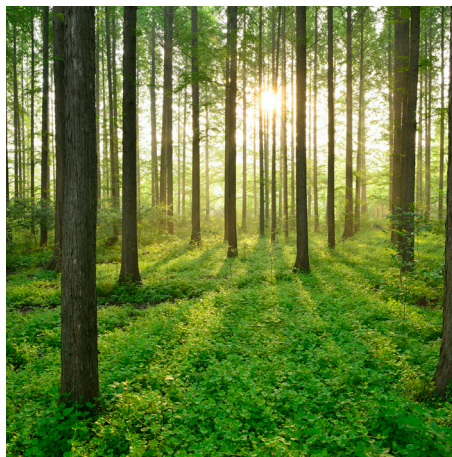
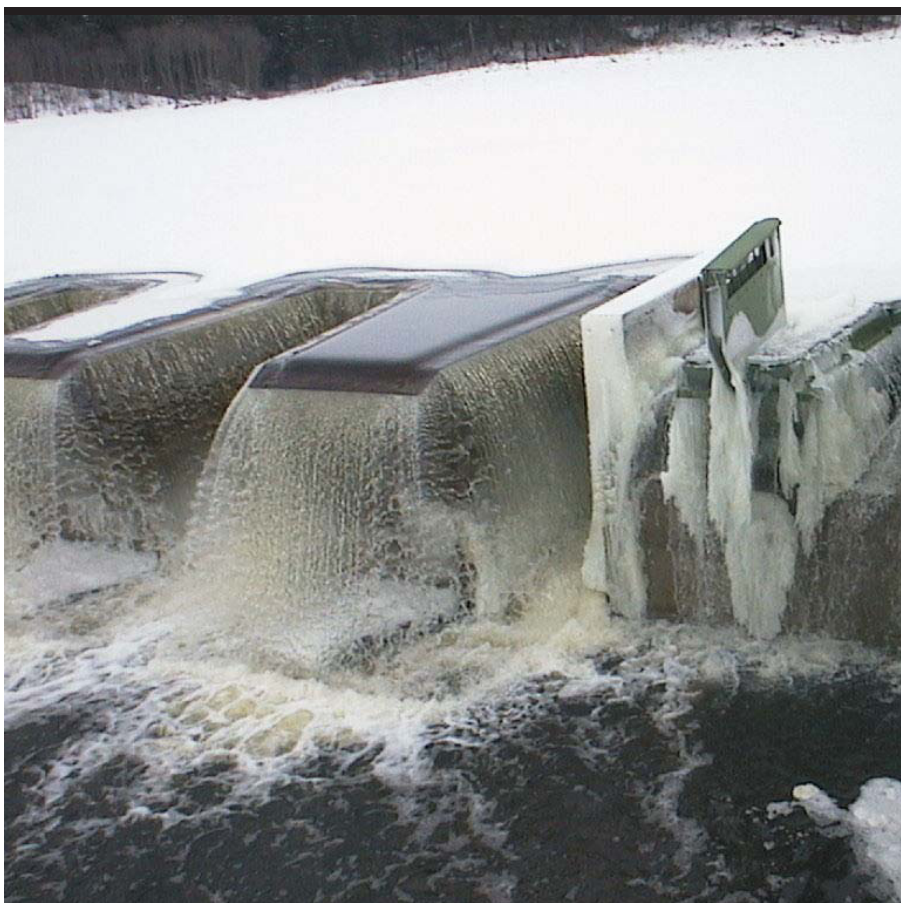
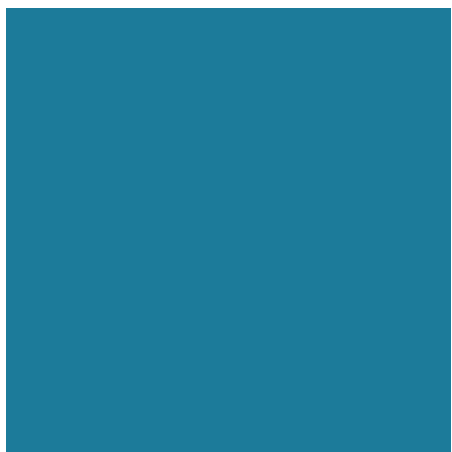


LABYRINT- OCH PIANOTANGENTUTSKOV I NORDISKT KLIMAT – KUNSKAPSSAMMANSTÄLLNING

RAPPORT 2024:1038



DAMMSÄKERHET



Labyrint- och pianotangentutskov i nordiskt klimat – kunskapssammanställning

JAMES YANG

ISBN 978-91-89919-38-9 | © Energiforsk juli 2024 | Omslagsfoto: © Hydroplus, Inc.

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Att på ett säkert sätt avbörda extrema översvämningar är en viktig del av dammsäkerhetshanteringen. Innovativa lösningar för att öka utskovsflödena eftersöks kontinuerligt. En sådan lösning är labyrintutskov, som är krökt i planform, vilka förlänger överströmningslängden och leder till, för samma flödesavledning, en betydande minskning av reservoarens vattennivå jämfört med den linjära dammen med samma bredd. Pianotangentutskov är en vidareutvecklad version av labyrintutskov och har tagits fram för att kringgå några av nackdelarna med den senare. De har en rektangulär layout i planform och vinklade golv för att skapa överhängande toppar, och är strukturellt enklare och hydrauliskt mer effektiva. Den kan placeras på befintliga eller nya gravitationsdammars krön för att förbättra deras avbördningskapacitet. Utmaningarna med labyrint- och pianotangentutskov i kalla klimat är isbildning och flytande skräp av viss storlek.

Projektet "Labyrint- och pianotangentutskov i nordiskt klimat – kunskapssammanställning" ingår i Energiforsks Dammsäkerhetstekniska forskningsprogram och har genomförts av James Yang på Vattenfall R&D och Kungliga Tekniska Högskolan (KTH) som varit projektledare och tillika utförare. Övriga projektmedlemmar har varit Erik Nordström och Jonas Persson.

Referensgruppen bestod av Stina Åstrand (Fortum), Carl-Oscar Nilsson (Uniper), Romanas Wolfsborg (Vattenfall), Mathias Björk (Fortum), Mikael Hernqvist (Statkraft) och Rikard Hellgren (Svenska kraftnät).

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

Avbördningssäkerhet i nordiskt klimat är en frågeställning som berör samtliga anläggningar oavsett vad som orsakar avbördningsbehovet. Både labyrinth- och pianotangentutskov är effektiva avbördningsanordningar. I projektering av ombyggnationer av landets dammar inkluderas de ibland som alternativ till konventionell utskovslösning med luckor. Det är därför nödvändigt att undersöka deras driftförutsättningar under bl.a. vinterförhållanden för att säkerställa god avbördningssäkerhet. Syftet med studien är bl.a. att samla in kunskap från länder där relevant dokumentation finns och att sprida kunskapen till dammsäkerhetsbranschen i landet.

Det nordiska klimatet inkluderar här både vinterförhållanden och förekomsten av drivgods. Baserat på laboratorieundersökningar och prototypobservationer är de aspekter som ingår i studien isbildning, vinterbeteende, avbördning av drivgods inklusive isflak och avbördningskapacitet i närvaro av istäcke.

Trots att många labyrinth- och pianotangentutskov finns i USA, Frankrike och andra kalla regioner, är dokumentationen av deras driftbeteenden begränsad. Khrorbrovskaya-dammen består av både fuse gate- och labyrinthutskov. Fältstudien som utförts under två kalla vintrar, med en temperatur ner till -23°C , ger övertygande bevis för deras funktion; inga onormala händelser eller incidenter har noterats, vilket är positivt.

CFD-beräkningar har utförts för att undersöka avbördningsförmågan vid närvaro av ett istäcke. För att bibehålla avbördningskapaciteten är det tillräckligt att hålla inloppstangenter isfria; det kvarstående istäcket i reservoaren påverkar avbördningen marginellt (endast $\sim 5\%$). Om inloppstangenterna eller hela vattenytan täcks med is reduceras avbördningskapaciteten signifikant.

Isflakens beteenden över labyrinth- och pianotangentutskov är beroende av framför allt överfallshöjd och isens tjocklek. Modellförsök med ett pianotangentutskov visar att för att lyfta tjocka isflak över det krävs att överfallshöjden är nästan dubbelt så stor som isens tjocklek.

Drifterfarenheter från Frankrike och USA visar att potentiella effekter av drivgods på avbördningskapacitet hos labyrinth- och pianotangentutskov kan vara mindre än förväntat. Utformningen och underhållet måste dock beakta dess effekter för situationer där en stor belastning av drivgods förväntas i samband med höglödessituationer.

Både labyrinth- och pianotangentutskov är passiva strukturer. Om de konstrueras strukturellt stabilt mot verkande krafter inklusive iskraft, är de pålitliga konstruktioner som kräver väldigt lite underhåll i kallt klimat. De huvudfaktorer som styr valet av utskovstyp torde vara dammsäkerhetsmässiga överväganden och projektkostnader. Det finns dock inte några belägg som talar emot dem i svenska förhållanden.

Nyckelord

Labyrintutskov, pianotangentutskov, kallt klimat, avbörkningssäkerhet, laboratorieundersökning, prototypobservationer, vinterförhållanden, istäcke, islast, drivgods, CFD.

Summary

In the Nordic climate, flood discharge safety is an issue that concerns all dam facilities irrespective of the reason that leads to the need. Both labyrinth and piano key weirs are effective flood release structures. In the upgrades of the country's dam facilities, they are included as an option to conventional spillways with gates. It is therefore essential to investigate their operating premise under e.g. winter conditions, which contributes to a high level of hydraulic safety. The main purposes of study are to collect knowledge from countries where there is relevant documentation and to disseminate the knowledge to the hydropower business.

The Nordic climate refers here to both winter conditions and the presence of floating debris. Based on laboratory investigations and prototype observations, the aspects that are included in the study are ice formation, winter behaviours, release of floating debris inclusive of ice floes and discharge capacity in the presence of ice cover.

Although many labyrinth and piano key weirs exist in USA, France, and other cold regions, documentation of their operating behaviors is limited. The Khrorbrovskaya dam consists of both fuse gates and labyrinth weirs. The field study conducted during two cold winters, with temperatures down to -23°C , provides convincing evidence of their durability. After more than two decades of operation, no abnormal events or incidents have been noted, which is positive.

CFD calculations have been performed to investigate the discharge performance in the presence of ice cover. To maintain the discharge capacity, it is sufficient to keep the inlet keys free of ice; the remaining ice cover in the reservoir affects the discharge marginally. If the water surface in the inlet keys or the whole reservoir water surface is covered by ice, the discharge capacity drops down significantly.

The behavior of ice floes over the labyrinth and piano key weirs depends above all on the water head and ice thickness. To lift thick ice blocks over the crest, the water head should be twice as large as the ice thickness.

Operation experience from France and the USA shows that potential effects of floating debris on the spillway capacity may be less than expected. However, the design and maintenance must consider its effects for situations where a significant impact of floating debris is expected during large floods.

Both labyrinth and piano key weirs are passive structures. If they are designed structurally stable against acting forces including ice thrust, they

are reliable structures that require little maintenance in cold climates. There is not any evidence that speaks against them in Swedish conditions.

Innehåll

1	Inledning	9
1.1	Labyrint- och pianotangentutskov	9
1.2	Tidigare Energiforsk-projekt	12
1.3	Motivation	13
1.4	Syften	15
1.5	Genomförande	15
2	Istäcke och islast	17
3	Vinterförhållanden vid fuse gate	19
4	Isproblematik vid labyrint- och pianotangentutskov	30
5	Avbördningskapacitet vid närvaro av istäcke	37
6	Avbördning av isflak	44
7	Avbördning av drivgods	50
8	Diskussioner	55
9	Slutsatser	57
10	Referenslista	59

1 Inledning

I denna inledning ges en kort beskrivning av labyrint- och pianotangentutskov, utfall av en tidigare Energiforsk-studie, motivation till och syfte med nuvarande studie samt dess genomförande.

1.1 LABYRINT- OCH PIANOTANGENTUTSKOV

Både labyrintutskov och pianotangentutskov (*piano key weir*, PKW) är passiva men ändå mycket effektiva avbördningsanordningar. Vid liknande hydrauliska förhållanden kan de avbörda 2–5 gånger så mycket vatten som ett linjärt överfall, vilket är beroende på överfallshöjd. Ofta blir de ett fördelaktigt alternativ i design av en ny dammanläggning eller en uppgradering av befintlig anläggning. De kan användas vid ett årsregleringsmagasin eller strömkraftverk, som ordinarie-, reserv- respektive nödutskov.

Det allra första labyrintutskovet som identifierats i publicerad litteratur torde vara East Park Dam, USA (byggt 1910 och ägt av US Bureau of Reclamation). Det består av nio halvcirkelformade enheter placerade längs en något krökt dammaxel. En tunn vertikal vägg placerades i en triangulär eller trapetsformad form (i planvy) för att maximera överfallslängden inom ett begränsat utrymme. Sedan åttiotalet ökade antalet labyrintprojekt exponentiellt efter byggandet av Ute damm (USA) (Falvey 2003, Erpicum et al. 2020). Många sådana strukturer har hittills byggts i olika länder. Endast i USA finns det drygt 150 sådana överfall (Paxson et al. 2013, Crookston et al. 2019). Vårt grannland Norge har över tio stycken i drift. Labyrintutskovs hydrauliska egenskap är fortfarande ett aktivt forskningsämne (Shen & Oertel 2021, Vermeulen et al. 2017, Bhukya et al. 2022). Figur 1.1 visar två befintliga anläggningar.



(a)



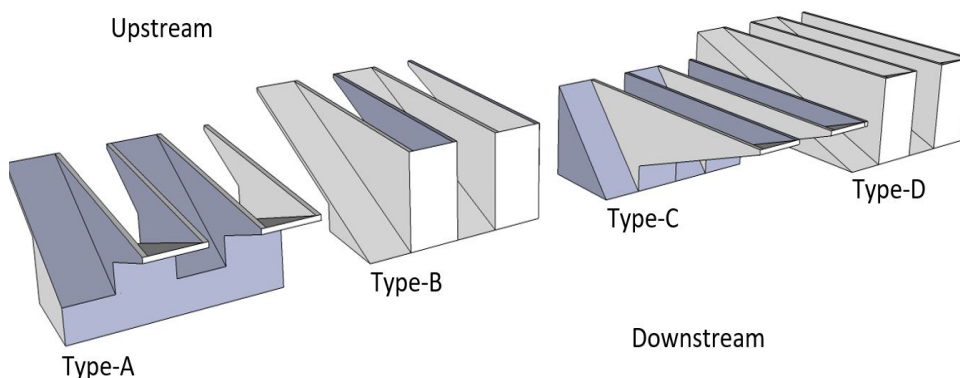
(b)

Figur 1.1 Labyrintutskov vid (a) Saggrendadammen – Kongsberg, Norge (Kjetil Arne Vaskinn, Sweco Norge) och (b) Fobney Lock-dammen, Reading, UK (www.tonycanapics.co.uk).

Lempérière och Ouamane (2003) utvecklade en förbättrad och mer effektiv typ av labyrintutskov, vilket kan placeras ovanpå gravitationsdammar utöver de olika tillämpningar som är vanliga för labyrintöverfall på t.ex. fyllningsdammar. År 2003 föreslogs för första gången pianotangentutskov. Beteckningen pianotangentutskov syftar på det rektangulära krönmönster som liknar tangenter i ett piano. Det är en rektangulär labyrintform som ofta består av ett antal symmetriska enheter. Varje enhet förses med två lutande sidor i strömriktningen och två vertikala sidoväggar, vilket ökar överfallslängden inom givet utrymme.

Pianotangentutskov kännetecknas av en något mer komplex geometri. De parametrar som styr avbördningen inkluderar en enhets längd och bredd, inlopps- och utloppstangenters bredd, överhängens 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.

Man brukar dela upp pianotangentutskov i fyra typer (figur 1.2) (Ergic et al. 2013): 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 1.2 Pianotangentutskov i fyra typer.

Sedan konstruktionen av det första pianotangentutskovet vid Goulours 2006 har Électricité de France (EDF) byggt drygt 10 sådana anläggningar, varav flera i befintliga dammar (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 stycken uppförts. Figur 1.3 visar pianotangentutskov i drift i Vietnam, Indien och USA.

Vid dammanläggningen Lake Peachtree byggdes ett av de två pianotangentutskoven i USA. Den föreslagna lösningen var en trestegs layout som var placerad inom det ursprungliga utskovsområdet and överfallströskeln försågs med differentierade höjder. Detta alternativ valdes av Peachtree City Council och den slutliga utformningen fastställdes i december 2016. De två första stegen (krönhöjden +784,5 fot respektive +786,5 fot) är utformade för att styra basflöde, låga flöden och upp till 100-årsflödet, och den tredje krönhöjden (+789,0 fot) var satt för avbördning av högre vattenföringar.



(a)



(b)



(c)

Figur 1.3 Pianotangentutskov, (a) Van Phon-dammen (foto VNCold), Vietnam, (b) i närheten av Thimmapuram, Andhra Pradesh, Indien (Bhukya et al. 2022) och (c) Lake Peachtree Dam, Peachtree City, Georgia, USA (Collins et al. 2019).

1.2 TIDIGARE ENERGIFORSK-PROJEKT

I ett tidigare Energiforsk-projekt (Yang 2022) granskades de geometriska och hydrauliska förhållanden som påverkar avbördningskapaciteten hos både labyrint- och pianotangentutskov. Syftet var att föreslå geometriska modifieringar hos den senare för laboratoriestudier. Andra aspekter som berördes inkluderade luftinblandning och luftmedrivning, drivgoods av träd och isbildning samt sedimenttransport.

För att förbättra inströmningsförhållandena samt att utöka krönets längd föreslås att bl.a. inlopps- och utloppstangenters ändar görs strömlinjeformade och att

lutande bottnar i bågiga tangenterna anpassas till den rundade formen. En parapet kan läggas på krönet för att förbättra överströmningsförhållanden vid krönet. Det finns också ett behov av att undersöka beteendet hos drivgods framför pianotangentutskov. Då denna rapport skrivs pågår, som utfall av ovannämnt Energiforsk projekt, ett parallellt projekt som undersöker strömningsförhållanden hos ett förbättrat pianotangentutskov. Projektet finansieras av Svenskt centrum för hållbar vattenkraft (SVC).

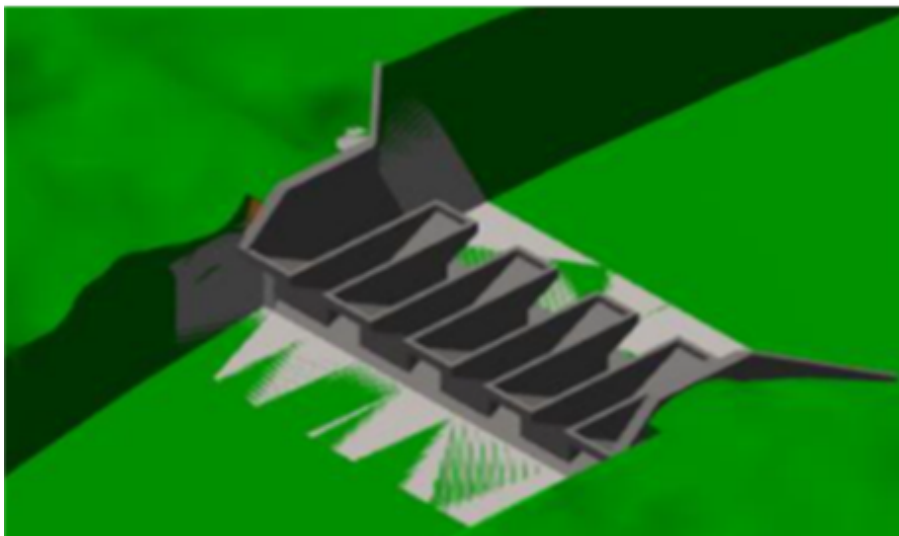
1.3 MOTIVATION

I samband med reviderade riktlinjerna för dimensionerande vattenföring och dammsäkerhet, ska ett stort antal dammar uppgraderas i Europa för att uppfylla högre säkerhetsstandarder. Många svenska dammar förväntas genomgå uppgraderingar. Att på ett säkert sätt avbörda extrema flöden är en viktig frågeställning rörande dammsäkerheten.

Ingenjörer arbetar för att ta fram innovativa lösningar för ökad avbördningsförmåga. Det kan utan tvekan sägas att både labyrinth- och pianotangentutskov är innovationer inom hydraulisk design. För att åstadkomma kostnadseffektiv avbördningsanordning bör de behandlas som ett alternativ vid design av våra uppgraderingsprojekt.

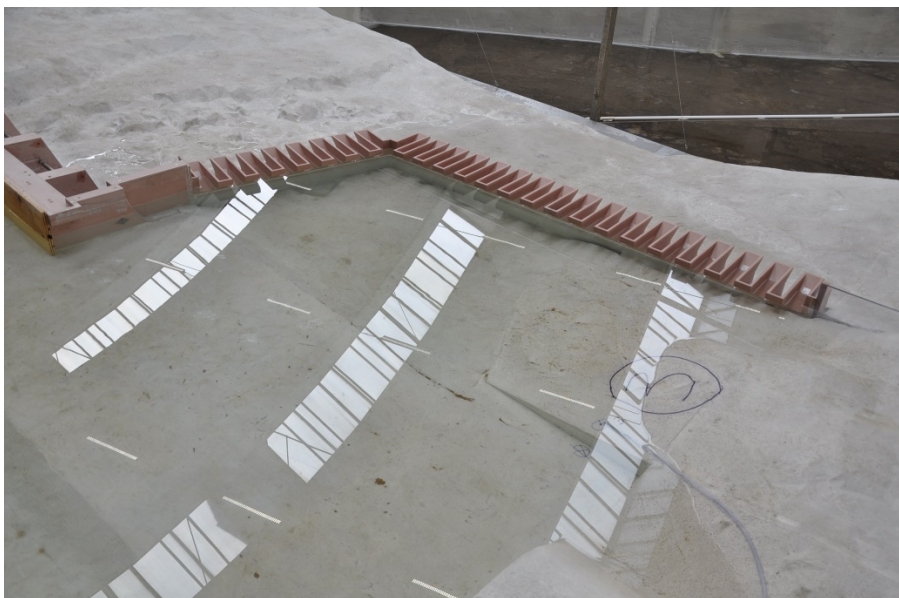
Det kan nämnas att labyrinth- och pianotangentutskov, enligt kommunikation med flera forskare och ingenjörer i Belgien, Frankrike och USA, inte alltid används i kombination med annan typ av utskov i en dammanläggning. Till exempel är ett pianotangentutskov den enda avbördningsanordningen vid dammarna Oule (Frankrike), Record (Frankrike), Campauleil (Frankrike) och Ouldjet Mellegue (Algeriet). Vid Lake Brazos, Linville, Lake Peachtree och många andra dammar i USA byggs endast labyrinthutskov för avbördning. Det torde vara lagstiftning, tekniska krav mm som skiljer sig från ett land till ett annat.

För att öka avbördningsförmågan i en dammanläggning i Umeälven föreslogs en PKW lösning (Figur 1.4). Dess tröskel var satt på DG. Den dimensionerades med samma krav på avbördningsförmåga som ett överfallsutskov med segmentluckor, en maximal kapacitet om ca 700 m³/s. Då ett PKW alltid har sin tröskel på, eller över, DG krävdes en viss överdämning. Om magasinet skulle överdämmas för att avbörda via PKW krävdes också åtgärder på dammen. Ett PKW som avbördar 700 m³/s vid en hög överdämning var billigare att konstruera i jämförelse med ett PKW som avbördar 700 m³/s vid en låg överdämning. Däremot ställde det billigare PKW-alternativet större krav på åtgärder, som t.ex. höjning av tät kärnan, betongdamm och våguppspolningsskydd.



Figur 1.4 Pianotangentutskov som föreslogs för att öka avbördning i en anläggning i Umeälven.

För att öka avbördningskapacitet och i en anläggning i Fjällsjöälven har ett pianotangentutskov av drygt 20 enheter projekterats. Laboratorieförsök utförs i Älvkarleby under 2024 (Figur 1.5). Man ser generellt en tendens att denna typ av utskov börjar tas med som ett alternativ i uppgradering av landets dammanläggningar.



Figur 1.5 Pianotangentutskov som i Älvkarleby håller på att testas för en dammanläggning i Fjällsjöälven (foto James Yang).

I den nordiska miljön finns dock en oro rörande isbildning och avbördning av is och drivgods av betydande storlek. Förutsättningar för användning av labyrint- och pianotangentutskov behöver därför klargöras. Det är därför nödvändigt att samla in och analysera såväl laboratoriemässiga som operativa erfarenheter från länder där dokumentation finns tillgänglig.

1.4 SYFTEN

Studien behandlar sådana aspekter som isbildning, drivgods och avbördning vid labyrinth- och pianotangentutskov i det nordiska klimatet, med avsikten att uppnå följande mål.

1. Att samla in och sammanfatta kunskap från länder där relevant dokumentation och data finns;
2. Att sprida kunskapen i ämnet till dammsäkerhetsbranschen i landet;
3. Att förse branschen med underlag för dessa utskovstypers användning i det nordiska klimatet och att öka förståelsen för för- och nackdelar vid avbördning oavsett vad som orsakar avbördningsbehovet.

1.5 GENOMFÖRANDE

Labyrintutskov har använts i många decennier och finns i många länder. Endast i USA finns det över 150 sådana överfall (Crookston et al. 2019). Cirka 35 pianotangentutskov har f.n. byggts i några länder (Epicum et al. 2017, 2020). Dessutom finns det en liknande typ av utskov som kallas *fuse gate* eller *fusible gate* – ett utskov som stjälpas nedströmsåt då uppströmsvattenståndet i magasinet överstiger dess tillåtna gränsvärde för stabilitet. Vad gäller isförhållanden bör tidigare relevant ingenjörserfarenhet tas till vara. En annan aspekt är eventuella erfarenheter från användning av islänsar, vilka kan förhindra bildandet av istäcke framför dammar och utskov.

I rapporten behandlas isformation, dess inverkan på avbördningskapacitet, avbördning av isflak m.m. Även drivgods av träd är del av frågeställningar som berör dammsäkerhet i det nordiska klimatet och som inkluderas i rapporten. Islaster nämns men det är inte någon huvudfokus i detta projekt. Avsikten är att samla in både publicerade och icke-publicerade rapporter och artiklar relaterade till sådana aspekter.

ICOLD och IAHR knutna kontakter inkluderar:

- EDF, Frankrike
- HydroPlus, USA
- Worthington Products, USA
- NVE, Sweco, m.fl. Norge
- Schnabel Engineering, USA
- HEIA-FR, Schweiz
- Utan State University, USA
- VNIIG, Ryssland

Litteratur är från följande källor:

- IAHR-publikationer inkl. Journal of Hydraulic Research och International Symposium on Hydraulic Structures
- ICOLD-publikationer
- ASCE-publikationer inkl. Journal of Hydraulic Engineering och Cold region Engineering (ASCE),

- ASDSO- och USSD-publikationer
- Journal of Cold Regions Science and Technology
- Journal Hydropower & Dams
- Journal International Power & Dam Construction
- MDPI Water
- MDPI Applied Science
- Conference proceedings Labyrinth and PK Weir 2011, 2013 and 2017
- Övriga källor

Publikationer om drivgods- och isproblematik är otaliga, endast de artiklar som är direkt kopplade till labyrinth- och pianotangentutskov, fuse gate och isbommar är inhämtade.

Rapporten består av följande aspekter.

- Istäcke och islast mot utskov
- Vinterförhållanden vid fuse gate
- Isproblematik vid labyrinth- och pianotangentutskov
- Avbördningskapacitet vid närvaro av istäcke
- Avbördning av isflak
- Avbördning av drivgods
- Diskussioner
- Slutsatser

2 Istäcke och islast

Detta avsnitt behandlar kortfattat islast och är baserat på bl.a. tidigare Vattenfallrapporter om isproblematik vid betongdammar och utskovsluckor (Billfalk and Lif 1985). Både labyrinth- och pianotangentutskov är slanka konstruktioner och skall dock byggda för dimensionerande islast.

Istäcken mot vattenbyggnadskonstruktioner kan uppkomma på flera olika sätt. Ett fast istäcke längdutvidgas och kan belasta dammar och utskovsluckor med betydande horisontalkrafter. Vattenfall utförde på 60-talet en serie istrycksmätningar framför utskovsluckor. Som högst noterades 8,1 ton/m, orsakat av termisk utvidgning av isen (Ingevald 1963). Tidigare forskning handlande om beräkningar av isspänningar på isen i oreglerade sjöar av bl.a. Bergdahl och Wernersson (1978) visade att istryck under ogynnsamma förhållanden kan bli betydligt högre än 20 ton/m. Större dammar i Sverige torde vanligen vara dimensionerade för en islast av 20 ton per längdmeter. Våra äldsta dammar dimensionerades dock för lägre islast. De ursprungliga Älvkarlebydammnarna beräknades t.ex. för 6 ton per längdmeter.

För att undvika överbelastning av dammar som ej dimensionerats för rimliga islaster används olika metoder att hålla isfritt längs dammnarna (Billfalk 1979). Detsamma gäller för utskovsluckor, som ofta inte dimensioneras för islast över huvud taget. Den förmodligen mest effektiva metoden består i att sätta upp en ytström längs den aktuella konstruktionen med hjälp av strömbildare. Om varmt bottenvatten finns tillgängligt, vilket kan vara fallet i djupa magasin, kan varmvattnet bringas till ytan genom luftbubbling varmed isfritt vatten kan bibehållas.

När det gäller luckor så värms luckfalsar, tätningar mm på elektrisk väg. Luckorna är dessutom ofta inklädda på nedströmssidan och värms invändigt med aerotemperar. Dessa åtgärder räcker normalt för att säkerställa manövrerbarhet även under mycket kalla vintrar. Om man tvingas spilla vatten under perioder med kallt väder uppstår emellertid problem med ispåväxt. Dylika problem var vanliga och omöjliggjorde på vissa håll stängning av öppnade luckor.

Längs utskovsluckor används, även strålvärmare för att skapa en smal råk närmast luckan. Denna metod är dock ej helt tillförlitlig, vilket illustreras av den skada som en utskovslucka vid Imnäsdammen utsattes för under den kalla vintern 1978/79. Flera spant i luckan bucklades och luckans övre del erhöll en kvarstående deformation på ca 5 cm. Utgående från de observerade skadorna beräknades att den horisontella islasten mot luckans överkant uppgick till 24 ton/m. Denna last kunde ha orsakats p.g.a. termisk expansion av istäcket. Eftersom istäcket låg an mot luckan kunde även en rent mekanisk åverkan uppstått i samband med de vattenståndsvariationer som förekom dagligen (Billfalk 1979). Infrusna vattenbyggnadskonstruktioner utsätts för betydande vertikalkrafter i samband med vattenståndsvariationer. Problem uppstår främst med påverk, bryggor o dyl. som kan lyftas upp eller tryckas ner i botten. Detta gäller även luckor som måste öppnas "genom" ett istäcke.

Isforskning och islastsmätningar kopplade till vattenkraftanläggningar pågick i Sverige fram till 1990-talet. Under drygt två decennier efteråt gjordes knappt någon insats inom området i landet. Först under 2016 startades ett SVC forskningsprojekt på KTH, i vilket isen och dammen som ett system behandlades för att på så sätt öka förståelse kring både islaster och betongdammars beteende under normal drift. De nuvarande riktlinjerna i RIDAS är geografiskt baserade och anger att betongdammar ska dimensioneras för en linjelast med storleken 50–200 kN/m. En sådan storlek innebär att islasten, särskilt för små dammar, utgör en betydande del av den totala lasten (Hellgren 2019, 2022, Hellgren et al. 2022). Det pågår fortfarande SVC projekt med mätningar av islaster mot dammar under olika driftförhållanden. Det är viktigt att dokumentera randvillkor för mätningarna, så att mätningensresultaten kan jämföras med beräkningsmodeller.

Mätningarna har visat att vattenståndsvariationer i reservoaren kan ge upphov till höga laster. Istjockleken och avstånd till stränder verkar också ha inverkan på hur höga islasterna blir. Isformation och islaster skiljer sig ganska mycket mellan exempelvis:

- ett "nödutskov" för ett säsongsmagasin där vattennivån under vintern (och därmed isen) är långt under utskovets tröskelnivå.
- ett strömkraftverk med liten skillnad mellan dämningensgräns (DG) och sänkningsgräns (SG) med små men dagliga vattenståndsvariationer där isen är i närheten av tröskelnivå hela vintern.
- en anläggning med ständigt relativt höga vattenhastigheter där ett fast istäcke inte (eller sällan) bildas.

Det är också värdefullt att beakta kunskap vi har från andra typer av anläggningar. Då det finns ett begränsat antal utskov av denna typ i kallt klimat kan det behövas en kombination av erfarenheter/kunskaper från andra utskovstyper och resonemang. Några aspekter kan nämnas:

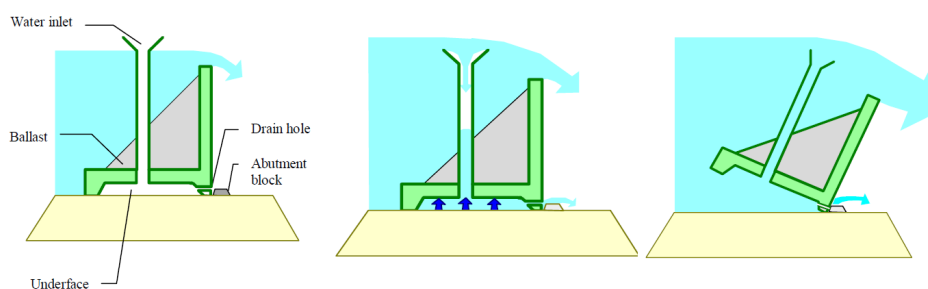
- Som en tumregel brukar man säga att en vattennivåförändring större än aktuell istjocklek bryter loss isen från dammen.
- Sprickbildning i isen är väldigt avgörande för dess hållfasthet. Borde även påverka avbördningskapacitet vid istäcke.
- På uppströmssidan av en ej uppvärmd ställucka kan man få is som är många gånger tjockare än isen på magasinet, borde vara liknande för t.ex. en *fuse gate*.
- Både labyrinth- och pianotangentutskov skall vara dimensionerade för islast. Det känns spontant som att det är görbart att spänna fast delarna för att få tillräcklig stabilitet, men kanske svårt att göra stagen inspekterbara.

Det pågår fortsatt forskning för att studera vad som styr islasters storlek mot dammar. Både labyrinth- och pianoutskov är en passiv struktur som saknar luckor, vilket torde vara fördelaktigt jämfört med ytutskov försedda med avstängningsanordning. Samtidigt är de av en tunn struktur och islaster spelar, ur stabilitetssynpunkt, en viktigare roll och bör beaktas i projekteringen.

3 Vinterförhållanden vid fuse gate

Fuse gate är en avbördningsanordning som i konfiguration liknar labyrinthutskov och funktionsmässigt associeras med både labyrinth- och pianotangentutskov. Driften av dammanläggningen Khrorobrovskaya under vinterförhållanden (två stränga vintrar) beskrivs nedan.

Benämningen *fuse gate* avser den typ av avbördningsanordning som är ett patentskyddat system designat att fungera som ett labyrinthutskov och är förknippat med stegvist utsläpp och lämpar sig som ett hjälp- eller nödutskov. Denna typ av överfallsutskov tillhandahåller ett sätt att hantera frekventa små vattenföringar genom överströmning och stora extrema flöden genom att stjälpas och förskjuta en eller flera sektioner (Figur 3.1). Det ger möjlighet att öka (maximera) reservoarvolym och/eller avbördningskapacitet (Falvey and Treille 1995, Hydroplus 2010, Bureau of Reclamation 2014).



Figur 3.1 Fuse gate utformad för att fungera som ett labyrinthutskov vid låga vattenföringar. Det blir sedan instabilt, stjälpas och förskjuts nedströms då vattenståndet i magasinet överstiger en kritisk vattennivå (Kocahan and Rodionov 2003).

En viktig faktor är den potentiella nedströmspåverkan som avbördningsen ger upphov till och som noggrant måste utvärderas. En risk är bakåtskridande erosion (*headcutting*) nedströms som undergräver strukturen under en höglödeshändelse. Det bör också noteras att, när en fuse gate förlorar sin stabilitet, kan magasinet inte hållas över sitt ursprungliga krön. Detta skulle resultera i förlust av reservoarvolym tills utskovet återinstallerats eller bytts ut. Fuse gate är tillämpliga på betong-, fyllnings- eller kompositdammar. Som extra avbördningsanordning är Terminus dammen (Figur 3.2) tillhörande U.S. Army Corps of Engineers ett typiskt fall.



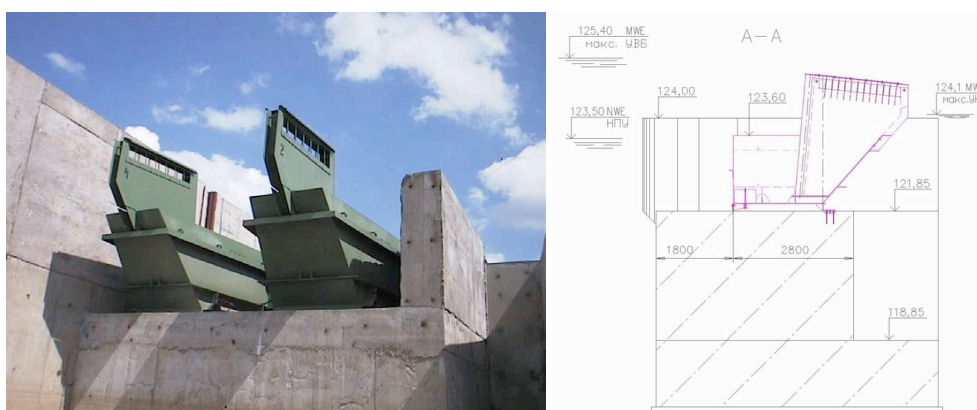
Figur 3.2 Terminus dammen, California (källa: Bureau of Reclamation 2014).

I design och även funktion liknar ett fuse gate-system både labyrinth- och pianotangentutskov. Samtliga utskovstyper har liknande krönkonfiguration och erfarenheter från fuse gates är utan tvekan mest relevant i detta sammanhang. Det finns inte mycket dokumentation av vinterförhållanden kopplade till strukturen; prototyptester utförda vid dammanläggningen Khorobrovskaya vid floden Nerl-Volzhs kaya är den mesta relevanta vi kan få (Figur 3.3) (Kocahan and Rodionov 2003). Dammen ligger cirka 13 mil norr om Moskva.

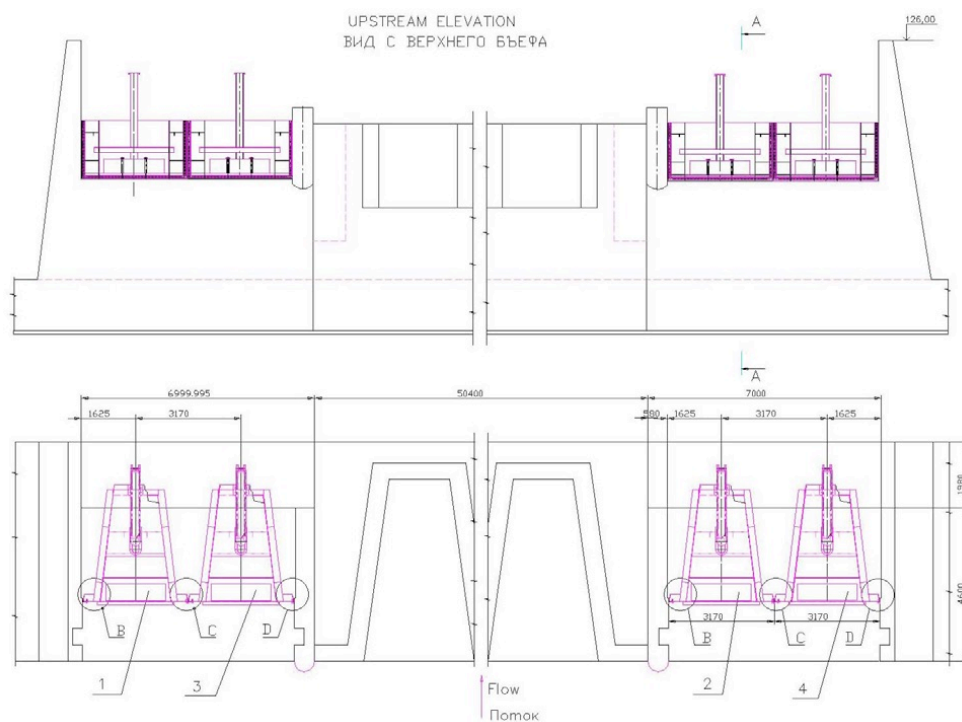


Figur 3.3 labyrinthutskov vid Khorobrovskaya dammen, hösten 2001 (Kocahan and Rodionov 2003).

Khorobrovskaya-dammen är försedd med ett utskovsparti som består av både fuse gates och ett stort antal labyrintöverfall. Omfattande fälttester tidigare utförda på fuse gate-utskovet, vilket var mycket väl dokumenterat, sammanfattas och utvärderas nedan (Hydroplus 2010). Det var företaget Hydroplus som installerade två fuse gate-utskov och utförde testerna på dem, dock inte på labyrintutskovet. Fuse gates är placerade på båda sidor av labyrintutskovspartiet. Layouten visas i Figur 3.4. Två enheter installerades på var sida om den horisontella tröskeln (6,42 m bred längs dammlinjen). Tröskeln var 4,60 m lång i flödesriktningen. En 2,15 m hög betongpelare skilde testsektionen från labyrintdelen.



Figur 3.4 Layout av två fuse gate-sektioner vid Khorobrovskaya damanläggningen. Ett labyrintutskov finns i mitten (Hydroplus 2010).



Figur 3.4 (fort.) Layout av två fuse gate-sektioner vid Khorobrovskaya damanläggningen. Ett labyrintutskov finns i mitten (Hydroplus 2010).

Fuse gates byggdes i en svetsad lådliknande konstruktion av 8 mm tjock stålplåt. Vikten av varje gate är 6 ton (Figur 3.5). Produktionsdesignen utvecklades av det specialiserade designkontoret "Moshydrostal" inom ramen för dammprojektet. Syftet är att genomföra tester under svåra klimatförhållanden under ryska vintrar och utvärdera deras beteenden.



Figur 3.5 Tillverkade Hydroplus-gates innan installation i dammen (Hydroplus 2010).

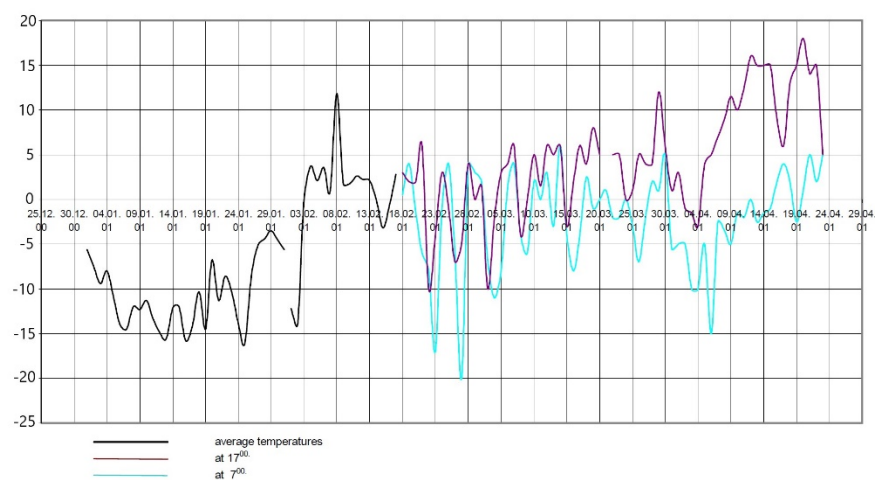
Regelbundna observationer av insatsen gjordes under perioden december 2001 till april 2002 genom dagliga besök av expertgrupper. Syftet var att utföra undersökningar, instrumentering, samt dagliga mätningar av lufttemperaturen på platsen. Tabellen nedan visar den information som samlats in under expertgruppsbesök.

Tabell 3.1 Uppgifter som samlades vid Khorobrovskaya fältstudier av fuse gates.

1)	Date and time of observation
2)	Name of surveying engineer
3)	Air temperature
4)	Weather (sunny, overcast, windy, snowy)
5)	Depth (average) of snow cover away from structures on ice surface
6)	Direction of wind (if any)
7)	Upstream water level mark (to 1 cm)
8)	Water temperature
9)	Existence of overspill through gates
10)	Icing from the downstream side (comments: icing of the gate itself, sill, pressure chamber)
11)	Thickness of ice in head water at different locations
12)	Hummocking of ice in head water (if any) – comments
13)	Type of ice in head water – comments (integral ice field, cracks, loose ice, separate blocks)

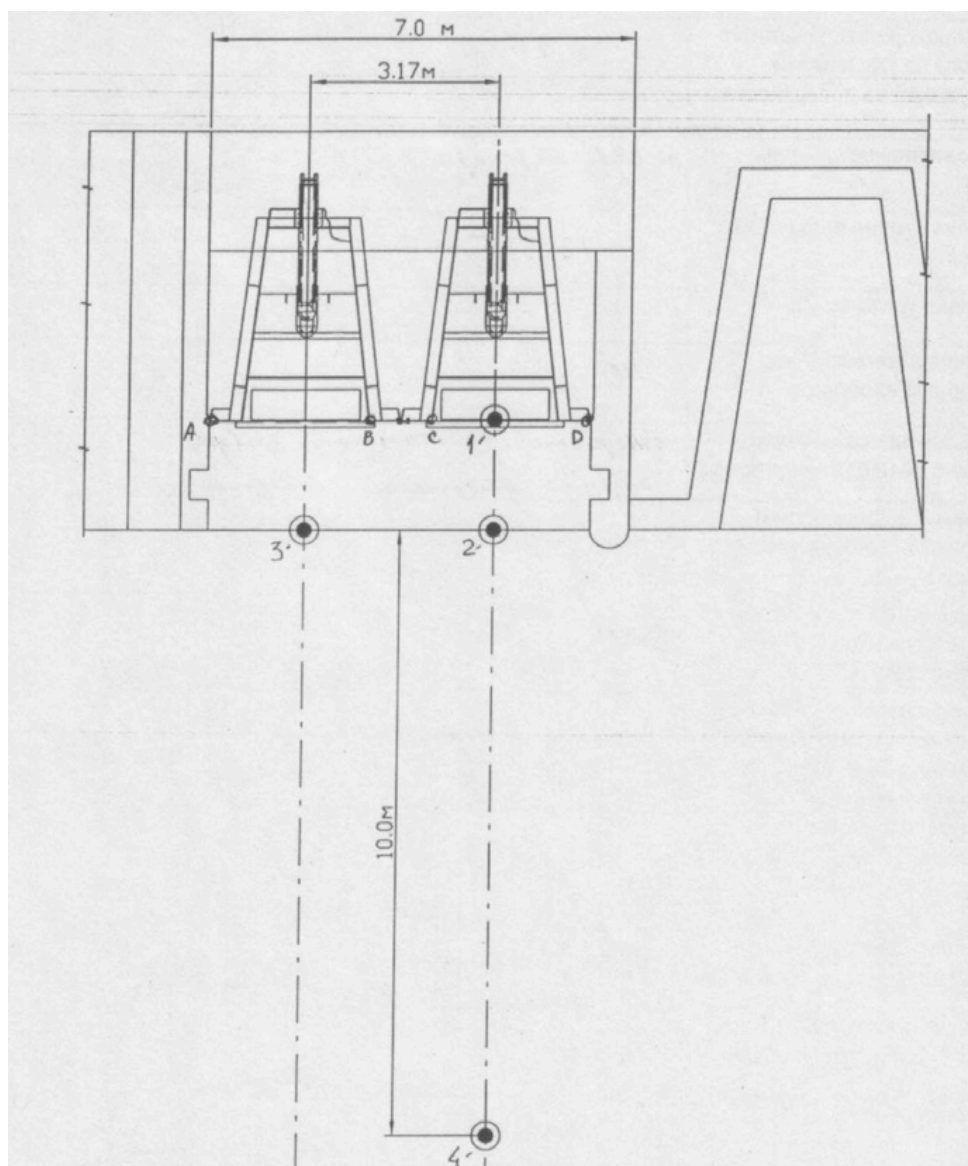
14)	Presence of leaks from drainage apertures in the foundation of the gates
15)	Presence of leaks along the perimeter of the pressure chamber
16)	Shifting of gates relative to the measuring section
17)	Presence of ice inside the gate well, ice surface marks
18)	Type of contact between the ice and the internal surface of the gate (frozen, water layer)
19)	Other information

Temperaturvariationer under testperioden visas i Figur 3.6. På grund av kraftiga temperatursvängningar mellan dag och natt visar grafen temperaturer uppmätta på morgonen och kvällen.



Figur 3.6 Temperaturfluktuationer under försöksperioden vid Khrorobrovskaya dammen (Hydroplus 2010).

Istjockleken mättes genom att ett hål med diametern 15 cm borrades i istäcket. Placeringen av mätpunkterna visas i Figur 3.7. Mätresultaten anges i tabellerna 3.2 och 3.3.



Figur 3.7 Mätning av istäckens tjocklek, mätpunkternas placering uppströms fuse gates (Hydroplus 2010).

Tabell 3.2 Istäckens tjocklek uppströms i magasinet (Hydroplus 2010).

Date of measurement	Ice thickness (cm)			
	T1	T2	T3	T4
2002-01-10	42	-	-	36
2002-01-17	44	38	42	40
2002-02-07	45	36	45	40
2002-02-08	45	36	45	40
2002-02-17	0	0	0	0
2002-02-27	1	10	10	31
2002-03-14	0	0	0	32
2002-03-21	0	0	0	0
2002-04-04	0	0	0	0

Tabell 3.3 Istäckens tjocklek inom 3 cm ifrån fuse gates (Hydroplus 2010).

Date of measurement	Ice thickness (cm)
2001-12-16	20
2001-12-22	35
2001-12-31	40
2002-01-10	25
2002-01-16	20
2002-01-17	20
2002-01-24	7
2002-02-07	0
2002-02-08	2
2002-02-14	2
2002-02-17	2
2002-02-27	10
2002-02-28	6
2002-03-14	0
2002-03-21	2
2002-04-04	0

Även uppströmsvattenstånden registrerades. Tillsammans med avbördningsdata anges de i tabell 3.4. Avbördningen skedde först över pianotangentutskovet och sedan också över fuse gates från den 14 februari 2022.

Tabell 3.4 Uppströmsvattenstånd och vattenföringar under testperioden (Hydroplus 2010).

Observation data	Reservoir water level (m)	Flow discharge (m ³ /s)
2001-12-16	123.55	2.87
2001-12-22	123.56	3.77
2001-12-31	123.56	3.77
2002-01-17	123.57	4.75
2002-02-07	123.61	9.36
2002-02-08	123.61	9.36
2002-02-14	123.62*	10.67
2002-02-17	123.63	12.35
2002-02-27	123.62	10.65
2002-03-14	123.65	15.3
2002-03-21	123.70	18.8
2002-04-04	123.70	18.8
2002-04-08	123.79	42.1

* beginning of overspill through the Hydroplus gates.

Horisontella rörelser i flödesriktningen mättes under perioden. Tvärgående markörer, skurna i fuse gates övre kant, fungerade som mätpunkter. De var förbundna med ställinor. Markeringar skars också på utskovsöppningens pelare (sidoväggarna). Rörelser detekterades genom att mäta avståndet mellan ställinorna och de tvärgående markörerna. Resultaten visade att rörelserna var sporadiska och inom ett område av 0–1,0 mm. Detta förklaras förmodligen av dåligt mätnoggrannhet och svåra väderförhållanden. Men man kan konstatera att rörelserna i fuse gates var obetydligt små under hela försöksperioden.

Övervakning av fuse gate-strukturen utfördes veckovis under vintern 2001/2002. Perioden med minusgrader började i mitten av november. Andra veckan i december sjönk temperaturen till –20°C. Mellan mitten av december och början av januari fluktuerade den inom intervallet –10 till –23°C. Under denna period var istjockleken 51 cm i reservoaren och 61 cm vid strukturen som var ordentligt fryst.

Den horisontella betongtröskeln nedströms täcktes med is upp till 10 cm tjock, vilket också resulterade i isbildning på nedströmssidan av fuse gates.

I slutet av 1:a veckan och under hela 2:a veckan i januari varierade temperaturen mellan -29 och 2°C. Under 2–3 dagar skedde ett kraftigt temperaturfall ner till -23°C. Fram till mitten av februari fluktuerade temperaturen runt 0°C inom intervallet -4 till 4°C. Medeltemperaturen i februari uppgick till 2 till 4°C.

Figur 3.8 visar situationer med istäcken under testperioden. Det går ej att lista ut när fotona var tagna.



(a)



(b)

Figur 3.8 I situation vid fuse gate-strukturen under fältförsök 2001–2002 (Hydroplus 2010, Chapuis 2018, Kocahan and Rodionov 2003).

Trots svåra driftsförhållanden (stora temperaturfluktuationer genom fryspunkten) observerades ingen förskjutning eller märkbar deformation av fuse gates. När temperaturen gick över nollgrader och varade där drygt en vecka, smälte all is på nedströmsvattensidan och dräneringssystemet började fungera igen. En remsa med fritt vatten bildades på uppströmssidan, vilket ledde till separation av fuse gates från istäcket.

Situation när temperaturen översteg nollgrader och varade drygt en vecka kan beskådas i Figur 3.9.



Figur 3.9 Situation med is och istäcken när plus-temperaturen varade drygt en vecka och isen började smälta (Hydroplus 2010, Kocahan and Rodionov 2003).

Efter avbördning vintern 2001–2002 noterades inget synligt läckage vid inspektioner av tätningarna mot betongtröskeln. Övervakningen fortsatte under vinterperioden 2002–2003. Trots två stränga vintrar var samtliga fuse gates i gott skick och uppförde sig som förväntat när det gäller både strukturell stabilitet och avbördningsbeteenden.

4 Isproblematik vid labyrinth- och pianotangentutskov

För att hitta säkerhetsrelaterade frågor som berör labyrinth- och pianotangentutskov i kallt klimat har en mängd tidskrifts- och konferensartiklar granskats. Litteraturgenomgången visar att otaliga publikationer behandlar de grundläggande frågeställningar som rör isbildning och dess egenskaper i floder och reservoarer; de som är kopplade till denna typ av utskov och dyl. är tyvärr inte många. Det är säkert att många incidenter inträffat, men det räcker inte till en publikation som en artikel eller för att göra en presentation på en konferens. Någon typ av dokumentation av torde finnas hos dammägare men den torde inte sökbar.

Tre internationella konferenser har hållits som avhandlar både labyrinth- och pianotangentutskov:

- Labyrinth and Piano Key Weirs – PKW 2011, Liège, Belgien
- Labyrinth and Piano Key Weirs II – PKW 2013, Paris, Frankrike
- Labyrinth and Piano Key Weirs III – PKW 2017, Qui Nhon, Vietnam.

Sammanlagt presenteras 95 bidrag som behandlar bl.a. avbördningsförmåga, geometriska förbättringar, luftinblandning, energiomvandling, drivgods och verktyg (skaleffekt, modellförsök och CFD). Inte ett enda bidrag berör förvånande nog utskovens beteenden under vinterförhållanden.

Kontakter har tagits med dammägare och konsultingenjörer i ett antal länder som har erfarenheter inom driften av labyrinth- och pianotangentutskov. I Norge finns det cirka 10 st labyrinthutskov, inklusive Forsland kraftverk, Deg dammen, Store Slindvatn, Lauvsnes nedre, Salsbruket, Nedre Fiskumfoss (Figur 4.1), Dam Tesse, Dam Svartevatn och Saggrendadammen – Kongsberg.



Figur 4.1 Labyrinthutskov i Nedre Fiskumfoss kraftverk (foto Aslak Løvoll, Norconsult AS).

Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) Seksjon for damsikkerhet, några dammägare inklusive NTE och Småkraft, Norconsult i Sandvika och NTNU kontaktas för information om labyrintutskovens egenskaper under vinterförhållanden. Kommentarer sammanfattas nedan.

- Väl lämpad som avbördningsanordning på platser med begränsat utrymme, till exempel smal dalgång, svåra grundförhållanden mm.
- Lämplig för att förhindra/minska översvämning.
- Genom att bygga labyrintutskov kan man undvika luckor, vilket kommer att förenkla driften (t.ex. vid Salsbruket).
- Underhåll är minimalt, även under vintern.
- Om ett vanligt utskov (med luckor) leder till 1 m höljning i uppströmsvattenstånd kan ett labyrintutskov reducera den till t.ex. 0,5 m, vilket innebär att det vid samma överfallshöjd kan avbörda mycket större flöden.
- Trevlig att titta på, som en skulptur.
- Luftning är nödvändig för att förmildra buller från fallande vattenstrålar och resulterande vibrationer.
- Drivgoods framför labyrintutskov bör undersökas för en specifik anläggning. Drivgodsets form bör ses över.
- Samtliga labyrintutskov finns i kalla regioner. Is och snö på vintern torde inte utgöra något problem. Det är dock oklart om de används för avbördning under vintern och om avbördningen sker med ett isfritt magasin eller med istäcke.

För Deg dammen (Figur 4.2) har följande kommentarer erhållits från dammägaren Sira Kvina. Labyrintöverfallet vid Deg färdigbyggdes 2016, och därmed erfarenheter sedan dess. Betongkonstruktionen (labyrinten) byggdes för att klara islaster enligt NVEs föreskrifter. Vi har hittills goda erfarenheter av vinterdrift. Men vi inte har haft några tappningar under vintern.



Figur 4.2 Deg-dammen, Norge (källa: NTNU).

I Norge har det inte rapporterats några incidenter med labyrintutskoven under vintern. Det har upplevts att de är pålitliga strukturer, kanske något mer pålitliga än konventionella utskov med luckor.

Électricité de France (EDF) har sedan 2006 byggt drygt 10 pianotangentutskov (Laugier & Vermeulen 2017). Det betyder att de har mer än 15 års erfarenhet av drift. EDF-personal kontaktas angående vinterförhållanden. Deras kommentarer är följande.

- Den maximala överfallshöjden på dessa utskov ligger i ett intervall mellan 0,5 m och 1,5 m, med en specifik avbördningskapacitet upp till 10 m³/s/m (typiskt vid 1,0 m överfall), alltså två till fyra gånger bättre än ett linjärt konventionellt överfall. Pianotangentutskovet vid Rekord dammen är ett undantag, med ett 4,4 m överfall.
- Stabilitetsanalysen inkluderar belastning av jordbävning, iskraft och förspända ankare för att förbättra stabiliteten. Vid design av Gloriettes pianotangentutskovet tillämpas en 50 cm istjocklek och en last på 510 kN/m².
- Avbördning av isflak behandlas som drivgods av träd i studien. Isens maximala dimensioner som kan inträffa bör undersökas.

Hos EDF har det inte observerats några skador eller incidenter i form av bl.a. läckage, deformation och onormala rörelser hos pianotangentutskov under vinterförhållanden. Liknande svar har tillhandhållits från bl.a. USA, Tyskland och Schweiz som också byggt pianotangentutskov. Ett stort antal labyrintutskov har funnits länge i USA. Bl.a. har publikationer från årsmöten från USSD (U.S. Society of Dams), ASDSO (Association of State Dam Safety Officials), ASCE och ICOLD gått igenom och beskrivning av deras vinterförhållanden är få.

Det kanske mest övertygande beviset är den fältstudie som gjorts på Khrorbrovskaya-dammen. Dess fokus var att utvärdera beteendet under vinterförhållanden hos fuse gate-utskoven som Hydroplus tillhandahåller. Den beskriver emellertid indirekt situationen för labyrintutskovspartiet mellan de två fuse gate-segmenten (Kocahan and Rodionov 2003, Hydroplus 2010, Chapuis 2018).

Figur 4.3 visar läget i ett tidigt skede av vintern 2001. Ett istäcke bildas på en höjd omedelbart ovanför labyrintens krön. På grund av det strömmande vattnet hålls en stor del av bräddkrönet isfritt och vatten avbördas över det.



Figur 4.3 Labyrintutskov vid Khrorbrovskaya dammen, med isläggning och vid avbördning i början av vintern 2001 ((Hydroplus 2010, Kocahan and Rodionov 2003).

Figur 4.4 visar istäcket mitt under vintern 2001/2002. Fuse gate-utskovet är helt täckt med is och snö. Inget vatten rinner över den. För labyrinten sträcker sig istäcket till och med utanför strukturen i flödesriktningen. Istäcket påverkar strömningen men avbördning är fortfarande möjlig.



(a)



(b)

Figur 4.4 Issituation vid fuse gate- och labyrinthutskov under fältförsök 2001–2002 (Hydroplus 2010, Chapuis 2018, Kocahan and Rodionov 2003). Det är oklart när foto (a) är taget men foto (b) är från 2002-01-04.

När temperaturen överstiger noll grad börjar isen så småningom smälta vid utskoven, vilket kan beskådas i Figur 4.5. Ismassor faller även i vatten nedströms och blir borttransporterade. Det noteras också att det verkar fastna mer is på fuse gate-utskovet, vilket torde bero på att det är tillverkat av stål, medan labyrinthen av betong.



(a)



(b)

Figur 4.5 Situation med is och istäcken när plustemperaturen varade drygt en vecka och isen började smälta (Hydroplus 2010, Kocahan and Rodionov 2003).

Med mer än två decenniers drift under stränga vinterförhållanden har labyrintutskovet vid Khrorbrovskaya-dammen fungerat som förväntat och inget onormalt har observerats.

5 Avbördningskapacitet vid närvaro av istäcke

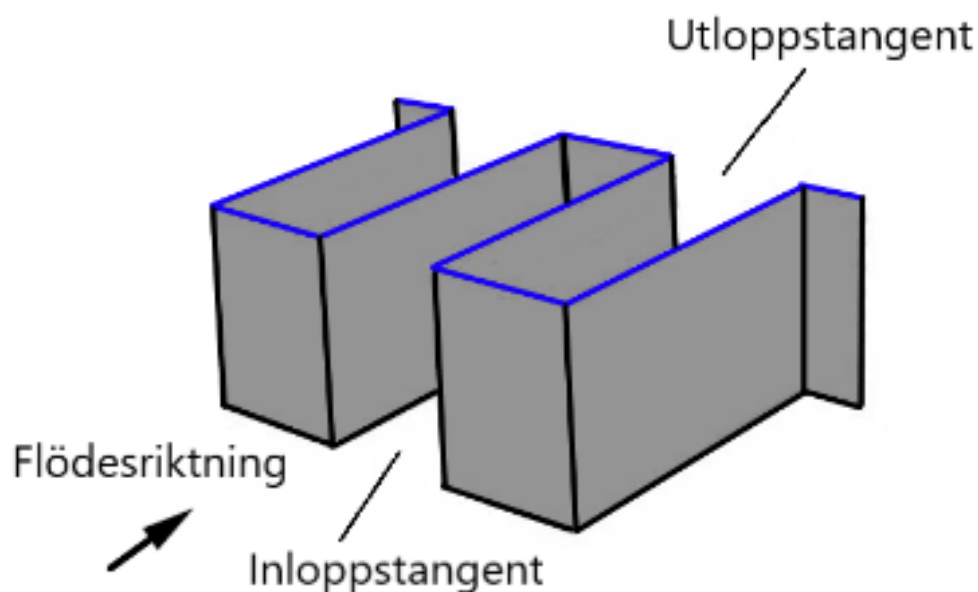
Hur mycket vatten kan ett labyrint- eller pianotangentutskov avbörda i närvaro av istäcke om det skulle inträffa en högflödessituation? Det är en fråga många ofta undrar över. CFD-beräkningar har utförts på ett rektangulärt labyrintutskov i vilka effekter av istäcken i olika utföranden på avbördning undersöks och jämförs.

Ett labyrint- eller pianotangentutskov är vanligtvis konstruerad på ett sådant sätt att dess krönhöjd är något över det högsta legala vattenståndet i magasinet. En frågeställning som ofta berör avbördnings säkerheten är utskovets kapacitet under vintertiden. Ett mycket kallt väder som under en lång period håller i sig leder till att ett tjockt istäcke bildas som sträcker sig ut på labyrintutskovet. Detta innebär att istäcket ligger något under krönhöjden. Om en flödessituation inträffar sker avbördningen över istäcket och sedan över utskovskrönet. Om magasinnivån ligger långt under krönnivån torde det bildade istäcket påverka avbördningskapaciteten obetydligt mycket.

Istäcket fungerar som en förhöjd älvbotten och leder till en förändring i inflödesmönstret uppströms utskovet och även en modifiering av utskovsgeometrin som avviker från dess ursprungliga design. Omfattningen av minskning i avbördningskapacitet behöver kartläggas. CFD-beräkningar utförs för att klargöra dess kapacitet vid närvaro av ett istäcke och att fastställa reduktionen i avbördningskapacitet. Detta är användbart för både utskovsdesign och drift. Ett labyrintutskov har valts, detta på grund av att detaljerade experimentella resultat finns tillgängliga för verifiering av CFD-modellen.

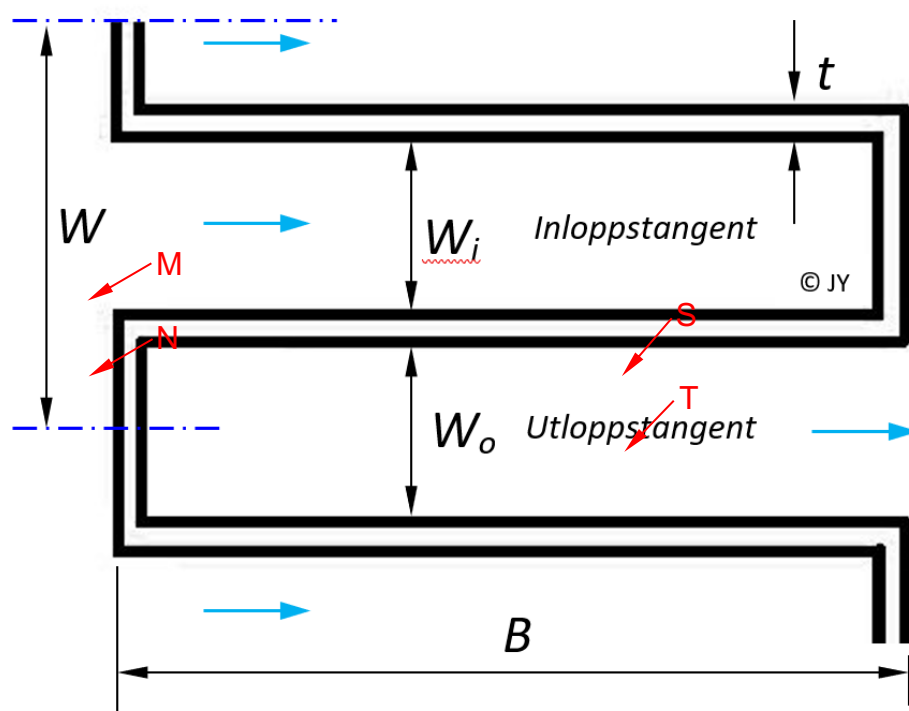
Randvillkor för CFD-modelleringen och slutsatser sammanfattas nedan.

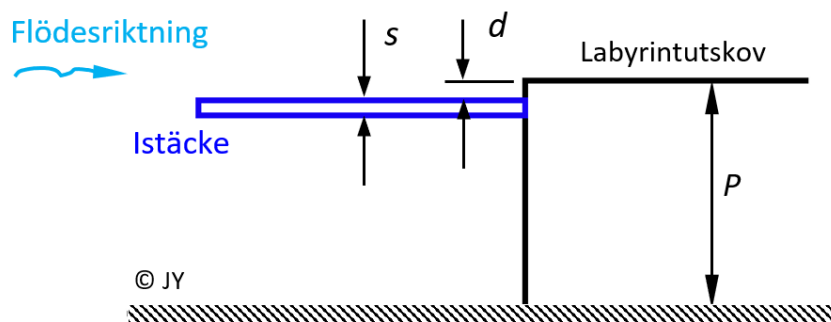
1. Labyrintutskovets geometri och avbördningskapacitet är baserade på labbförsök utförda av Ben Said and Ouamane (2022) vid vattenbyggnadslaboratoriet, Biskra University, i vilka flera labyrintutskovsvarianter undersöktes.
2. Det valda labyrintutskovet är rektangulärt i planform. Två labyrintenheter används i beräkningarna (Figur 5.1).



Figur 5.1 Två enheter av det valda labyrintutskovet i CFD beräkningar.

3. Definitionen av parametrar och dess storlekar anges i Figur 5.2 samt Tabell 5.1. W_i = inloppstangentens bredd, W_o = utloppstangentens bredd, t = väggens tjocklek, W = en enhets bredd på ett labyrintutskov ($= W_i + W_o + 2t$), P = labyrintutskovshöjd, B = labyrintutskovets längd i strömningsriktningen och L = krönlängd ($= 2B + W_i + W_o$). Istäcket är $s = 1$ cm tjock och dess överkant ligger $d = 1$ cm under labyrintutskovets krönnivå, vilka är rimliga antaganden i förhållanden till prototypssituationer.





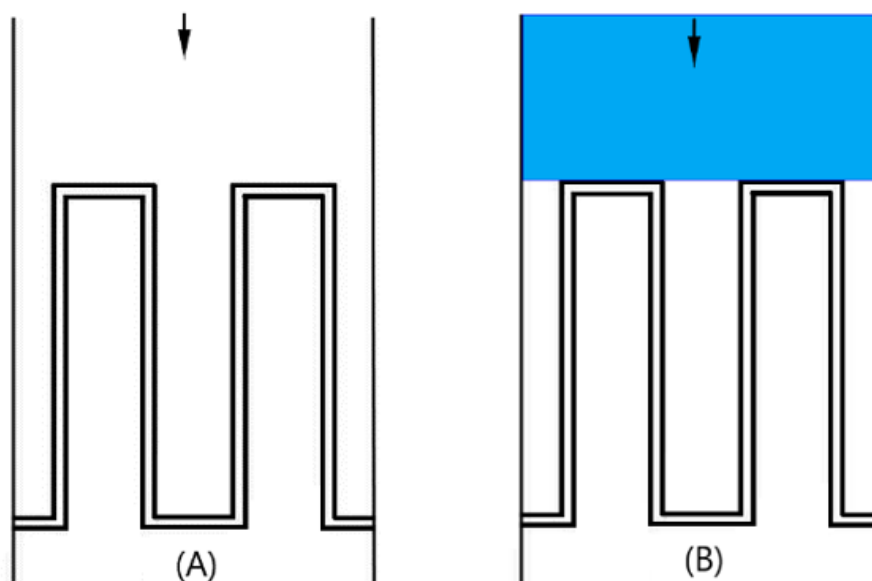
Figur 5.2 Parameterdefinition av labyrintutskov och istäcke.

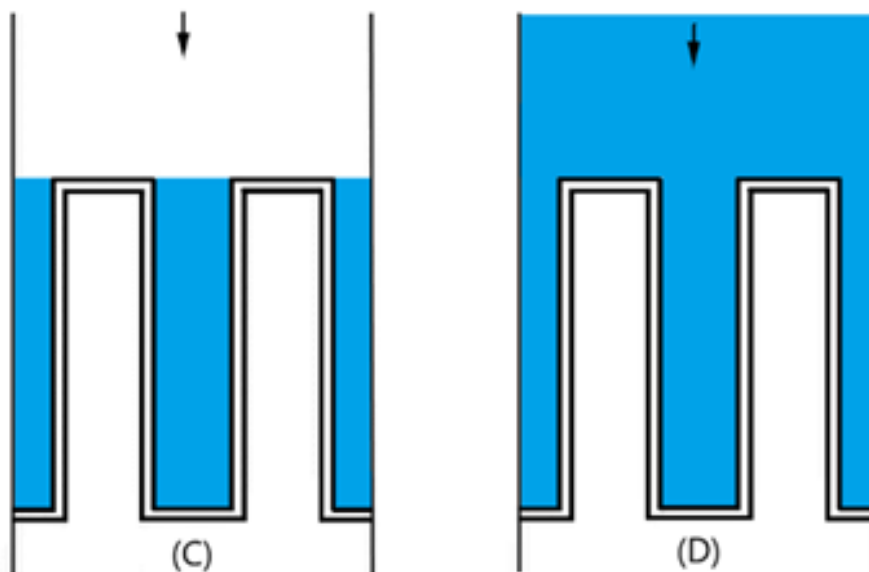
Tabell 5.1. Parametrars storlekar av labyrintutskov.

Parameter	B (cm)	W_i (cm)	W_o (cm)	t (cm)	P (cm)	W (cm)	L (cm)
	25.0	7.3	7.3	0.2	15.0	15.0	64.6

4. Vattenföringen in CFD modelleringen uppgår till cirka 45 liter/s, vilket innebär att flödet över en labyrintutskovsenhet (Q) blir cirka 22,5 liter/s som högst.

5. Figur 5.3 visar de fyra situationer som ingår i undersökningen. Layout A avser utan istäcke och utgör ett referensfall. I layout B bildas ett istäcke uppströms labyrintutskovet, men inte i inloppstangenterna. I layout C bildas eller kvarstår ett istäcke endast i inloppstangenterna, och magasinet är isfritt. I layout D täcks hela vattenytan med is, inklusive inloppstangenterna.



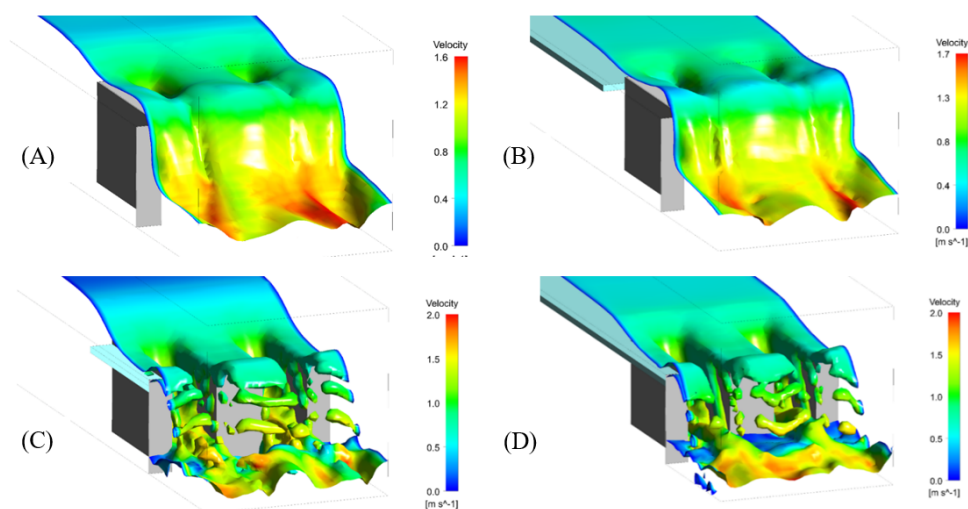


Figur 5.3 Fyra situationer som undersöks i CFD modellering - layout A utan istäcke utgörandes ett referensfall; layout B med ett istäcke uppströms, men inte i inloppstangenterna; layout C med istäcke endast i inloppstangenterna (isfritt magasin) och layout D med heltäckande is på vattenytan inklusive inloppstangenterna.

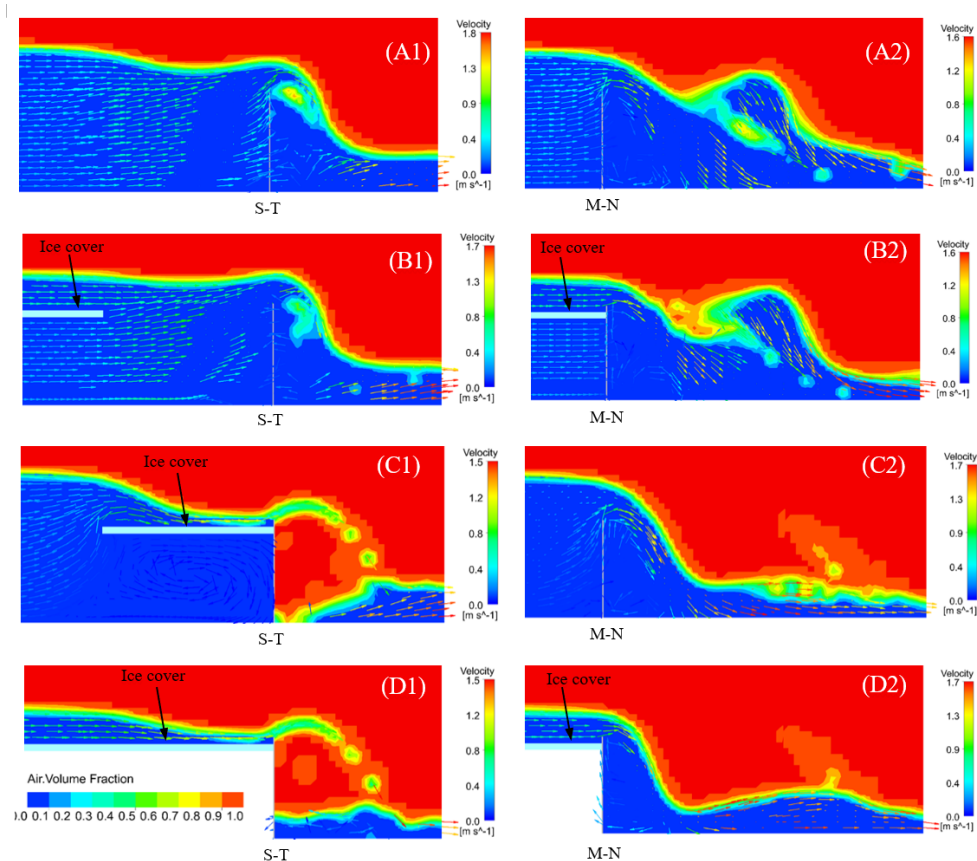
6. ANSYS FLUENT programvaran används för beräkning av flöden över labyrintutskovet (ANSYS 2015). Den s.k. Volume of Fraction (VOF) modellen används i beräkningen av tvåfasströmning bestående av vatten och luft.

7. Fem uppströmsvattenstånd (flöden) simuleras, $H/P = 0,13, 0,31, 0,47, 0,71$ och $0,90$.

För ett utvalt uppströmsvattenstånd, $H/P = 0,47$, visar Figurer 5.4 och 5.5 vattenytans läge över labyrintutskovet respektive strömningsmönster för de fyra layouterna. Andra flödesfall skiljer sig något men inte markant.

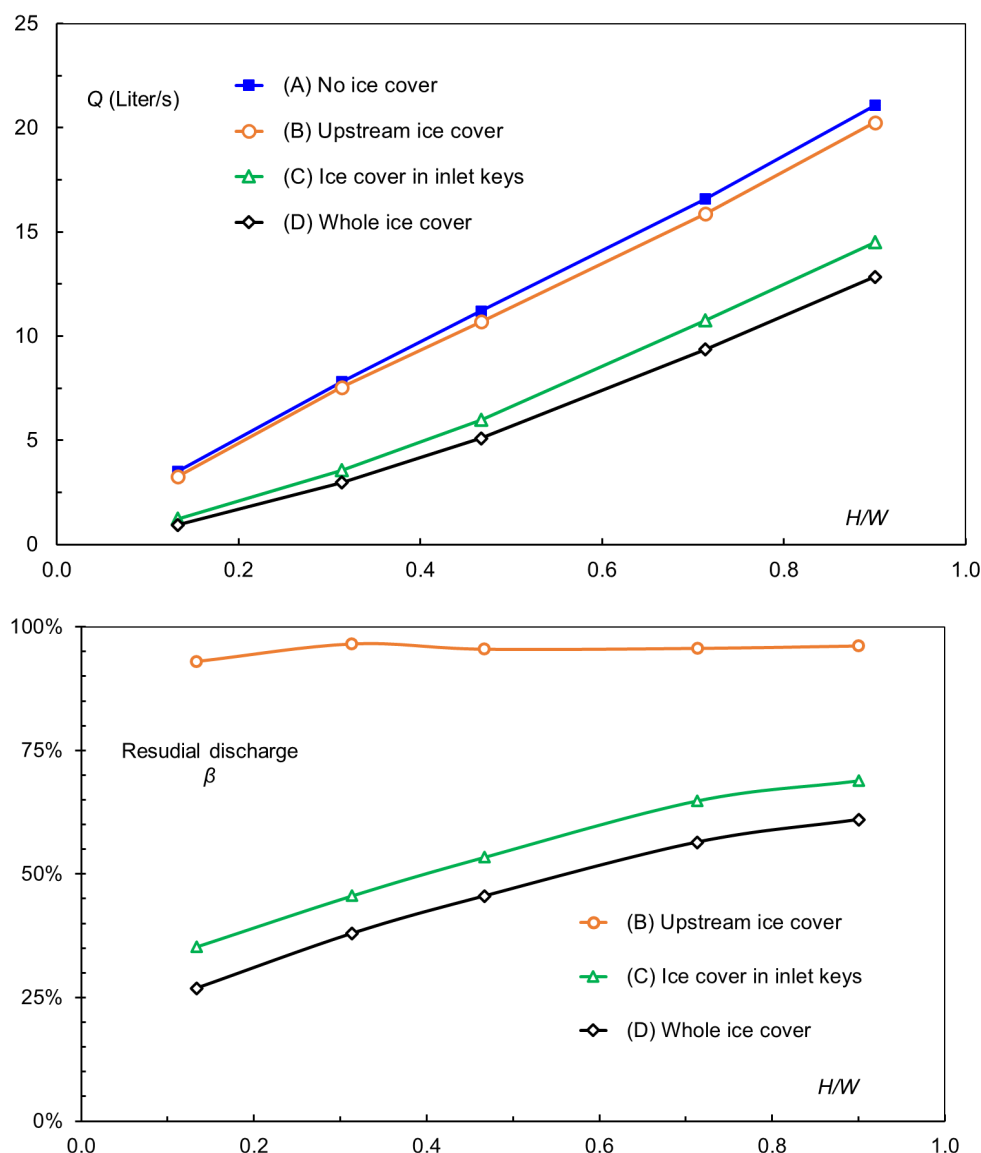


Figur 5.4 Avbördning över labyrintutskov - ett fågelperspektiv av vattenytans lägen över de fyra layouterna (A, B, C och D) vid $H/P = 0.47$ (profilerade av vattnets VOF = 0.70).



Figur 5.5 Avbördning över labyrintutskov - strömningsmönster av de fyra layouterna (A, B, C och D) vid $H/P = 0.47$, plottat längs mittplanen av inloppstangenterna (A1, B1, C1 och D1) och utloppstangenterna (A2, B2, C2 och D2). Färgskalan indikerar hastighetens storlek.

Beräkningsresultat av avbördningskapacitet presenteras och jämförs i Figur 5.6. En dimensionslös parameter β definieras, där β (%) = avbördning vid istäcke delad med avbördning utan istäcke (layout A).



Figur 5.6 Avbördning över labyrintutskov - jämförelser av avbördningsförmåga med och utan istäcke.

Av beräkningarna framgår följande slutsatser.

CFD-resultaten visar att istäcket i reservoaren (layout B) leder till en obetydlig minskning av avbördningskapaciteten. Nästan oberoende av magasinnivå är flödesminskningen ~5% ($\beta = \sim 95\%$).

För layout C är dock restkapaciteten 35–70 % av layout A; för layout D är dess kapacitet ~8% lägre än i layout C. Vid låga reservoarnivåer är minskningen i avbördning stor och avtar vid ökande vattenföring eller uppströmsvattenstånd.

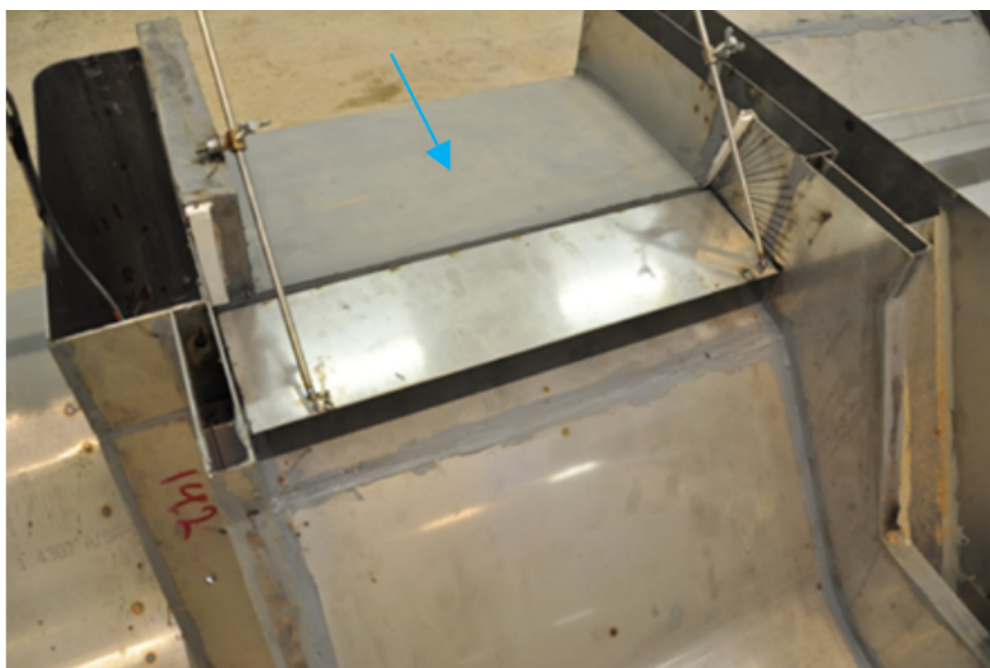
För att bibehålla avbördningskapaciteten av ursprunglig labyrintutskovsdesign är det tillräckligt att ta bort istäcket i inloppstangenterna; det kvarstående istäcket i reservoaren har försumbara effekter.

Studien är baserad på ett labyrintutskov, men slutsatsen torde gälla även fuse gate-utskov och pianotangentutskov.

6 Avbördning av isflak

Kan isflak passera ett labyrinth- eller pianotangentutskov i samband med en vårflod? Vad krävs för att lyfta över dem? Inte mycket prototypdokumentation har påträffats. Studier av isflak över denna typ av utskov är från labbmiljö.

Vissa dammanläggningar i landet förses med ett isutskov. Till exempel har ett nytt isutskov med nedåtgående planlucka projekterats för en anläggning i Göta älv. En liknande lucka har byggts i ett dammutskov i Västerdalälven (Figur 6.1). Inverkan av isflak vid ett labyrinth- eller pianotangentutskov på avbördning bör kartläggas. Krönet på ett sådant utskov ligger ofta en aning över dämningens gränsen (DG) och avbördningen sker med överdämning.



Figur 6.1 Undersökning av utskovsfunktion för avbördning av is och drivgods i modellen (foto James Yang).

På grund av isens rörelser förorsakade av bl.a. temperaturändring och vattenytans variationer spricker det enhetliga isfältet i ett magasin upp i isflak, vilkas diameter kan vara från några decimeter upp till flera meter. Drivande is i strömmande vatten kan naturligtvis ge betydande laster på främst utskovspelare när det passerar ett ytutskov med lucka. Avbördning av isflak sker på våren eller försommaren. Figur 6.2 visar avbördning vintertid över pianotangentöverfallet vid Escouloubre-dammen. Trots kylan hölls magasinet fritt från is, vilket underlättade avbördningen.

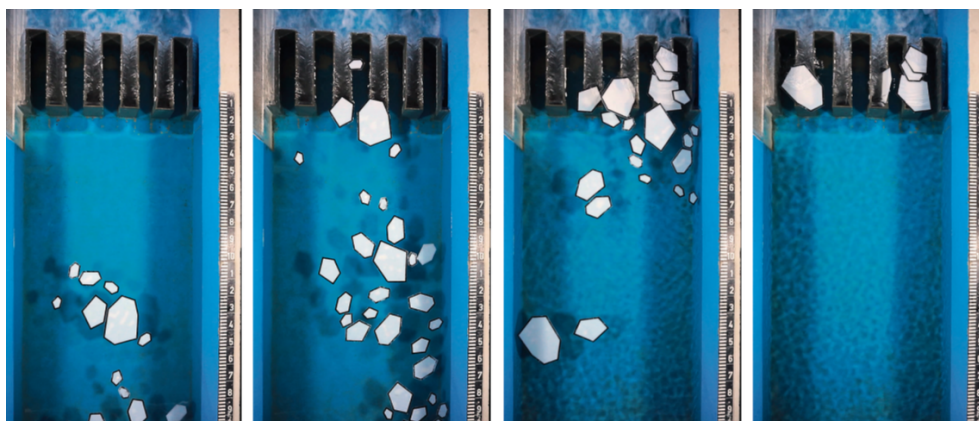


Figur 6.2 Avbördning under vinter genom pianotangentutskov vid Escouloubre-dammen, Frankrike (källa EDF; Erpicum, et al. 2013).

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), Gebhardt et al. (2017) och Herbst et al. (2020) jämfördes ett trapetsformat och ett rektangelformat labyrinthutskov med avseende på ansamling av drivis vid överfallen (Figur 6.3). I försöken är bredden på labyrinthutskovets enhet (cykel) cirka $W = 40$ cm och is av plastskiva används, med längden 10–34 cm, densiteten $\rho_{is} = 0.9$ och tjockleken $s = 0,5$ cm.

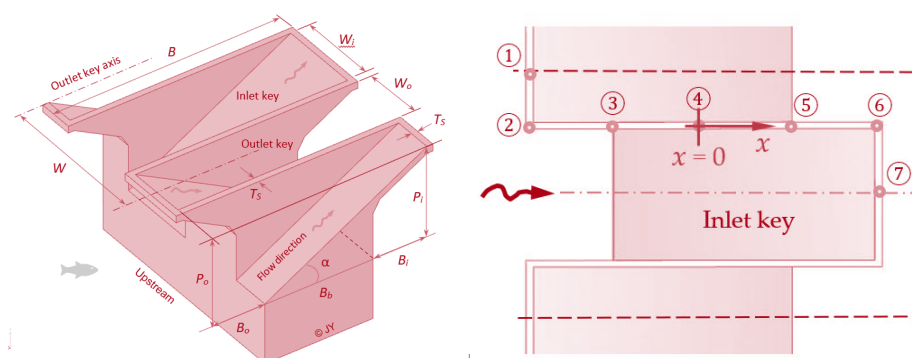
Det konstaterades att beteendena var beroende av faktorer som vattenföring, isens koncentration, storlek och form. Det observerades även att resulterande ökning i uppströmsvattenstånd var begränsad och majoriteten av flytande is passerade överfallen med ett ökat flöde. Vid dimensionerande vattenföring fanns endast ett fåtal stora isflak kvar på överfallens krön. Resultaten visar att det trapetsformade labyrinthutskovet brukar ge lite högre nivåökning än den rektangulära varianten men skillnaden ej är stor.

I försöken är isens storlek mindre än bredden på labyrinthutskovets enhet (W), vilket är en nackdel. I prototyper kan den vara större (på EDFs anläggningar är $W = 3,0$ – $5,0$ m). Dessutom används vattenföring som ett mått. I förhållanden till isens tjocklek (s) borde överfallshöjden (H) vara ett mer realistiskt mått som styr isens beteenden. Försöken redovisar inte heller om flytande is kan fastna i inloppstangenterna.



Figur 6.3 Avbördning av isflak över ett rektangelformat labyrintutskov (Herbst et al. 2020).

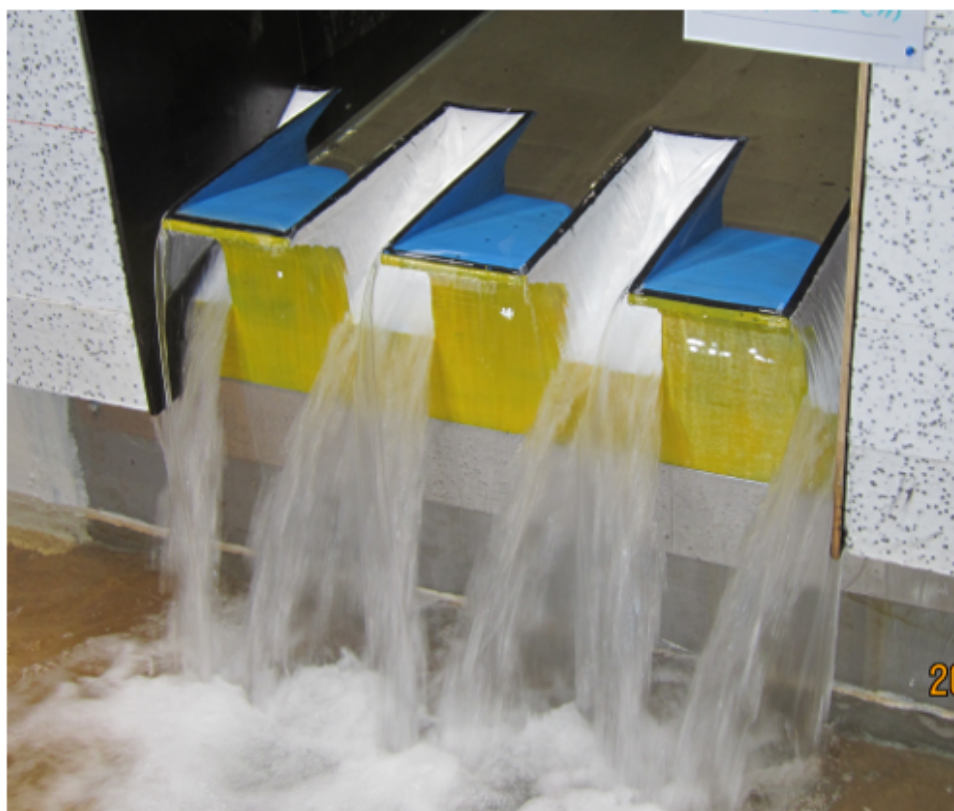
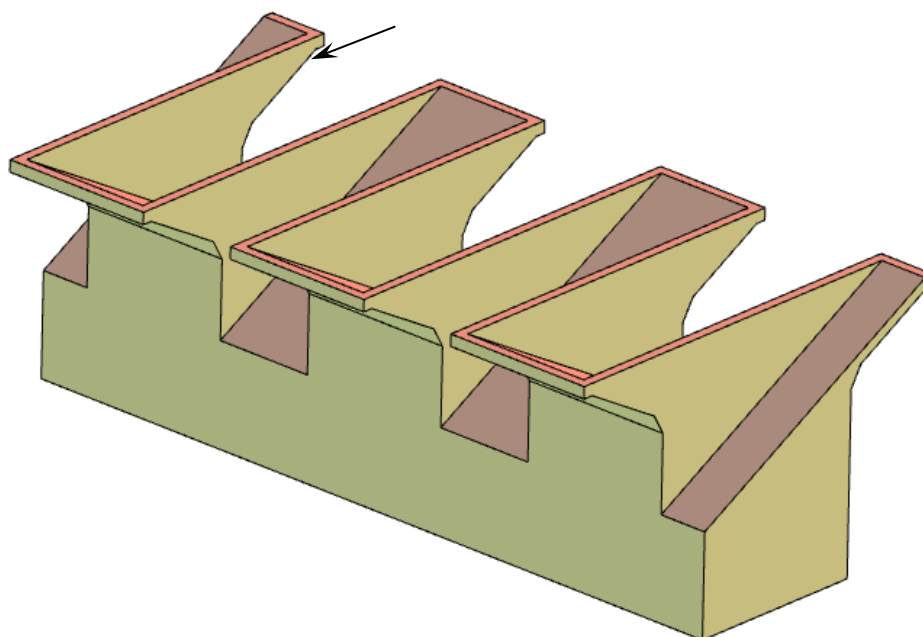
Under 2023 utförs rännförsök med pianotangentutskov av olika layouter på vattenbyggnadslaboratoriet i Älvkarleby. Huvudsyftet med försöken är att förbättra utskovsdesignen och undersöka dess avbördningskapacitet. I förhållanden till överfallshöjd mäts vattendjup (h) på krönet för att förklara isens beteenden över utskovet. Figur 6.4 visar ett pianotangentutskovs styrande parametrar och mätpunkter på krönet. Pianotangentutskovets dimensioner som används i försöken sammanfattas i Tabell 6.1. Tre enheter tillverkas och monteras flush med nedströmsänden av en ränna (Figur 6.5).



Figur 6.4 Pianotangentutskov – vänster, definition av parametrar; höger, mätpunkter på pianotangentutskovets krön. Punkter ① och ⑦ är på utloppstangentens respektive inloppstangentens centrumplan.

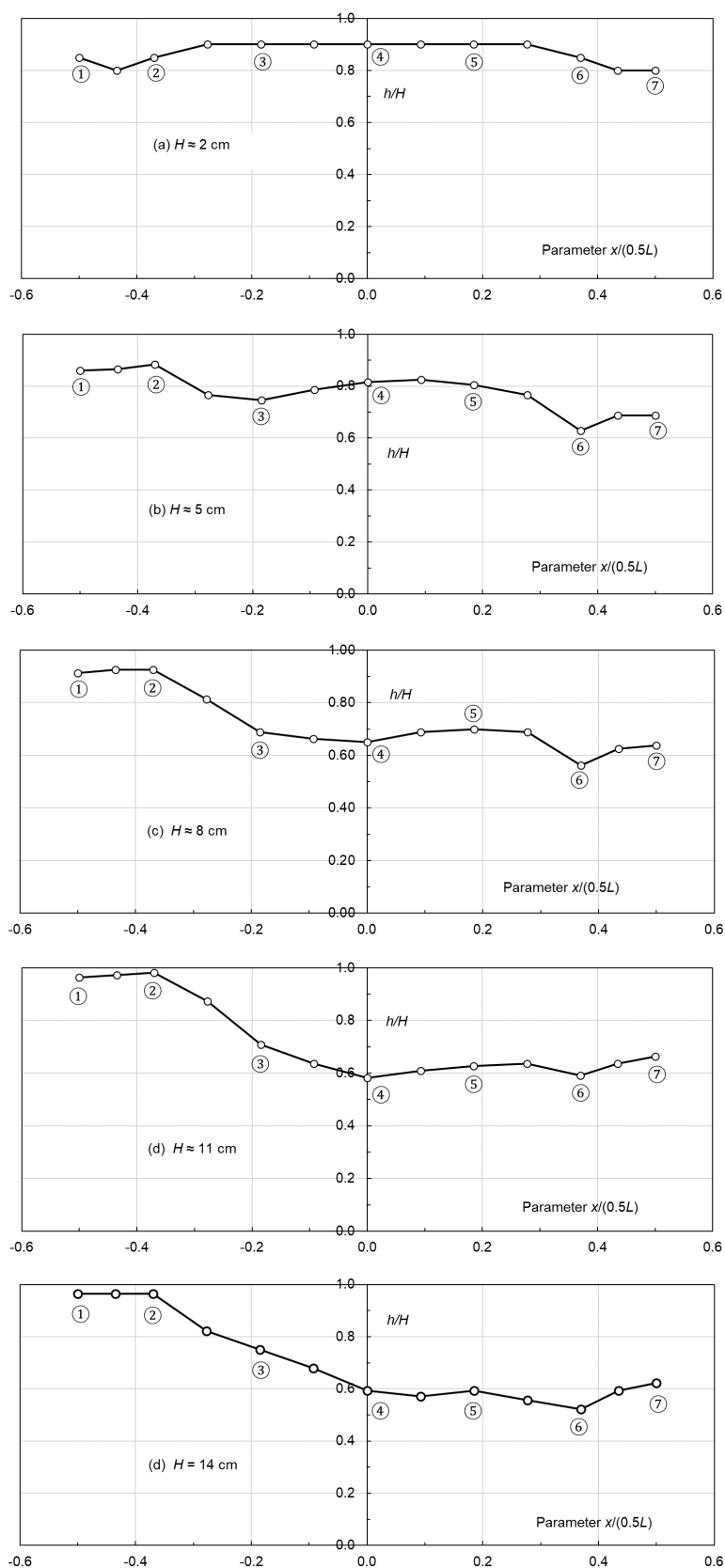
Tabell 6.1 Dimensioner av ett pianotangentutskov som undersöks i Älvkarleby 2023.

W_i (cm)	W_o (cm)	B_i (cm)	B_o (cm)	B_b (cm)	B (cm)
20,0	15,00	13,50	13,50	27,00	57,00
T_s (cm)	P_i (cm)	P_o (cm)	P (cm)	W (cm)	α (°)
1,5	22,50	22,50	37,50	38,00	29,05



Figur 6.5 Pianotangentutskov (tre enheter) som under 2023 testades i Älvkarleby. En enhet består av en inlopps- och en utloppstangent.

I försöken uppgår vattenföringen i rännan till cirka 315 liter/s och fem uppströmsvattenstånd undersöks, motsvarande $H \approx 2,0, 5,0, 8,0, 11,0$ och $14,0$ cm. Variationen av h/H längs krönet från punkt ① och ⑦ anges i Figur 6.6.



Figur 6.6 Modelförsök med pianotangentutskov – resultat av vattendjup (h) längs pianotangentutskovets krön vid olika överfallshöjder (H). Punkt 4 motsvara placeringen $x = 0$.

Utgående från försöken kan följande slutsatser dras.

Testerna visar att vid låga flöden ($H < 3$ cm) är vattennivån längs sidoväggen (mellan punkterna ② och ⑥) nästan horisontell. Med en ökning i vattenföring sjunker vattendjupet nedströms punkt ②, med ett betydande fall vid höga flöden. Vattendjupet vid punkt ② är det största och vid punkt ⑥ det lägsta, vilket gäller för alla undersökta högfödesfall. Flödesaccelerationen bildar en "puckel", som på ryggen av en kamel. Med en ökande överfallshöjd rör sig puckeln längre nedströms på krönet. Vid $H \geq 11$ cm är puckeln inte så tydlig längre.

Isens densitet $\rho_{is} \approx 0,91$, vilket innebär att den höjd av isen som ligger under vatten är $\rho_{is}/\rho_{vatten} \cdot s = 0,91s$. För att isen ej skall fastna på krönet krävs att det lägsta krönvattendjupet

$$h_{min} > \frac{\rho_{is}}{\rho_{vatten}} s$$

Längs nedre delen av krönet blir vattendjupet cirka hälften av överfallshöjden vid höga vattenföringar. Detta antyder att, för att helt lyfta tjocka isflak över krönet och vidare nedströms, skall överfallshöjden vara dubbelt så stor som isens tjocklek. Förenklade försök med isflak av samma storlek som W har bekräftat detta. Fortsatta tester kommer att genomföras för att kartlägga komplexa förhållanden, t.ex. igensättning av isflak i inloppstangenter.

Med en bom bildas ett istäcke uppströms. Dess funktion är att initialt möjliggöra skapandet av ett istäcke ovanför bomlinjen. Det fungerar som en "isolator" för att förhindra värmeförluster från vattnet när temperaturen sjunker. Genom att förhindra värmeförlusten kan vi minska bildningen av kravis och därmed förhindra isackumulering på nedströms strukturer och särskilt för att förhindra isbildning på grindar. Isbommar kan användas för alla typer av utskov och i älvar, ej specifikt för labyrint- och pianotangentutskov varför inga vidare diskussioner förs här. Mer beskrivning hittas i Gooch (1996), Abdelnour et al. (1998), Lever and Gooch (2001), Tuthill and Gagnon (2002), Liddiard et al. (2002), Abdelnour and Abdelnour (2012), Gebre et al. (2014) och Abdelnour et al. (2017).

7 Avbördning av drivgods

Förekomst av drivgods i älvar är en av de frågeställningar som berör dammsäkerheten i nordiska förhållandena. Detta kapitel behandlar dess beteenden vid labyrinth- och pianotangentutskov i både laboriemiljöer och prototyper.

Drivgods är en frågeställning som berör dammsäkerhet i nordiska förhållanden. I Sverige, Norge och även andra regioner som Alaska består drivgods huvudsakligen av träd av olika slag (gran, tall, björk etc.) och varierande storlekar. I en högflödessituation blir de eroderade och transporterade i älven, vilket kan vara problematiskt om mängden som samlas framför labyrinth- och pianotangentutskoven blir stor. Även vid medelhöga vattenföringar förekommer transport av drivgods. Det påverkar utskovsavbördning i form av minskad avbördningskapacitet och ökat uppströmsvattenstånd (Figur 7.1).

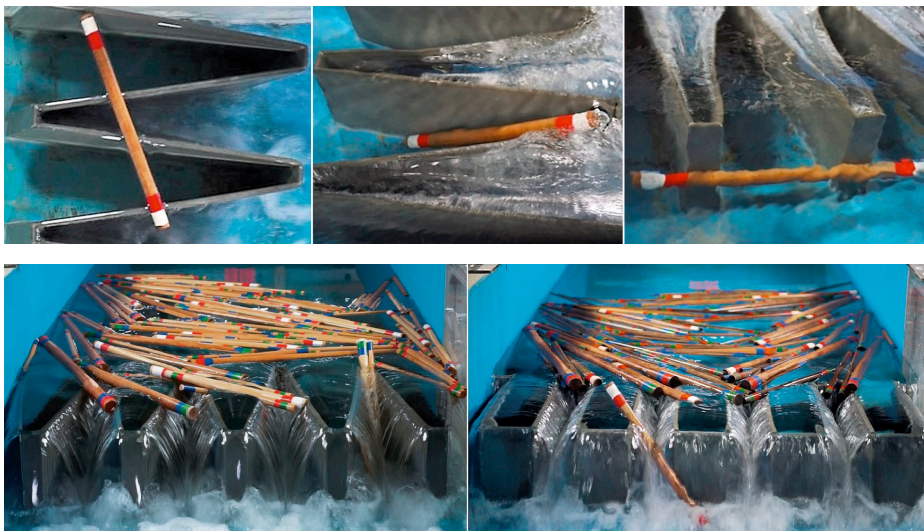
Det har inte rapporterats några allvarliga incidenter hos labyrinth- och pianotangentutskov, och dokumentation av prototypbeteenden är få. De flesta studier av drivgods är baserade på laborieundersökningar. Pfister et al. (2013a, b) visade att ackumuleringen av drivgods ökade om överfallshöjden var lägre 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, resulterande i högre uppströmshastigheter, vilket påverkade resultatet.



Figur 7.1 Beteenden av drivgods av träd vid pianotangentutskov (Gebhardt et al. 2017). Om överfallshöjden ej är tillräckligt stor för att lyfta drivgods över utskovet samlas det i magasinet.

Herbst (2016) och Herbst et al. (2020) jämförde, med avseende på ackumulering av drivgods, ett trapetsformat labyrinthöverfall och ett pianotangentöverfall (Figur 7.2). Ur drift- och underhållssynpunkt var det problematiskt om träd pressades mot uppströmsöverhängen 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 labyrinth- eller pianotangentöverfall med vertikala uppströmsändar var fördelaktiga.



Figur 7.2 Drivgods vid ett trapetsformat respektive ett rektangulärt labyrinthutskov. Om de inte fastnar framför nosen eller i inloppstangenter lyfts drivgods över krönet och transporterade nedströms (Herbst et al. 2020).

En annan fråga är skalningen av drivgods i laboratoriestudier. I många tester används modellträd utan rötter och grenar. Ett typiskt exempel visas i Figurer 7.3a och 7.3b. Dessa är ofta torkade små träd med 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 modellträden efterlikna dem vad gäller trädets form, storlek och densitet (Figur 7.3c). Ett trädets rot- och grensystem kan ha stor betydelse för hur det beter sig framför ett labyrinth- eller pianotangentöverfall. Om flera träd går in i varandra och fastnar bildas ett bröt, vilket ger ännu mer komplicerade beteenden.



(a)



(b)



(c)

Figur 7.3 Drivgods som användes i tidigare laboratorieundersökning. (a) vid försök av Pfister et al. (2013a), (b) vid modellförsök av Herbst et al. (2020), (c) vid försök med drivgods i samband med ombyggnad av utskov vid Höljesdammen (Yang 2013).

Drivgods utgör sällan någon fara för bottenutskov. Drivgods beteenden framför ett konventionellt ytutskovsparti, med eller utan luckor, styrs huvudsakligen av utskovets pelare och dess nettobredd, vilket nästan är oberoende av överfallshöjd. Om ett träd sitter fast framför eller i t.ex. ett fullt öppet WES-utskov kan man knappt flytta på det genom att höja uppströmsvattenstånd – större överfallshöjd ger ju upphov till större kraft på träden. Sitter ett träd fast kommer flera träd att fastna. En trädstams diameter varierar ofta mellan 15 och 25 cm, och kraften från strömningen i en utskovsöppning blir knappt tillräckligt stor för att bryta itu trädet.

För labyrinth- och pianotangentöverfall som inte har någon begränsning i sidled spelar överfallshöjden en dominerande roll. Drivgods har ofta större längddimensioner än överfallets enhetsbredd. För att inte utgöra någon

säkerhetsrisk är det önskvärt att det skall lyftas över överfallskrönet och transporteras nedströms.

Erfarenheter och observationer från EDF, som sedan 2006 har byggt över 10 pianotangentutskov, sammanfattas nedan Laugier & Vermeulen (2017).

1. När det gäller driftsäkerhet av pianotangentutskoven är drivgods en avgörande fråga och bör inte tas för givet.

2. I vissa EDF dammanläggningar finns det redan konventionella ytutskov med plan- eller segmentluckor. Dammarnas uppgradering leder till tillbyggnaden av pianotangentutskoven. Avbördningskapaciteten för de konventionella luckorna i ett magasin är dock generellt sett högre än över ett pianotangentutskov. Till exempel kan en 4,0 m hög lucka ha ett specifikt flöde större än 20 m²/s. När pianotangentutskovet avbördar vid låga överfallshöjder under de första timmarna av överdämningen, är det specifika flödet litet. Således attraheras drivgodset av strömningen till luckorna, inte av flödet över pianotangentutskovet.

3. Strömningen över ett pianotangentutskov kännetecknas av fri vattenyta. När uppströmsvattenståndet i magasinet ökar kommer drivgods att spolas över, vilket observerats vid medelhöga vattenföringar.

4. Laboratorietester utförs för alla renoveringsprojekt där ett pianotangentutskov är inblandat. Med givna hydrauliska förhållanden undersöks både avbördningskapacitet utan drivgods och beteenden med drivgods. De undersökta frågorna inkluderar bl.a. hur drivgodset passerar utskovet och den kvarvarande kapaciteten hos ett pianotangentutskov som delvis blir blockerad av drivgodset.

5. Modellen av pianotangentutskov vid Goulours-dammen testas med reducerade trädlängder motsvarande 4 till 10 m långa träd. Experimentella resultat visar att:

- Blockeringen av utskovet påverkar endast en liten del av krönets längd (5% till 10%), vilket motsvarar det främre krönets längd av uppströmstangenten. Denna del kommer i direkt kontakt med drivgods och är därför mer utsatt. Vissa träd fastnar i inloppstangenten och effekterna på flödet är dock inte betydande.
- Numeriska simuleringar utförs för att visa flödesmönstret och strömlinjerna. Om drivgods samlas framför ett pianotangentutskov går en betydande del av flödet under drivgodset och vidare till krönet.
- Även om pianotangentutskovet är blockerat av drivgods, är den kvarvarande avbördningskapaciteten nära 80% av normala förhållanden utan blockering.

Som en slutsats kan man säga att drivgods inte utgör någon säkerhetsrisk för pianotangentutskoven på EDF. Observationerna görs dock baserat delvis utifrån låga och medelstora vattenföringar och delvis på laboratorieförsök.

En studie från Utah Water Research Laboratory (Crookston et al. 2015) sammanfattas nedan. Den bygger på undersökning av både prototyputskov och modellförsök.

Jämfört med linjära överfall av samma bredd, underlättar den större krönlängden som tillhandahålls av ett labyrint- eller pianotangentutskov en ökning i

avbördningskapacitet eller en lägre överfallshöjd vid ett givet flöde. Följaktligen fanns det oro för att denna typ av utskov kan ha en högre potential som drivgodssamlare. En studie har genomförts i vilken 75 prototyper av labyrinthutskov i USA och Portugal undersöktes. Dammägarna och operatörerna av dessa anläggningar rapporterade ingen betydande ackumulering av drivgods eller erforderliga insatser för avlägsnandet. I avrinningsområden som bidrar med betydande mängder drivgods kan en ansamling vara möjlig vid avbördningen. Därför krävs visst underhåll (Figur 7.4). I vissa fall reducerar labyrinthutskov, som ersätter konventionella utskov med luckor, avsevärt underhållsproblem till följd av drivgods.



Figur 7.4 Drivgods som samlas vid Lake Brazos labyrinthutskov (Crookston et al. 2015).

Resultaten av en laboratoriestudie av tre pianotangentutskov med drivgodsansamling indikerar en ökning med 16% i överfallshöjd för högre flöden och med 67% för lägre flöden. Liknande trender rapporteras också i en fysisk modellstudie för labyrinthutskov. Potentiella effekter av drivgods på avbördningskapacitet hos labyrinthutskov kan vara mindre än förväntat. Utformningen och underhållet måste dock verkligen beakta effekter av drivgods för situationer där en stor belastning av drivgods förväntas.

Bommar används ofta för att stoppa och sedan avleda drivgods till ett angivet område i en älvfåra. Detta är dock gemensamt för alla utskov, inte specifikt för labyrinth- och pianotangentutskov, varför inga diskussioner om det förs här. De som är intresserade hänvisas till t.ex. Åstrand et al. (2015), Åstrand & Persson (2017), Gambettim et al. (2015) och Baecher (2020).

8 Diskussion

I detta kapitel diskuteras vissa aspekter för att inkludera labyrint- och pianotangentutskov vid ombyggnation av landets dammanläggningar. Till skillnad från gravitationsdammar av betong bör islaster på dessa slanka konstruktioner kartläggas.

Vid projektering av ombyggnationer av landets dammar bör labyrint- och pianotangentutskov vara inkluderade som alternativ till konventionella utskov med luckor. De faktorer som talar för dem är bl.a. kostnader för att bygga ut avbördningsanordningen eller ersätta del av den i en befintlig damm samt behovet av underhåll i kallt klimat. För att säkerställa en god avbördningsssäkerhet är det därför nödvändigt att undersöka deras driftförutsättningar under bl.a. vinterförhållanden.

I ett ombyggnadsprojekt som syftar till ökad avbördningsförmåga är kostnader, förutom dammsäkerhetsmässiga överväganden, en faktor som styr valet av utskovstyp. Litteraturgenomgången visar att varken labyrint- eller pianotangentutskovsanläggningar har några platsbegränsningar eller kräver någon särskild anpassning till lokala situationer. De är lämpliga även i avlägsna regioner där framkomligheten under vintern är begränsad. Erfarenheter från andra länder visar att det inte finns några belägg som talar emot dem i svenska förhållanden.

Om en damm höjd är liten anläggs de direkt på grunden; utskovet kan prefabriceras i antingen plåt eller betong. Vid större överfallshöjder byggs ofta en gravitationsdamm, på vilken labyrint- eller pianotangentutskov placeras. För att öka avbördningskapaciteten kan ett befintligt utskovsparti med luckor avlägsnas eller befintligt dammkrön sänkas till förmån för konstruktion av labyrint- eller pianotangentutskov. Inom tillgängligt utrymme kan flera snarlika enheter byggas, vilket leder till en låg vattenföring per längdmeter och därmed reduceras behovet av byggandet av en kostsam energiomvandlare.

I vissa anläggningar utomlands finns enbart labyrint- eller pianotangentutskov som avbördningsanordning. I samtliga dammar i Sverige finns det redan utskov med luckor eller bräddavlopp utan luckor. Tillbyggnaden av ett labyrint- eller pianotangentutskov blir ett komplement till befintligt utskovsparti. Avbördnings genom ett sådant utskov kräver överdämning över dämningsskärningen (DG). Om det avbördas vatten (även isflak eller drivgods) under DG blir labyrint- eller pianotangentutskovet inte påverkat.

Labyrint- eller pianotangentutskov kan användas vid ett årsregleringsmagasin eller strömkraftverk och det torde inte finnas någon skillnad med avseende på avbördningskapacitet och kan dock ha stor påverkan om hur kallt klimat yttrar sig och hur islasten verkar på det. Det kan användas som ordinarie-, reserv- eller nödutskov. Vid EDFs anläggningar används samtliga pianotangentutskov förutom en som ordinarieutskov. Endast vid Escouloubre funkar det som nödutskov för att avbörda överskottsvattnet vid turbinstopp (kraftverket har inte något annat utskov).

Gravitationsdammar av betong ska ju vara stabila mot ett tjockt istäcke. I RIDAS finns ett lastfall som ska klaras med säkerhetsfaktor $S \geq 1,5$: vattenytan vid dämningssgräns (DG) och dimensionerande islast (tjock is). Till skillnad från gravitationsdammar kännetecknas både labyrint- och pianotangentutskov av en relativt tunn struktur men har samtidigt också en begränsad höjd. Ur stabilitetssynpunkt bör dimensionerande islast på denna typ av utskov undersökas. Vi vet faktiskt inte tillräckligt mycket om islaster verkande på gravitationsdammar och vi kan ännu mindre om islaster på slanka labyrint- och pianotangentutskov.

Genomfrysning av sådana slanka konstruktioner behandlas inte i denna studie. Ämnet genomfrusen betong diskuteras av bl.a. Rosenqvist (2016).

9 Slutsatser

Med en sammanställning av kunskap från olika länder i kalla regioner kan man konstatera att både labyrinth- och pianotangentutskov även i kallt klimat är pålitliga strukturer med avseende på avbördningssäkerhet. Vidare ges förslag på framtida arbeten.

Under vinterförhållanden kan ett istäcke, i kombination med andra ogynnsamma faktorer, bildas framför ett labyrinth- eller pianotangentutskov. Trots att många labyrinth- och pianotangentutskov finns i Norge, USA, Frankrike och många andra länder i kalla regioner är dokumentationen av deras driftbeteenden begränsad.

Fuse gate-utskov är en liknande avbördningsanordning. Den fältstudie som gjorts vid Khorobrovskaya-dammen som består av både fuse gate- och labyrinthutskov torde vara det mest övertygande beviset i detta sammanhang. Fältundersökningen gjordes under två kalla vintrar, med en temperatur ner till -23°C . Efter mer än två decenniers drift sedan dess har inga onormala händelser eller incidenter rapporterats vid dessa utskov, vilket är positivt.

CFD-beräkningar, i vilka fyra scenario ingår, har utförts för att undersöka avbördningsförmågan vid närvaro av istäcke. Om isen endast täcker inloppstangenter eller täcker hela magasinet inklusive inloppstangenter får man en signifikant minskning i avbördningskapacitet. För att bibehålla avbördningskapaciteten är det tillräckligt att hålla inloppstangenterna isfria; det kvarstående istäcket i reservoaren har försumbara effekter på avbördningen.

Studier av avbördning av isflak är baserade på laboratorieundersökning. Isflakens beteenden beror på sådana faktorer som överfallshöjd, isens koncentration, storlek och form. I förhållanden till isens tjocklek är överfallshöjden styrande för att lyfta isblock över krönet. Inte mycket prototypdokumentation har påträffats.

Förekomst av drivgods i älvar är en av de frågeställningar som berör nordiska förhållandena. I driften av pianotangentutskoven på EDF har drivgods inte utgjort någon säkerhetsrisk. Inte heller har några incidenter rapporterats från studien av 75 prototyplabyrinthutskov i USA och Portugal. Potentiella effekter av drivgods på avbördningskapacitet hos labyrinth- och pianotangentutskov kan vara mindre än förväntat. Slutsatsen är dock endast baserad på låga och medelhöga vattenföringar. Utformningen och underhållet måste dock beakta dess effekter för situationer där en stor belastning av drivgods förväntas i samband med högflödessituationer. Avbördning av drivgods kan kräva större överfallshöjd än av isflak, detta på grund av att ett träds rotsystem och grenar kan vara kvar när det nalkas ett utskov.

Både labyrinth- och pianotangentutskov är passiva strukturer, dock med ett begränsat mått i höjd. För att minimera risken vid design bör laboratorieundersökningar utföras med avseende på avbördningskapacitet. Isflak, drivgods, energiomvandling och erosionsrisk nedströms. Om de konstrueras strukturellt stabilt mot verkande krafter inklusive iskraft, är de pålitliga konstruktioner som kräver lite underhåll i kallt klimat.

Att anlägga labyrint- och pianotangentutskov och kartlägga dess beteenden i kallt klimat är en viktig fråga som berör dammsäkerhet. Förslag på framtida arbeten inkluderar följande aspekter.

- Vi vet inte tillräckligt mycket om iskrafter på betongdammar och ännu mindre på labyrint- och pianotangentutskov. Att bestämma dimensionerande islast verkande på dem torde vara ett angeläget ämne.
- Egenskap vid genomfrysning av dessa slanka konstruktioner.
- Påverkan av vinterspel i kallt klimat, med avseende på ispåbyggnad nedströms förorsakad av stänk på grund av energiomvandling och luftinblandning.
- Isfrihållning- eller isborttagningssystem i labyrint- eller pianotangentutskov.
- Prototypövervakning av rörelser och stabilitet hos labyrint- eller pianotangentutskov i kallt klimat.

10 Referenslista

Allmänna referenser om labyrint- och pianotangentutskov

- Gentillini, B (1941). Stramazzi con cresta a pianta obliqua e a zig-zag. Memorie e Studi del Instituto di Idraulica e Construzioni Idrauliche del Regil Politecnico di Milano, No. 48 (in Italian).
- Ben Said, M & Ouamane, A (2022). Performance of rectangular labyrinth weir – an experimental and numerical study. *Water Supply* 22(4), 3628, doi: 10.2166/ws.2022.005.
- Bhukya, RK, Pandey, M, Valyrakis, M & Michalis, P (2022). Discharge Estimation over Piano Key Weirs: A Review of Recent Developments. *Water* 2022, 14, 3029. <https://doi.org/10.3390/w14193029>.
- Collins, JR, Kees, S, Robblee, G & Bassa, R. (2019). Tale of Two Spillways: The First Two Piano Key Weirs Constructed in the United States. Association of State Dam Safety Officials the *Journal of dam safety*, 16(2), 29–38.
- Crookston, BM (2010). Labyrinth weirs. Ph.D. Dissertation, Utah State University, Logan, Utah, USA.
- 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.
- 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, 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, 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).
- Falvey, HT (2003). *Hydraulic Design of Labyrinth Weirs*. ASCE Press, Reston, Virginia, USA.
- 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’Etroit 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, Chambéry, France.
- 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.
- 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.
- 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.
- Vermeulen, J, Lassus, C & Pinchard, T (2017). Design of a Piano Key Weir aeration network. Labyrinth and Piano Key Weirs III – PKW 2017 (Epicum et al. eds), CRC Press, London, UK.
- Yang, J (2022). Labyrint- och pianotangentutskov för effektiv avbördning. Energiforsk, rapportnummer 2022:853, Stockholm.

Referenser om istäcke och iskraft

- Bergdahl, L & Wernersson, L (1978). Calculated and expected thermal ice pressures in five Swedish lakes. Rapport, serie B:7, Inst. för vattenbyggnad, Chalmers tekniska Högskola, Göteborg.
- Billfalk, L (1979). Is mot luckor och dammar. Rapport, Älvkarlebylaboratoriet, Älvkarleby, 1979-03-30.
- Billfalk, L & Lif, T (1985). Isproblem vid vattenkraftregleringar och drift av vattenkraftanläggningar. Rapport UL-LB/gp-3544, Vattenfall Älvkarlebylaboratoriet, Älvkarleby, 1985-03-28.
- Hellgren, R (2019). Condition assessment of concrete dams in cold climate. Licentiate thesis no. TRITAABE-DLT-1934, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Hellgren, R (2022). A system approach to ice loads on concrete dams. Doctoral Thesis in Civil and Architectural Engineering, no. TRITA-ABE-DLT-221, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

- Hellgren, R, Enzell, J, Ansell, A, Nordström, E & Malm, R (2022). Estimating the Ice Loads on Concrete Dams Based on Their Structural Response. *Water* 2022, 14, 597. <https://doi.org/10.3390/w1404059>.
- Ingevald, K (1963). Inverkan av istryck på utskovsluckor, II. Vattenfall rapport nr. L-121, Älvkarleby.
- Rosenqvist, M (2016). Frost-induced deterioration of concrete in hydraulic structures: Interactions between water absorption, leaching and frost action. Doctoral thesis, Report TVBM-1036, Lund University, Lund.

Referenser om istäcke vid fuse gate

- Bureau of Reclamation (2014). Design Standards No. 14, DS-14(3), Appurtenant Structures for Dams (Spillways and Outlet Works) Design Standard. Chapter 3: General Spillway Design Considerations. Technical Service Center, Bureau of Reclamation, Denver, USA.
- Chapuis, A (2018). Innovative spillways: PK-weirs and French examples. SwedCOLD Temadagen, April 2018, Stockholm.
- Falvey, HT & Treille, P (1995). Hydraulics and design of fusegates. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(7), 512–518.
- Jones, SJ, Spencer, Rodionov, DB, Lounatsi, ME & Ait Alla A (1996). The reliability of fusible gates in ice-affected environments. *International Journal of Hydropower & Dams*, 1996, issue three, 79–82.
- Kocahan, HT & Rodionov, VB (2003). The behaviors of fusegates in ice affected environments. *Dam Safety 2003, Proceedings of Association of State Dam Safety officials (ASDSO) Annual Conference*, September 7–10, 2003, Minneapolis, Minnesota, USA.
- Lacroix, S & Walz, A (2009). Engineering a fusegated spillway. *Proceedings of 23rd ICOLD Congress*, May 2009, Brasilia, Brazil.
- Johnson, D (2017). Dams in Cold Climates: Design Considerations and Challenges of Construction. Presentation at US Society on Dams (USSD) Cold Regions Engineering Conference, September 20–21, 2017, Anchorage, Alaska, USA.
- HydroPlus (2010). Monitoring methods and results at Khrorbrovskaya HPP. HydroPlus project report, Palmetto, Florida, USA.

Referenser om istäcke vid labyrinth- och labyrinthutskov

- Kocahan, HT & Rodionov, VB (2003). The behaviors of fusegates in ice affected environments. *Dam Safety 2003, Proceedings of Association of State Dam Safety officials (ASDSO) Annual Conference*, September 7–10, 2003, Minneapolis, Minnesota, USA.
- HydroPlus (2010). Monitoring methods and results at Khrorbrovskaya HPP. Personal communications with HydroPlus.

Referenser om avbördningskapacitet vid istäcke

- ANSYS (2015). Help system, Fluent multiphase flows theory guide (Academic Research Release 15). ANSYS Inc., Canonsburg, USA.
- Ben Said, M & Ouamane, A (2022). Performance of rectangular labyrinth weir – an experimental and numerical study. *Water Supply* 22(4), 3628, doi: 10.2166/ws.2022.005.

Referenser om avbördning av isflak

- 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* (Epicum et al. eds), CRC Press, London, UK.
- Herbst, J (2016). *Hydraulische Untersuchungen an Labyrinth-Wehren zur Durchgängigkeit von Treibgut, Geschiebe und Eis*. Master thesis, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), und Bundesanstalt für Wasserbau, BAW, Karlsruhe, Germany.
- Herbst, J, Gebhardt, M, Pfrommer, J & Belzner, F (2020). Untersuchungen zur Durchgängigkeit von Feststoffen an Labyrinth-Wehren. *BAW Mitteilungen* Nr. 105, 85–98.

Referenser om isboom

- Abdelnour, R & Abdelnour, E (2012). *Jenpeg Generating station ice boom – as built final report*. BMT Fleet Technology Limited, Victoria, BC, Canada.
- Abdelnour, R, Abdelnour, E Robert, E & Malenchak, J (2017). *Ice Boom Design Challenges in a Very Large, High-Latitude, North-Flowing River*. CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment, 19th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Whitehorse, Yukon, Canada, July 9–12, 2017.
- Abdelnour, R, Nicholson, C & Gong, YX (1998). The design, fabrication and deployment of an ice boom to protect two hydroelectric power plant water intakes from ice blockages during winter. *Ice Problems, IAHR 1998*.
- Gebre, S, Timalisina, N & Alfredsen, K (2014). Some Aspects of Ice-Hydropower Interaction in a Changing Climate. *Energies* 2014, 7, 1641–1655.
- Gooch, G (1996). *Effects of Ice Boom Geometry on Ice Capture Efficiency*. US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Special Report CRREL 96-17, Hanover, New Hampshire, USA.
- Lever, JH & Gooch, G (2001). Design of Cazenovia Creek ice control structure. *Journal of Cold Regions Engineering*, Vol. 15, No. 2.
- Liddiard, A, Abdelnour, R, Tremblay, R-M, Quach, TT & Morse, B (2002). Design and Monitoring of a Prototype Ice Boom for Use in an Area of High Current Velocity. *Proceedings of the 16th IAHR International Symposium on Ice*. December 2–6, 2002, Dunedin, New Zealand.

Tuthill, AM & Gagnon, JJ (2002). Videomonitoring Performance of the St. Marys River Ice Islands and Ice Boom. US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, Technical Report ERDC/CRREL TR-02-8, Hanover, New Hampshire, USA.

Referenser om drivgods

Baecher, GB (2020). Floating debris management. CEATI project No. T192700-0248, CEATI International Inc., Montreal, Quebec, Canada.

Crookston, B, Mortensen, D, Stanard, T, Tullis, BP & Vasquez, VM (2015). Debris and maintenance of labyrinth spillways. USSD 2015 Annual Conference, April 13–17, 2015, Louisville KY, USA.

Gambettini, DLG, Junior, NC, Alves, AM & Alaman, JF (2015). Protection against impacts and accumulation of logs in the structures of Santo Antônio hydropower plant, taking account the transposition of downstream river. 25th ICOLD Congress, June 2015, Stavanger, Norway.

Herbst, J (2016). Hydraulische Untersuchungen an Labyrinth-Wehren zur Durchgängigkeit von Treibgut, Geschiebe und Eis. Master thesis, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), und Bundesanstalt für Wasserbau, BAW, Karlsruhe, Germany.

Herbst, J, Gebhardt, M, Pfrommer, J & Belzner, F (2020). Untersuchungen zur Durchgängigkeit von Feststoffen an Labyrinth-Wehren. BAW Mitteilungen Nr. 105, 85–98.

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.

Merkel, J (2015). Hydraulische Untersuchungen am Piano-Key-Wehr. Master Thesis, Institute for Hydromechanics, Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe.

Ott, RA, Lee, MA, Putman, WE, Mason, OK, Worum, GT & Burns, DN (2001). Bank Erosion and Large Woody Debris Recruitment Along the Tanana River, Interior Alaska. Alaska Department of Environmental Conservation Division of Air and Water Quality, Juneau.

Pfister, M, Schleiss, AJ & Tullis, BP (2013a). Effect of driftwood on hydraulic head of piano key weirs. In Labyrinth and Piano Key Weirs II – PKW 2013 (Epicum 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.

Schmocker, L, Detert, M & Weitbrecht, V (2013). Bypass driftwood retention River Sihl. Proceedings of 2013 IAHR World Congress, Chengdu, China.

Schmocker, L & Hager, WH (2011) Probability of drift blockage at bridge decks. Journal of Hydraulic Engineering, 137(4), 470–479.

- Tyler, RN (2011). River Debris: Causes, Impacts, and Mitigation Techniques. Report. The Alaska Center for Energy and Power, Alaska.
- Vaughn, T, Crookston, BC & Pfister, M (2021). Floating Woody Debris: Blocking Sensitivity of Labyrinth Weirs in Channel and Reservoir Applications. Journal of Hydraulic Engineering, 147(11), 06021016.
- Åstrand, S & Persson, F (2017). Metod för analys och hantering av drivgods. Energiforsk rapport nr. 2017:446, Stockholm (rapporten finns även på engelska).
- Åstrand, S, Persson, F & Engström Meyer, A (2015). Floating debris at extreme flood events in Swedish rivers – development of methodology for analyzing potential risks. 25th ICOLD Congress, June 2015, Stavanger, Norway.

Källhänvisningar är en service till läsaren som snabbt ska kunna kontrollera den aktuella källan. I rapporttexten ska källhänvisningar formateras enligt Oxfordsystemet genom fotnoter. Använd samma referenssystem genom hela rapporten och referenslistan.

Använd formatmallen för brödtext med ett hängande indrag på 1,5 för att formatera referenslistan. Resterande formatering av källan ska också göras enligt Oxfordsystemet

LABYRINT- OCH PIANOTANGENT- UTSKOV I NORDISKT KLIMAT – KUNSKAPSSAMMANSTÄLLNING

Både labyrinth- och pianotangentutskov är kostnadseffektiva avbördningsanordningar. För att förse framtida uppgradering av befintliga anläggningar med erforderliga belägg utvärderas dess driftförutsättningar i kallt klimat. Som komplement till befintligt utskov med luckor torde dessa slanka utskov vara tillförlitliga konstruktioner med avseende på dammsäkerhet.

Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på energiforsk.se.

