

Lossen

Provtappning och validering av CFD-modellering - hur väljer vi metod?

Gustav Enmark, Fortum

Pierre-Louis Ligier, Sweco

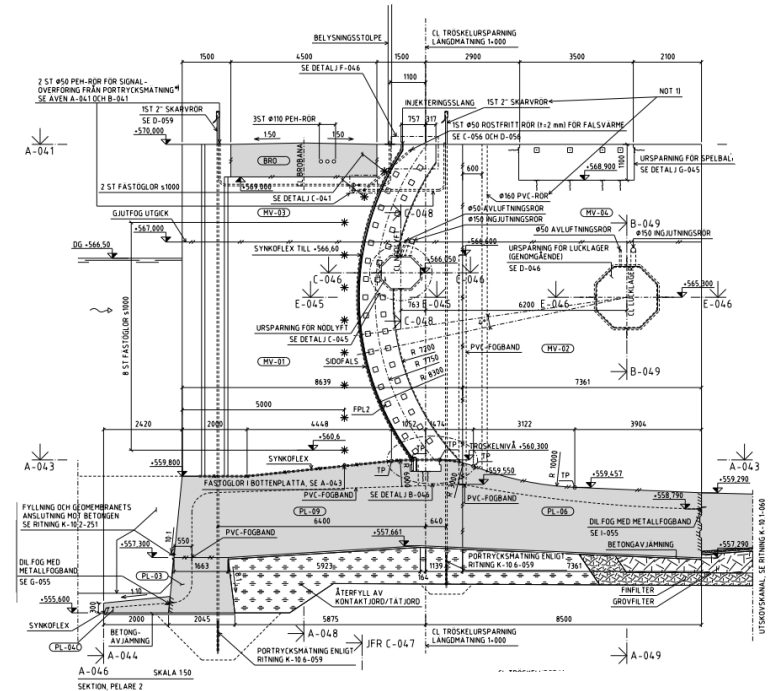
Francesca Polato, Sweco

Lossen

- Dammsäkerhetsklass A
- Allvarlighetsgrad I
- Årsregleringsmagasin

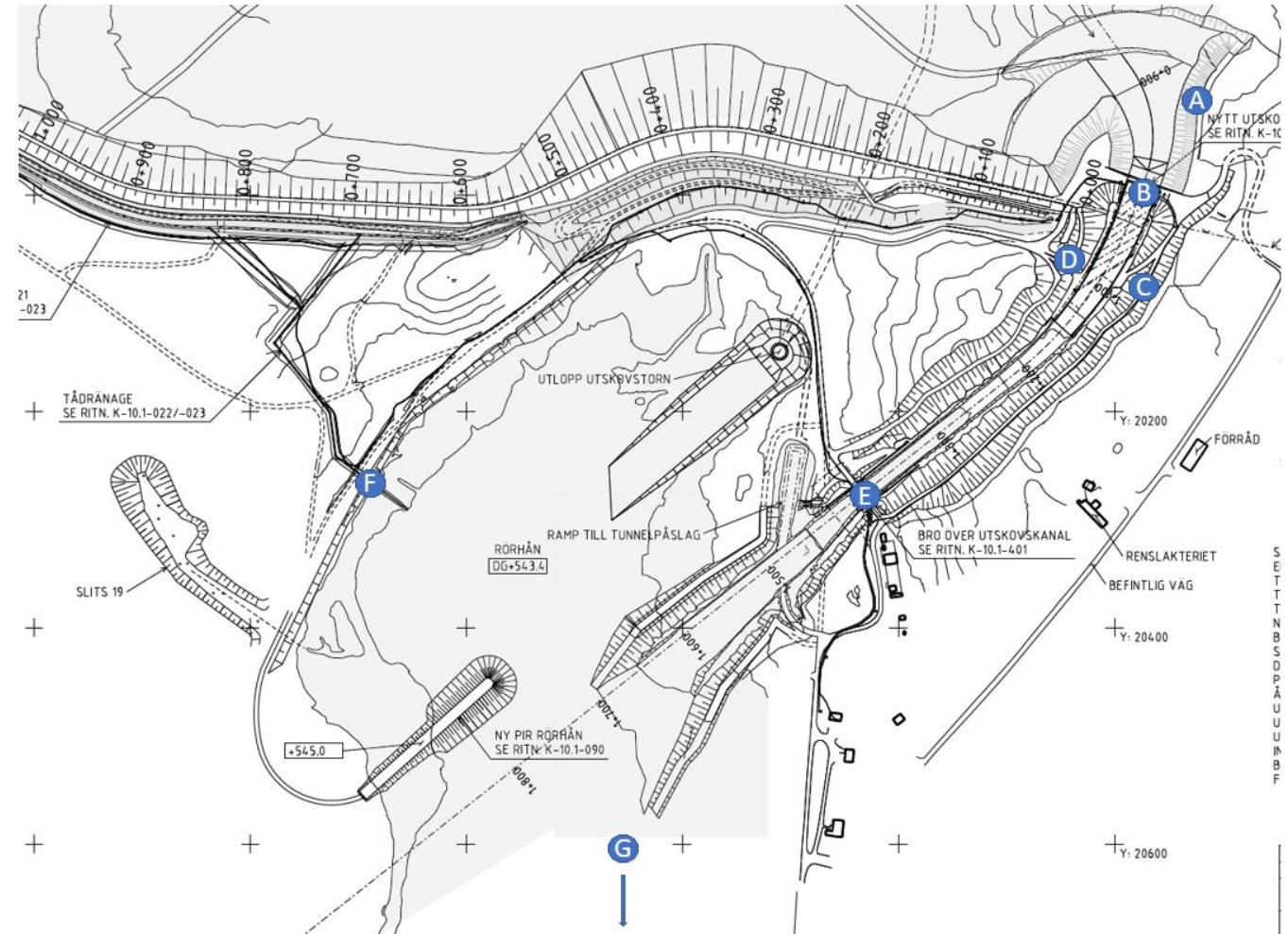
Lossen ytutskov

- Ytutskovet designades utan att några avbördningsmodeller – fysiska eller matematiska upprättades, endast enkla avbördningsberäkningar
- Designflöde 610 m³/s
- Byggtid 2012-2014



Lossen provtappning

- För att verifiera avbördningskapacitet och hydrauliskt beteende planerades en provtappning
- Hösten 2023 uppstod ett tillfälle med hög magasin nivå - 1,5 m under DG
- Avsänkning Rörhån
 - Läckagemätning Lossen
- Uppmärkning betong och bergkanal
- Flödesmätning
- Filmning från stativ, drönare, mobiler



Lossen provtappning

- Vattenstånd +565,0 (1,5 m under DG)
- En lucka



Betongkanal
Foto: D Ygland



Betongkanal V sida. Stängningssekvens
Fast montage



Betongkanal H sida.
Fast montage

Lossen provtappning

- Vattenstånd +565,0 (1,5 m under DG)
- Två luckor



V sida två luckor
Foto: G Enmark

Lossen provtappning

- Vattenstånd +565,0 (1,5 m under DG)
- Två luckor



Lossen provtappning

- Inströmning – ok
- Kanalströmning betongränna – ok, något höga nivåer
- Kanalströmning bergränna – ok, litet bergutfall
- Energiomvandling – ok, viss turbulens återstår (förväntat)
- Strömning Rörhån – ok
- Avbördningsförmåga:

	ACAP-mätning	Beräknad avbördning*
Fri avbördning 1 lucka	224 m ³ /s	226 m ³ /s
Fri avbördning 2 luckor	463 m ³ /s	476 m ³ /s

**senare beräkning som ger $Q = 739 \text{ m}^3/\text{s}$ vid DG*



CFD-modellering

CFD-modellering: kalibreringsunderlag

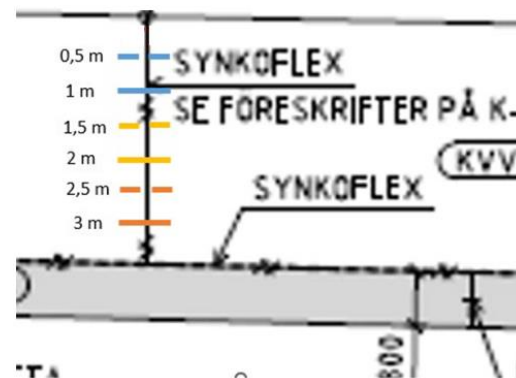
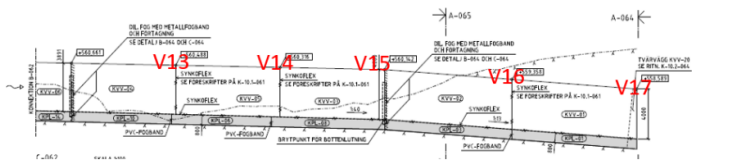
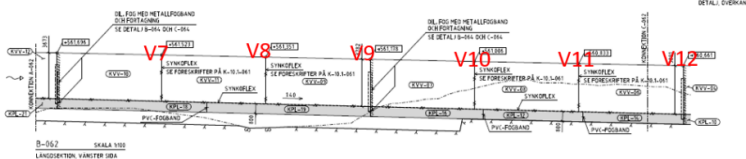
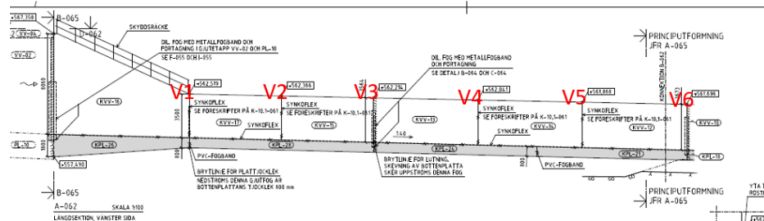
- Magasinsnivån låg 1,5 m under DG (4,7 m överfallshöjd)
- Två olika tappningskonfigurationer:
 - Vänster lucka (asymmetrisk avbördning)
 - Båda luckor (symmetrisk avbördning)
- ADCP-mätningar (avbördning, hastighetsprofiler) – Ola Hammarberg (VDM AB)

Lokalisering av ADCP-mätningen (20 m uppströms utskovet)



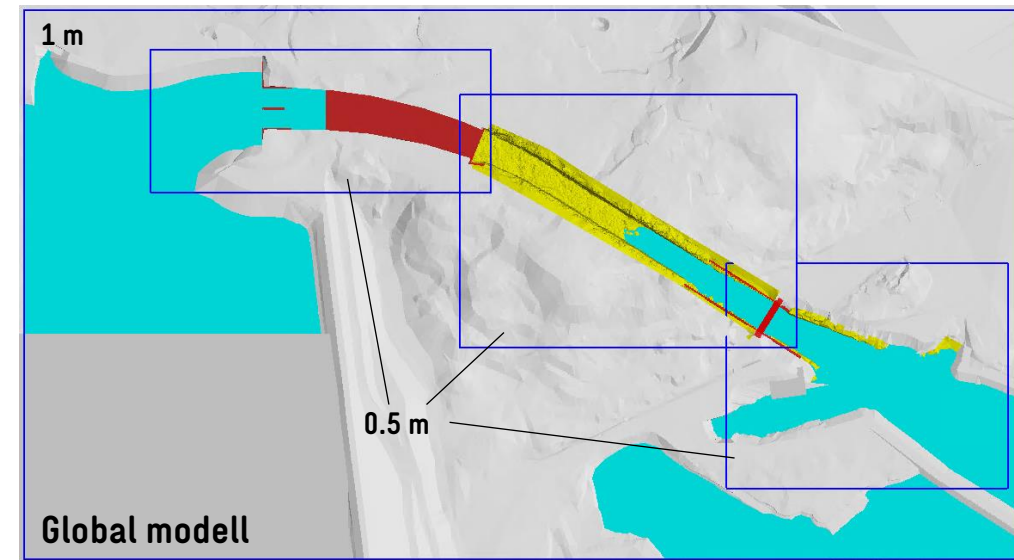
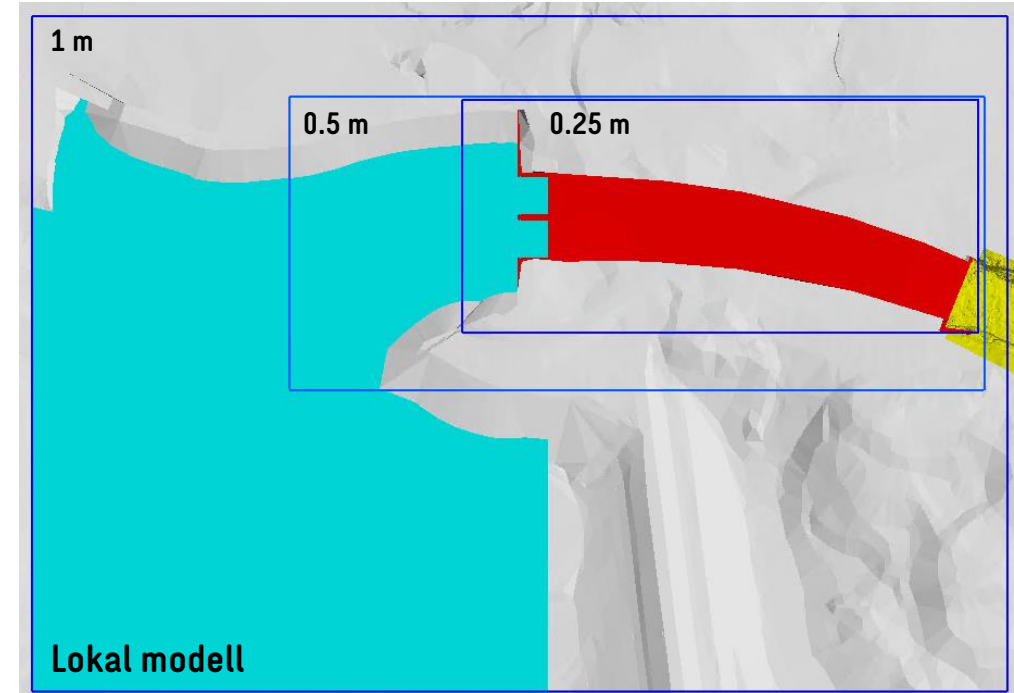
CFD-modellering: kalibreringsunderlag

- Vattennivåmätningar:
 - På uppströmssidan utskovet (vänster och höger)
 - Utmed betongkanalens sidoväggar



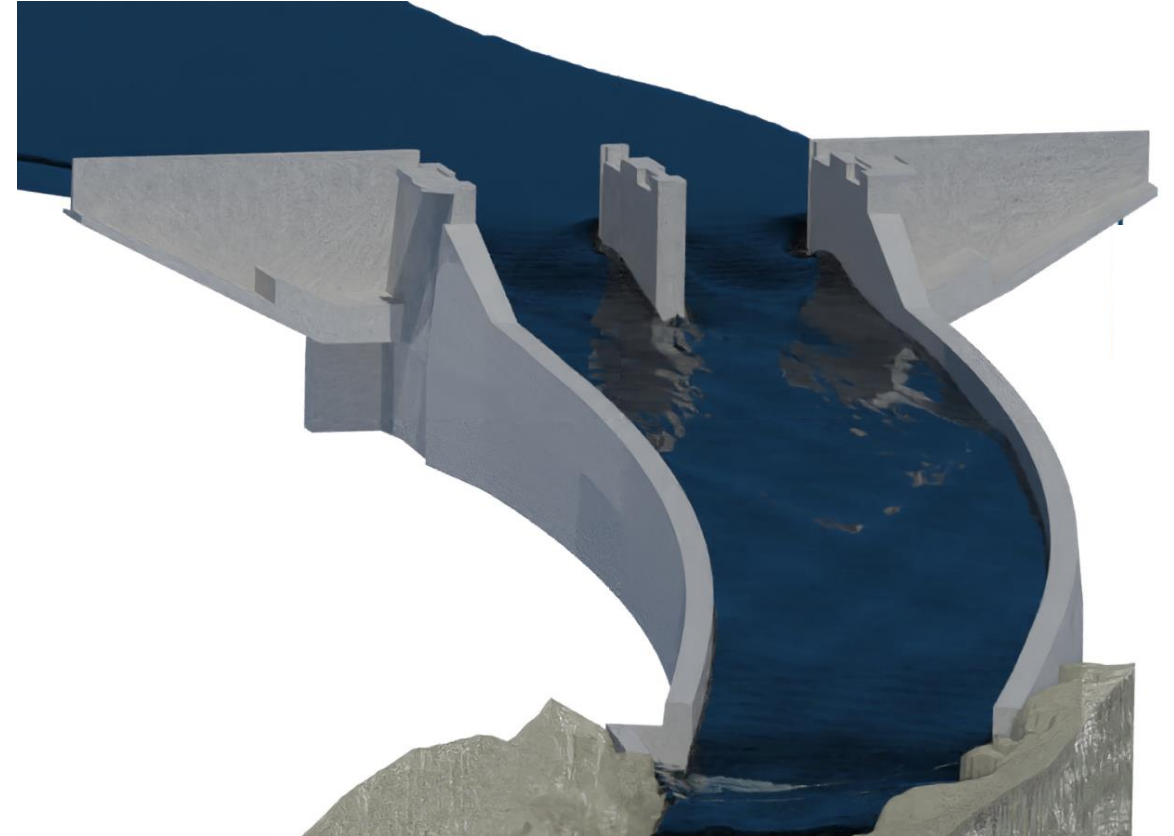
CFD-modellering

- CFD-modell:
 - FLOW-3D Hydro
 - “One-fluid Volume of Fluid (VOF)”
 - Turbulens: Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)
- Två olika modeller:
 - En lokal modell med hög upplösning i betongkanalen (cellstorlek 0,25 – 1 m):
 - Avbördningskapacitet, kalibrering m.h.t. strömningsförhållanden utmed betongkanalen (huvudmodell)
 - En global modell inkl. bergkanal och energiomvandlaren (cellstorlek 0,5-1 m):
 - Kontroll av energiomvandling



CFD-modellering: set-up

- Totalt har ca 10 st. scenarier simulerats:
 - Friktionskoefficient magasinsbotten och betong
 - Turbulensmodell (RNG, $k-\omega$)
 - Diverse numeriska parametrar
- Modellering av luftinblandning
- Varierande cellstorlek



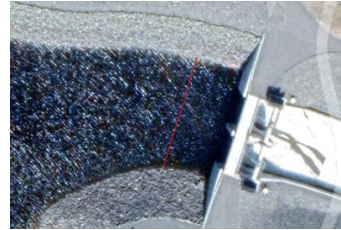
Resultat: avbördningskapacitet (ADCP)

- God överensstämmelse mellan modell och ADCP (mindre än 2% skillnad)
- ADCP-utrustningens osäkerhet är $\pm 3.5\%$
- Endast mindre skillnader mellan de olika modellparametrar som har undersökts

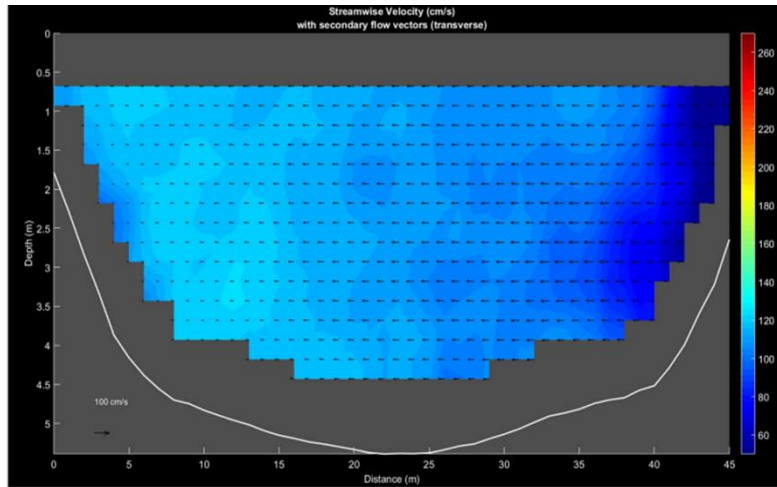
Konfiguration	ADCP	FLOW-3D
Vänster lucka enbart	224 m ³ /s	220-224 m ³ /s
Båda luckor	463 m ³ /s	453-459 m ³ /s

Resultat: hastighetsprofiler (ADCP)

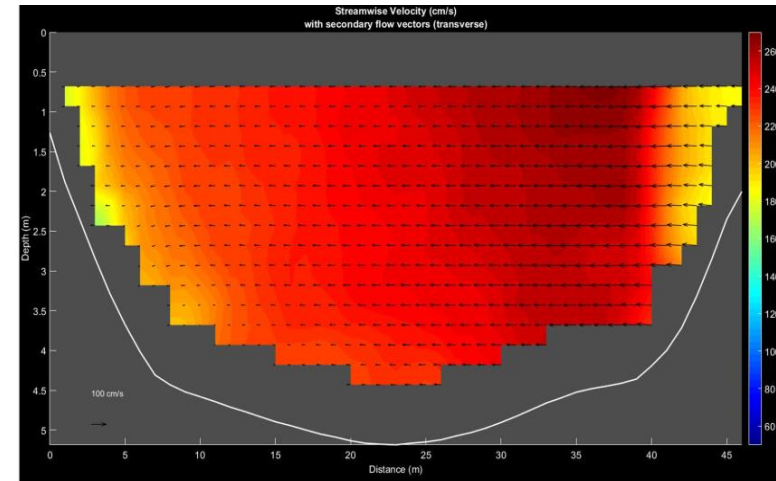
- Hastighetsfördelning: god överensstämmelse mellan modell och mätningar



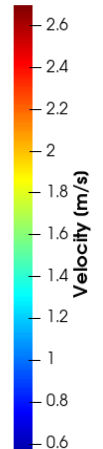
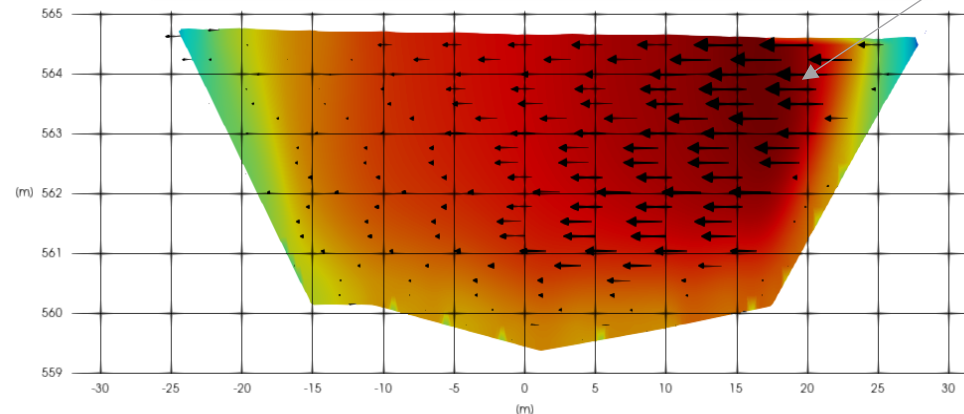
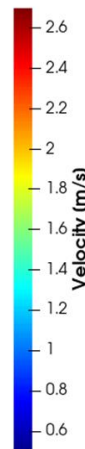
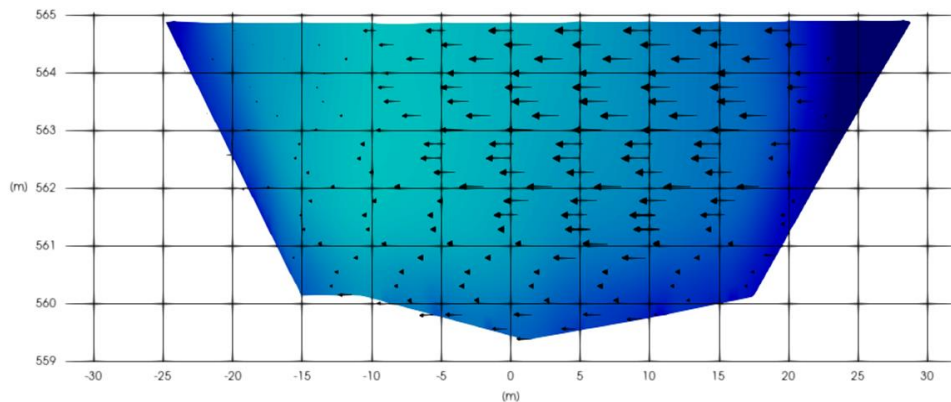
Vänster lucka enbart



Båda luckor

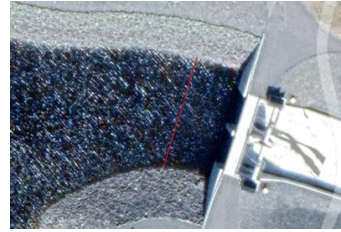


*Tvärgående
komponent av
hastighetsfältet*

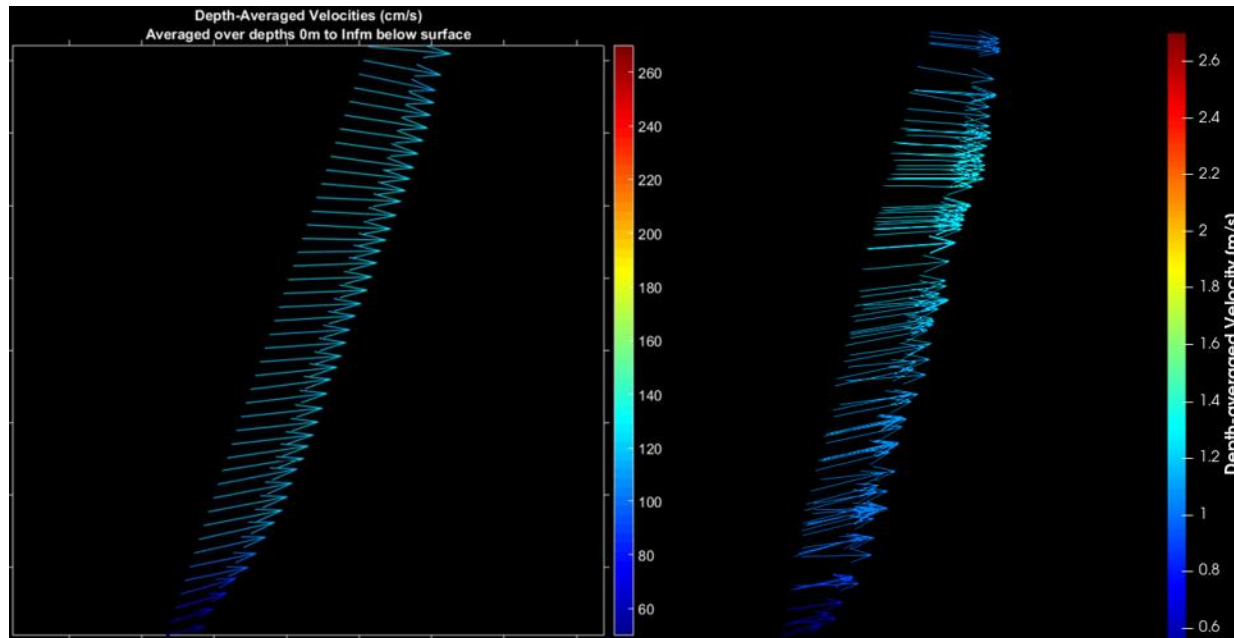


Resultat: hastighetsprofiler (ADCP)

- Horisontellt hastighetsfält (djupmedelvärde) utmed ADCP-profilen



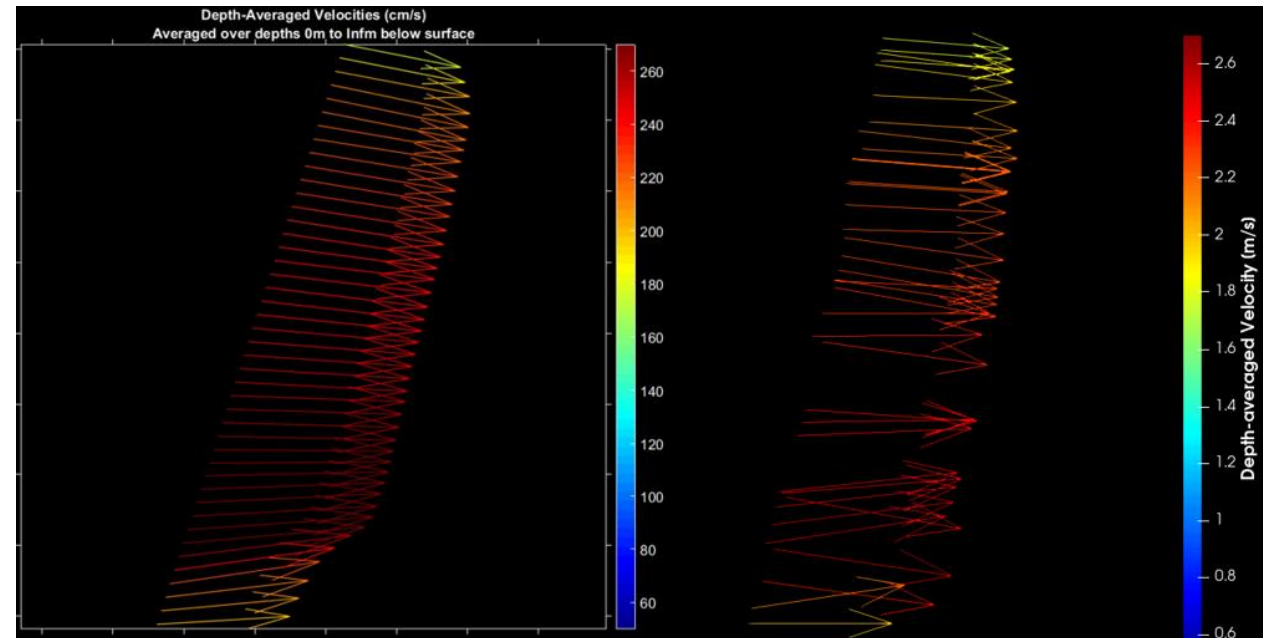
Vänster lucka enbart



ADCP

FLOW-3D

Båda luckor



ADCP

FLOW-3D

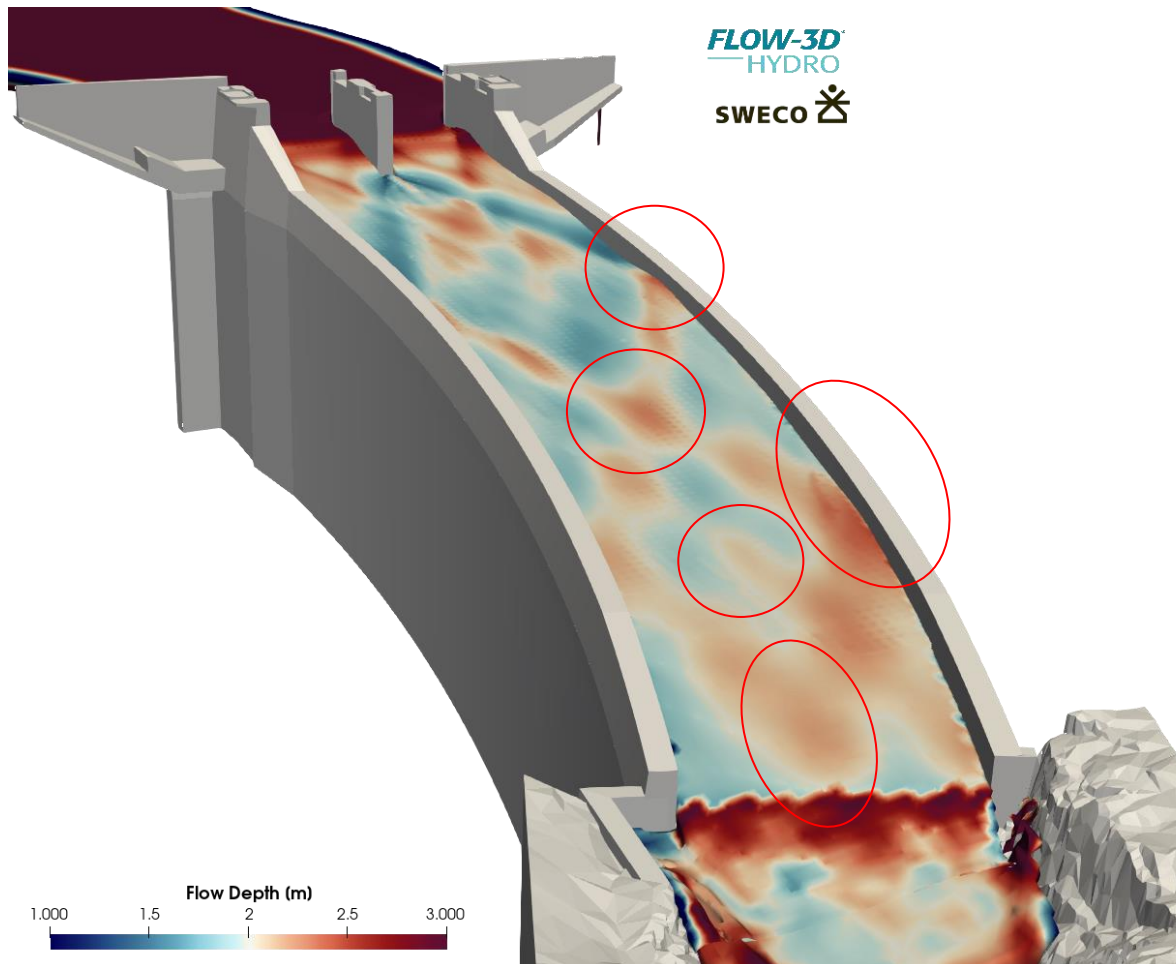
Resultat: v.y. uppströms utskovet

- Uppmäta nivåer uppvisar skillnad mellan höger och vänster sida, tyder på komplexa strömningsförhållanden
- God överensstämmelse mellan modell och mätningar på vänster sida, acceptable skillnader på höger sida
- Mycket liten inverkan av friktionskoefficient för magasinsbotten (simuleringar med $k_s = 0.1-0.3-0.5$ m, $k_s = 0.1$ m har valts för samtliga slutliga körningar)

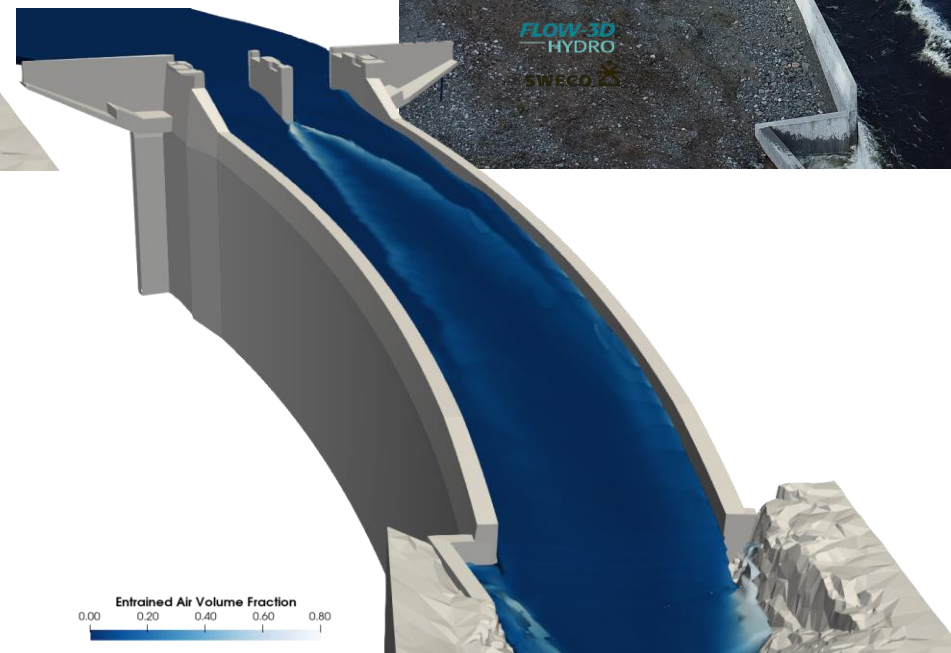
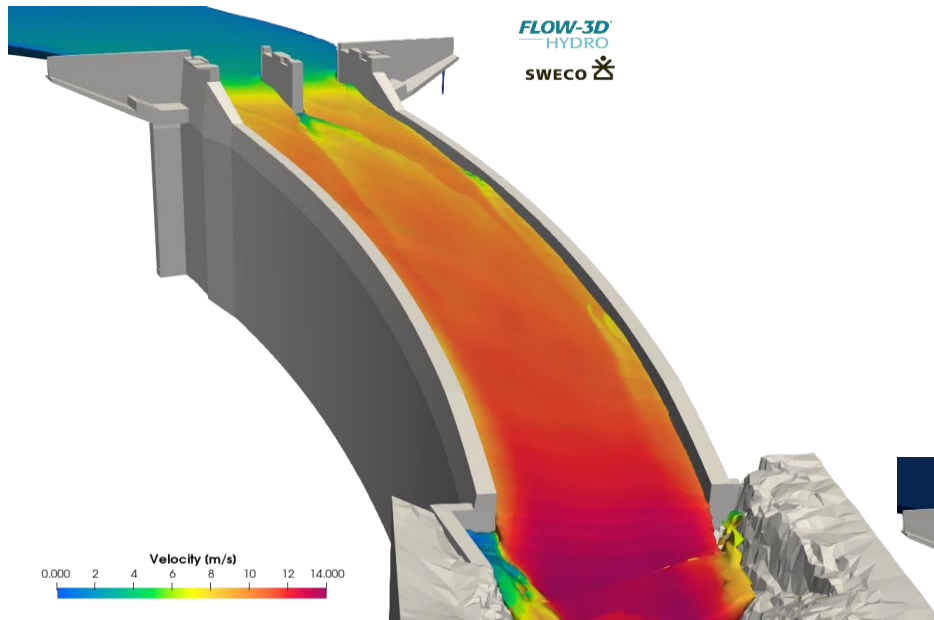


Konfiguration	Vänster sida		Höger sida	
	Mätning	FLOW-3D	Mätning	FLOW-3D
Vänster lucka	+564.92	+564.95 (+0.03 m)	+564.79	+564.89 (+0.10 m)
Båda luckor	+564.80	+564.78 (-0.02 m)	+564.54	+564.62 (+0.08 m)

Resultat: vågmönster utmed betongkanalen (båda luckor)

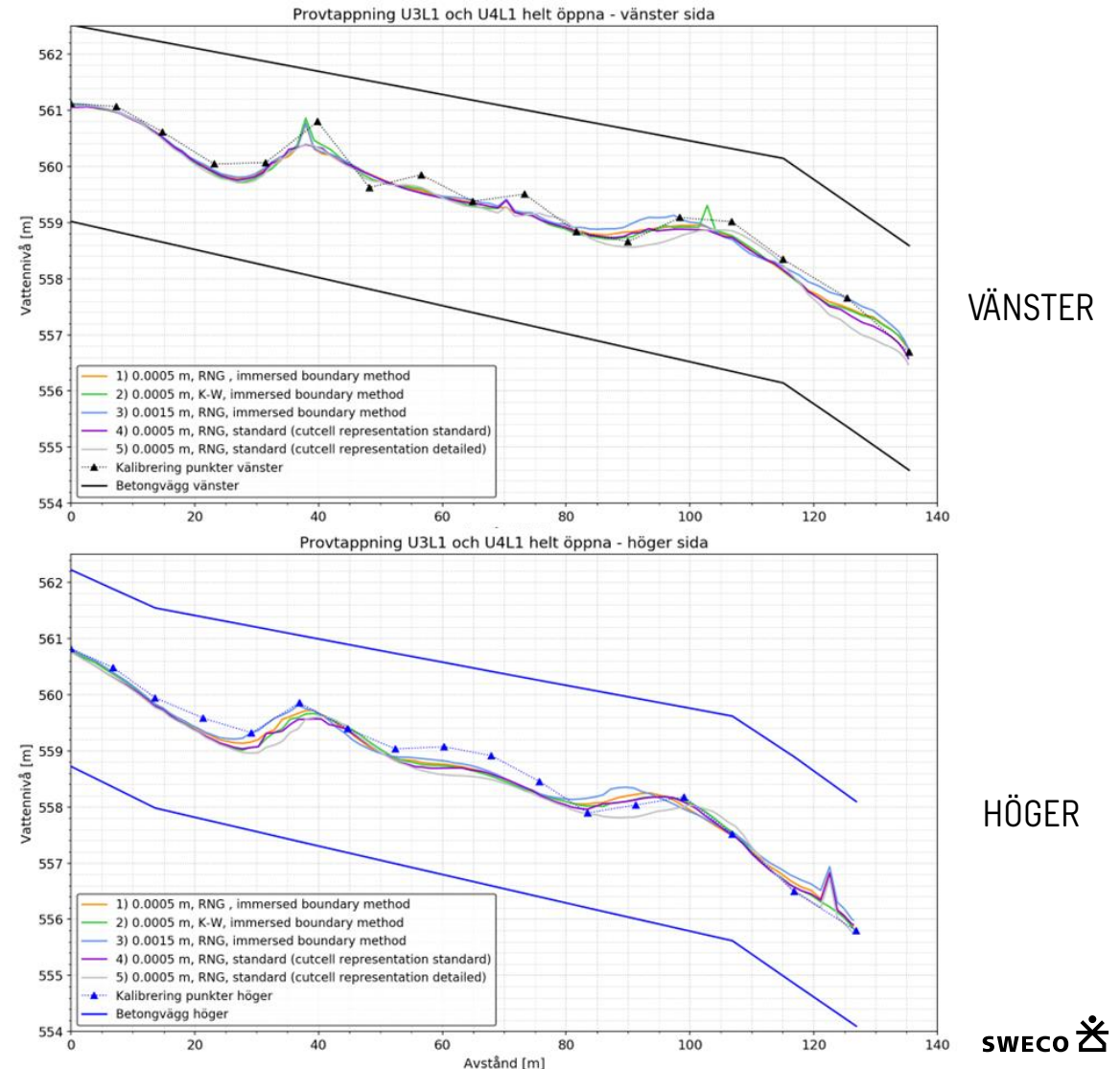


Resultat: vågmönster utmed betongkanalen (båda luckor)

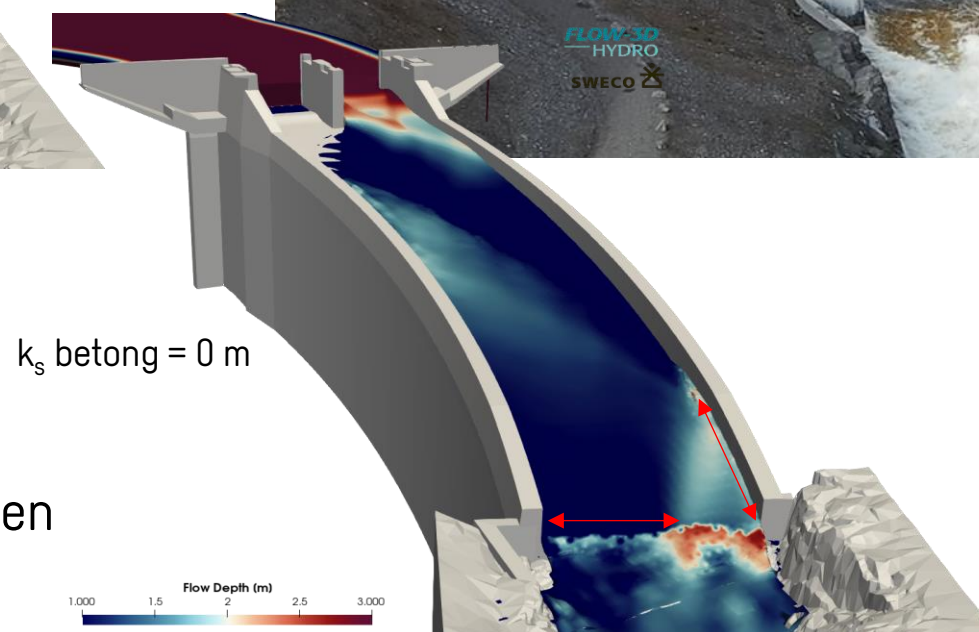
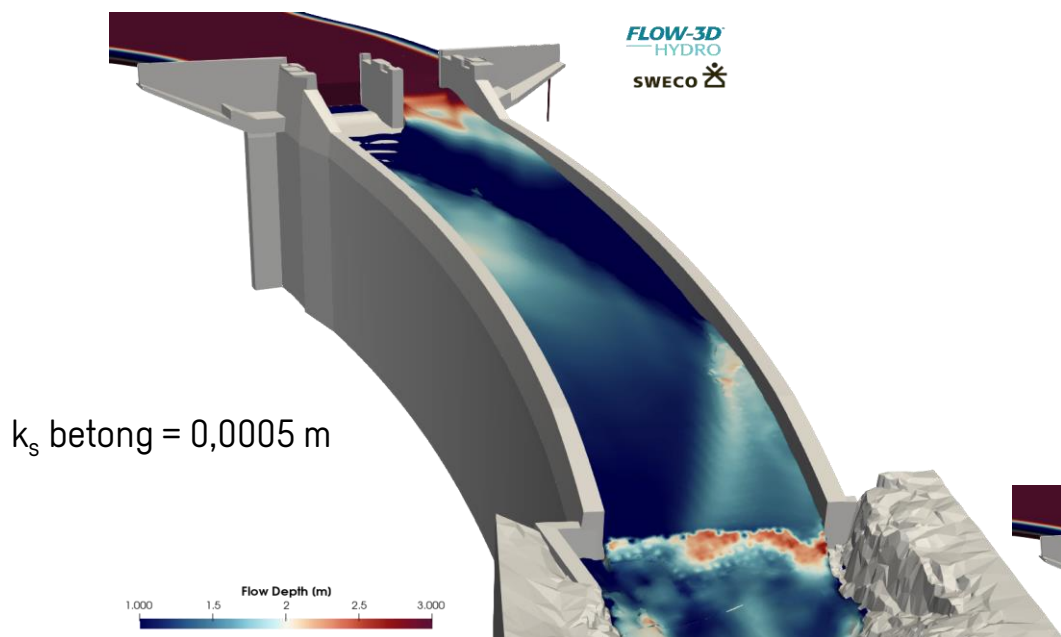


Resultat: vågmönster utmed betongkanalen (båda luckor)

- Båda luckor:
 - Vattennivåer och vågmönster utmed sidoväggarna reproduceras på ett tillfredställande sätt, vissa skillnader förekommer lokalt
 - Medeldjup ≈ 2 m
 - Skillnader mellan tolkade vattennivåer och modell: 0,2-0,3 m (10-15% av vattendjupet)
 - Undersökta modellparametrar (fysiska, numeriska) uppvisar mindre inverkan på resultat

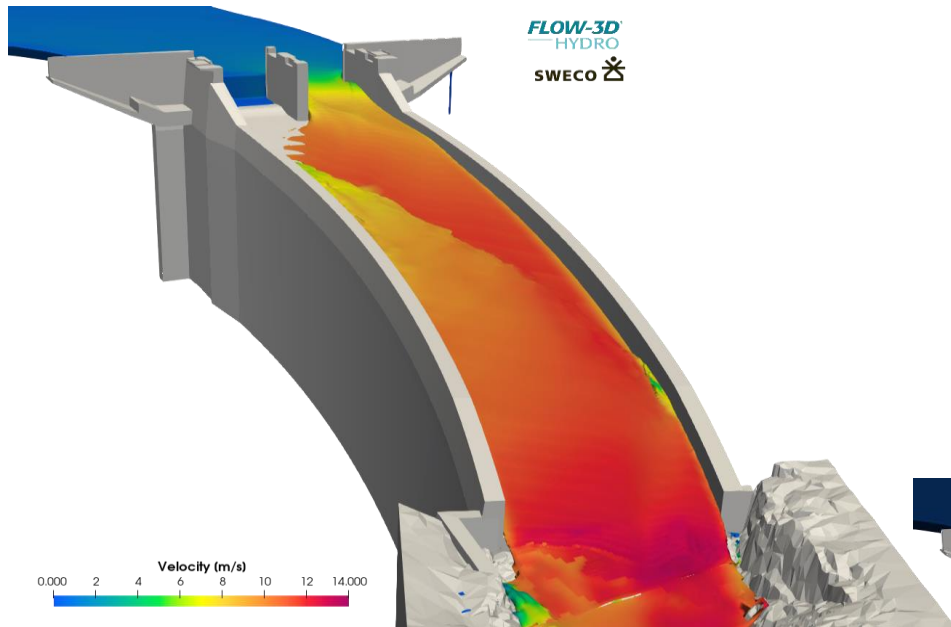


Resultat: vågmönster utmed betongkanalen (vänster lucka)



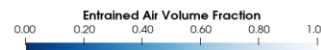
→ Luftinblandning påverkar friktion vid botten

Resultat: vågmönster utmed betongkanalen (vänster lucka)



k_s betong = 0 m

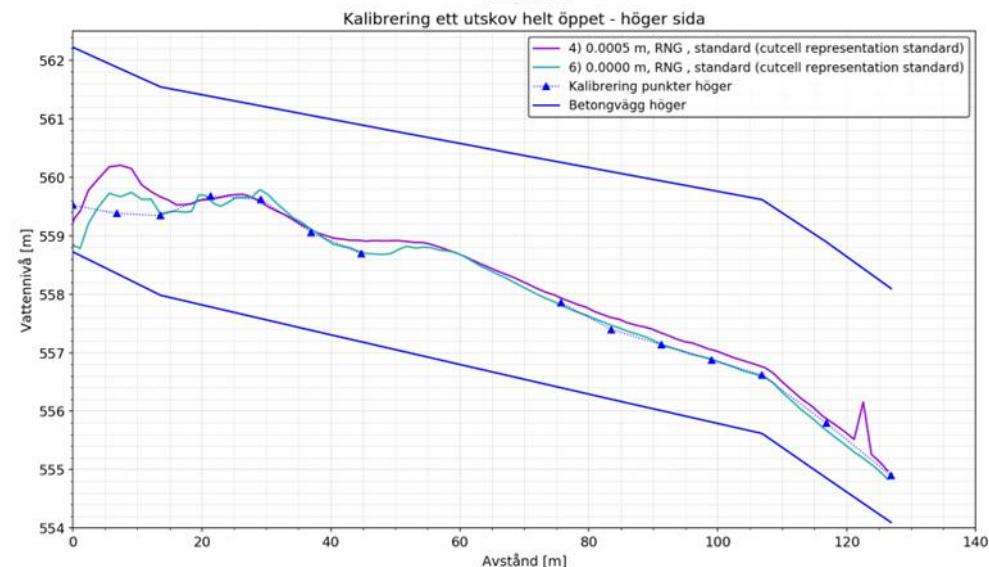
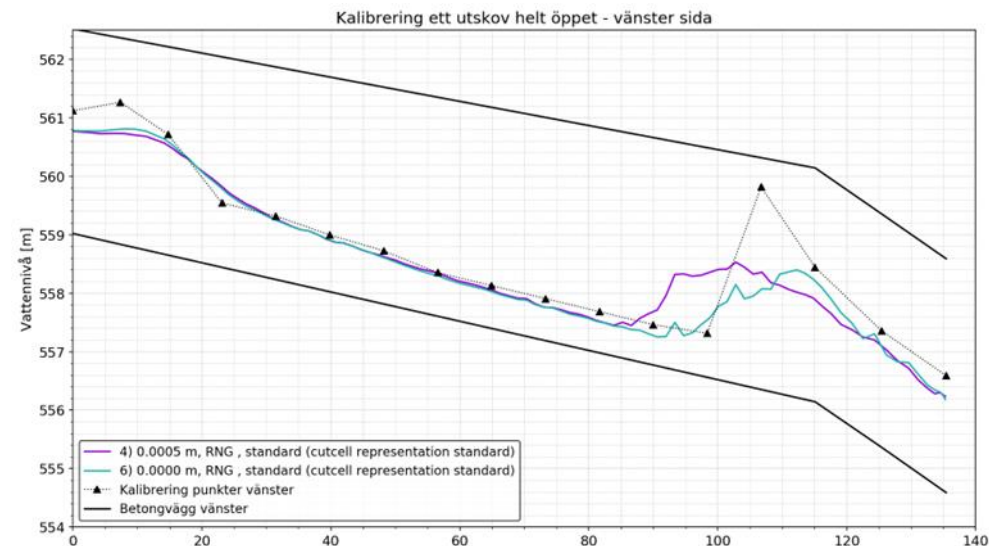
→ Luftinblandning påverkar friktion vid botten



Resultat: vågmönster utmed betongkanalen (vänster lucka)

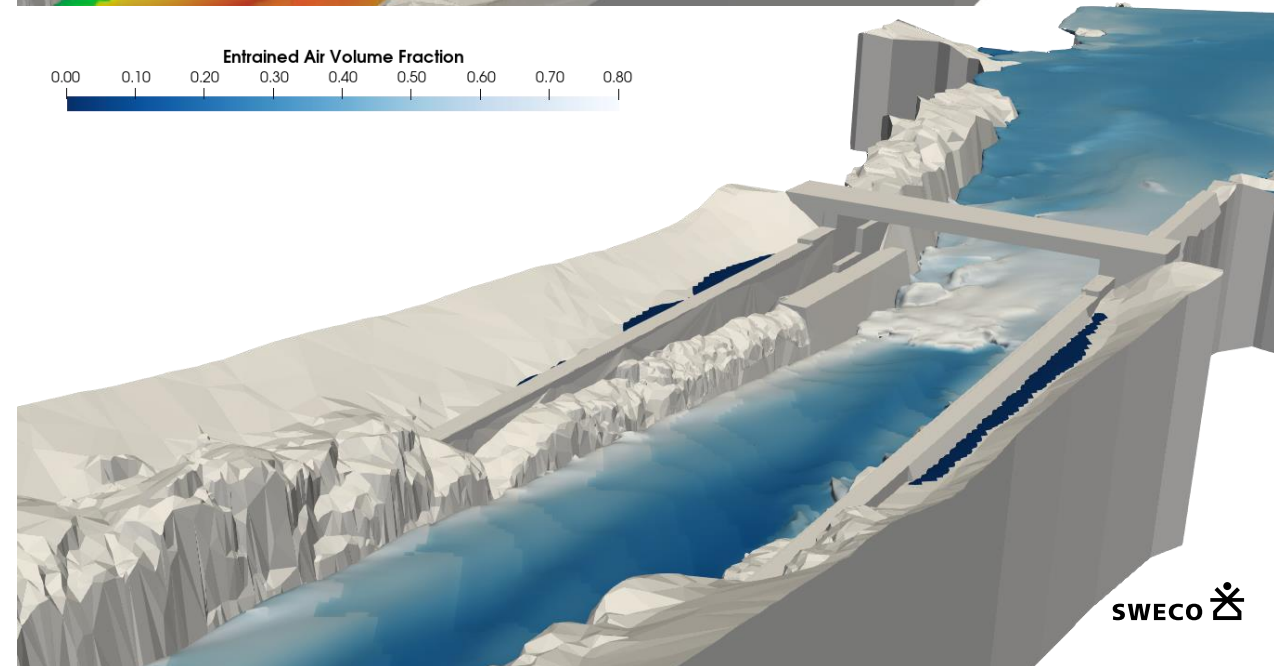
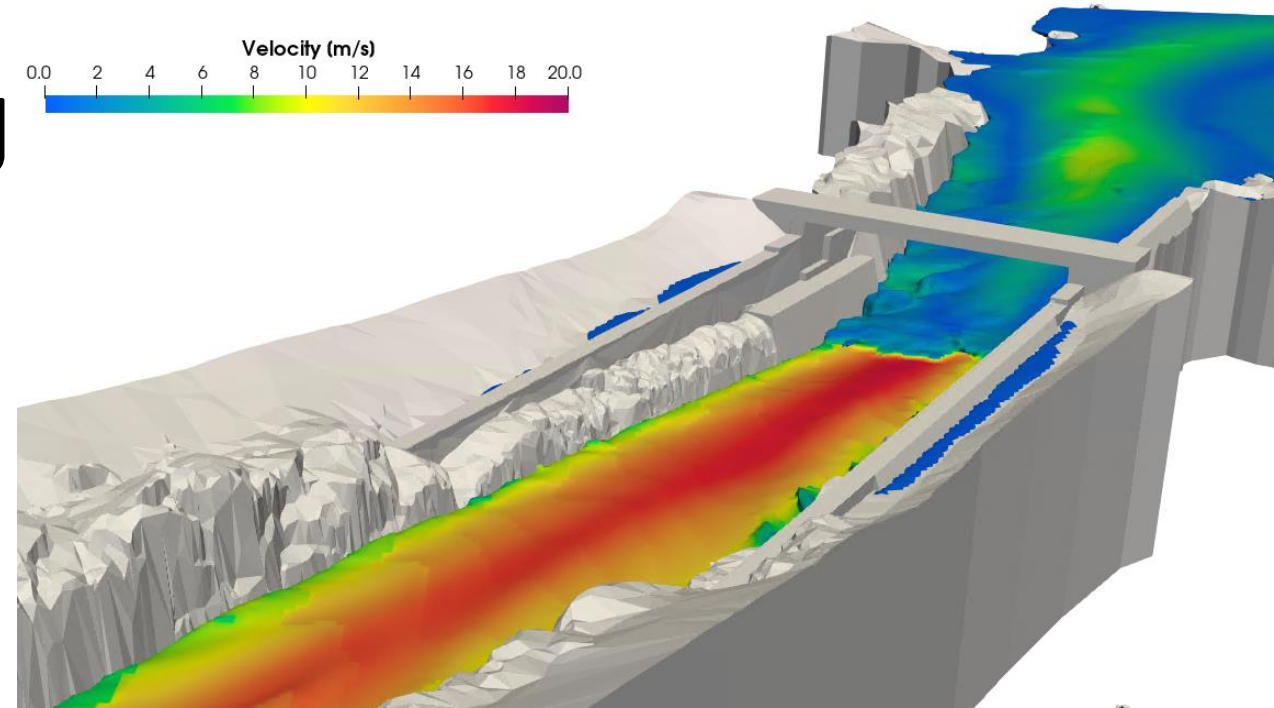
- Vänster lucka enbart:
 - k_s betong = 0,0005 m
 - Vattennivåer överskattas något (höger sida)
 - Läge där andra vågtopp träffar vänstra ledmur ligger 20 m uppströms j.f.m. observationer
 - k_s betong = 0 m
 - Mycket god överensstämmelse avseende vattennivå
 - Läge där andra vågtopp träffar vänstra ledmur reproduceras korrekt
 - Våghöjd vid andra vågtopp (vänster sida) underskattas med ≈ 1 m)

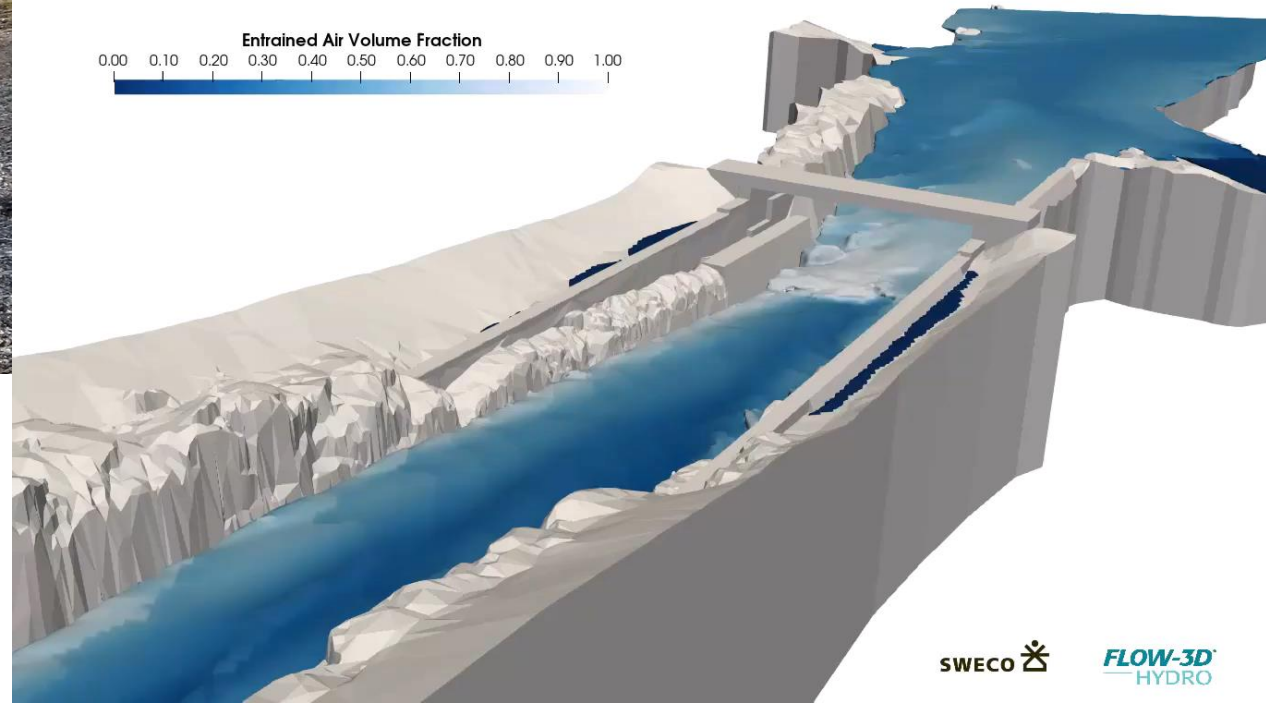
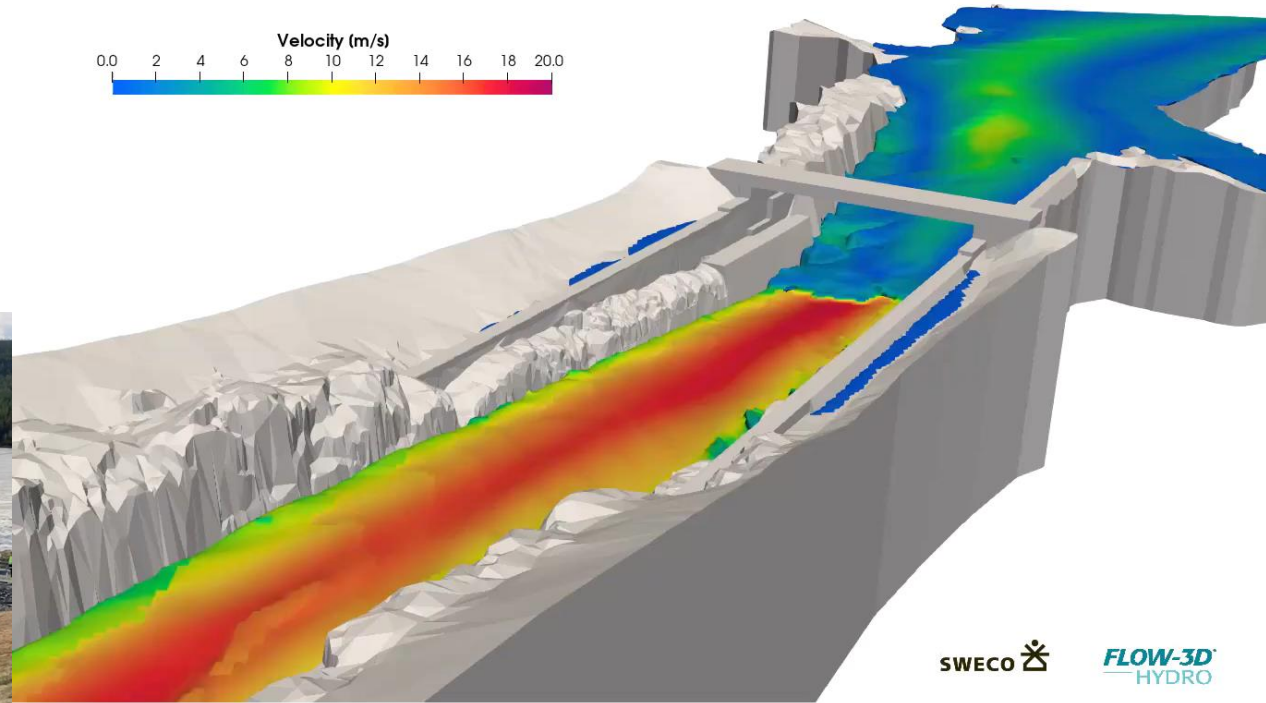
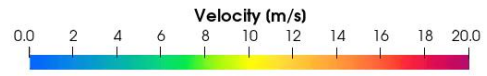
≈



Resultat: energiomvandling

- Vattensprångets läge reproduceras på ett tillfredställande sätt
- Luftinblandning (koncentration) är beroende av turbulens samt cellstorlek, god kvalitativt resultat





CFD-modellering: slutsatser

- Insamling av kalibreringsunderlag/dokumentation: viktigt och kräver förberedelser
- CFD-modelleringen gav goda resultat, begränsad inverkan av beräkningsparametrar
- CFD-modellen har sedan använts för att simulera avbördning vid DG
- **Avbördningskapacitet vid DG**, sammanställning av olika uppskattningar:
 - Relativt stor spridning mellan de olika metoderna
 - Val av metod är viktig!

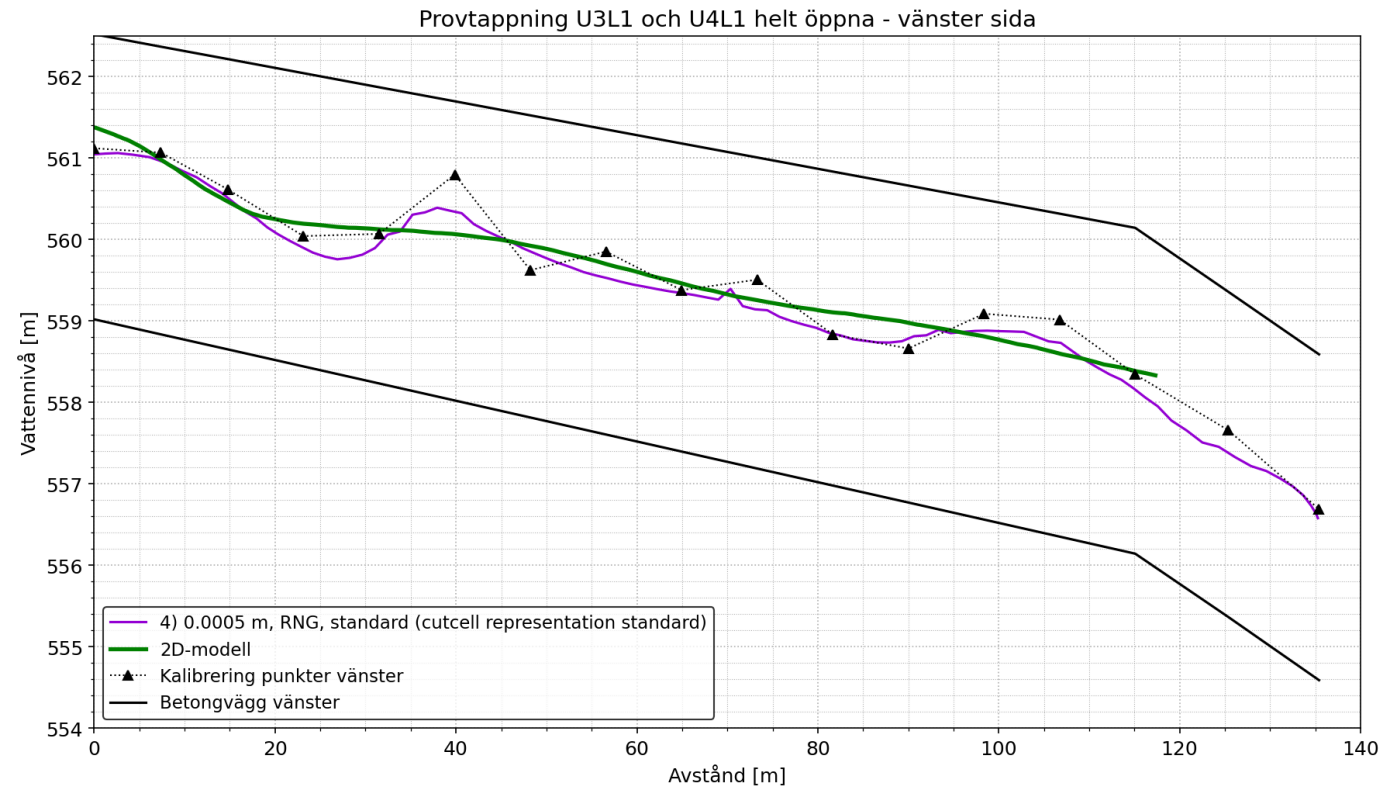
Underlag projektering	2D-modell 2012	Handberäkning 2023	CFD 2024
610 m ³ /s (-10,6%)	660 m ³ /s (-3,2%)	739 m ³ /s (+8,4%)	682 m ³ /s

Hydraulisk dimensionering av utskov: hur väljer vi metod?

Hydraulisk dimensionering av utskov: hur väljer vi metod?

- Vilka metoder?
 - Handberäkningar
 - Numeriska modeller
 - Fysiska modellförsök
- Vilka numeriska modeller i 2025?
 - CAD-modeller (3D) är lättillgängliga idag
 - ➔ **CFD bör vara förstahandsval**
 - 1D- eller 2D kan duga i vissa avgränsade/enkla fall
 - Vissa undantag finns dock (t.ex. USBRs SpillwayPro, ...)

JÄMFÖRELSE 2D vs. CFD (Lossen, provtappning)



CFD vs. fysiska modellförsök: jämförelse

Moment/fenomen	CFD	Fysiska modellförsök
Uppsättning	Relativt enkelt och snabb (3D-CAD-modeller lättillgängliga nuförtiden).	Byggarbeten kan vara tidskrävande.
Modiferingar (geometri)	Relativt enkelt och snabb (CAD + beräkningsnät).	Rimlig tidsåtgång utom vid komplexa modifieringar.
Beräkningar	Tidskrävande, begränsning i antal scenarier som kan simuleras (rimligt med upp till 10 st.). Stor variation från fall till fall.	Test utförs mycket snabbt, möjligheten att utföra ett stort antal försök. Resultat kan analyseras i realtid, fördel för att testa och anpassa olika utformningar.
Redovisning	Grafer, plottar och ev. animeringar. Kan vara tidskrävande, men nästan allt går att redovisa.	Grafer, plottar, foton och filmer. Möjlighet att besöka modellen fysiskt, fantastiskt verktyg för kommunikation.

CFD vs. fysiska modellförsök: jämförelse

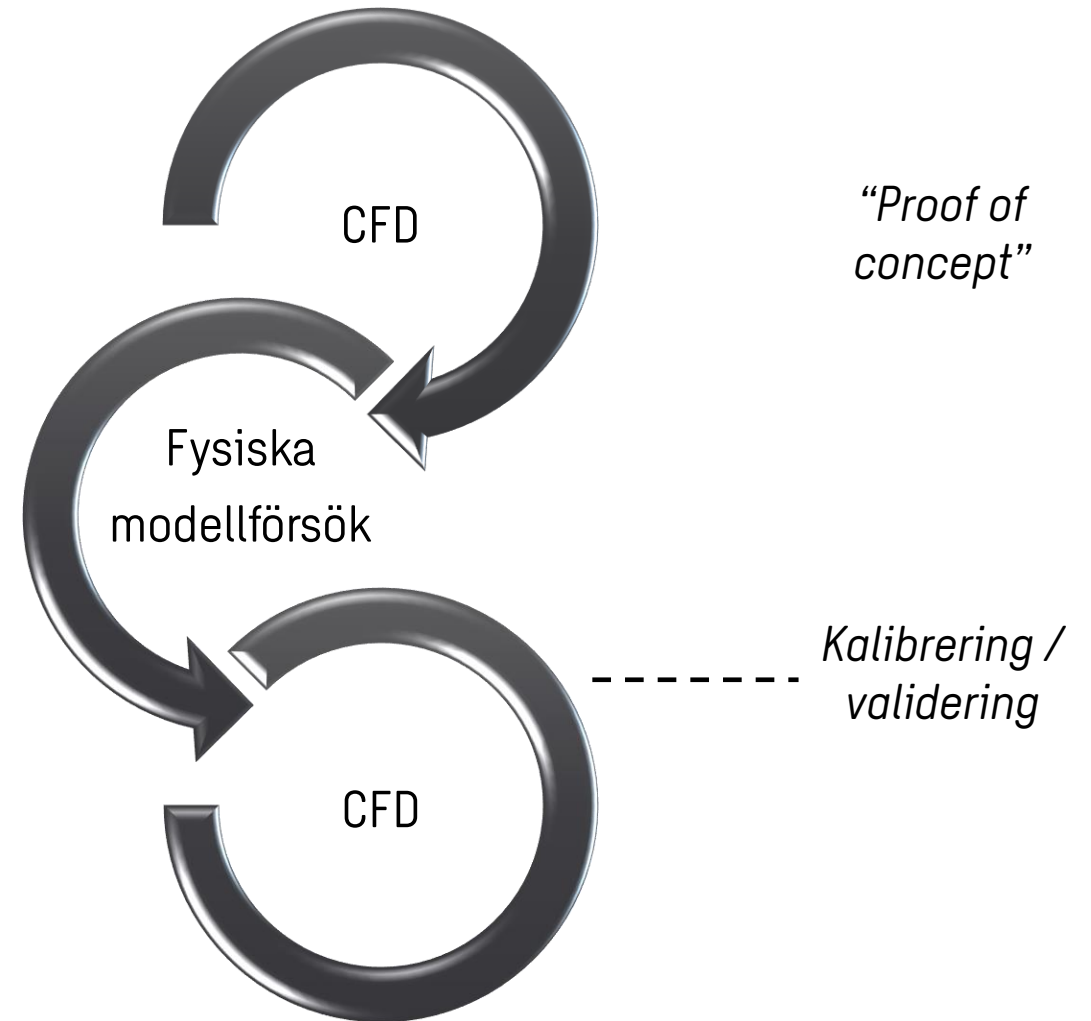
Moment/fenomen	CFD	Fysiska modellförsök
Dokumentation / efterlevnad	Resultat kan extraheras från hela modellen. Modellen kan arkiveras och återanvändas i framtiden (akta för ev. problem med licens, version osv.)	(Kvantitativa) resultat extraheras vid enstaka utvalda platser enbart. Modellen är "förlorad" efter utrivning.
Avbördningskapacitet	Erfarenhet visar att noggrannheten är generellt god, mindre inverkan av beräkningsparametrar. Framtagning av lucktabeller behöver göras i kombination med handberäkningar (för krävande annars).	Effektiv metod inkl. framtagning av lucktabeller osv.

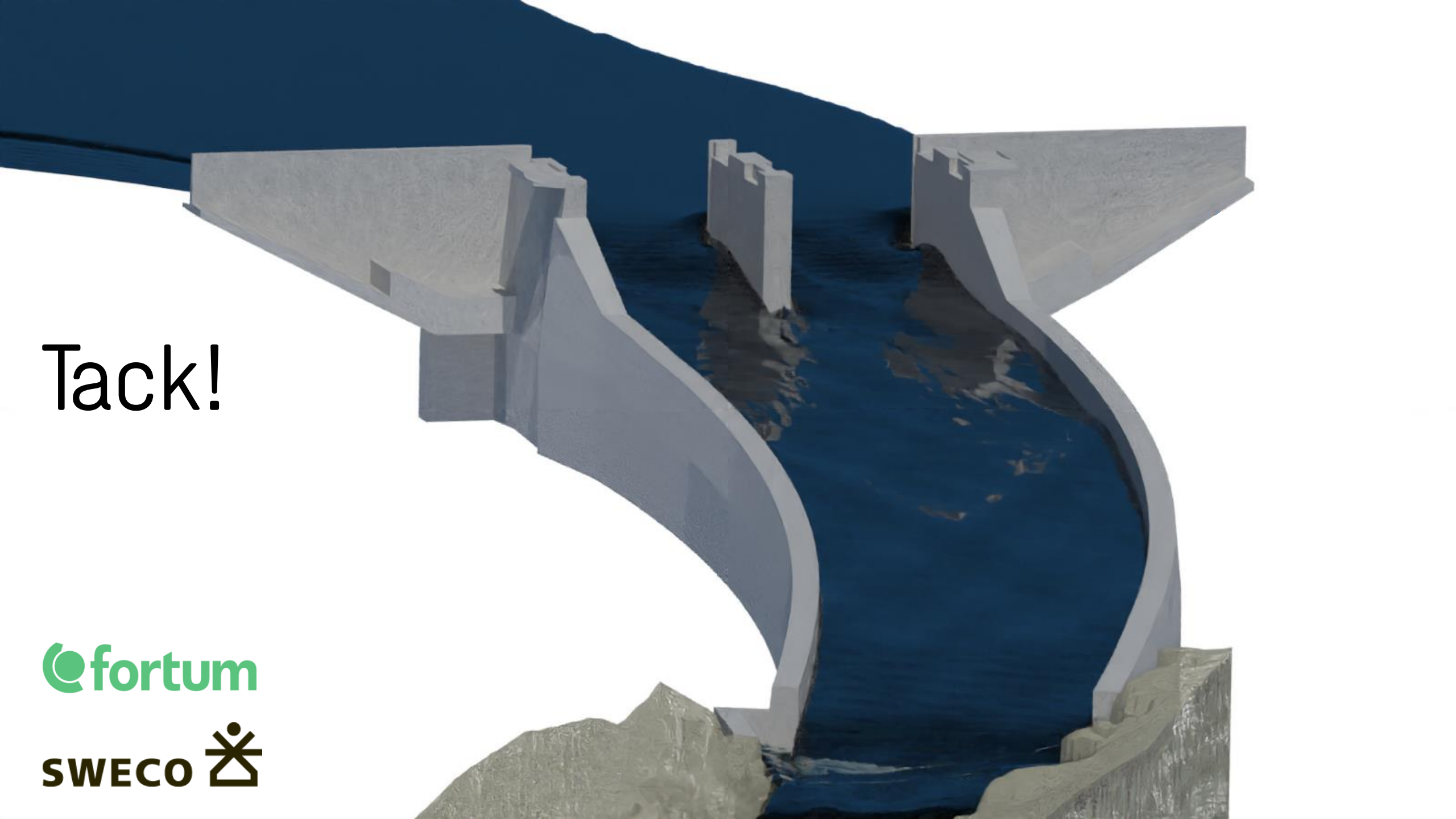
CFD vs. fysiska modellförsök: jämförelse

Moment/fenomen	CFD	Fysiska modellförsök
Luftinblandning / luftmeddrivning	Begränsningar p.g.a. komplex fysik och småskaligt fenomen. Osäkerheter i specifika numeriska modeller. Mycket svårt att kalibrera (underlag).	Begränsningar p.g.a. skaleffekt. Mycket svårt att kalibrera (underlag).
Undertryck / kavitation	Begränsningar p.g.a. komplex fysik.	Begränsningar p.g.a. skaleffekt.
Erosion	Begränsningar p.g.a. komplex fysik och stora osäkerheter i erosionsprocesser. Tidskrävande beräkningar	Rimliga resultat om kalibrering kan utföras (ej berg).
Drivgoods	Kan simuleras med vissa programvaror. Osäkerheter? Tidskrävande beräkningar	Relativt praktiskt, men fenomenet är svårt att skalera.

”Composite modelling”

- Att använda både CFD och fysiska modellförsök för att erhålla bättre resultat
- Utnyttjar fördelar av varje metod
- Provtappning: viktigt för att kalibrera modellen i prototypskala!
- **Lästips: ICOLD Bulletin 172 (draft)**
”Technical advancements in spillway design”





Tack!

 fortum

SWECO 