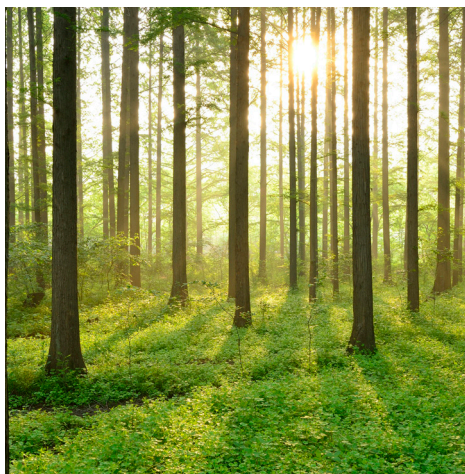


# LABYRINT- OCH PIANOTANGENTUTSKOV FÖR EFFEKTIV AVBÖRDNING

RAPPORT 2022:853





# Labyrint- och pianotangentutskov för effektiv avbördning

JAMES YANG





## Förord

**I detta projekt har en litteraturstudie genomförts för att beskriva kunskapsläget inom forskning och tillämpningar av labyrint- och pianotangentutskov.**

Projektet har genomförts av Vattenfall R&D med James Yang som projektledare. Referensgruppen bestod av Romanas Wolfsborg (Vattenfall), Stina Åstrand (Fortum) och Carl-Oscar Nilsson (Uniper).

Projektet har finansierats av Energiforsks dammsäkerhetstekniska utvecklingsprogram med medverkan från industrin och Svenska kraftnät.

Författaren ansvarar för rapportens innehåll.

## Sammanfattning

**Att säkert kunna avbörda överskottsvatten är en fråga som berör alla vattenkraftanläggningar i högflödessituationer. Det är därför viktigt att undersöka potentiella förbättringar i utformningen av utskov, vilket bidrar till ökad avbördnings säkerhet.**

Både labyrintutskov och pianotangentutskov (*piano key weir*, PKW) är effektiva avbördningsanordningar. Vid liknande hydrauliska förhållanden kan de, beroende på överfallshöjd, avbörda 2–5 gånger så mycket vatten som ett linjärt överfall. I studien granskas deras geometriska och hydrauliska förhållanden som påverkar avbördningskapaciteten. Syftet är att föreslå geometriska modifieringar hos PKW för laboratoriestudier. Andra aspekter som diskuteras inkluderar luftinblandning och luftmedrivning, drivgods av träd och isbildning samt sedimenttransport.

PKW är en vidareutvecklad version av labyrintöverfall och kännetecknas av en något mer komplex geometri. De parametrar som styr avbördningsen inkluderar en PKW-enhets längd och bredd, inlopps- och utloppstangenters bredd, bågöverhängens längd och strukturell höjd. Det optimala valet av parametrar kan variera beroende på om det är ett nytt utskov eller en tillbyggnad på en befintlig damm. Avvägningen mellan hydraulisk effektivitet och strukturell komplexitet spelar också en roll i sammanhanget.

För att förbättra inströmningsförhållandena samt att utöka krönets längd föreslås att bl.a. inlopps- och utloppstangenters ändar görs strömlinjeformade och att lutande bottnar i bågövertangenterna anpassas till den rundade formen. En parapet läggs på krönet för att förbättra överströmningsförhållandena vid krönet. Det finns också ett behov av att undersöka beteendet hos drivgods framför PKW.

## Nyckelord

Utskov, avbördnings, labyrintutskov, pianotangentutskov, avbördningskapacitet, avbördnings säkerhet

## Summary

**To safely release floods is an issue that concerns all hydropower facilities in case of extreme flood events. It is therefore essential to explore improvements in spillway design and whereby to increase the discharge safety.**

Both labyrinth and piano key weirs (PKW) are effective discharge options. At similar hydraulic conditions, they can, depending on water head, discharge 2–5 times as much as a linear weir. In the study, their geometrical and hydraulic aspects that influence the discharge capacity are reviewed, the purpose is to propose geometrical modifications of PKW for laboratory study. The other issues that are discussed include air entrainment, behaviors of floating debris and ice and even sediment transport.

PKW is a developed version of labyrinth weir and is characterized by somewhat more complex geometry. The parameters that govern the discharge include a PKW unit's length and width, inlet and outlet keys' width, both overhangs' length and weir height. The optimum choice of the parameters may vary depending whether it is a new weir to build or an extension on an existing dam. The tradeoff between hydraulic efficiency and structural complexity also plays a role in the context.

To improve approach flow conditions and extend crest length, the proposed modifications refer to streamline both ends of the inlet and outlet keys and to adapt the sloping bottoms of both keys to the rounded shapes. A parapet wall is added on the crest to enhance the flow efficiency. There is also a need to examine the behaviors of floating debris at the PKW.

## Innehåll

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduktion</b>  | <b>7</b>  |
| <b>2</b> | <b>Syfte och mål</b>                                       | <b>15</b> |
| <b>3</b> | <b>Labyrintutskov</b>                                      | <b>16</b> |
| 3.1      | Historik   | 16        |
| 3.2      | Avbördning och påverkande parametrar                       | 17        |
| 3.3      | Andra geometriska aspekter                                 | 21        |
| <b>4</b> | <b>Pianotangentutskov</b>                                  | <b>24</b> |
| 4.1      | Utveckling av pianotangentutskov                           | 24        |
| 4.2      | Typer av pianotangentutskov och terminologi                | 24        |
| 4.3      | Avbördning och styrande parametrar                         | 28        |
| 4.3.1    | Krönform i tvärsnitt                                       | 28        |
| 4.3.2    | Nosform under uppströmsöverhäng                            | 29        |
| 4.3.3    | Frontform av uppströmsöverhäng                             | 30        |
| 4.3.4    | Effekt av parapet  | 31        |
| 4.3.5    | Geometriska förhållanden                                   | 32        |
| 4.4      | Jämförelse mellan PKW och WES-utskov                       | 33        |
| <b>5</b> | <b>Andra aspekter hos labyrint- och pianotangentutskov</b> | <b>35</b> |
| 5.1      | Luftningsbehov   | 35        |
| 5.2      | Drivgods av träd   | 38        |
| 5.3      | Isfrågor   | 40        |
| 5.4      | Sedimenttransport  | 41        |
| <b>6</b> | <b>Slutsatser och rekommendationer</b>                     | <b>43</b> |
| <b>7</b> | <b>Referenslista</b>                                       | <b>45</b> |

# 1 Introduktion

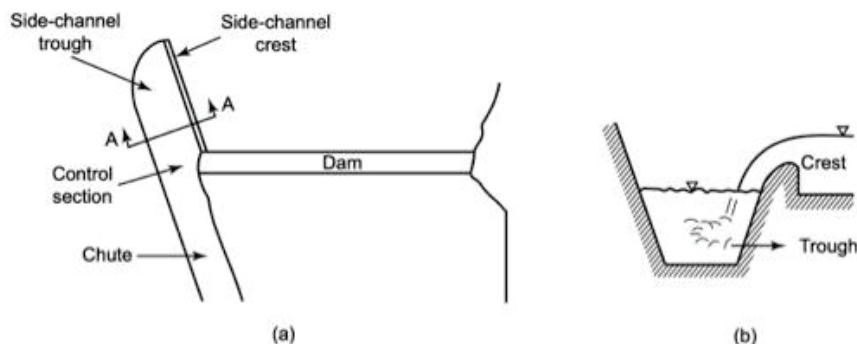
**I denna inledning ges en introduktion av utskov, överfallsutskov, utvecklingen av utskovstyp från labyrinth- till pianotangentöverfall och syften med studien.**

I en vattenkraftanläggning är en tillfredsställande avbördningsfunktion avgörande för anläggningens säkerhet. Som bekant är ytutskov, ofta med uppåtgående luckor, den vanligaste typen av avbördningsanordning. I enlighet med RIDAS skall ytutskov ensam kunna avbörda dimensionerande flöde. Förutom avbördningsförmåga utgör energiomvandlingen en viktig del av funktionen. Dess utformning är ofta nära kopplad till bl.a. dammens typ och dess strukturella höjd.

Överfallsutskov utan någon lucka finns i många befintliga anläggningar. Normalt är de placerade ungefärligt vinkelrätt mot strömningsriktningen och har en strömlinjeformad profil för effektiv avbördningskapacitet. De parametrar som styr avbördningskapacitet är överfallsprofil och längd (mätt längs dammen) och vattendjup uppströms (överfallshöjd). Bland dessa parametrar har överfallslängden störst påverkan på avbördningskapaciteten.

I samband med att riktlinjer för dimensionerande vattenföring för vattenkraftdammar har uppdaterats eller håller på att revideras i många länder behöver många utskov byggas om för att möta krav på ökad tillrinning. Detta sker oavsett om det är aktiv eller passiv dämpning. I Sverige påverkas många dammar. I en artikel (Yang et al. 2019) listas, för tiotals dammar, jämförelser mellan befintlig utskovskapacitet och reviderat avbördningskrav. Ökningen i dimensionerande vattenföring varierar ofta mellan 30% och 50%. I vissa fall torde den uppgå till 70–80%.

Utän att göra något strukturellt ingrepp i själva dammen är sidoutskov (*side spillway*) en effektiv metod att öka avbördningskapaciteten, där överfallströskeln är placerad i ena stranden av älvfåran och i direkt anslutning till dammen. Vattnet avbördas sedan i en öppen kanal eller genom en tunnel (trycksatt eller med fri vattenyta). Figur 1.1 illustrerar denna typ av utskov och figurer 1.2 och 1.3 visar utskovet i två befintliga anläggningar (Valldalen, Norge och Kárahnjúkar, Island).



Figur 1.1 Illustration av ett sidoutskov.



Figur 1.2 Sidoutskov vid Valdalen-dammen, Norge (foto: Hydro Energi AS).



Figur 1.3 Sidoutskov vid Kárahnjúkar-dammen, Island (Källa: www.langdale-associates.com).

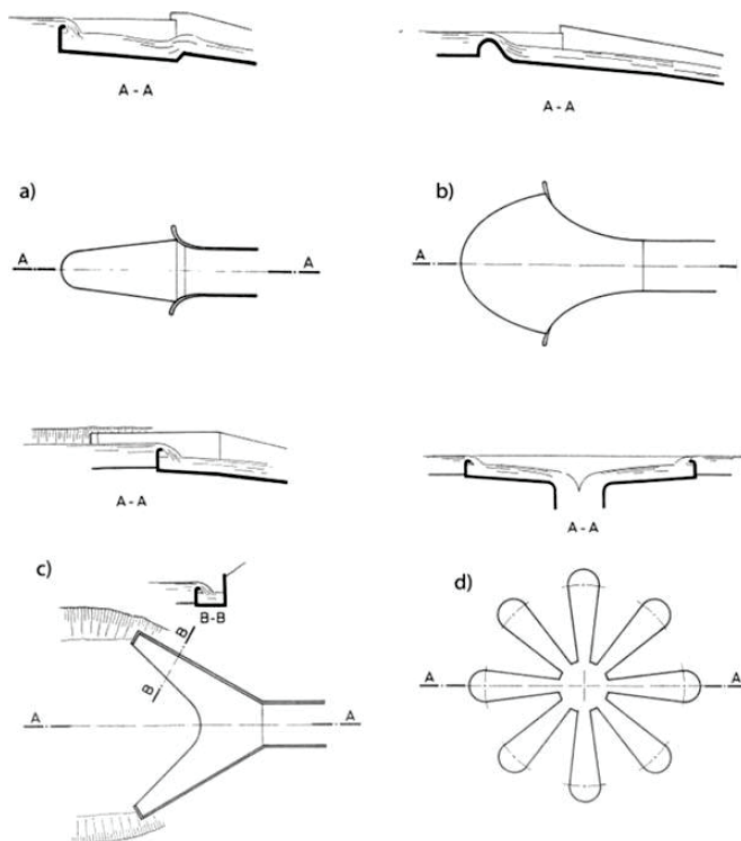
Avbördning med fri vattenyta över ett överfallsutskov beskrivs ofta enligt följande formel

$$Q = CLH^{1,5}$$

Där  $Q$  = vattenföring,  $C$  = avbördningskoefficient,  $L$  = total överfallslängd mätt längs krönets centrumlinje och  $H$  = överfallshöjd. Parametern  $H$  avser den opåverkade vattenytans höjd över överfallets krönnivå. Men i vissa studier kan den ersättas med  $H_T = H + V^2/(2g)$ , vilken inkluderar vattenhastighetshöjden, där  $V$  = medelhastighet uppströms i magasinet och  $g$  = gravitationskonstanten. För att erhålla högre  $Q$  finns det tre sätt: att öka  $L$ , att förbättra  $C$  och att höja  $H$ . Att öka ett överfalls tröskellängd torde vara ett effektivt sätt att avbörda mer vatten i en befintlig anläggning.



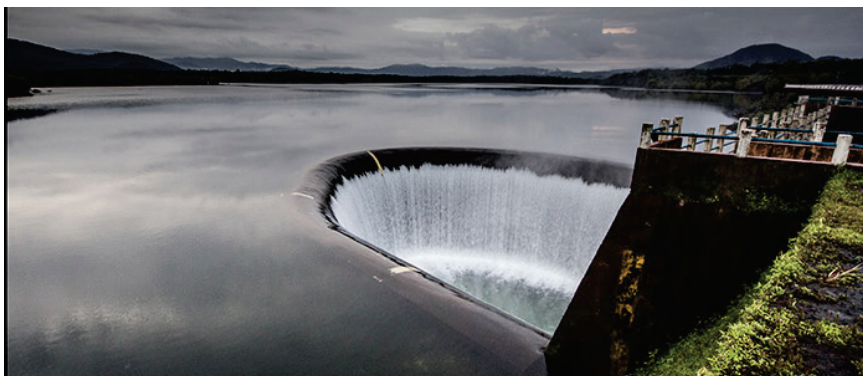
Ett sätt att öka överfallslängden ( $L$ ) är att ersätta en rak (linjär) tröskel med tröskelkonfigurationer som skissas i figur 1.4. Prototyper av s.k. näbbdjur (duckbill)- och badkar (bathtub)-formade trösklar visas i figur 1.5 respektive 1.6.



Figur 1.4 Varianter av tröskelutformningar (ICOLD 1994, Schleiss 2011). (a) näbbdjur (*duckbill*), (b) solfjäder (*fan*), (c) Y-typ, (d) tusensköna-blomma (*Daisy*).



Figur 1.5 Näbbdjur (*duckbill*)-format överfall, Garden Route-dammen, Sydafrika (Källa: george.gov.za, bwa.co.za).



Figur 1.6 Badkar (*bathtub*)-format överfall, Salauli-dammen, India (goawrd.gov.in).

Om flera sådana överfall placeras sida vid sida får man ett s.k. labyrintöverfall (*labyrinth weir*) eller pianotangentöverfall (*piano key weir, PKW*). Figurer 1.7 och 1.8 visar exempel av den förra respektive den senare typen.

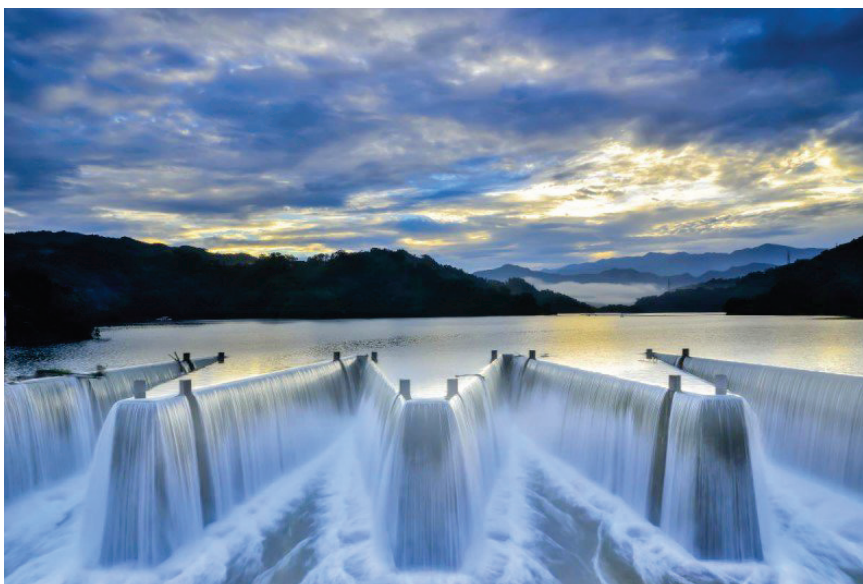


Foto: Sira-Kvina Kraftselskap

Figur 1.7 Labyrintutskov vid Liyutan-dammen, Taiwan (Twitter, @Taiwancbtour) (övre foto) och vid Degdammen, Norge (foto Sira-Kvina Kraftselskap) (nedre foto).





Figur 1.8 Pianotangentöverfall vid Gloriettes respektive Escouloubre-dammen, Frankrike (foto EDF respektiv S. Ercicum vid University of Liege).

I labyrinthöverfall, som först formellt studerades 1941 av Gentilini, placerades en tunn vertikal vägg i en triangulär eller trapetsformad form (i planvy) för att maximera överfallslängden inom ett begränsat utrymme. Antalet labyrinthprojekt ökade exponentiellt efter publicering av nyckelforskning från *US Bureau of Reclamation (USBR)* och *American Society of Civil Engineers (ASCE)* på åttiotalet och efter byggandet av Ute damm (USA) (Falvey 2003, Ercicum et al. 2020). Ytterligare studier som bidragit till *state-of-the-art* inom området genomfördes vid *Laboratório Nacional de Engenharia Civil* (Portugal) och vid *Utah Water Research Laboratory, Utah State University* (USA). Mer än hundra strukturer har hittills byggts (Paxson et al. 2013, Crookston et al. 2019) och labyrinthöverfall är fortfarande ett aktivt forskningsämne (Shen & Oertel 2021).

I samarbete med *EDF Laboratoire National d'Hydraulique (EDF-LNH)*, Frankrike, och sedan *Indian Institute of Technology Roorkee*, Indien, och *Biskra University*, Algeriet, påbörjade *NGO Hydrocoop* 1999 undersökningar för att förbättra det traditionella labyrinthkonceptet (Lempérière & Ouamane 2003, Lempérière et al. 2011). Deras mål var att utveckla en ny och mer kostnadseffektiv typ av labyrinthutskov. En sådan förbättrad version kan placeras ovanpå gravitationsdammar utöver de olika tillämpningar som är vanliga för labyrinthöverfall på t.ex. vallar och fyllningsdammar. År 2003, med resultat från många tester med utvalda former vid *University of Biskra* och experiment vid *EDF-LNH*, Chatou, föreslog Lempérière och Ouamane för första gången pianotangentöverfall (PKW) (Lempérière & Ouamane 2003).

Namnet pianotangentöverfall syftar på det rektangulära krönmönster som liknar tangenter på ett piano. Det är en rektangulär labyrinthform som ofta består av ett antal lika symmetriska enheter; varje enhet förses med två lutande sidor i strömriktningen och två vertikala sidoväggar, vilket ökar överfallslängden inom givet utrymme. Efter 2003 har utvecklingen fortsatt vid *University of Biskra*, där en specifik experimentell plattform byggdes (Ouamane & Lempérière 2006). Ytterligare framsteg gjordes vid *EDF-LNH* (Frankrike), *IIT Roorkee* (Indien) och *Ho Chi Minh och Hanoi Hydraulic Laboratories* (Vietnam). Efterföljande forsknings- och designframsteg erhöles vid *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne* (Schweiz), *University of Liege* (Belgien) och *Utah State University* (USA).

EDF byggde 2006 den första prototypen av pianotangentutskov vid Goulours-dammen. Ett avgörande steg i utvecklingen nåddes då ett pianotangentöverfall konstruerades på befintlig Charmines-damm för att öka dess avbördningskapacitet (figur 1.9). I Vietnam byggdes en lång struktur i Van Phon-dammen för att undvika en installation av dyra och mindre säkra segmentluckor (figur 1.10).

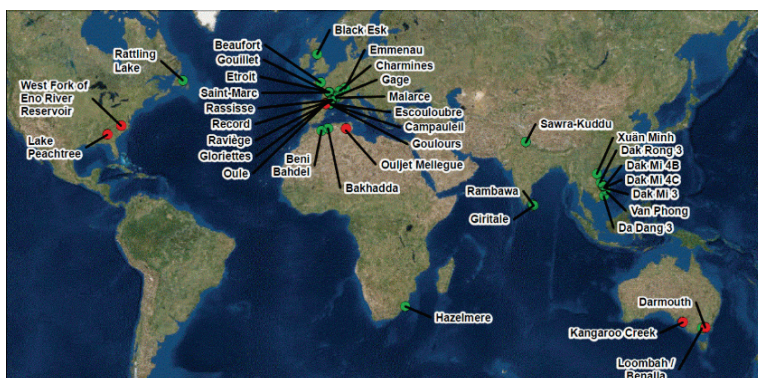


Figur 1.9 Pianotangentöverfall som EDF byggt på bägge sidorna av ett ytutskovsparti i befintlig Charmines-damm (foto EDF).



Figur 1.10 Ett långt pianotangentöverfall i Van Phon-dammen(foto VNCold).

Sedan konstruktionen av det första pianotangentutskovet vid Goulours 2006 har EDF byggt drygt 10 sådana anläggningar (Laugier 2007, Laugier et al. 2009, Laugier et al. 2011, Laugier et al. 2013, Laugier & Vermeulen 2017, Laugier et al. 2017). Världen över har drygt 35 st uppförts, se figur 1.11 och tabell 1.1. Mer uppgifter hittas på [https://www.uee.uliege.be/cms/c\\_5026433/en/world-register-of-piano-key-weirs-prototypes](https://www.uee.uliege.be/cms/c_5026433/en/world-register-of-piano-key-weirs-prototypes).



Figur 1.11 Karta över redan byggda pianotangentutskov i flera länder.

Tabell 1.1 Lista av redan byggda pianotangentutskov.

| Name                 | Country        | Commissioning |
|----------------------|----------------|---------------|
| <u>Goulours</u>      | France         | 2006          |
| <u>Saint-Marc</u>    | France         | 2008          |
| <u>Etroit</u>        | France         | 2009          |
| <u>Gloriettes</u>    | France         | 2010          |
| <u>Rattling Lake</u> | Canada         | 2011          |
| <u>Escouloubre</u>   | France         | 2011          |
| <u>Gouillet</u>      | France         | 2011          |
| <u>Malarce</u>       | France         | 2012          |
| <u>Beaufort</u>      | France         | 2013          |
| <u>Black Esk</u>     | United Kingdom | 2013          |
| <u>Dak MI 4B</u>     | Vietnam        | 2013          |
| <u>Dak MI 4C</u>     | Vietnam        | 2014          |

|                              |              |      |
|------------------------------|--------------|------|
| <u>Giritale</u>              | Sri Lanka    | 2013 |
| <u>Lombah</u>                | Australia    | 2013 |
| <u>Sawra Kuddu</u>           | India        | 2013 |
| <u>Emmenau</u>               | Switzerland  | 2012 |
| <u>Campauleil</u>            | France       | 2014 |
| <u>Charmines</u>             | France       | 2015 |
| <u>Rambawa Tank</u>          | Sri Lanka    | 2015 |
| <u>Rassisse</u>              | France       | 2015 |
| <u>Raviege</u>               | France       | 2015 |
| <u>Van Phong</u>             | Vietnam      | 2015 |
| <u>Da Dang 3</u>             | Vietnam      | 2016 |
| <u>Dak Mi 3</u>              | Vietnam      | 2016 |
| <u>Record</u>                | France       | 2016 |
| <u>Xuan Minh</u>             | Vietnam      | 2016 |
| <u>Gage</u>                  | France       | 2017 |
| <u>Hazelmere</u>             | South Africa | 2018 |
| <u>Oule</u>                  | France       | 2018 |
| <u>Ouldjet Mellegue</u>      | Algeria      | 2018 |
| <u>Lewis Creek reservoir</u> | USA          | 2019 |

Det kan utan tvekan sägas att pianotangentutskov är en innovation inom hydraulisk design. För fri avbördning över ett pianotangentutskov beror avbördningsförmågan huvudsakligen på dess geometriska layout och fallhöjd över krönet. Vid medelhöga och höga vattenföringar är fallande strålars beteende av intresse och bör också beaktas i utformningen. Andra relaterade frågor inkluderar energiomvandling, drivgods och isbildning.



## 2 Syfte och mål

Projektet avser att uppnå följande syften:

- Litteraturgenomgång för att kartlägga *state-of-the-art* inom forskning och design av både labyrint- och pianotangentutskov;
- Spridning av kunskap till branschkollegor;
- Med hänsyn till svensk anpassning föreslå förbättrade/modifierade PKW-layouter för effektiv avbördning.

## 3 Labyrintutskov

**I detta kapitel beskrivs hydrauliska aspekter av det klassiska labyrintutskovet som vidareutvecklas till det mer gynnsamma pianotangentutskovet.**

### 3.1 HISTORIK

Beteckningen labyrintöverfall avser historiskt triangel- och trapetsformade utseenden av överfall. Gentillini (1941) utförde på 40-talet den tidigaste experimentella studien av labyrintöverfall. Knappt tre decennier senare gjorde Taylor (1968) och Hay and Taylor (1970) modellstudier, med syftet att generera data för praktiska tillämpningar. Darvas (1971) använde resultaten från studier av hydrauliska modeller (Avon- och Woronora-utskov) för att utöka teorin och utvecklade en familj av kurvor för att utvärdera labyrintöverfalls egenskaper. Sedan utförde USBR också några studier av labyrintöverfall; anledningen var att Ute-dammens utskovsdimensioner överskred tillämpningsområdet från Taylors studie (Houston 1982). En översikt över de av USBR utförda testerna ges i Lux and Hinchliff (1985). Sedan 80-talet har väldigt många undersökningar utförts, vilket ger vägledning till bättre utformning av labyrintöverfall och även pianotangentöverfall.

Enligt Lux et al. (2006) och Paxon et al. (2013) har drygt 100 sådana överfallsutskov med åren byggts i USA. I vårt grannland Norge finns det cirka 10 st och ett nytt håller på att testas hos *NTNU* i Trondheim. Jämfört med ett konventionellt rakt överfallsutskov är labyrintöverfallet ett mycket mer effektivt sätt att öka avbördningskapaciteten. De kan anpassas till platsspecifika krav för att avsevärt öka avbördningsförmåga, förbättra översvämningsskydd tack vare lägre uppströmsvattenstånd och erbjuda ytterligare lagring av vattenvolym. Dessa "3D"-utskov ger också passiv magasindrif, högre tillförlitlighet, effektiv energiomvandling, kontrollerad luftinblandning och önskvärd estetik. Hydrauliska optimeringar styrs vanligtvis av projektekonomi och byggbarhet. Labyrintöverfall är särskilt väl lämpade för applikationer där det är fördelaktigt att minimera bredden på bräddavloppet.

I Falveys bok "*Hydraulic design of labyrinth weirs*" (Falvey 2003) behandlas olika hydrauliska aspekter av labyrintöverfall. Det är den första bok som går igenom grundläggande aspekter av denna typ av utskov. En omfattande översikt ges senare i doktorsavhandlingen "*Labyrinth weirs*" av Crookston (2010) över den hydrauliska utformningen av labyrintutskov. Han presenterar en grundlig historik om dess forskning och design, inklusive beräkningsmetoder, många fallstudier och en omfattande bibliografi över forskningspublikationer för utskovstypen. Crookston:s resultat har sammanfattats och publicerats i Crookston och Tullis (2013a, b) och Crookston och Tullis (2012a, b, c).

### 3.2 AVBÖRDNING OCH PÅVERKANDE PARAMETRAR

Vattenförling över ett labyrinthöverfall är en funktion av dess geometriska konfiguration och flödesförhållanden, ofta uttryckt som

$$Q = f(H_T, H_d, L, \alpha, l, w, P, B, t, g, \nu, \text{inströmning, krönform, ytråhet m. m.})$$

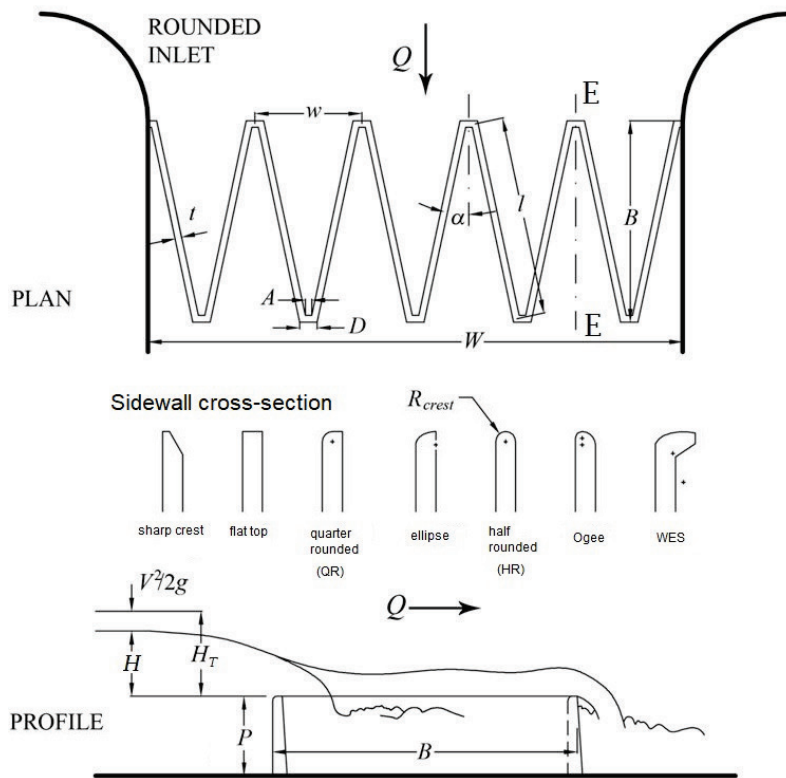
där  $H_d$  = nedströmsvattenstånd och  $\nu$  = vattens kinematiska viskositet. Övriga parametrar definieras enligt figur 3.1. Sambandet mellan vattenförling och överfallshöjd beskrivs ofta av

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d L H_T^{1,5}$$

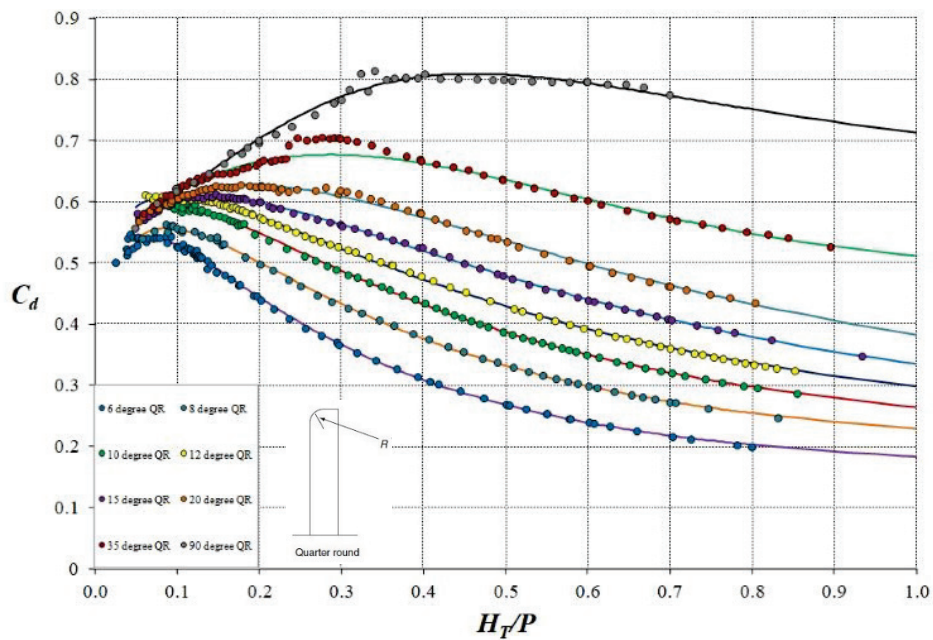
där  $C_d$  = dimensionslös avbördningskoefficient, vilken ofta bestäms med hjälp av modellförsök eller numerisk beräkning.

De försök som Crookston (2010) utfört presenteras nedan för att illustrera de dominerande parametrar som påverkar avbördningen. En av de uppsättningar av modellförsök som undersökts visas i figur 3.1 och avser ett trapetsformat labyrinthöverfall. För den kvartscirkelformade respektive halvcirkelformade krönformen sammanställs försöksresultaten av avbördningskoefficient ( $C_d$ ) i figur 3.2. Av diagrammen framgår att  $C_d$ , som en funktion av överfallshöjden  $H_T$ , avtar med en ökning av  $H_T$ . Den är också starkt beroende av  $\alpha$  (vinkeln mellan sidoväggarna är  $2\alpha$ ). Med en större  $\alpha$  blir sidoväggens längd ( $l$ ) kortare, vilket leder till lägre avbördningskapacitet.

Skillnaden i hydraulisk effektivitet mellan de kvarts- och halvruna kröntyperna diskuteras av Crookston och Tullis (2013a). Den senare är hydrauliskt mer effektiv än den förra vid låga  $H_T/P$ -värden, vilket beror på förmågan hos den halvruna krönformen att förbli fäst vid krönprofilens nedströmsdel. Vid högre  $H_T/P$ -värden kommer strålen så småningom att separeras från krönets nedströmsdel och de beter sig på ett liknande sätt.

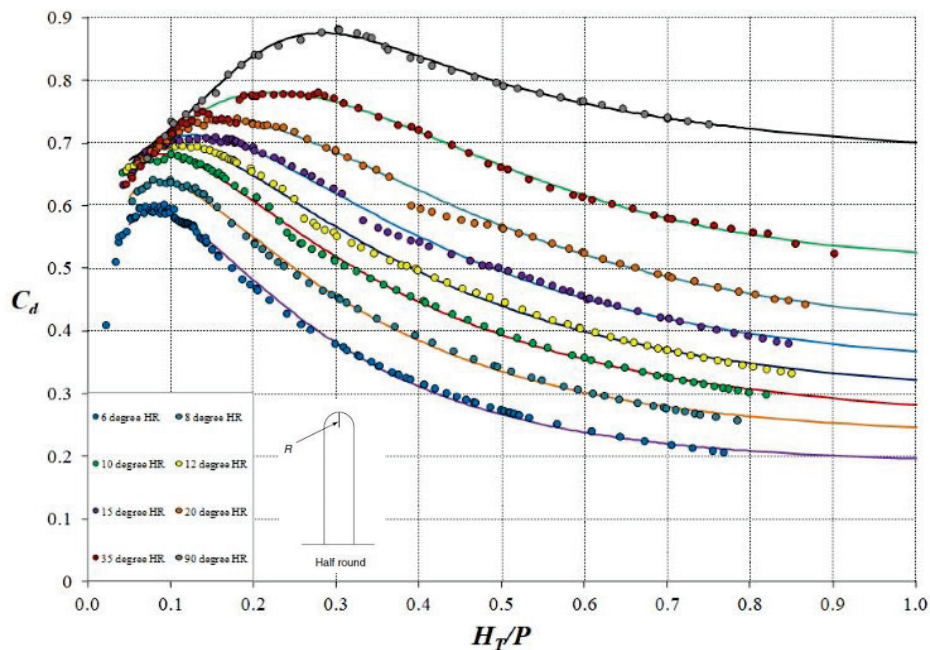


Figur 3.1 Labyrintöverfall – geometri, vattenytprofil och parameterdefinition (reviderat från Crookston 2010).



$C_d$  versus  $H_T/P$  for quarter-round trapezoidal labyrinth spillways

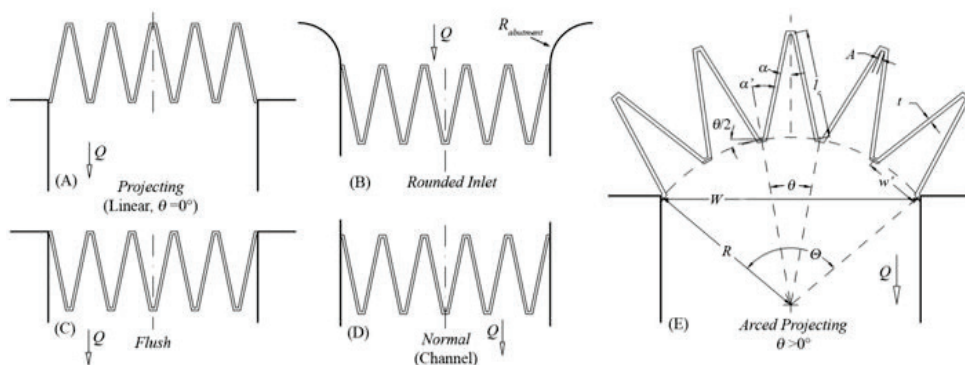
(a)



$C_d$  versus  $H_T/P$  for half-round trapezoidal labyrinth spillways  
(b)

Figur 3.2 Samband mellan  $C_d$  och  $H_T/P$  för trapetsformat labyrintöverfall. (a) kvarts-cirkeformat, (b) halvcirkeformat (Crookston 2010).

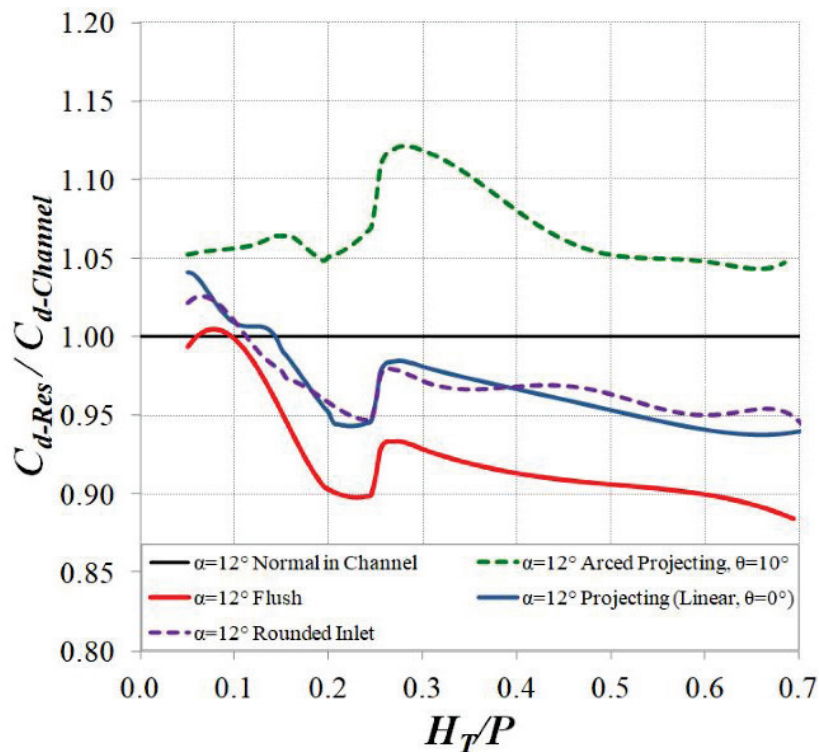
Crookston och Tullis (2021b) undersökte effekterna av reservoargeometrier på avbördningskapaciteten. Fem olika layouter som testades visas i figur 3.3. Resultaten illustreras i figur 3.4, i vilket en placering i rak kanal behandlas som referens med  $C_{d-Res}/C_{d-Channel} = 1,0$ . De visar att för samma geometriska parametrar ( $W, l, t, \alpha, A$ ) hos labyrintöverfall avbördar en gynnsam layout 5%–10% mer vatten, medan en mindre gynnsam layout leder till 5%–10% lägre kapacitet.



Crookston and Tullis (2012b) reservoir geometries: (A) *Projecting*, (B) *Rounded Inlet*, (C) *Flush*, (D) *Normal*, and (E) *Arched*.

Figur 3.3 Labyrintöverfalls placering vid ett magasins utlopp (Crookston and Tullis 2012b).





Figur 3.4 Effekter av reservoargeometrier på avbördningsförmåga, samband mellan  $C_d$  och  $H_T/P$  vid olika  $\alpha$ -värden (Crookston & Tullis 2012b).

I figur 3.5 visas det labyrintöverfall som vid *Utah State University* testades för Lake Brazos damm samt ett foto över prototypen i drift (Crookston 2010). Det består av ett stort antal labyrintenheter som placeras tvärs över floden. Med hjälp av modellförsöken förbättrades labyrintöverfallets utformning. Man kan även se att både upp- och nedströmsändarna och krönet är avrundade för att skapa gynnsamma flödesförhållanden.



(a)





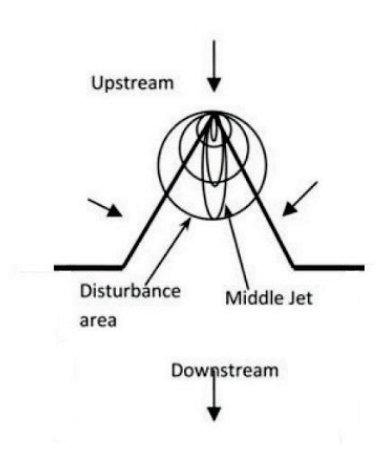
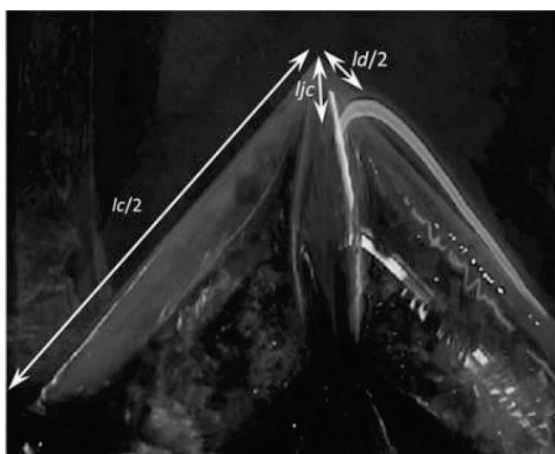
(b)

Figur 3.5 Labyrintöverfall vid Lake Brazos-dammen, Waco, Texas, USA. (a) modellförsök, (b) prototyp i drift (Crookston 2010).

### 3.3 ANDRA GEOMETRISKA ASPEKTER

Labyrintutskovets höjd (krönnivå) bestäms ofta av magasinets tillåtna vattenstånd och kan marginellt justeras. Som demonstreras av Falvey (2003), Crookston (2010) Crookston och Tullis (2012a, b, c) och Crookston och Tullis (2013a, b) är det även andra geometriska aspekter och dess kombination som påverkar avbördningen.

I modellförsök studerade Ouamane (2011) strömningsmönster och avbördning i ett triangulärt labyrintöverfall (figur 3.6). På grund av långa sidoväggar ges ofta en liten inre vinkel ( $2\alpha$ ) i uppströmshörnet som utgör en singularitetspunkt för strömningen. Störningen i utströmningen märks direkt då magasinets vattenstånd stiger och två motsatta strålar möts nedströms hörnet.

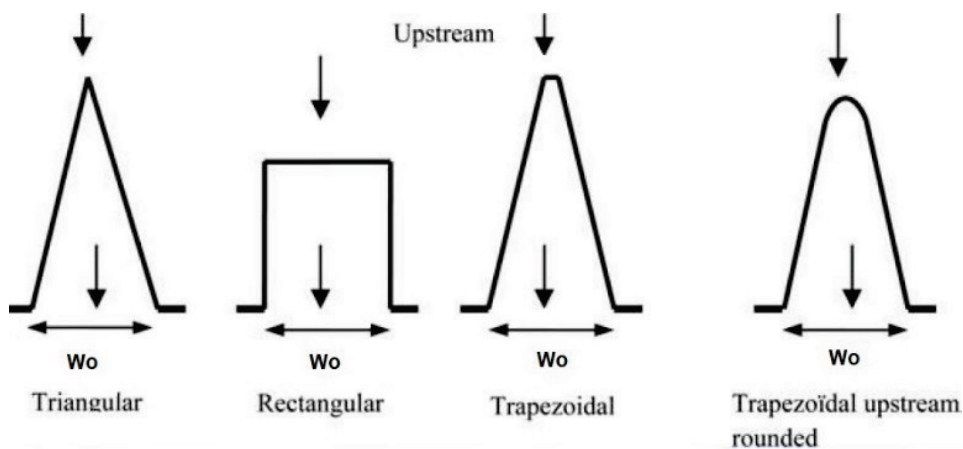


Figur 3.6 Triangulärt labyrintöverfall – strömning med störning vid överfalllets uppströmshörn (Ouamane 2011).

Säid och Ouamane (2011) och Jorgensen et al. (2021) utvärderade i sina experiment hur ett trapetsformat labyrintöverfalls uppströmsform påverkar utströmningen.

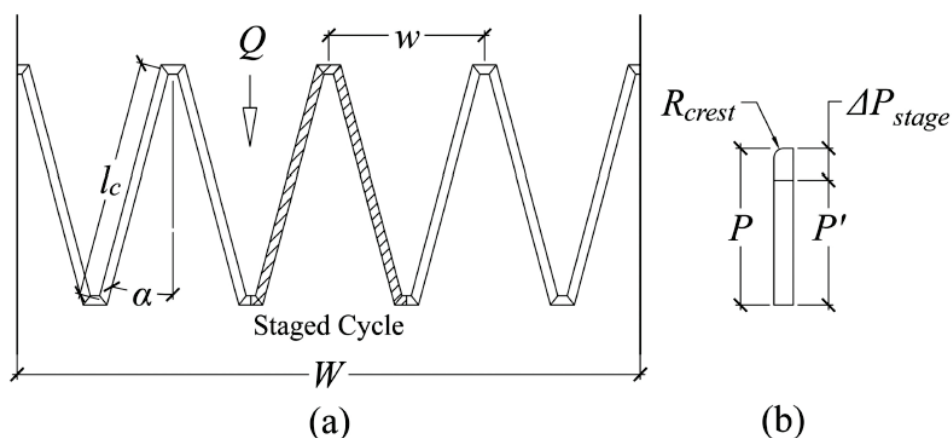
Med en trapetsform har uppströmsändan inre vinklar som är större  $90^\circ$ , vilket förbättrar utströmningssituationen. Beroende på överfallshöjd kvarstår dock viss störning.

I försöken jämförde Ouamane (2011) fyra olika uppströmsformer av labyrinthöverfall, triangulärt, rektangulärt, trapetsformat och trapetsformat med rundad uppströmsända (figur 3.7). Det konstaterades att det trapetsformade överfallet gav bättre ekonomi och hydraulik, speciellt om uppströmsändan är rundad. I denna studie var det rektangulära överfallet inte optimerat och det tas med endast som ett alternativ för jämförelse.



Figur 3.7 Labyrinthöverfalls konfigurationer undersökta av Ouamane (2011).

I en studie av Dabling & Tullis (2013) undersöktes ett trapetsformat labyrinthöverfall med differentiella krönnivåer (*staged weir*) (figur 3.8). På så sätt kan avbördningen vid olika uppströmsvattenstånd kontrolleras efter behov.



Labyrinth weir design parameters in plan (a) and elevation (b).

Figur 3.8 Labyrinthöverfalls labyrinthöverfall med differentiell krönnivå (Dabling & Tullis 2013).

Sammanfattningsvis kan man säga att, jämfört med ett traditionell rakt överfall, har ett labyrinthöverfall större förmåga att avbörda vatten vid samma

uppströmsvattenstånd. Det är flera geometriska parametrar som påverkar avbördningen och dessa inkluderar krönlängd, krönform i tvärsnitt, vinkeln mellan sidoväggar och uppströmsnosens utseende. En nackdel hos labyrinthutskov är att om utrymmet längs dammlinjen är begränsat kan det krävas att det anläggs en längre bottenplatta i strömriktningen.

## 4 Pianotangentutskov

**I detta kapitel behandlas pianotangentutskov med överhäng och dess hydrauliska egenskaper. Det diskuteras hur geometrier kan modifieras för att öka avbördningsförmågan.**

### 4.1 UTVECKLING AV PIANOTANGENTUTSKOV

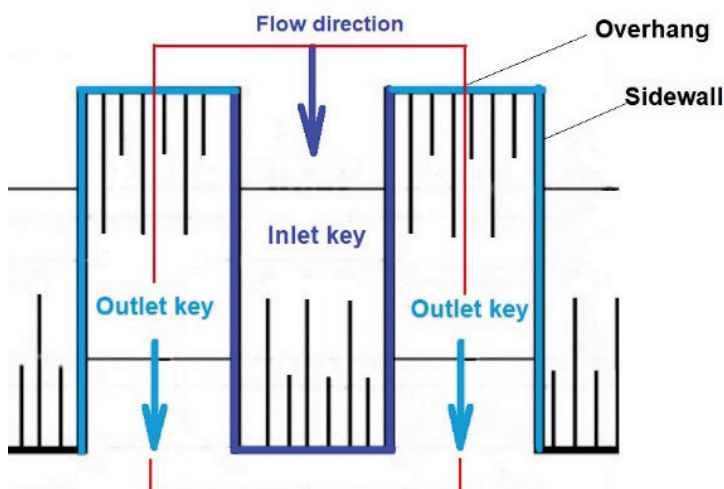
Pianotangentutskov (PKW) är en innovativ struktur som kan avbörda mycket hög vattenföring per breddmeter. Det är en variant av det traditionella labyrintutskovet och utformas ursprungligen för att motverka vissa av dettas nackdelar (Barcouda et al. 2006). Genom att använda en rektangulär layout och lutande botten skapas överhängande eller fribärande spetsar, vilket gör att PKW är strukturellt enkelt och effektivt och kan placeras på befintliga eller nya gravitationsdammar. Vid samma uppströmsvattenstånd i magasinet ökar avbördningskapaciteten flerfaldigt jämfört med ett rakt överfallsutskov med liknande bredd i dammen. Lämpligt projekterat avbördar det även mer vatten än ett labyrintutskov med jämförbar geometri.

Med erfarenheter från labyrintöverfall föreslog Lempérière och Ouamane (2003) med hjälp av modellförsök pianotangentöverfall för första gången år 2003. Den första prototypen byggdes 2006 av EDF vid Goulours-dammen. Sedan dess har över 35 sådana utskov byggts i olika delar av världen.

Tack vare sin förmåga att effektivt avbörda vatten har det funnits stort intresse från både den akademiska världen och vattenkraftbranschen. Förutom workshops har tre internationella konferenser hållits för att behandla dess hydrauliska design och avrapportera tillämpningar i olika projekt (PKW 2011 i Belgien; PKW 2013 i Frankrike; PKW 2017 i Vietnam). Syftet med konferenserna var att bl.a. få en bättre förståelse av hydrauliska egenskaper och samtidigt att utröna potential och möjligheter till förbättring.

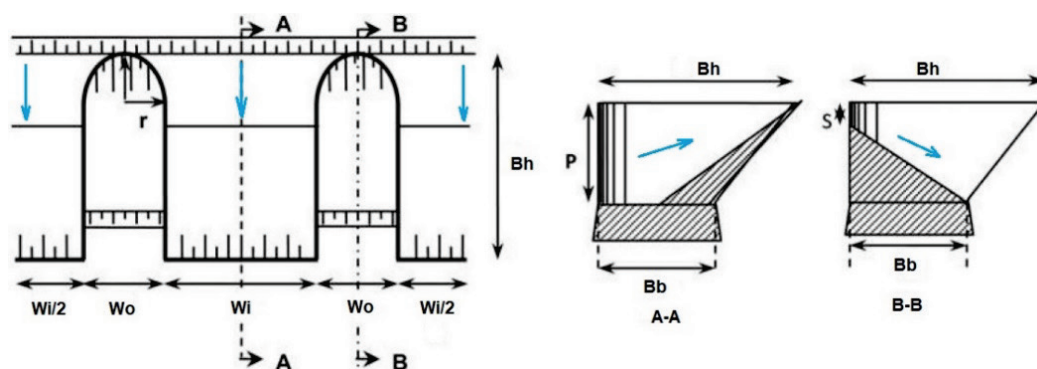
### 4.2 TYPER AV PIANOTANGENTUTSKOV OCH TERMINOLOGI

Som illustreras i figur 4.1 förses ett typiskt pianotangentutskov ofta med överhäng både upp- och nedströms. Det består av inloppstangent (*inlet key*), utloppstangent (*outlet key*) och sidovägg (*sidewall*), en beteckning som samtliga använder. Med en enhet eller cykel menas ofta en inloppstangent och två halvor av utloppstangenter (inom det rödmarkerade området). Ett utskov består ofta av ett (stort) antal likadana enheter.



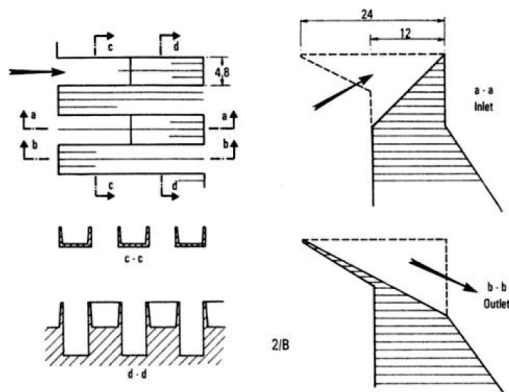
Figur 4.1 Beteckning av pianotangentöverfall – inloppstangent, utloppstangent, överhäng och sidovägg.

Ett labyrinthöverfall har vertikala väggar. Ett sätt att förlänga överfallskrönet är att göra inloppets nedströmsdel lutande. Detta undersöktes först av *NGO Hydrocoop* 1998 vid laboratoriet *EDF-LNH*, Frankrike, och demonstrerades i modellförsök av Ouamane (2011) (figur 4.2). I detta fall blir fundamentets längd ( $Bb$ ) i strömningsriktningen mindre och sidoväggarnas längd ( $Bh$ ) blir större tack vare den överhängande nedströmsdelen. Valet av denna utskjutande form kan är fördelaktigt för energiomvandlingen.



Figur 4.2 Pianotangentöverfall med nedströmsöverhäng. Inloppets nedströmsdel görs lutande för att öka avbördning (reviderat från Ouamane 2011).

Ett annat sätt är att ha en vertikal nedströmsvägg och istället utforma uppströmsdelen som utskjutande (figur 4.3) (Lempérière & Ouamane 2003, Schleiss 2011). Ofta kan man utforma utloppstangenter för att anpassa utströmningen och underlätta energiomvandlingen. Figur 4.4 visar pianotangentutskovet vid Bakhada-dammen, Algeriet (Lempérière et al. 2011).

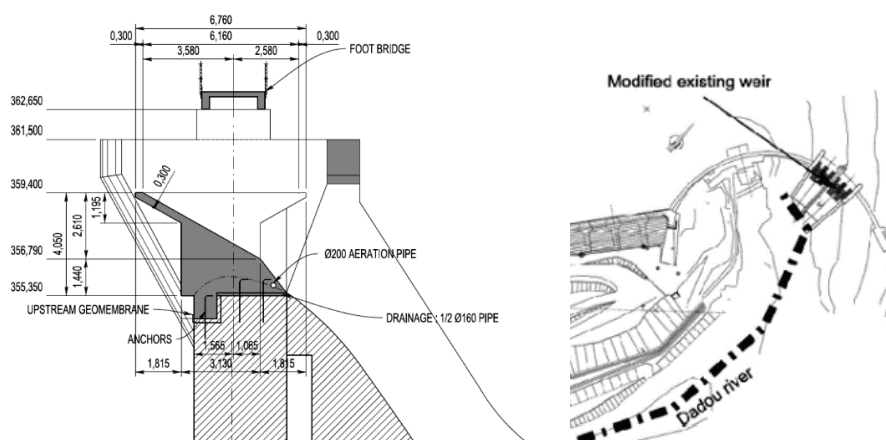


Figur 4.3 Pianotangentöverfall med uppströmsöverhäng (Lempérière & Ouamane 2003).



Figur 4.4 Pianotangentöverfall med uppströmsöverhäng vid Bakhada-dammen (45 m hög), Algeriet (Lempérière et al. 2011).

För att öka driftsäkerheten har EDF byggt om avbördningsanordningen vid Rassise dammen (Bail et al. 2013). Bl.a. ersatte man ett befintligt överfall i valvdammen med ett pianotangentutskov med endast uppströmsöverhäng (figur 4.5). Botten i utloppstangenten utformades på ett sådant sätt att utflödet följer befintlig skibordsprofil och nuvarande energiomvandlare vid dammtån kunde därför användas.



Design of the PKweir on top of the arch dam.

Figur 4.5 Pianotangentöverfall med uppströmsöverhäng i Rassise-dammen, Frankrike (Bail et al. 2013).



Man brukar dela upp pianotangentutskov i fyra typer (Epicum et al. 2013) (figur 4.6):

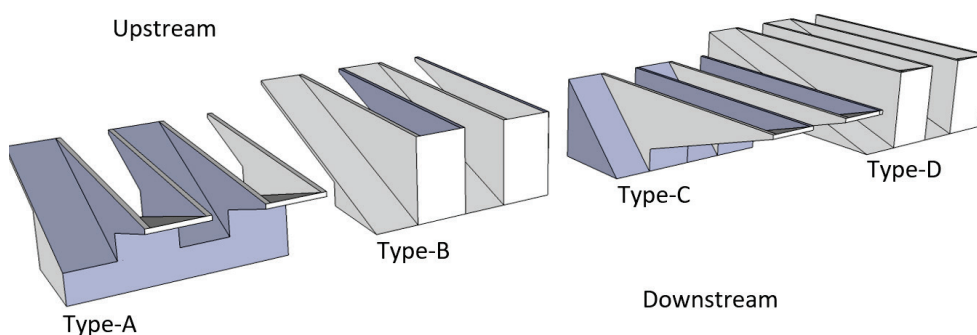
typ A – med överhäng både upp- och nedströms;

typ B – med överhäng uppströms (vertikal nedströmssida);

typ C – med överhäng nedströms (vertikal uppströmssida) och

typ D – med samtliga sidor vertikala.

Till skillnad från labyrintutskov är botten i både inlopps- och utloppstangenter lutande.



Figur 4.6 Uppdelning av pianotangentöverfall i fyra typer (Epicum et al. 2013).

Geometrin hos pianotangentöverfall involverar flera geometriska parametrar än hos labyrintutskov och kan tyckas vara komplex. För att förenkla beteckningar används ofta en gemensam nomenklatur i branschen, se i figur 4.7 (Pralong et al. 2011).

$W_i$  = inloppsbredd;

$W_o$  = utloppsbredd;

$T_s$  = sidoväggstjocklek;

$P_i$  = inloppshöjd;

$P_o$  = utloppshöjd;

$B_b$  = bottenlängd i strömriktningen;

$B_i$  = krönlängd av inloppets överhängande del;

$B_o$  = krönlängd av utloppets överhängande del;

En sidoväggs längd  $B_h = B_i + B_o + B_b$ .

För en enhet (cykel) gäller

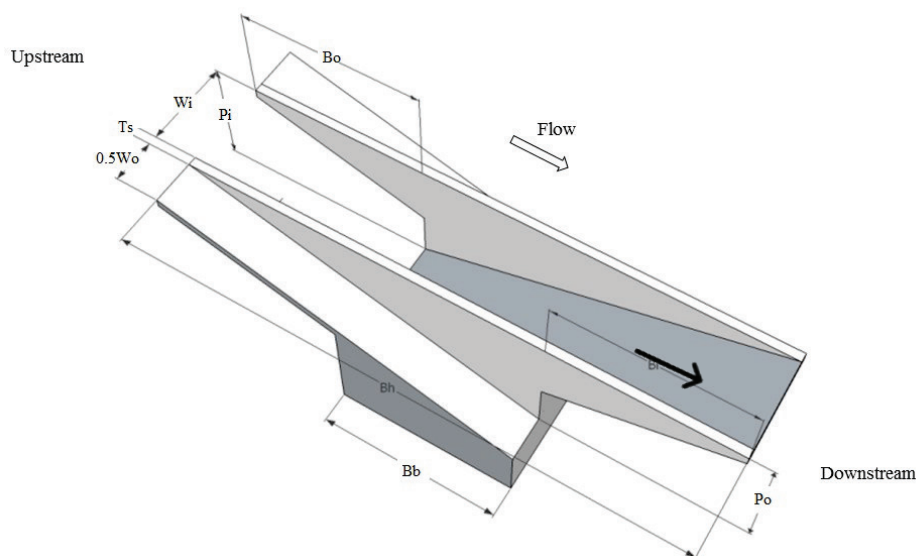
Enhetens bredd  $W_u = W_i + W_o + 2 \cdot T_s$ ;

Enhetens krönlängd  $L_u = W_u + 2 \cdot B_h$  (ofta kallas utvecklade krönlängd)

För ett pianotangentöverfall bestående av  $N$  identiska enheter gäller

Total överfallsbredd  $W = N \cdot W_u$ ;

Total (utvecklad) krönlängd  $L = N \cdot L_u$ .



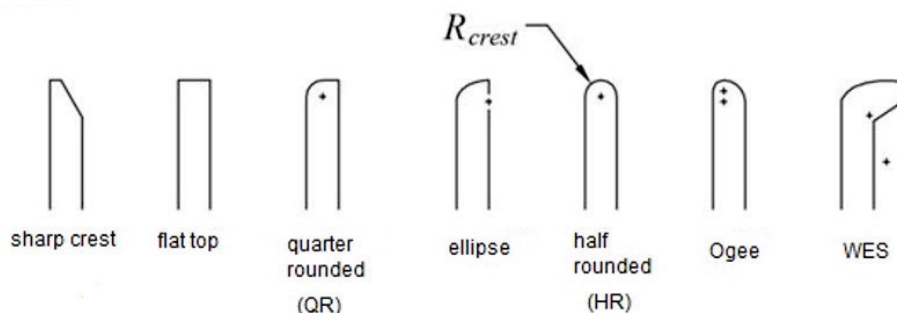
Figur 4.7 Pianotangentutskov – parameterdefinition.

### 4.3 AVBÖRDNING OCH STYRANDE PARAMETRAR

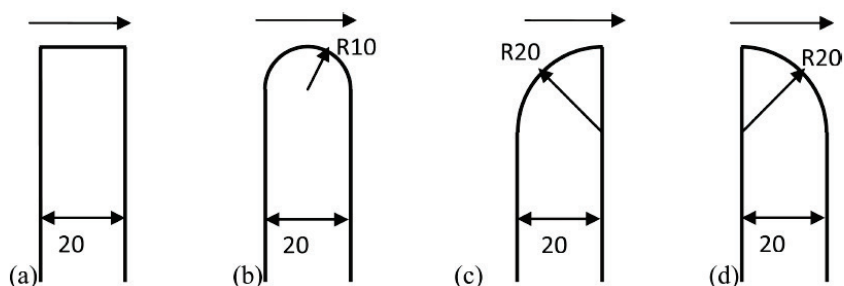
För en given typ av pianotangentutskov utvärderas ofta dess configuration med hjälp av hydrauliska modellförsök. CFD utförs också i vissa projekt men är inte lika vanligt. Bottenplattans längd i strömriktningen ( $B_b$ ) är ofta förutbestämd i stabilitetsanalysen och det finns begränsat utrymme att ändra på den. Maximala längder på de överhängande delarna ( $B_i$  och  $B_o$ ) styrs till viss mån också av överfallens stabilitet. Eftersom flödet i inloppstangenten utövar en enorm vertikal kraft är  $B_i$  och  $B_o$  ofta jämförbara med  $B_b$ .

#### 4.3.1 Krönform i tvärsnitt

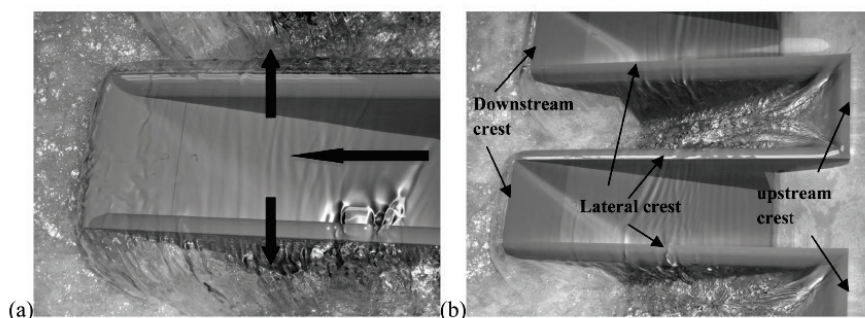
Parametrar som ofta undersöks i modellförsök inkluderar  $B_i$  och  $B_o$ ,  $P_i$  och  $P_o$  (ofta  $P_i = P_o = P$ ), samband mellan  $W_i$  och  $W_o$  och krönets form. I tester av labyrinthöverfall undersökte Crookston & Tullis (2011, 2013a) hur olika krönformer i tvärsnitt påverkar avbördningen (figur 4.8). Detta ger ledtrådar i utvärderingen också av pianotangentutskov. I modellförsök av Cicero & Delisle (2013) testades flera tvärsnitt av krönet (figur 4.9).



Figur 4.8 Pianotangentutskov – krönets tänkbara tvärsnittsform.



Shapes (dimensions in mm) of the lateral crest: flat-topped (a), half-rounded (b), upstream quarter-rounded (c) and downstream quarter-rounded (d).



Lateral crest with the upstream quarter-rounded (a) and the downstream quarter rounded (b).

Figur 4.9 Pianotangentutskov – krönformer i tvärsnitt undersökta av Cicero & Delisle (2013). (a) rektangulärt, (b) halvcirkelformat, (c) kvartscirkelformat uppströms och (d) kvartscirkelformat nedströms.

Samtliga analyser bekräftade följande slutsatser.

- (1). Krönformen, oavsett om den är platt eller rundad, påverkar avbördningskapaciteten men dess effekt minskar med en ökande överfallshöjd.
- (2). Effekten av krönformen är mest uppenbar vid små överfallshöjder. Jämfört med det platta krönet ligger ökningen i avbördning med de rundade formerna inom intervallet 10%–20%, vilket främst tillskrivs den fallande strålens beteende. De halvrundade och kvartsrundade formerna ger bättre hydraulisk prestanda än den platta. Denna aspekt beskrevs av Falvey (2003) och nämns även i nästa kapitel då luftinblandning diskuteras.
- (3). Vid stora överfallshöjder blev skillnaderna mellan de olika formerna försumbara. Viss skillnad torde finnas men det är svårt att kvantifiera med tanke på mätutrustningsnoggrannhet.

#### 4.3.2 Nosform under uppströmsöverhäng

En annan aspekt är nosens utformning under uppströmsöverhänget. Istället för en platt eller rektangulär form används ofta en triangulär eller en halvcirkelformad nos för att reducera sidokontraktionen och förbättra inströmningen in i inloppstangenterna (Anderson & Tullis 2013). Figur 4.10 visar nosar vid Escouloubre-dammen (Epicum et al. 2013). En liknande utformning byggdes också i Goulours pianotangentutskov (Laugier et al. 2013, Laugier & Vermeulen 2017).

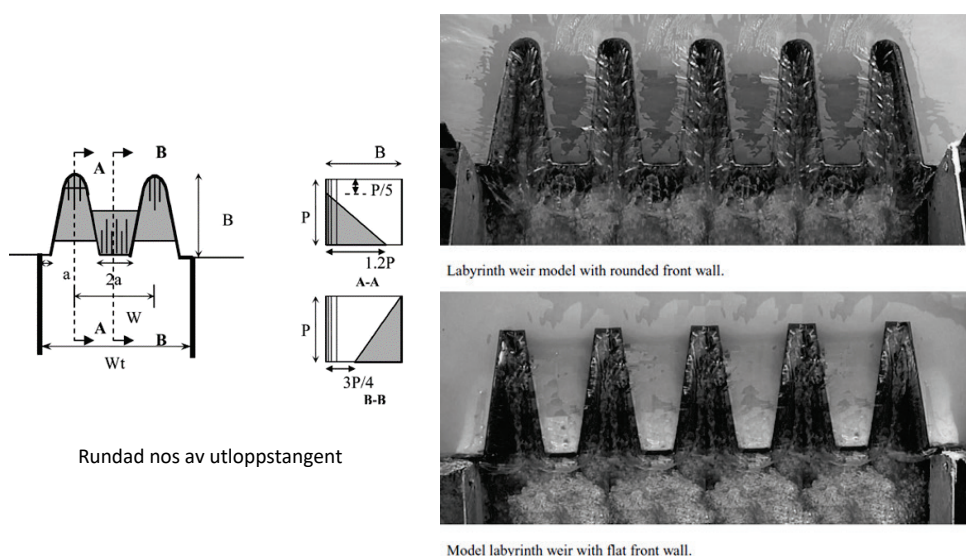


Figur 4.10 Pianotangentutskov vid Escouloubre-dammen, EDF – triangulära nosar under uppströmsöverhäng (Epicum et al. 2013). (a) modell (foto HECE-ULiege) och (b) prototyp (foto EDF).

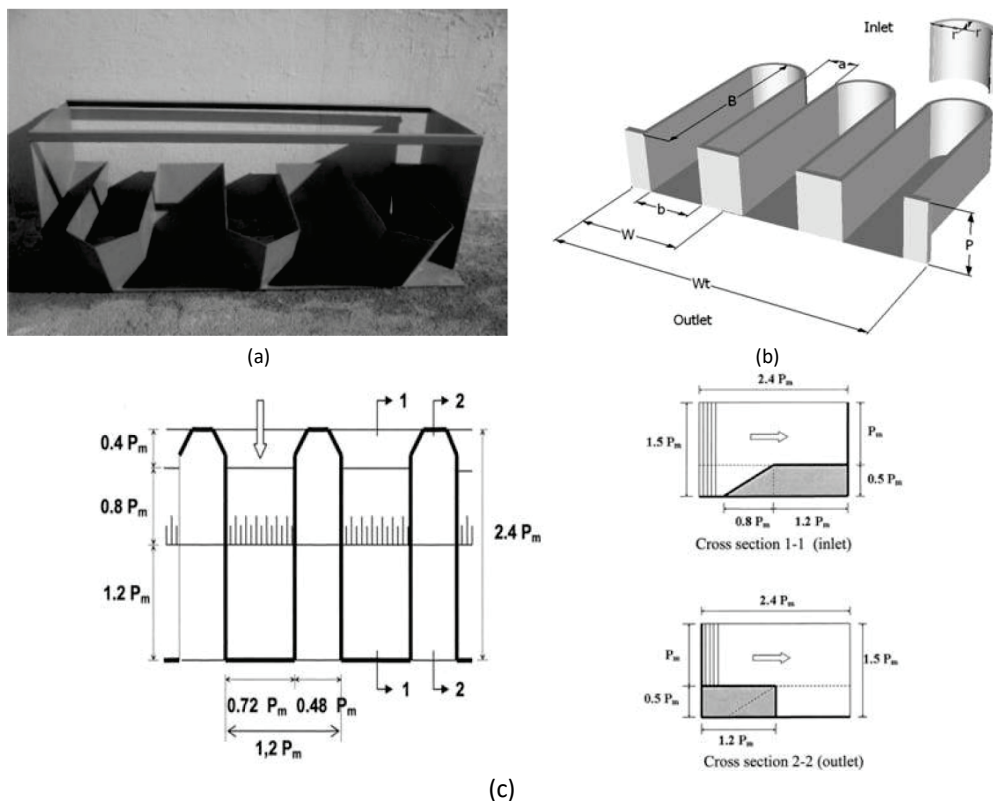
### 4.3.3 Frontform av uppströmsöverhäng

Formen hos uppströmsfront för utloppstangenter är alltid ett objekt för laboriestudier, vilket delvis kan jämföras med pelare i ett konventionellt ytutskov. Utloppstangenten påverkar strömningen uppströms och dess form påverkar som förväntat avbördningskapaciteten.

Flera studier har utförts det senaste decenniet, både som ren teoretisk undersökning och även i samband med praktiska tillämpningar (figurer 4.11 och 4.12) (Ouamane 2013, Belaabed & Ouamane 2013), Saïd & Ouamane 2011), Belaabed & Ouamane 2011), Lempérière et al. 2011). Dessa inkluderar platt, rundad, triangulär och trapetsformad utformning. Strömlinjeformade nosar underlättar inströmningen in i inloppstangenten. Jämfört med den platta formen ger dessutom andra mer gynnsamma former någon extra krönlängd, vilket påverkar avbördningskapaciteten positivt.



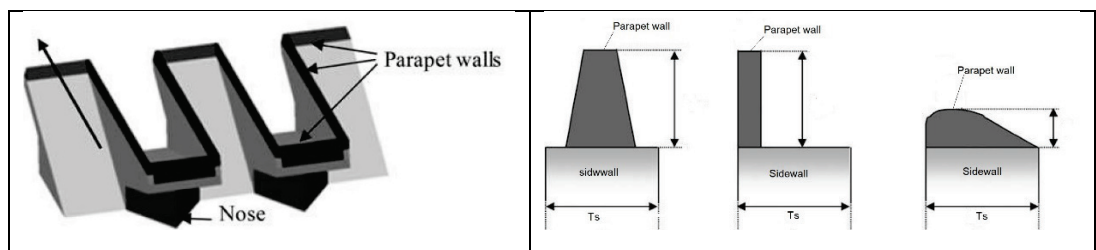
Figur 4.11 Laboratorieundersökning av effekter av frontform hos utloppstangent (Ouamane 2013).



Figur 4.12 Pianotangentutskov – utloppstangentens frontform. (a) Belaabed & Ouamane (2013), (2) Saïd & Ouamane (2011) och (c) Belaabed & Ouamane (2011) och Lempérière et al. (2011).

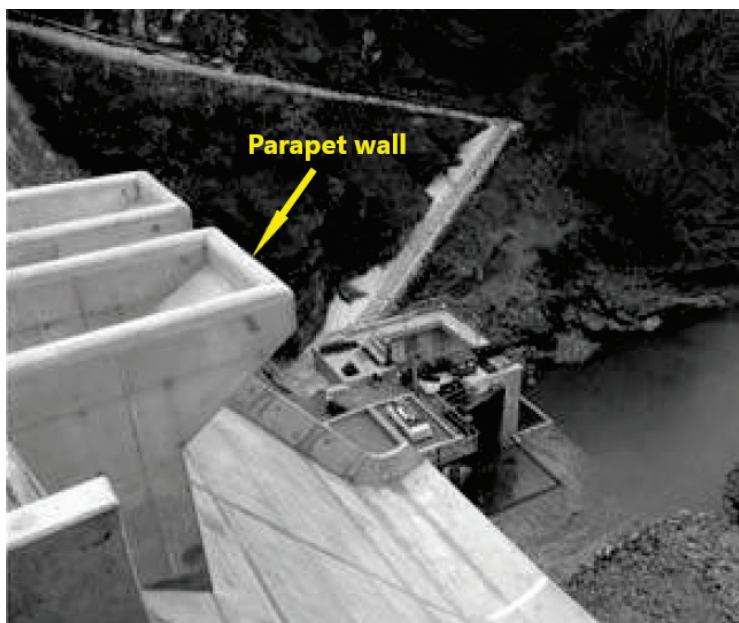
#### 4.3.4 Effekt av parapet

I flera studier undersöks effekterna av en parapet på överfallskrönet (Pralong et al. 2011, Vermeulen et al. 2011, Anderson & Tullis 2013). Genom att bibehålla samma höjd på pianotangentöverfallet ( $P = \text{konstant}$ ) sänks krönnivån, och en parapet, vars höjd motsvarar sänkningen, läggs till på krönet. På detta sätt blir bottenlutningsvinklarna i bägge tangenterna något mindre (figurer 4.13 och 4.14).



Figur 4.13 Pianotangentutskov med parapet på krönet (Pralong et al. 2011).





Figur 4.14 Pianotangentutskov vid L'Étroit-dammen med 0,5 m hög parapet (Vermeulen et al. 2011).

Studierna visar att vattenföringen, genom att den översta delen av överfallet ersätts med en parapet, ökar vid samma uppströmsvattenstånd (överfallshöjd). Detta beror sannolikt på en ökning av vattenvolymen i både inlopps- och utloppstangenter som resulterar i en minskning av energiförlust i inloppstangenten och en motsvarande minskning av påverkan från utströmningen i utloppstangenten.

#### 4.3.5 Geometriska förhållanden

Under det senaste decenniet har många studier bidragit till optimeringen av pianotangentutskovens geometri för att åstadkomma effektiv avbördning. De geometriska parametrar som huvudsakligen styr avbördningskapacitet kategoriseras enligt följande (Lempérière et al. 2011, Machiels et al. 2011a):

- Krönets längd/bredd-förhållande  $L/W$  eller  $L_u/W_u$ . Detta förhållande representerar den utvecklade längden och är en dominerande faktor, speciellt vid låga överfallshöjder.
- Tangenters breddsförhållande  $W_i/W_o$ . Ett högt värde förbättrar, å ena sidan, inströmningstillståndet och ökar inflödet till inloppstangenten och kan, å andra sidan, förhöja nedströmsvattenståndet i utloppstangenten och förstärka motdämningseffekten som negativt påverkar avbördningen.
- Höjd/bredd-förhållanden  $P/W_u$ . Det påverkar inströmningstillståndet och inflödet till inloppstangenten. Ett högt värde minskar motdämningseffekten i utloppstangenten.
- Sidoväggstjocklek  $T_s$ . En tjock sidovägg minskar avsevärt det tillgängliga utrymmet för krönet. Den kan påverka avbördningen upp till 10%–15% för en överfallsenhet.

Avbördningen är beroende av följande kombinerade effekter: lokala överströmningsbeteenden över krönet, utvecklade krönlängd ( $L$  eller  $Lu$ ) och överfallshöjd ( $H_T$ ). Ouamane & Lempérière (2006) och Leite Ribeiro et al. (2012a) visade att längd/bredd-förhållandet  $Lu/Wu$  är huvudparametern som styr avbördningen. Ett värde på  $Lu/Wu = 5,0$  verkar vara en rimlig kompromiss mellan överfallens effektivitet och strukturkomplexitet. Pfister et al. (2012) undersökte  $Lu/Wu$ -förhållandet för befintliga pianotangentutskov och de varierar från 4 till 8. Machiels (2012) och Machiels et al. (2011a, b, 2012a, b, 2014) identifierade  $P/Wu$ ,  $Wi/Wo$  och  $Bo/Bi$  som de huvudsakliga geometriska parametrarna som, för ett givet  $Lu/Wu$ -förhållande, påverkar den hydrauliska effektiviteten.

Dessa studier påvisar att det är tillrådligt att förse ett överfall med höga värden på  $Lu/Wu$ ,  $Wi/Wo$  och  $Bo/Bi$ , vilket fördelaktigt förstör inloppstangentens tvärsnitt. En ökning av tvärsnittet reducerar strömningshastigheten längs krönet och ökar därmed dess effektivitet. Vid  $Lu/Wu = 5,0$  presenterade Machiels (2012b) en överfallsdesign med  $P/Wu = 1,30$ ,  $Wi/Wo = 1,25$  och  $Bo/Bi = 3,0$  som ger högst avbördningskapacitet. Detta resultat överensstämmer med resultaten framtagna av Leite Ribeiro et al. (2012a), Anderson & Tullis (2013) och Lempérière et al. (2011). Anderson och Tullis (2013) visade, i modellförsöken, att det optimala  $Wi/Wo$ -intervallet för att maximera avbördningen sannolikt ligger inom det ungefärliga intervallet 1,25–1,50. Förhållandet  $Wi/Wo > 1,50$  har dock inte testats.

Machiels studie belyser också betydelsen av de tekniska och ekonomiska kriterierna i definitionen av en optimal design för pianotangentutskov. Ett högt  $P/Wu$ -värde (t.ex.  $P/Wu = 1,3$ ) är, ur hydraulisk synvinkel, mer effektivt och bör därför övervägas för nya projekt. Ett lågt värde (t.ex.  $P/Wu = 0,5$ ), även om det är mindre hydrauliskt effektivt, skulle vara mer praktiskt för rehabiliteringsprojekt. För de senare gäller ofta  $Wi/Wo = 1,0$  och  $Bi/Bo = 1,0$  (Ercicum et al. 2014).

Varje design av pianotangentutskov är en avvägning av de ovannämnda parametrarna. Sammanfattningsvis kan sägas att, för ett givet tillgängligt utrymme, har det mycket hög effektivitet vid låga överfallshöjder och kan ge 2 till 5 gånger så mycket avbördning som ett Ogee-överfall. Överfallsverkningsgraden avtar med ökande överfallshöjd.

#### 4.4 JÄMFÖRELSE MELLAN PKW OCH WES-UTSKOV

Mellan pianotangent- och WES-utskov görs en jämförelse, med syftet att illustrera skillnaden i avbördning om de ges samma bredd (längs dammens axel). Vattenföringen över ett pianotangentutskov kan uttryckas som

$$Q = C_L L \sqrt{2gH_T^3}$$

Denna definition är baserad på den utvecklade krönlängden  $L$ , med en motsvarande avbördningskoefficient  $C_L$  (Leite Ribeiro et al. 2012a, b). Uttrycket kan konverteras till följande form (Ouamane & Lempérière 2006, Machiels et al. 2011a)

$$Q = C_W W \sqrt{2gH_T^3}$$



vilken baseras på pianotangentutskovets bredd  $W$  och en motsvarande koefficient  $C_w$ . Som jämförelse kan flödet över ett standard WES-överfall med samma bredd  $W$  skrivas som

$$Q_s = C_s W \sqrt{2gH_T^3}$$

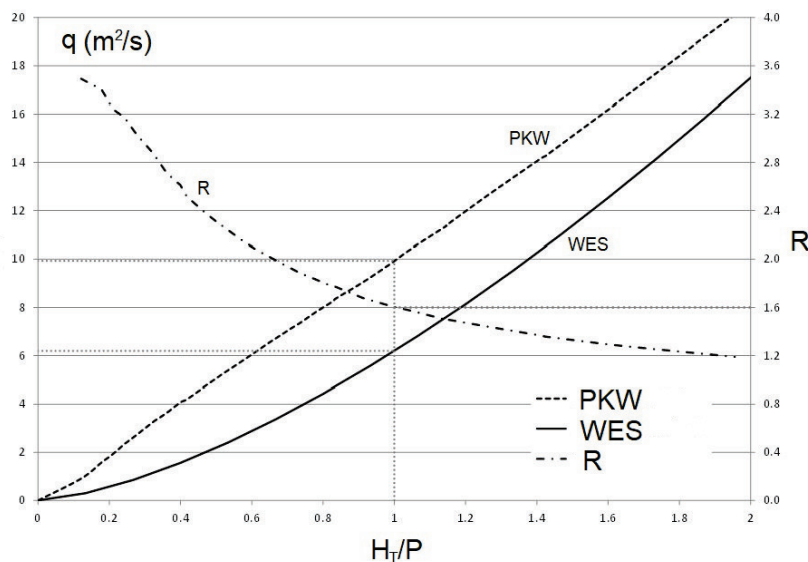
där  $C_s$  = avbördningskoefficient för WES-utskovet. Såsom definieras av Leite Ribeiro et al. (2012a, b) reflekterar förhållandet mellan  $Q$  och  $Q_s$  skillnaden i avbördningsförmåga

$$R = \frac{Q}{Q_s} = \frac{C_w}{C_s}$$

En typisk jämförelse görs av Erpicum et al. (2013) med följande parametrar. För pianotangentutskovet,  $P = P_i = P_o = 2,0$  m och  $L/W = 5,0$ . För WES-utskovet är dess profil baserad på en 2,0 m överfallshöjd och  $C_s = 0.494$ .

Resultaten visas i figur 4.15. För samma bredd är pianotangentutskovet mycket effektivare än WES-utskovet, särskilt vid låga överfallshöjder. Detta förklarar varför de flesta av befintliga pianotangentutskov har designats för ett maximalt  $H_T/P$ -värde under 1,0 (Pfister et al. 2012). Den betydande ökningen i avbördningsförmåga tillskrivs den utvecklade krönlängden som är flera gånger WES-utskovets bredd.

När det gäller ett labyrinthutskov med liknande form i plan och samma antal enheter (placerat i samma utrymme  $W$ ), är pianotangentutskovet cirka 10% effektivare vid ett överfallshöjd  $H_T$  som är lika med dess höjd  $P_i$  ( $H_T = P_i$ ), vilket visas i en studie utförd av Anderson och Tullis (2012).



Comparison of discharge per unit width between a PKW and an Ogee weir – PKW:  $P = P_i = P_o = 2$  m and  $L/W = 5$ ; Ogee crested weir: design head = 2 m,  $C_s = 0.494$  (Erpicum et al. 2013)

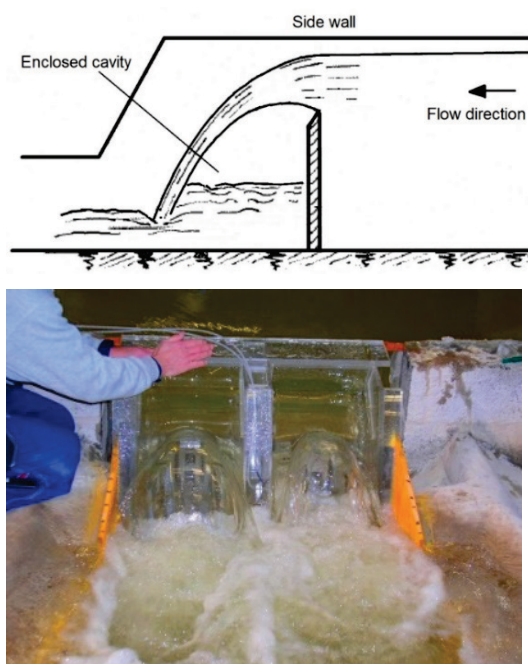
Figur 4.15 Jämförelse mellan pianotangentutskov och WES-utskov med samma bredd (Erpicum et al. 2013).

## 5 Andra aspekter hos labyrint- och pianotangentutskov

Vid projektering av ett labyrint- eller pianotangentutskov görs ansträngningar huvudsakligen för att erhålla en gynnsam geometrisk konfiguration och hög avbördningskapacitet, vilket ofta kan åstadkommas med hjälp av modellförsök. Det finns även andra hydrauliska aspekter som bör beaktas. Dessa inkluderar luftinblandning och luftmedrivning, drivgods av träd och is och även sedimenttransport.

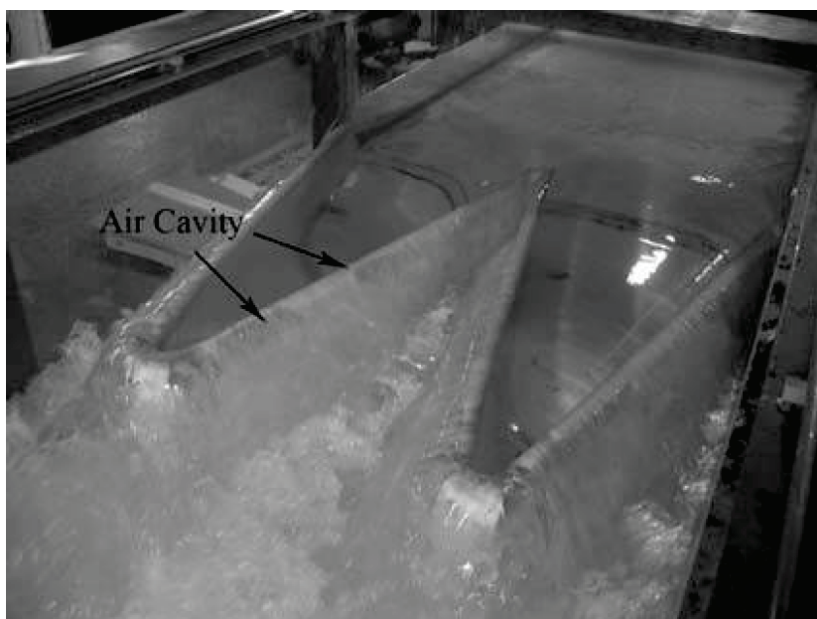
### 5.1 LUFTNINGSBEHOV

I en Froude-modell av utskov ska vattenströmningen utsättas för atmosfärstrycket i alla riktningar. Det finns dock flödessituationer där luft med ett tryck lägre än det atmosfäriska trycket är närvarande i form av ett inneslutet utrymme. Detta på grund av att luft dras in i vattnet från utrymmet om strömningshastigheten är hög och ett undertryck fås om lufttillförsel till utrymmet är begränsad. Figur 5.1 illustrerar två sådana exempel, i vilka en lufthålighet bildas bakom ett vertikalt, skarpkantat överfall omgivet av raka sidoväggar (Vermeulen et al. 2017) och inneslutna luftfickor skapas vid avbördning över strålupplyftare med luftningspassage (Teng och Yang 2018). En parallell kan dras med avbördning över labyrint- eller pianotangentutskov. Om lufthålighet bildas och utsätts för underatmosfäriskt tryck, måste Eulers modellregel uppfyllas, vilket sällan är fallet i laboratorieundersökningar.



Figur 5.1 Bildande av lufthålighet som utsätts för ett tryck lägre än det atmosfäriska trycket. (a) lufthålighet bakom ett horisontellt, skarpkantat överfall omgivet av sidoväggar (reviderad från Vermeulen et al. 2017); (b) inneslutna luftfickor vid avbördning över strålupplyftare med luftningspassage (Teng och Yang 2018).

Bildandet av lufthålighet med undertryck påverkar avbördning och utströmningsegenskaper hos labyrinth- och pianotangentutskov. Crookston & Tullis (2011) demonstrerade, i modellförsök, närvarandet av en luftficka längs hela sidoväggen av ett labyrinthöverfall (figur 5.2). Vattenstrålens beteenden är förstås nära kopplade till bl.a. strålens tjocklek (överfallshöjd) och nedströmsvattenstånd. En luftad stråle släpper igenom en viss mängd luft och reducerar undertrycket bakom. En tjock stråle bestående av s.k. *black water* skulle leda till undertryck, vilket gör att strålen fluktuerar med låg frekvens och även överfallets väggar därigenom kan vibrera.



Figur 5.2 Bildning av luftfickor med undertryck under vattenstrålen längs sidoväggen (trapetsformat labyrinthöverfall,  $\alpha = 12^\circ$ ,  $H_T/P = 0,3$ ) (Crookston & Tullis 2011).

Luftinblandning och luftmedrivning modelleras ej korrekt i en Froude-modell, som dock kan indikera eventuell lufthålighet med undertryck. Detta innebär att luftningsbehov bör undersökas vidare. I detta sammanhang brukar man utföra CFD-beräkning för att uppskatta luftningsbehov vid flöden upp till dimensionerande vattenföring. Beräkningen görs direkt i prototypdimensioner.

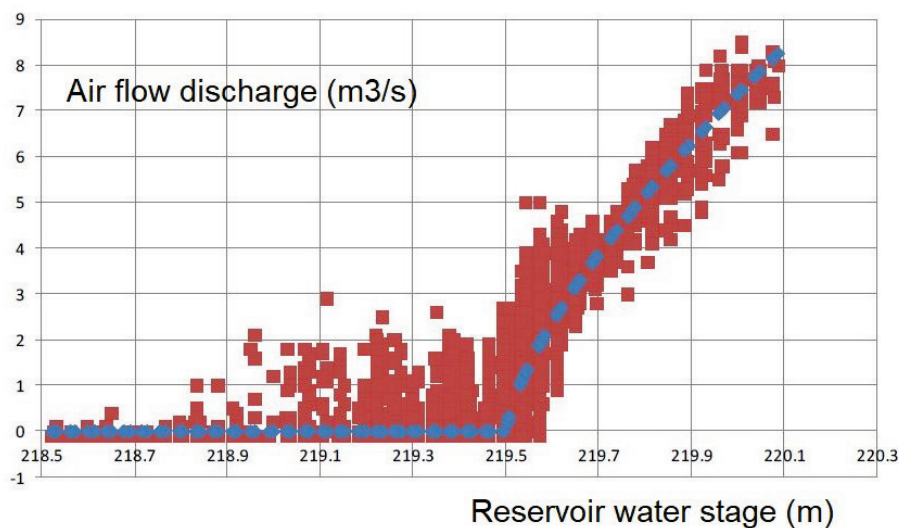
Vid rehabiliteringen av St-Marc-dammen, Frankrike, placerades ett pianotangentöverfall med en luftningsanordning på befintligt dammkrön. Två intag, vardera 0,40 m i diameter, tillförde luft från dammkrönet till under överhänget (Laugier et al. 2009, Leite Ribeiro et al. 2011).

I uppgraderingen av Malarce-dammen, Frankrike, byggdes ett långt pianotangentöverfall med 12 inloppstangenter och ett luftningssystem installerades genom hela överfallet för att undvika undertryck under bräddavloppet (figur 5.3) (Pinchard et al. 2013). Mätutrustning byggdes in i luftpassagen för att mäta lufthastigheter och övervaka luftningsbehovet.



Figur 5.3 Luftningssystem för pianotangentutskov vid Malarce-dammen (Pinchard et al. 2013).

I Malarce installerades under 2012 flera anemometrar. Sedan dess har det förekommit fler än 15 höga flöden. Preliminära mätresultat av luftflöden i luftningssystemet visas i figur 5.4 (Laugier et al. 2017). Uppenbarligen är luftflödet litet under magasinnivån +219,5 m. Över denna nivå skapas ett slutet lufthållrum med undertryck under nedströmsöverhäng och ett kontinuerligt luftflöde genereras därför i luftningssystemet.



Figur 5.4 Labyrintutskov i Malarce-dammen – mätdata av luftmängd (Epicum et al. 2017).

För att undvika strålens fluktuationer och strukturella vibrationer anlades, per default, ett luftningssystem för de flesta pianotangentutskov som EDF byggt, med ett luftningsrör som pekar mot utrymmet under nedströmsöverhänget för varje PKW-enhet. Rördiametern varierade mellan 35 och 50 cm. För att garantera säkerhetsmarginalen fanns vanligtvis två luftintag. Det antogs att luftvolymflödet var i storleksordningen 5% till 10% av vattenföringen och att luftflödets hastighet i röret inte översteg 50–100 m/s (Vermeulen et al. 2017).



EDF utförde mätningar som visar att luftningsbehovet i vissa prototyper ligger långt under nuvarande designkriterier (Epicum et al. 2017). Detta innebär att mer forskning och prototypobservationer behövs för att bättre förstå tvåfasströmningen över överfallen. Denna är nära förknippad med beteenden av fallande vattenstrålar från krönet som i sin tur är beroende av överfallshöjd.

## 5.2 DRIVGODS AV TRÄD

Drivgods, vanligtvis i form av träd, transporteras ofta i en älv under högflödessituationer, vilket kan vara problematiskt när det samlas framför utskovet (figur 5.5). Det minskar avbördningskapaciteten och ökar magasinets vattennivå. Pfister et al. (2013a, b) visade att ackumuleringen av drivgods ökade om överfallshöjden var lägre och sannolikheten för att trädstammar sköljdes över ett pianotangentöverfall ökade med ett ökande enhetsflöde. Dessa resultat bekräftades i stort sett av Merkel (2015), dock med något lägre överfallshöjd, vilket kunde förklaras av skillnaden i försökskonfigurationer. Pfister et al. (2013a, b) placerade överfallet i ett magasin, medan Merkel (2015) lade den i en smal kanal, vilket resulterade i högre uppströmshastigheter.



Figur 5.5 Beteenden av drivgods av träd vid pianotangentöverfall (Gebhardt et al. 2017).

Herbst (2016) jämförde, med avseende på ackumulering av drivgods, ett trapetsformat labyrintöverfall och ett pianotangentöverfall. Ur drift- och underhållssynpunkt var det problematiskt om träd pressades mot uppströmsöverhänget på ett pianotangentöverfall eller fastnade i inloppstangenten. Det observerades att utan uppströmsöverhäng, hölls en lägre volym av drivgods kvar av utskovet och fler träd passerade. Baserat på dessa resultat drogs slutsatsen att labyrintöverfall eller pianotangentöverfall med vertikala uppströmsändrar var fördelaktiga.

Drivgods-beteenden framför ett konventionellt utskov styrs huvudsakligen av utskovets pelare och nettobredd, vilket nästan är oberoende av överfallshöjd. Om flera träd sitter fast framför t.ex. ett WES utskov kan man knappt flytta på dem genom att höja uppströmsvattenstånd. För labyrint- och pianotangentöverfall spelar överfallskrönet i kombination med överfallshöjd en dominerande roll.

Drivgods, ofta med större längddimensioner än  $W_i$  och  $W_o$ , skall lyftas över överfallskrönet och transporteras nedströms, ej genom tangenterna.

En annan fråga är skalningen av drivgods i laborierstudier. I många tester används modellträd utan rötter och grenar. Ett typiskt exempel visas i figur 5.6a. Dessa är ofta torkade små träd och har låg densitet. I vissa tester används raka plaströr eller runda träpinnar. Detta kan ge en missvisande bild av en prototypsituation. Det finns tyvärr inte någon strikt modellregel att följa vid modelltester av drivgods. Men om prototypträden har rötter och grenar, bör modellträd efterlikna dem vad gäller trädets form, storlek och densitet (figur 5.6b). Ett träds rot- och grensystem kan ha stor betydelse för hur det beter sig framför ett överfallsutskov. Om flera träd går in i varandra och fastnar bildas då ett bröt, vilket ger ännu mer komplicerade beteenden.



(a)



Small trees used in Höljes tests, with a length of 25–50 cm and a density of 650–1000 kg/m<sup>3</sup>

(b)

Figur 5.6 Drivgods som användes i tidigare modellförsök. (a) vid försök i floden Sihl (Schmocker et al. 2013), (b) vid försök med drivgods i samband med ombyggnad av utskov vid Höljes-dammen (Yang 2013).



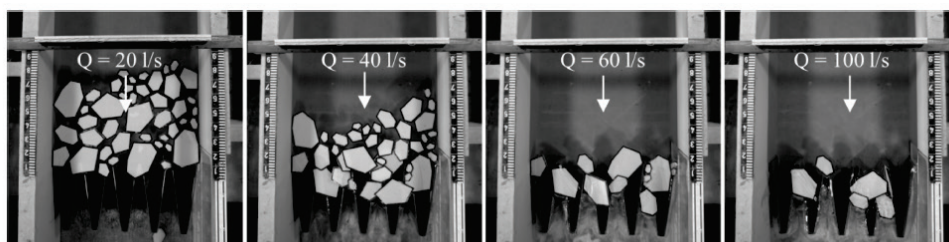
### 5.3 ISFRÅGOR

Isbildning är ett problem i kalla klimat. Istryck orsakar å ena sidan extra belastningar på utskovet (Falvey 2003). Å andra sidan blir det också problematiskt om flytande is fastnar i utloppstangenter och reducerar avbördningsförmågan. Figur 5.7 visar avbördning vintertid över pianotangentöverfallet vid Escouloubre-dammen. Trots kylan hölls magasinet fritt från is, vilket underlättade avbördningen.



Figur 5.7 Avbördning under vintertiden genom pianotangentutskov vid Escouloubre-dammen, Frankrike (källa EDF, Epcum, et al. 2013).

Laboratorietester av is vid labyrinth- och pianotangentutskov är begränsade, vilket främst beror på skaleffekter. Resultat från modellförsök anses ofta vara kvalitativa än kvantitativa. I studien av Herbst (2016) jämfördes labyrinth- och pianotangentutskov med avseende på ansamling av is vid överfallen (figur 5.8). Det konstaterades att beteendena var beroende av faktorer som vattenföring, isens koncentration, storlek och form. Det observerades även att resulterande ökning i uppströmsvattenstånd var begränsad och majoriteten av flytande is passerade överfallen med ett ökat flöde. Vid dimensionerande vattenföring fanns endast ett fåtal stora isflak kvar på överfallens krön.



Accumulation of ice in a physical model of a trapezoidal labyrinth weir, ice concentration 60%

Figur 5.8 Beteendena av isflak över ett trapetsformat labyrinthöverfall (Herbst 2016, Gebhardt et al. 2017).

Det kan hända att ett istäcke, på grund av komplexa väderförhållanden och ogynnsamma variationer i uppströmsvattenstånd, bildas över ett labyrint- eller pianotangentutskov. Inga händelser har hittills rapporterats vid dessa utskov men bildandet av istäcke över s.k. *fuse gates* kan beskådas i Figur 5.9. Bägge utskovstyperna har liknande krönkonfiguration.



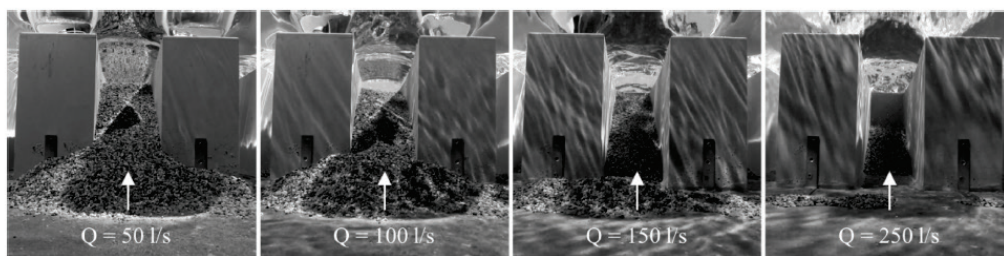
Figur 5.9 Istäcke över s.k. *fuse gate* (Chapuis 2018).

Betongdammar ska ju vara stabila mot ett tjockt istäcke. I RIDAS finns ett lastfall som ska klaras med säkerhetsfaktor  $S \geq 1,5$ : vattenytan vid dämmningsgräns (DG) och dimensionerande islast (tjock is). Hur ett pianotangentutskov klarar detta bör undersökas.

#### 5.4 SEDIMENTTRANSPORT

Många labyrint- och pianotangentutskov placeras direkt på älvbotten och kan medföra sedimentproblematik. De, liksom andra utskovsdammar, utgör i allmänhet passiva fördämningar och antas vara benägna att hålla kvar sediment. Vanligtvis sker sedimentering efter avbördning med höga vattenföringar. På grund av avtagande vattenhastigheter i strömningsriktningen minskar kornstorleken i magasinet från upp- till nedströms, vilket gäller i både låg- och höglödessituationer.

Kvalitativa studier av sediment utfördes med ett pianotangentutskov (Braun 2015, Herbst 2016). Magasinet närmast överfallet och inloppstangenter fylldes med grus. Vid succesivt ökad vattenföring undersöktes strömningens transportförmåga och bottenprofiler framför överfallet. Figur 5.10 visar sedimenteringsmönstret vid flöden från 50 till 250 l/s. Sedimentdeposition förväntades före experimenten men en övervägande del av gruset förflyttades och spolades ut ur inloppstangenter och fördes vidare nedströms. Denna effekt av självrengöring beskrevs tidigare av Falvey (2003). Därför kan man säga att vid höga flöden kan höghastighetsströmningen genom överfallet transportera sediment vidare nedströms. Liknande slutsatser drogs i studier av bl.a. Guan et al. (2015), Noseda (2017) och Herbst et al. (2018), i vilka flera konfigurationer av överfallen undersöktes.



Self-cleaning effect in a rectangular labyrinth weir with increasing discharge

Figur 5.10 Sedimenttransport vid ett pianotangentutskov av typ C med nedströms överhäng (Braun, 2015, Herbst 2016, Gebhardt et al. 2017).

Inloppstangenten i ett pianotangentutskov har en lutande botten ända fram till krönet, vilket, som förväntat, underlättar sedimentrörelsen över utskovet. Ett labyrinthöverfall har vertikala väggar. Studierna indikerar dock att sedimentet så småningom fyller utrymmet i nedre delen av inloppstangenten och en sluttande botten därmed bildas. Det betyder att skillnaden i sedimentbeteenden inte är signifikant mellan labyrinth- och pianotangentutskov.

För anläggningsspecifik sedimenttransport bör modellförsök och matematiska beräkningar i prototypdimension utföras.

## 6 Slutsatser och rekommendationer

**Pianotangentutskov, en vidareutvecklad variant av labyrintutskov, är en kostnadseffektiv avbördningsanordning som kan avbörda 2–5 gånger så mycket vatten som ett linjärt överfall. På grund av dess något mer komplicerade geometri finns det potential att optimera och åstadkomma mer effektiv avbördningsanordning, speciellt om anläggningsutrymmet är begränsat.**

I många länder har riktlinjer för bestämning av dimensionerande vattenföring reviderats eller håller på att uppdateras. Väldigt många dammanläggningar har fått ökade krav på avbördningskapacitet. Detta innebär att deras avbördningsanordningar måste byggas om eller utökas för att på ett säkert sätt avbörda det nya dimensionerande flödet. Labyrint- eller pianotangentutskov är ett kostnadseffektivt alternativ i detta sammanhang. EDF har under de senaste 15 åren byggt drygt 15 pianotangentöverfall i befintliga dammar.

Gemensamt för samtliga utskov är att avbördningskapaciteten är beroende av överfallslängd, överfallshöjd och avbördningskoefficient. Labyrint- och pianotangentutskov har lägre avbördningskoefficient än t.ex. ett rakt överfall eller ett WES-utskov men det uppvägs av flera gånger längre krönlängd.

För ett givet utrymme är projekteringen av ett labyrintöverfall relativt enkel. Labyrintöverfall har vertikala sidor och dess avbördningspåverkas av bl.a. placeringsläge, krönets utvecklade längd, krönform i tvärsnitt och nosens planutformning. Finns det tillräckligt utrymme kan det förses med korta sidoväggar och vice versa.

Pianotangentutskov är geometriskt något mer komplicerade än labyrintvarianten och involverar flera parametrar. Generellt sett har ett trapetsformat labyrintutskov högre avbördningsförmåga per krönlängd än ett pianotangentutskov. För applikationer där det finns begränsningar av utrymme som påverkar bottenlängd ( $B_b$ ) och överfallsbredd ( $W$ ) (t.ex. toppen av gravitationsdammar) kan pianotangentutskovet, även om det ger lägre avbördningsförmåga per krönlängd i förhållande till ett typiskt trapetsformat labyrintöverfall, i vissa fall generera en högre avbördningskapacitet, vilket är tack vare dess större krönlängd som kan rymmas i det tillgängliga utrymmet (Anderson & Tullis 2013). Detta bör beaktas i rehabiliteringsprojekt.

De utförda studierna påvisar en stark påverkan på avbördningskapacitet av förhållandena  $Lu/Wu$ ,  $P/Wu$ ,  $Wi/Wo$  och  $Bo/Bi$ . Det rekommenderas att förse ett överfall med höga värden för dessa. Det finns dock ingen väl etablerad regel när det gäller valet av de styrande parametrarna. Valet kan bero på om det är anläggning av ett nytt överfall eller rehabilitering av ett befintligt utskov. Avvägningen mellan överfallets effektivitet och strukturkomplexitet spelar också en roll. Andra påverkande faktorer är former av bl.a. krönets tvärsnitt, överhängsfronter och uppströmsnos.

Luftinblandning och luftmedrivning, drivgods av träd och isbildning samt sedimenttransport bör också beaktas i projekteringen.

Målet med denna studie var att finna och föreslå möjligheter att förbättra pianotangentutskovsutförning och åstadkomma mer effektiv avbördning. Efter denna fas föreslås att inleda hydrauliska modellstudier i syfte att designa och konstruera PKW-modeller och utvärdera föreslagna konfigurationer för mer effektiv avbördning. Sammantaget är målet att öka förståelsen för PKW-hydrauliken och lägga grunden för kostnadseffektiv design i svenska renoveringsprojekt. Energiomvandling, en viktig aspekt även för pianotangentutskov och dock ofta en anläggnings-specifik fråga, behandlas inte i denna studie.

Med genomgången av forskning och utveckling av både labyrint- och pianotangentutskov föreslås följande aspekter vid design och konstruktion av PKW-modeller. För att kunna jämföra förbättringsgraden bör också ett referensobjekt designas.

- En strömlinjeformad krönform hos bågöverhängens ändrar för att förbättra inströmningen till inloppstangenten samt öka överfallets utvecklade krönlängd.
- Bottenprofiler i både inlopps- och utloppstangenter anpassas till den strömlinjeformade krönformen och ges också en avrundad planprofil.
- En parapet byggs på krönet för att öka avbördningen. Andra aspekter inklusive krönets tvärsnitt ges gynnsamma former.



## 7 Referenslista

- Anderson, RM and Tullis, BP (2012). Comparison of Piano Key and Rectangular Labyrinth Weir Hydraulics. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 138(4), 358–361
- Anderson, RM & Tullis, BP (2013). Piano key weir hydraulics and labyrinth weir comparison. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 139(3), 246–253.
- Barcouda, M, Laugier, F, Cazaillet, O, Odeyer, C, Cochet, P, Jones, BA, Lacroix, S & Vigny, JP (2006). Cost effective increase in storage and safety of most existing dams using fusegates or P.K. weirs (Q84, R78). *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> ICOLD Congress, Barcelona, Spain.*
- Bail, A, Deroo, L & Sixdenier, JP (2013). Designing a new spillway for the Rassisse Dam. *Labyrinth and Piano Key Weirs II – PKW 2013 (Epicum et al. eds), CRC Press, London, UK.*
- Belaabed, F & Ouamane, A (2011). Contribution to the study of the Piano Key Weirs submerged by the downstream level. *Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2011 (Epicum et al. eds), CRC Press, London, UK.*
- Belaabed, F & Ouamane, A (2013). Submerged flow regimes of Piano Key weir. *Labyrinth and Piano Key Weirs II – PKW 2013 (Epicum et al. eds), CRC Press, London, UK.*
- Braun, W (2015). *Hydraulische Untersuchungen am Labyrinth-Wehr. Karlsruhe University, Karlsruhe, Germany.*
- Chapuis, A (2018). Innovative spillways: PK-weirs and French examples. *SwedCOLD Temadagen, April 2018, Stockholm.*
- Cicero, GM & Delisle, R (2013). Effects of the crest shape on the discharge efficiency of a type A Piano Key weir. *Labyrinth and Piano Key Weirs II – PKW 2013 (Epicum et al. eds), CRC Press, London, UK.*
- Crookston, BM (2010). *Labyrinth weirs. Ph.D. Dissertation. Utah State University, Logan, Utah, USA.*
- Crookston, BM & Tullis, BP (2011). Hydraulic characteristics of labyrinth weirs. *Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2011 (Epicum et al. eds), CRC Press, London, UK.*
- Crookston, BM & Tullis, BP (2012a). Arced labyrinth weirs. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 138(6), 555–562.
- Crookston, BM & Tullis, BP (2012b). Discharge efficiency of reservoir-application-specific labyrinth weirs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 138(6), 773–776.
- Crookston, BM & Tullis, BP (2012c). Labyrinth weirs: Nappe interference and local submergence. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 138(8), 757–765.



- Crookston, BM & Tullis, BP (2013a). Hydraulic design and analysis of labyrinth weirs. Part 1: Discharge relationships. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 139(5), 363–370.
- Crookston, BM & Tullis, BP (2013b). Hydraulic design and analysis of labyrinth weirs. Part 2: Nappe aeration, instability, and vibration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 139(5), 371–377.
- Crookston, BM, Erpicum, S, Tullis, BP & Laugier, F (2019). Hydraulics of Labyrinth and Piano Key Weirs: 100 Years of Prototype Structures, Advancements and Future Research Needs. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 145(12), 02519004.
- Darvas, LA (1971). Discussion of Performance and Design of Labyrinth Weirs. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 97(8), 1246–1251.
- Dabling, MR & Tullis, BP (2013). Staged labyrinth weirs and their effects on the outflow hydrograph. *Labyrinth and Piano Key Weirs II – PKW 2013* (Erpicum et al. eds), CRC Press, London, UK.
- Erpicum, S, Archambeau, P, Dewals, B & Pirotton, M (2017). Hydraulics of piano key weirs: a review. *Labyrinth and Piano Key Weirs III – PKW 2017* (Erpicum et al. eds.), CRC Press, London, UK.
- Erpicum, S, Archambeau, P, Pirotton, M and Dewals, B J (2014). Geometric parameters influence on Piano Key Weir hydraulic performances. *Proceedings of 5<sup>th</sup> IAHR International Symposium on Hydraulic Structures*, 25–27 June, 2014, Brisbane, Australia.
- Erpicum, S, Lempérière, F, Ouamane, A, Ho Ta Khanh, M, Laugier, F, Tullis, BP & Crookston, BM (2020). *From Labyrinth to Piano Key Weirs: the story*. IAHR Hydrolink, 2020(4).
- Erpicum, S, Machiels, O, Dewals, B, Archambeau, P & Pirotton, M (2013). Considerations about the optimum design of PKW. *Proceedings of International Conference on Water Storage and Hydropower Development for Africa (Africa 2013)*, Addis Ababa, Ethiopia.
- Erpicum, S, Silvestri, A, Dewals, BJ, Archambeau, P, Pirotton, M, Colombié, M & Faramond, L (2013). Escouloubre Piano Key weir: prototype versus scale models. *Labyrinth and piano key weirs II – PKW 2013* (Erpicum et al. eds), CRC Press, London, UK.
- Falvey, HT (2003). *Hydraulic Design of Labyrinth Weirs*. ASCE Press, Reston, Virginia, USA.
- Guan, D, Melville, B & Friedrich, H (2015). Live-bed scour at submerged weirs. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 141(2), 04014071.
- Gebhardt, M, Merkel, J, Belzner, F & Thorenz, C (2017). A comparison of side weirs and labyrinth weirs at Ilmenau river. *Labyrinth and piano key weirs III – PKW 2017* (Erpicum et al. eds), CRC Press, London, UK.
- Gentillini, B (1941). Stramazzi con cresta a planta obliqua e a zig-zag. *Memorie e Studi del Istituto di Idraulica e Construzioni Idrauliche del Regil Politecnico di Milano*, No. 48 (in Italian).

- Hay, N & Taylor, G (1970). Performance and design of labyrinth weirs. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 96(11), 2337–2357.
- Herbst, J (2016). *Hydraulische Untersuchungen an labyrinth- und piano-key-wehren zur Durchgängigkeit von Treibgut, Geschiebe und Eis*. Karlsruhe, Germany.
- Herbst, J, Gebhardt, M, Merkel, J, Belzner, F & Thorenz, C (2018). Sediment transport over labyrinth weirs. *Proceedings of 7<sup>th</sup> IAHR International Symposium on Hydraulic Structures*, Madrid, Spain.
- Houston, K (1982). *Hydraulic model study of Ute dam labyrinth spillway Report No. GR-82-7*. U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, USA.
- ICOLD (1994). *Technical Dictionary on Dams*, Paris, France.
- Jorgensen, T, Tullis, BP & Crookston, BM (2021). Labyrinth weir outlet ramps: managing flow instability and discharge efficiency. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 174(3), 134–142.
- Laugier, F (2007). Design and construction of the first Piano Key Weir (PKW) spillway at the Goulours dam. *International Journal of Hydropower and Dams*, 14(5), 94–101.
- Laugier, F, Lochu, A, Gille, C, Leite Ribeiro, M & Boillat, J-L (2009). Design and construction of a labyrinth PKW spillway at Saint-Marc dam, France. *International Journal of Hydropower and Dams*, 16(5), 100–107.
- Laugier, F, Gille, C & Cazaillet, O (2011). Adaptation of Piano Key Weir (PKW) spillway solution to upgrade l'Étroit dam affected by concrete swelling pathology. *Proceedings of International Conference Hydro 2011, Prague, Czech Republic*.
- Laugier, F, Vermeulen, J & Lefebvre, V (2013). Overview of Piano Key Weirs experience developed at EDF during the past few years. *Labyrinth and piano key weirs II – PKW 2013* (Epicum et al. eds), CRC Press, London, UK.
- Laugier, F & Vermeulen, J (2017). Overview of design and construction of 11 Piano Key Weirs spillways developed in France by EDF from 2003 to 2016. *Labyrinth and piano key weirs III – PKW 2017* (Epicum et al. eds), CRC Press, London, UK.
- Laugier, F, Blancher, B, Bouassida, S & Nagel, V (2017). “Hydrothermal” season based design of a new flood spillway at Gage II dam (in French). *Proceedings of CFBR/SHF conference, Chambery, France*.
- Leite Ribeiro, M, Boillat, J-L, Schleiss, AJ & Laugier, F (2011). Coupled spillway devices and energy dissipation system at St-Marc Dam (France). *Labyrinth & Piano Key Weirs – PKW 2011* (Epicum et al. eds.), CRC Press, London, UK.
- Leite Ribeiro, M, Pfister, M, Schleiss, AJ & Boillat, J-L (2012a). Hydraulic design of A-type Piano Key Weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 50(4), 400–408.
- Leite Ribeiro, M, Bieri, M, Boillat, J-L, Schleiss, AJ, Singhal, G & Sharma, N (2012b). Discharge capacity of Piano Key Weirs. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 138(2), 199–203.

- Lempérière, F & Ouamane, A (2003). The piano keys weir: A new cost-effective solution for spillways. *International Journal of Hydropower Dams*, 10(5), 144–149.
- Lempérière, F & Vigny, J-P (2011). General comments on labyrinths and Piano Key Weirs – The future. *Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2011* (Epicum et al. eds), CRC Press, London, UK.
- Lempérière, F, Vigny, J-P & Ouamane, A (2011). General comments on labyrinth and piano key weirs: the past and present. *Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2011* (Epicum et al. eds), CRC Press, London, UK.
- Lux, F and Hinchliff, D (1985). Design and construction of labyrinth spillways (Vol. IV Q59, R15). *Proceedings of the 15<sup>th</sup> ICOLD Congress*, Lausanne, Switzerland.
- Lux, F, Paxson, G & McGill, D (2006). 25 years of labyrinth spillways from Ute to Dog river, Notes from the field. *Proceedings of the American Association of Dam-Safety Officials (ASDSO) Annual Conference*, Boston, USA.
- Machiels, O, Epicum, S, Dewals, B, Archambeau, P & Piroton, M (2011a). Experimental observation of flow characteristics over a Piano Key Weir. *Journal of Hydraulic Research*, 49(3), 359–366.
- Machiels, O, Epicum, S, Archambeau, P, Dewals, BJ and Piroton, M (2011b). Piano Key Weir preliminary design method - Application to a new dam project. *Labyrinth and piano key weirs – PKW 2011* (Epicum et al. eds), CRC Press, London, UK.
- Machiels, O (2012). Experimental study of the hydraulic behaviour of Piano Key Weirs, PhD thesis. HECE research unit, University of Liège, Belgium.
- Machiels, O, Epicum, S, Archambeau, P, Dewals, BJ and Piroton, M (2012a). Method for the preliminary design of Piano Key weirs. *La Houille Blanche*, 4–5, 14–18
- Machiels, O, Epicum, S, Archambeau, P, Dewals, BJ and Piroton, M (2012b). Parapet wall effect on Piano Key Weirs efficiency. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(6), 506–511.
- Machiels, O, Piroton, M, Archambeau, P, Dewals, BJ and Epicum, S (2014). Experimental parametric study and design of Piano Key Weirs. *Journal of Hydraulic Research*, 52(3), 326–335
- Nosedá, M (2017). Upstream erosion at piano key weirs. MSc thesis, Laboratory of Hydraulic Constructions, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland.
- Ouamane, A (2011). Nine years of study of the Piano KeyWeir in the university laboratory of Biskra “lessons and reflections”. *Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2011*(Epicum et al. eds), CRC Press, London, UK.
- Ouamane, A (2013). Improvement of labyrinth weirs shape. *Labyrinth and Piano Key Weirs II – PKW 2013* (Epicum et al. eds), CRC Press, London, UK.
- Ouamane, A & Lempérière, F (2006). Design of a new economic shape of weir. *Dams and Reservoirs, Societies and Environment in the XXI Century* (Berga et al. eds). CRC Press, London, UK.

- Paxson, GS, Monroe, JS, Crookston, BM & Campbell, D (2013). Balancing site considerations with hydraulic efficiency for labyrinth spillways. Proceedings of ICOLD's International Symposium Changing Times: Infrastructure Development to Infrastructure Management, Seattle, Washington, USA.
- Pfister, M, Erpicum, S, Machiels, O, Schleiss, A & Piroton, M (2012). Discharge coefficient for free and submerged flow over Piano Key Weirs – Discussion. *Journal of Hydraulic Research*, 50(6), 642–645.
- Pfister, M, Schleiss, AJ & Tullis, BP (2013a). Effect of driftwood on hydraulic head of piano key weirs. *Labyrinth and Piano Key Weirs II – PKW 2013* (Erpicum et al. eds), CRC Press, London, UK.
- Pfister, M, Capobianco, D, Tullis, B & Schleiss, AJ (2013b). Debris-blocking sensitivity of piano key weirs under reservoir-type approach flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(11), 1134-1141
- Pinchard, T, Farges, J-L, Boutet, J-M, Lochu, A & Laugier, F (2013). Spillway capacity upgrade at Malarce dam: Construction of an additional piano key weir spillway. *Labyrinth and Piano Key Weirs II – PKW 2013* (Erpicum et al. eds), CRC Press, London, UK.
- Pralong, J, Vermeulen, J, Blancher, B, Laugier, F, Erpicum, S, Machiels, O, Piroton, M, Boillat, J-L, Leite Ribeiro, M & Schleiss, A (2011). A naming convention for the Piano Key Weirs geometrical parameters. *Labyrinth and Piano Key Weirs - PKW 2011* (Erpicum et al. eds), CRC Press, London, UK.
- Saïd, MB & Ouamane, A (2011). Study of optimization of labyrinth weir. *Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2011*(Erpicum et al. eds), CRC Press, London, UK.
- Schleiss, A (2011). From labyrinth to piano key weirs – A historical review. *Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2011* (Erpicum et al. eds), CRC Press, London, UK.
- Schmocker, L, Detert, M & Weitbrecht, V (2013). Bypass driftwood retention River Sihl. Proceedings of 2013 IAHR World Congress, Chengdu, China.
- Shen, XY & Oertel, M (2021). Comparative study of nonsymmetrical trapezoidal and rectangular Piano Key Weirs with varying key width ratios. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 147(11), 04021045.
- Taylor, G (1968). The performance of labyrinths weirs. Ph.D. thesis, University of Nottingham, Nottingham, UK.
- Teng, PH & Yang, J (2018). Modeling and prototype testing of flows over flip-bucket aerators. *Journal of Hydraulic Engineering*, 144(12), 04018069.
- Vermeulen, J, Lassus, C & Pinchard, T (2017). Design of a Piano Key Weir aeration network. *Labyrinth and Piano Key Weirs III – PKW 2017* (Erpicum et al. eds), CRC Press, London, UK.
- Vermeulen, J, Laugier, F, Faramond, L & Gille, C (2011). Lessons learnt from design and construction of EDF first Piano Key Weirs. *Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2011* (Erpicum et al. eds), CRC Press, London, UK.
- Yang, J (2013). Interception of spillway floating debris following extreme floods. Proceedings of 2013 IAHR World Congress, Chengdu, China.

Yang, J, Andreasson, P, Teng, PH & Xie, QC (2019). The past and present of discharge capacity modelling for spillways – a Swedish perspective. *Fluids*, 2019, 4, 10.





# LABYRINT- OCH PIANOTANGENT- UTSKOV FÖR EFFEKTIV AVBÖRDNING

För en vattenkraftdamm är en tillfredsställande avbördningsanordning avgörande för dammsäkerheten. I rapport går vi igenom *the state of the art* inom forskning och tillämpningar av labyrint- respektive pianotangentutskov för vattenkraftändamål. Syftet med studien är att få en ökad förståelse av utskovens hydrauliska egenskaper och utröna potential och förbättringsmöjligheter för effektiv avbördning.

## Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. [www.energiforsk.se](http://www.energiforsk.se)