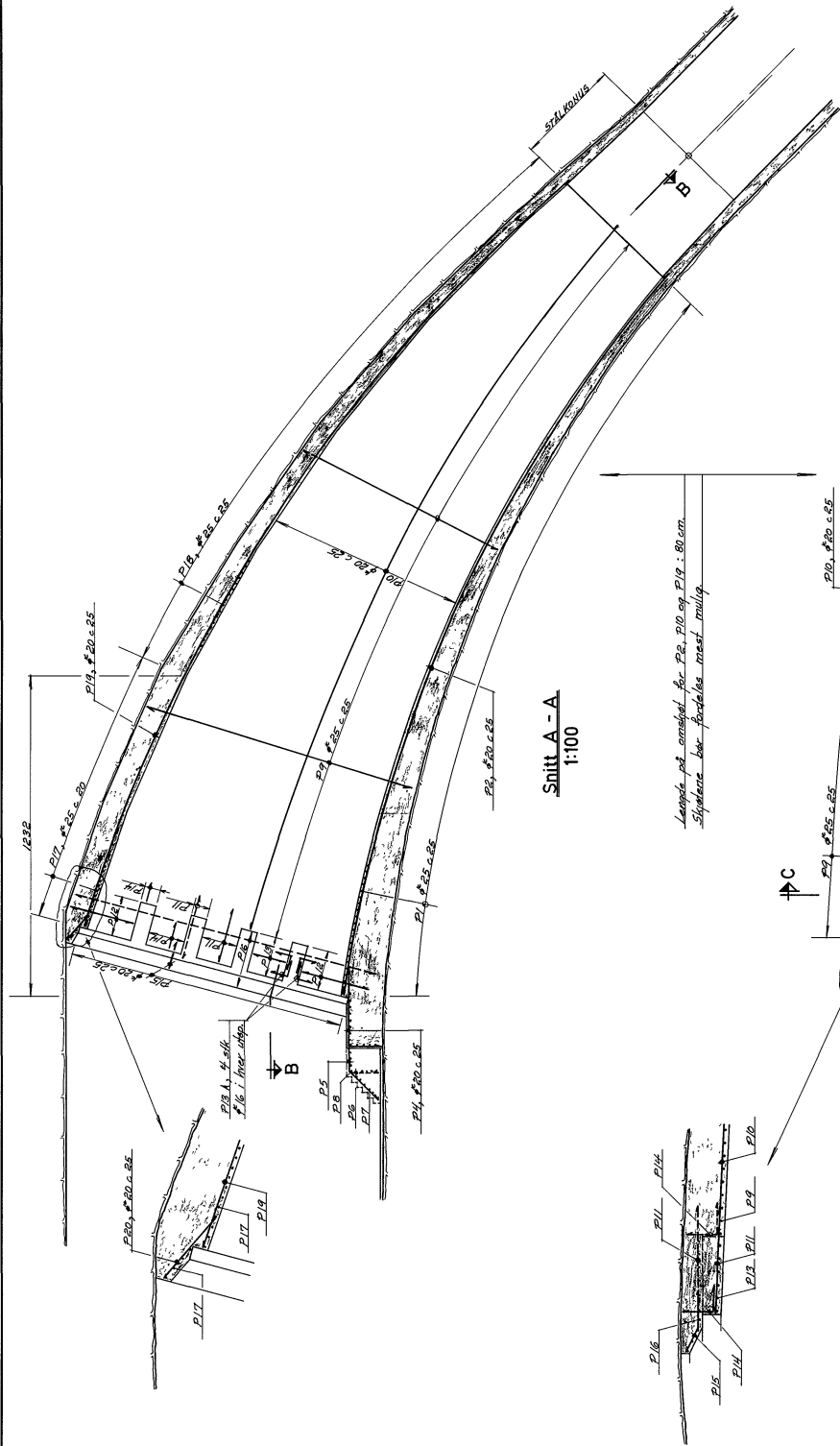
6038

K3333-000 806038
 02-Angve 413



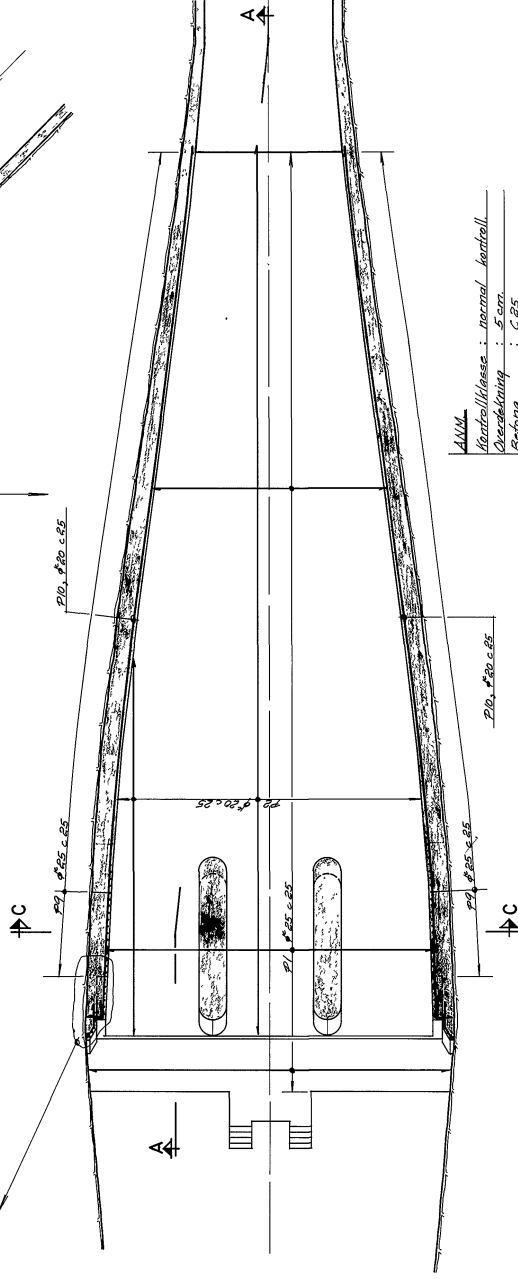
For for differensialtrykk-måler. Søle med
 i betong og ut til tårnveggen.
 Løsnes og monteres av H.B.



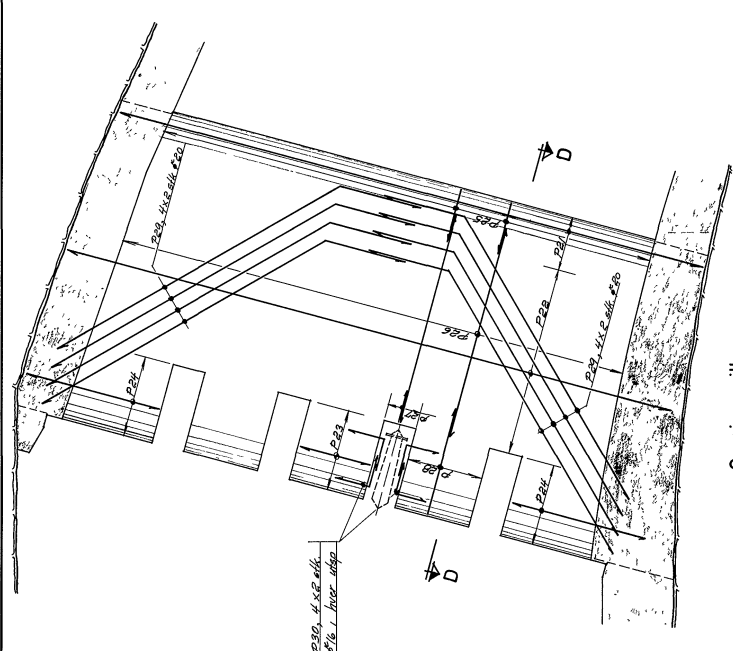


Snitt A - A
1:100

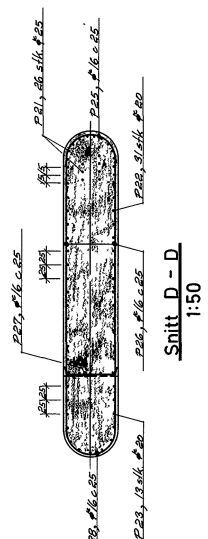
Løp på anstall for P2, P10 og P19: 80 cm.
Spalte bør fordøse mest mulig.



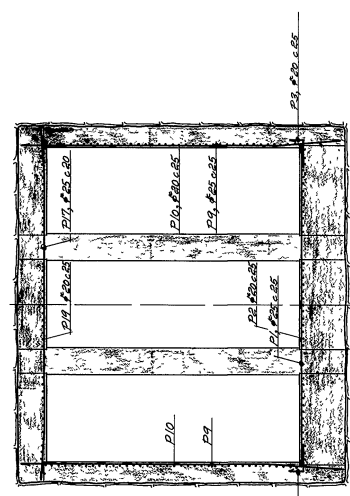
Snitt B - B
1:100



Oppriss pilar
1:50



Snitt D - D
1:50



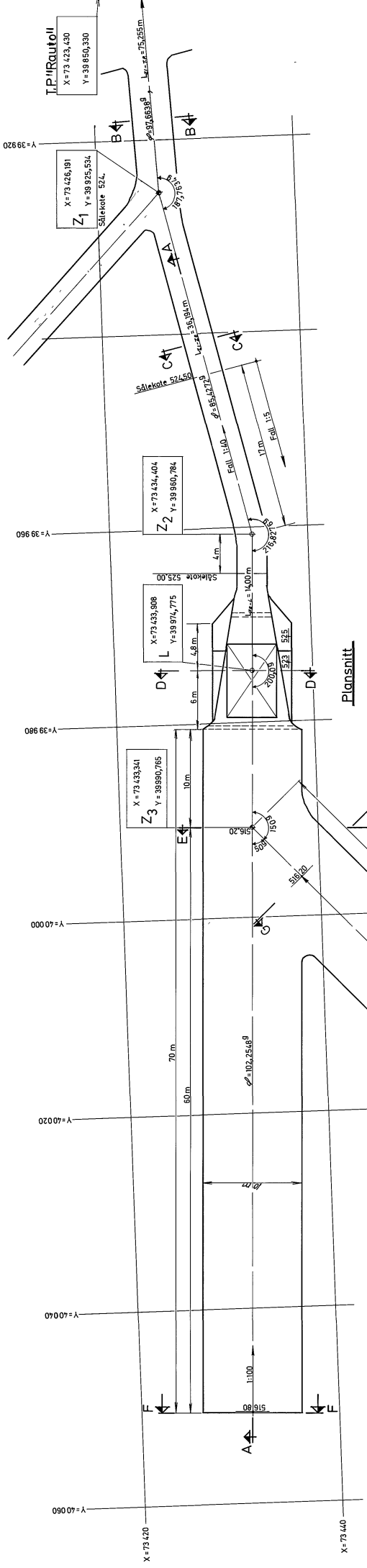
Snitt C - C
1:100

ANM.
Kontrollklasse : normal kontroll
Overvektning : 5.00
Bæring : C.B5
Armering : 14. 10 og 16. 10.5

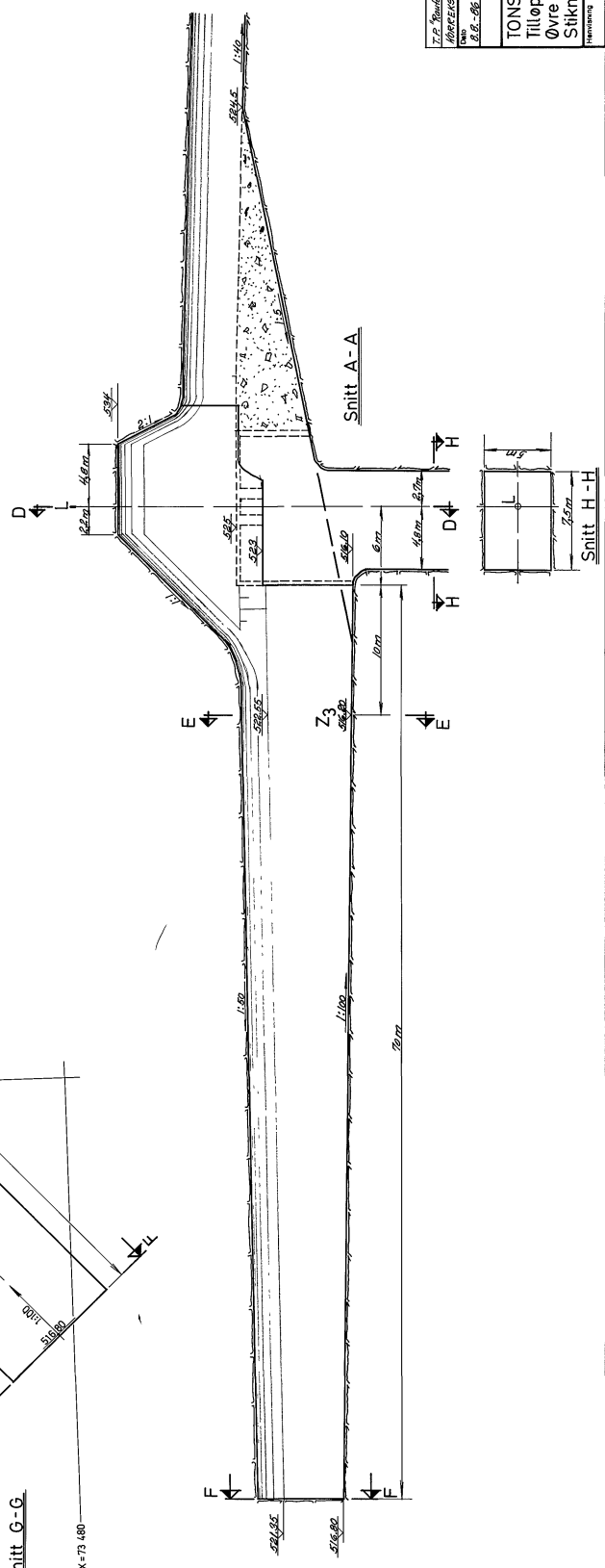
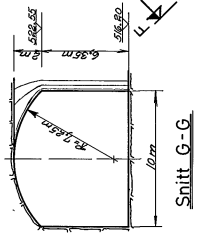
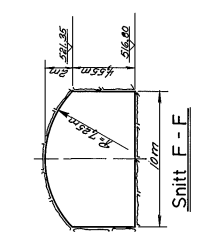
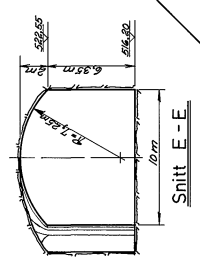
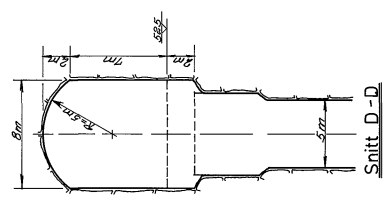
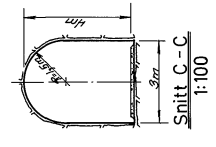
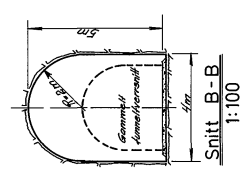
Dato 21.12.2022	Kontor/Prosjekt K22	Konstruktør K22	Målestokk 1:50 1:100	Selskap SIN KLING	Prosjekt TONSTAD	Eierskap Eierstaten av	Saksnummer 6039

TONSTAD KR. VERK, UTVISDELSE
Varegrindparti topp trykksjakt

6039
K22_223_000_B06039



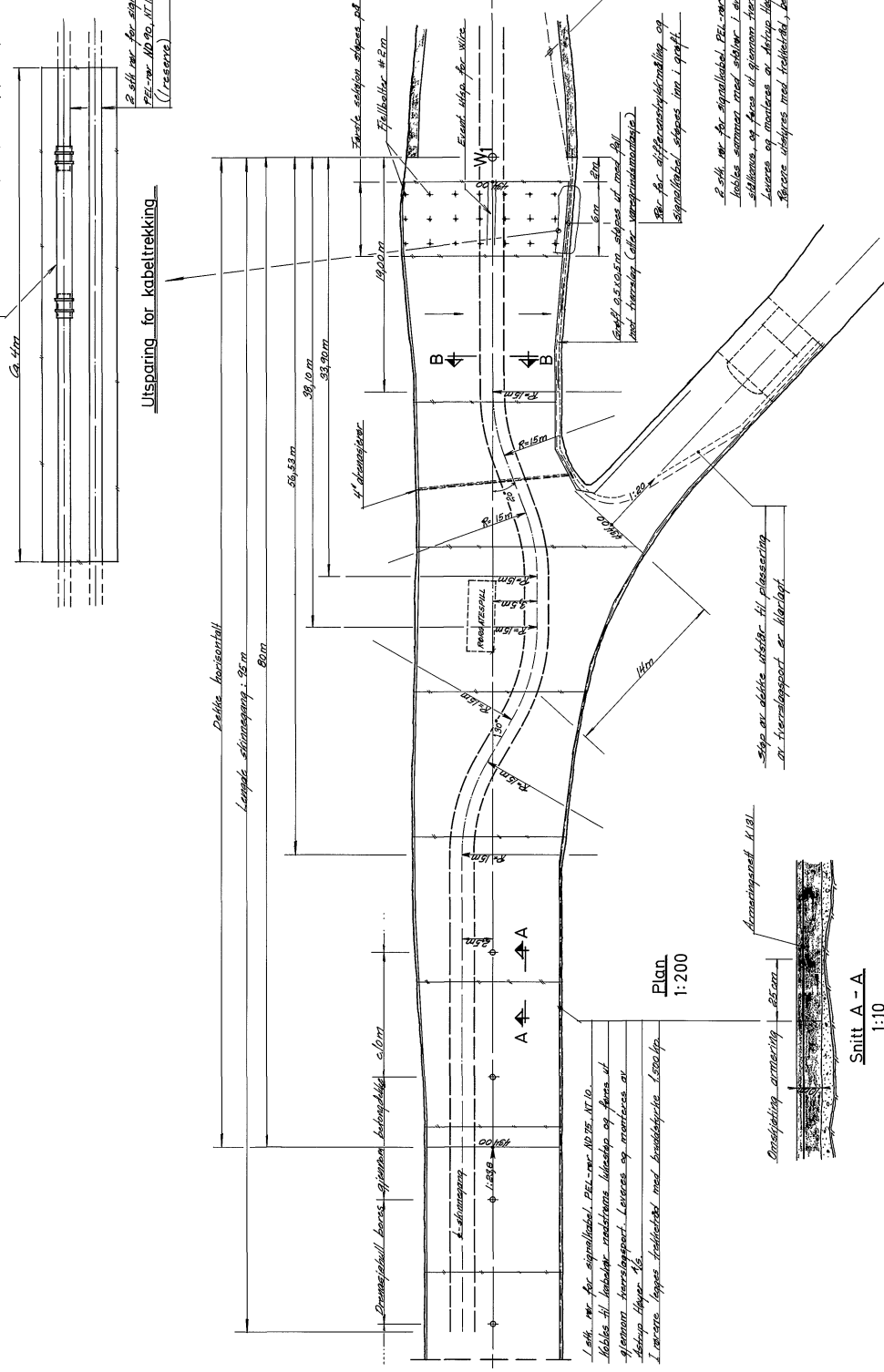
Plansnitt



Z.P. Teinäs, Offentlig svingekammer.		A		E.E. - 66	AHZ
Byggherren	Kommune	Maasstokk			
NR 262-66	7232	1:500			
TONSTAD KR. VERK, Utvidelse			Svingekammer		
Øvre svingekammer			M/lukammer		
Stikning, sprengning					
6050			A		
SK 322.001.05.05					

Pel med søn bules til indledende lag og siktes sammen med væddes stene eller til liksten er fortykket mellem horisonten og horisontsporet til siges liges.

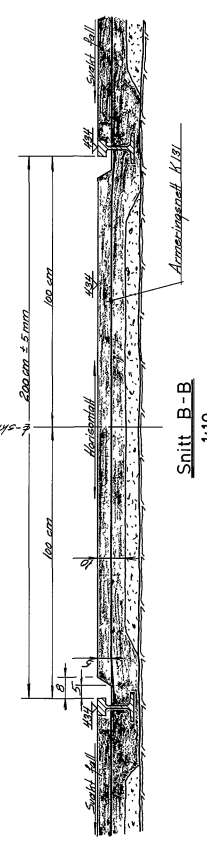
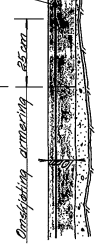
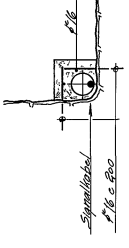
2 stk nr. for signalbøl
PEL nr. 10/20, NT/10
(Reserve)



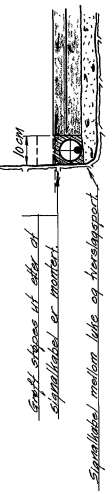
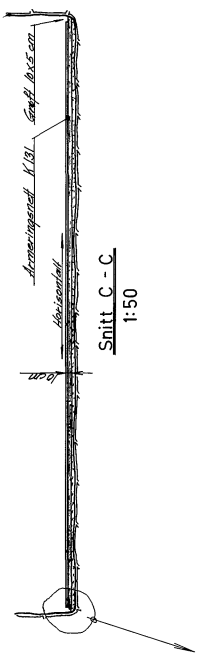
Utsparing for kabeltrekning

Deltke horisontall
Løpelt skivegang: 92m
80m

1 stk nr. for signalbøl, PEL nr. 10/20, NT/10
liktes til indledende lag og siktes sammen med væddes stene eller til liksten er fortykket mellem horisonten og horisontsporet til siges liges.
I tværsnittet lages hældningen med kullens biter 1:200.



Snitt A - A
1:10



ANMÆRKNINGER:

Overdekning : 5 cm
Betong : C 25
Armering : Armeringsnett K 181
Fjællbiter : Øyete biter, fæs. 1,5 m i fæl, og 1 m i betong.

2 stk nr. for signalbøl, PEL nr. 10/20, NT/10
liktes sammen med stene i area av siktes stene og fæsa til gjennom horisontsporet. Lagene og materialet av Armeringsnett K 181
Borene lages med hældning, belasting: 1:200
Sigs av dette indgår til finansiering av horisontsporet av horisontsporet.

D	AVZ	19.11-87
	C	18.9-87
	B	14.9-87
	A	14.1-86
	ADRESSTONER	
	Sjakk	
S	Sina-Kina kraftbøl	
	Ettasing for	
	Ettasing for	
6058		
TONSTAD KR. VERK, Utvidelse		
Tiltøpstunnel		
Betongdekket mellom vøre-grind og luke		
KTB. 3.1. del. 6058		