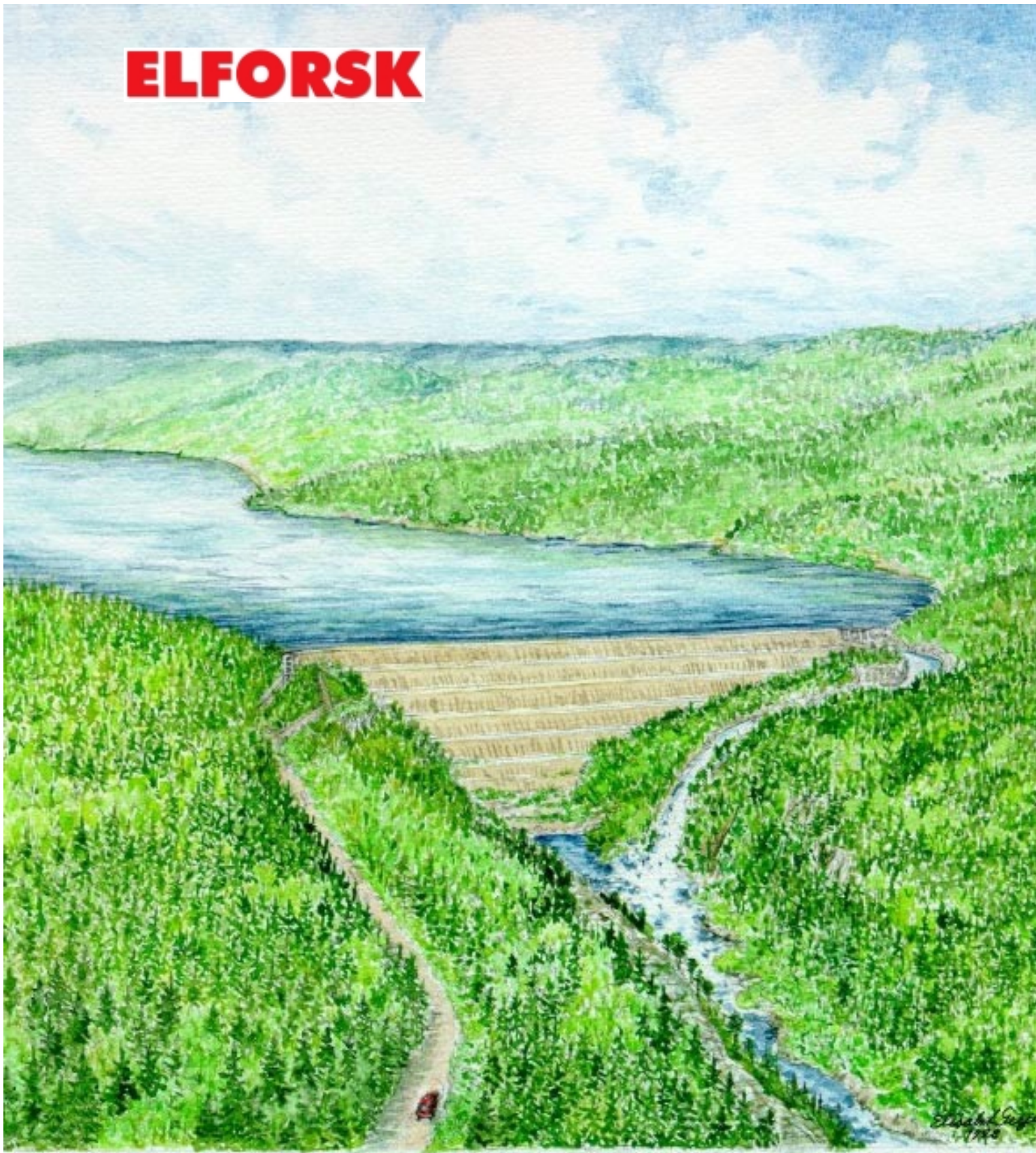


ELFORSK



DAMMSÄKERHET

**Avbördning i utskov – Jämförande studie mellan
beräkningar och fysiska modellprov**

**Rapport 99:11
Juni 99**

DAMMSÄKERHET

**Avbördning i utskov – Jämförande studie mellan
beräkningar och fysiska modellprov**

**Rapport 99:11
Juni 99**

Förord

De nya riktlinjerna för flödesdimensionering i Sverige medförde behov av en översyn av dimensioneringen för existerande dammar, vilken fått formen av älvvis dimensionering. Det är därvid naturligtvis av grundläggande betydelse att de i detta arbete använda ingångsparametrarna är korrekta. En av dessa parametrar är avbördningsförmågan hos utskoven, vilken ofta grundar sig på modellförsök gjorda i samband med den ursprungliga projekteringen. I några fall kan även beräkning ha skett med utgångspunkt från avbördningsstabeller för olika utskovstyper etc. I samband med dimensioneringen finns ofta även behov av att extrapolera avbördningsförmågan för vattennivåer över normalt tillåten dämningssgräns, vilket (med hänsyn till vattendom) enbart kan göras med modellförsök eller matematiska beräkningar.

Generellt bedöms modellförsök ge den bästa noggrannheten, men utvecklingen inom databeräkningstekniken har varit snabb liksom datorernas kapacitet. Detta har varit anledningen till detta projekt, som syftar till att ge en uppfattning om vilken noggrannhet som kan uppnås med databeräkningar, så kallad CFD-teknik. På sikt är förhoppningen att denna teknik skall ge resultat likvärdiga med modellförsök och fördelaktiga ur kostnadssynpunkt.

Författare till rapporten är:

**Farid Alavyoon
Jonas Rundqvist**

**Vattenfall Utveckling AB
SWECO**

SAMMANFATTNING

INLEDNING

De nya Svenska riktlinjerna för beräkning av dimensionerande flöden i våra älvar har medfört ett behov att bestämma och i förekommande fall uppgradera avbördningskapaciteten hos utskoven i dammarna. Vid utvärderingar har det, nationellt och internationellt, noterats att utskovskapaciteten ofta varit lägre än förväntat. Kostnadseffektiva metoder att verifiera utskovskapacitet hos såväl nya som äldre utskov är följaktligen viktiga att utveckla. Matematisk modellering som en ersättning/komplement till fysiska modellförsök har på senare tid blivit allt mer aktuell.

UNDERSÖKNINGEN

Föreliggande studie undersöker möjligheterna att med hjälp av CFD (Computational Fluid Dynamics) beräkna avbördningskapaciteten i utskov. Sex olika utskovskonfigurationer, inkluderande fyra standard WES-profiler och två icke standard-profiler, är testade. Studien består av tre delar. Del ett bestod av fysiska modellförsök för fastställande av utskovskapaciteten. Dessa utfördes i en ränna på KTH. Del två bestod i motsvarande CFD-beräkning och del tre i beräkning av kapaciteten med hjälp av två olika s.k. "handräkningsmetoder". Alla mätningar och beräkningar utfördes oberoende av varandra och mätningarna utfördes efter det att beräkningarna slutförts. CFD-beräkningarna utfördes med de kommersiella programpaketerna CFX, PHOENICS och FLUENT.

SLUTSATSER

CFD-beräkningarnas resultat stämde väl överens med uppmätta värden. Största skillnaderna fanns vid låga flöden. Dessa skillnader kan förklaras med att upplösningen på beräkningarna då var lägre eftersom fast rumsupplösning användes i den geometriska beskrivningen. Vid högre flöden avvek beräkningarna genomgående med mindre än 3% från mätningarna, vilket uppskattades vara det maximala mätfelet vid de fysiska modellförsöken. Resultaten pekade inte heller på någon skillnad mellan de olika programpaketerna eller mellan olika användare (alla kvalificerade strömningstekniker). Slutsatsen är att CFD-beräkningar tekniskt klarar av att med god noggrannhet beräkna utskovskapacitet om tillräcklig geometrisk upplösning nyttjas i beräkningarna.

Samtidigt kan det vara värt att notera att beräkningarna tog mellan en och tre CPU-veckor per beräkningsfall på kraftfulla arbetsstationer (1997). Så i verkligheten kan man nog fortfarande dra slutsatsen att det inte är ett fullt ut praktiskt användbart verktyg för att räkna på ännu mer komplicerade naturliga fall. Å andra sidan ökar beräkningsprestanda mycket snabbt varför framtiden för denna typ av beräkningar ändå måste bedömas som ljus.

SUMMARY

INTRODUCTION

New Swedish guidelines for design flood have resulted in need of increased spillway capacity in a number of existing dams in Sweden. During safety re-evaluations of existing dams, full-scale tests of spillways have sometimes been carried out and often, both abroad and in Sweden, the capacity has been less than expected and other problems have also been revealed. Thus methods to verify the discharge capacity are important for new spillways as well as for old ones. As an alternative for physical model testing mathematical modelling is becoming increasingly attractive.

TESTS

The present investigation explores the possibility of flow simulation over spillways by use of CFD-computations. Six different spillway configurations are tested. They include four standard WES spillways and two nonstandard. The study consists of three parts. Part one is a physical model test of the discharge capacity, which was made at the Royal Institute of Technology in Stockholm. Part two is the corresponding CFD-calculation and part three is a calculation of the discharge by means of standard calculation methods based on estimation of discharge coefficients. All measurements and calculations were done totally independent of each other, and the tests were made after the calculations.

The mathematical models were built with help of the commercial program codes CFX, FLUENT and PHOENICS.

CONCLUSIONS

The CFD-calculations produce results in good correspondence with the measured levels. The most significant differences are for the cases with low flow. This can be explained by the in general lower relative resolution used for these cases. The high flow cases are calculated with differences from the measured ones well within the maximum error (3%) of the measurements. The results show no significant difference in accuracy between the tested program codes or between different users of the same code. The conclusion from this is that CFD-calculations can, if good enough grid resolution is used, predict the discharge from spillways.

On the other hand, these calculations took ranging from one to three CPU-weeks per flow case on fairly powerful workstations. So, it is still not a very practical tool for even more complicated natural cases, for example where upstream parts of the river has to be incorporated. On the other hand the quick development within the computer area with ever faster processors will make the future more bright for the CFD-option.

Innehållsförteckning

1	PRESENTATION AV BERÄKNINGSFALLEN	5
1.1	FALL 2 (VBB+VUAB)	5
1.2	FALL 3 (VUAB)	6
1.3	FALL 4 (VUAB)	7
1.4	FALL 5 (VBB)	8
1.5	FALL 6 (VUAB)	9
1.6	FALL 7 (VBB)	11
2	MÄTRESULTAT I FYSISK MODELL (KTH)	13
2.1	INLEDNING	13
2.2	MODELLFÖRSÖK	13
2.3	KALIBRERING AV RÄNNAN	14
2.4	MÄTNING AV FLÖDEN	14
2.5	FELANALYS	15
2.6	SAMMANFATTNING AV MÄTRESULTATEN	16
3	MATEMATISK MODELLBERÄKNING, VUAB	17
3.1	ALLMÄNT OM PROGRAMSYSTEM	17
3.2	FYSIKALISK MODELL	17
3.3	NUMERISK MODELL	19
3.4	ALLMÄNT OM RANDVILLKOREN	21
3.5	BEGYNNELSEVILLKOR	22
4	MATEMATISK MODELLBERÄKNING, VBB	23
4.1	ALLMÄNT OM PROGRAMSYSTEMET FLUENT	23
4.2	BERÄKNINGSMETODIK	25
4.3	FELUPPSKATTNING	25
5	BERÄKNINGSMODELLER	31
5.1	FALL 2 (VBB)	31
5.2	FALL 2 (VUAB)	32
5.3	FALL 3 (VUAB)	33
5.4	FALL 4 (VUAB)	33
5.5	FALL 5 (VBB)	33
5.6	FALL 6 (VUAB)	34
5.7	FALL 7 (VBB)	34
6	BERÄKNINGSRESULTAT	37
6.1	BERÄKNINGSRESULTAT FRÅN VBB	37
6.2	BERÄKNINGSRESULTAT (VUAB)	40
7	HANDBERÄKNINGAR	45
8	FELANALYS	47
9	SAMMANFATTNING AV RESULTATEN	49
10	REFERENSER	51
11	BILAGOR	53

Inledning

Bestämning av utskovskapacitet är viktig för både nya utskov på projekteringsstadiet och befintliga utskov där tveksamhet råder om utskovens verkliga avbördningskapacitet. Som ett alternativ till fysiska modeller börjar nu matematiska modeller bli användbara, men det är oklart vilka begränsningar de har och vilken noggrannhet man kan förvänta sig.

I föreliggande rapport redovisas resultaten av beräkningar som VBB Anläggning (numera SWECO) och Vattenfall Utveckling AB (VUAB) har utfört på uppdrag av Elforsk AB. Uppdragets främsta syfte är att undersöka om matematiska modeller tillgängliga i kommersiella datorprogram kan utnyttjas för att bestämma avbördningskapacitet hos ytutskov.

VUAB har utfört beräkningar med programmen PHOENICS (ref. 1), CFX (ref. 2) och FLUENT (ref. 3). Den andra parten i detta projekt, VBB Anläggning, har utfört beräkningar med programmet FLUENT. Institutionen för Vattenbyggnad på KTH har utfört rännförsök som verifieringsunderlag.

Underlag i form av geometri- och flödesdata för samtliga beräkningar har framtagits av, eller i samarbete med, KTH.

1 Presentation av beräkningsfallen

Inom ramen för detta projekt har VUAB utfört fyra beräkningar med avseende på geometri och VBB har utfört tre beräkningar. Observera att numrering av de olika fallen som presenteras nedan är vald sådan att den stämmer med den gemensamma offert som ursprungligen lämnades. Fall 1 enligt offerten beställdes aldrig och har följaktligen inte beräknats. Fall 2 är beräknat av både VBB och VUAB. Fall 3, 4, och 6 har beräknats av VUAB och 5 och 7 har beräknats av VBB.

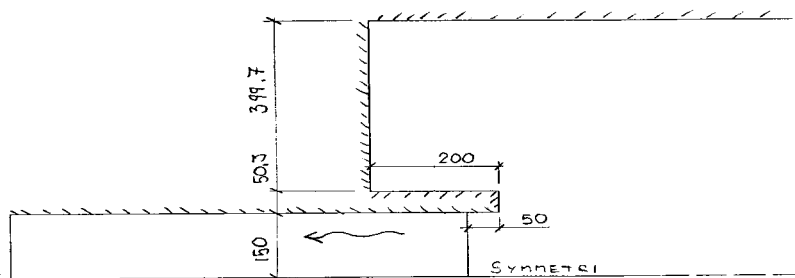
För varje fall har, bland annat, vattenståndet 1,5 m uppströms utskovets vertikala front bestämts för tre olika flöden. Flödena har valts så att vattenståndet bedömdes motsvara ungefär 0.5, 1.0 och 1.5 gånger utskovets konstruktionshöjd eller ungefär 0.1, 0.2 och 0.3 m överfallshöjd.

(Varje försök har alltså genomförts så att man anpassat flödet tills vattennivån stabiliserats vid en förutbestämd nivå (100, 200 eller 300 mm). Med detta flöde har vattennivån och flödet noggrant bestämts. Vid beräkningarna har geometrin och flödet för de olika fallen varit utgångspunkten. Nedan beskrivs de undersökta fallen:

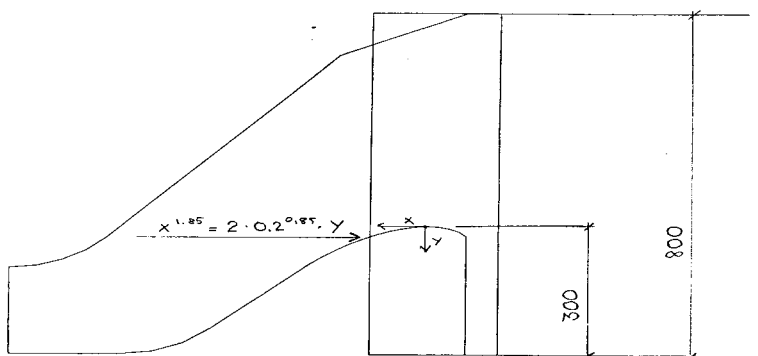
1.1 Fall 2 (VBB+VUAB)

Fall 2 består av ett 0,3 m brett utskov som är placerat centriskt i en 1,2 m bred kanal. Utskovet omgärdas av sidopelare som skjuter fram 0,05 m framför utskovets vertikala uppströmskant. Sidopelarna är helt rektangulära och saknar alltså rundning. Utskovet har WES-profil med konstruktionshöjden 0,2 m. Tröskelns höjd över den horisontella uppströmsbotten är 0,3 m. Skibordet följer WES-profilen tills lutningen 1:1 nås. Skibordet avslutas med en 0,2 m radie. Botten nedströms utskovet är på samma nivå som botten uppströms utskovet. Se bild 1.

Fall 2 har studerats för tre olika avbördningar, som antas motsvara vattennivåer uppströms utskovet på omkring 0,1 m, 0,2 m respektive 0,3 m över utskovströskeln.



Plan



Längdsektion

Bild 1. Modellens geometri, fall 2

1.2 Fall 3 (VUAB)

Geometrin för detta fall visas i bild 2. Utskovet är, som i fall 2, en WES profil (se bild 1) begränsad av två pelare. Pelarnosarna är halvcylindriska med en radie av 0,05 m. Hela utskovspaketet är vridet 15 grader i förhållande till normalen mot rännans sidoväggar. Detta leder till en sned och osymmetrisk tillströmning mot utskovet.

Fall 3 har studerats för tre olika avbördningar, som antas motsvara vattennivåer uppströms utskovet på omkring 0,1 m, 0,2 m respektive 0,3 m över utskovströskeln. Endast datorprogrammet CFX har använts för beräkningar av fall 3.

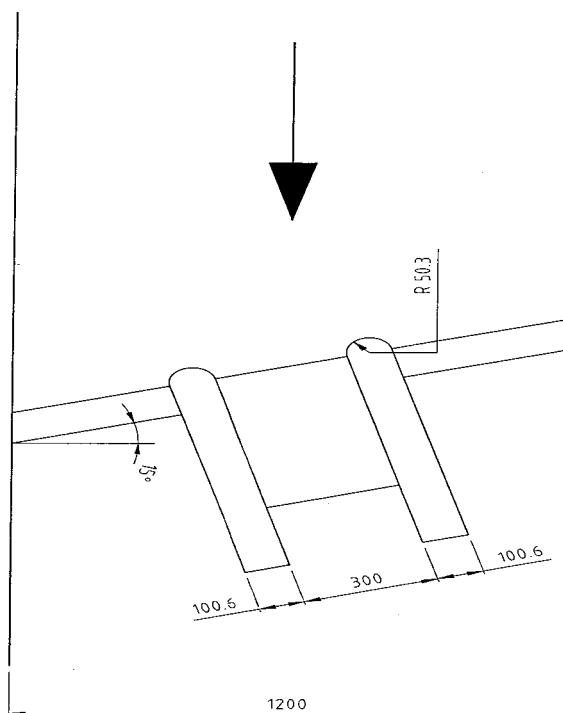


Bild 2. Modellens geometri, fall 3.

1.3 Fall 4 (VUAB)

I det här fallet är utskovet, liksom i fall 2, utformat enligt WES, och tillströmningen är rak. Pelarnosarna är, som i fall 3, halvcylindriska. På uppströmssidan är vattnet grunt med betydande bottenråhet. Det sistnämnda skapas genom att placera makadam på en blindbotten, se bild 3. I modellen ligger botten uppströms utskovet 0,025 m under utskovets tröskelnivå. I själva verket är denna höjd den ekvivalenta bottennivån efter det att hänsyn har tagits till makadam som ligger på botten. Området med makadam sträcker sig fem meter uppströms utskovet.

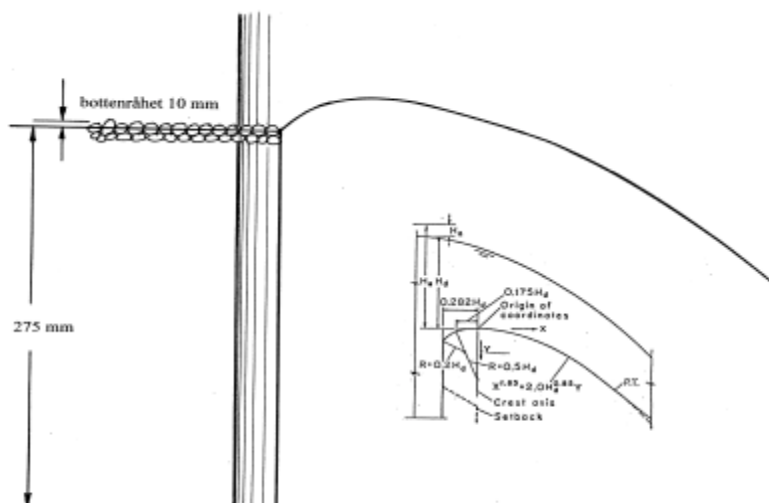


Bild 3. Modellens geometri, fall 4.

Fall 4 har studerats för tre olika avbördningar, som antas motsvara vattennivåer uppströms utskovet på omkring 0,1 m, 0,2 m respektive 0,3 m över utskovströskeln. Endast CFX har använts för beräkningar av fall 4.

1.4 Fall 5 (VBB)

Fall 5 består, liksom fall 2, av ett 0,3 m brett utskov som är placerat centriskt i en 1,2 m bred kanal. Utskovet omgärdas av sidopelare som skjuter fram 0,0503 m framför utskovets vertikala uppströmskant. Sidopelarna är 0,1006 m breda och har en rundning inåt utskovet med radien 0,0503 m. Utskovet har WES-profil med konstruktionshöjden 0,2 m. Tröskelns höjd över den horisontella uppströmsbotten är 0,05 m. Skibordet följer WES-profilen tills lutningen 1:1 nås. Skibordet avslutas med en 0,2 m radie. Botten nedströms utskovet ligger 0,30 m under tröskelkrönet. Sidopelarna slutar där botten blir horisontell nedströms utskovet. Kanalen vidgas där till 0,38 m bredd. Se bild 4.

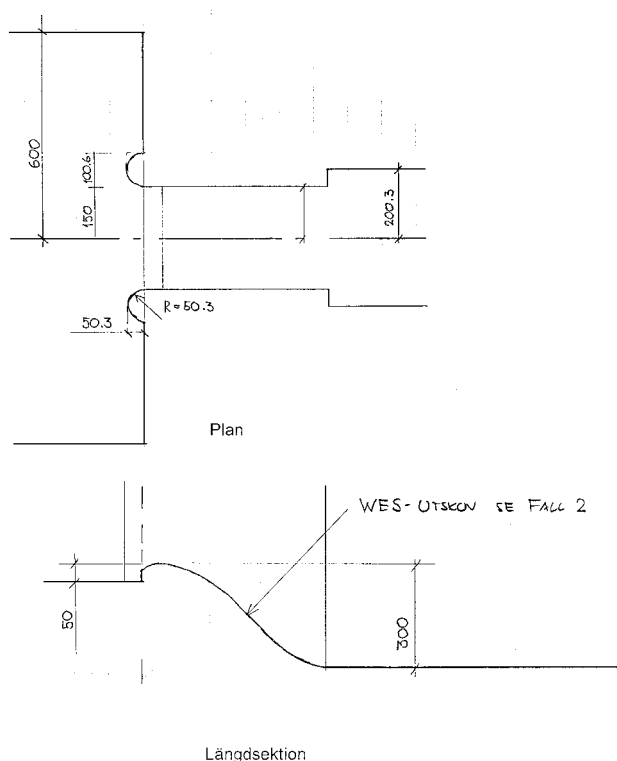


Bild 4. Modellens geometri, fall 5.

Fall 5 studeras för 3 olika kombinationer av avbördningar och nedströmsvattennivåer. Dessa antas motsvara vattennivåer på 0,10 m, 0,20 m och 0,30 m uppströms tröskeln, med en förväntad indämning på mellan 5 och 25 % nedströms ifrån.

1.5 Fall 6 (VUAB)

I detta fall har utskovet en flack och nästan horisontell profil, motsvarande en ombyggd flottningsränna, se bild 5 och 6. Tillströmningen är rak med djupt vatten uppströms. Intaget är avrundat som kvartscylindrar med en radie av 0,05 m. Koordinaterna för utskovets profil är givna i tabell 1

<u>X' (m)</u>	<u>Y' (m)</u>
0,00	0,3000
0,05	0,2992
0,10	0,2980
0,15	0,2952
0,20	0,2916
0,25	0,2848
0,30	0,2800
0,35	0,2724
0,40	0,2676
0,45	0,2596
0,50	0,2516
0,55	0,2400
0,60	0,2288
0,65	0,2180
0,70	0,2048
0,75	0,1956
0,80	0,1860
0,85	0,1780
0,90	0,1720
0,95	0,1660
1,00	0,1600

Tabell 1: Flottningsrännans profil
(Koordinaten X' räknas från utskovets frontkant och tröskeln ligger på höjden Y' = +0,30 m)

Fall 6 har studerats för tre olika avbördningar, som antas motsvara vattennivåer uppströms utskovet på omkring 0,1 m, 0,2 m respektive 0,3 m över utskovströskeln. Endast CFX har använts för beräkningar av fall 6.

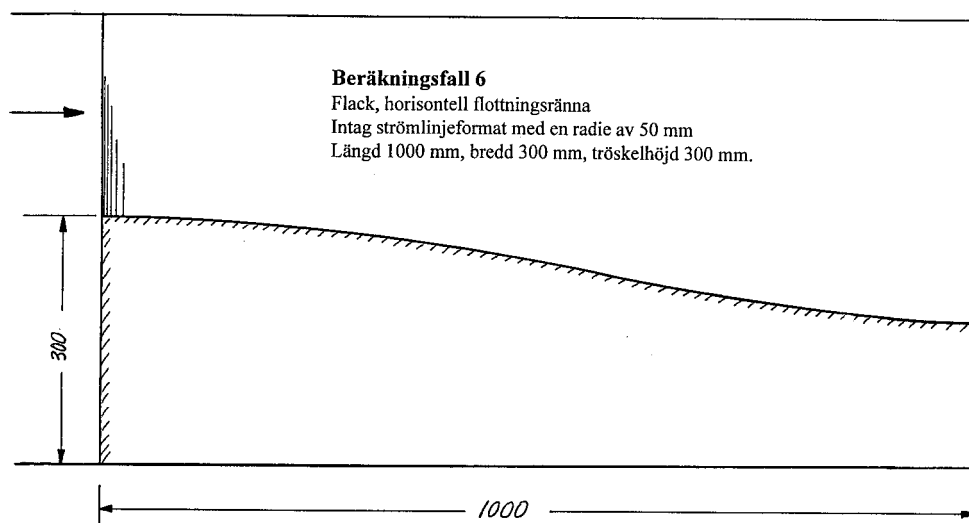


Bild 5. Längdsnitt av modellen, fall 6

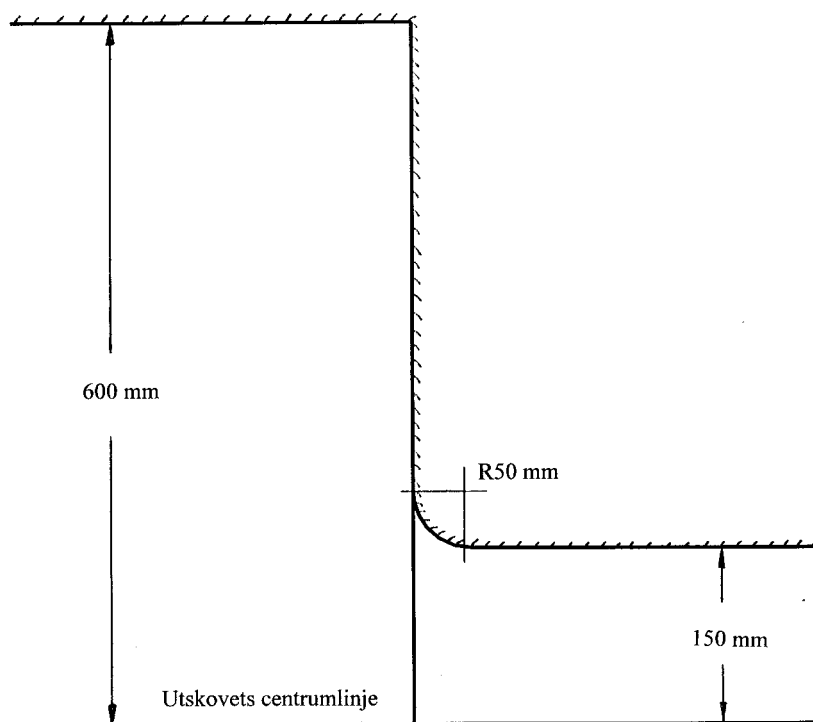


Bild 6. Modellens geometri, fall 6.

1.6 Fall 7 (VBB)

Liksom de övriga fallen, består fall 7 av ett 0,3 m brett utskov som är centriskt placerat i en 1,2 m bred kanal. Tröskelns höjd är 0,05 m över kanalens botten. Tröskelns form är kantig med en uppströmsyta som lutar 1:1, har ett horisontellt krönparti som sträcker sig 0,03 m nedströms och som avslutas med en vertikal nedströmskant med 0,05 m höjd. Nedströms detta faller botten undan 0,07 m på en sträcka av 0,17 m, och därefter faller botten med 3% i strömriktningen. Utskovet omgärdas av sidopelare som skjuter fram 0,0503 m uppströms utskovets lutande uppströmsyta. Pelarnas uppströmsändar är rundade med radien 0,0503 m. Nedströmskanalen har samma bredd som utskovet, dvs 0,3 m. Se bild 3.

Fall 7 studeras för tre olika avbördningar som förväntas motsvara vattennivåer på 0,1 m, 0,2 m och 0,3 m över tröskelns krön.

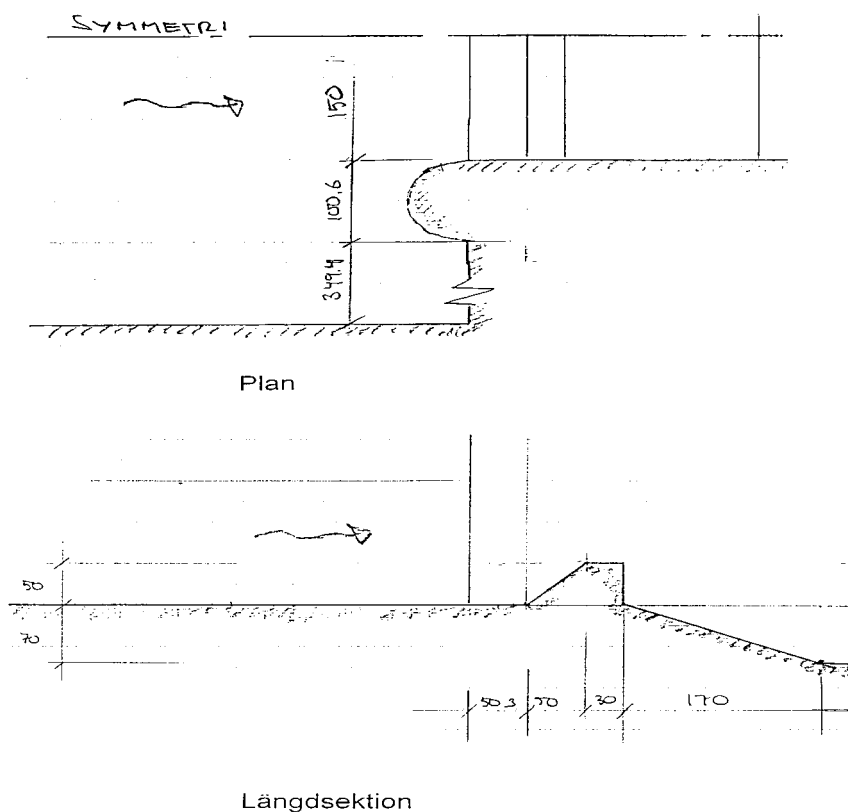


Bild 7. Modellens geometri, fall 7.

2 Mätresultat i fysisk modell (KTH)

2.1 Inledning

KTH's uppgift har varit att bestämma avbördningsförmågan för utskoven med hjälp av fysiska modellförsök. Resultaten har därefter använts för verifiering av de matematiska modellstudier som utförts av VBB och Vattenfall. Sex olika fall har studerats.

Modellförsöken har omfattat mätning av vattenstånd och hastighetsprofiler. De företag som gjort beräkningarna har inte haft tillgång till information från modellförsöken.

2.2 Modellförsök

Undersökningen har genomförts i en ränna 38,5 m lång, 1,2 m bred och 0,8 m djup. Mätsektionen var placerad 28 m nedströms inloppet. Flödet till rännan har mätts med hjälp av ett mätöverfall. Utskovets bredd var 0,3 m. Sex olika fall har studerats (fall 2-7). Utskoven var konstruerade enligt WES standard och konstruktionshöjden var 0,2 m för fall 2 till 5. I fall 6 och 7 har specialutformade utskov testats. Undersökningen avser helt öppna utskov vid en överfallshöjden (H) på ungefär 0,1, 0,2 och 0,3 m i samtliga fall. Utskovsdetaljer presenteras i tabell 2.

Utskoven byggdes i rostfritt stål för att simulera en hydrauliskt glatt yta. Pelarnosarna tillverkades i Plexiglas och övriga delar i plywood.

Fall	Strömriktning	Pelare	Uppströmråhet	Nedströms vattennivå
2	0°	Rektangulär	0	Kritisk
3	15°	Cirkulär	0	Kritisk
4	0°	Cirkulär	32-64 mm	Kritisk
5	0°	Cirkulär	0	Motdämning
6	0°	Cirkulär	0	Kritisk
7	0°	Cirkulär	0	Kritisk

Tabell 2 Utskovsdetaljer

Bild 8 och 9 visar koordinatsystemet. Pelarnosen var placerad vid $X=195\text{cm}$ i samtliga fall och rännans botten är noll nivån.

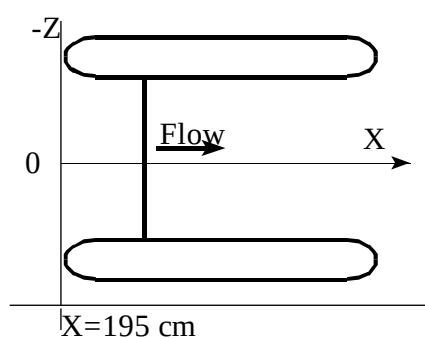


Bild 8. Planvy över koordinatsystemet använt vid modellförsöken.

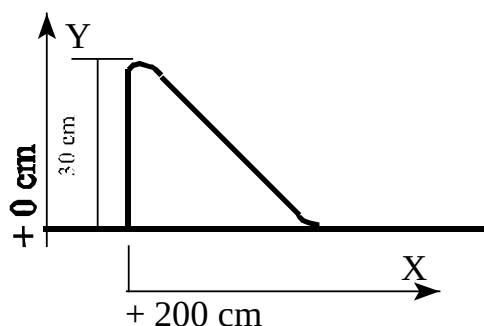


Bild 9. Sidovy över koordinatsystemet använt vid modellförsöken.

2.3 Kalibrering av rännan

För att uppnå korrekta strömningsförhållanden i rännan måste följande villkor uppfyllas:

1. Fullt utvecklad turbulent strömning
2. Symmetrisk hastighetsprofil i sidled

Mätning av hastighetsprofiler vid $Re=41600$ visade att villkor 1 och 2 gällde i rännan.

2.4 Mätning av flöden

Ett grundläggande krav har varit att mäta flöden med stor noggrannhet. Två olika mätmetoder har använts, den ena med hjälp av ett mätöverfall och den andra med en magnetisk flödesmätare. Det befintliga mätsystemet gav bra noggrannhet vid flöden över 30 l/s. Den magnetiska flödesmätaren användes för kalibrering vid flöden under 30 l/s. Tre oberoende mätningar gjordes för flöden i intervallet 1,5 l/s till 35 l/s. Sedan jämfördes resultat med mätöverfallsmätningar (Figur 10).

N_d är differensen mellan mätöverfallets och den magnetiska flödesmätarens värde, normaliserade med det tidigare värdet. Den maximala avvikelsen mellan de två olika

mätmetoderna är 0,6%. För att få större mätnoggrannhet vid låga flöden anpassades en tredjegradspolynom till mätdata erhållna från den magnetiska flödesmätaren. (Lokala förhållanden omöjliggjorde genomgående mätning med den magnetiska flödesmätaren, vilket varit att föredra ur noggrannhetssynpunkt.)

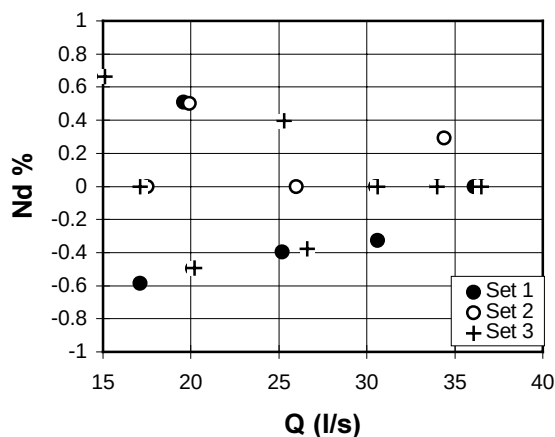


Bild 10. En jämförelse mellan mätöverfall och magnetiska flödesmätare.

2.5 Felanalys

Det finns två typer av fel, dels byggfel som är relaterat till modellen och kringutrustningen och dels mättningsfel som huvudsakligen beror på mätutrustningen.

Modellen kunde byggas med ± 1 mm:s noggrannhet. Alla ytor och anslutningar var jämna för att undvika störningar i strömfältet. Vad gäller mättningsfel så består de olika felkällorna av; fel i mätning av vattenstånd $\pm 0,1$ mm, fel i mätning av hastigheter > 5 cm/s $\pm 0,1$ cm/s, fel i mätning av flöden vid < 30 l/s 0,4-0,5% och fel i mätning av flöden > 30 l/s 3%. Då blir felet i överfallshöjden 2%-3% och $\pm 0,15$ l/s i flödet. Slutligen blir felet i mätningen av avbördningskoefficient 2%. Det fanns också en stående våg i rännan som hade en amplitud på $\pm 0,7$ mm. Det uppmätta vattenståndet är korregerat med hänsyn till vågen.

2.6 Sammanfattning av mätresultaten

Mätningarna i rännan sammanfattas i tabell 4. I denna tabell presenteras uppmätt överfallshöjd, dvs uppströms vattenstånds nivå över krönet på skibordet. Mätningarna är utförda 1,5 m uppströms skibordet.

Fall	Flöde (l/s)	Överfallshöjd. (cm)
2 - 100	19	10.22
2 - 200.	50	19.48
2 - 300	85	27.18
3 -100	17	9.55
3 - 200	44	17.40
3 - 300	75	23.90
4 - 100	15	9.02
4 - 200	46	18.28
4 - 300	80	25.50
5 - 100	13	8.86
5 - 200	44	19.50
5 - 300	85	27.80
6 - 100	20	11.90
6 - 200	45	20.00
6 - 300	70	26.00
7 - 100	16	9.60
7 - 200	45	18.20
7 - 300	75	25.60

Tabell 3. Sammanfattning av resultat från mätningar i rännan, flöde (l/s) samt överfallshöjd.

3 Matematisk modellberäkning, VUAB

3.1 Allmänt om programsystem

De kommersiella datorprogrammen PHOENICS (*ref. 1*), CFX (*ref. 2*) och FLUENT (*ref. 3*) har utnyttjats för de beräkningar som redovisas i föreliggande rapport. Som tidigare nämnts användes alla tre programmen för fall 2 och endast CFX för de övriga fallen. För fluider som vatten och luft löser programmen ekvationer för bevarande av rörelsemängd, värme, koncentration av kemiska ämnen o.s.v. i två eller tre dimensioner för både stationära och tidsberoende förlopp. De matematiska metoder som programmen grundar sig på kallas för CFD, vilket står för 'Computational Fluid Dynamics'. CFD går ut på en rumsindelning av geometrin i ett stort antal beräkningsceller. Detta görs genom att först skapa geometrin i ett lämpligt koordinatsystem, och sedan dela varje koordinat-riktning i ett antal intervaller. På det viset skapar man ett beräkningsnät, som är en samling av beräkningsceller som fyller upp geometrin. För varje beräkningscell uppställs algebraiska ekvationer för bevarande av problemets intressanta storheter. De algebraiska ekvationssystem som härleds på detta sätt löses med hjälp av numeriska metoder. De sistnämnda ekvationerna härleds genom modifieringar av differentialekvationer som grundar sig på fysikens lagar och fluidens egenskaper.

3.2 Fysikalisk modell

Den centrala frågan i den undersökning som redovisas här är om man kan bestämma ett utskovs avbördningskapacitet med matematiska modeller. Det är därför endast vattnets rörelse som bör vara intressant att studera. Men eftersom den fria vattenytans form inte är känd i förväg är man tvungen att räkna även på rörelsen av ett luftskikt ovanför vattenytan. Både luft och vatten är vätskor med låga kinematiska viskositeter ($\nu_{\text{luft}} = 1,6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $\nu_{\text{vatten}} = 0,8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$). Strömning av sådana vätskor är i regel turbulent även vid relativt låga hastigheter och små geometriska dimensioner. I följande två delavsnitt ges först en kortfattad beskrivning av fenomenet turbulens, och dess modellering, sedan beskrivs metoder för bestämning av den fria vattenytans form.

3.2.1 Turbulens

Turbulenta strömningar är alltid instationära, oregelbundna och virvelintensiva. Dessa egenskaper gör direktsimuleringar av turbulensen i praktiken omöjliga. För att möjliggöra en matematisk beskrivning av turbulensen utnyttjar man statistiska metoder. Detta görs genom att dela det momentana värdet för varje intressant storhet

f (exempelvis hastighet eller tryck) i ett tidsmedelvärde $\hat{f}$ och en fluktuerande del f' ,

dvs $f = \hat{f} + f'$. Tidsmedelvärdet $\hat{f}$ gäller för tidsintervaller som är längre än

tidsskalor för de turbulenta fluktuationerna, men kortare än tidsskalor för

nettovariationer i medelflödet. Med tidsberoende turbulent strömning menas att alla

intressanta storheters tidsmedelvärde $\hat{f}$ är konstanta i tiden. Ur en matematisk modellerings synvinkel kan den turbulenta strömningen av en vätska behandlas som en laminär strömning där den kinematiska molekylära viskositeten ν , som är en materialegenskap, utbyts mot en effektiv viskositet $\nu + \nu_t$, där ν_t är den turbulenta viskositeten. I ett sådant betraktelsesätt är de beräknade variablerna medelvärden som $\hat{f}$ (och ej momentana värden som f). Den turbulenta viskositeten ν_t varierar i strömningsfältet och är en funktion av de turbulenta fluktuationernas egenskaper. Mycket av det som kallas turbulensmodellering går ut på att bestämma ν_t på ett lämpligt sätt. En användbar och enkel första approximation för ν_t är att ansätta $\nu_t = \text{konstant}$. Konstantens värde kan uppskattas på olika sätt, exempelvis med hjälp av experiment eller empiriska formler. En mycket enkel tumregel för uppskattning av ν_t är

$$\nu_t = 0,01 \times \text{typisk hastighet} \times \text{typisk längd}$$

En sådan ansats ger godtagbara resultat avseende hastighetsfältets storleksordningar och riktningar. I fråga om detaljer kan dock stora avvikelser från verkligheten förekomma.

En turbulensmodell som används flitigt vid simuleringar av industriella problem är $k - \varepsilon$ modellen, där k (m^2/s^2) och ε (m^2/s^3) betecknar den turbulenta kinetiska energin respektive den viskösa dissipationen. I $k - \varepsilon$ modellen ansätter man $\nu_t = 0,09 k^2 / \varepsilon$. För k och ε löser man transportekvationer som är delvis empiriska.

I de beräkningar som redovisas i denna rapport har vi, beroende på beräkningsfall, använt både antagandet $\nu_t = \text{konstant}$ (PHOENICS och FLUENT) och $k - \varepsilon$ modellen (FLUENT och CFX).

3.2.2 Fri vattenyta

Simulering av strömning i rinnande vattendrag försvåras av det faktum att den fria vattenytans läge inte är bekant i förväg. Denna svårighet kan övervinnas på olika sätt. De modeller som har använts här är Volume of Fluid (VOF) för beräkningar med FLUENT och CFX¹, samt Height of Liquid (HOL) i PHOENICS. Nedan ges kortfattade beskrivning av VOF och HOL.

VOF, i likhet med HOL, går ut på att modellera det rinnande vattnets och det överliggande luftskiktets rörelser samtidigt. Gränssytan mellan luft och vatten, d.v.s. den fria vattenytan, bestäms med hjälp av en markör som anger andelen vätska i varje beräkningscell. Markören kan betraktas som en funktion ϕ av rumskoordinater x, y, z och tiden t . Vidare gäller det att i varje beräkningscell $0 \leq \phi(x, y, z, t) \leq 1$, där $\phi = 0$ om cellen innehåller endast luft, $\phi = 1$ om den innehåller endast vatten, och

¹ I CFX kallar man VOF modellen för 'Homogeneous model', som är en förenklad version av den allmännare två-fas modellen 'Multi-fluid model'.

$0 < \phi(x, y, z, t) < 1$ om den fria vattenytan går genom cellen. ϕ bestäms genom att lösa följande partiella differentialekvation

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (1)$$

där $\bar{u} = \bar{u}(x, y, z, t)$ och ∇ betecknar vattnets, eller luftens, lokala hastighetsvektor, respektive nablaoperatoren $(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z})$.

För att bestämma $\bar{u}$ löser man en uppsättning ekvationer för bevarande av rörelsemängd och massa. Dessa ekvationer innehåller det strömmande mediets materialegenskaper, som i varje beräkningscell bestäms enligt formeln $\chi = \phi \chi_{\text{vatten}} + (1 - \phi) \chi_{\text{luft}}$, där χ betecknar mediets densitet eller viskositet.

Huvudskillnaden mellan HOL och VOF är att andelen vatten i varje cell, dvs ϕ enligt ovan, bestäms algebraiskt och ej genom att lösa ekvation (1). I HOL följer man den fria vattenytans rörelser genom att uppställa masskontinuitetsekvationer för (vertikala) kolumner av beräkningsnätets celler. Ett krav för att få HOL att fungera är att beräkningsnätets kolumner inte får avvika för mycket från lodrät riktning. Vattenytans nya position för varje nytt tidssteg, eller iteration, bestäms ur sambandet:

$$\zeta_{\text{vattenyta}}^{\text{ny}} = \zeta_{\text{vattenyta}}^{\text{gamal}} + \frac{Q_{\text{vatten}}^{\text{in}} - Q_{\text{vatten}}^{\text{ut}}}{\Delta S}$$

där ζ , Q och ΔS betecknar för det betraktade cellkolumnen vattenstånd, volymsflöde respektive horisontell tvärsnittsarea. Med kännedom om vattenytans nya position kan man bestämma ϕ för varje cell. För övrigt är tillvägagångssättet likt VOF.

VOF fungerar endast som en tidsberoende modell. Detta medför att för stationära strömningsförlopp måste tidsberoende beräkningar utföras tills stationära förhållanden uppnås. Detta är en stor svaghet hos modellen som leder till mycket långa beräkningstider. Oftast får man nöja sig med nästan stationära förhållanden för att spara beräkningstid. HOL kan i princip modellera stationära förlopp, dock oftast med stora konvergenssvårigheter. På inrådan av programleverantören CHAM simulerade vi PHOENICS-beräkningarna i fall 2 som tidsberoende.

3.3 Numerisk modell

Ett strömningsförlopp kan matematiskt beskrivas med hjälp av ett antal partiella differentialekvationer av följande form:

$$\underbrace{\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t}}_{\text{Tillväxt}} + \underbrace{\nabla \cdot \rho \bar{u} \Phi}_{\text{Advektion}} = \underbrace{\nabla \cdot \gamma \nabla \Phi}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{\sum}_{\text{Källa/sänka}} \quad (2)$$

där ρ , γ , $\bar{u}$, Φ och S betecknar det strömmande mediets densitet, effektiva diffusivitet, hastighetsvektor, bevarad storhet (rörelsemängd, energi, koncentration...) respektive källterm. För att numeriskt lösa ekvation (2), eller ett system av sådana ekvationer, volymsintegrerar man ekvationen i varje beräkningscell. Med hjälp av vektoranalytiska satser uttrycker man volymsintegralerna för de advektiva och diffusiva termerna som ytintegraler:

$$\int_V \frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} dV + \int_A \rho \Phi \bar{u} \cdot \bar{n} dA = \int_A \gamma \nabla \Phi \cdot \bar{n} dA + \int_V S dV \quad (3)$$

där dA och $\bar{n}$ betecknar ytelement respektive normalvektor på beräkningscellens begränsningsytor. dV betecknar ett volymselement i beräkningscellen. $\int_A \dots dA$ och

$\int_V \dots dV$ är yt- respektive volymsintegraler över beräkningscellen. Ekvation (3) kan

reduceras till en algebraisk ekvation genom att approximera integralerna med algebraiska uttryck som innehåller variablernas värden i mitten av angränsande beräkningsceller vid två eller flera konsekutiva tidpunkter. Detta förfarande kallas för diskretisering. Genom att diskretisera ekvationerna härleder man ett antal algebraiska ekvationssystem som sedan löses numeriskt. Noggrannheten av den numeriska lösningen beror, bland annat, av antal beräkningsceller och sättet att härleda de algebraiska ekvationssystemen. Det bör påpekas att högre noggrannhet medför oftast numerisk instabilitet och därmed konvergenssvårigheter. Å andra sidan ger ett noggrannare diskretiseringsschema en bättre upplöst bild av strömningsfältet. I föreliggande arbete har vi, förutom i ekvation (1) för vätskeandelen ϕ , undvikit högre ordningens scheman för att minska beräkningstiderna.

3.4 Allmänt om randvillkoren

3.4.1 Beräkningsområdets inlopp (uppströmsrand)

I samtliga beräkningar föreskrivs en konstant hastighet för vattnets inströmning vid inloppet. Inloppets höjd, som är ungefär detsamma som vattenståndet vid inloppet, uppskattas genom enkla handformler. Området ovanför vattenytan vid inloppet blockeras med en friktionsfri vägg.

3.4.2 Beräkningsområdets utlopp (nedströmsrand)

Utloppsrandvillkoren behandlas på olika sätt i de olika beräkningsprogrammen. I PHOENICS föreskrevs trycket lika med noll, i FLUENT given konstant hastighet (för VUAB's beräkning), och i CFX föreskrevs utloppsrandvillkoren genom extrapolering av förhållandena omedelbart uppströms utloppet.

3.4.3 Beräkningsområdets topp

Olika villkor applicerades på toppen av beräkningsområdet i de olika fallen. I CFX antogs att beräkningsområdets topp var en friktionsfri vägg i vissa beräkningar, se bilagor 2(5) och 3(2), och en öppen rand med tryck lika med noll i andra fall, se bilagor 4(2) och 5(2). I PHOENICS var toppen en friktionsfri rand. I FLUENT var i VUAB's beräkning topprandens horisontella del modellerad som en öppen rand med tryck lika med noll, och den lutande delen som en ogenomtränglig yta.

3.4.4 Botten och väggar

I de första cellerna intill beräkningsområdets fasta väggar utnyttjas vägglagen, se ref. 4, för att beräkna hastigheten parallell med väggen. Detta gäller endast de beräkningar där $k - \epsilon$ modellen har använts. Enligt vägglagen är den dimensionslösa hastigheten i närheten av en fast vägg en logaritmisk funktion av den dimensionslösa lokala koordinaten, d.v.s.

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{y}{k_s}\right) + B$$

där

u = hastighet parallell med väggen och på avståndet y från väggen (m/s),

u_* = den s.k. väggfriktionshastigheten (m/s),

$\kappa = 0,41$ von Karmans konstant,

y = avståndet räknat vinkelrätt från den fasta väggen (m),

k_s = referenslängd för glatta ytor, eller ekvivalent sandråhet (m) för råa ytor,

B = en konstant som är funktion av bl.a. råheten och Reynolds tal.

För turbulent strömning på en rå yta, exempelvis som på botten uppströms utskovet i beräkningsfall 4, är B bara beroende av råheten. I beräkningen sattes $B = 8,48$ (ref. 4 och 5). I fall 4 beror råheten k_s bl.a. på hur makadammen läggs på botten, dess form, storlek och porositet. Av KTH har vi fått en typisk bottenstruktur med makadam limmad på en skiva. Dess höjd är cirka 20 mm enligt mätningen. Baserat på detta har en ekvivalent sandråhet (roughness height) av $k_s = 10$ mm använts i beräkningarna.

3.5 Begynnelsevillkor

Samtliga beräkningar börjar från ett gissat begynnelsefält. Begynnelsevillkoren är av stor betydelse för modellens konvergenssegenskaper och för beräkningstiderna. Olämpligt val av begynnelsevillkor, speciellt avseende vattenytans startläge, visade sig leda till numerisk divergens, eller i bästa fall orimligt långa beräkningstider. I de fall som redovisas här har vi föreskrivit begynnelsevillkoren för vattenytans läge genom att utnyttja tillgängliga empiriska resultat av likartade strömningsfall.

4 Matematisk modellberäkning, VBB

4.1 Allmänt om programsystemet FLUENT

FLUENT är ett CFD-program. (Computational Fluid Dynamics). FLUENT har använts inom VBB sedan 1987 i ett stort antal projekt. Det löser de generella strömningsekvationerna i tre dimensioner. Det kan användas för att beräkna vattenströmning såväl som värmeöverföring och kemiska reaktioner i ett strömfält, t.ex. i en förbränningskammare.

Fluent löser de partiella differentialekvationer (Navier-Stokes samt kontinuitet) som styr strömningen. Dessa ekvationer diskretiseras och skrivs i form av finita differenser, varefter de kan lösas numeriskt. Det finns tre olika interpolationsalgoritmer tillgängliga:

1. Power Law
2. Second Order Upwind
3. QUICK

Power Law baseras på en lokal endimensionell konvektions- och diffusionsekvation, och ger acceptabla resultat när strömningen väl följer det cellnät som strömningsfältet är indelat i. Vid uppställning av ekvationerna för en viss cell tas endast hänsyn till de celler som angränsar till den betraktade cellen. I Second Order Upwind och QUICK tas fler celler med i uppställningen av ekvationerna vilket medför att precisionen ökar. QUICK har en högre formell precision än Second Order Upwind. De två sistnämnda klarar skarpare upplösning av gradienter då den numeriska diffusionen är låg i dessa interpolationsalgoritmer. Priset är att de är mer beräkningsintensiva än Power Law och inte konvergerar lika snabbt.

Vid laminär strömning är viskositeten konstant över hela strömningsfältet och lika med den dynamiska viskositeten.

Turbulensens inverkan på viskositeten modelleras i princip genom att viskositeten hos den modellerade vätskan höjs i områden med stora hastighetsgradienter. Den viskositet som erhålls varierar mellan olika punkter i modellen och kallas effektiv viskositet. Den är summan av den dynamiska och den turbulenta viskositeten.

Det finns tre olika sätt att modellera turbulensens inverkan på viskositeten. Gemensamt för dessa är att de medger att dissipationen av 'turbulens' är separerad från produktionen av 'turbulens'. Virvlar som egentligen är för små för att kunna representeras av cellnätet kan alltså föras med flödet i form av en förhöjd effektiv viskositet och dissipera nedströms om den plats där de skapas. De tre olika modellerna är;

- k - epsilon; är delvis empiriskt baserad, och är användbar för flöden med höga Reynolds tal. Kräver minst beräkningstid av de tre modellerna.
- RNG; gäller för alla Reynolds tal och ger generellt sett bättre värden på den turbulenta viskositeten. Modellen klarar både laminär och turbulent strömning. Därför har denna modell bättre förutsättningar att modellera flödesseparation, kraftigt krökt strömning och virvelavlösning än ovan nämnda k-epsilon. Beräkningsmässigt är RNG något mer krävande än k - epsilon.
- RSM; tillåter anisotrop turbulent viskositet, dvs olika turbulent viskositet i olika riktningar. Är beräkningsmässigt mycket krävande.

För beräkningarna har i möjligaste mån RNG turbulensmodell använts. Detta på grund av att den är förhållandevis effektiv beräkningsmässigt, samtidigt som den ger en bättre representation av verkligheten än k - epsilon, eftersom den klarar att modellera både laminär och turbulent strömning. Detta är viktigt då strömning i utskov simuleras. Praktisk erfarenhet med modellen har också visat att den är beräkningsmässigt stabil med god konvergens.

Den avancerade turbulensmodell som använts (RNG), kräver dock en låg numerisk diffusion och därmed en högre ordningens beräkningsalgoritm för att bli meningsfull.

I FLUENT används VOF-modellen (Volume Of Fluid) för att simulera fria vattenytor. Den bygger på antagandet att de olika faser som modelleras, här luft och vatten, inte blandar sig. I varje cell bestäms genomsnittsvärden för densitet och viskositet beroende på hur stor del av cellen som är fylld med respektive fas. Därefter löses de generella strömningsekvationerna över hela strömningssfältet på samma sätt som tidigare. VOF-formuleringen är flexibel i så måtto att man inte bara kan modellera en fri vattenyta. Möjligheten finns i princip även att modellera strålar med vattenytor både över, under och på sidorna, t.ex. skarpkantade överfall med luftning under strålen.

Programversionen FLUENT 4.3.2 har använts med strukturerat cellnät. Det innebär att modellvolymen delas in i sexsidiga block som är flexibla i den meningen att de kan ha krökta sidor och fås att följa krökta ytor. Geometriskt erbjuder det strukturerade cellnätet i princip möjlighet att modellera hur komplexa geometrier som helst.

Vid ett ostrukturerat cellnät delas modellvolymen in i tetraedrar. Det ostrukturerade cellnätet har två fördelar. Nämligen att man kan förtäta cellindelningen lokalt samt att cellstrukturen blir riktningfri. VOF-modellen som används för beräkning av fria vattenytor är ännu inte tillgänglig för det ostrukturerade cellnätet utan endast för det strukturerade.

På grund av att den geometri som ska modelleras både är omfattande till storlek och kräver god cellupplösning lokalt, blir modellen förhållandevis tung. Vid skapande av cellnätet har effekten av kontraktion bedömts vara mycket viktig att modellera väl. Erforderlig celltäthet i tröskelsektionen har varit utgångspunkten. Nackdelen av en tung

modell kan kompenseras något genom att man t.ex. Väljer enklare turbulensmodeller och beräkningsscheman tills en stationär lösning nås. Därefter kan de mer avancerade modellerna och beräkningsalgoritmerna kopplas in.

4.2 Beräkningsmetodik

Beräkningar med fri vattenyta utförs som instationära i Fluent. Som startvillkor anges modellens grad av vattenfyllnad samt ungefärliga hastigheter i olika delar av modellen. Sedan startas simuleringen som får pågå tills strömfältet i modellen blivit stationärt och inte varierar med tiden. Rent teoretiskt kommer aldrig stationäritet att inträffa då ytan i uppströmskanalen asymptotiskt kommer att närma sig sitt "sanna" läge, dock utan att någonsin nå fram. Rent praktiskt krävs för fall 2 och 7 ungefär 50 sekunders modelltid, d.v.s. ca 20-100 000 tidssteg, för att felen ska bli rimligt små. Detta beror på hur stort fel som gjordes i det första antagandet om vattennivå i kanalen. För fall 5 krävs den dubbla tiden.

Fall 2 räknades med ett tidssteg på 0,001s. RNG turbulensmodell samt ett avancerat beräkningsschema (QUICK) redan från början.

Fall 5 räknades med tidssteg på mellan 0,001 och 0,01s. Beräkningarna startades med laminär strömning och ett enkelt beräkningsschema. (Power Law). Efter att stationära förhållanden nåts kopplades RNG turbulensmodell samt QUICK beräkningsschema in för fall 5-200.

Fall 7 räknades med tidssteg på 0,001s. Beräkningarna inleddes med laminär strömning, och efter ca 20 sekunder kopplades RNG turbulensmodell in. Beräkningarna fick sedan löpa ytterligare omkring 30 sekunder.

4.3 Feluppskattning

I den här felanalysen behandlas i första stycket de generella fel som finns, och som är gemensamma för de olika fallen. Det specifika som gäller respektive fall diskuteras i efterföljande stycken.

Förenklat randvillkor i uppströmsänden

I de fysiska modellförsöken leder en drygt 20 m lång kanal fram till utskoven. Gränsskikten är alltså så gott som fullt utvecklade med låga hastigheter intill väggarna och högre i mittdelen av rännan.

I uppströmsänden på den numeriska modellen har ett inloppsrandvillkor med konstant hastighet använts över hela bredden och upp till de förväntade vattennivån använts. På grund av rännans begränsade längd i den numeriska modellen hinner fullständiga gränsskikt inte utbildas. Gränsskiktet har en tjocklek på ungefär 7 cm i detta fall. Det betyder att mer vatten transporteras vid botten och sidorna i den numeriska modellen än

i den fysiska. De fel som detta orsakar avseende avbördning är emellertid mycket små på grund av de låga hastigheterna i rännan. Storleksordningen är tiondelar av procent.

Väggfriktion

I den numeriska modellen har väggarna ansatts som glatta vilket väl torde motsvara den fysiska modellens väggar av glas. Inga märkbara fel på grund av olika väggfriktion förutses alltså.

Cell-indelning

Y^+ parametern är ett dimensionslöst tal som anger hur väl cellindelningen klarar att lösa upp gränsskiktet. Ju större Y^+ värde desto mindre inverkan av gränsskiktet. Rekommendationen är att detta värde ska ligga inom intervallet 15-1000.

För tidigt avbrytande av beräkning

Om ett felaktigt vattenstånd antagits initialt, kommer modellens vattenstånd att asymptotiskt närma sig den slutliga nivån. Teoretiskt kommer det alltid att kvarstå ett fel som dock går mot noll då beräkningstiden går mot oändligheten. Detta tidsförlopp för vattenytans närmande till den slutliga nivån kan beräknas med en enkel magasinmodell. I magasinmodellen sätts förändringen i vattennivå lika med skillnaden mellan inflöde och utflöde delat med rännans horisontella area och multiplicerat med tidssteget.

Genom att jämföra vattenytans sänkning/höjning i CFD-modellen med det teoretiska tidsförloppet i magasinmodellen kan man få en uppfattning om hur långt det är till den slutliga nivån vid ett visst tillfälle i CFD-modellen. På så vis kan det kvarstående felet av denna orsak vid körningens avbrytande också uppskattas.

Utvärderingsfel

För den numeriska modellen bestäms vattendjupet genom mätning på bilder av vattennivåns läge.

Konturlinjen för ett vatteninnehåll på 50% representerar vattenytan i FLUENT. Läget för 50% konturen interpoleras fram från värden i cellernas mitt. I det fall 50% konturen ligger i samma cell-lager under en viss sträcka och vertikalt näraliggande cellers höjd inte skiljer sig markant, är det interpolerade läget för 50% konturen bra. I det fall då 50% konturen skär genom olika cell-lager, cellnätet ändrar riktning eller angränsande cellers storlek varierar, blir den interpolerade 50% konturen ojämn och inte rättvisande i varje punkt. Detta är dock ett grafiskt redovisningsproblem och inte ett beräkningsproblem.

I tabellerna under respektive fall nedan ges en sammanställning över de fel som diskuteras ovan. Ett positivt felvärde betyder att felet ökar avbördningen, och en korrigering medför att vattennivån i rännan ska höjas. Felets storlek är i förhållande till vattennivåns höjd över tröskelkrönet.

Förutom de kända fel som redovisas i tabellen finns ett fel i CFD's förmåga att representera verkligheten. Detta fel är inte möjligt att uppskatta på annat sätt än att jämföra mot verkliga fall.

4.3.1 Fall 2

Cellindelning

Vid tröskeln ligger Y^+ -värdena i regionen 250-1200, där de största värdena egentligen något överskrider de rekommenderade värdena på 15-1000. De högsta värdena noteras i uppströmsänden på skibordet, i det område där gränsskikten är under uppbyggnad och hastigheterna invid skibordet samtidigt är höga tack vare den trycksänkning som tröskelns krökning ger. Det laminära gränsskiktets tjocklek vid den bestämmande sektionen kan beräknas till omkring 1 mm. Felet av den eventuella felrepresentation av detta gränsskikt som sker är mindre än förhållandet av gränsskiktets förträngningstjocklek till djupet, dvs. mindre än ca 0,2% och påverkar avbördningen i positiv riktning.

Utvärdering

Vattennivån mäts på 16 ställen symmetriskt placerade kring en punkt 1,5 m uppströms om tröskelns krön. Nivån mäts med 3 siffrors noggrannhet och ett medelvärde används. Felet för varje mätpunkt blir ca 0,5 mm, och för medelvärdet mindre, säg 0,1 mm

Felkälla	Fall	2-100,VBB (%)	2-200,VBB (%)	2-300,VBB (%)
Förenklat randvillkor		+0,1/+ 0,2	+0,1/+0,2	+0,1/+0,2
Cellindelning		+0,1/+0,3	+0,05/+0,15	+0/+0,1
Avbrytande av ber.		+0,5/+1	- 0,3/-0,5	- 0,1/-0,2
Utvärdering		~0,3	~0,2	~0,2
Totalt		+0,4/+1,8	-0,55/+0,25	-0,3/+0,4

Tabell 4. Felsammanställning för fall 2.

4.3.2 Fall 5

Turbulensmodell/Beräkningsschema

Utav de tre fall med olika vattennivå som räknats för fall 5, har fall 5-100 och 5-300 räknats med laminär strömning och ett lägre ordningens beräkningsschema (Power Law). Fall 5-200 räknades först med laminärströmning och Power Law, men senare också med RNG turbulensmodell, och ett andra ordningens beräkningsschema (QUICK).

Rent generellt blir avbördningsförmågan lägre för turbulent strömning än för laminär. Turbulensen modelleras ju genom att viskositeten höjs och vätskan blir därigenom mer trögflytande.

Ett beräkningsschema av högre ordning gör strömningen mer oberoende av cellnätets riktning. Detta underlättar inströmning från sidorna och underifrån och leder generellt till högre avbördningsförmåga. Dessa effekter blir större med ökande vattendjup, då trycksänkningen blir större kring skibordet krön.

Dessa båda effekter tar alltså delvis ut varandra och för fall 5-200 sänktes uppströmsnivån med ca 1,6% efter att RNG turbulensmodell och QUICK beräkningsschema kopplats in. Det tyder på att det i vårt fall, där det sker en hel del strömning tvärs cellstrukturerna, är mycket viktigt med ett högre ordningens beräkningsschema.

Utvärdering

Utvärderingen av uppströmsnivåerna har skett i en punkt 1,5m uppströms om utskovens vertikala uppströmsvägg. Nivån har avlästs med linjal på en plott av nivån. Mätningprecisionen är ca 0,2mm och måtten varierar mellan 50 och 90mm. Det relativa felet blir alltså omkring 2 till 4 promille. Det maximala felet om felet går åt samma håll i båda ändar på mätningen och på både nivåmätningen och på referenslinjemätningen blir mellan 8 och 16 promille. Det troliga felet ligger dock

snarare på de tidigare siffrorna 2 till 4 promille. I nedanstående tabell ges en sammanställning av de uppskattade felen.

Felkälla	Fall	5-100,VBB (%)	5-200,VBB (%) (rng)	5-300,VBB (%)
Förenklat randvillkor		+0,1/+ 0,2	+0,1/+0,2	+0,1/+0,2
Cellindelning		+0,1/+0,3	+0,05/+0,15	+0/+0,1
Avbrytande av ber.		+0,4/+0,8	+0,3/+0,5 (-0,5/0)	-0,4/-0,2
Turbulens/ Beräkningsschema		-1/-0	-2/-1 (0)	-3/-2
Utvärdering		~0,4	~0,2	~0,3
Totalt		-0,8/+1,7	-1,75/+0,05 (+0,25/+1,05)	-3,6/-1,6

Tabell 5. Felsammanställning för fall 5.

4.3.3 Fall 7

Feluppskattningen för fall 7 är i princip lika som fall 2. I tabellen nedan visas en sammanställning över felkällorna för fall 7. Utvärderingen av nivåerna har skett genom mätning i nio punkter symmetriskt placerade kring en punkt 1,5 m uppströms tröskeln i rännans centrumlinje.

Felkälla	Fall	7-100,VBB	7-200,VBB	7-300,VBB
Förenklat randvillkor		+0,1/+ 0,2%	+0,1/+0,2%	+0,1/+0,2%
Cellindelning		+0,1/+0,3%	+0,05/+0,15%	+0/+0,1%
Avbrytande av ber.		-0,5	-0,1	-0,1
Utvärdering		-0,2/+0,2	-0,15/+0,15	-0,10/+0,10
Totalt		-0,5/+0,2	-0,1/+0,4	-0,10/+0,30

Tabell 6. Felsammanställning för fall 7.

5 Beräkningsmodeller

5.1 Fall 2 (VBB)

Den numeriska modellen sträcker sig 3 m uppströms pelarnosarna och avslutas ca 0,25 m nedströms skibordet. Eftersom utskovet är centriskt placerat har endast halva utskovet och kanalen modellerats och ett symmetrirandvillkor utnyttjats i kanalens mitt. Modellens höjd är 0,8 m vilket är 0,2 m över högsta förväntade vattennivå. Bredden är alltså hälften av rännans bredd eller 0,6 m. Modellen består av 35700 celler varav 68 i längd, 21 i bredd och 25 i höjd.

På uppströmsranden har ett randvillkor med förutbestämd konstant hastighet för vattnet ansatts. Inloppet har en utsträckning över hela kanalens bredd och höjden är den som de modellerade avbördningarna förväntas motsvara. På uppströmsranden är också ett inlopp för luft med konstant hastighet placerat. Det har samma bredd som kanalen och mäter 0,15 m på höjden. Modellens hela nedströmsände utgörs av ett utlopp där en konstant utloppshastighet specificeras. Denna hastighet bestäms så att den blir något högre än den fria utströmningshastigheten, så att indämningseffekter från nedströmsändan undviks.

Samtliga hittills nämnda randvillkor har bestämd area och bestämd hastighet och därmed också ett bestämt flöde. För att avrundningsfel i modellen inte ska få beräkningen att kollapsa används ytterligare ett inlopp för att reglera volymen av luft och vatten i modellen. Detta inlopp för luft är placerat i modellens tak över det dödutrymme som uppstår vid sidan om pelaren, och har ett tryckrandvillkor. Är tillströmning till modellen p.g.a. avrundningsfel större än avrinningen, kommer överskottet att släppas ut genom detta inlopp, och vice versa.

Inledningsvis provades ett randvillkor med föreskrivet statiskt tryck för vatteninloppet i uppströmsändan. Detta bedömdes vara en mer praktisk ansatts då frågeställningen normalt är vilken avbördning ett utskov har vid en viss nivå, och inte tvärtom. Beräkningen blev dock instabil med detta randvillkor varför ett hastighetsinlopp användes istället.

De beräkningar som gjorts benämns i det följande:

Namn	Flöde m ³ /s	Uppskattad vattennivå över tröskel
2-100, VBB	0,019	100 mm
2-200, VBB	0,050	200 mm
2-300, VBB	0,085	300 mm

Tabell 7. Lista över beräknade fall för fall 2.

5.2 Fall 2 (VUAB)

Eftersom utskovet är centriskt placerat har endast halva utskovet och kanalen modellerats och ett symmetrirandvillkor utnyttjats i kanalens mitt.

PHOENICS beräkningarna gjordes under antagandet att den turbulenta viskositeten är konstant $\nu_t \sim 10^{-3}$. Det totala antalet beräkningsceller var ca 120 000. Ekvationerna integrerades med ett tidsteg av 17 ms.

CFX beräkningarna gjordes med $k - \varepsilon$ modellen för vattnets rörelser och konstant viskositet i luften. Antal beräkningsceller var ca 45 000. För mellanflödet gjordes dessutom en beräkning med ett finare nät. Detta ledde till en ökning av överfallshöjden med ca 6%, vilket motsvarar 9% i flöde. Beräkningarna utfördes med ett tidsteg av ca 50-100 ms.

FLUENT beräkningarna gjordes först under antagandet att den turbulenta viskositeten är konstant. Antalet beräkningsceller var ca 80 000. Sedan utfördes beräkningar med $k - \varepsilon$ modellen för mellanflödet och högsta flödet. Detta ledde till en minskning av överfallshöjderna med ca 2%, vilket motsvarar 3% i flöde. Tidsteg av ca 40 ms krävdes för de beräkningar som utfördes under antagandet att den turbulenta viskositeten är konstant. För beräkningar med $k - \varepsilon$ modellen behövdes tidsteg av ca 1 ms eller mindre.

Namn	Flöde m ³ /s	Uppskattad vattennivå över tröskel
2-100,VUAB	0,019	100 mm
2-200,VUAB	0,050	200 mm
2-300,VUAB	0,085	300 mm

Tabell 8. Vattenföringar vid de olika beräkningarna.

5.3 Fall 3 (VUAB)

Beräkningarna har utförts med programsystemet CFX. Beräkningarna gjordes med $k - \varepsilon$ modellen för vattnets rörelser och konstant viskositet i luften. Antal beräkningsceller var ca 90 000 i fall 3. Hela rännans bredd har modellerats då man inte har någon symmetrilinje i detta fall.

Namn	Flöde m ³ /s	Uppskattad vattennivå över tröskel
3-100, VUAB	0,017	100 mm
3-200, VUAB	0,044	200 mm
3-300, VUAB	0,075	300 mm

Tabell 9. Vattenföringar vid de olika beräkningarna.

5.4 Fall 4 (VUAB)

Beräkningarna har utförts med programsystemet CFX. Beräkningarna gjordes med $k - \varepsilon$ modellen för vattnets rörelser och konstant viskositet i luften. Antal beräkningsceller var ca 45 000 i fall 4. Halva rännans bredd har modellerats då man har en symmetrilinje i detta fall.

Namn	Flöde m ³ /s	Uppskattad vattennivå över tröskel
4-100, VUAB	0,015	100 mm
4-200, VUAB	0,046	200 mm
4-300, VUAB	0,080	300 mm

Tabell 10. Vattenföringar vid de olika beräkningarna.

5.5 Fall 5 (VBB)

Den numeriska modellen sträcker sig 2 m uppströms pelarnosarna och avslutas 2 m nedströms skibordet. Eftersom utskovet är centriskt placerat har endast halva utskovet och kanalen modellerats och ett symmetrirandvillkor utnyttjats i kanalens mitt. Modellens höjd är 0,8 m för fall 5-300 vilket är 0,2 m över högsta förväntade vattennivå, och 0,65m för fall 5-200 och 5-100. Bredden är alltså hälften av rännans bredd eller 0,6 m. Modellen består av 40040 celler varav 91 i längd, 22 i bredd och 20 i höjd.

På uppströmsranden har ett randvillkor med förutbestämd konstant hastighet för vattnet ansatts. Inloppet har en utsträckning över hela kanalens bredd och höjden är den som de modellerade avbördningarna förväntas motsvara. På uppströmsranden är också ett inlopp för luft med konstant hastighet placerat. Det har samma bredd som kanalen och mäter för fall 5-300 0,15m på höjden, och för fall 5-200 och 5-100 0,05 m. Modellens hela nedströmsände utgörs av ett utlopp där en konstant utloppshastighet specificeras. Denna hastighet bestäms så att vattennivån vid aktuellt flöde blir korrekt.

Precis som i fall 2 används ytterligare ett inlopp för att reglera volymen av luft och vatten i modellen. Detta inlopp för luft är placerat i modellens tak över det dödutrymme som uppstår vid sidan om pelaren, och har ett tryckrandvillkor.

Randvillkoren presenteras i nedanstående tabell:

Fall	Flöde [l/s]	Ynedstr [m]	V uppstr [m/s]	V nedstr [m/s]
5-100, VBB	13	0,38	0,07222	0,08540
5-200, VBB	44	0,47	0,1467	0,2337
5-300, VBB	85	0,52	0,2024	0,4080

Tabell 11. Randvillkor för fall 5.

5.6 Fall 6 (VUAB)

Beräkningarna har utförts med programsystemet CFX. Beräkningarna gjordes med $k - \epsilon$ modellen för vattnets rörelser och konstant viskositet i luften.

Antal beräkningsceller var ca 45 000 i fall 6. Halva rännans bredd har modellerats då man har en symmetrilinje i detta fall.

Namn	Flöde m ³ /s	Uppskattad vattennivå över tröskel
6-100, VUAB	0,020	100 mm
6-200, VUAB	0,045	200 mm
6-300, VUAB	0,070	300 mm

Tabell 12. Vattenföringar vid de olika beräkningarna.

5.7 Fall 7 (VBB)

Den numeriska modellen sträcker sig 3 m uppströms pelarnosarna och avslutas 0,7m nedströms skibordets uppströmskant. Eftersom utskovet är centriskt placerat har endast halva utskovet och kanalen modellerats och ett symmetrirandvillkor utnyttjats i kanalens

mitt. Modellens höjd varierar för de olika fallen på ett sådant sätt att mängden luft hålls ungefär konstant med en förväntad höjd på 0,1m i uppströmsänden. Bredden är alltså hälften av rännans bredd eller 0,6 m. Antalet celler i modellen varierar. På längden respektive bredden består modellen av 75 resp 24 celler. På höjden varierar antalet celler med modellernas utsträckning i höjddled enligt nedanstående tabell.

Fall	Antal celler	Längd	Bredd	Höjd	Totalt
7-100, VBB		75	24	16	28800
7-200, VBB		75	24	21	37800
7-300, VBB		75	24	25	45000

Tabell 13. Cellnät för fall 7.

På uppströmsranden har för inlopp nr 1 ett randvillkor med förutbestämd konstant hastighet för vattnet ansatts, så att den inströmmande mängden vatten blir korrekt. Inloppet har en utsträckning över hela kanalens bredd och höjden är den som de modellerade avbördningarna förväntas motsvara. På uppströmsranden är också inlopp nr 2 placerat med luftinströmning. Inledningsvis ansattes konstant hastighet för detta inlopp. Efter konvergensproblem vid inlopp 5, som reglerade volymen av luft i modellen, ändrades inlopp 2 till ett tryckinlopp, och inlopp 5 stängdes. Inlopp 2 har samma bredd som kanalen och mäter 0,05m på höjden.

Modellens nedströmsände utgörs av två utlopp med konstant hastighet. Höjden av det undre av dessa, utlopp 3, utgör den teoretiska vattennivån för respektive flöde. Hastigheten är satt till den fria utströmningshastigheten multiplicerad med 1,2. Utlopp nr 4 utgörs av den kvarvarande ytan på nedströmsänden. Här ansätts en konstant utströmningshastighet på en fjärdedel av den fria utströmningshastigheten. Randvillkoren presenteras i nedanstående tabell:

Fall	7-100, VBB	7-200, VBB	7-300, VBB
Höjd över tröskel [m]	0,100	0,200	0,300
Flöde [l/s]	16	45	75
Hastighet, inlopp 1 [m/s]	0,0889	0,1500	0,1786
Höjd, utlopp 3 [m]	0,0264	0,0652	0,0971
Fri utströmningshastighet [m/s]	2,020	2,301	2,575
Hastighet, utlopp 3 [m/s]	2,424	2,761	3,090
Hastighet, utlopp 4 [m/s]	0,505	0,575	0,644

Tabell 14. Randvillkor fall 7.

6 Beräkningsresultat.

6.1 Beräkningsresultat från VBB

6.1.1 Fall 2 (VBB)

Resultatet av beräkningarna redovisas i tabell 15, där de randvillkor som använts, tillsammans med de vattennivåer i kontrollpunkten som resulterat redovisas. Dessutom redovisas i bilaga 1, ett antal bilder över strömningen som visar vattenytans position eller hastighetsfördelningen hos strömningen. Enligt förutsättningarna ska vattenytans nivå i en punkt 1,5 m uppströms pelarnosarna och i rännans mitt jämföras. På grund av en viss vågighet i vattenytan har vi valt att beräkna nedanstående nivåer genom att över en sträcka på ca 0,5 uppströms och nedströms denna punkt läsa av totalt 16 nivåvärden varefter medelvärdet beräknas.

	Q [m ³ /s]	V _i [m/s]	V _u [m/s]	Z _w [m]
Fall 2-100,VBB	0,019	0,0396	2,8	0,096
Fall 2-200,VBB	0,050	0,0833	3,1	0,191
Fall 2-300,VBB	0,085	0,1181	3,4	0,273

Tabell 15. Resultat och indata fall 2.

I fall 2-200 är den kritiska sektionen belägen alldeles vid tröskelkrönet. Vattenytan har här en kraftig snedställning. Man kan alltså dra slutsatsen att avbördningen i utskovet är starkt påverkad av den sidokontraktion som uppstår vid pelarna när vattnet som flyter in från sidorna ska omlänkas i utskovets riktning. Snedställningen i vattenytan uppgår till omkring 3 cm vilket är ca 25% av största djupet i sektionen. En viss vågbildning kan också skönjas i vattenytan i den övre delen av utskovspartiet.

Bilaga 1 innehåller bilder över strömningen i beräkningsområdet

Bild 4 visar modellens geometriska uppbyggnad. De olika färgerna indikerar vilket randvillkor som används för respektive yta. Grönt är vägg och blått är inlopp.

I bilderna för vattenstånd markeras vattennivån av en linje.

I bilderna för hastighetsprofiler visas linjer med samma hastighet. Det är totalhastigheten som avses, dvs summan av x, y och z komponenterna. Hastigheten kan läsas av mot färgskalan till vänster. 1.50E+00 läses som 1,5 m/s.

Bild	Fall	Visar
1	2-200	Vattenstånd i centrumlinje för rännan
2	2-200	Hastighetsprofil bestämmande sektion
3	2-200	Hastighetsprofil 0,1 m uppströms pelare
4	2	Modellens cellnät

6.1.2 Fall 5 (VBB)

Resultatet av beräkningarna redovisas i tabell 14, där de randvillkor som använts, tillsammans med de vattennivåer i kontrollpunkten som resulterat redovisas. Dessutom redovisas i bilaga 2, ett antal bilder över strömningen som visar vattenytans position eller hastighetsfördelningen hos strömningen. Precis som i fall 2 ska vattenytans nivå i en punkt 1,5 m uppströms pelarnosarna och i rännans mitt jämföras.

	Q [l/s]	Z _w [mm]	Z _w över tröskeln[mm]
Fall 5-100,VBB	13	ca 138,8	88,8
Fall 5-200,VBB	44	252,5	202,5
Fall 5-300,VBB	85	340,7	290,7
Fall 5-200,VBB rng	44	249,3	199,3

Tabell 16. Resultat och indata fall 5.

För fall 5-100 är dämpningsgraden hela omkring 25 %. Vattenytan faller bara knappt 9 mm över tröskeln. En vågighet i ytan fortplantar sig från utskovet och nedströmsåt. Dämpningsgraden för fall 5-200 (rng) är omkring 15 %, och det är ungefär 32 mm nivåskillnad mellan uppströms och nedströms om utskovet. Även här fortplantar sig en viss vågighet från utskovet och nedströms. I fall 5-300 är dämpningsgraden bara omkring 5 %,

Bilaga 2 innehåller bilder över strömningen i beräkningsområdet

Bild 4 visar modellens geometriska uppbyggnad. De olika färgerna indikerar vilket randvillkor som används för respektive yta. Grönt är vägg och blått är inlopp.

I bilderna för vattenstånd markeras vattennivån av en linje.

I bilderna för hastighetsprofiler visas linjer med samma hastighet. Det är totalhastigheten som avses, dvs summan av x, y och z komponenterna. Hastigheten kan läsas av mot färgskalan till vänster. 1.50E+00 läses som 1,5 m/s.

Bild	Fall	Visar
1	5-200	Vattenstånd i centrumlinje för rännan, U/S
2	5-200	Hastighetsprofil bestämmande sektion
3	5-200	Hastighetsprofil 0,1 m uppströms pelare
4	5	Modellens cellnät

6.1.3 Fall 7 (VBB)

Resultatet av beräkningarna redovisas i tabell 15, där de randvillkor som använts, tillsammans med de vattennivåer i kontrollpunkten som resulterat redovisas. Dessutom redovisas i bilaga 3, ett antal bilder över strömningen som visar vattenytans position eller hastighetsfördelningen hos strömningen. Enligt förutsättningarna ska vattenytans nivå i en punkt 1,5 m uppströms pelarnosarna och i rännans mitt jämföras.

	Q [l/s]	Z _w [mm]	Z _w över tröskeln[mm]
Fall 7-100,VBB	16	134,6	84,6
Fall 7-200,VBB	45	231,4	181,4
Fall 7-300,VBB	75	310,1	260,1

Tabell 17. Resultat och indata fall 7.

För samtliga tre flöden i fall 7 blir den beräknade vattennivån i rännans uppströmsdel lägre än förväntat. För fall 7-100 erhålls lokalt undertryck vid tröskelns vertikala nedströmsvägg. Så är inte fallet för fall 7-200, där lågtryckszonen vid tröskelns nedströmsvägg fortfarande har ett tryck som överstiger atmosfärstryck. Detsamma gäller för fall 7-300.

En svag vågighet existerar hos vattenytan i rännan för alla tre fallen. Kontraktionen kring sidopelarna ger en snedställning hos vattenytan på omkring X cm för fall 7-200.

Bilaga 3 innehåller bilder över strömningen i beräkningsområdet.

Bild 4 visar modellens geometriska uppbyggnad. De olika färgerna indikerar vilket randvillkor som används för respektive yta. Grönt är vägg och blått är inlopp.

I bilderna för vattenstånd markeras vattennivån av en linje.

I bilderna för hastighetsprofiler visas linjer med samma hastighet. Det är totalhastigheten som avses, dvs summan av x, y och z komponenterna. Hastigheten kan läsas av mot färgskalan till vänster. 1.50E+00 läses som 1,5 m/s.

Bild	Fall	Visar
1	7-200	Vattenstånd i centrumlinje för rännan
2	7-200	Hastighetsprofil 0,1 m uppströms pelare
3	7-200	Hastighetsprofil 0,4 m uppströms pelare
4	7	Modellens cellnät

6.2 Beräkningsresultat (VUAB)

Totalt har 18 beräkningar utförts för de fyra fall som redovisas här. En detaljerad analys och redovisning av varje beräkning blir för omfattande. Därför fokuseras redovisningen i detta avsnitt endast kring de viktigaste av resultaten, som t.ex. överfallshöjden uppströms utskovspelaren som funktion av flöde för de olika fallen. För varje beräkningsfall visas dessutom ett antal plottar av beräkningsnät, hastighetsvektorer samt den fria vattenytan för det aktuella fallets mellanflöde, se bilagor 4 -7.

6.2.1 Fall 2 (VUAB)

Resultaten av beräkningarna i fall 2 visas i bilaga 4 och i tabell 18. I tabellen visas beräknade överfallshöjder, ca 1,5 m uppströms utskovets vertikala front, för olika program och olika flöden. Av symmetriskäl modelleras hälften av geometrin i fall 2.

PHOENICS beräkningarna gjordes under antagandet att den turbulenta viskositeten är konstant $\nu_t \sim 10^{-3}$. Det totala antalet beräkningsceller var ca 120 000. Ekvationerna integrerades med ett tidssteg av 17 ms.

CFX beräkningarna gjordes med $k - \epsilon$ modellen för vattnets rörelser och konstant viskositet i luften. Antal beräkningsceller var ca 45 000. För mellanflödet gjordes dessutom en beräkning med ett finare nät. Detta ledde till en ökning av överfallshöjden med ca 6 %, vilket motsvarar 9 % i flöde. Beräkningarna utfördes med ett tidssteg av ca 50 -100 ms.

FLUENT beräkningarna gjordes först under antagandet att den turbulenta viskositeten är konstant. Antalet beräkningsceller var ca 80 000. Sedan utfördes beräkningar med $k - \epsilon$

modellen för mellanflödet och högsta flödet. Detta ledde till en minskning av överfallshöjderna med ca 2 %, vilket motsvarar 3 % i flöde. Tidsteg av ca 40 ms krävdes för de beräkningar som utfördes under antagandet att den turbulenta viskositeten är konstant. För beräkningar med $k - \varepsilon$ modellen behövdes tidsteg av ca 1 ms eller mindre.

Program	Överfallshöjd vid symmetriplanet (m)		
	Lägsta flödet	Mellanflödet	Högsta flödet
PHOENICS	0,105	0,188	0,262
CFX	0,115	0,170 ⁽¹⁾ 0,180 ⁽²⁾	0,275
FLUENT	0,108	0,195 0,190 ⁽³⁾	0,273 0,268 ⁽³⁾

(1) avser överfallshöjd baserat på ett nät med ca 45000 celler.

(2) avser överfallshöjd baserat på ett nät med ca 70000 celler.

(3) avser överfallshöjd baserat på k-epsilon modellen.

Tabell 18 Beräkningar med PHOENICS, CFX och FLUENT för fall 2.

I bilaga 4 visas hastighetsvektorer längs utskovets symmetriplan samt den fria vattenytan i olika snitt (mellanflödet). I samtliga beräkningar visar det sig att hastigheten ovanför utskovets högsta punkt är ca 1 m/s, jämför bilagor 4(3), 4(5) och 4(8). Längre nedströms ökar hastigheterna till ca 2,5-3 m/s. Nedsänkning av vattenytan intill utskovspelaren och vid passage över utskovet predikteras av alla tre programmen, se bilagor 4(2), 4(6) och 4(9).

Jämförelse mellan resultaten från de olika programmen tyder på en kvalitativ, och i viss mån även kvantitativ, överensstämmelse i de delar av strömningsfältet som fylls av vatten. Spridningen i beräknade överfallshöjder med $\pm 3-6\%$, vilket motsvarar $\pm 5-10\%$ i flöde, indikerar vilken noggrannhet man kan förvänta sig vid en numerisk simulering. Observera att strömningen i luftskiktet ovanför vattnet kan vara helt olika i olika fall. Detta påverkar dock inte resultaten avseende vattenytans form eftersom luftens rörelser är av ringa betydelse för vattnets rörelser.

Efter att ha jämfört olika aspekter av de tre beräkningsprogrammen bestämde vi oss för att beräkna de kvarvarande fallen med programmet CFX. Detta beslut motiveras med följande argument:

- 1) CFX har möjlighet till utnyttjande av multiblocktekniken vid geometri- och nätgenerering. Detta förenklar geometri- och nätgenereringsarbetet.

FLUENT har en ostrukturerad version, kallad UNS, som är bra för komplicerade geometrier. PHOENICS har multiblockteknik. Varken UNS eller PHOENICS/multiblock klarar av strömningar med fria vätskeytor på ett helt tillfredsställande sätt.

- 2) Numeriken i CFX, åtminstone avseende tidsberoende förlopp, är bättre än i FLUENT och PHOENICS. Detta gör det möjligt att integrera ekvationerna med relativt stora tidssteg och få iterationer per tidssteg. Det i sin tur leder till kortare beräkningstider.
- 3) I CFX kan man simulera vattnets strömning som turbulent och luftens som laminär. Detta bidrar till en förkortning av beräkningstiden.

I FLUENT och PHOENICS måste både vattnets och luftens strömning modelleras som antingen turbulent eller laminär.

Det är viktigt att påpeka här att PHOENICS, FLUENT och CFX utvecklas kontinuerligt av respektive programs leverantör. Vårt val av CFX för beräkningar av de övriga fallen får ej ses som ett underkännande av de andra två programmen.

6.2.2 Fall 3, 4 och 6 (VUAB)

Resultaten av beräkningarna i fall 3, 4 och 6 visas i bilagorna 5-7. Tabell 19 visar beräknade överfallshöjder, 1,5 m uppströms utskovets vertikala front, för olika fall och olika flöden. I fall 3 modelleras hela geometrin, medan av symmetriskäl modelleras hälften av geometrierna i fall 4 och 6.

Beräkningarna gjordes med $k - \varepsilon$ modellen för vattnets rörelser och konstant viskositet i luften. Antal beräkningsceller var ca 90 000 i fall 3 och ca 45 000 celler för fall 4 och fall 6.

Beräknings- Fall	Överfallshöjd vid centrumplanet (m)		
	Lägsta flödet	Mellan- flödet	Högsta flödet
3	0,080	0,170	0,238
4	0,088	0,184	0,261
6	0,112	0,201	0,267

Tabell 19 Sammanställning av resultaten av beräkningsfall 3, 4 och 6.

6.2.3 Sammanfattande slutsatser (VUAB)

Resultaten från beräkningar med PHOENICS, CFX och FLUENT överensstämmer väl kvalitativt och i viss mån även kvantitativt. CFX valdes för beräkningarna i fall 3, 4 och 6 med motiveringen är att programmet har multiblockteknik, som underlättar geometri- och nätgenerering, samt att beräkningarna kunde utföras snabbare med CFX.

En viktig slutsats av detta uppdrag är att långa beräkningstider är den dominerande svagheten i tre-dimensionella beräkningar av strömning över utskov. Dessa kan bli orimligt långa och därmed dyra även för små geometrier.

7 Handberäkningar

Beräkningar av detta slag, med hjälp av handformler kombinerat med erfarenhet, har traditionellt varit ett vanligt verktyg vid dimensioneringsarbete. Handberäkningarna, i detta fall, utfördes med avsikt att få en uppfattning om hur stora differenser från uppmätta värden som man kan påräkna vid denna form av dimensionering. Beräkningarna utfördes av två oberoende konsultföretag, väl förfarna vid dylika uppdrag. Den ena beräkningen (Handberäkning 1) utfördes enligt principen ”att vara på den säkra sidan” vad det gäller avbördningsförmåga. Den andra beräkningen (handberäkning 2) utfördes enligt de Norska föreskrifterna för avbördningsberäkningar. Resultaten från handberäkningarna i form av överfallshöjd (cm) för respektive fall presenteras i tabell 20.

Fall	Flöde (l/s)	Handberäkning 1. (cm)	Handberäkning 2. (cm)
2 – 100	19	10.5	10.2
2 – 200	50	20	18.5
2 – 300	85	29	25.5
3 – 100	17	11	9.5
3 – 200	44	20.5	17.1
3 – 300	75	29	23.7
4 – 100	15	9.5	9.4
4 – 200	46	20	18.8
4 – 300	80	28.5	26.4
5 – 100	13	8	8.4
5 – 200	44	18.5	17.8
5 – 300	85	28.5	26.6
6 – 100	20	12	12.8
6 – 200	45	20.5	21.5
6 – 300	70	27	28.3
7 – 100	16	10	9.6
7 – 200	45	20	19.1
7 – 300	75	28.5	26.8

Tabell 20. Sammanfattning av resultat från handberäkningar, flöde (l/s) samt överfallshöjd.

8 FELANALYS.

För att kunna bilda sig en uppfattning om onoggrannheten i de olika beräkningarna i jämförelse med de uppmätta resultaten ställdes följande formler för felet upp.

Procentuellt fel i överfallshöjd (%):

$$H_{\bar{O}} = (H_B - H_M) * 100 / H_M$$

Där $H_{\bar{O}}$ är felet i vattenstånd över skibordets krön, H_B är beräknat vattenstånd och H_M är uppmätt vattenstånd.

Procentuellt beräknat fel i flödet (%):

$$Q_{\bar{O}} = ((H_{\bar{O}}/100) + 1)^{1.5} - 1 * 100$$

De beräknade resultaten presenteras i tabell 21.

Fall	CFD Fel i H (%)	Handber. 1. Fel i H (%)	Handber. 2. Fel i H (%)	CFD Fel i flöde (%)	Handber. 1. Fel i flöde (%)	Handber. 2. Fel i Q (%)
2-100	-6.1	2.7	-0.2	-9.0	4.1	-0.3
2-200	-2.0	2.7	-5.0	-2.9	4.0	-7.5
2-300	0.4	6.7	-6.2	0.7	10.2	-9.1
3-100	-16.2	15.2	-0.5	-23.3	23.6	-0.8
3-200	-2.3	17.8	-1.7	-3.4	27.9	-2.6
3-300	-0.4	21.3	-0.8	-0.6	33.7	-1.3
4-100	-2.4	5.3	4.2	-3.6	8.1	6.4
4-200	0.7	9.4	2.8	1.0	14.4	4.3
4-300	2.4	11.7	3.5	3.6	18.2	5.3
5-100	0.2	-9.7	-5.2	0.3	-14.2	-7.7
5-200	3.8	-5.1	-8.7	5.8	-7.6	-12.8
5-300	4.6	2.5	-4.3	6.9	3.8	-6.4
6-100	-5.9	0.8	7.6	-8.7	1.3	11.6
6-200	0.5	2.5	7.5	0.8	3.8	11.5
6-300	2.7	3.8	8.8	4.1	5.8	13.6
7-100	-11.9	4.2	0.0	-17.3	6.3	0.0
7-200	-0.3	9.9	4.9	-0.5	15.2	7.5
7-300	1.6	11.3	4.7	2.4	17.5	7.1

Tabell 21. Sammanfattning av resultaten för de 6 fallen. Procentuellt fel i flöde resp överfallshöjd.

9 Sammanfattning av resultaten

Som framgår av tabell 21 så ger CFD-beräkningarna resultat i god överensstämmelse med de uppmätta värdena. De största skillnaderna förekommer i lågflödesberäkningarna. Detta kan förklaras med den lägre upplösning som använts i beräkningarna för dessa fall (fast grid). De högre flödena ger resultat som avviker mindre än 3 % från mätningarna vilket uppskattats vara det maximalt fel som gäller för mätningarna i rännan. Utgående från detta kan man dra slutsatsen att CFD-beräkningar mycket väl kan nyttjas för att fastställa avbördningförmågan i utskov, där det ju är höga flöden som är av intresse. Å andra sidan tar beräkningarna även för dessa enkla och stiliserade fall CPU-veckor i anspråk för varje enskilt beräkningsfall med dagens datorer (1997). Mer komplicerade fall där uppströmsdelarna av älven/magasinet måste inkluderas kommer givetvis att hindra att CFD blir ett praktiskt verktyg att nyttja för dimensioneringsarbete i ännu några år.

Någon slutsats avseende skillnad mellan de olika programmen vad gäller beräkningsresultat har inte konstaterats och utvecklingen inom området sker snabbt varför en sådan analys vore av begränsat värde.

Vad gäller handberäkningarna kan av naturliga skäl spridningen bli stor beroende bl.a. på kompetens och erfarenhet hos den som räknar. Beräkningarna enligt principen "på säkra sidan" visar större spridning än enligt riktlinjer som t.ex. de norska.

Den använda fysiska modellen hade vissa mättekniska svagheter vilket tidigare kommenterats. Beräkningarna kan möjligen indirekt sägas styrka att felen vid fysiska modellprov med den använda mättekniken är av samma storleksordning som beräkningsfelen vid ett korrekt nyttjande av kvalificerade CFD-beräkningar.

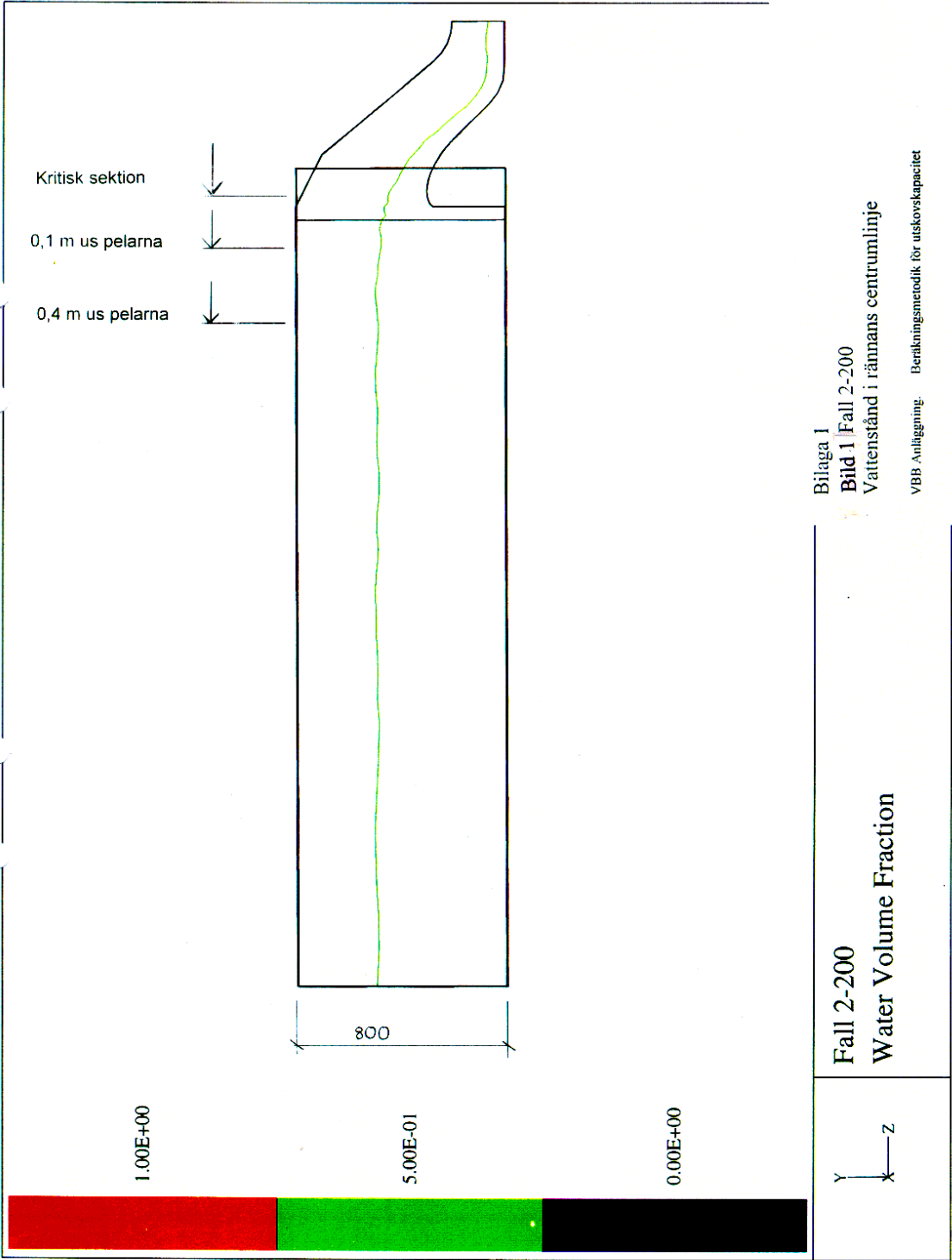
De genomförda beräkningarna tyder på att de norska riktlinjerna är en god grund för handberäkningar.

10 Referenser

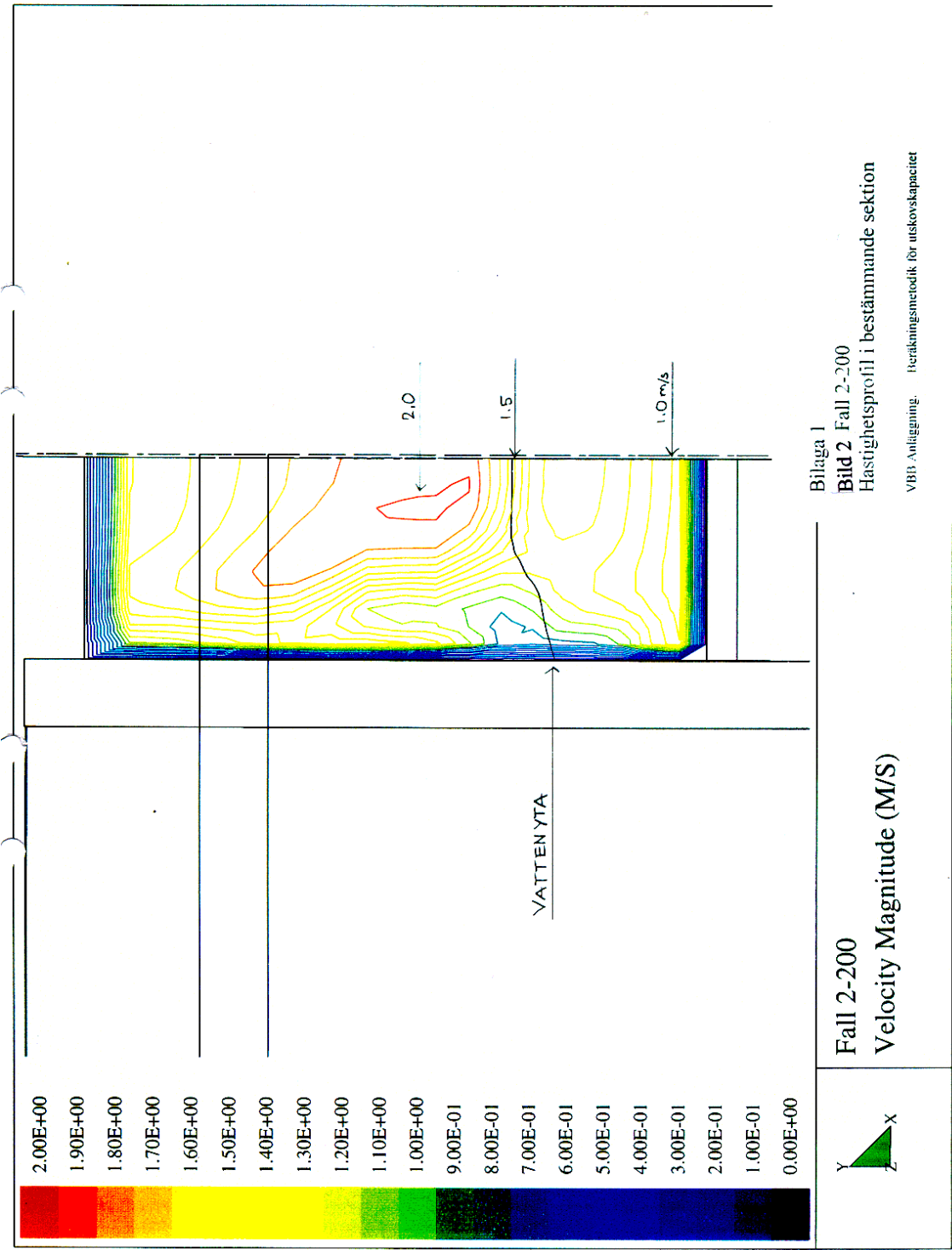
1. CHAM (1994), *PHOENICS Instruction Courses, Course Notes*, CHAM TR/300, UK.
2. AEA Technology (1996), *CFX 4.1- Flow Solver User Guide*, UK.
3. FLUENT Incorporated (1996), *FLUENT User's Guide*, Release 4.4, USA.
4. Schlichting, H. (1968), *Boundary-Layer Theory*, McGraw-Hill Book Company, New York, N.Y.
5. Cederwall, K och Larsen, P. (1981). *Hydraulik för väg- och vattenbyggare*, Liber Läromedel Malmö, Bröderna Ekstrands Tryckeri AB, Lund.
6. Dargahi Bijan, "An experimental study of discharge characteristics of spillways", TRITA-AMI REPORT 3032
7. Cederström M, Dargahi B, Hammar L, Johansson N, Rundqvist J, "CFD Modelling of Spillway Capacity - a comparison between hydraulic and mathematical models"
8. Dam Safety, Berga (ed.) *Proceedings of the International Symposium on New Trends and Guidelines on Dam Safety/Barcelona/Spain/17-19 June 1998/A.A. BALKEMA/ROTTERDAM*
9. Bard, A& Cederwall, K & Johansson, N. 1996 *CFD modelling of spillway capacity*. TRITA-AMI REPORT 3021

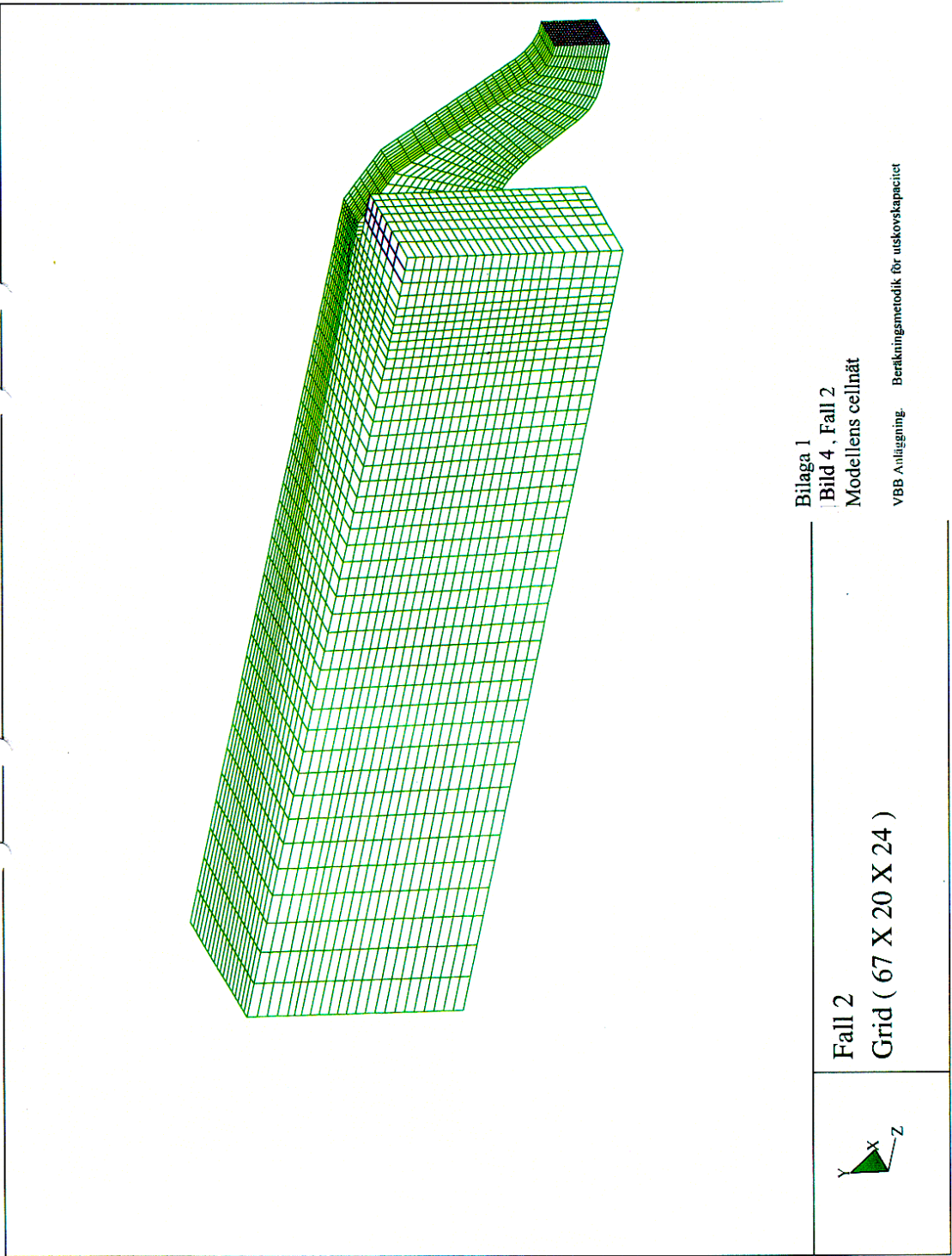
11 BILAGOR

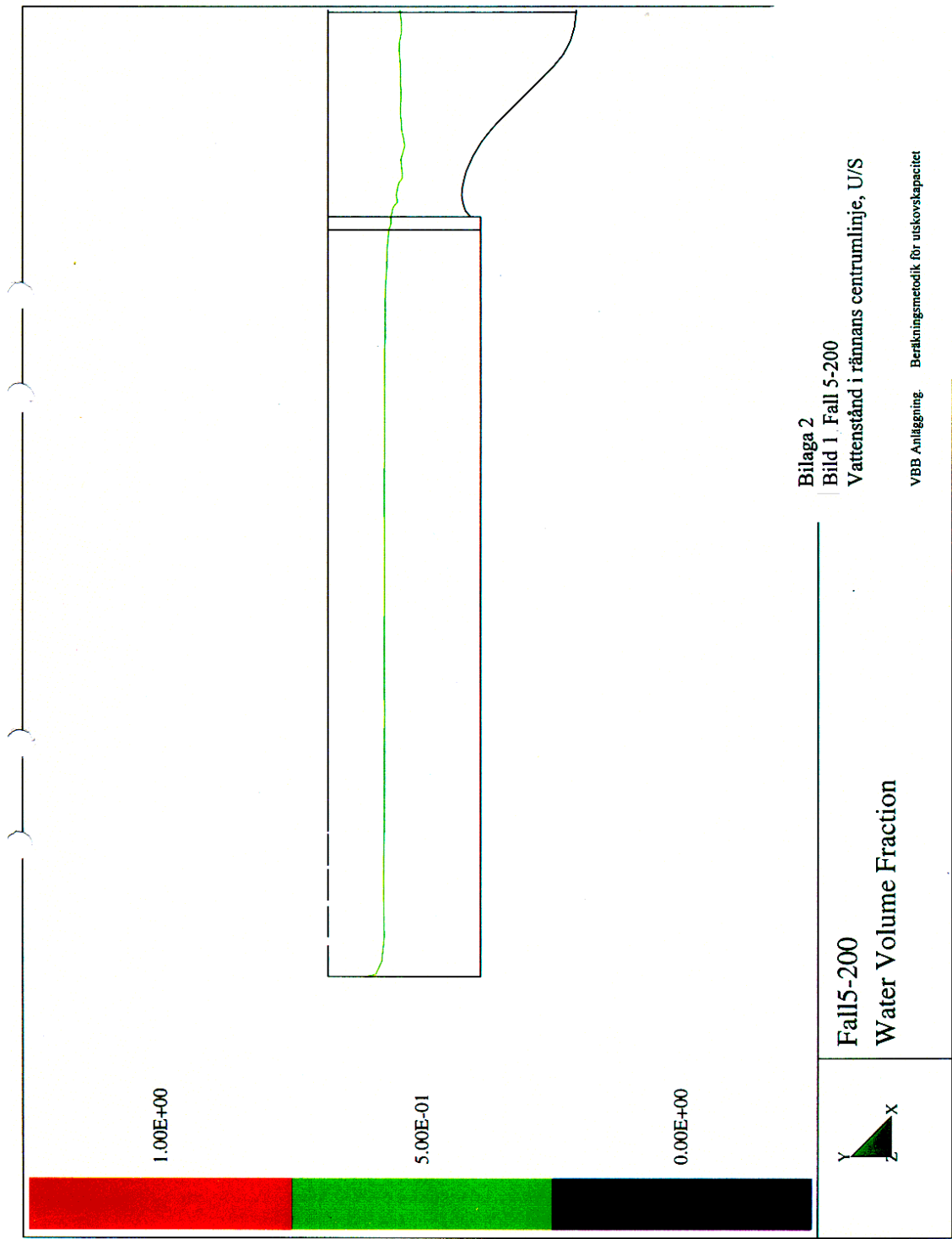
Bilaga 1	Grafisk presentation av resultaten, Fall 2 (VBB)
Bilaga 2	Grafisk presentation av resultaten, Fall 5 (VBB)
Bilaga 3	Grafisk presentation av resultaten, Fall 7 (VBB)
Bilaga 4	Grafisk presentation av resultaten, Fall 2 (VUAB)
Bilaga 5	Grafisk presentation av resultaten, Fall 3 (VUAB)
Bilaga 6	Grafisk presentation av resultaten, Fall 4 (VUAB)
Bilaga 7	Grafisk presentation av resultaten, Fall 6 (VUAB)

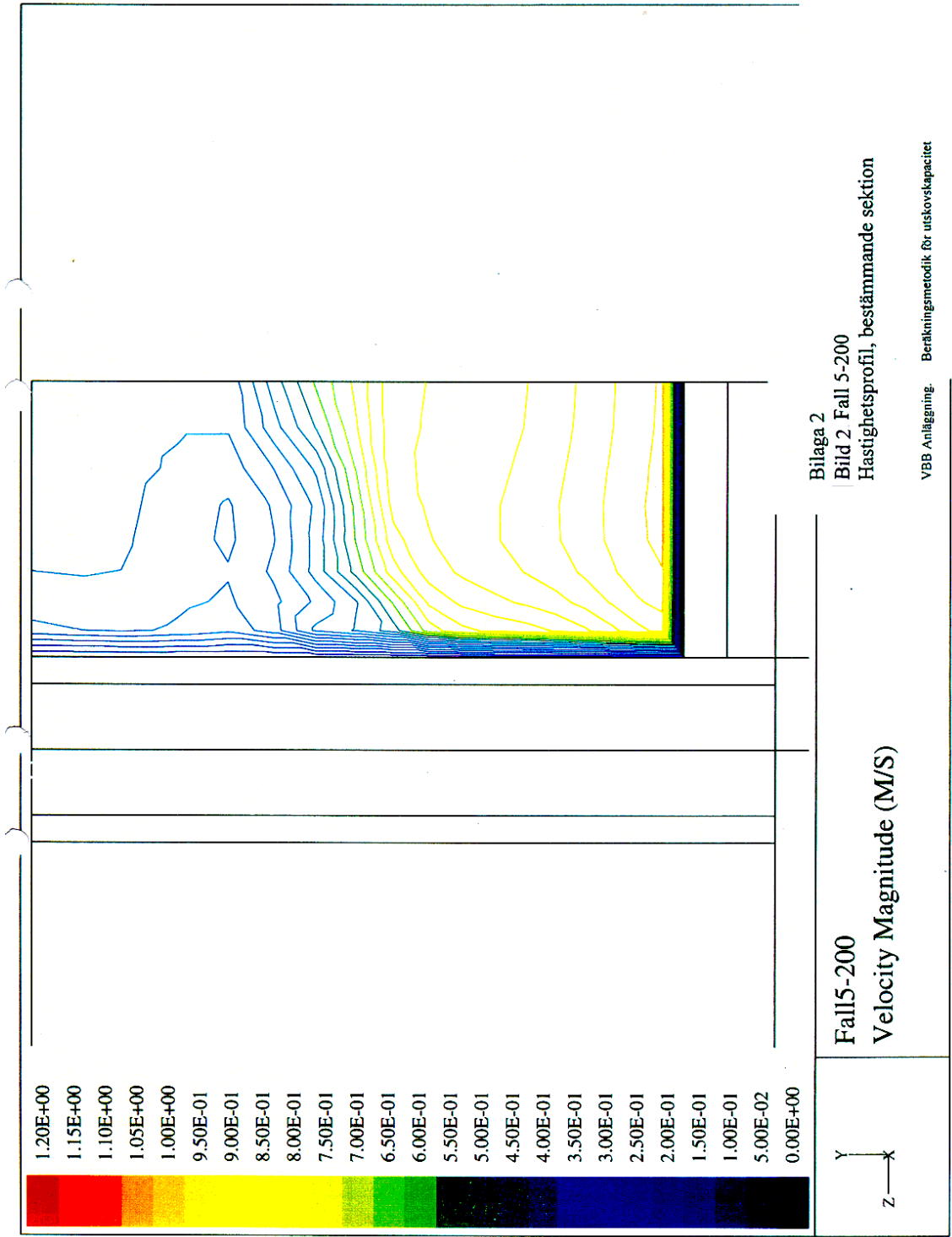


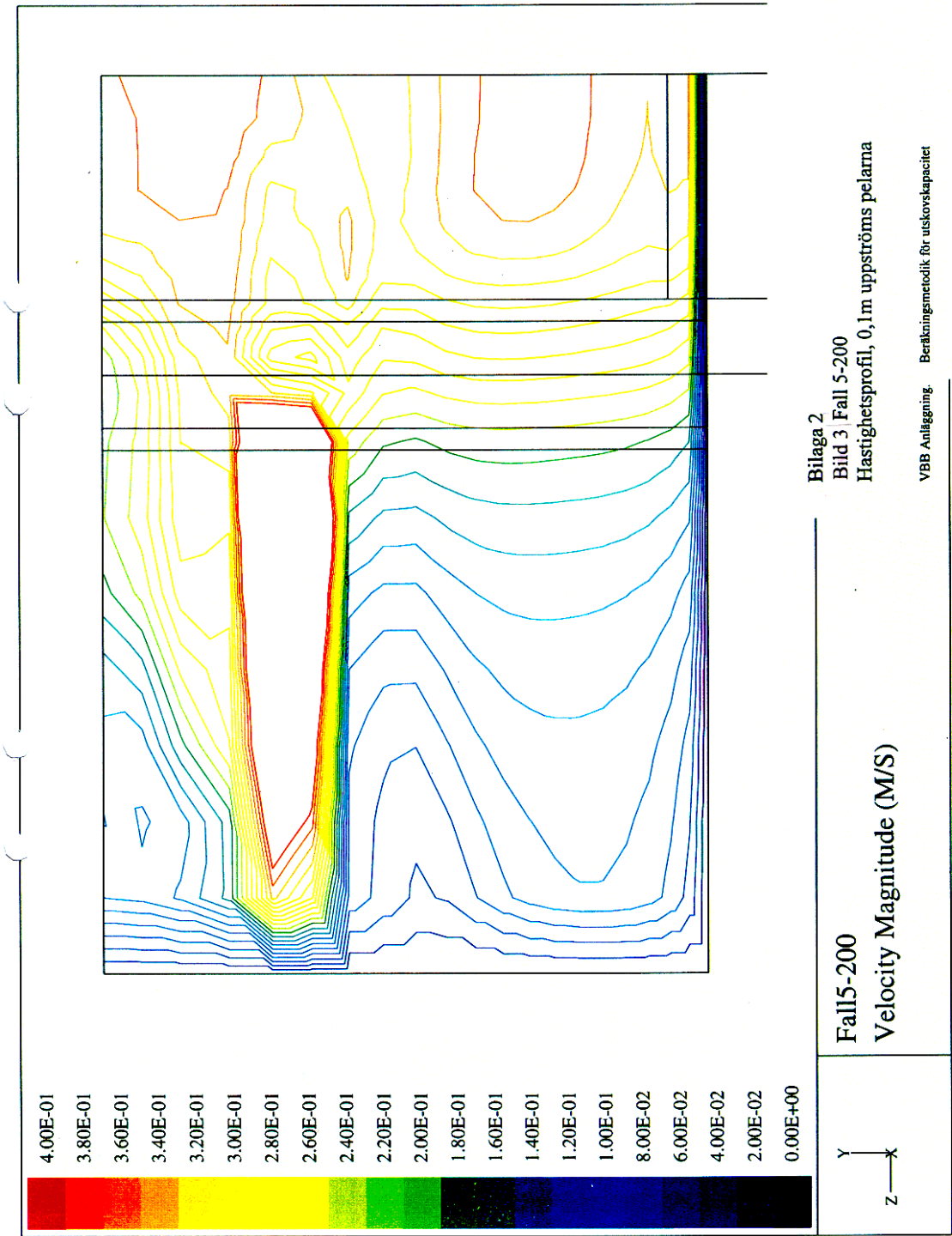
Bilaga 1
Bild 1 | Fall 2-200
Vattenstånd i rännans centrumlinje
VBB Anläggning Beräkningsmetodik för utskovskapacitet

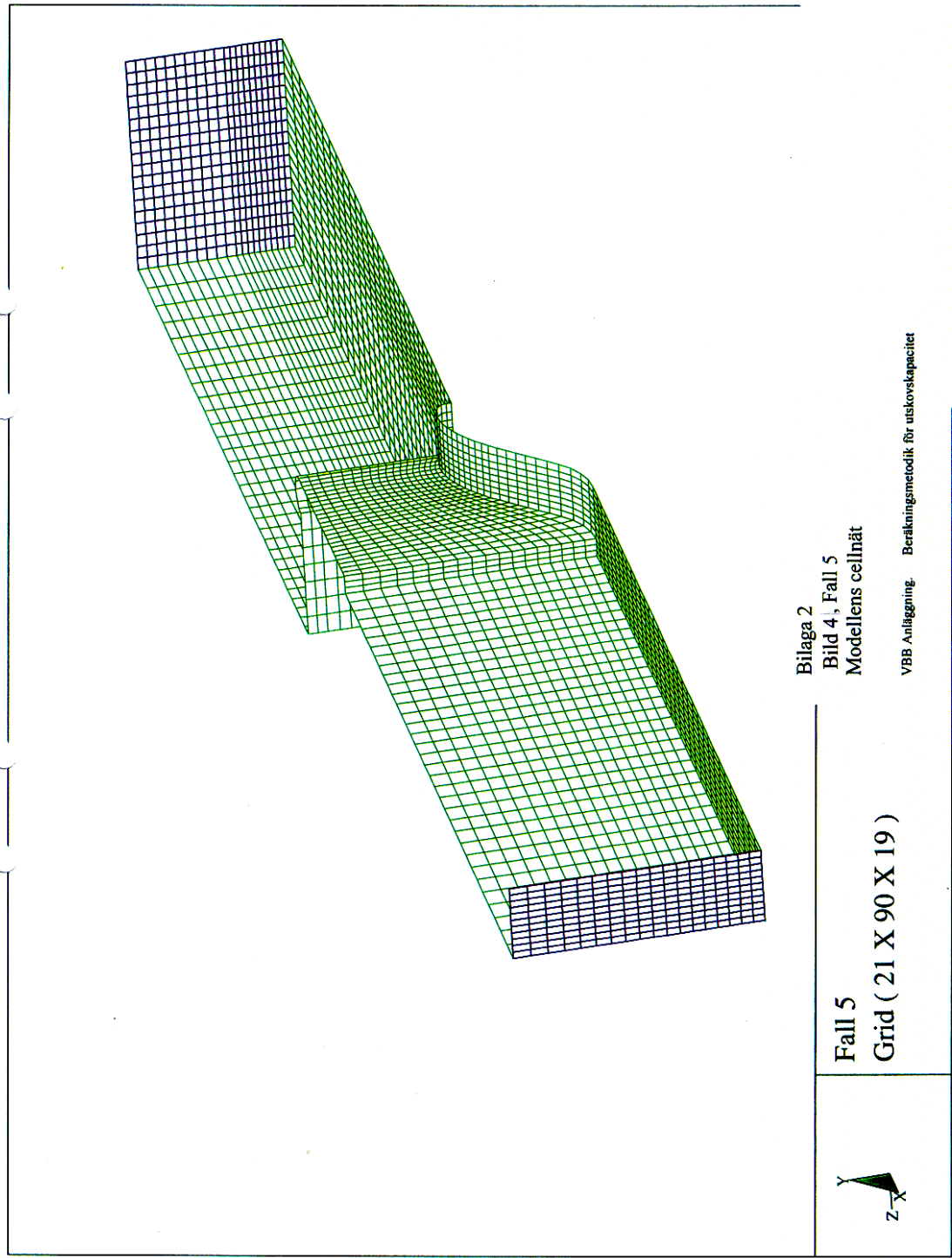


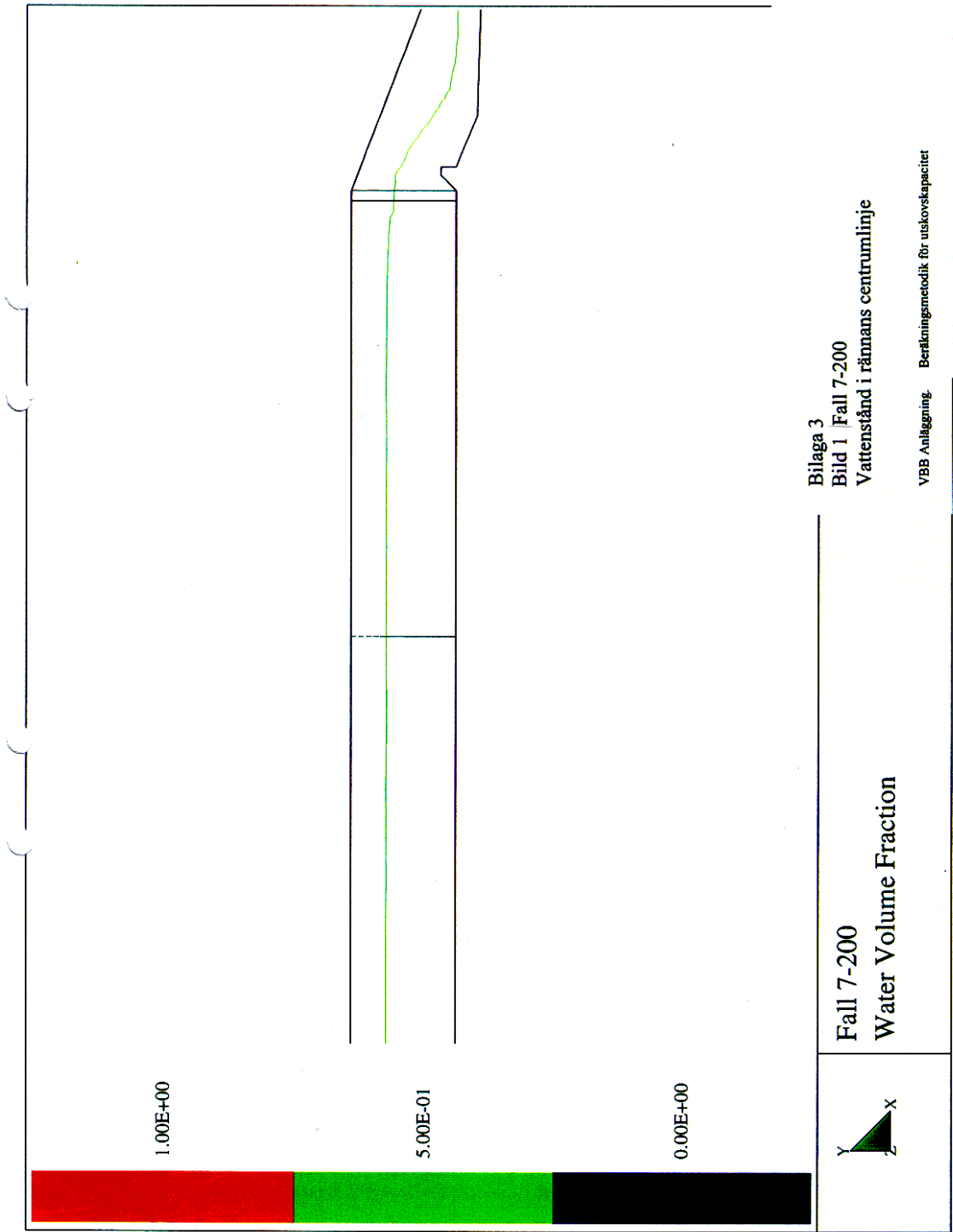


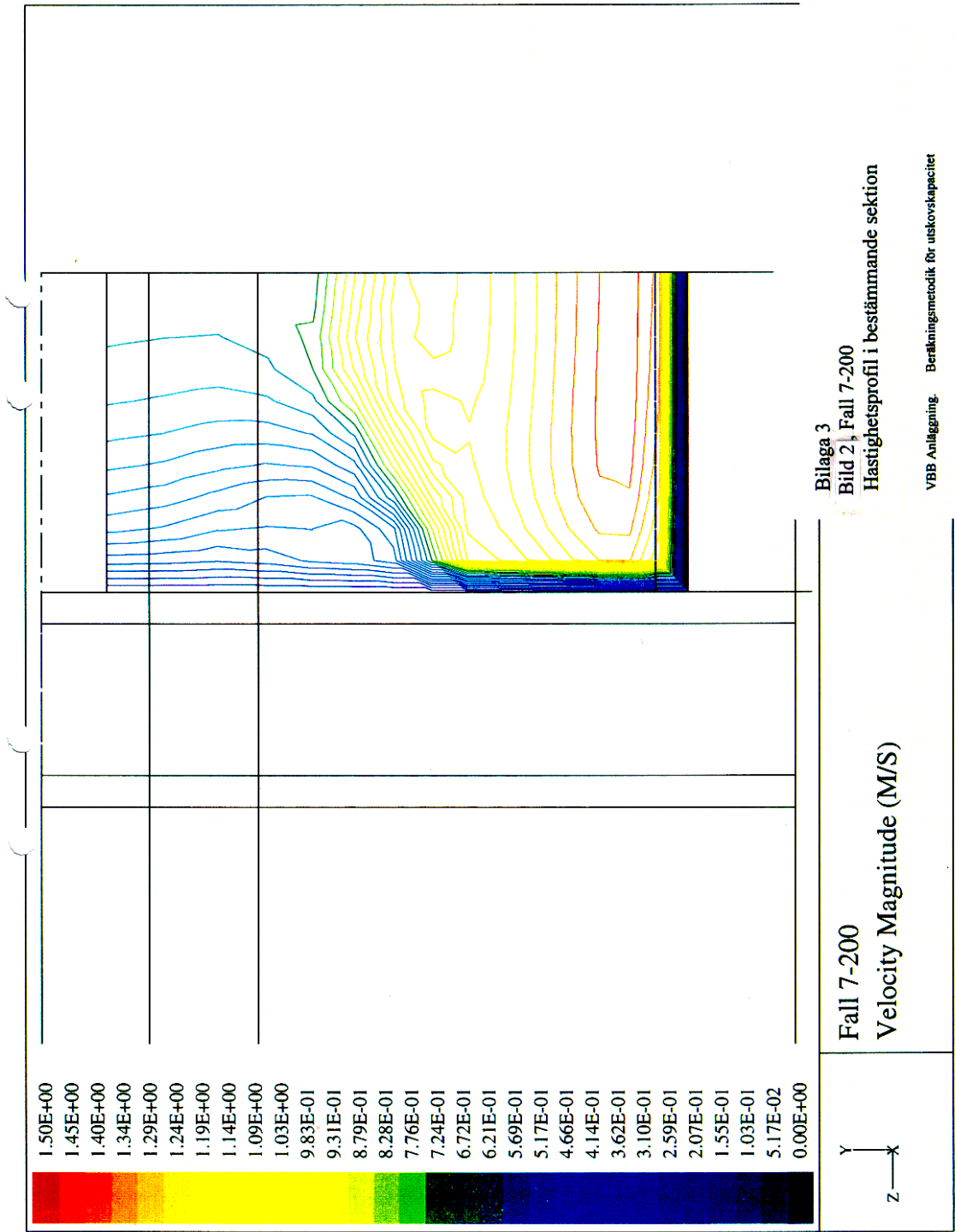


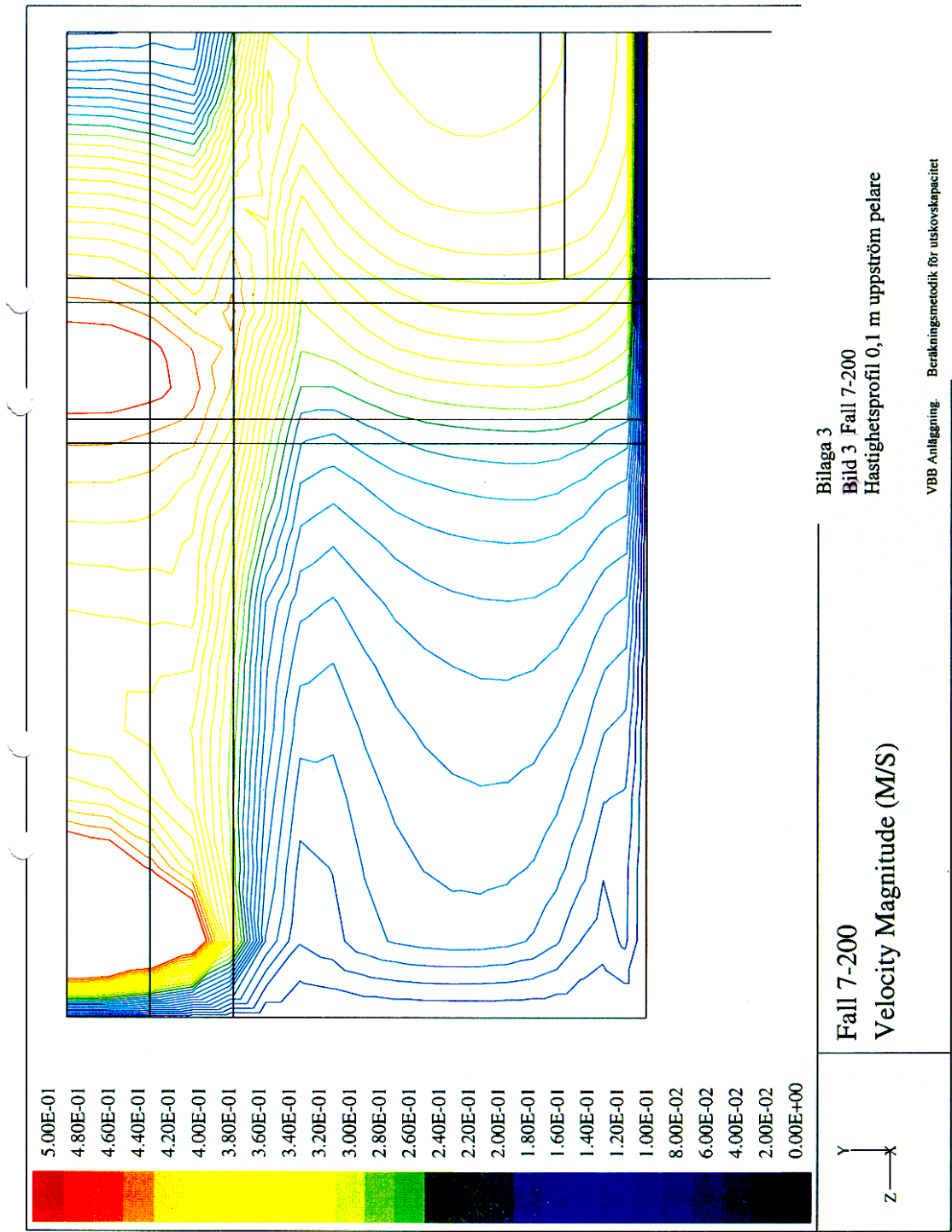


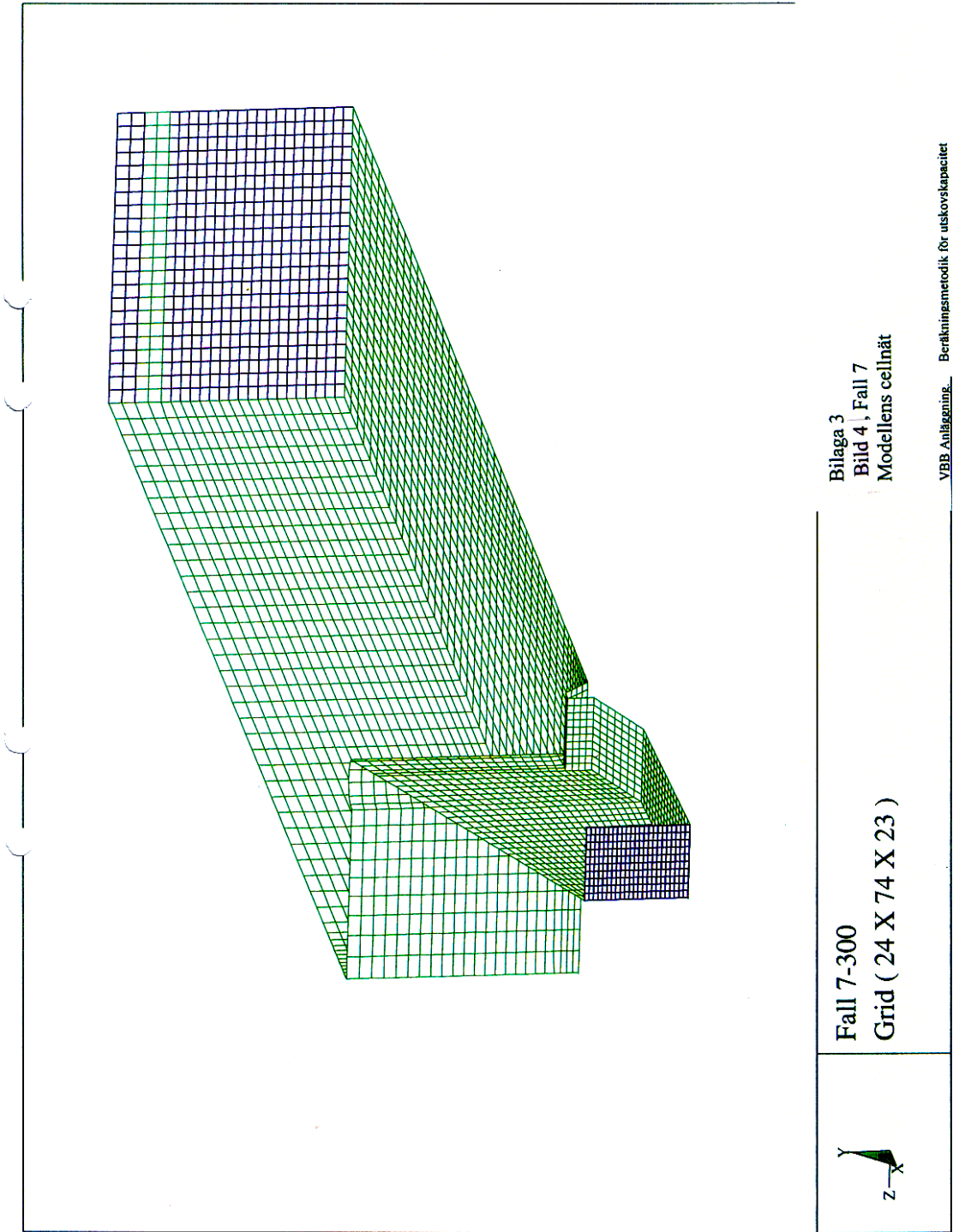






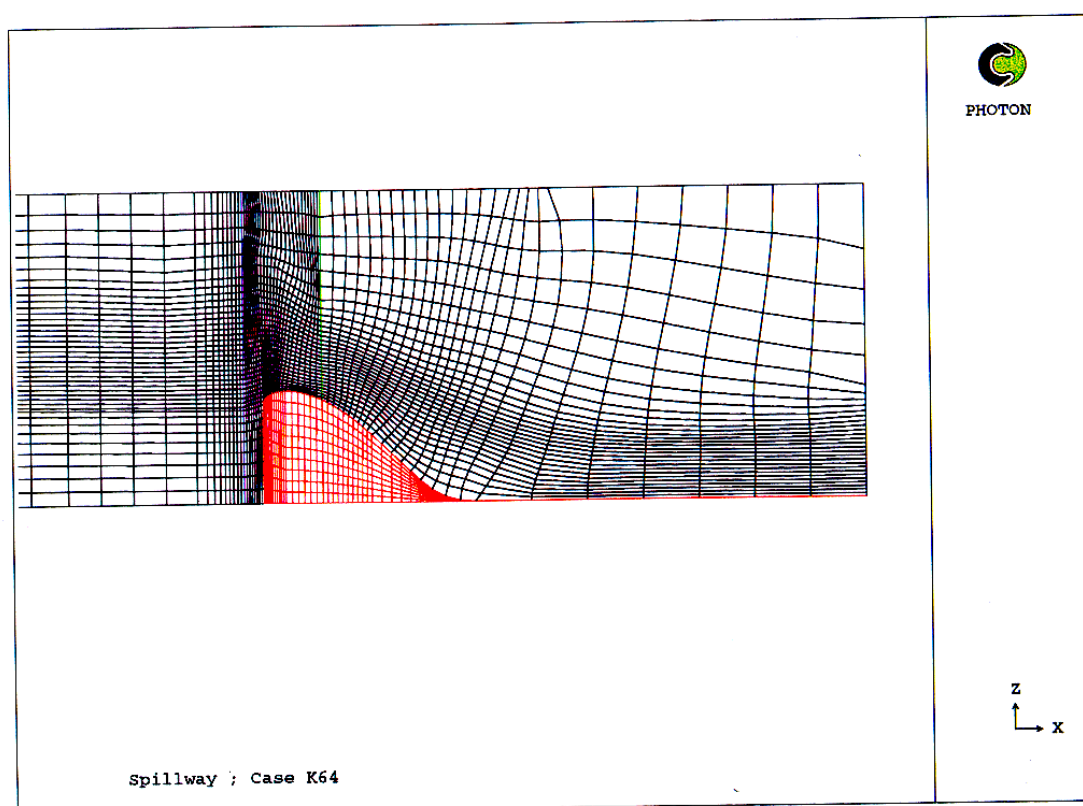




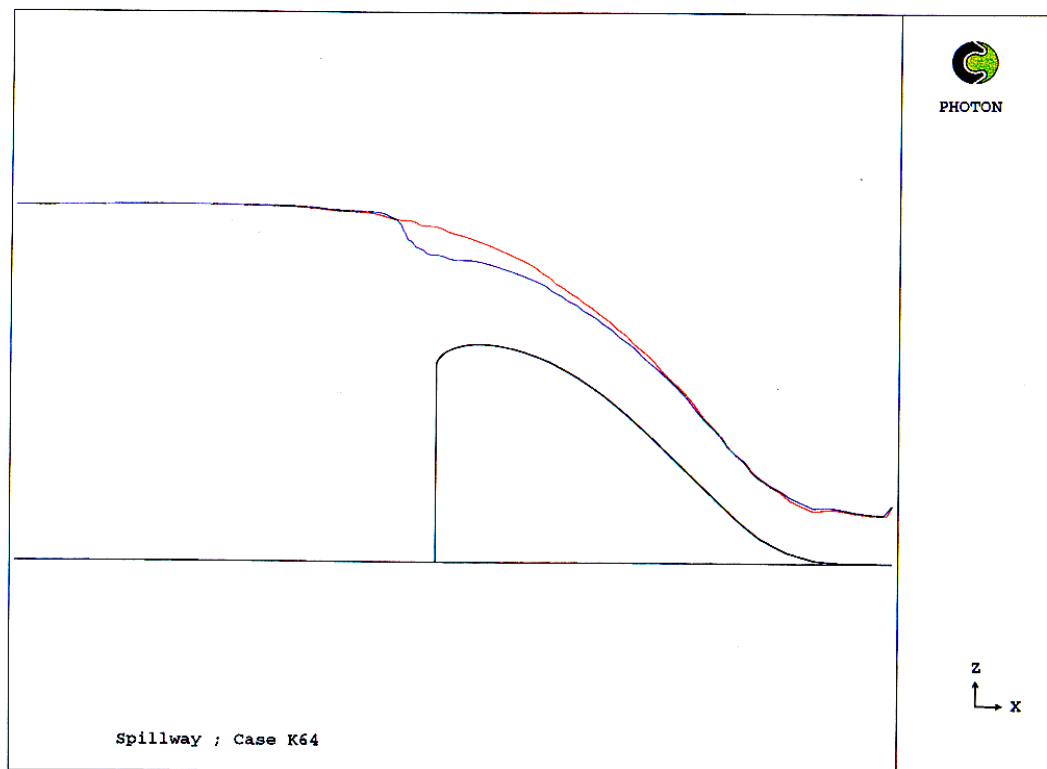


Fall 2- PHOENICS beräkningar: Beräkningsnät

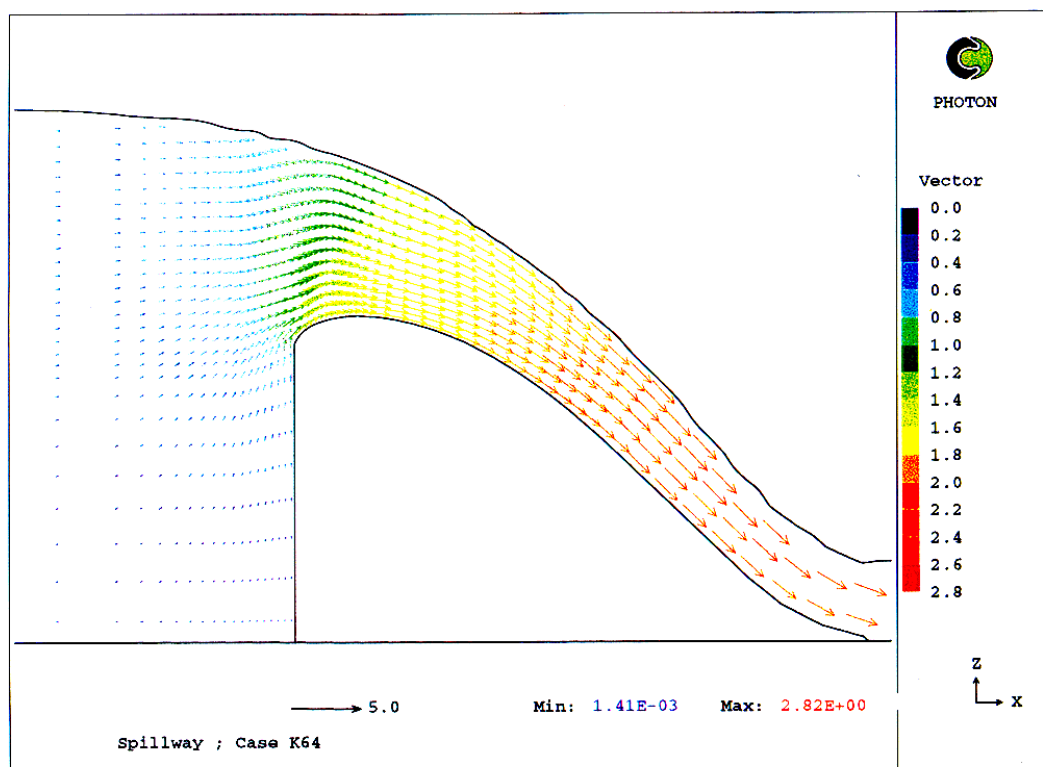
BILAGA 4
Bild 1(9)



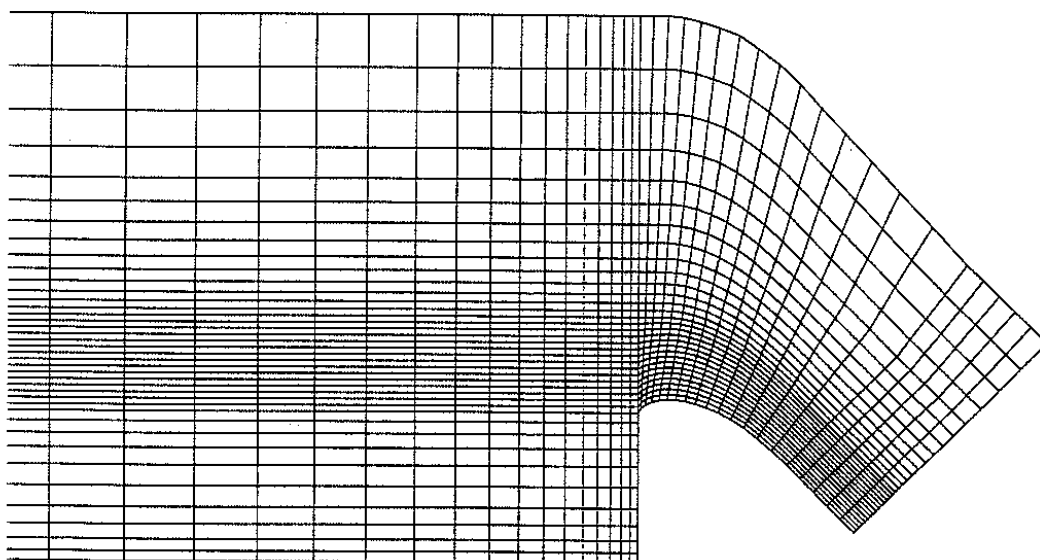
Fall 2- PHOENICS beräkningar: Vattenytans form längs utskovets centrumlinje (röd),
och längs utskovspelaren (blå)



Fall 2- PHOENICS beräkningar: Hastighetsvektorer och vattenytans form längs
utskovets centrumlinje

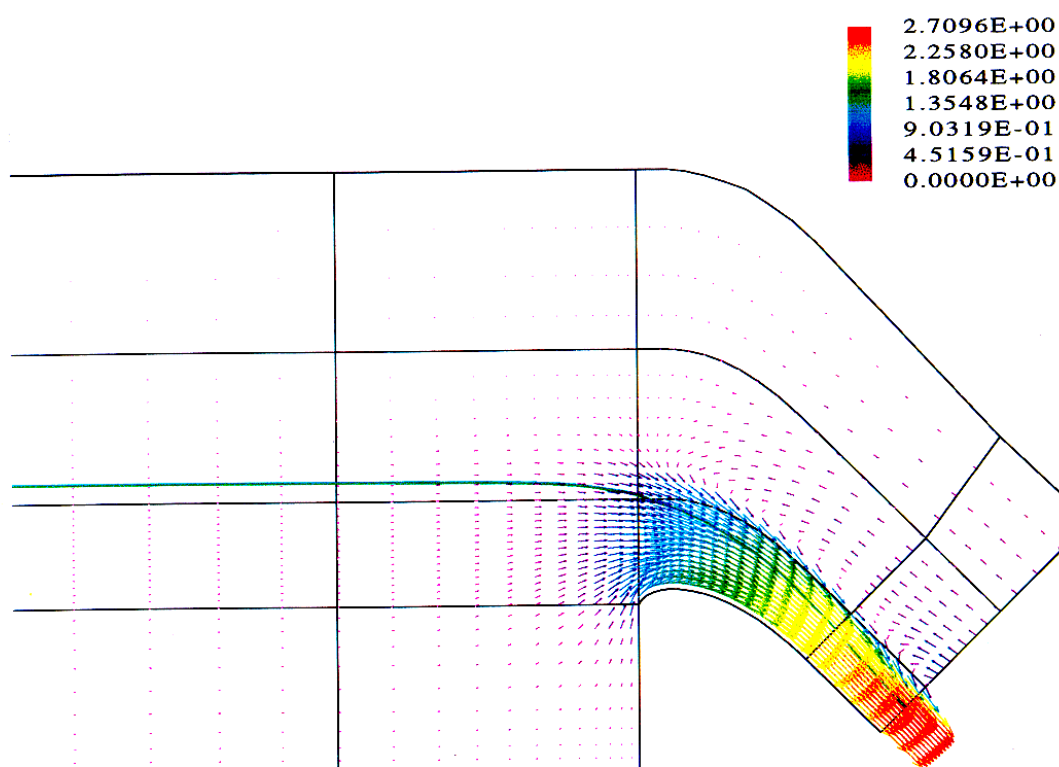


Fall 2- CFX beräkningar: Beräkningsnät

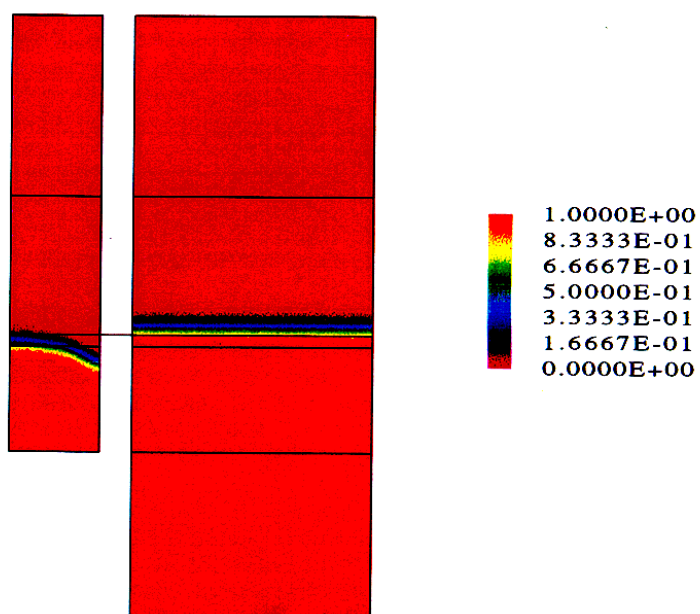


BILAGA 4
Bild 5 (9)

Fall 2- CFX beräkningar: Hastighetsvektorer och vattenytans form längs utskovets centrumlinje

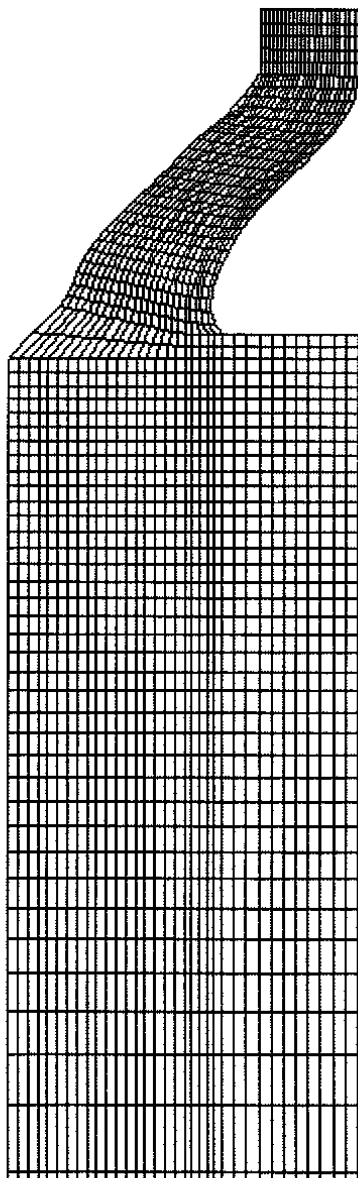


Fall 2- CFX beräkningar: Vattenytans form i ett vertikalt snitt vid pelarnosen

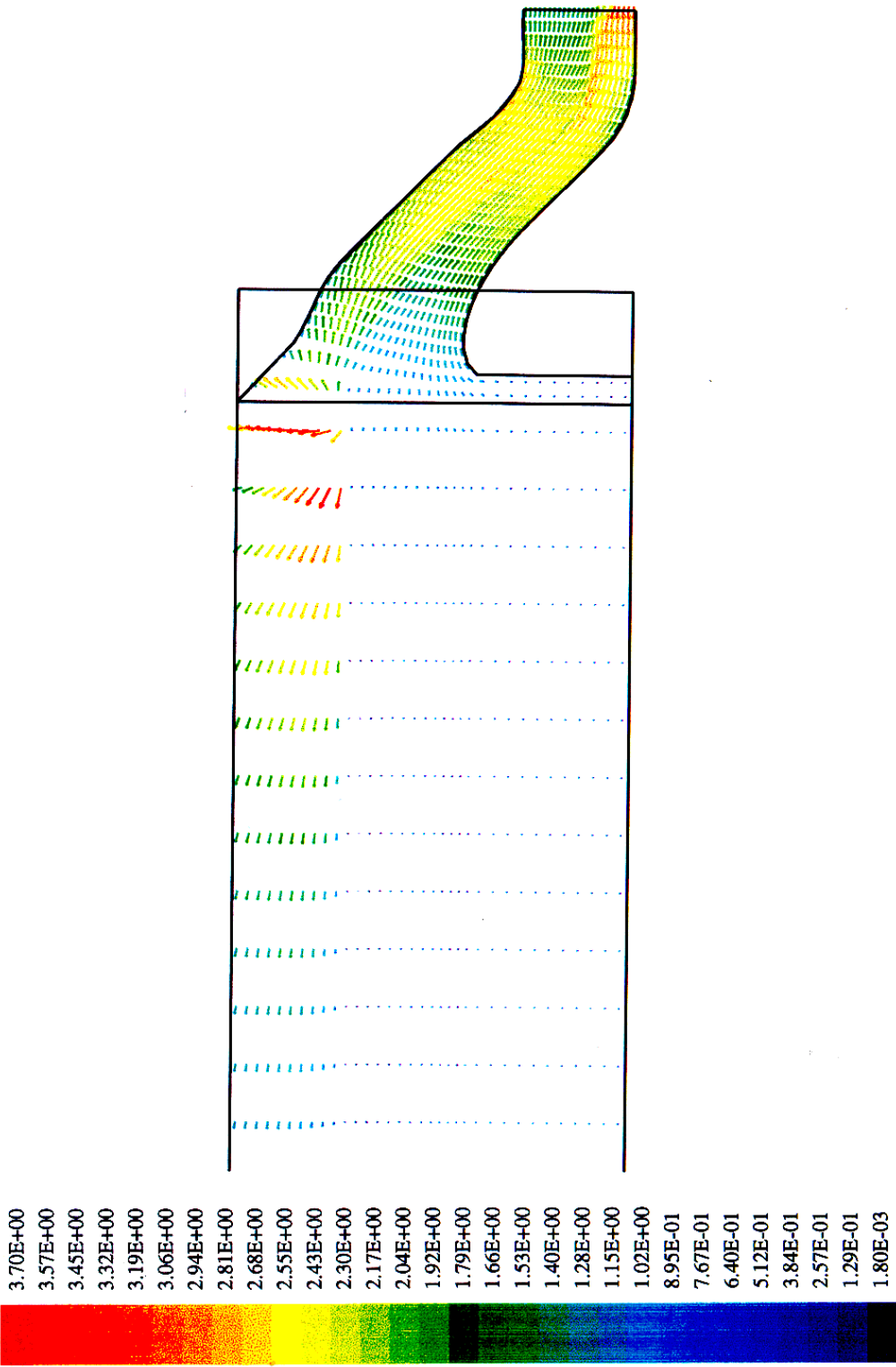


Fall 2- FLUENT beräkningar: Beräkningsnät

BILAGA 4
Bild 7 (9)

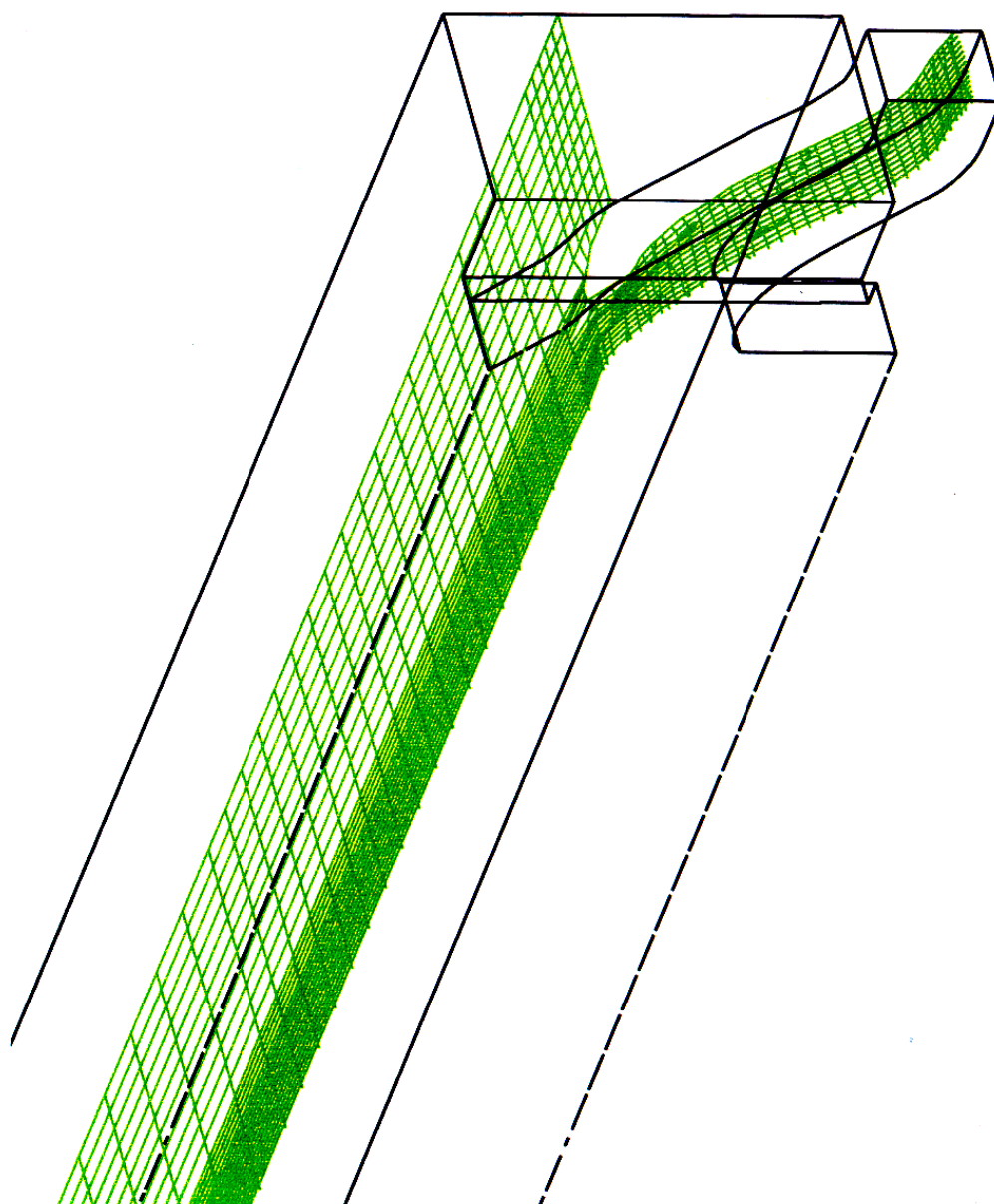


Fall 2- FLUENT beräkningar: Hastighetsvektorer längs utskovets centrumlinje



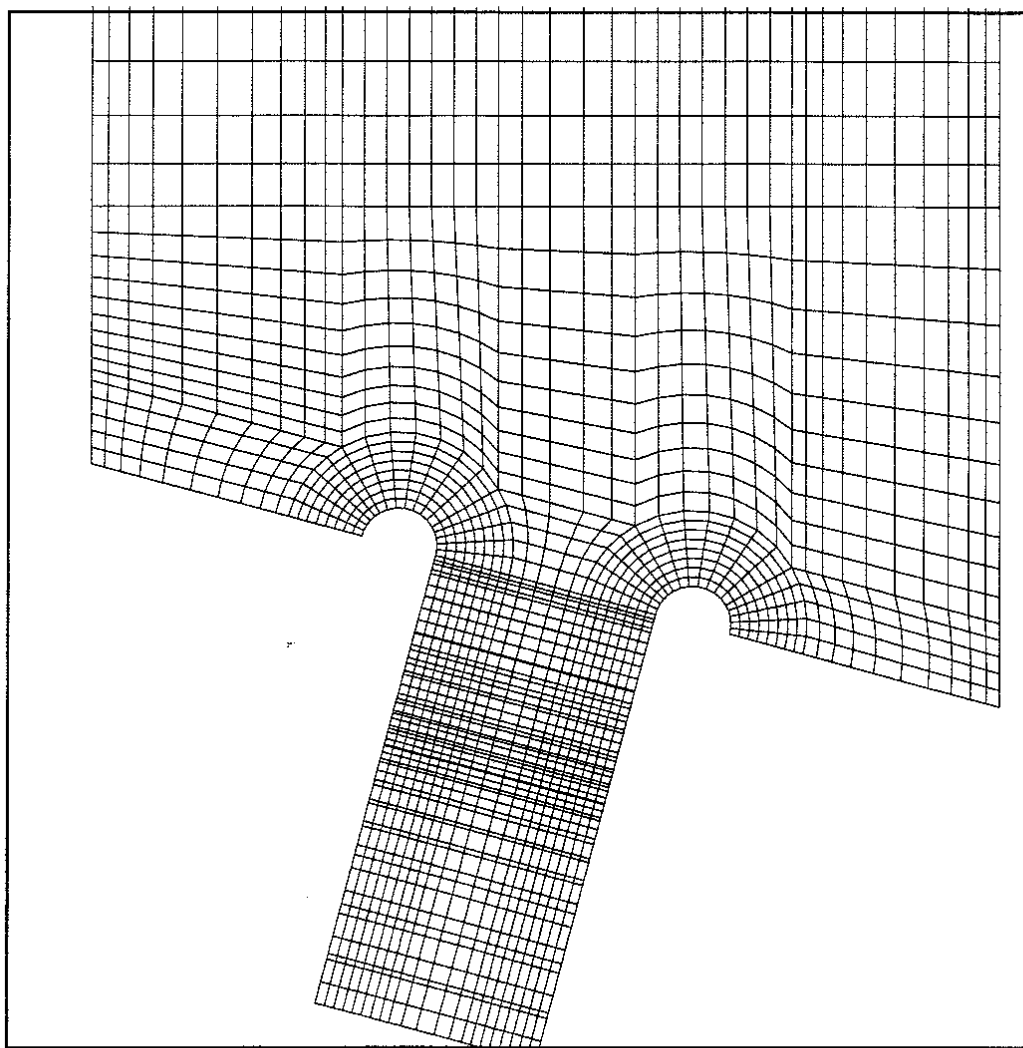
Fall 2- FLUENT beräkningar: Vattenytans form

BILAGA 4
Bild 9 (9)

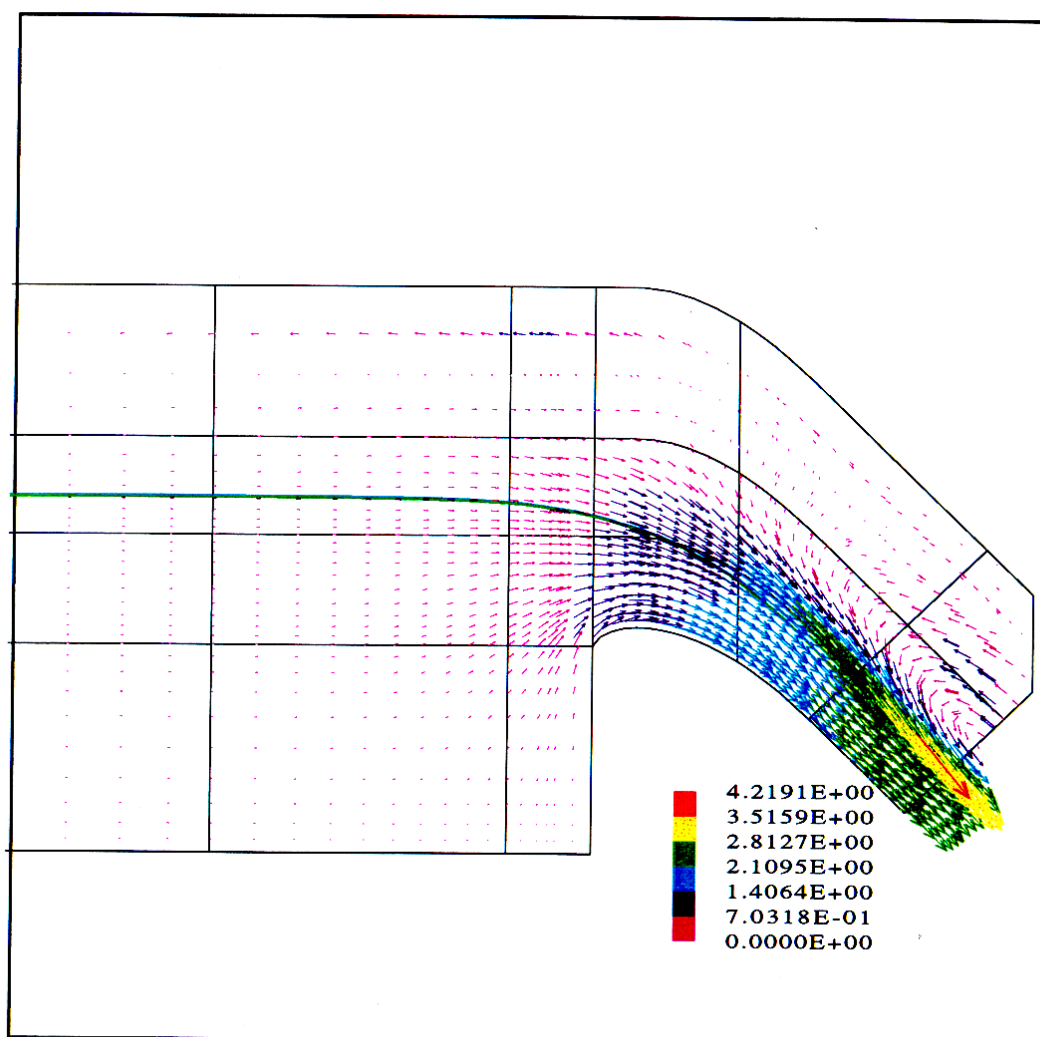


Fall 3- CFX beräkningar: Beräkningsnät

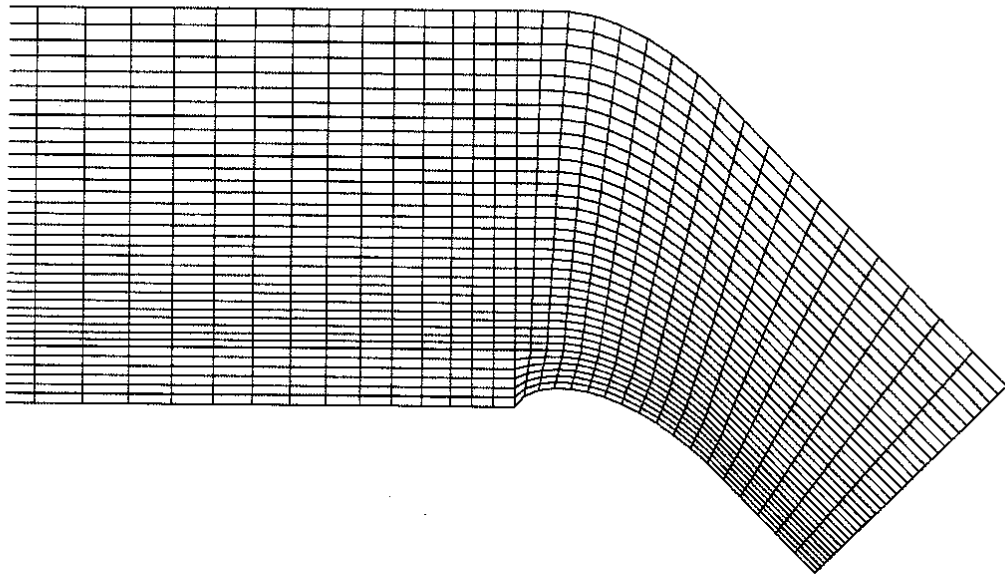
BILAGA 5
Bild 1 (2)



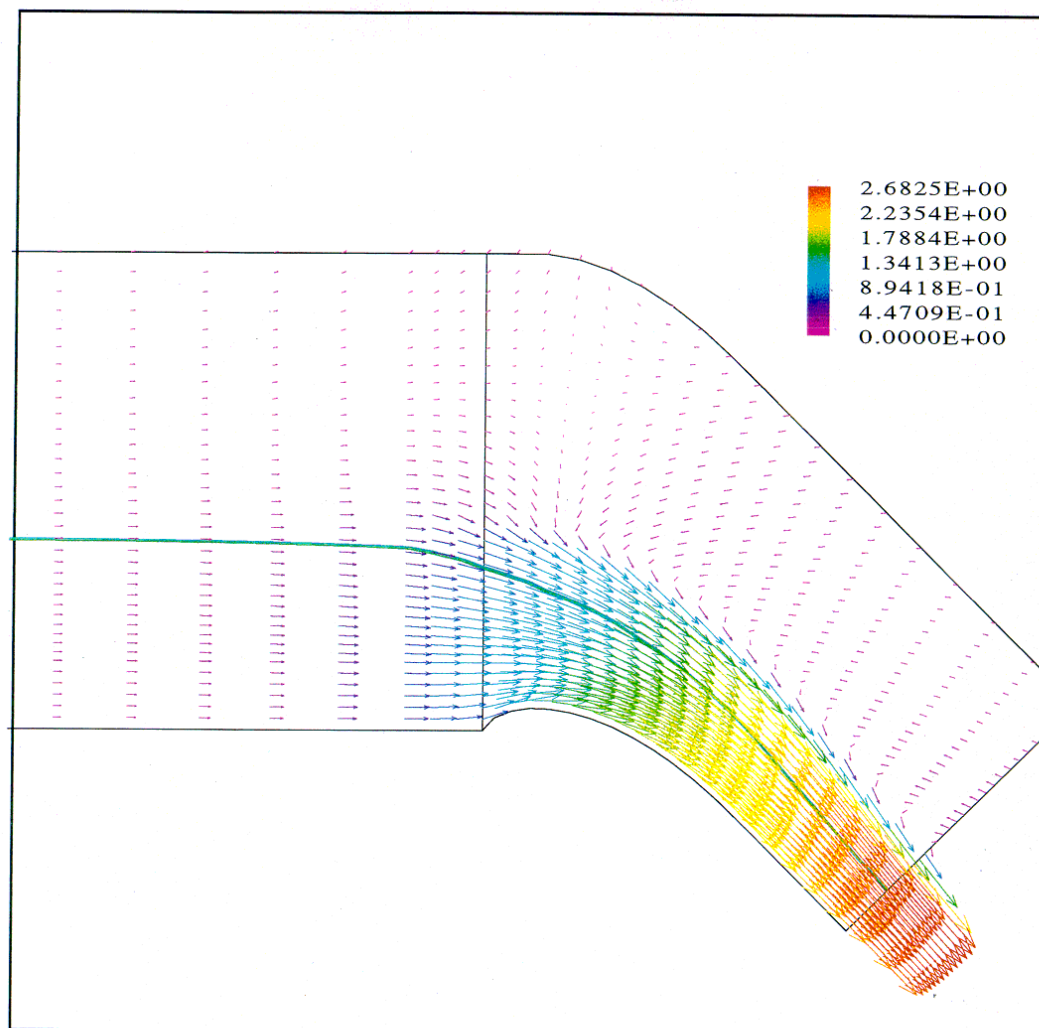
Fall 3- CFX beräkningar: Hastighetsvektorer och vattenyta längs utskovets centrumplan



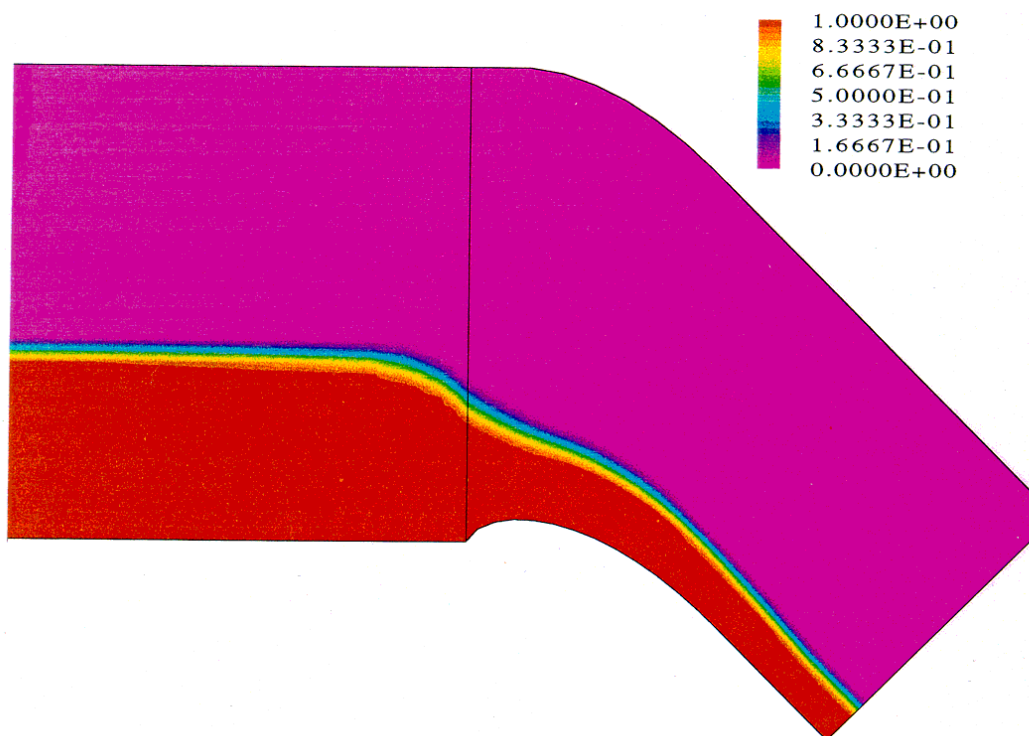
Fall 4- CFX beräkningar: Beräkningsnät



Fall 4- CFX beräkningar: Hastighetsvektorer och vattenyta längs utskovets centrumplan

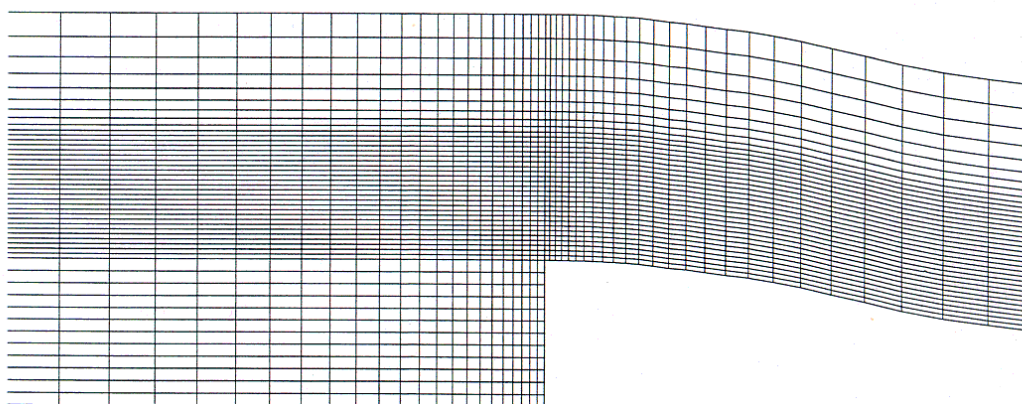


Fall 4- CFX beräkningar: Vattenytans form längs utskovspelaren

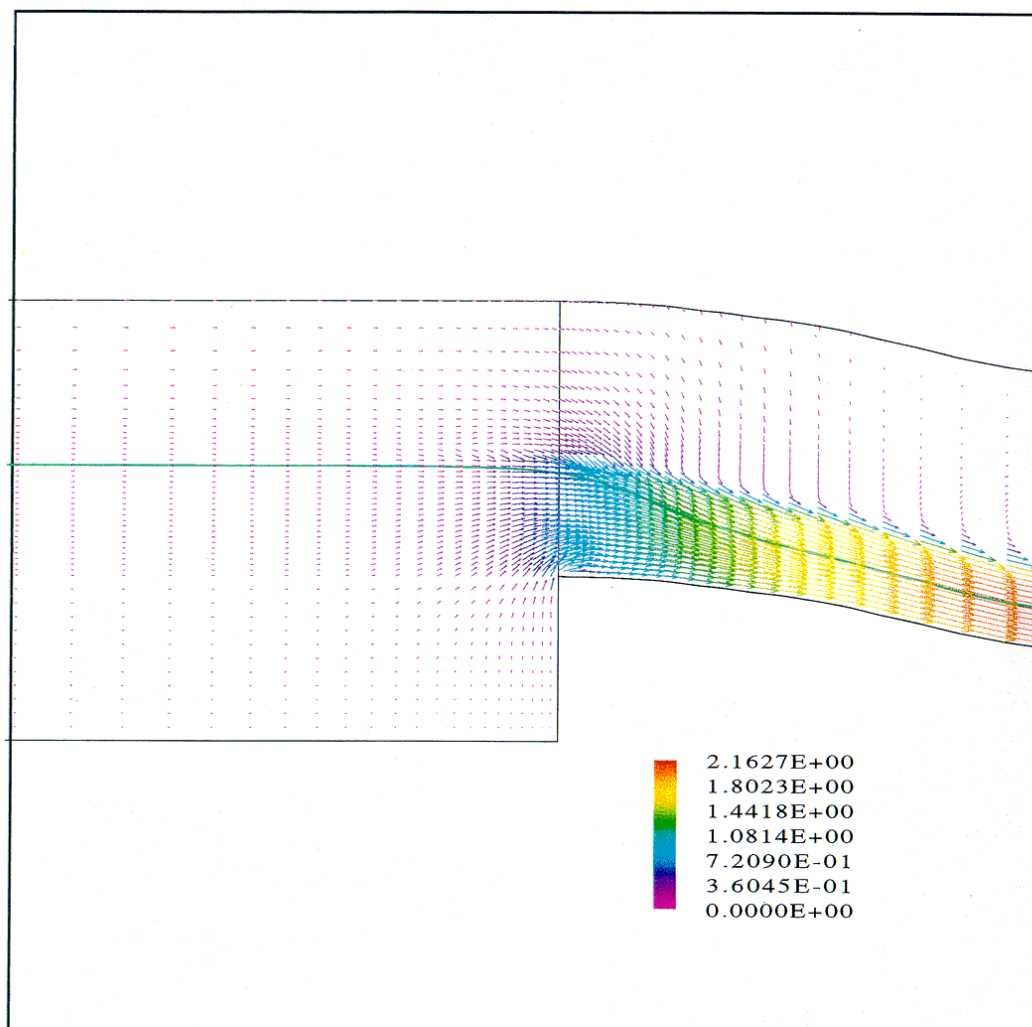


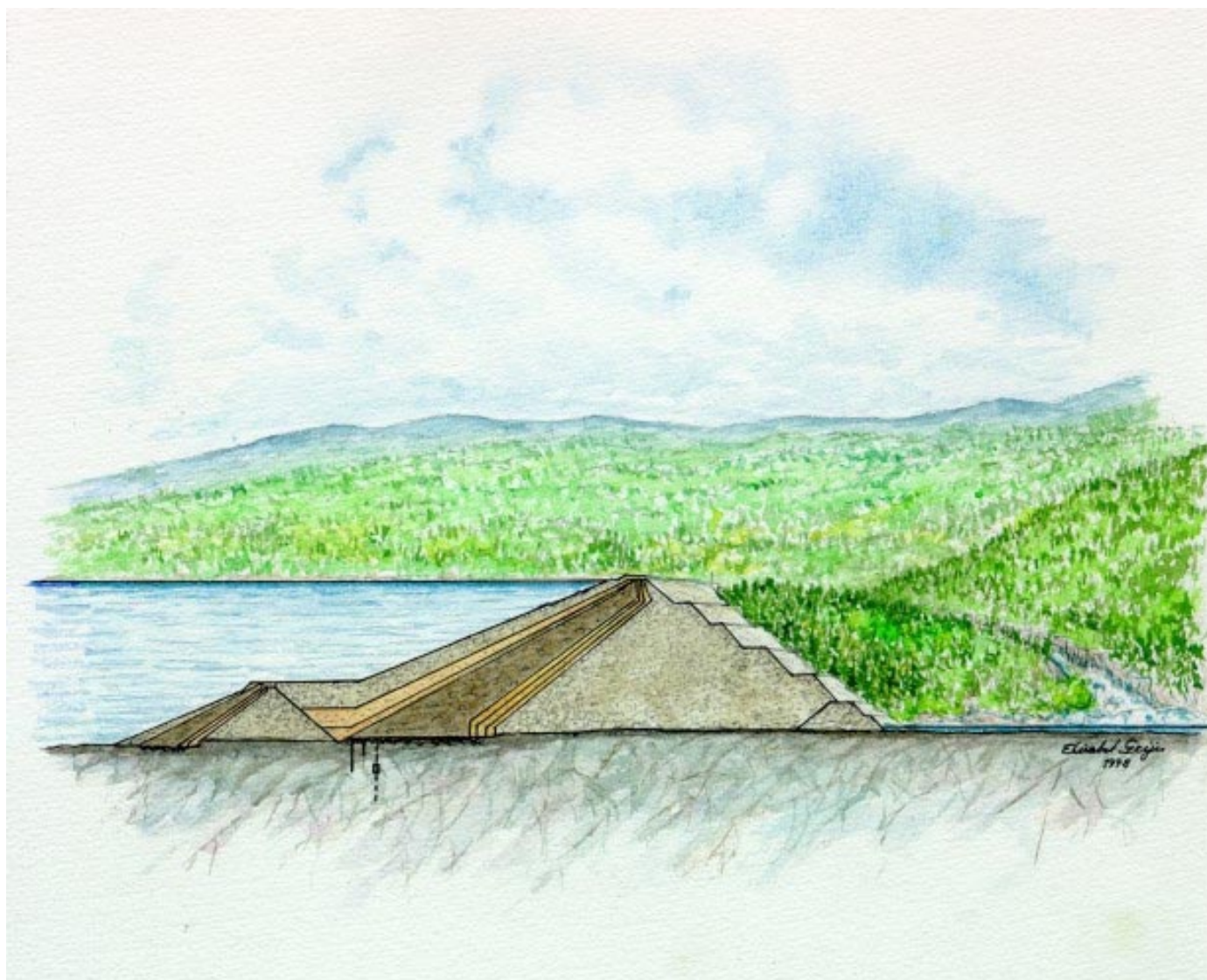
Fall 6- CFX beräkningar: Beräkningsnät

BILAGA 7
Bild 1 (2)



Fall 6- CFX beräkningar: Hastighetsvektorer och vattenyta längs utskovets centrumplan





ELFORSK

SVENSKA ELFÖRETAGENS FORSKNINGS- OCH UTVECKLINGS – ELFORSK – AB
Elforsk AB, 101 53 Stockholm. Besöksadress: Olof Palmes Gata 31
Telefon: 08-677 2530. Telefax 08-677 2535
www.elforsk.se