

Hydraulisk kapasitet for modifiserte overløpsprofiler – CFD-baserte retningslinjer for prosjektering

Av Halvor Kjærås

Halvor Kjærås (M.Sc) er rådgivende ingeniør innen hydraulikk og fiskevandring i Sweco Norge AS og PhD-kandidat ved NTNU.

Summary

Hydraulic capacity for modified weir profiles – CFD based design guidelines. Computational Fluid Dynamics (CFD) has been used to analyse how common geometric modifications affect the hydraulic capacity of a standard ogee weir. Four types of changes were investigated: downstream flattening, flat crest, vertical downstream face, and upstream rounding. The results show that the capacity is nearly unchanged when the transition to the downstream slope lies more than $0.5 H$ below the crest, while even a short flat crest causes a strong reduction towards broad-crested conditions. Vertical downstream faces require air-venting to avoid sub-atmospheric pressures, and small upstream radii ($R/H \approx 0.05$) are sufficient to prevent flow separation. The derived dimensionless correction formulas provide practical guidance for assessing modified spillways in design and rehabilitation projects. The results have also been implemented in an interactive tool where dimensionless parameters can be adjusted and the effect on discharge capacity visualized, providing support for practical design applications.

Sammendrag

Ved hjelp av Computational Fluid Dynamics (CFD) er det undersøkt hvordan vanlige geometriske endringer påvirker den hydrauliske kapasiteten til et standardoverløp. Fire modifikasjonstyper ble analysert: nedstrøms utflatning, flatt topp-parti, vertikal nedstrøms avslutning og oppstrøms avrunding. Resultatene viser at

kapasiteten er tilnærmet uendret når utflatningen starter mer enn $0,5 H$ under toppen, mens selv korte flate partier gir en markert reduksjon mot bredkronet oppførsel. Vertikale avslutninger krever lufting for å unngå undertrykk, og små radier i oppstrøms kant ($R/H \approx 0,05$) er tilstrekkelige for å hindre separasjon. De utledede dimensjonsløse korreksjonsformlene gir et praktisk grunnlag for vurdering og prosjektering av modifiserte overløp i flomløp og damanlegg. Resultatene er videre implementert i et interaktivt beregningsverktøy som gjør sammenhengene direkte anvendbare i prosjektering.

Innledning

Overløp er sentrale konstruksjoner for kontrollert avledning av vann ved dammer og reguleringsanlegg. Pålitelig bestemmelse av overløpskapasitet er derfor viktig både for dimensjonering av flomløp og for videre hydraulisk ruting av flomforløp nedstrøms. Selv moderate feil i kapasitetskurven kan gi systematiske avvik i beregnet flomstigning, vannstand og sikkerhetsmarginer i tilknyttede anlegg og elvestrekninger (NVE, 2005; USBR, 1987). Standardoverløpet, ofte omtalt som et ogee-overløp, ble utviklet for å gi høy hydraulisk effektivitet ved fri strømming og samtidig en gunstig trykkfordeling over profilet. Formen bygger på konturen til undersiden av en fri vannstråle fra et skarpkantet overløp, og har siden blitt et standardvalg i vassdragskonstruksjoner. Klassiske arbeider fra U.S. Bureau of Reclamation la grunnlaget for denne

utformingen, og prinsippene er senere videreført i standardverk som *Design of Small Dams* (USBR, 1987).

Både fysiske modellforsøk og numeriske studier har gjennom flere tiår undersøkt kapasitet, strømningsmønster, trykkforhold og påvirkning fra nedstrøms randbetingelser. Dette gjelder både idealiserte standardprofiler og mer komplekse overløp (f.eks. Jacobsen & Olsen, 2010; Johnson & Savage, 2006; Olsen & Kjellesvig, 1998; Savage & Johnson, 2001). Samlet viser disse studiene at numeriske metoder kan gi gode estimater av vannføringskapasitet når geometri, randbetingelser og strømnings-tilstand er tilstrekkelig godt beskrevet. En nyere norsk litteraturstudie på blant annet overløp finnes i Walløe & Pedersen (2022).

Computational Fluid Dynamics (CFD) er dermed ikke bare et spesialverktøy for enkeltprosjekter, men en etablert metode for analyse av hydrauliske konstruksjoner og utvikling av kapasitetskurver. Dette er også vist i mer overordnede arbeider om kapasitetsmodellering ved overløp og andre hydrauliske konstruksjoner, der CFD brukes både til datagenerering, validering og systematisk vurdering av usikkerhet (Yang et al., 2019; Zeng et al., 2016).

Samtidig synes litteraturen i større grad å ha vært rettet mot standardprofiler, komplekse flomløp som helhet, eller spesifikke problemstillinger som undervannspåvirkning og bredkronede overløp, enn mot enkle og praktisk vanlige modifikasjoner av selve standardprofilet. For eksempel er kapasiteten til bredkronede overløp godt kjent fra klassiske og nyere studier (Hargreaves et al., 2007; Haun et al., 2011; Tracy, 1957), men det finnes etter det forfatteren kjenner til mindre systematisk dokumentasjon av hvordan mindre geometriendringer i et ellers standardisert overløp påvirker overløpskoeffisienten under fri strømming.

Dette gjelder særlig modifikasjoner som ofte oppstår i praktisk prosjektering: utflatning av kurven på nedstrøms side, innføring av et flatt topp-parti, vertikal avslutning av nedstrøms side og redusert oppstrøms avrunding. Slike endringer kan være konstruktivt eller praktisk

begrunnet, men behandles i liten grad eksplisitt i vanlige veiledere for standardoverløp (NVE, 2005; USBR, 1987). I praksis må prosjekterende derfor ofte basere seg på skjønn, prosjektspesifikke modellforsøk eller egne CFD-beregninger for å vurdere kapasitetskonsekvensene.

Formålet med denne studien er å bruke CFD til å analysere hvordan fire typiske modifikasjoner av et standardoverløp påvirker den hydrauliske kapasiteten, uttrykt ved overløpskoeffisienten. Målet er ikke å erstatte detaljert modellering i alle prosjekter, men å etablere enkle, dimensjonsløse sammenhenger og praktiske grenseverdier som kan brukes ved vurdering, prosjektering og rehabilitering av modifiserte overløp.

Metode

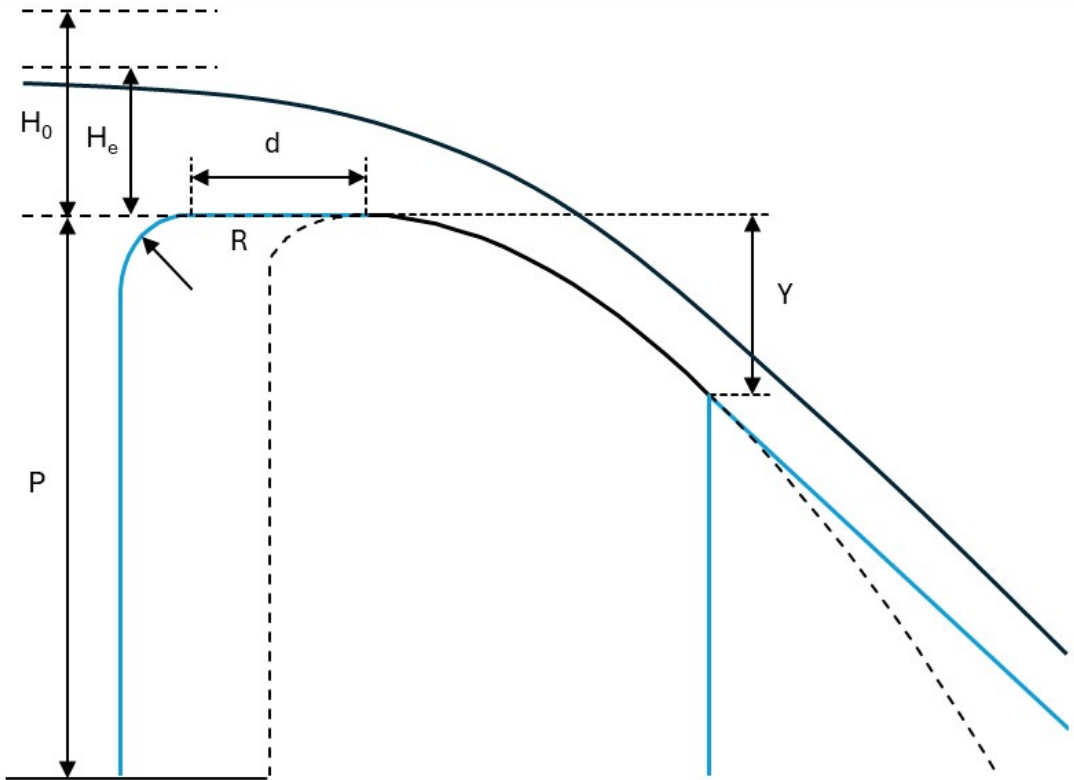
Analysene er utført ved hjelp av CFD for å beregne hvordan ulike geometriske modifikasjoner påvirker overløpets vannføringskapasitet. Ved å sammenligne simulert vannføring for modifiserte og uendrede profiler ved samme oppstrøms energihøyde er det mulig å kvantifisere reduksjonen i overløpskoeffisienten, uttrykt som C/C_0 , der begge koeffisientene er beregnet fra overløpsformelen, $C = \frac{Q}{LH_e^{3/2}}$. Beregningene er gjort for én meters bredde av et overløp, modellert uten friksjon mot sidene, og representerer dermed todimensjonal strømming uten sidekontraksjon eller tredimensjonale effekter.

Geometri

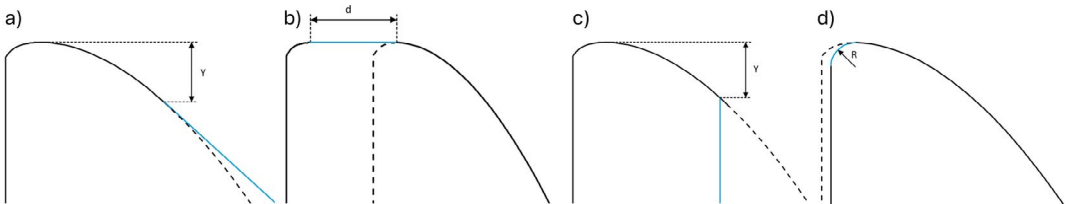
Utgangspunktet er standardprofilet for overløp i *Design of Small Dams*, med forholdet $P/H_0 = 3,0$, og dimensjonerende overløpshøyde $H_0 = 1,0$ m. Geometriske parametere er definert i Figur 1.

Fire modifikasjoner ble undersøkt:

- 1) Nedstrøms utflatning: overgang fra kurvet til rett profil flyttet gradvis nærmere toppunktet ($Y/H_e = 0,1-3,0$; Figur 2a);
- 2) Flatt topp-parti: innskutt horisontal seksjon med varierende lengde ($d/H_e = 0,0-4,0$; Figur 2b);
- 3) Vertikal nedstrøms avslutning: avkapping av nedstrøms del av kurven ved ulike høyder ($Y/H_e = 0,1-1,0$; Figur 2c);



Figur 1. Definisjon av geometriske parametere. H_0 og H_e er hhv. dimensjonerende og opptredende oppstrøms overløpshøyde, P er oppstrøms terskelhøyde, R er radius ved oppstrøms avrunding, d er lengden på innskutt flatt topp-parti, og Y er vertikal avstand fra toppunktet til overgangen mellom kurvet og rett nedstrøms side.



Figur 2. Prinsippkisser av de analyserte modifikasjonene av standardoverløpet.

- 4) Oppstrøms avrunding: varierende radius på innløpskurvaturen ($R/H_0 = 0,0-0,5$; Figur 2d).

Dimensjonene er valgt slik at resultatene kan uttrykkes dimensjonsløst, og dermed anvendes for overløp i ulike størrelser. For enkelte tilfeller ble simuleringene kjørt i flere serier med forskjellige opptredende overløpshøyder ($H_e/H_0 = 0,5-1,5$).

CFD-modell

Analysene ble utført i Flow-3D Hydro (Flow Science, 2024) som todimensjonale simuleringer. Simuleringene ble kjørt med konstant vannføring over lang nok tid til at strømmingen ble tilnærmet stasjonær. Beregningene benyttet Renormalized Group (RNG) $k-\epsilon$ -modell for turbulens og Volume of Fluid (VOF)-metode for vann-luft-grensesnittet.

Oppstrøms grensebetingelse ble satt som en energihøyde, og nedstrøms høyde definert som atmosfærisk trykk og tomme celler. For simuleringer der lufting av den frie strålen var avgjørende, ble det benyttet en 2D/3D hybrid-modell, der oppstrøms forhold ble modellert som 2D og nedstrøms forhold som 3D med atmosfærisk trykk på sidene for lufting av strålen.

Beregning av overløpskoeffisient

Når simuleringene hadde nådd stasjonære forhold, ble vannføringen hentet ut fra modellen og brukt til å beregne den effektive overløpskoeffisienten: $C = \frac{Q}{LH_e^{2.5}}$. Reduksjonen i kapasitet for hver modifikasjon ble deretter uttrykt som C/C_0 der det var mulig. For innskutt flatt topp-parti er det ikke mest hensiktsmessig å uttrykke effekten som en ren multiplikativ korreksjon C/C_0 . Årsaken er at et økende topp-parti gradvis endrer strømningstypen fra standardoverløp til bredkronet overløp. Kapasiteten går derfor ikke mot null, men mot en asymptotisk grenseverdi C_{min} . Sammenhengen beskrives derfor bedre som en overgang fra C_0 til C_{min} enn som en prosentvis reduksjon av samme grunnprofil.

Parametere er gjort dimensjonsløse som forholdet mellom endrede geometriske dimensjoner og overløpshøyden. Valg av referanse høyde følger hvilket hydraulisk fenomen modifikasjonen primært påvirker. Geometrier som virker i den aktive, opptredende strømningssonen over og nedstrøms for toppen, skaleres best med opptredende overløpshøyde H_e . Geometrier som endrer den faste referanseformen til standardprofilen, skaleres best med dimensjonerende overløpshøyde H_0 .

Resultatene er analysert i form av dimensjonsløse kurver og enkle empiriske sammenhenger. Trykkfordelinger og strømninger fra CFD-modellen ble brukt kvalitativt for å forklare årsakene til observerte endringer i kapasitet.

Validering og verifikasjon

Modellen ble validert ved gridsensitivitetsanalyse. Dette ble gjort ved å trinnvis halvere cellestørrelsen i kritiske områder. Resultatene

viste at endringen i beregnet overløpskoeffisient skalerte tilnærmet lineært med cellestørrelsen, og at et nett med om lag 20 celler over vann dybden på overløpet gir mindre enn 0,5 % avvik fra den fineste oppløsningen.

Resultatene er ikke verifisert med nye empiriske forsøk, men sammenligning for kjente sammenhenger (påvirkning av terskelhøyde, effektiv overløpshøyde og nedstrøms nivå) mot publiserte kurver (USBR, 1987) ga verdier ca. 1 % lavere for $H_e/H_0 \leq 0,3$ og ca. 1,5 % høyere for $H_e/H_0 \geq 1,0$.

Resultater og diskusjon

Nedstrøms utflatning

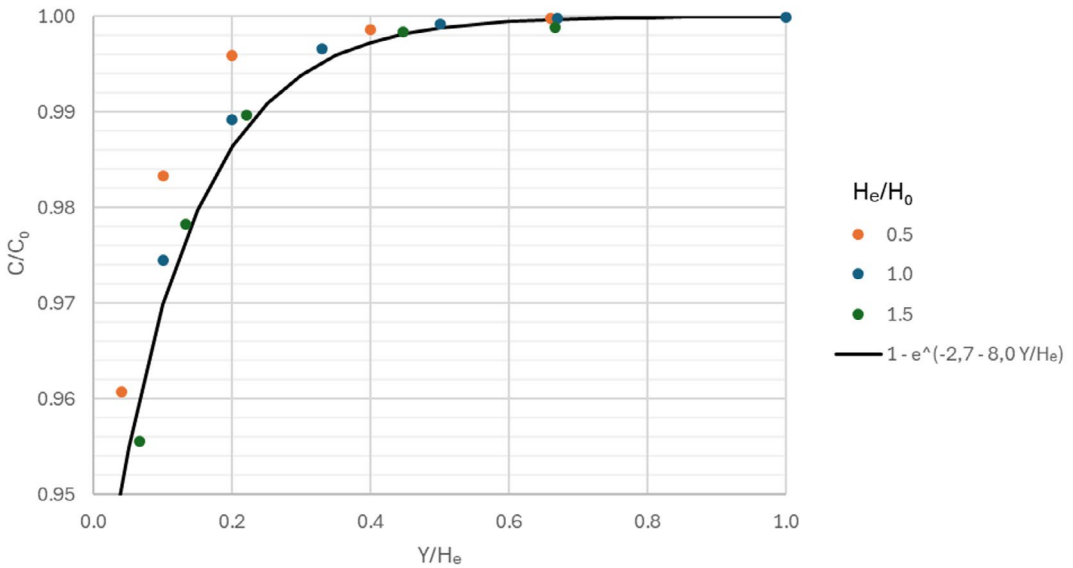
Simuleringene viser en reduksjon av overløpskapasiteten når utflatningspunktet flyttes nærmere toppunktet på terskelen. Bruk av opptredende overløpshøyde ga bedre samsvar med resultatene enn dimensjonerende overløpshøyde. Forholdet kan beskrives med den empiriske sammenhengen $\frac{C}{C_0} = 1 - e^{-2,7 - 8,0 Y/H_e}$, der Y er den vertikale avstanden fra toppunktet til utflatningspunktet og H_e den opptredende overløpshøyden, som vist på Figur 3.

Så lenge utflatningspunktet ligger mer enn 0,5 overløpshøyder under toppen, er reduksjonen ubetydelig. Selv ved 0,33 H_e under toppunktet er reduksjonen bare rundt 0,5 %. Dette betyr at moderate geometriske tilpasninger mot damkonstruksjon eller stabilitetskrav kan gjøres uten målbar effekt på kapasiteten.

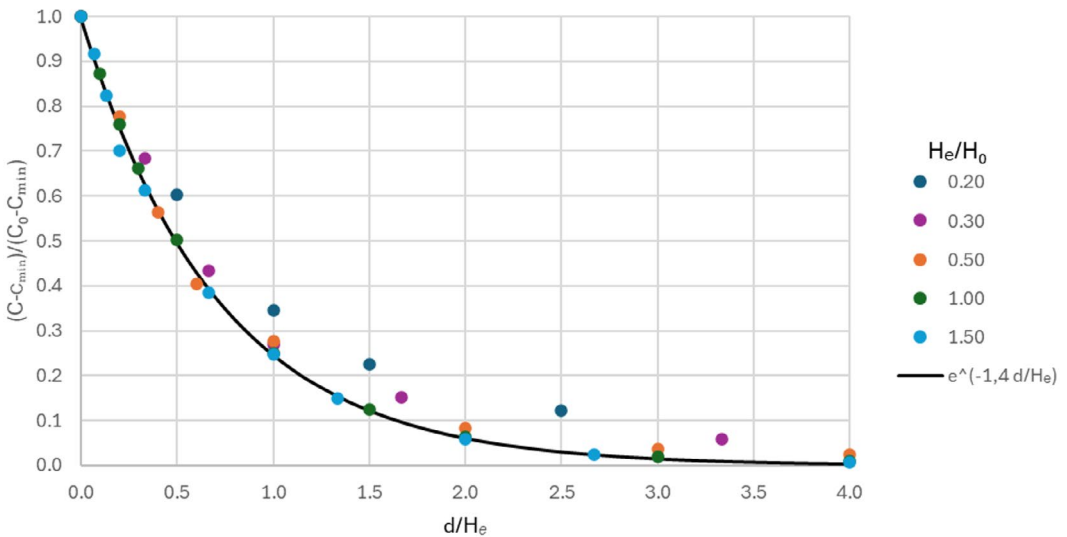
Trykkfordelingene viser at reduksjonen skyldes at vannstrålen tvinges til en retningsendring. Dette skaper et lokalt overtrykk mot terskelen, som forplanter seg noe oppstrøms og gir svak oppstuvning av vannflaten. Resultatene stemmer godt med klassiske laboratorieforsøk, som viser uendret kapasitet så lenge nedstrøms terreng ligger minst 0,67 H_e under toppen (USBR, 1987).

Flatt topp-parti

Effekten av et flatt topp-parti skiller seg fra effekten av nedstrøms utflatning ved at endringen gradvis endrer selve overløpstypen. Når topp-partiet forlenges, blir strømningen mer og



Figur 3. Korreksjon av overløpskapasitet som funksjon av utflatningspunktets posisjon (Y/H_e).

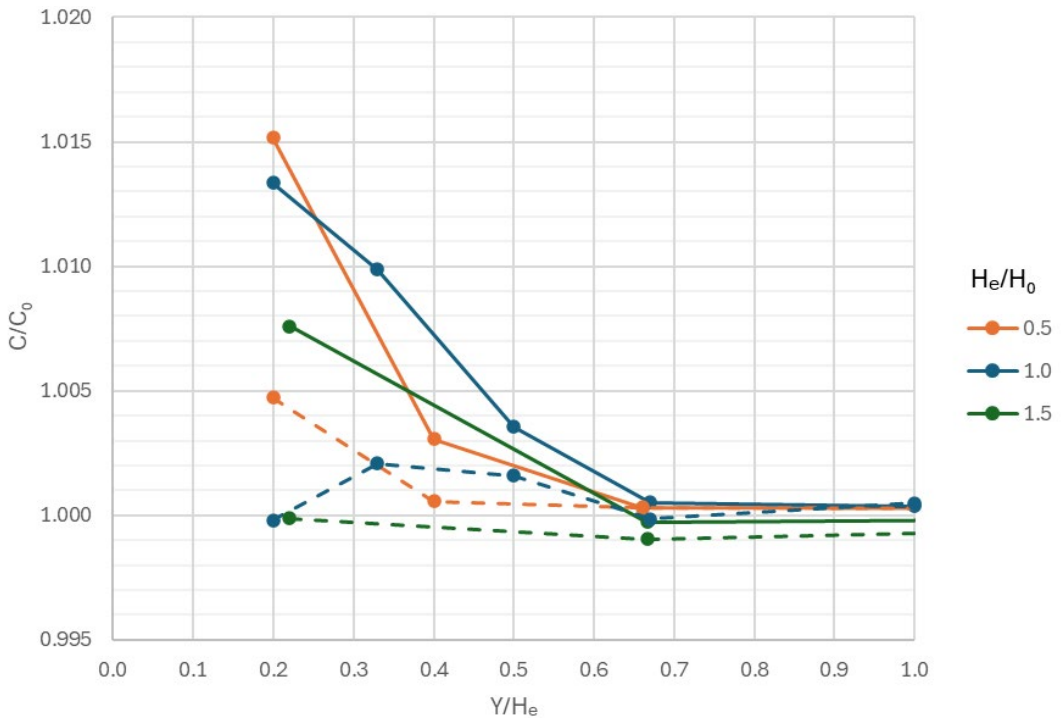


Figur 4. Normalisert reduksjon i overløpskapasitet som funksjon av lengden på flatt parti (d/H_e).

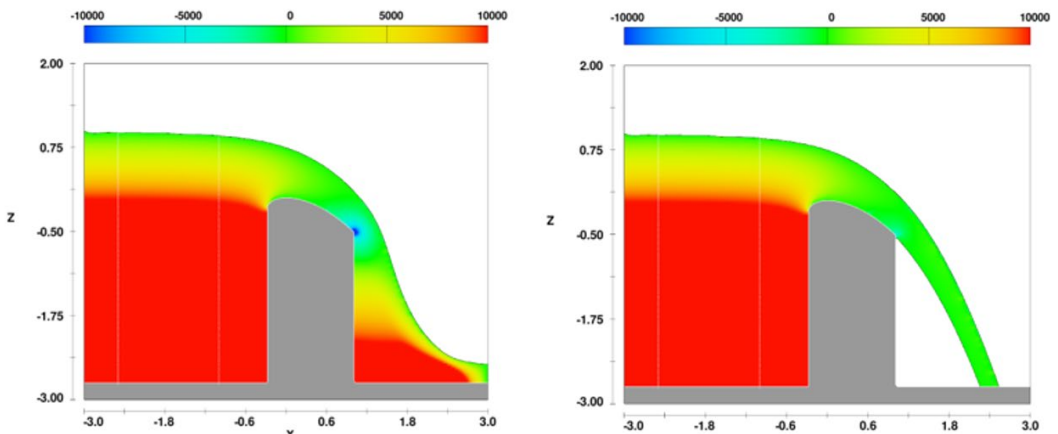
mer lik et bredkronet overløp, som har en lavere og nær konstant overløpskoeffisient. Kapasiteten med korreksjon går derfor ikke mot null, men mot en asymptotisk verdi ($C_{min} \approx 1,65 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$). Dette gjør at sammenhengen mellom reduksjon og lengde (d/H_e) ikke er multiplikativ og derfor ikke enkelt kan presenteres på formen C/C_0 , men følger en overgang fra maksimal kapasitet (standardprofil) til bred-

kronet karakteristikk. Sammenhengen kan beskrives ved $C = C_{min} + k(C_0 - C_{min})$, der $k = e^{-1,4 \frac{d}{H_e}}$, d er lengden på det flate partiet og C_0 er overløpskoeffisienten for samme geometri, men uten flatt parti. Sammenhengen er vist på Figur 4.

Trykkfordelinger viser at strømmingen er hydrostatisk når $d/H_e > 2,5$. Ved lengder større enn disse er vannoverflaten horisontal, og simu-



Figur 5. Korreksjon av overløpskapasitet som funksjon av plassering av nedstrøms vertikal avslutning ved ulike opptredende overløpshøyder. Stiplede linjer viser luftet strømning, og heltrukne linjer viser strømning uten lufting.



Figur 6. Trykkfordeling ved vertikal nedstrøms avslutning: uten (venstre) og med lufting (høyre).

leringene viser en overløpskoeffisient på $1,65 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$, tilsvarende et bredkronet overløp. Dette samsvarer med laboratoriestudier for bredkronede overløp, som viser en stabilisering av overløpskoeffisienten ved $L/H > 2,5$ for bredkronede overløp (Tracy, 1957).

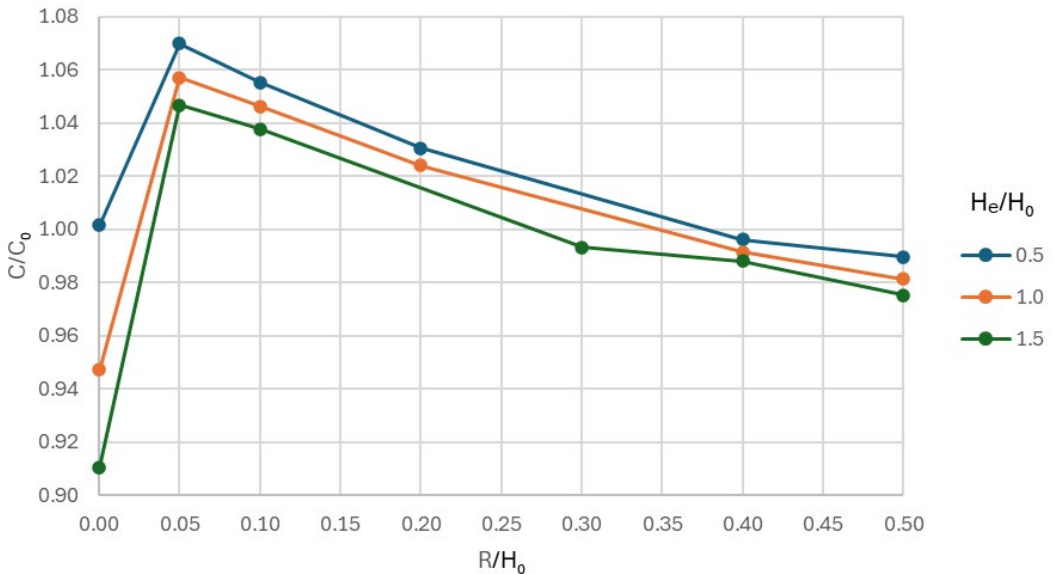
Et flatt topp-parti kan være en praktisk løsning av konstruktive hensyn, men resultatene tilsier at det normalt er en mindre gunstig løsning når høy kapasitet er viktig. Hydraulisk sett er det som regel mer fordelaktig å øke overløpshøyden H_o , slik at terskelprofilet blir bredere

innenfor standardgeometrien, enn å innføre et flatt topp-parti som trekker strømmingen mot bredkronet oppførsel.

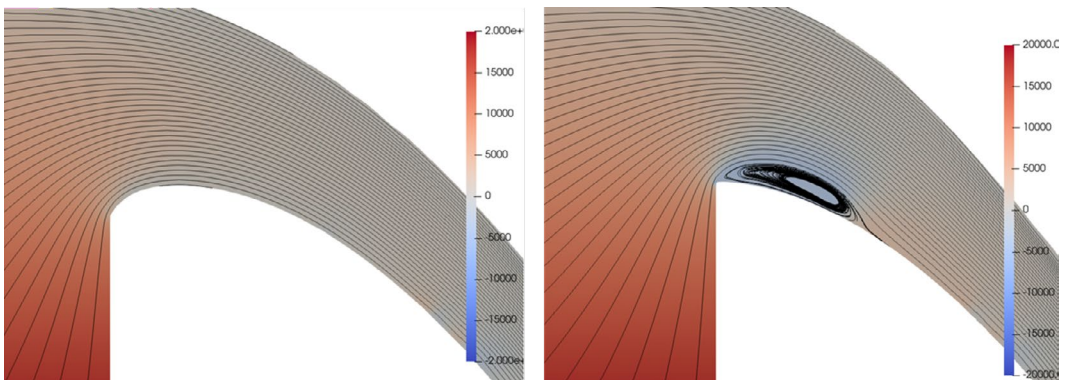
Vertikal nedstrøms avslutning

Vertikal avslutning av nedstrøms side har liten påvirkning på kapasiteten (Figur 5), forutsatt at strålen forlater overløpet med atmosfærisk trykk på undersiden. Uten lufting kan vannstrålen tidvis klistre seg til den vertikale flaten som vist på Figur 6, eller tomrommet under strålen kan fylles delvis med vann. Dette gir et undertrykk, som isolert sett kan gi en kapasitets-

økning, men strømmingen kan være ustabil og gi kavitasjonsfare. Dette gjelder særlig ved høy vannføring og liten avstand mellom knekkpunkt og topp. Resultatene viser at lufting i knekkpunktet stabiliserer strømmingen og eliminerer undertrykk. Anbefalingen er derfor å sørge for lufting eller strålesplitter ved vertikal avslutning. For stabil strømming bør parabelformen også føres tilstrekkelig langt ned til at kurven styrer strømmingen, men Figur 5 gir ikke noen klar grense.



Figur 7. Korreksjon av overløpskapasitet som funksjon av oppstrøms radius ved ulike opprettedende overløpshøyder.



Figur 8. Strømlinjer for standardoverløp (venstre) og uten oppstrøms avrunding (R/H₀ = 0, høyre).

Oppstrøms avrunding

Overløpskapasiteten synker omtrent lineært med økende radius som følge av overgang fra undertrykk til overtrykk i tilløpet (Figur 7). En utforming helt uten avrunding ($R/H_0 = 0$) viser tydelig separasjon rett nedstrøms for hjørnet og lavere kapasitet enn standardoverløpet (Figur 8). Ved små radier ($R/H_0 \approx 0,05$) elimineres separasjonen fullstendig, og kapasiteten er høyere enn standardoverløpet. Dette stemmer godt med funnene til (Tracy, 1957) og bekrefter at selv små avrundinger er tilstrekkelige for å opprettholde kapasiteten.

Praktiske anbefalinger

Resultatene viser at standardformen for overløp tåler visse geometriske avvik uten vesentlig reduksjon i kapasitet, mens andre endringer bør unngås. Tabellen under oppsummerer anbefalte grenseverdier for modifikasjoner basert på de numeriske analysene. Verdiene er dimensjonsløse og kan anvendes direkte i prosjektering av overløp i ulik skala.

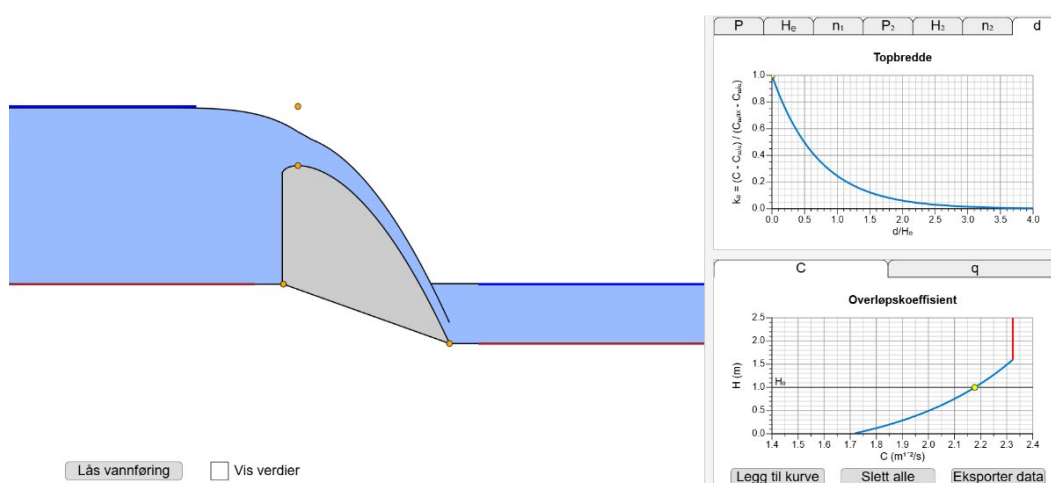
Modifikasjon	Hovedresultat	Praktisk implikasjon
Nedstrøms utflatning	Uendret kapasitet for $Y/H_e > 0,5$	Sjelden en utforming å tilfredsstillere kriteriet
Flatt topp-parti	$\approx 1\%$ reduksjon ved $d/H_e = 0,03$	Unngås – øk heller H_0 for stabilitet
Vertikal avslutning	Uendret kapasitet med lufting	Lufting/strålesplitter nødvendig
Oppstrøms avrunding	$R/H_0 \geq 0,05$ eliminerer separasjon	Små radier er tilstrekkelig

Disse retningslinjene kan brukes som første vurdering ved rehabilitering eller nybygging av overløp. For prosjekter der geometriske avvik er uunngåelige, gir de empiriske sammenhengene i kapittel 3 et grunnlag for å beregne kapasiteten mer presist uten nye CFD-beregninger.

For å gjøre resultatene direkte anvendbare i prosjektering er det utviklet et eget interaktivt beregningsverktøy basert på de empiriske sammenhengene i denne artikkelen og eksisterende standardempiri. Verktøyet gjør det mulig å variere sentrale dimensjonsløse parametere og umiddelbart se hvordan overløpskoeffisienten påvirkes, og fungerer dermed som et praktisk supplement til de generelle retningslinjene (vasslab.no, 2025; Figur 9)

Begrensninger

Gridsensitivitetsanalysen viste mindre enn 0,5 % avvik fra den fineste oppløsningen, og de relative forskjellene mellom geometrier med samme oppløsning var mindre.



Figur 9. Interaktivt grensesnitt for beregning av overløpskoeffisient.

Det ble ikke gjennomført systematiske analyser med alternative turbulensmodeller, vegglov-formuleringer eller ruhetsparametre. Basert på litteratur og erfaring med 2D-CFD-modeller av overløp antas slike valg hovedsakelig å påvirke detaljer i resirkulasjonssoner, mens effekten på vannføring normalt er liten. Siden målet i denne studien i hovedsak er dimensjonsløse reduksjonsforhold C/C_0 , vurderes resultatene som robuste innenfor formålet.

Studien er utført med CFD-analyse, og det er ikke gjort noen ny empirisk verifikasjon av resultatene. Simuleringene utført med geometri som et standardoverløp kan likevel sammenlignes med kjente empiriske studier. Forskjellene er verdt å merke seg, men er ikke spesielt høye. Separasjonssonen ved redusert oppstrøms radius er ikke kvantitativt vurdert, og overgangen omkring $R/H_0 \approx 0,05$ bør derfor oppfattes som en praktisk rettesnor heller enn en absolutt grense.

De empiriske sammenhengene er tilpasset direkte til CFD-dataene som ligger bak figurene, og avviket mellom datamaterialet og formeltilpasningen er mindre enn 1 %.

For videre arbeid vil det være relevant å validere resultatene i fysiske modellforsøk.

Konklusjon

Studien viser at små geometriske endringer i et standardoverløp kan gi betydelige utslag i hydraulisk kapasitet.

De viktigste resultatene kan oppsummeres slik:

- Nedstrøms utflatning kan utføres uten merkbar effekt dersom knekkpunktet ligger minst $0,5 H$ under toppunktet. Reduksjonen kan estimeres med $\frac{C}{C_0} = 1 - e^{-2,7 - 8,0 Y/H_e}$.
- Flatt topp-parti gir rask reduksjon i kapasitet; selv korte flater bør unngås. Økt overløps-høyde H_0 er et bedre tiltak for stabilitet. Overløpskoeffisienten kan estimeres med $C = 1,65 + k(C_0 - 1,65)$, der $k = e^{-1,4 \frac{d}{H_e}}$ og C_0 er overløpskoeffisienten for et overløp uten flatt parti.
- Vertikal avslutning nedstrøms påvirker ikke kapasiteten, men krever lufting eller strålesplitter for å hindre undertrykk og kavitasjon.

- Oppstrøms avrunding er avgjørende for å hindre separasjon; radier på $R/H_0 \geq 0,05$ er tilstrekkelige.

Samlet sett gir de utledede korreksjonsformlene og grenseverdiene et praktisk grunnlag for prosjektering og vurdering av modifiserte overløp. Det er verdt å understreke at usikkerheten i hydraulisk beregning av overløp normalt er vesentlig mindre enn usikkerheten i flomberegninger. Selv om små geometriendringer kan gi flere prosents variasjon i C , vil slike avvik i praksis være små sammenlignet med usikkerheten i beregnede flommer (f.eks. Q_{1000}). De presenterte korreksjonene bidrar derfor til mer korrekt flomstigning og ruting for en gitt vannføring, selv om den absolutte flommen er beheftet med større usikkerhet.

Takk

Studien ble initiert og gjennomført på forfatterens eget initiativ, uten oppdrag, ekstern finansiering eller andre eksterne føringer. Arbeidet ble utført mens forfatteren var ansatt i Norconsult, men forfatterens nåværende tilknytning er Sweco. Studien er uavhengig av forfatterens pågående doktorgradsarbeid ved NTNU. Beregningene ble utført med Flow-3D Hydro, lisensiert til Norconsult. Forfatteren takker kollegaer og doktorgradsveiledere Leif Lia og Nils Reidar Bøe Olsen for faglige innspill i arbeidet.

Referanser

Flow Science. (2024). *FLOW-3D HYDRO (version 2024R1)*. Flow Science Inc.

Hargreaves, D. M., Morvan, H. P., & Wright, N. G. (2007). Validation of the Volume of Fluid Method for Free Surface Calculation: The Broad-Crested Weir. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 1(2), 136–146. <https://doi.org/10.1080/19942060.2007.11015188>

Haun, S., Olsen, N. R. B., & Feurich, R. (2011). Numerical Modeling of Flow Over Trapezoidal Broad-Crested Weir. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 5(3), 397–405. <https://doi.org/10.1080/19942060.2011.11015381>

Jacobsen, J., & Olsen, N. R. B. (2010). Numerical modeling of the capacity for a complex spillway. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 163(6), 283–288.

<https://doi.org/10.1680/wama.2010.163.6.283>

Johnson, M. C., & Savage, B. M. (2006). Physical and Numerical Comparison of Flow over Ogee Spillway in the Presence of Tailwater. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(12), 1353–1357.

[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2006\)132:12\(1353\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2006)132:12(1353))

NVE. (2005). *NVE Retningslinjer for flomløp - utgave 2*.

Olsen, N. R. B., & Kjellesvig, H. M. (1998). Three-dimensional numerical flow modelling for estimation of spillway capacity. *Journal of Hydraulic Research*, 36(5), 775–784. <https://doi.org/10.1080/00221689809498602>

Savage, B. M., & Johnson, M. C. (2001). Flow over Ogee Spillway: Physical and Numerical Model Case Study. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(8), 640–649.

[https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2001\)127:8\(640\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2001)127:8(640))

Tracy, H. J. (1957). Discharge characteristics of broad-crested weirs. In *USGS*.

USBR. (1987). *Design of Small Dams*. In *US Bureau of Reclamation*. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation.

vasslab.no. (2025). *Visualisering av overløpskoeffisient for standardprofiler*. *Www.Vasslab.No*.

<https://vasslab.no/overlop/>

Walløe, K. L., & Pedersen, Ø. (2022). *Ekstern rapport 10/2022: Hydraulisk modellering av flomløp med sideoverløp, kanal og lukka avløp*. *Litteratur- og casestudier*.

Yang, J., Andreasson, P., Teng, P., & Xie, Q. (2019). The Past and Present of Discharge Capacity Modeling for Spillways—A Swedish Perspective. *Fluids*, 4(1).

<https://doi.org/10.3390/fluids4010010>

Zeng, J., Zhang, L., Ansar, M., Damisse, E., & González-Castro, J. A. (2016). Applications of Computational Fluid Dynamics to Flow Ratings at Prototype Spillways and Weirs. I: Data Generation and Validation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(1), 04016072.

[https://doi.org/10.1061/\(asce\)ir.1943-4774.0001112](https://doi.org/10.1061/(asce)ir.1943-4774.0001112)

VANN

COWI har lang erfaring fra prosjekter innen fagområdene vann, avløp og kommunale vegger. Dette omfatter hovedplaner og strategisk rådgiving, vannforsyning, transportsystemer, avløpsbehandling, overvannshåndtering og flomsikring.