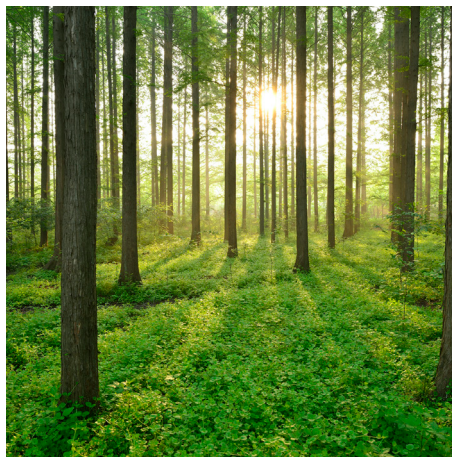


IDRIFTTAGNING AV AVSTÄLLDA DJUP- OCH BOTTENUTSKOV

RAPPORT 2025:1110



DAMMSÄKERHET



IDRIFTTAGNING AV AVSTÄLLDA DJUP- OCH BOTTENUTSKOV

En intervju- och litteraturstudie
av praktiska erfarenheter

ELIN JOHANSSON TORÉN
KARIN APPELQVIST
PIERRE-LOUIS LIGIER
BJÖRN ERIKSSON

ISBN 978-91-89918-13-9 | © Energiforsk maj 2025

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

Förord

Det här projektet har syftat till att fånga upp tekniska utmaningar vid idrifttagning av avställda bottenutskov och skapa en kunskapsbank samt ge vägledning i viktiga aspekter att ta hänsyn till vid planering, design, upprustning och utförande.

Uppdraget har genomförts inom Energiforsks program för Dammsäkerhet, som fokuserar på att bidra med kunskap i det strategiska arbetet med dammsäkerhet och för att främja den svenska vattenkraftproduktionens långsiktiga utveckling.

Författare till rapporten är Elin Johansson Torén, Karin Appelqvist, Pierre-Louis Ligier och Björn Eriksson från Sweco AB. Referensgruppen bestod av Henrik Arver, Vattenregleringsföretagen, Carl-Oscar Nilsson, Uniper, Romanas Wolfsburg, Vattenfall AB, Mikael Hernqvist, Statkraft AB.

Rapportförfattarna ansvarar för alla resultat och slutsatser i rapporten.

Bilden på framsidan tillhandahålls av Uniper.

Sammanfattning

Flera dammägare överväger idag att idriftta avställda bottenutskov, som kanske inte använts sedan dammanläggningen togs i drift.

Anledningarna kan vara flera, men vanligen står dammsäkerhetsaspekten i centrum. Det kan exempelvis vara det enda möjliga kontrollerade sättet att sänka av magasinsytan under ytutskovens tröskelnivå, men det kan även skapa en redundans i anläggningens avbördningssystem, eller minska risken för begränsad avbördningskapacitet vid drivgodsproblematik.

Att idriftta avställda djup- och bottenutskov som varit ur drift en längre tid, är både tekniskt krävande och kostsamt. Ett försök att samla erfarenheter och utmaningar från genomförda projekt avseende bl.a. behovsanalys, planering för ombyggnation och idrifttagning har gjorts, med syftet att förenkla idrifttaganden i framtida projekt. Erfarenheter av idrifttagningsprojekt har samlats in genom intervjuer med idrifttagningsledare, projektledare och hydrauliker, vilket lett till konstateranden att upprustnings- och idrifttagningsprojekt av denna typ ofta kräver komplicerade och kostsamma lösningar, samt noggrann planering. Slutsatser kopplade till exempelvis dammtyper, utskovsdjup eller manöveranordningar kan däremot inte dras p.g.a. att antalet anläggningar där bottenutskov åter tagits i drift - som identifierats - är för få.

Produktionstekniskt är arbetet svårt, framför allt om inte arbetsområdet är torrlagt. Men även arbeten med uppförandet av avstängningsanordningar görs i vatten – i de fall dessa inte redan finns på plats. Undervattensarbeten på stora djup innebär höga tryck och låga vatten-temperaturer, ibland med dålig sikt. Detta kan leda till att betong- och injekteringsbruk erhåller oönskade egenskaper och orsaka svårigheter för dykare med monteringsarbeten. Genom att utföra provgjutningar under motsvarande förhållanden (tryck och temperatur) kan dessa risker minskas och byggmaterialens egenskaper säkerställas. Det är även klokt att involvera dykare tidigt i projekten. Man bör dock vara medveten om att undervattensarbeten medför betydande risker, vilket kan leda till att vissa arbetsmoment inte kan utföras enligt plan.

Utöver produktionstekniskt komplexa problem knutna till restaurering av djup- och bottenutskov beskrivs även flertalet problem kopplade till idrifttagning, både i litteraturen som behandlats i projektet, samt av de respondenter som deltagit. Exempel på kända problem under eller i direkt anslutning till idrifttagningar av sedan tidigare avställda djup- och bottenutskov är vibrationer, luftfenomen (exempelvis stora luft-undertryck och höga vindhastigheter), kavitation och erosion. Dessa fenomen har man dock till stor grad kunnat förutspå med hjälp av CFD-analyser och modellförsök. Utöver detaljerade utredningar; noggrann planering och utförliga riskanalyser inför idrifttagningen; dokumentation och mätningar före, under och efter spill; samt analyser av dessa; kan en rad åtgärder vara nödvändiga för att säkerställa ett lyckat projekt. Exempel på åtgärder i aktuella projekt är temporär avstängningsanordning, luckrenovering eller

installation av ny lucka, lufttillförsel, förstärkning av vattenvägen samt energiomvandlare nedströms luckan.

Nyckelord

Idrifttagning, funktionskontroll, verifikationstest, bottenutskov, damm, CFD, erosion, kavitation, vibration, luft, djup- och bottenutskov, avställning

Summary

Several dam owners are currently considering the reactivation of decommissioned bottom outlets, which may not have been utilized since the dam facilities became operational. The reasons behind this consideration can vary, but typically, dam safety aspects are central to the discussion. For instance, commissioning bottom outlets may be the only viable controlled method for lowering the reservoir surface below the threshold level of the surface outlets. Additionally, it can provide redundancy within the facility's discharge system or mitigate the risk of inadequate discharge capacity in the event of operational failure.

Commissioning a bottom outlet that has been out of operation for an extended period is both technically demanding and costly. An attempt has been made to gather experiences and challenges from completed projects concerning needs analysis, planning for reconstruction and commissioning with the aim of simplifying future commissioning processes, as well as the projects and preparations required prior to commissioning. Insights from prior projects have been collected through interviews with commissioning leaders, project managers, and hydraulic engineers, leading to the conclusion that this type of project often necessitates complicated and costly solutions, which in turn requires meticulous planning. Conclusions related to dam types, outlet depths, and control devices cannot be drawn due to the limited number of reference projects.

From a production standpoint, the work is challenging, especially if the work area is not adequately dewatered. Tasks involving the construction of shut-off devices are also performed underwater when such devices are not already in place. Underwater work at significant depths entails high pressure and low water temperatures, often accompanied by poor visibility. This can cause concrete and mortar developing undesirable properties and create difficulties for divers engaged in assembly tasks. By conducting test castings under equivalent conditions (pressure and temperature), these risks can be mitigated, and the properties of construction materials can be ensured. It is also prudent to involve divers early in the projects. However, one should be aware that underwater tasks always entail significant risks, which may result in certain work components not being executed as planned.

In addition to the production-related complexities associated with the restoration of bottom outlets, several issues related to commissioning are described both in the literature and in the projects undertaken, as well as by the participating respondents. Examples of known problems occurring during or in direct connection to the commissioning of bottom outlets include vibrations, air phenomena (such as substantial negative air pressure and high wind speeds), cavitation and erosion. However, these issues were predicted using Computational Fluid Dynamics (CFD) analyses and model testing. In addition to detailed investigations, careful planning, and extensive risk analyses prior to commissioning; documentation and measurements before, during, and after spillage are needed, as well as analyses of these measurements; a range of actions may be required to ensure a successful project. Examples of actions in relevant projects include temporary shut-off devices, gate renovations or installation of new gates, air supply, reinforcement of the waterway, and energy converters downstream gates.

Innehåll

1	Inledning	9
1.1	Bakgrund	9
1.2	Syfte	10
1.3	Metod	10
1.4	Avgränsningar/förtydliganden	11
2	Litteraturstudie	12
2.1	Utformning bottenutskov	12
2.1.1	Lucktyper	13
2.1.2	Täthet	13
2.2	Utmaningar/kända problem med bottenutskov	14
2.2.1	Redundans	14
2.2.2	Drivgods / Ingensättning	15
2.2.3	Erosion	15
2.2.4	Kavitation	15
2.2.5	Luft-undertryck och höga lufthastigheter	16
2.2.6	Luftmedrivning och luftutblåsning i spillvatten	16
2.2.7	Nedåtsug	17
2.2.8	Upptryck	17
2.2.9	Vibrationer och pulserande strömningar	17
2.2.10	Höga ljud / buller	18
2.2.11	Miljöaspekter	18
2.2.12	Elektriska fel	19
2.3	CFD-beräkningar och modellförsök	19
3	Intervjuer	21
3.1	Motiv / bakgrund	21
3.2	Utredningar	21
3.3	Utformning och anläggningsdata	23
3.4	Idrifttagning (funktionskontroll)	27
3.4.1	Reservdrift och alternativa avstängningsmöjligheter	28
3.4.2	Erosion	29
3.4.3	Kavitation	29
3.4.4	Luft-undertryck	30
3.4.5	Vibrationer	30
3.4.6	Vattenkaskader	30
3.4.7	Höga ljud / buller	30
3.4.8	Drivgods	30
3.4.9	Isbildning	30
3.4.10	Miljö	31
3.4.11	Tillstånd	31

3.4.12	Arbetsmiljö	31
3.4.13	Risikanalyt	31
3.5	Bryggbarhet och utmaningar i byggskedet	32
3.5.1	Avstängningar	32
3.5.2	Äldre anläggningar	33
3.5.3	Arbetsmiljö	33
3.5.4	Dykarbeten	34
3.5.5	Materialval	34
4	Diskussion	35
4.1	Referensprojekt	35
4.2	Dammsäkerhet	35
4.2.1	Avsänkningmöjligheter	35
4.2.2	Redundans	35
4.2.3	Igensättning	36
4.3	Byggskedet	37
4.3.1	Avstängningsanordningar	37
4.3.2	Dykarbeten	37
4.4	Arbetsmiljö/säkerhet	38
4.5	Utformning och bärförmåga	38
4.5.1	Materialval och hållbarhet	38
4.5.2	Vattenvägens utformning	39
4.5.3	Luckor och falsars utformning	40
4.6	Tillstånd	42
5	Slutsatser	43
6	Föreslag på fortsatt arbete	44
7	Referenslista	45
Bilaga A:	Checklista idrifttagning av avställda djup- och bottenutskov	47

1 Inledning

Många svenska dammanläggningar saknar djup- och bottenutskov i drift, trots att avbördning via djup- och bottenutskov, på många anläggningar, är det enda möjliga kontrollerade sättet att sänka av magasinsytan under ytutskovens tröskelnivå. Detta trots att möjligheten att kunna sänka av magasinet många gånger är kritisk om allvarliga problem identifieras på dammanläggningen.

Att kunna sänka magasinsytan är både fördelaktigt ur ett belastningsperspektiv (t.ex. vid stabilitetsproblem) och ibland nödvändigt för att minska konsekvenserna av en skada. Det kan också finnas andra behov av djup- och bottenutskov, såsom att öka anläggningens avbördningskapacitet eller för att skapa redundans i anläggningens avbördningssystem. Även produktionstekniskt kan det vara relevant att idriftta avställda djup- och bottenutskov, i de fall magasin med hög regleringsamplitud riskerar att låsa in vatten vid ett driftstopp, vilket kan ske då ytutskovens trösklar ligger över magasinsytan. Ett sådant scenario kan påverka ett helt älvsystems produktion (nedströms den aktuella dammen), men också vara förenat med höga kostnader för dammägaren. Det kan dessutom innebära att man inte klarar att upprätthålla krav om minimitappning enligt anläggningens vattendom.

1.1 BAKGRUND

De djup- och bottenutskov som finns på våra anläggningar byggdes initialt för förbiledning av vatten under byggtiden samt för reglering av magasinet vid första dämningssupptagandet. Sedan dess har många av dessa djup- och bottenutskov varit avställda och vissa har till och med byggts igen.

Som en anpassningsåtgärd med hänsyn till klimatförändringar och säker avbördning av höga flöden, krävs idag ett ökat fokus på dammsäkerhet samt fokus på ökad redundans i dammanläggningarna. Detta kan åstadkommas genom att avställda djup- och bottenutskov upprustas och åter tas i drift. Energiforsk har därför inom dess Dammsäkerhetstekniska utvecklingsprogram initierat en studie som syftar till att samla erfarenheter från tidigare idrifttagningar av avställda djup- och bottenutskov som varit ur drift en längre tid, samt de förarbeten som krävts. Att restaurera och idriftta dessa avställda djup- och bottenutskov kan vara både tekniskt utmanande och kostsamt. Ofta saknas relevant dokumentation, från både byggskede (relationshandlingar) och drift av bottenutskoven (instruktioner), vilket gör designarbetet utmanande och kan leda till felaktiga antaganden. Det är därför viktigt att i förväg analysera potentiella risker kopplade till idrifttagningen, att ha ett välarbetat provningsprogram för den planerade spillsekvensen och att fastställa tydliga acceptanskriterier för övervakning av parametrar. Om acceptanskriterierna överskrids, bör åtgärder vara baserade på noggrant genomtänkta och inövade planer. Misstag under idrifttagningen kan vara mycket problematiska och i värsta fall katastrofala, vilket ställer höga krav på organisationen, både vid planeringen och genomförandet av processen.

1.2 SYFTE

Rapporten syftar till att fånga upp tekniska utmaningar som noterats vid tidigare projekt: att skapa en kunskapsbank; samt ge vägledning i viktiga aspekter att ta hänsyn till vid planering, design, upprustning samt idrifttagandet i sig.

1.3 METOD

Studien har genomförts som en litteratur- och intervjustudie, i vilken erfarenheter från tidigare projekt avseende idriftsättning av avställda djup- och bottenutskov, samt upprustning inför idrifttagningen, har sammanställts.

Intervjuer har genomförts med fem respondenter inom kategorierna dammägare (projektledare), konsulter (hydraulikspecialist, konstruktör luckmekanik) och idrifttagningsledare. Flera av respondenterna har också varit verksamma inom flera (och samma) projekt. Frågorna är avsedda att samla erfarenheter av aspekter som är relevanta för att idriftta avställda djup- och bottenutskov och är kopplade till

- Drift
- Dammsäkerhet
- Produktion/byggbarhet/ekonomi
- Arbetsmiljö/säkerhet vid produktion
- Arbetsmiljö/säkerhet vid drift
- Utformning och bärförmåga
- Miljö och hållbarhet
- Generisk information för att kunna knyta eventuella fenomen till storlek på damm.

Trots att många förfrågningar sändes ut kunde endast fem personer intervjuas, som varit delaktiga i upprustnings- och idrifttagningsprojekt. Ursprunglig förfrågan från Energiforsk formulerade att idriftsättningsledare och dammägare skulle intervjuas, men det låga deltagandet innebar att valet också föll på att inkludera specialister inom strömningsteknik/hydraulik. Samtal har också genomförts med respondent F, professor i hydraulteknik, med initial ansats att genomföra en intervju. Det visade sig dock att respondent F:s erfarenheter inte passade det valda intervjuformatet, varför vi i stället förde ett fritt samtal om djup- och bottenutskov (inkluderande bl.a. utformning, redundans och internationella regelverk).

Totalt behandlar studien fem projekt / dammar där avställda bottenutskov tagits i drift.

1.4 AVGRÄNSNINGAR/FÖRTYDLIGANDEN

Analysen syftar till att samla in erfarenheter av idrifttagning av avställda djup- och bottenutskov, varför erfarenheter av normal drift och drift-problematik som kan uppstå under ett bottenutskovs drifttid, ej varit fokus i intervjuer. Dock belyses fel som kan uppstå under ett bottenutskovs drifttid under avsnitt 2.

Skillnaderna mellan verifikationstest, funktionskontroll, idrifttagning och provspill beskrivs nedan. De tre förstnämnda beskrivs mer ingående i Ridas Tv 8, Underhåll (Energiföretagen, 2022).

Vid verifikationstest kontrolleras om en enhets karakteristik eller egenskap överensstämmer med angivna krav och därmed säkerställer en hög tillförlitlighet hos enheten. Verifikationstest kan exempelvis utföras i anslutning till inspektioner där utskovsluckor med tillhörande utrustning normalt testas.

Med funktionskontroll menas en åtgärd som utförs efter underhållsåtgärder för att verifiera enhetens förmåga att utföra det som krävs. Normalt utförs kontrollen efter ett funktionsodugligt tillstånd.

Efter en genomförd anläggningsändring eller förnyelse genomförs en idrifttagning. Vid såväl funktionskontroll efter funktionsodugligt tillstånd, eller idrifttagning efter anläggningsändring, upprättas provprogram som säkerställer att funktioner kontrolleras mot ställda krav.

I intervjuer beskrivs ibland att idrifttagningen föregås av "provspill" eller "provtappning", då del av avbördningsanordningens system testas (vilket innebär partiell lucköppning utan fullständig funktionskontroll).

2 Litteraturstudie

Avsnitt 2 syftar till att summera hittills kända egenskaper hos djup-/bottenutskov, inklusive vanlig utformning av dessa. Utöver att djup-/bottenutskov inte omedelbart påverkar vattenytan i ett magasin (mindre risk att exempelvis bryta upp ett istäcke), är de inte heller lika utsatta för flytande drivgods. Men de huvudsakliga fördelarna med att upprusta och idriftsätta djup- och bottenutskov som varit ur drift en längre tid, är att de:

- skapar möjligheten att kunna sänka av magasinet under ytutskovens tröskelnivå;
- kan öka anläggningens avbördningskapacitet; och
- skapar redundans i anläggningens avbördningsystem då de kan fungera som reservutskov.

Internationellt används bottenutskov dessutom för att tömma vattenmagasinet på sediment, men sedimentation i den omfattning att den skapar igensättning av magasin är ej vanligt förekommande i Sverige.

Tidigare studier avseende bottenutskov i Sverige inkluderar bl.a.

- Dath & Mathiesen (2010): utförde en enkätstudie avseende drifterfarenheter, i vilken 38 bottenutskov i Sverige identifierades, varav 23 var i drift. Ca 20 % av utskoven uppgavs aldrig ha manövrerats.
- Halvarsson m.fl. (2019): utförde en enkätstudie avseende drifterfarenheter, i vilken 50 bottenutskov i Sverige identifierades, varav 36 var i drift och ytterligare 9 av dessa planerades då att tas i drift. Till denna studie hänvisas läsare som är intresserade av mekaniska och elektriska fel som är vanliga under ett bottenutskovs livslängd (vid gängse drift).
- Hellgren m.fl. (2021): genomförde en enkätstudie avseende projekt där avbördningskapaciteten säkrats eller utökats mellan åren 2000 – 2020, i vilken totalt 34 projekt ingick. Av dessa hade 9% av projekten (3 st) huvudåtgärd "driftsättning bottenutskov", vilket antyder att antalet projekt i Sverige där djup- och bottenutskov upprustats och idrifttagits hittills är lågt.

2.1 UTFORMNING BOTTENUTSKOV

Utformningen av bottenutskov i Sverige styrs i första hand av bottenutskovets syfte; men även faktorer som topografi, geologi, dammtyp, dammhöjd och regleringsamplitud styr utskovets utformning (Dath & Mathiesen 2010).

Vissa bottenutskov är utformade som betongkulvertar som rymmer både inlopp, förbiledning och energiomvandling. Dessa utskov benämns *kulvertutskov* och avser en betongkonstruktion genom vilken vattenvägen (kulverten) går genom dammen. *Bergtunnelutskov* går istället under dammen och har en horisontell eller lätt lutande avbördningsväg. Alla tunnlar i berg benämns bergtunnelutskov, oavsett om de är

oförstärkta, förstärkta med sprutbetong eller betonginklädda. Mynningen nedströms i bergtunnel- och kulvert-utskov kan vara, men är inte alltid indämd. *Schaktutskov med delvis trycksatt vattenväg* är en egen kategori bergtunnlar där vattnet faller ned i ett vertikalt schakt för att avbördas under dammen. Mynningen mynnar ut genom ett vertikalt eller uppåtlutande schakt under nedströms vattenyta. *Bottenutskov utan eller med mycket kort vattenväg* återfinns ofta i betongdammar. I dessa utskov sker avbördningen fritt bakom luckan. I *kombinerade yt- och bottenutskov* är bottenutskovet och ytutskovet anlagda i en gemensam konstruktion med skibordet placerat ovanpå bottenutskovet (Dath & Mathiesen 2010).

Avstängningsanordningarna kan också vara placerade på olika ställen; ibland sitter de på nedströmssidan, men oftast finns de i uppströmsdelen, men även placeringar mellan dessa alternativ förekommer (Dath & Mathiesen 2010).

2.1.1 Lucktyper

Djup- och bottenutskov förses vanligen med planluckor eller segmentluckor, men det finns även exempel på rena bottenutskov som har försetts med cylinderluckor. Segmentluckor är vanligast förekommande lucktyp i denna studie samt även generellt i svenska bottenutskov (Dath & Mathiesen 2010; Halvarsson m.fl. 2019) och för denna typ av lucka beräknas behovet av öppnande vridmoment mot det bromsande moment som luckans egenvikt och friktion ger upphov till. Egentyngd, friktion från sidotätningar och lagerfriktion är de bromsande komponenterna, där egentyngden är den klart dominerande (i storleksordningen 80%). Beträffande lucklagrens friktion beaktas både den huvudsakliga radiella komponenten och den normalt mindre axiella friktionen från styrningen i sidled. Vanliga segmentluckor stänger i princip alltid av sitt egentyngdsmoment. Ett undantag kan vara om de har överkanttätning i en djup- eller botteninstallation och det upptryck som denna ger upphov till blir för stort. Luckan bör i det fallet barlastas så att inte tryckkraft från luckspelet krävs för att hålla den stängd (Energiföretagen, 2021).

Lucktypen har betydelse när det gäller hur luftning ska utformas, men även om den tål indämning och tryck från nedströmssidan (Dath & Mathiesen 2010).

För bottenutskov på stora djup är det kritiskt att även beakta de stora krafter som kan genereras av en hög vattenpelare och de mekaniska påfrestningar som dessa kan orsaka, t.ex. på ventiler, portar och andra rörliga delar. Är inte dessa korrekt dimensionerade kan det leda till deformation eller brott.

2.1.2 Täthet

RIDAS Tv 9, Avbördande funktion (Energiföretagen, 2021) beskriver att det krävs särskild kunskap och erfarenhet för att konstruera luckor i djup- eller botteninstallationer och att man redan vid 20 – 25 meters vattentryck bör ställa specifika krav på exempelvis tätningars utföranden. Till skillnad från ytutskov behövs en överkanttätning i bottenutskov, vilken per definition kommer att utsättas för en friktionskraft tvärs sin utsträckning vid stängt luckläge, något som ställer stora krav på dess utformning och infästning. Om överkantstättningen är placerad på luckan kombineras den ofta med någon form av mekanisk grovtätning

/ stänktätning för att förhindra vattensprut över luckan under öppnandet. En överkantstätning som placeras på betongkonstruktionen ställer istället stora krav på luckans ytjämnhet och formriktighet. Det behövs även ett överkantanslag i falsarmaturen om tätningen placeras på luckan, alternativt placeras tätningen på anslaget och släpar mot luckans bordläggning. Överkantanslaget utförs normalt så att luckans topptätning enbart går i ingrepp mot slutet av luckans stängningsrörelse.

2.2 UTMANINGAR/KÄNDA PROBLEM MED BOTTENUTSKOV

I detta avsnitt beskrivs de vanligaste utmaningarna vid användning av bottenutskov.

2.2.1 Redundans

Enligt RIDAS Tv 9, Avbördande funktion (Energiföretagen, 2021) är det, vid ordinarie drift, önskvärt att alla utskov används regelbundet, såvida det inte finns särskilda skäl att prioritera något utskov. Regelbunden användning är bra för mekaniska installationer (gäller speciellt hydrauliska spel, lager och tätningar), bidrar till att tidigt upptäcka problem vid anläggningen och säkerställer att driftpersonalen har god kännedom om utrustningen. Detta gäller förstås även bottenutskov eftersom det, i de fall utskovsluckor inte har använts på länge, kan finnas osäkerheter kring deras funktionalitet. Regelbunden användning och/eller driftmässig inspektion är därför avgörande för att säkerställa att installationer fungerar korrekt och hålls i gott skick. Utöver detta bör verifikationstest, externa kontroller och funktionskontroller utföras, vilket är viktigt för att tryggt kunna använda bottenutskoven; men även för att kunna medräknas i anläggningens avbördningskapacitet.

Skulle något gå fel är det av största vikt att det finns en alternativ avstängningsanordning, för att minimera risken att magasinet töms. Halvarsson m.fl. (2019) identifierade att den mest förekommande typen av alternativ avstängning för befintliga bottenutskov är sättar. Andra typer, som nålar, bågsättar och valvluckor, används också, men inget av de inventerade utskoven hade någon möjlighet att stänga bottenutskoven med alternativ avstängning i strömmande vatten – något som begränsar flexibiliteten och kontrollen över vattenflödet vid spill. Många djup- och bottenutskovsluckor beskrivs också ha blivit stående oanvända på grund av att de inte utförts med redundant avstängningsanordning, vilket medfört att driftpersonalen helt enkelt inte har velat ta risken att använda dem ifall de inte skulle gå att stänga efter ett spill (Energiföretagen, 2021). Alternativa öppningsanordningar för bottenutskov i drift är dock vanligare (Halvarsson m.fl. 2019).

Vid så stora djup att torrläggning för underhållsarbeten och inspektioner kräver omfattande insatser eller rentav är omöjliga att utföra, anger RIDAS Tv 9, Avbördande funktion (Energiföretagen, 2021) att dubbla luckor (i serie) bör anläggas. I dessa fall rekommenderas att nedströmsluckan används till avbördning, medan uppströmsluckan används som service- och nödavstängningslucka.

2.2.2 Drivgods / Ingensättning

Djup- och bottenutskov är inte lika känsliga för flytande drivgods som ytutskov, men däremot kan bottenutskov vara desto mer känsliga för sjunktimmer och liknande gods som kan förekomma på botten av ett magasin och som riskerar att dras med i inströmningen till utskovet. Det är därför inte ovanligt att bottenutskov förses med någon form av grovgrind och/eller så kallade "stenfickor" där skräp kan samlas i gropar innan det når utskovet (Energiföretagen, 2021).

2.2.3 Erosion

Vatten som spills innehåller stora mängder energi, vilket kan orsaka erosion i vattenvägen. Energin kan orsaka erosion både uppströms, vid utskovet och nedströms utskovet. Områden nedströms utskoven är oftast de värst utsatta för erosion. Om erosion utvecklas kan den bli bakåtgripande och leda till underminering av konstruktioner, leda till instabilitet och i värsta fall ett dammhaveri (Association of State Dam Safety Officials, 2024). Vattenvägens utformning är därför kritisk för att minska risken för erosion.

Dath & Mathiesen (2010) beskriver att strömningsrelaterad erosion främst uppkommer i anslutande jordslänter och vid dåligt berg eller dålig betong. Åtgärder uppströms bottenutskov kan inkludera betong- eller plåtlining, men även anläggningens geometrier är kritisk för att minska risken för erosion. Exempelvis är pelare med strömlinjeformade hörn i stället för skarpa hörn mot utskovet fördelaktiga ur ett erosionsperspektiv. Friktions- och stötkrafter vid spill kan också orsaka erosion vid själva avstängningsanordningen, något som bör minimeras genom utskovets utformning. Åtgärder runt luckan kan exempelvis vara betong- eller plåtlining. Åtgärder direkt nedströms utskoven kan inkludera förbättrad energiomvandling och förstärkningar i form av betongplattor (skibordsförlängning), bergförankrade skibord, ledmurar i betong och betong- eller plåtlining som förstärkning av vattenvägen. Vid behov kan även jordslänter nedströms utskoven behöva skyddas.

2.2.4 Kavitation

Kavitation sker när en vätskas lokala tryck sjunker under dess ångtryck, vilket leder till att vätskan förångas lokalt och gasbubblor bildas. Det kan liknas vid att vätskan "kokar" eller går över i gasform. När trycket stiger igen nedströms punkten där kavitationen sker imploderar bubblorna vilket skapar stora krafter som kan skada närliggande ytor av fast material (Dath & Mathiesen 2010).

Li (2023) beskriver att risken för kavitation uppstår då vattenhastigheten vid avbördning överstiger 20 m/s, och att detta är ett problem som påverkar många dammar i Sverige (vid yt- såväl som bottenutskov). Tryckförändringar som sker till följd av strömning förbi snabba geometriförändringar (t.ex. i inloppssektioner) kan orsaka lokala låga trycknivåer som kan ge upphov till kavitation. Fenomenet ger också upphov till höga ljud, vibrationer och kan störa vattenflödet, vilket även kan resultera i minskad avbördnings-kapacitet (Liu 2014).

Kolachian m.fl. (2012) belyste att kavitation är ett relativt vanligt problem i många dammar i Iran, som ökar med ökande vattenpelare och ökande vattenhastigheter.

De påtalade dels att problemet kan avhjälpas genom luftning och visade också genom numeriska och fysikaliska modellförsök, att luftinjektioner nedströms bottenutskov kan minska riskerna eller helt förebygga förekomsten av kavitationsproblem. Även andra studier har visat att luftning av vattenflödet kan avhjälpas kavitationsfenomen, men tillvägagångssätten (för luftning) måste anpassas efter respektive anläggning (Pfister & Hager 2010; Kolachian m.fl. 2012; Wei & Deng 2023). Av konstruktiva skäl är det dock relativt utmanande att implementera åtgärder för att införa lufttillförsel till befintliga bottenutskov.

Ytbehandling i form av målning av luckor är vanligt för att förhindra korrosion kopplad till kavitation, i de fall man ej använt rostfritt stål.

2.2.5 Luft-undertryck och höga lufthastigheter

Stora luft-undertryck (i utrymmen kring bottenutskovet) uppkommer på grund av det utströmmande vattnets hastighet under luckan (Energiföretagen, 2021) och beskrivs av Kolachian m.fl (2012) som ett relativt vanligt fenomen vid bottenutskov. Undertryckseffekten uppkommer vid spill genom att spillvatten med höga flödeshastigheter drar med sig luft. I utrymmen som är sammanlänkade med utskovet (t.ex. trapphus, maskinhallar, manöverutrymmen) kan då kraftiga luftströmmar bildas, vilket bl.a. kan skapa svårigheter att öppna tillträdesdörrar och skapa allmän oreda som kan leda till personsäkerhetsrisker (Halvarsson m.fl. 2019). Fenomenet kan dock avhjälpas med tillräcklig luftning (Pfister & Hager 2010; Kolachian m.fl. 2012; Wei & Deng 2023).

RIDAS Tv 9, Avbördande funktion (Energiföretagen, 2021) beskriver vidare att undertryckseffekten vid olyckligt utformad lucka kan visa sig bli ett stort tillskott till det totala spelkrafts-behovet. Som riktvärde på undertrycket anges 0,4 bar, men det är svårt att bestämma den yta som detta verkar på. Det finns verkliga exempel där sugverkan under en (dåligt utformad) planlucka medfört en 20%-ig ökning av det förväntade spelkraftsbehovet. En tumregel för sugkraftens normala storlek är att den kan vara cirka 1 – 2 gånger sidotätningarnas friktion.

2.2.6 Luftmedrivning och luftutblåsning i spillvatten

När spillvatten flödar genom bottenutskovet kan luft inneslutas och tillfälligt slukas av vattnet. Den slukade luften blandas in i vattnet i form av stora och små bubblor och transporteras med vattenströmmen in i tunneln. Vanligen uppstår dessa fenomen p.g.a. bristfällig luftning när avbördningen sker radiellt ner i vertikala schakt eller stråkande längs ett lutande schakt ned i en fylld tunnel (Dath & Mathiesen 2010). Luftmedrivning kan minska effektiviteten hos utskovet genom att det leder till oförutsedda/ogynnsamma flödesförhållanden.

Medriven luft i utskovstunnlar söker sig mot lägre tryck, vilket innebär att den rör sig med strömmen om tunneln lutar mindre än trycklinjen, men mot strömmen om lutningen på tunneltaket är större än lutningen på trycklinjen. I det senare fallet kan detta leda till att luft ansamlas i tunneltak och specifikt i övergången mellan schakt och tunnel där det ofta råder låga tryckförhållanden. När dessa luftfickor blir tillräckligt stora, eller om det sker förändringar i strömningen och tryckförhållandena, kommer den komprimerade luften sträva mot möjligheten att

slippa ut. Fenomenet, som vanligen benämns luftutblåsning (eng. blowouts), innebär att instängd, komprimerad luft expanderar när den rör sig uppåt – på grund av tryckförändringen. Denna process accelereras då trycket avtar och till slut skjuts en del av det mötande vattnet ut som en vattenkaskad. Utblåsningar av luft och vatten kan då ske närmast explosionsartat. Luftutblåsningen har i sig inte någon skadlig effekt, men det utblåsta vattnet kan orsaka allvarliga skador på bland annat betongkonstruktioner (Dath & Mathiesen 2010; Liu 2014).

Luftmeddrivning bedöms också kunna orsaka slitage på lucktätningar och leda till läckage.

2.2.7 Nedåtsug

Nedåtsug beskrivs i RIDAS Tv 9, Avbördande funktion (Energiföretagen, 2021) som ett känt potentiellt problem vid bottenutskov, men anses främst vara ett problem som uppstår med planluckor. Nedåtsug kan dels skapa oönskade strömningar och virvlar i vattnet nedströms, vilket kan leda till instabilitet och potentiella skador på strukturer eller utrustning i närheten. Kraftiga nedåtsug kan även belasta planluckorna och deras mekaniska system, vilket kan leda till slitage, skador eller funktionsfel över tid; orsaka kavitationsfenomen; eller om nedåtsuget är oregelbundet eller oförutsägbart kan det göra det svårt att reglera vattenflödet på ett effektivt sätt, vilket påverkar hela systemets funktion.

2.2.8 Upptryck

Upptryck är ett strömningsrelaterat fenomen som kan påverka överkantstätningar och därför ställer stora krav på dessa utformningar (ej att blanda ihop med upptryck från undergrunden som uppstår p.g.a. det dämnda vattnet mot en damm och utgör ett invändigt vattentryck som bl. a. reducerar tyngden hos dammbyggnaden och därför påverkar dess stabilitet negativt). Upptryck som strömningsfenomen uppstår när vatten strömmar genom bottenutskovet, där det kan skapa ett upptryck på luckan. Detta tryck kan vara betydande, särskilt vid höga flödeshastigheter och stora vattenpelare. Det ökade trycket kan orsaka deformation eller skador på tätningen om den inte är korrekt dimensionerad eller installerad. Upptrycket kan även förändra den kraft som tätningen utövar mot luckans yta. Om tätningen inte längre har tillräcklig kontaktkraft kan det leda till läckage. Detta är särskilt kritiskt vid höga tryck, där även små läckage kan leda till betydande vattenförluster och potentiella skador. Upptrycket kan även påverka temperaturen på tätningen, särskilt om vattnet har stora temperaturvariationer, vilket kan påverka materialets egenskaper och leda till sprickbildning eller deformation, vilket i sin tur kan påverka tätningens effektivitet (Vinnogg, 1974).

2.2.9 Vibrationer och pulserande strömningar

Vibrationer beskrivs som ett vanligt förekommande fenomen i dammar – vid de flesta typer av utskov och utskovsluckor. Vibrationer kan leda till en rad olika problem och dammluckor beskrivs vara en särskilt utsatt konstruktionsdel. Bottenutskov anses synnerligen utsatta då strömningshastigheterna oftast är högre än hos andra luckor; samt att tryckvariationerna mot konstruktionen är större än vid ytutskov. Risker med vibrationer anses särskilt stor vid stängning av luckan.

Vibrationer kan bl.a. uppkomma från mekaniska eller strömningsrelaterade orsaker. När vatten flödar runt eller förbi en strukturell komponent sker en förändring i flödets riktning, vilket kan leda till vibrationer då energin från flödet överförs till strukturen. Även om flödet är jämnt kan oregelbundna krafter uppstå på grund av turbulens, sned inströmning eller andra flödesfenomen, vilket i sin tur skapar vibrationer. Är vibrationernas amplitud tillräckligt hög för att skapa betydande spänningar och dessa vibrationer pågår under en längre tid, kan det leda till utmattning av strukturella komponenter och allvarliga skador – eller i värsta fall haveri. Vibrationer (dess uppkomst och egenskaper) påverkas också av hur luckan manövreras (ICOLD Bulletin 102).

Dath & Mathiesen (2010) beskriver att äldre luckor ofta inte är optimalt utformade för att styra vattenstrålen nedströms luckan utan istället främst är designade för att klara det statiska vattentrycket. Eftersom dessa luckor ofta saknar en bestämd avlösningskant, sker flödesavlösningen också utan styrning, vilket leder till att avlösningspunkten förflyttar sig – något som kan orsaka vibrationer i konstruktionen. Detta fenomen kan leda till att hela luckkonstruktionen, eller i värsta fall hela utskovet kommer i svängning. Storleken på svängningen beror av hur väl dämpat systemet är. I konstruktioner som betongdammar kan allvarliga resonansproblem uppstå om svängningar i flödet matchar konstruktionens egenfrekvens, men i utskov förlagda till bergtunnlar är resonansproblemen vanligen relativt små, då dämpningen av bergmassan är stor.

Även kavitation kan bidra till vibrationer genom plötsliga tryckändringar.

RIDAS Tv 9, Avbördande funktion (Energiföretagen, 2021) beskriver vidare att avbördningsanordningar är utsatta för hydrodynamiska laster, vilket innebär att det är viktigt att kontrollera att deformationer eller svängningar som kan skada konstruktionens funktionalitet inte uppstår. De största dynamiska påkänningarna beskrivs uppstå genom pulserande vattentryck p.g.a. ett svängningssystem mellan de två delarna: en hydraulisk strömning och en elastisk konstruktion, där vibrationernas omfattning påverkas av styrkan på exiteringen och dämpningen i systemet. Utformningen av avbördningssystemet bör därför göras för att minimera risken för pulserande strömning och för att säkerställa att konstruktionens egenfrekvens ligger väl separerad från virvelavlösningens frekvens.

Halvarsson m.fl. (2019) beskriver att kraftiga luftpulsationer vid spill har orsakat både deformation på intagsgaller och instängd personal i manöverutrymmen.

2.2.10 Höga ljud / buller

Höga ljud / buller kan orsakas av undertryck och luftströmmar, men även av vibrationer. I de fall detta inte går att avhjälpa, är personlig skyddsutrustning av största vikt för att undvika skador på t.ex. hörselgångar.

2.2.11 Miljöaspekter

Aspekter kring klimat och miljö handlar främst om påverkan på artrikedom eller klimat; och risk för utsläpp av klimatgaser vid spill av bottenvatten från magasinet, om reservoaren blivit stratifierad. Luftmedrivning (beskrivs ovan) kan leda till luftövermättnings av vattnet, vilket lokalt påverkar fisklivet negativt (Dath &

Mathiesen 2010). En stratifierad reservoar innehåller vanligen högre halter metan och koldioxid i de djupare skikten, gaser som bildas då organiskt material bryts ned på magasinbotten. Generellt konstateras att utsläpp från stratifierade reservoarer varierar med säsong, magasin geometrier, (stratifierad) temperatur, fauna, alg tillväxt, magasin djup och flöden genom magasinet. Omrörning motverkar att klimatgaserna koncentreras vid botten, men data saknas för de flesta dammar – både nationellt och internationellt. Klimatgaserna släpps ut till atmosfären antingen genom diffusion från grunda vatten eller genom avbördning av vatten från magasinbotten, t.ex. genom djup- eller bottenutskov.

2.2.12 Elektriska fel

Elektriska problem som belysts av Halvarsson m.fl. (2019) innefattar kommunikationsproblem, utlöst motorskydd, problem med slirkoppling, problem med klämspärkoppling och problem med lager som skar i växelströmspel.

2.3 CFD-BERÄKNINGAR OCH MODELLFÖRSÖK

Strömningsförhållanden vid avbördning i bottenutskov kan till viss grad analyseras med CFD-beräkningar eller i modellförsök.

Erfarenheter från projekt visar att CFD-beräkningar kan användas för att bestämma avbördningskapaciteten samt för att beskriva de allmänna strömningsförhållandena (vatten) med god noggrannhet. CFD-beräkningar kan också användas för att identifiera områden med kavitationspotential genom analys av trycknivåer i hela beräkningsmodellen. CFD-beräkningarna kan användas för att simulera både vatten- och luftflöden. Interaktion mellan vatten och luft är dock komplext (Liu 2014; Teng 2019) och för bäst resultat behöver numeriska modeller kalibreras mot observationer när detta är möjligt. Begränsningar avseende modellernas upplösning innebär att småskaliga fenomen kan vara svåra att modellera (t.ex. spray vid små lucköppningar och motsvarande luftinblandning, ejektorverkan m.m.). Dynamiska fenomen kan också vara svåra att upptäcka om dessa uppkommer på relativt långa tidsskalor, som inte är kompatibla med tillgänglig datorkapacitet. Det är därför viktigt att använda säkerhetsmarginaler vid tolkning av modellresultat, särskilt avseende luftflöden (hastigheter, tryck).

Modellförsök uppvisar liknande fördelar som CFD-beräkningar vad gäller uppskattning av avbördningskapacitet och beskrivning av de allmänna strömningsförhållandena (vatten) i bottenutskov. Analys av kavitationspotential är dock begränsad på grund av begränsningar vid tryckmätningar (begränsat antal platser, noggrannhet på mätutrustning). Interaktion mellan vatten och luft är också svårt att reproducera på grund av skaleffekter (ICOLD 2016; Teng 2019).

CFD-beräkningar är relativt enkla att sätta upp för en eller flera geometrier. Begränsningar i datorkapacitet innebär dock att antal beräkningar och längd på simuleringsperiod kan behövas avgränsas. CFD-beräkningar innehåller resultat inom hela beräkningsmodellen och är tillgängliga utan tidsbegränsning efter arkivering. Modellförsök är, i jämförelse med CFD-beräkningar, dyrare och mer komplext att ta fram, men kan ge bättre noggrannhet i jämförelse med CFD. De kan också krävas för att verifiera CFD-beräkningar och kunna kalibrera CFD-

beräkningarna. Det är dock möjligt att utföra flera tester på kort tid. Antalet försök är dock begränsade och kan inte kompletteras efter rivning av modellen (ICOLD 2016).

3 Intervjuer

Erfarenheter från projekt rörande idrifttagning av avställda djup- och bottenutskov sammanfattas i avsnitt **Error! Reference source not found.** till **Error! Reference source not found.**.

3.1 MOTIV / BAKGRUND

Motiv för att idriftta avställda djup- och bottenutskov, som under en längre tid varit avställda, är desamma vid samtliga anläggningar. Bottenutskoven beskrivs ha tagits i drift som en dammsäkerhetshöjande åtgärd för att kunna sänka av magasinet under ytutskovens tröskelnivå vid upptäckt av allvarliga brister samt för att kunna utföra renoveringsarbeten på/vid dammen. I några projekt beskrivs också motivet vara att minska risken för begränsad avbördningskapacitet vid drivgodsproblematik. Trots diskussioner om redundans medräknas inte bottenutskoven i någon av anläggningarnas avbördningskapacitet, utan är främst tänkta att användas i dessa specifika situationer.

En av respondenterna understryker att det enligt internationella riktlinjer (bland annat i Tyskland) ofta krävs att dammar ska vara försedda med bottenutskov just för att magasinet ska kunna sänkas av vid allvarliga brister – för att garantera dammens säkerhet.

Även om det i Sverige inte finns krav på att en anläggning ska utrustas med bottenutskov, har det i intervjuerna framkommit att det är samma bakomliggande faktorer som är drivkrafter för att idriftta avställda djup- och bottenutskov som ingått i studien. Man har helt enkelt velat kunna säkerställa dammsäkerheten vid upptäckt av allvarliga problem.

3.2 UTREDNINGAR

Samtliga av de i studien inkluderade idrifttagningarna har föregåtts av relativt omfattande förstudier / utredningar. Det skiljer sig något mellan anläggningarna, men i stora drag är det snarlika utredningar som utförts. I tabell 1 listas de moment som ingått i förstudien, för respektive damm.

Tabell 1. Ett urval av de utredningar som ingått i respektive Dammsäkerhetsprojekt

Damm	Utredning
Damm 1	• CFD-analys • Kontroll av last på bottenplatta (gjuten på berg), porttryck, upptryck (samt påverkan på dränage). • Fysiska modellförsök i Älvkarleby för utformning av vattenväg, energiomvandlare samt ledmur (för att minska risken för överspolning). • Utredning status på befintlig ställning (plåtinklädnad) samt utredning om erforderliga åtgärder. • Utredningar för temporär avstängningsanordning (se nedan) CFD-analys inkluderande: • Avbördningskapacitet • Luftningsbehov • Tryckpulsationer (för luftintag) • Kavitationsskador på bultar Utredningar för temporär avstängningsanordning inkluderade • Prov-undervattensgjutningar för test av gjutbarhet eftersom höga tryck och låga temperaturer råder. • Utredning kring svårigheter att montera ingjutningsgods samt behov av ingjutningsgods samt dess placering. • Dykinspektioner kring området där temporär avstängning uppförs. • Utredning kring val av injektering/kemankare i och med låga temperaturer (endast någon enstaka plusgrad) och arbetstemperaturerna för kemankare och injekteringsmassor. • Falsars utförande för påverkan strömningsförhållanden
Damm 2	• CFD-analys • Kontroll av last på bottenplatta (gjuten på berg), porttryck, upptryck (samt påverkan på dränage). • Fysiska modellförsök i Älvkarleby för utformning av vattenväg, energiomvandlare och ledmur. • Utredning status på befintlig ställning (plåtinklädnad) samt utredning om erforderliga åtgärder. • Utredningar för temporär avstängningsanordning (se nedan) CFD-analys inkluderande: • Avbördningskapacitet • Luftningsbehov • Tryckpulsationer (för luftintag) • Kavitationsskador på bultar • Kontroll av strålllängd och behov av strålupplyftare. Utredningar för temporär avstängningsanordning inkluderade • Provgjutningar för test av gjutbarhet eftersom höga tryck och låga temperaturer råder. • Utredning kring svårigheter att montera ingjutningsgods samt behov av ingjutningsgods samt dess placering. • Dykinspektioner kring området där temporär avstängning uppförs. • Utredning kring val av injektering/kemankare i och med låga temperaturer (endast någon enstaka plusgrad) och arbetstemperaturer för kemankare och injekteringsmassor. • Utredning kring falsars utförande för påverkan på strömningsförhållanden.

Damm 3	• Utredning kring hur ny utloppskanal skulle dras. Den tidigare byggdes senare än dammen (på 70-talet). • Förstudier Mek-åtgärder (luckans renoveringsbehov). • Utredning för behov av plåtinklädnad av vattenvägen – anpassad i nedströmsområdet. Endast fysiska modellförsök gjordes för detta. • Fysiska modellförsök: test av originalutförande samt utformning av nya kanalalternativ. • CFD: test av originalutförande samt utformning av nya kanalalternativ. • Renoveringsprogram upprättades.
Damm 4	• Spelkraftsberäkningar • Tillståndsbedömning lucka och vattenvägar inkl Hållfasthetsberäkning lucka • CFD - analys CFD-analys inkluderande: • kontroll av luftmeddrivning vid avbördning kopplat till förväntade undertryck.
Damm 5	• Utredning vattenvägens utformning och behov av energiomvandlare. • Utredning behov av ytbehandling av lucka och ställning i vattenväg (fram till lucklager) • CFD-analys CFD-analys inkluderande: • Kontroll av luftmeddrivning • Energiomvandling • Spray-utredning, med olika höjd på lucköppningar

3.3 UTFORMNING OCH ANLÄGGNINGSDATA

Oavsett om utskovsluckan har renoverats eller bytts ut berättar respondenterna att åtgärderna har varit kostsamma och tekniskt krävande. Det vittnas om många olika typer av tekniska utmaningar. Gemensamt för projekten är dock att man inte behövt göra ingrepp i den bärande betongen för att genomföra de åtgärder som krävts för att upprusta och ta i drift de avställda utskoven. Och trots att relationshandlingar vanligen saknas, rör ingrepp främst synliga delar (som byts eller lagas), varför projekteringen ändå kunnat utföras tillfredsställande och utan större förändringar i byggskedet.

Fem anläggningar ingår i studien (anläggningsdata summeras i tabell 2), med maxhöjd/vattenpelare varierande mellan 20 och 40 meter. En damm har dubbla (parallella) luckor, övriga endast en lucka.

Tabell 2. Anläggningsdata.

	Damm 1	Damm 2	Damm 3	Damm 4	Damm 5
Dammtyp	Lamell	Lamell	Lamell	Lamell	Lamell
Utskovstyp	Kulvertutskov, Centriskt dammen Indämd på uppströmssida	Kulvertutskov, Centriskt dammen Indämd på uppströmssida	Kulvertutskov, Centriskt dammen Indämd på uppströmssida	Kulvertutskov, Centriskt dammen Indämd på uppströmssida	Kulvertutskov, Centriskt dammen Indämd på uppströmssida samt nedströms
Höjd	37m (till DG)	31,5m (till DG)	24 m (till DG) 26,5 m (till krön)	25 m (till krön)	29 m (till krön)
Placering av utskov	Djupaste delen	Djupaste delen	Djupaste delen	Djupaste delen	Djupaste delen
Dammens avbördnings- kapacitet	1165 m ³ /s	799 m ³ /s	1580-1590 m ³ /s	740 m ³ /s	Information ej tillgänglig
Bottenut- skovets avbördnings- kapacitet	245** m ³ /s	430 m ³ /s	480 m ³ /s	340 m ³ /s	Information ej tillgänglig
Dim. Flöden	895 m ³ /s	910 m ³ /s	2 095 m ³ /s	1080 m ³ /s	3535 m ³ /s
Nöddrift*	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Lucka	Segmentlucka	Segmentlucka	Segmentlucka	Segmentlucka	Segmentlucka
Historisk användning	Avställt sedan byggtiden	Avställt sedan byggtiden	Avställt sedan byggtiden	Avställt sedan byggtiden	Avställt sedan byggtiden

*Exempel på nöddrift är:

- Förbränningsmotor som driver en hydraulpump som i sin tur driver en hydraulmotor
- Ponnymotor, d.v.s. eldriven motor, och reservverk

Se även stycke 3.4.1 *Reservdrift och alternativa avstängningsmöjligheter*.

**Med begränsningar p.g.a. vibrationer. Utan driftbegränsningar 425m³/s.

Samtliga bottenutskov har gemensamt att de har begränsad eller ingen indämning (damm 5 är indämd ca 1 m på nedströmssidan). Kulvertens längd varierar med dammhöjden, men generellt sitter luckan med ett avstånd på 5 m till tunnelinloppet och 15 – 25 m till tunnelutloppet, se figur 1 – 2.

Bottenutskoven i studien användes troligen, likt många andra svenska bottenutskov, för att förbilda vatten under byggtiden samt för att reglera magasinet under första dämningstagandet.

Åtgärder för att åter ta de befintliga utskoven i drift beskrivs i tabell 3, och innefattar för utloppskanalerna bl.a. lagning av plåtar, nya erosionsskydd, strålllyftare, rivning och uppförande av nya ledmurar samt höjning av befintliga ledmurar för skydd mot överspolning vid spill, förlängning av skibord, ny bottenplatta, bergförankring av platta, men även en delvis helt ny sträckning av bottenutskovskanalen i ett projekt.

Exempel på spill i krökt respektive rak utloppskanal ses i figur 1 och figur 2 nedan.

Åtgärder för isfrihållning har ej bedömts nödvändiga på uppströmssidan p.g.a. de stora djupen. Vid damm 1–4 finns vädskydd för utrymmet mellan lucka och utlopp i form av takskjutsportar vid utloppet. I damm 5 finns värme framdragen från stationen som blåser mot luckorna vid behov. Vid några bottenutskov finns även värme framdragen för att vid behov kunna värma falsar.



Figur 1. Spill från bottenutskov med krökt utloppskanal. Foto av Uniper.



Figur 2. Spill från bottenutskov med rak utloppskanal. Foto av Uniper.

Tabell 3. Utförda åtgärder på respektive damm.

Anläggning	Avstängnings- anordning byggskede	Åtgärder Luckmeknik	Åtgärder Bygg
Damm 1	Planlucka med nya tätningsytor på befintliga luckfalsar	Ny segmentlucka i rostfritt stål. Nya falsar och plåtinklädnad utanpå befintlig plåtinklädnad och infästning genom bef. plåt i betongen. Renovering av befintligt spel.	Åtgärder kanal och betong, bl.a. höjning av en ledmur och "keps" på ledmur för att förhindra överspolning vid spill. Muddring framför utskovet.
Damm 2	Planlucka med nya tätningsytor på befintliga luckfalsar	Ny segmentlucka i rostfritt stål. Nya falsar och plåtinklädnad utanpå befintlig plåtinklädnad och infästning genom bef. plåt i betongen. Renovering av befintligt spel.	Åtgärder kanal, betong. Ny utloppskanal med ändrad sträckning, nya ledmurar och kanalbotten, samt bergförstärkning. Strålupplyftare. Förlängd bottenplatta n.s. luckan
Damm 3	Nål-avstängning	Renovering av befintlig segmentlucka och tillhörande manöverutrustning. Blästring och ytbehandling av lucka (p.g.a. rostfläckar på uppströmsytan av bordläggningen).	Återställande av utloppskanal (fylld med massor under avställning). Förändring av kanalens geometri (av hydrauliska skäl). Omledning av utloppskanal till befintlig energi-omvandlare för ytutskov, inkl. ny ledmur. Förstärkning befintliga ledmurar, lagning av erosionsskador på energiomvandlare, stabilitets-förstärkning höger fyllningsdamm mm.
Damm 4	Sätt-avstängning	Renovering av befintlig segmentlucka.	Påtaglig bergerosion nedströms utloppet efter provtappning vaför men efter upptäck valde att anlägga en strålupplyftare.
Damm 5	Us: Sättluckor Ns: Sättbalkar	Renovering av 2 parallella utskov med segmentluckor.	Ställning från sättläge till segmentluckans lucklager.

Samtliga luckor har begränsningar gällande öppningshöjd, bl.a. för att minimera risken för kavitation i inloppssektionen. I ett fall infördes även denna begränsning för att vattnet inte skulle träffa en lucklagerbalk nedströms utskovet. I detta fall var lucklagerbalken (i betong) placerad i höjd med inloppets överkant, men nedströms utskovet. Dels orsakade detta risker för erosion/belastning på balken, men även oönskad störning i vattenflödet som riskerar att trigga oönskade strömningsförhållanden.

3.4 IDRIFTTAGNING (FUNKTIONSKONTROLL)

De största riskerna med användning av bottenutskov beskrivs vara följande punkter, som också noterats vid idrifttagningen eller i utredningar:

- Redundant avstängning för underhåll och nödläge saknas.
- Strömningsrelaterad erosion nedströms utskovet
- Kavitation
- Stora undertryck och luftströmmar
- Vibrationer
- Vattenkaskader
- Höga ljud/buller

Punkterna ovan beskrivs närmare i avsnitt 3.4.1 till 3.4.7. De efter idrifttagningen observerade skadorna som beskrivs i 3.4.1 till 3.4.7 sammanfattas i tabell 4 nedan. I avsnitt 3.4.8 till 3.4.10 beskrivs övriga risker som bör beaktas då djup- och bottenutskov åter tas i drift; och i avsnitt 3.4.12 till 3.4.13; hur dessa risker har behandlats i de aktuella projekten.

Tabell 4. Sammanställning av observerade skador

	Damm 1	Damm 2	Damm 3	Damm 4	Damm 5
Erosion	Inga observerade skador	Inga observerade skador	Data saknas	Påtaglig erosion nedströms	Inga observerade skador
Kavitation	Ej noterats i samband med idrifttagning. Skador noterade på bef. lining vid inlopp.	Ej noterats i samband med idrifttagning. Skador noterade på bef. lining vid inlopp.	Ej noterats i samband med idrifttagning.	Ej noterats i samband med idrifttagning. Föreligger risk enl. CFD.	Ej noterats i samband med idrifttagning. Föreligger risk enl. CFD.
Luftundertryck	Normala lufttryck.	Normala lufttryck.	Normala lufttryck.	Höga luftundertryck och stora luft-hastigheter.	Höga luftundertryck och stora luft-hastigheter.
Vibration	Vibrationsproblem detekterade, vilket medför begränsningar vid lucköppning.	Vibrationsproblem detekterade, vilket medför begränsningar vid lucköppning.	Vibrationsproblem detekterad, vilket medför begränsningar vid lucköppning.	Inga observerade problem	Inga observerade problem
Vattenkaskader	Inga observerade problem.	Inga observerade problem.	Vatten slår i lucklager-balk vid full lucköppning.	Inga observerade problem.	Spray vid begränsad lucköppning.
Höga ljud/buller	Förekommer i samband med vibrationer	Förekommer i samband med vibrationer	Förekommer i samband med vibrationer	Förekommer i samband med stora luftundertryck	Förekommer i samband med stora luftundertryck

3.4.1 Reservdrift och alternativa avstängningsmöjligheter

Samtliga dammar har redundant manöveranordning för öppning och stängning av luckan, i form av vev, separat förbränningsmotor eller eldriven motor och reservverk till en hydraulmotor som driver det ordinarie spelmaskineriet. Dock saknas alternativ avstängningsanordning vid samtliga anläggningar, något som av flera respondenter beskrivs som en stressfaktor (psykologisk) vid provspill/funktionskontroll/identifikation. Ingen av dammarna har heller luckor i serie, men i åtminstone ett av projekten har möjligheten att i efterhand sätta in luckor i serie utretts, men p.g.a. komplexiteten har alternativet valts bort.

3.4.2 Erosion

I de fall vattenvägens botten är belägen under nedströms vattenyta har man i vissa projekt kört ROV eller multibeam före och efter spill för att jämföra skador. I damm 1, 2 och 5 noterades inga anmärkningsvärda skador. I de fall bergytan är belägen ovan nedströms vattenyta har visuell inspektion (med/utan drönare) kunnat utföras av berget före och efter spill. I Damm 4 noterades påtaglig bergerosion efter idriftsättningen, till den grad att en krater bildats nedströms utskovet. Som efteråtgärd utfördes en skibordsförlängning med strålupplyftare (se figur 3) för att ej spola sönder dammens grundläggning. För att kunna utföra arbetet i torrhet uppfördes en fångdamm på nedströmssidan.



Figur 3 Exempel på ett bottenutskovs-utlopp med strålupplyftare. Foto av Uniper.

3.4.3 Kavitation

I de intervjuer som genomförts i denna studie framkommer att kavitation inte noterats i någon av de berörda dammanläggningarna i samband med idrifttagandet, men risk för kavitation föreligger framförallt i damm 4 och damm 5 (enligt CFD-analys). Vid provspill antas risken för kavitation vara minimal och vid behov av skarp användning, om man skulle behöva sänka av magasinet, bedöms kavitationsrisken underordnad dammsäkerheten.

I damm 1 och 2 noterades kavitationsskador på bultar på den befintliga plåtliningen (vid inloppet). Istället för att förnya dessa lades en ny plåt med bultförband som förankrades genom befintlig plåtlining, i betongen.

3.4.4 Luft-undertryck

I damm 4 och damm 5 har man, trots omfattande förstudier, fått problem med stora luft-undertryck, vilket bedömts vara oväntade fenomen. I damm 4 uppgick undertrycket till 1800 Pa. Efter detta vittnade 2 av 5 personer, som var med vid idrifttagningen, om ömmande hörselgångar. Utöver ömmande hörselgångar observerades höga lufthastigheter på grund av det stora undertrycket, vilket resulterade i att saker flög runt i rummet och att bl.a. en skärm till en laptop slog igen. Lufthastigheter > 50 m/s uppmättes vid det initiala öppnandet (vid begränsad lucköppning (40–80 cm). Se vidare under avsnitt 3.5.3.

Åtgärder för att minska arbetsmiljörisker eller obehagskänslor beskrivs i avsnitt 3.4.13

3.4.5 Vibrationer

I samtliga dammar kan flödet regleras genom att öppningshöjden för luckan justeras. Att kunna göra detta är väsentligt då flera av bottenutskoven får problem med vibrationer vid full lucköppning. I flera dammar noterades vibrationsproblem vid nästan full öppning av luckan. Detta antas bero på att, vid nästan full öppning, skapades pulserande vatten, vilket i sin tur skapade vibrationer.

3.4.6 Vattenkaskader

Vid provspill i damm 3 noteras att vatten vid full lucköppning slår i nedströms lucklagerbalk, ett fenomen som hade identifierats med CFD redan i förstudien.

Vid provspill i damm 5 utvecklades en vattenkaskad (eng. spray), vid en begränsad lucköppning (mellan ca 0,3 och 0,4 m), som täckte hela utloppet. Denna beskrivs ha orsakats av att luckans tröskel ligger försänkt i skibordet, vilket gjorde att lufttillförseln blockerades från nedströmssidan. Detta antas också vara en av orsakerna till de stora undertrycken som beskrivs i avsnitt 3.4.4. En annan orsak beskrivs kunna vara att styrplåtar haft andra vinklar gentemot de på ritning, vilket kan ha bidragit till en kaskad av vatten.

3.4.7 Höga ljud / buller

Utöver risken för personskada, finns även en risk för nedsatt kommunikationsförmåga, vilket i sin tur kan leda till fel eller missar. Detta avhjälpas med personlig säkerhetsutrustning.

3.4.8 Drivgods

Vid flera dammar, inför idrifttagningen, kördes multi-beam uppströms utskoven och potentiellt drivgods rensades bort, för att förhindra igensättning av utskoven vid spill. Inga problem med drivgods har heller rapporterats vid spill.

3.4.9 Isbildning

Isbildning (och fastfrysning av utskov eller tyngande ispåbyggnad) har ej rapporterats vid något av utskoven. Endast uppströmssidan är indämd och på så

pass stort djup (>20 m) att vattnet på uppströmssidan ej förväntas frysa. Vid de flesta utskoven har dock nedströmssidan försetts med våderskydd (se avsnitt 3.3).

3.4.10 Miljö

Vattendomen är styrande i samtliga aktuella projekt och gentemot denna har inga avsteg gjorts. I intervjustudien togs även andra aspekter gällande klimat och miljö upp.

De berörda samtalspunkterna var:

- Påverkan på artrikedom eller klimat.
- Risk för utsläpp av klimatgaser vid sänkning av magasin, om reservoaren blivit stratifierad.

Det har dock konstaterats att dessa aspekter inte ansetts vara relevanta då utskoven inte är en del av det avbördande systemet, utan främst är till för nödsituationer. I dessa fall är miljöfrågor sekundära i förhållande till dammsäkerheten. Vid svenska dammanläggningar anses också magasinen generellt vara omrörda, varför risken för utsläpp av klimatgaser anses minimal.

3.4.11 Tillstånd

Tillstånd för rätten att nyttja bottenutskoven har beviljats, men denna process beskrivs inte som särskilt komplex i de aktuella projekten.

3.4.12 Arbetsmiljö

Höga luft-undertryck och buller är de vanligaste rapporterade fenomenen som skapat arbetsmiljörisker vid idrifttagning. Dessa inkluderar bl.a. skador på hörselgångar (med nedsatt hörsel som följd), klämrisk i dörrar, risk att bli instängd, svårigheter att kommunicera och ögonskador från partiklar.

I äldre anläggningar såsom dessa är sällan utrymningsvägar anpassade till dagens krav. Dessutom vittnas om en oro över att inte kunna stänga luckan.

3.4.13 Riskanalys

Risker som identifierats kunna uppstå under idrifttagning (men även ordinarie avbördning) beskrivs under avsnitt 3.4.1 – 3.4.9. Åtgärder avseende anläggningens utformning som är kopplade till dammsäkerhet beskrivs i huvudsak under avsnitt 3.3. Specifika arbetsmiljörisker beskrivs under avsnitt 3.4.12 och 3.5.3 – 3.5.4. Inför idrifttagning utfördes en detaljerad riskanalys för att avhjälpa och förebygga risker som identifierats under utredningar / detaljprojektering gällande dammsäkerhet och arbetsmiljö, men som inte kunnat projekteras bort. I vissa hänseenden vidtogs ytterligare åtgärder efter denna riskanalys, såsom

- Anläggande av slussar i inspektionsgångar (för hantering av luft-undertryck). Slussfunktion säkerställs.
- Skrotning av berg/betong där det bedöms nödvändigt.

- Genomgång av spel, smörjning av lager och påfyllning av olja inför idrifttagning.
- Kontroll av reservdrift.
- Upprättande av rutin / bruksanvisning för luckan (inkl. manöverhastighet med ordinarie spel / reservdrift; tid för öppning och stängning från respektive ytterläge).
- Kontroll av att erforderliga tillstånd finns på plats samt säkerställande av att överträdelser av vattendom inte sker och att denna inte innehåller begränsningar som kan påverka idrifttagningen.
- Nyckelpersoner gör självtest inför idrifttagning för att klarlägga riskområden.
- Området städas för att minimera risken för flygande saker.
- Fastställande av signal (teckenspråk) för avbrytande av spill. Samtliga närvarande har rätt att avbryta.
- Skydd av bl.a. rörliga delar, där klämrisk råder samt av strömsatta delar
- Luftig tidplan.
- Adekvata luckor/portar hålls öppna/stängda under idrifttagning.
- Nyckelpersoner utrustas med hörselskydd med kommunikation (BT och radio).
- Personal förses med personlig skyddsutrustning (inkl. hjälm, hörselskydd, skyddsglasögon, fungerande handhållen belysning, ev. komradio).
- Fungerande belysning.
- Mätning av luftstötter och gränsvärde (för att avbryta spill).
- Tydliga ansvarsområden, t.ex. vem som dokumenterar avbördningskapacitet, vibrationer, lufttryck etc.; samt gränsvärden och åtgärder om dessa överträds.
- Analys av loggar efter idrifttagning – för kontroll av påverkan på mekaniska och strukturella komponenter. Dessa jämförs med observationer från idrifttagning.

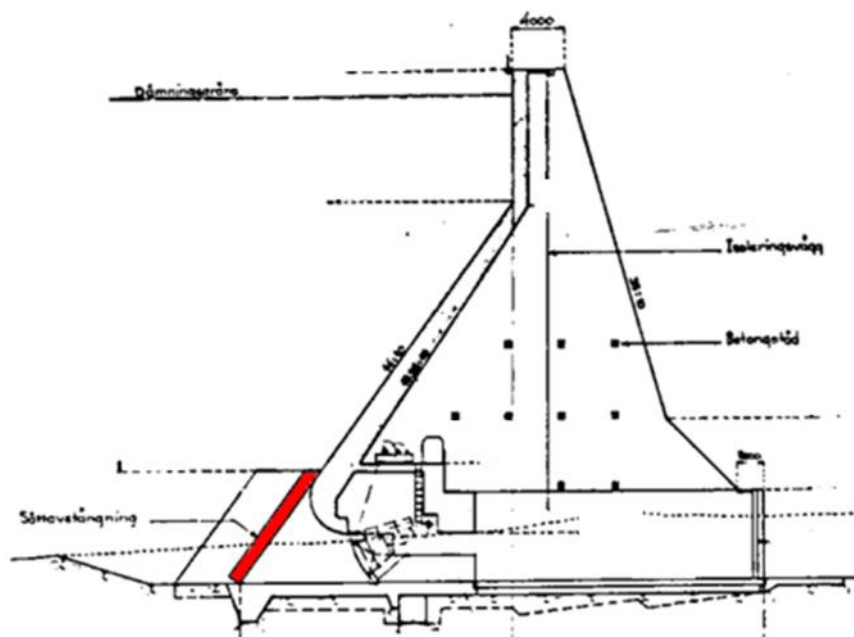
3.5 BRYGGBARHET OCH UTMANINGAR I BYGGSKEDET

Att upprusta befintliga bottenutskov beskrivs av respondenterna som svårt och kostsamt. I samtliga projekt har arbetena blivit dyrare p.g.a. komplicerade arbeten. Framför allt har följande punkter belysts under intervjuerna:

3.5.1 Avstängningar

En av de viktigaste och mest utmanande punkterna har varit utmaningar med vattenavstängningar – och att uppnå torrhet inom arbetsområdet. Vid damm 1 och

2 installerades en ny temporär planlucka vid kanalens inlopp (se figur 4). I damm 3 skedde arbetet bakom en nålavstängning, med nålar placerade helt i vatten. Dessa nålar stöddes av en nybyggd ramkonstruktion ovanför utskovet och i befintlig fals framför utskovet (Hellgren m.fl. 2021). I damm 4 och 5 användes sättavstängningar. Vid två anläggningar uppfördes avstängningar på både upp- och nedströmssidan; vid den ena uppfördes sättbalkar på nedströmssidan och vid den andra byggdes en träavstängning (endast 1 m hög) på nedströmssidan.



Figur 4 Exempel på avstängningsanordning med planlucka, från Halvarsson, 2019.

När avstängning väl är på plats har arbetet kunnat utföras i torrhet och skiljer sig inte påtagligt i förhållande till andra utskovstyper.

3.5.2 Äldre anläggningar

Projekten omfattar gamla bottenutskov som inte upprustats tidigare. Anläggningarna byggdes mellan 40- och 70-talet och sedan dess har bottenutskoven inte varit i drift. På grund av detta har stora lagningsarbeten krävts vid några anläggningar, bl.a. har omfattande lagningar och behandling av korrosionsskador behövt göras. Dessutom saknas ofta relationshandlingar och vissa antaganden gällande utskovens utformning måste göras.

3.5.3 Arbetsmiljö

Arbetsmiljörisker inkluderar bl.a. arbete i vattenvägar, dykarbeten (se vidare avsnitt 3.5.4), tunga lyft, arbete på hög höjd, målning och exponering för farliga ämnen och blåstring/svetsning i trånga utrymmen, vilket kräver specifika arbetsberedningar.

3.5.4 Dykarbeten

Dykarbeten är generellt svåra och dyra och en viktig arbetsmiljöfråga i byggskedet. Dykarbeten krävs bl.a. för uppförande av temporär avstängning och inkluderar bland annat rensning av falsar och trösklar, sättningsavstängningar, av- och påkoppling av lyftlinor, montage av temporära avstängningsanordningar och för bakgjutningar för att täta plåtar etc. I de dammprojekt som ingår i studien, utförs arbeten på 20 – 40 m vattendjup, vilket gör förhållandena extra utmanande.

Bottentemperaturen är vanligen mycket låg på dessa djup (0 – 4°C). Vattnets grumlighet inverkar också på dykarnas arbetsmiljö, då grumliga förhållanden och dålig sikt försvårar dykarbeten avsevärt. Komplicerade montage i kombination med dessa punkter gör arbetet extra svårt (och dyrt).

De låga vattentemperaturerna, i kombination med höga tryck, påverkar även materialens egenskaper, se avsnitt 3.5.5 Materialval.

3.5.5 Materialval

Utöver vattenavstängning har utmaningar i byggskedet till stor del handlat om materialval. Arbeta i vatten, på dessa djup, är inte bara utmanande ur arbetsmiljösynpunkt. Tryck- och temperatur-skillnader på dessa djup kan leda till att material inte erhåller förväntade egenskaper. Ett sådant exempel som belyses är undergjutningsbrukets flytegenskaper (i intervjuer beskrivs att det färska bruket hade styvare konsistens än normalt, vilket gjorde att det inte fyllde ut formen som önskat vid provgjutning). Istället fick nya bruk tas fram, som klarade dessa tryck och låga temperaturer. I dessa fall understryks vikten av att provgjuta med avsett bruk under verkliga förhållanden innan man gjuter skarpt.

För att minimera framtida underhåll på luckan, då underhåll är både svårt och kostsamt på dessa djup samt att avstängningsanordningar för underhåll ofta saknas, har man primärt valt nya luckor i rostfritt stål. Eftersom leverantörerna inte har lika god vana av att producera luckor i rostfritt stål, har det dock varit utmanande att hitta en leverantör av dessa.

4 Diskussion

4.1 REFERENSPROJEKT

Det har i den genomförda studien visat sig att det finns ytterst få referensprojekt i Sverige, där avställda djup- och bottenutskov upprustats och åter tagits i drift, varför uppgiften att samla in erfarenheter i sig var utmanande. Detta medför också att signifikansen av resultaten sänkts. Oavsett kan konstateras att de projekt som genomförts kan användas för kunskapsåterföring avseende åter-idrifttagning av bottenutskov som varit avställda en längre tid.

Eftersom relationshandlingar och annan relevant data/dokumentation ofta saknas från byggskedet är det en tekniskt och säkerhetsmässigt utmanande uppgift att ta ett befintligt bottenutskov, som varit avställt en längre tid, i drift. Hellgren m.fl. (2021) beskriver en organisation som arbetar systematiskt med driftsättning av bottenutskov och en driftsättningsplan. Planen bygger både på teknisk expertis och på insikter från intervjuer med organisationer som har erfarenhet från tidigare driftsättningar. Detta bedöms vara ett effektivt sätt att inhämta erfarenheter på och bör särskilt göras i de fall organisationen saknar tidigare erfarenheter av upprustning och idrifttagning av tidigare avställda djup- och bottenutskov.

4.2 DAMMSÄKERHET

4.2.1 Avsänkingsmöjligheter

Den främsta fördelen som beskrivs med att upprusta och idriftta tidigare avställda bottenutskov är ökad dammsäkerhet och möjligheten att sänka av magasinet under övriga utskovs tröskelnivåer, något som i samtliga studier använts som motiv för åter-idrifttagningen. Att pumpa vattnet eller använda sig av exempelvis en hävert – som klarar motsvarande tillrinning, anses inte särskilt sannolikt vid en större anläggning, utan djup- eller bottenutskov bedöms det mest rimliga sättet att kunna sänka av ett magasin tillräckligt snabbt om ett allvarligt hot mot dammsäkerheten skulle identifieras.

4.2.2 Redundans

Då bottenutskov är tänkta att kunna användas som nödutskov – och på så sätt öka anläggningens redundans bör beaktas att ett bottenutskov endast ger anläggningen större redundans förutsatt att verifikationstest utförs kontinuerligt. Det noteras att inget av de aktuella projekten har genomfört verifikationstester som del av driftmässig inspektion, inspektion eller fördjupad inspektion efter idrifttagningen. Funktionsprovningsprogram har inte heller tagits fram i något av projekten.

Luckor bör verifikationstestas för att driftpersonalen ska kunna känna tillräcklig säkerhet för att, vid behov, använda utskoven. Respondent E beskriver det som en stor nackdel om verifikationstest ej utförs kontinuerligt eftersom erfarenheten saknas vid skarpt läge. Körning med bottenutskov beskrivs av flera respondenter som "omtumlande" då de stora undertryck som vanligen skapas vid körning leder

till kraftigt undertryck och blåst i manöverutrymmen, stora vibrationer och höga bullernivåer. Av denna anledning anses det vara av särskild vikt att verifikationstest genomförs kontinuerligt och under kontrollerade former. En åtgärd för att öka denna säkerhet och som diskuterats inom ett par projekt har varit att genomföra verifikationstest vid lägre flöden/vattennivåer (och lägre last), men även med liten lucköppning, för att minimera riskerna. Notera att detta kan vara en förberedelse inför ett verifikationstest, men för att kunna tillgodoräknas som ett fullskaligt verifikationstest bör det utföras enligt vägledning i RIDAS (Energiföretagen, 2022); RIDAS Tv 8, Underhåll (Energiföretagen, 2022); och i RIDAS Tv 9, Avbördande funktion (Energiföretagen, 2021). Endast vid ett fullskaligt verifikationstest kan relevanta risker observeras. Funktionen ska vara tillförlitlig och uthållig.

En av de mest kritiska frågeställningarna kring bottenutskov kretsar kring dess alternativa avstängningsanordningar. Att riskera ett tömt magasin om luckan inte går igen; eller översvämningar nedströms, är inte något önskvärt scenario. Redundant drivning av manöversystemet är därför essentiellt - som säkerställer att ordinarie lucka går att både öppna och stänga, med alternativ elkraftsmatning eller alternativ mekanisk nödöppningslösning.

Alternativa avstängningsanordningar som rekommenderas i både RIDAS Tv 9, Avbördande funktion (Energiföretagen, 2021) och internationella riktlinjer (Personlig kommunikation respondent F), samt att sätta två luckor i serie, bör också beaktas då avställda djup- och bottenutskov åter tas i drift. Skulle två luckor i serie införas skulle man inte bara få möjligheten att utföra renoveringar på ytutskoven; utan även öppna upp för möjligheten att kunna utföra inspektioner, renoveringar och underhåll (inkluderande bättringsmålning, rengöring av skyddsplåtar och betongreparationer) på och uppströms nedströmsluckan, utan ytterligare behov av torrläggning framför denna lucka. Dock krävs temporär avstängning för inspektion och underhåll av den uppströms belägna avstängningsluckan.

RIDAS Tv 9, Avbördande funktion (Energiföretagen, 2021) rekommenderar också två luckor i serie i de fall bottenutskoven är anlagda på så stora djup att underhållsarbeten och inspektioner kan underlättas. I dessa fall är rekommendationen att den nedströms liggande luckan används till avbördning, medan uppströmsluckan används som service- och nödavstängningslucka.

För att säker dämning ska kunna utföras är det också av största vikt att bottenutskoven underhålls under hela dess drifttid – och att designen inför/vid upprustningen av djup- och bottenutskoven tar hänsyn till dessa behov.

4.2.3 Igensättning

Risken att ett bottenutskov på större djup sätts igen av drivgods bedöms i vissa fall mindre jämfört med ytutskovsluckor; även om bottenutskov anses mer känsliga för sjunktimmer, stenblock och annat material som kan följa med bottenströmmen. Däremot kan risken vara större om bottenutskoven är grundare. Det har inte heller rapporterats om några sådana bekymmer i något av projekten, trots avsaknad av galler/grindar framför utskovskanalen. Däremot har rapporterats om muddring

framför bottenutskoven inför idrifttagningen, något som kan rekommenderas i de fall grindar saknas.

För att effektivisera muddringsarbeten är det en god idé att undersöka botten med undervattensdrönare, t.ex. ROV, inför muddringsarbetet.

4.3 BYGGSKEDET

4.3.1 Avstängningsanordningar

Alternativ avstängningsanordning saknades på samtliga anläggningar och för produktionsskedet har istället temporära avstängningsanordningar installerats – för att kunna arbeta i torrhet. Dessa avstängningar bedöms som nödvändiga för att lyckas med den här typen av komplexa projekt. När avstängningen har genomförts kan arbetet utföras i torra förhållanden, vilket gör att det inte skiljer sig märkbart från andra typer av utskov. Lösningar inkluderar planluckor vid tunnelinloppet, nålavstängningar och sättavstängningar; samt fångdammar på nedströmssidan. För nålavstängning, beskrivs i ett projekt nålar stöddas av en nybyggd ramkonstruktion ovanför utskovet vilken byggs i befintlig fals framför utskovet (Hellgren m.fl. 2021). I andra projekt beskrivs även bågsättar och valvluckor som alternativ avstängning för bottenutskov (Halvarsson m.fl. 2021).

4.3.2 Dykarbeten

Dykarbeten bedöms som en mycket viktig fråga i byggskedet, som påverkar såväl arbetsmiljö (AFS 2010:16) som materialegenskaper (för materialegenskaper, se avsnitt 4.5.1) och kan skapa stora merkostnader om de inte hanteras korrekt. Arbeten som utförs på 20 – 40 m vattendjup innebär inte bara en risk p.g.a. de låga temperaturerna (0 – 4 °C). Dykning till större djup än 30 meter kräver reservdykare och dykning till större djup än 40 meter kräver tryckkammare i projektets närhet. I de fall dammarna dessutom ligger högt över havet leder det till en mer komplicerad tryckutjämning (förlängd dekompressionstid än vid motsvarande dyk vid havsytan), vilket bl.a. medför att arbetstiden för dykarbeten kan vara begränsade till en halvtimme åt gången. Detta kan leda till att större dykarlag krävs och att tryckutjämningskammare ska finnas på platsen (samt personal som kan hantera denna), punkter som också gör arbetet dyrare.

Vattnets grumlighet inverkar också på dykarnas arbetsmiljö, då grumliga förhållanden och dålig sikt försvårar dykarbeten avsevärt. Bl.a. försvåras möjligheter att utföra noggranna kontroller såsom gjuthöjd (Hassanzadeh 2023, Bilaga 2). Komplicerade montage i kombination med dessa punkter kan göra arbetet extra svårt (och dyrt). Det bedöms vara av stor vikt att dykare involveras i planeringen och bl.a. får provmontera i torrhet och/eller under liknande förhållanden, för att minimera risken för komplicerade monteringsarbeten under vatten och för att säkerställa att projektet löper på så smidigt som möjligt.

4.4 ARBETSMILJÖ/SÄKERHET

Riskbedömningar ska alltid utföras och eftersom idrifttagning av tidigare avställda bottenutskov generellt, p.g.a. dess komplexitet, bedöms som hög-risk-projekt bör riskarbetet inledas tidigt för att identifiera potentiella faror och risker som kan uppstå under idrifttagningen. Arbetet bör därefter utföras kontinuerligt – från projektstart, under utredningar och detaljprojektering, inför idrifttagning; men även utvärderas efter idrifttagningen för erfarenhetsåterföring till kommande projekt.

Risker minimeras genom väl utarbetade tid- och arbetsplaner som inkluderar säkerhetsåtgärder och nödvändiga resurser för att hantera samtliga risker. Åtgärder inkluderar att alla arbetare har rätt utbildning och kompetens för att kunna utföra sina arbetsuppgifter enligt praxis och på ett säkert sätt. Lämplig personlig skyddsutrustning används och arbetsmiljöplan för respektive arbetsmoment tas fram. Arbete i vattenvägar innebär extra stora risker, varför utbildningen ESA Vattenvägar ska krävas för samtliga arbetstagare. Adekvat kommunikation och samordning bör också säkerställas, samt att räddningsplaner för att hantera potentiella olyckor och incidenter arbetas fram av BAS-U.

En av riskerna som det ej vittnats om, men som ändå är påtaglig, är risken att personal stängs in vid stora undertryck, eller skadas, då dörrar slår igen. Det har också påtalats i andra studier (Halvarsson m.fl. 2019) att undertryck p.g.a. dålig lufttillförsel kan förbättras genom spärrade dörrar i öppet läge vid större tappning, något som minimerar risker kopplade till att dörrar slår igen. Att ställa upp dörrar kan dock leda till att andra delar av anläggningen blir utsatt för laster som de ej är designade för.

I damm 5, där höga lufthastigheter uppmätts och detta beskrivs som ett stort problem, finns manöverplats uppe på dammen, vilket rekommenderas vid ordinarie drift. Vid provspill / idrifttagning där man vill göra mätningar i de inre utrymmen bör personlig utrustning säkras för att minimera risker för bl.a. flygande partiklar i ögon och hörselskador. I övrigt bör risker som beskrivs i avsnitt 3.4.13 beaktas.

4.5 UTFORMNING OCH BÄRFÖRMÅGA

4.5.1 Materialval och hållbarhet

Höga vattenpelare innebär höga tryck, vilket bl.a. kräver att materialen som används i konstruktionen har hög hållfasthet och är korrosionsbeständiga. Val av material är således kritiskt för att säkerställa långvarig hållbarhet och säkerhet i dammen. I vissa projekt krävs ny teknik eller nya lösningar, såsom i damm 1 och 2, där undervattensbetongen ej fungerade tillfredsställande vid provgjutningen. Istället utvecklades ett nytt recept för undervattensbetong, för att erhålla önskvärda egenskaper. Hade man i detta fall inte provgjutit på tänkt djup hade det med största sannolikhet blivit tillfälligt stopp i produktionen.

Hassanzadeh (2023) förklarar varför betonggjutning på stora djup ställer stora krav på betongens konsistens med att betongblandningar som innehåller luft kan få

försämrade konsistens p.g.a. att luftbubblorna komprimeras. Betongblandningen kan på så sätt förlora det konsistenstillskott som komprimeringsluften och den eventuella lufttillsättningen medför. Stort tryck medför också att friktionskraften mellan partiklarna ökar, varför det är önskvärt att betongblandningen innehåller små runda och släta partiklar och flyttillsatser som minskar friktionen mellan ballastkornen.

Hassanzadeh (2023) beskriver, utöver att den färska betongmassans konsistens försämrar på stora djup, att undervattensgjutningar ställer stora krav på utförandet och att vattendjupet påverkar såväl betongsammansättning, formbyggnad som utförande. Utöver dessa aspekter innehåller undervattensbetong vanligen antiutvaskningsmedel, vilket har en negativ inverkan på betongens luftporsystem, varför det inte bedöms lämpligt att tillsätta luftporbildande tillsatsmedel i undervattensbetong (vilken således inte heller anses vara frostbeständig). Detta är också anledningen till att icke frostbeständig undervattensbetong endast, enligt AMA, bör användas inom den frostfria undervattensdelen av en konstruktion. Frostutsatta konstruktionsdelar bör enligt AMA istället gjutas i torrhet.

Även om undervattensgjutning utan antiutvaskningsmedel beskrivs kunna medföra dålig betongkvalité, stor spridning av betongens hållfasthet, samt sämre förmåga att omsluta armeringen, nämns också exempel där man gjutit frostbeständig undervattensbetong utan antiutvaskningsmedel, med goda resultat (bl.a. Vogt m.fl., 2010). Detta kan bland annat åstadkommas med stora mängder finmaterial (cement, naturfiller, kalkfiller) eller tillsatsmedel såsom luftporbildare, flytmedel och viskomedel. Enligt Hassanzadeh har modern betongteknik samt kunskapen om och tillgången till effektiva tillsatsmedel och tillsatsmaterial möjliggjort framställningen av nya betongblandningar som kan användas för undervattensgjutning utan antiutvaskningsmedel. Det kan bl.a. åstadkommas med självkompakterande betong för undervattensgjutning, vilken väl sammansatt kan användas för gjutning av frostbeständiga betongkonstruktioner, som kan sträcka sig från det frostfria vattendjupet och förbi skvalpzonen till en nivå väl över vattenytan.

4.5.2 Vattenvägens utformning

Allmänt

Vattenvägens utformning är kritisk för dammsäkerheten. Vid de aktuella dammarnas anläggande användes endast bottenutskoven för förbiledning av vatten under byggtiden, varför det inte är säkert att man haft parametrar såsom hydraulisk kapacitet eller beständighet i beaktande vid dess utformning. Användning av CFD som hjälpmedel är ett kraftfullt verktyg för att kunna utforma vattenvägen på bästa sätt och veta var åtgärder bör sättas in för att uppnå optimal hydraulisk design. För att säkerställa att rätt parametrar analyseras rekommenderas inmätning/scanning t.ex. med ROV undervattensrobot så att modeller skapas med rätt förutsättningar och korrekt utformning.

Erosion

Avbördning genom bottenutskov ger vanligtvis upphov till höga strömningshastigheter. Om avbördning ska ske i kontakt med berg (till exempel i tunnlar eller i energiomvandlare) är det viktigt att utreda huruvida risk för erosion föreligger. Bergmassan behöver därmed karteras och undersökas. Risk för erosion kan uppskattas med hjälp av indexmetoder, exempelvis Pells (Energiforsk 2018; Energiforsk 2020; Pells 2016; Pells & Douglas 2019). Risk för bergerosion kan också utredas med hjälp av numeriska metoder, bland annat koppling mellan CFD-beräkningar och bergmodell (Bollaert 2024). Berggrundens kvalitet bedöms ha stor påverkan på projektets komplexitet och behov av energiomvandlare nedströms utskovet.

För ökad kännedom om bergets erosionsbenägenhet bör berggrunden inspekteras inför och efter varje spill, vilket skapar möjligheter att upptäcka eventuella erosionsskador tidigt – och även möjligheter att sätta in åtgärder som hindrar långtgående erosion. Inspektion kan utföras exempelvis med skanning från drönare eller ROV för att kunna skapa 3D-modeller. 3D-modeller är utmärkta hjälpmedel för att utgöra en jämförelsebasis mellan inspektionstillfällen. Andra visuella observationer kan också utföras, som t.ex. målning av bergpartier för att upptäcka lossnandet av block.

För en ökad förståelse av kritiska delar rekommenderas CFD-analyser eller modellförsök för utvärdering av hur befintlig konstruktion kan anpassas till nya avbördningsförhållanden; olika utformningar av vattenvägen; var behovet av åtgärder är störst – eller om delar av vattenvägen t.o.m. behöver ledas om.

Energiomvandlare

Vid upprustning av bottenutskov bör behovet av energiomvandlare och typ av energiomvandlare nedströms bottenutskovsluckor utredas. Som input bör vattenvägens befintliga tillstånd utvärderas, men det bör också beaktas om vattenvägen ens har använts sedan byggskedet.

Alternativ till energiomvandlare kan vara förstärkning i form av betong- eller plåt-lining, något som också beskrivs ha utförts med goda resultat i flera av de aktuella projekten.

Kavitation

Den risk för kavitation som bedömts med CFD-beräkningar i de aktuella projekten anses inte kritisk, men att kavitation inte alls noterats vid provspill / idrifttagning är inte nödvändigtvis ett bevis på att risken för kavitation är låg. Eftersom detta fenomen uppträder efter en viss tid bedöms spilllets varaktighet för kort för att överhuvudtaget ge upphov till några skador.

4.5.3 Luckor och falsars utformning

Behov av upprustning av luckor och falsar bör inledas med en inspektion av befintlig mekanisk utrustning och tydliggörande av dimensioneringsförutsättningar såsom om luckor ska dimensioneras för högre vattenyta än tidigare. ROV kan användas vid inspektion för åtkomst till uppströmssidan i de

fall alternativ avstängningsanordning saknas. Dock kan dessa endast utföras i stillastående vatten varför endast delar synliga vid stängd lucka kan inspekteras.

Behov av upprustning, kostnad och utförande av befintliga luckor vägs mot kostnad, byggbarhet och installation av nya luckor. Ska nya luckor installeras bör framtida underhållsbehov vägas in. I de projekt där botten- och djuputskov åter tagits i drift och där man har valt att installera nya luckor, har dessa utformats i rostfritt stål, just för att minimera framtida underhåll. Kostnader för nya luckor vägs mot omaknet med framtida avstängningar för underhåll. I det stora hela var kostnadsökningen också liten i förhållande till den totala projektkostnaden (Hellgren m.fl. 2021).

Dock har det varit svårt att få tag på tillverkare som gör luckor i rostfritt stål, varför man behöver större marginal avseende framförhållning.

Luftning

Många av de problem som belyses under avsnitt 2.2 och 3.4 beskrivs kunna avhjälpas genom förbättrad lufttillförsel på anläggningen. Nya luftschakt utreddes också i flera projekt under förstudierna, men då behovet inte kunde styrkas med CFD-analyser valdes dessa åtgärder bort. Som en försiktighetsåtgärd valde man istället att, vid provtappning, öppna vissa luckor/utrymmen för att öka lufttillförseln. Trots detta upplevdes stora luftströmmar i flera projekt varför tillräckligt stora säkerhetsmarginaler för dessa beräkningar bör beaktas. Uppmätt undertryck vid idrifttagning blev också större än beräknat.

Luftmedrivning och motsvarande luftbehov bedöms kunna bli störst vid små lucköppningar, till följd av den ökande turbulensnivån som råder i strömningen, vilket kan leda till upphov av vattenkaskader ("spray", Falvey 1990). Strömningsförhållanden vid små lucköppningar bör således analyseras, särskilt avseende beskrivning av förväntade luftflöden och motsvarande trycknivåer. I de projekt som ingår i studien har vattenkaskader uppstått vid lucköppningar <0,8 m. Vid lucköppning bör detta beaktas och åtgärder vidtas för att minimera detta kritiska moment. I de fall detta fenomen identifierats (vid öppnande och stängning av luckan) bör luckan köras upp relativt snabbt (dvs. inte öppna med försiktighet).

Mekaniska påfrestningar

Snabba förändringar i vattenflödet, till exempel vid plötslig stängning av ventiler, kan orsaka tryckslag som kan skada rör och ventiler. Detta kräver noggrann design och kontroll av flödesregleringssystemet.

De stora krafter som genereras av en hög vattenpelare kan orsaka betydande mekaniska påfrestningar på ventiler, portar och andra rörliga delar, vilket kan leda till deformation eller brott om de inte är korrekt dimensionerade.

Att upprätthålla noggrann kontroll över flödet och trycket i systemet är avgörande för att undvika skador och säkerställa effektiv drift. Detta kräver avancerade styr- och kontrollsystem som kan hantera de höga trycken och flödes hastigheterna.

4.6 TILLSTÅND

Beroende av utskovets tänkta användningsområde, bör även tillståndsfrågan beaktas. Vid nödläge kan förstås utskovet användas även utan tillstånd, men för att kunna utföra verifikationstest och funktionskontroller bör tillstånd för användningen sökas.

5 Slutsatser

Råd och rekommendationer gällande idrifttagning av avställda djup- och bottenutskov sammanfattas i Bilaga A, med förslag på indelning utifrån skeden, gällande identifierade risker och åtgärdsalternativ.

Intervjuer visade entydiga resultat för de tekniska, ekonomiska och arbetsmiljömässiga utmaningarna som ett idrifttagande av ett befintligt bottenutskov, som varit ur drift en längre tid, innebär. Det konstateras att det är en tekniskt, ekonomiskt och säkerhetsmässigt utmanande uppgift och att stillestånd i byggskedet är väldigt fördröjande. Undervattensarbeten bedöms vara kostnadsdrivande och bör, även av arbetsmiljö-skäl, minimeras.

Trots få respondenter anses de slutsatser som dras i denna rapport, kunna nyttjas för planering av upprustning och idrifttagande av avställda bottenutskov. Det är dock viktigt att bära med sig att slutsatserna ska ses som en hjälp för planering och utförande. Fler aspekter än dessa kan vara väsentliga och varje enskild dammanläggning behöver utredas och planeras utifrån dess specifika förutsättningar. Det är även lämpligt att försöka samla in tidigare erfarenheter från liknande anläggningar och att ha möten med personer som varit delaktiga i tidigare projekt rörande upprustning och idrifttagning av avställda djup- och bottenutskov, för fördjupad förståelse.

Då relevant dokumentation från byggskedet kan vara bristfällig bör de delar som ska upprustas noggrant inspekteras och dokumenteras, inkluderat hela vattenvägen. Utskovens skick bör utvärderas och behov av renovering vägas mot installation av nya luckor beaktas. Relationshandlingar bör kontrolleras och ev. kompletteras med inmätningar. Dimensioneringsförutsättningar kan inkludera ökade flöden och krav på ökad avbördningskapacitet (samt ökad belastning på anläggningen i jämförelse med vid idrifttagningen), varför noggranna förstudier är av stor vikt. Kontrollberäkningar bör utföras för att säkerställa att dagens krav uppfylls. Dessutom bör möjligheten att kunna sänka av magasinet, vid upptäckt av allvarliga brister i dammen, också säkerställas.

Denna studie har identifierat några problemområden, vilka beskrivs under avsnitt 2.2, 3.5 och 4. Dessa behöver gås igenom och hanteras. Lämplig metod bör väljas med hänsyn till projekt och dess förutsättningar. I vissa projekt beskrivs att oväntade fenomen uppstått vid provspill / idrifttagning, varför man alltid bör planera dessa aktiviteter väl – samt upprätta åtgärdsplaner. För att bibehålla rutiner och för att säkerställa avbördningsfunktionen bör luckor testas regelbundet och för att göra detta på ett säkert sätt bör provningen göras enligt riktlinjer och tydliga program. Uppdagade fel på luckor, brister i arbetsmiljön eller andra problem bör dokumenteras, åtgärdas och gås igenom inför en idrifttagning.

6 Förslag på fortsatt arbete

Denna studie gör inte anspråk på att vara heltäckande. Fler liknande projekt pågår, från vilka erfarenheter ej inhämtats. En uppföljande studie bör genomföras för att samla även dessa erfarenheter. Även erfarenheter från installation av nya bottenutskov bör kunna ge värdefull information för kommande projekt där bottenutskov åter ska tas i drift, efter en längre tid ur bruk.

För att kunna skapa en så bra design som möjligt är det viktigt att konstruktörer får tillgång till strukturerad dokumentation av observationer och mätningar vid alla typer av spill. Checklistor eller mallar för denna typ av dokumentation bör tas fram.

Några av de viktigaste frågorna som kvarstår är:

- Hur kan man förbättra luftning (i vattenstråle såväl som utrymmen kring bottenutskov)?
- Hur kan man förbättra personsäkerheten (vid tryckförändringar etc.)? Vad kan avhjälpas med förbättrade rutiner och vad behöver byggas bort?
- Drivgodshantering – en känslighetsanalys bör utföras för att reda ut hur känsliga djup- och bottenutskov är för sjunktimmer och parametrar som påverkar dess känslighet (djup, utskovsdimensioner, drivgodstyp, -storlek etc.)
- Rapporten har inte heller berört virvelbildning, vilket bör beaktas i framtida studier.

7 Referenslista

AFS 2010:16, Dykeriarbete – Arbetsmiljöverkets föreskrifter om dykeriarbete samt allmänna råd om tillämpningen om föreskrifterna, 2019.

Association of State Dam Safety Officials, Outlet Erosion Control Structures (Stilling Basins), 2024. <https://damsafety.org/dam-owners/outlet-erosion-control-structures>

Bollaert, E., Digital Rock Scour, Cloud-Based Modelling and Engineering, 2024.

Dath, J. & Mathiesen, M., Förstudie hydraulisk design - Inventering och översiktlig utvärdering av bottenutskov i svenska dammanläggningar, Elforsk rapport 10:87, 2010.

Energiforsk, Bergerosion i spillfårar. Rapport 2018:532, 2018.

Energiforsk, Bergerosion i spillfårar – Etapp 2. Rapport 2020:644, 2020.

Energiföretagen Sverige AB, RIDAS – Energiföretagens riktlinjer för dammsäkerhet, 2022.

Energiföretagen Sverige AB, RIDAS Tillämpningsvägledning 8 – Underhåll, 2022.

Energiföretagen Sverige AB, RIDAS Tillämpningsvägledning 9 – Avbördande funktion, 2021.

Halvarsson, A., Holst, J., Bond, H., Nordstrand, M., Drifterfarenheter Bottenutskov, Energiforsk AB, 2019.

Hassanzadeh, M., Erfarenheter av undervattensgjutning, Energiforsk rapport 2023: 951, 2023.

Hellgren, R., Johnsson, L., Portin, H., Andersson, P., Halvarsson, A., Utökning av avbördningskapacitet – Erfarenhet från genomförda projekt, Energiforsk rapport 2021:783, 2021.

Falvey, H. T., Cavitation in Chutes and Spillways. Engineering Monograph No. 42. US Bureau of Reclamation, Denver, U.S.A., 1990.

Kolachian, R., Abbaspour, A., Salmasi, F., Aeration in bottom outlets Conduits of Dams for prevention of Cavitation, Journal of Civil Engineering and Urbanism, Volume 2, issue 5: 196-201(2012), s196-200.

ICOLD, Draft Bulletin 172, Technical Advancements In Spillway Design Progress and Innovations from 1985 to 2015, Final revised version, September 2016.

Liu, T. Modelling air-water flows in bottom outlets of dams, TRITA-LWR PHD (Thesis, Department of Land and Water Resources Engineering, 2014:02), 2014.

Pells S., Erosion of rock in spillways, PhD thesis, Civil & Env. Eng., Faculty of Eng., Univ. Of New South Wales, Australia, 1982 pp., 2016.

Pells S and Douglas K. Guidelines for assessment of scour in unlined spillways, 2019.

Svenska kraftnät, Dammar och dammteknik – En introduktion, SVK 2019/3255, 143 pp, 2019.

Teng, PH., CFD Modelling And Experiments On Aerator Flow In Chute Spillways, PhD Thesis, TRITA-ABE-DLT-1937, 2019.

Vinnogg, L., Retningslinjer for hydraulisk utformning av tappelukker, VHL rapport A73076, 161 pp, 197

Bilaga A: Checklista idrifttagning av avställda djup- och bottenutskov

Tabell A1. Checklista för idrifttagning av avställda djup- och bottenutskov. Visar de risker som bör hanteras i respektive skede. Notera att listan ej är fullständig, varje damm är unik och risker går igenom utifrån respektive anläggnings specifika förutsättningar.

Skede	Risk	Åtgärd
Utredning, Arbetsmiljö	Dykarbeten	Utred förutsättningar, t.ex. grumlighet, djup och temperatur. Involvera dykare i planering och design.
	Stora undertryck och luftströmmar	Utred lufttillförsel noga och identifiera strömningshastigheter på luften, för att förebygga stora undertryck och kraftig vind. Kan lucköppning fjärrstyras? Om ja, planera för detta. Planera för användning av skyddsutrustning såsom hjälm, skyddsglasögon, hörselskydd. Planera för att säkra lösa föremål så de inte kan blåsa iväg. Se till att utrymningsvägar kan öppnas/förblir öppna. Planera för att öppna luckor lite i taget och med försiktighet.
	Vibrationer	Projektera och planera för att förebygga vibrationer. Utred med hjälp av CFD och modellförsök. Se till att vibrationer inte kan orsaka personskada eller skada på anläggningen. Säkra lösa föremål och öppna luckor lite i taget och med försiktighet.
	Vattenkaskader, Vatten som slår i balkar i tak	Projektera och planera för optimal utformning av vattenvägen, för att förebygga vattenkaskader, exempelvis genom utredning med CFD och modellförsök. I de fall detta inte kan projekteras bort, överväg begränsningar i lucköppning.
Utredning, Dammssäkerhet	Inmätning	Inmätning/scanning av relevanta anläggningsdelar rekommenderas. Kan påverka mängder såväl som CFD-analyser om relationshandlingar ej är tillräckligt

		noggranna. Kan även användas för dokumentation av erosion före/efter spill.
	Erosion	Inspektion, dokumentation och bedömning av bergets/betongens kvalitet och risk för erosion. Vid behov eller tveksamheter, förse vattenvägen med energiomvandlare och/eller förstärkning. Kontrollera strålllängd med t.ex. CFD.
	Kavitation	Utred risker för kavitation med t.ex. CFD. Bedöm risk för kavitationsskador. Kan vara en ickefråga om utskov endast används vid nödsituationer. Se över lufttillförsel för att avhjälpa kavitation.
	Undertryck/vind/Ljud	Utred risker för undertryck med t.ex. CFD. Utred åtgärder såsom lufttillförsel, t.ex. med CFD.
	Vibrationer	Om vibrationer uppstår bör de mätas för att säkerställa att material inte utmattas eller tar skada på annat sätt.
	Betong och byggtekniska aspekter	Besiktning / inspektion av befintliga konstruktionsdelar, kompletterat med behovsanalys. Upprustning eller byte av delar av / hela konstruktionen?
	Mekaniska delar	Besiktning / inspektion av befintliga konstruktionsdelar, kompletterat med behovsanalys. Upprustning eller byte av delar av / hela konstruktionen? Alla mekaniska delar måste dimensioneras för de laster som kan uppstå.
	Elektriska delar	Besiktning / inspektion av befintliga konstruktionsdelar, kompletterat med behovsanalys.
	Strömningstekniska förutsättningar	Ska fungera med högre ÖVY än ursprunglig design, högre maximala avbördningsflöden. Kalibrering mot observationer från ev. provtappning kan utföras med CFD eller modellförsök.
	Redundans	Planera för kontinuerliga verifikationstester.

		Utred installation av luckor i serie i de fall bottenutskov är placerat på stort djup.
Planering, Byggskede	Produktionstekniska förhållanden	Utred vilka förhållanden som kommer att råda för att identifiera svårigheter produktionstekniskt och arbetsmiljömässigt. Upprätta planer för utförandet. Om möjligt, testa de arbetsmoment som ska utföras innan produktion påbörjas (t.ex. montage, svetsning, gjutning) Involvera dykare och montörer i planering och projektering för att minimera svåra och tekniskt krävande moment i byggskedet (säkerhetsmässigt och kostnadsmässigt mer effektivt, kan korta arbetstider, framför allt under dykning). Kan finnas moment som man behöver träna på/ testa innan. Planera materialval för att minska framtida underhåll. Planera arbetet för att utföra det som går i torrhet.
	Material och leverantörer	Inventera leverantörer och kontrollera kompetens, vana och tillgång på material. Se över leveranstider. Utför provgjutning med tänkt bruk / betong.
Installationer, byggskede	Noggrannhet utförande, toleransnivåer	Alla geometriska förändringar (vinklar, längder på exempelvis plåtar) kan orsaka stora förändringar i strömningsförhållanden. Säkerställ att alla i byggskedet är medvetna om toleranser för att undvika avvikande plåtvinklar eller annat som kan skapa vattenkaskader, vibrationer eller dylikt.
Idrifttagning	Riskfyllt arbete	Ta fram idrifttagningsprogram med tänkbara risker med avseende på arbetsmiljö och dammsäkerhet. Öppna med försiktighet, lite i taget. Vid definierade risker kan det dock innebära att man istället ska öppna så snabbt som möjligt (tex för att undvika spray vid initial lucköppning).

		Identifiera konsekvenser av lucköppningen samt åtgärder för om lucka inte går att stänga.
	Dokumentation	Insamling av data, observationer från idrifttagning. Uppföljning faktisk avbördning. Dokumentera ev. fel och skador, såsom erosion, kavitation, vibrationer.
	Oväntade fel	Åtgärda felen och utvärdera påverkan på arbetsmiljö och dammsäkerhet.
Efter idrifttagning	Kontroll av skador på dammen	Dokumentera ev. problem och skador. Åtgärda dessa om så är möjligt. Upprätta restriktioner för flöde/öppning av luckan i ev. problemzoner. I vissa fall kan oväntade fenomen uppstå som måste åtgärdas efteråt. Efter provspill/ idrifttagning, drönarscanna för att säkerställa bergets kvalitet för att säkerställa att skadlig erosion inte uppstått. Kontrollera att kavitationsskador inte uppstått. Mät och dokumentera ev. vibrationer och säkerställ att vibrationer inte förväntas ge materialskador. Kontrollera mekaniska delar så ingen påverkan på dessa försämrat funktionen, att snedställning eller annan skada ej uppstått.
	Validering av beräkningar	Jämför uppmätt data med uppskattade / beräknade värden
Driftskede	Verifikationstest	Program för verifikationstest planeras utifrån erfarenheter vid idrifttagning och utförs enligt RIDAS Tillämpningsvägledning 8.

IDRIFTTAGNING AV AVSTÄLLDA DJUP- OCH BOTTENUTSKOV

Idrifttagning av avställda djup- och bottenutskov är tekniskt krävande och kostsamt. Noggrann planering krävs för att upprustning och idrifttagning ska kunna göras på ett säkert och effektivt sätt, samtidigt som konstruktionens integritet bevaras. Planering bör innefatta dels riskanalyser men framförallt noggranna förstudier. För att identifiera fenomen knutna till driften har man sett att CFD-analyser och modellförsök är kraftfulla verktyg för att kunna förutspå den specifika anläggningens utmaningar. I vissa fall uppkommer dock helt oväntade fenomen vid användandet av bottenutskov. Vid idrifttagningen har man till exempel vittnat om kraftig vibrationsproblematik, erosion i vattenvägen och höga luftundertryck som äventyrat personsäkerheten.

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.

