

BOTTENUTSKOV MED PULSATIONSFENOMEN

RAPPORT 2019:597



Bottenutskov med pulsationsfenomen

Mätning av tryck och vibrationer under prov

FINN MIDBÖE

ISBN 978-91-7673-597-8 | © Energiforsk augusti 2019

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

Förord

Projektet syftade till att vid en provtappning nyttja tillfället att samla in och sammanställa mätdata från tryck- och vibrationsmätare installerade i utskovstornet, tunneln och omgivande konstruktioner. Den data som sammanställdes kan användas för framtida referens och verifiering av CFD-beräkningar, vilket i förlängningen kan resultera i förbättrad tillförlitlighet vid CFD-modellering.

Arbetet har utförts av projektledare Finn Midböe, HydroTerra Ingenjörer. Projektet har ingått i Energiforsks dammsäkerhetstekniska utvecklingsarbete med medverkan av vattenkraftindustrin och Svenska kraftnät.

Författaren ansvarar för rapportens innehåll.

Sammanfattning

I samband med tidigare avbördning av mindre flöden genom utskovet vid ett pumpkraftverk har luftpulsationer uppstått. I augusti 2018 genomfördes därför en provtappning med större flöde. Utskovstornet, tunneln och omgivande konstruktioner instrumenterades med tryck- och vibrationsmätare inför provet. Med dessa instrument kunde anläggningsdelarna övervakas under provet, och data samlas in för att senare användas för att jämföra det verkliga fullskaleförsöket med numeriska CFD-beräkningar.

Resultatet av mätningarna visar att tryck och vibrationer inte utgör något hot för anläggningen. Mätinstrumenten skadades och förstördes delvis under provet vilket visar att instrument och kablage som monteras i vattenvägarna nedströms ett utskov utsätts för stora påfrestningar och måste förankras och skyddas mycket väl för att fungera, även under en begränsad provtappning. Registrerade mätvärden för tryck visar delvis god överensstämmelse med beräknade tryckvariationer i CFD, men vissa fenomen som syns i mätvärdena fångas inte upp i beräkningen.

Data från tryckmätningarna kan tillgängliggöras dem som avser att studera luftpulsationer ytterligare och behöver göra jämförelser med fullskaleförsök, förutsatt att resultaten tillgängliggörs vattenkraftbranschen i Sverige.

Summary

During discharge of minor flows using a bottom outlet at a pumped storage plant, air blow-outs were observed. Therefore, in August 2018, a test of higher discharge flow was performed. The spillway tower, conduit and surrounding structures were monitored using pressure and vibration gauges during the test. Using these instruments, data was collected for later use in comparing real, full scale, measurements to numerical CFD models.

The results showed that registered vibrations and pressures are low and do not pose any threat to the spillway or embankment structure. The measuring equipment was damaged and partially destroyed during the test, demonstrating the importance of thorough anchoring and protection of both gauges and wiring when monitoring downstream a spillway, even for a limited test. Collected pressure data show resemblance with calculated pressures extracted from the CFD model, whereas other behaviour could not be seen in the CFD model.

Data from the test will be made available to those who intend to study air entrapment and blow-outs in further and need to make comparisons with full scale tests, provided that the results are made available to the hydropower industry in Sweden.

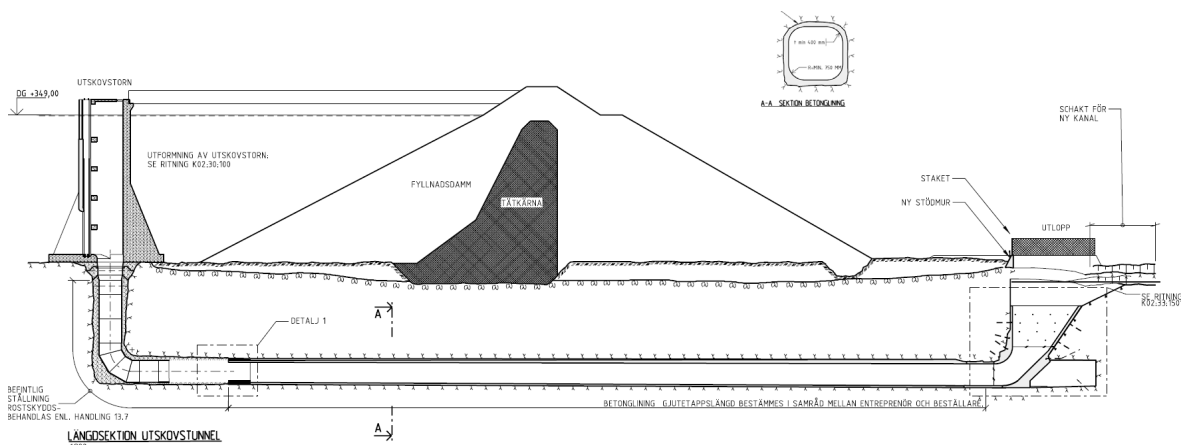
Innehåll

1	Bakgrund	7
2	Syfte	9
3	Instrumenteringens montage	10
4	Provets genomförande	12
5	Instrumenteringens funktion	14
6	Mätresultat	16
7	Jämförelse mellan CFD-modell och mätdata	20
8	Slutsats och fortsättning	22

1 Bakgrund

Anläggningen är ett pumpkraftverk beläget i Sverige. I samband med tidigare spilltappning med mindre öppning har luftpulsationer uppstått i ett bottenutskov. I augusti 2018 genomfördes en provtappning med större flöde än tidigare släppts för att undersöka fenomenet närmare och se hur luftpulsationerna uppträder vid större avbördning.

Kraftverket, byggt 1954 – 1957 ägs av Fortum Sverige AB, och utgör ett av få pumpkraftverk i Sverige med en fallhöjd på 191 m, utbyggnadsvattenföring 26 m³/s och pumpkapacitet 18 m³/s. Magasinet rymmer omkring 165 Mm³ och däms av två långa fyllningsdammar, 1 800 m lång och 23 m hög respektive, 2 200 m lång och 16 m hög. Vid den ena dammen finns ett utskov, bestående av ett utskovstorn ute i magasinet, där vattnet regleras med en bottenlucka och sedan leds genom en betonginklädd bergtunnel under fyllningsdammen, se Figur 1.



Figur 1. Sektion genom utskovet.

Sedan 2006 har det varit känt att luftpulsationer vid utloppet, liknande gejsrar, uppstår under avbördning via bottenutskovet. Utskovet hade då nyligen byggts om från att ursprungligen varit konstruerat för avbördning från ytan via ett sättöverfall, till att avbörda via en planlucka i botten av tornet, och användes för första gången. Avbördningen var uppskattningsvis 10 m³/s, vilket motsvarades av att utskovsluckan öppnas ca 0,3 m, luckans bredd är 3,0 m. Det kan jämföras med luckans totala öppningshöjd som är 5 m, vid vilken avbördningen beräknats uppgå till i storleksordningen 55 – 60 m³/s. Avbördningen begränsas då av friktionsförluster i tunneln under dammen.

Luftpulsationsfenomenet har varit en källa till oro eftersom det inte varit känt hur det påverkar konstruktionerna genom tryckvariationer inne i tornet och tunneln. Fenomenet upplevdes vid spilltappning på ca 10 m³/s som våldsamt både vid de gejsrar som uppstår på nedströmssidan (se omslagsbild), liksom luftrörelser och en pendlande vattenyta inne i tornet. Vidare fanns en oro kring hur luftpulsationsfenomenet skulle förändras med större öppning av luckan och högre flöden.

En betydelsefull omständighet är att vattenvägen nedströms utskovet inte är anpassad för större flöden. Detta var ett medvetet val då anläggningen byggdes eftersom utbyggnadsgraden är så hög, och nästan alla situationer skulle kunna hanteras med

hjälp av kraftstationen. Slukförmågan i turbinerna, 26 m³/s, motsvarar i storleksordningen ett 10-årsflöde och kan jämföras med den naturliga medelvattenföringen för avrinningsområdet som är 2,1 m³/s. Detta i kombination med den stora magasinvolymen, ca 165 Mm³, gjorde att utskovet vid tiden då dammen byggdes betraktades som ett rent nödutskov som i praktiken aldrig skulle behöva användas, och vattenvägen anpassades i praktiken endast till ett flöde på ca 5 m³/s. Det innebär att omfattande förberedelser måste vidtas vid högre spilltappning, och skador på en länsväg riskerar att uppstå vid flöden högre än 30 – 35 m³/s. Funktionsprovning annat än i mycket begränsad omfattning innebär därför betydande kostnader.

Efter att luftpulsationerna observerades 2006 gjordes CFD-beräkningar¹⁾, vilka indikerade att tryckförändringarna i tunneln var så pass låga att de inte kunde utgöra något hot mot konstruktionerna. På grund av utmaningar med CFD-beräkningar vid flerfasflöde bedömdes det dock inte som tillräckligt att förlita sig enbart på dessa beräkningar för att slå fast att luftpulsationsfenomenen inte utgjorde något hot mot anläggningen. Flerfasströmningen utgjorde även ett problem om fysiska modellförsök skulle ha använts för att analysera fenomenen vid större lucköppningar.

För att klarlägga bottenutskovets funktion och verkningssätt vid större spilltappningar planerades därför för en provtappning av ett högre flöde än 2006, men provtappningen var ändå tvungen att begränsas så att vägen och bron nedströms inte förstörs. Utskovstornet, tunneln och dammen instrumenterades med tryck- och vibrationsmätare och en begränsad provtappning genomfördes 2018-08-29 då som mest ca 25 m³/s spilldes genom utskovet. Syftena med provtappningen var;

- att undersöka hur tidigare observerade fenomen med luftpulsationer från bottenutskovet skulle uppträda vid högre flöden/större lucköppning
- att mäta vilka vibrationer och påfrestningar i form av tryckförändringar som uppstår
- att funktionsprova utskovsluckan och testa hanteringen av spilltappningen i vattenvägen nedströms utskovet.

Genom att mäta trycken på olika ställen i tornet och utloppstunneln under provet insamlades data för att verifiera CFD-modellen. På så sätt kan med större tilltro denna modell användas för att simulera att utskovet används med helt öppen lucka, och, om behovet skulle uppstå, testa ombyggnadsalternativ av utskovet för att åtgärda problem eller svagheter.

Genom att jämföra ett väl instrumenterat fullskaleförsök med en CFD-modell kan kunskapen om hur CFD-modeller kan användas vid flerfasflöden ökas. Denna rapport redovisar resultatet från provtappningen samt översiktliga resultat från jämförelser med de CFD-beräkningar som gjorts. Mätdata från provet finns tillgängliga för ytterligare simuleringar och förfining av metodiken.

1) THREE-DIMENSIONAL COMPUTATIONS OF WATER-AIR FLOW IN A BOTTOM SPILLWAY DURING GATE OPENING, Ting Liu, James Yang, 2013

2 Syfte

Projektets syfte är att utnyttja tillfället att vid en provtappning samla in och sammanställa mätdata så att dessa kan användas för framtida referens och verifiering av CFD-beräkningar.

Målet är att data ska kunna användas för att förbättra kvalitén och tillförlitligheten vid CFD-modellering av flerfasflöden i allmänhet och i synnerhet då de beskriver luftmeddragning i bottenutskov. För det specifika fallet finns även tidigare CFD-beräkningar som kommer att användas för att göra några preliminära jämförelser. Skulle sedan en djupare analys visa sig vara intressant att utföra kommer data att sparas och tillgängliggöras, med kommentarer.

Genom att jämföra en numerisk modell och ett väl instrumenterat fullskaleförsök var förhoppningen att kunna öka tilliten till CFD-modeller i dessa applikationer, vilket framförallt vore värdefullt vid anläggningar där fullskaleprov inte är genomförbara, eller vid design av nya bottenutskov där utvärdering av olika alternativ måste ske med hjälp av modeller.

3 Instrumenteringens montage

Utskovstornet, tunneln och omgivande konstruktioner instrumenterades med tryck- och vibrationsmätare inför provet.

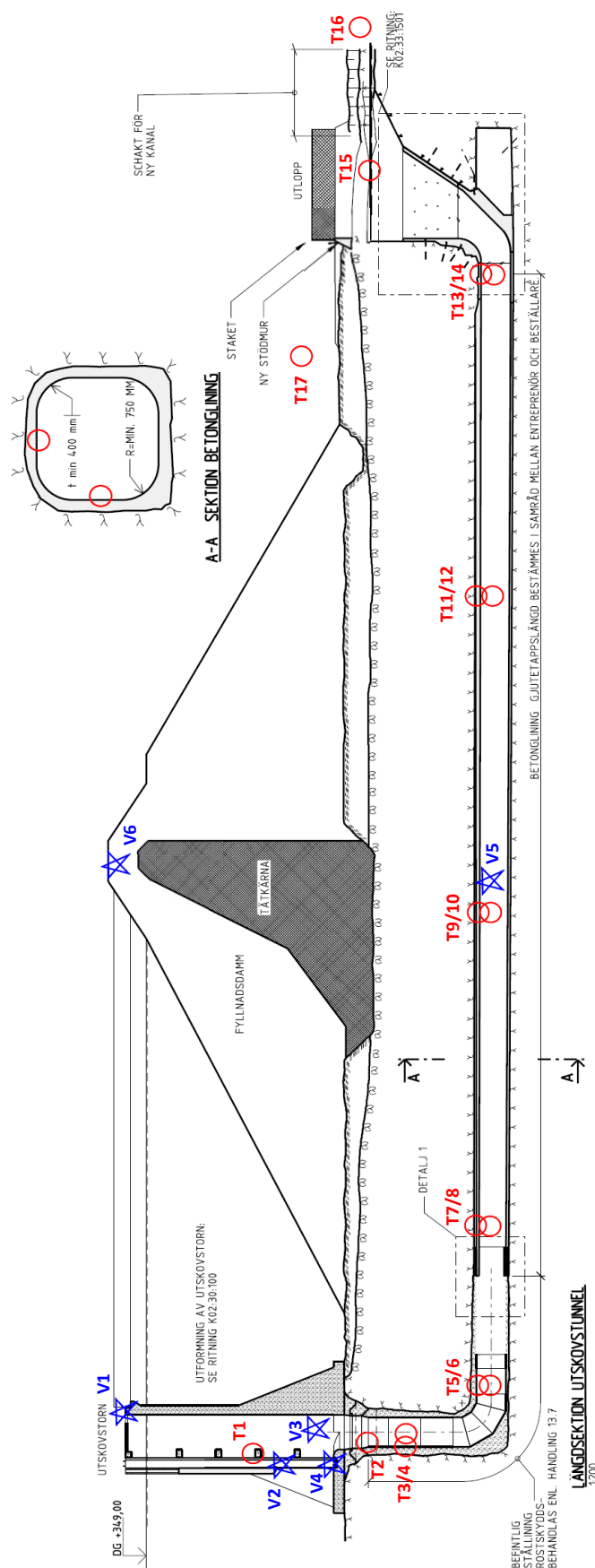
Veckan innan provet pumpades utskovstunneln ur och mätinstrument monterades. Mätare placerades enligt *Figur 3* och *Tabell 1*. Exempel på tryckmätarnas montering syns i *Figur 2*.

Tabell 1. Placering av vibrations- och tryckmätare under provtappning.

Vibrationsmätare	Benämning	dimensioner
Uppe på toppen av utskovstornet	V1(L/T/V)	X-Y-Z
Intill utskovsluckans överkant	V2	Z
På utsidan av utskovstornet (under vatten)	V3	Z
Intill utskovsluckans underkant	V4	Z
I berget vid sidan av tunneln, 0,5 m från tunneln, ca 50 m nedströms schaktets centrumlinje	V5	Z
På fyllningsdammens krön, nedschaktad 0,5 m	V6	Z
Tryckmätare		
Ovanför utskovsluckan	T1	
I ståltuben 3 m under utskovsluckans tröskelnivå, uppströmsväggen	T2	
I ståltuben ca 6 m under utskovsluckans tröskelnivå, uppströmsväggen	T3	
I ståltuben ca 6 m under utskovsluckans tröskelnivå, vänster sida	T4	
I ståltuben, ca 3,3 m nedströms vertikala schaktets centrumlinje, i tak	T5	
" " , på vägg	T6	
I betongkulvert, ca 17,3 m nedströms vertikala schaktets centrumlinje, i tak	T7	
" " , på vägg	T8	
I betongkulvert, ca 49,3 m nedströms vertikala schaktets centrumlinje, i tak	T9	
" " , på vägg	T10	
I betongkulvert, ca 79,3 m nedströms vertikala schaktets centrumlinje, i tak	T11	
" " , på vägg	T12	
I betongkulvert, ca 111,3 m nedströms vertikala schaktets centrumlinje, i tak	T13	
" " , på vägg	T14	
I betongmuren sidan av det vertikala schaktet nedströms	T15	
Referensmätning nedströmsvattennivå	T16	
Referensmätning lufttryck	T17	



Figur 2. Tryckgivare monterade i tunneln, bilden visar givare T11 och T12.



Figur 3. Sektion genom utskovstornet med markeringar för under provet utplacerade tryck- (T) och vibrationsmätare (V).

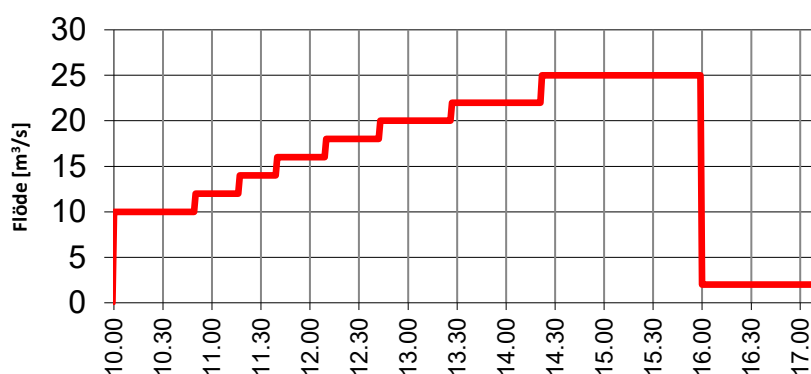
4 Provets genomförande

Efter några veckors förberedelser, inklusive montage av instrument i tornet och tunneln genomfördes provtappningen 2018-08-29. Tappningen ökades succesivt från inledningsvis ca 10 m³/s till som mest ca 25 m³/s.

Innan provet inleddes placerades personer ut på ett flertal platser nedströms som observatörer, dels för att dokumentera händelseförloppet längs vattenvägarna, dels för att kontrollera att provtappningen förlöpte som förväntat. Provet inleddes kl. 10.00 med vattennivån vid +345,84 m, d.v.s. 3,16 m under DG. Utskovsluckan öppnades enligt *Tabell 2* och *Figur 4*, där mätvärden och observationsplatser kontrollerades innan varje ytterligare öppning av luckan, för att säkerställa att provet genomfördes på ett säkert sätt. *Tabell 2*, som framräknats med handboksformler, hade inför provtappningen verifierats med CFD-beräkning i två punkter, med 0,45 m respektive 0,80 m öppning vilket resulterade i avbördning på 13,9 respektive 24,0 m³/s. Detta togs till intäkt för att beräkningen med handboksformler var korrekt och tillräckligt exakt för syftet.

Tabell 2. Lucköppning/flöde under genomförd provtappning 2018-08-29, beräknat med handboksformler.

Tidpunkt	Lucköppning	
	cm	m ³ /s
	0	0
10.00	32	10
10.50	38	12
11.17	45	14
11.40	51	16
12.10	58	18
12.43	65	20
13.27	71	22
14.22	81	25
16.00	7	2

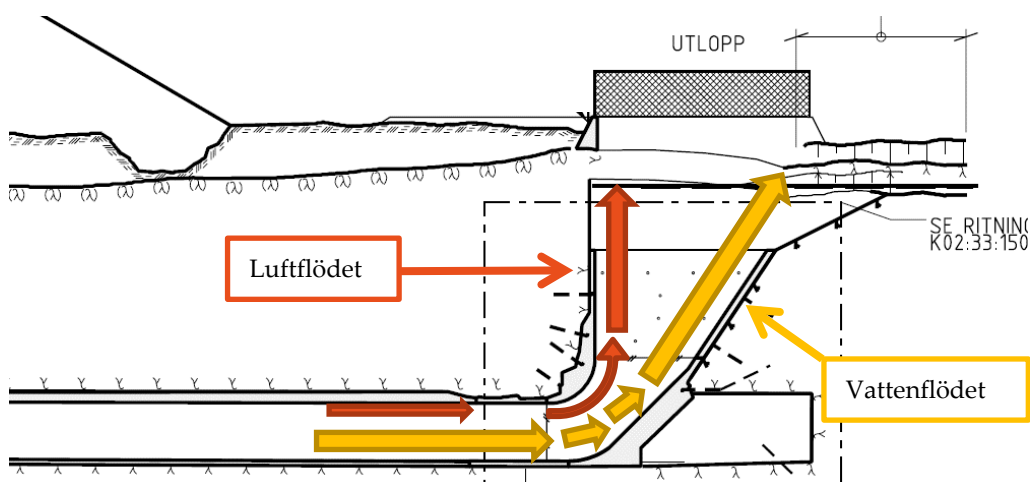


Figur 4. Graf som visar flöden genom utskovet under provtappningen.

Okulärt kunde observeras att luftpulserna vid 10 m³/s vara starkt periodiska med en återkomsttid på ca 35 s. Efter att utskovet öppnades ytterligare, blev periodiciteten mindre tydlig, då luftpulserna verkade delas upp i flera mindre pulser, vilket gör att de upplevs mindre våldsamma vid utloppet, även om enstaka ganska stora uppkastningar av vatten förekommer upp till ca 20 m³/s.

I samband med att spilltappningen ökades från 12 till 14 m³/s upphörde helt det fenomen som gör att vattennivån i tornet pulserar upp och ner, med följd att en luftström med små vattenpartiklar kan kännas växla mellan att transporteras uppåt och nedåt i trappschaktet på toppen av utskovstornet.

Ett fenomen som tvärtom blev tydligare allteftersom flödet ökades är att luftuppkastningen och det dominerande vattenutflödet mynnade på olika ställen. Luften tenderade att stiga rakt upp från tunnelns nedströmsschakt och följde uppströmsväggen av schaktet, medan vattnet istället följde nedströmsväggen snett upp ur schaktet, se Figur 5. Figur 6 utgör ett foto där fenomenet kan ses.



Figur 5. Schematisk skiss över utloppet och fenomenet som blir tydligt vid större flöden.



Figur 6. Bild av utloppet vid flöde på 25 m³/s där luftpulsationerna kastas upp överst i bilden, se röd markering, medan den dominerande utströmningen av vatten sker i förgrunden, se gul markering i bild.

Observationerna av luftpulsationerna under provspillet var i överensstämmelse med de CFD-beräkningar som gjorts inför provet, där lucköppning på 0,45 respektive 0,8 m modellerats vid uppströmsvattennivå +346 m.

5 Instrumenteringens funktion

Mätning av vibrationer och tryck gjordes kontinuerligt under hela provet, och övervakades av mättekniker som kommunicerade mätresultat och störningar till provledaren. Mätvärdesinsamlingen fungerade till en början i huvudsak bra men skador på givare och kablage som uppstod under provet medförde att mätvärdesinsamlingen inte blev komplett.

När provet inleddes fungerade samtliga givare, men omedelbart efter att utskovet börjat öppnas slutar T2, tryckgivaren belägen i övre delen av det vertikala schaktet att fungera. Efter ca två timmar, 12.02 slutar även T1 att leverera rimliga mätvärden. T4 visar efter ca 12.15 värden som motsvaras av att givaren skulle sitta nere i tunneln snarare än högre upp i tornet, och T3 likadant efter kl. 14.25.

Samtliga givare som var förbundna med loggerutrustningen via kabelstråket nedströms åt upp genom tunnelutloppet, T7 – T14 och V5, visade brus med början ca 14.15 och efter kl. 15.00 kan inga mätvärden urskiljas. Orsaken förmodas vara att signalkablarnas skyddsmantling skadades till följd av nötning vid upphängningen av kablagen.

Problemen med givarna som slutade fungera tidigt kunde bekräftas efter provtappningen då T1 – T6 endera helt slitits loss eller lossnat från signalkabelkopplingen. Att T3 och T4 visar tryck som att de vore monterade nere i tunnelns horisontella del efter 12.15 respektive 14.25 kunde förklaras av att givarna lossnat och sköljts med ner dit, se *Figur 7*.



Figur 7. Det skadade kablagen till givarna T3 och T4 ligger på botten av tunneln efter provet. Detta förklarar att de under provets senare del visar mätvärden med oväntat höga statiska tryck.

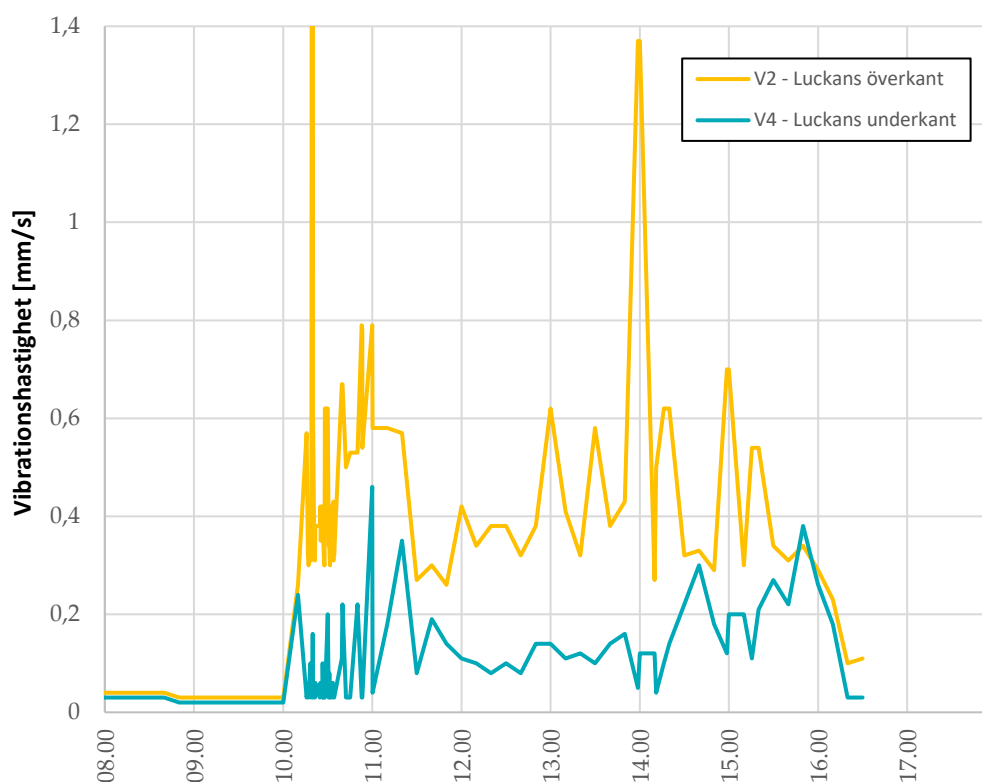
Instrumenteringen fungerade inledningsvis, och tillräckligt länge för att provtappningen skulle kunna genomföras som planerat med förvissning om att inga tryck eller vibrationer som hotade anläggningen uppstod. Betydande mängder mätdata kunde också insamlas, men inte för alla mätpunkter och problem med minneskort i loggern gjorde även att visa mätperioder saknas. Erfarenheten visar att mätutrustningen måste skyddas bättre vid mätning i utskovs vattenvägar för att inte

riskera att ett prov måste avbrytas. Kablar behöver förläggas inne i skyddande rör, istället för att fästas i en förankrad stålvajer som gjordes vid provet.

6 Mätresultat

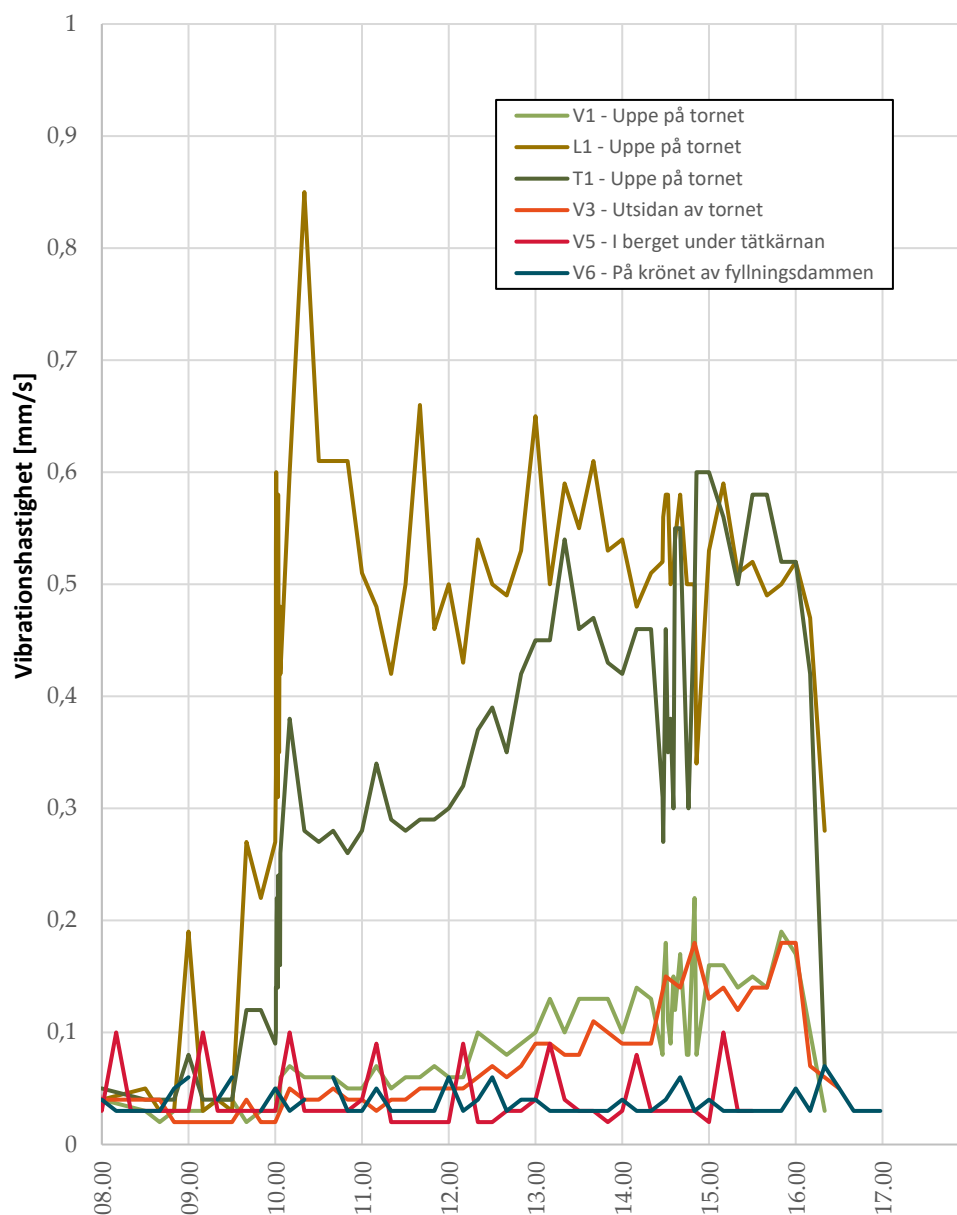
Vibrationsmätarna registrerade genomgående små vibrationer, som inte utgör något hot mot dammens konstruktioner. Tryckvariationerna har under provet, för mätarna som fungerade, en amplitud på typiskt 20 - 50 kPa. Variationer med låg frekvens var större under provets början (upp till ca 50 kPa), medan amplituden på mera högfrekventa tryckvariationer ökade med större tappning, till som mest ca 20 kPa.

Det kunde direkt under provets genomförande konstateras att uppmätta tryck och vibrationer var små och inte utgjorde ett hot mot dammen vid de förhållanden som gällde under provet. Vibrationer mättes under hela provtappningen och maxvärden lagrades var 10:e minut. Vertikala vibrationer intill luckan redovisas i Figur 8.



Figur 8. Uppmätta vibrationer, maxvärden under 10 minuter, intill utskovsluckan är större vid luckans överkant. Vibrationerna är dock små i förhållande till vad konstruktionen kan förväntas tåla.

Uppmätta vibrationer i berg, betongkonstruktioner och fyllningsdammen redovisas i Figur 9. Samtliga vibrationer är mycket små, i storleksordningen 0,5 – 1,5 % av gränsvärdet för sprängning intill känsliga konstruktioner.



Figur 9. Uppmätta vibrationer i berg, betongkonstruktioner och fyllningsdammen, maxvärden under 10 min.

Mätvärden för horisontella vibrationer i tornet (d.v.s. att tornet "svajar") låg, typiskt i storleksordningen 0,5 – 0,6 mm/s vinkelrätt mot dammen, konstant under provet. Horisontella vibrationer parallellt med dammen ökar svagt från ca 0,3 mm/s vid provets början till ca 0,6 mm/s då luckan öppnats som mest, efter 14.00.

En liknande trend, d.v.s. svagt ökande vibrationer under provet, ses för vertikala vibrationer i mätaren uppe på tornet samt givaren som satt monterad på utskovstornets utsida, men till ett lägre värde, upp till som mest 0,15 – 0,20 mm/s. Vibrationsmätarna i berget under tät kärnan, ingjuten 0,5 m från tunneln, samt uppe på fyllningsdammen, registrerar inga detekterbara ökningarna i vibrationer till följd av provtappningen. Uppmätta vibrationsvärden är desamma som under natten innan provet, då flödet var begränsat till minimitappningen, 10 l/s.

Lagrade tryckdata varierar, och saknas i några fall på grund av problem med minneskort, men de data som kunde sparas redovisas i *Tabell 3*.

Tabell 3. Lagrad data från tryckmätningen, inspelningar i 100 Hz och 1 kHz finns under några minuter före respektive steg. 0,1 Hz finns för hela provtappningen men ersätts av mera högfrekvent mätning under delar av förloppet, eller saknas delvis där mätningarna förlorades på grund av problem med minneskort.

Steg	Frekvens		
	0,1 Hz	100 Hz	1 kHz
10 m ³ /s	✓	begränsat	begränsat
12 m ³ /s	✓	✓	saknas
14 m ³ /s	✓	✓	saknas
16 m ³ /s	✓	✓	✓
18 m ³ /s	✓	✓	✓
20 m ³ /s	✓	✓	✓
22 m ³ /s	✓	✓	✓
25 m ³ /s	✓	✓	✓

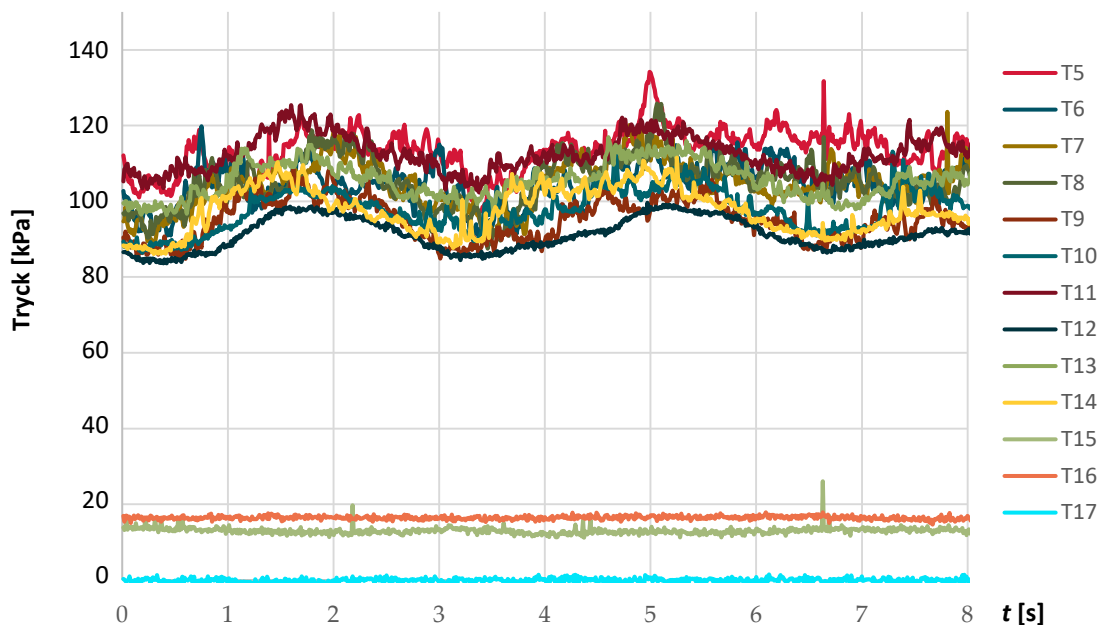
Vid en översiktlig analys av utjämnade tryckmätningar kan exempelvis fenomenet när den periodiskt återkommande pulsen vid 10 m³/s övergår till mera oregelbundna tryckvariationer tydligt urskiljas, när avbördningen ökas till 12 m³/s, se *Figur 10*.



Figur 10. Uppmätta tryck, 0,1 Hz (medel) under provtappningens tidiga del då tappningen ökades från 10 m³/s till 12 m³/s vilket skedde kl. 10.50. De tidigare högre och starkt periodiska tryckvariationerna minskar och blir mera oregelbundna, vilket kan ses på de flesta givare, exempelvis T3, T4, T11, T15 och T16.

I mätdata kan perioden beräknas och var för perioden 10.25 – 10.50 36 s, vilket överensstämmer väl med observerade 35 s vid 10 m³/s.

Vid större spilltappning kan en mera högfrekvent periodicitet skönjas. Vid ett flöde på ca $25 \text{ m}^3/\text{s}$ pendlar trycken i tunneln med i storleksordningen 20 kPa med period på ca 3 s, se *Figur 11*.

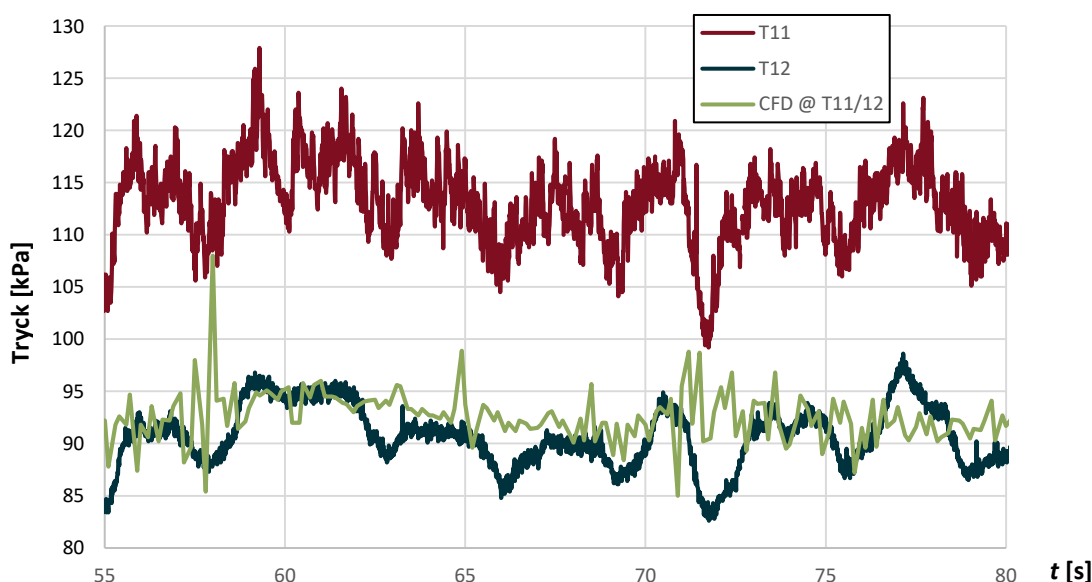


Figur 11. Uppmätta tryck, 100 Hz, under tappning av $25 \text{ m}^3/\text{s}$ (kl. 14.26).

7 Jämförelse mellan CFD-modell, mätdata och observationer

En målsättning med provtappningen var att utvärdera CFD-modellens förmåga att efterlikna de verkliga förhållandena i utskovet. Jämförelser kunde göras mellan modellen och uppmätta tryck samt mot luftpulsationernas periodicitet.

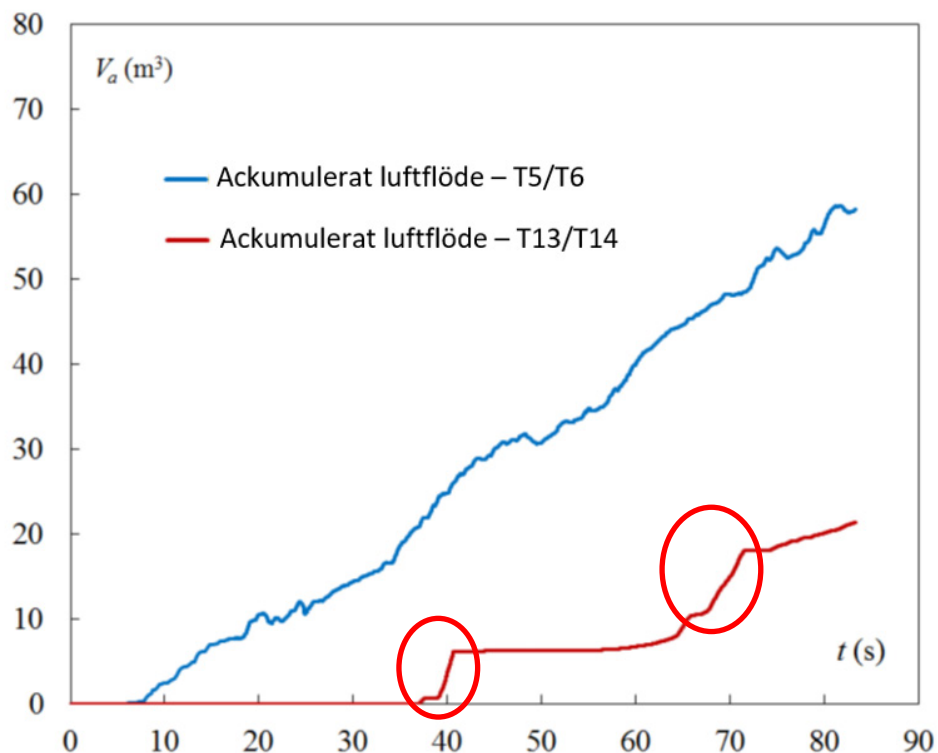
Endast några få CFD-simuleringar gjordes inför provtappningen, men en jämförelse kan ändå vara intressant. För jämförelsen väljs en förhållandevis ”lugn” plats, vid mätarna T11 och T12. Uppmätta tryck vid spilltappning med utskovsluckan öppen 0,81 m respektive simulerad öppning på 0,8 m redovisas i *Figur 12*.



Figur 12. Uppmätta tryck, 100 Hz, under tappning 25 m³/s (kl. 14.26), jämfört med beräknade tryck vid T11/T12. Den tydliga periodiciteten i de uppmätta värdena kan inte tydligt ses i CFD-modellen, men amplituden på tryckvariationen är likartad. Observera att samplingsfrekvensen i data från CFD-modellen endast är 10 Hz.

Storleksordningen på tryckvariationerna är jämförbar mellan uppmätta tryckvariationer och modellerade värden. Tidigare diskuterade periodicitet på ca 3 s kan dock inte tydligt urskiljas ur modellerade värden. Dock bör understrykas att CFD-modellen tilläts svänga in från startvillkoren under en begränsad period från $t = 0$ till $t = 80$ s. Det kan inte uteslutas att periodiciteten skulle kunna återfinnas i modellen om den tilläts ställa in sig under en längre period.

Den mera lågfrekventa svängningen med period 36 s som tidigare diskuterats kan inte detekteras i resultaten från CFD-modellen. Vid simuleringen av en lucköppning på 0,45 m kan dock ett stegvis utsläppande av luft ses, se *Figur 13*, vilket skulle kunna kopplas till detta fenomen.



Figur 13. Graf från CFD-beräkning med ackumulerat luftflöde in respektive ut från tunnelns horisontella del. Bilden visar att luft mera kontinuerligt sugas in i tunnelsektionen, och där ackumuleras så att utflödet kommer stegvis. Tiden mellan pulserna av luft ut ur modellen överensstämmer med observerad periodicitet vid tappning motsvarande $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

8 Slutsats och fortsättning

Provtappningen kunde genomföras som planerat, men delar av instrumenteringen av tunneln havererade under provet. Huvudsyftet, att bekräfta att anläggningsdelarna vid just den här anläggningen inte utsätts för stora påfrestningar i samband med spilltappning, uppnåddes. Data från tryckgivare finns lagrat och kan användas för att utforska pulsationsfenomen och andra egenskaper hos avbördningssystemet ytterligare.

Det kunde under provets genomförande konstateras att uppmätta tryck och vibrationer var små och inte utgjorde något hot mot anläggningen. Denna slutsats är dock specifik för den aktuella anläggningen och kan inte generaliseras att gälla luftpulsationsfenomen i allmänhet. Möjligheten att jämföra uppmätta tryck och andra observerade fenomen, såsom gejsrarna, med resultat från CFD-modellen underlättar förståelsen av hur utskovet fungerar hydrauliskt, och gör det lättare att lita på modellresultaten.

Erfarenheten från montaget av mätutrustningen är att instrument och kablage måste monteras mycket robust vid mätningar nedströms utskov. I det aktuella fallet kunde provet genomföras, men om instrumenteringen slutat fungera tidigare hade provet riskerat att få avbrytas i förtid, och eventuellt göras om vid ett senare tillfälle. Eftersom provet fordrar ganska omfattande förberedelser, efterarbeten och mycket personalresurser vid genomförandet skulle detta ha medfört betydande kostnader.

Uppmätta tryck har kunnat jämföras med de CFD-modeller som körts. Överensstämmelse bekräftar att CFD-modellen till vissa delar fångar upp relevanta strömningsfenomen. Därmed ökar tilliten till modellresultat även för scenarion som inte kan provas i verkligheten, i det aktuella fallet exempelvis en fullt öppen lucka för maximal avbördning.

Dammägaren avser dela med sig av mätdata från provtappningen till den som närmare vill undersöka luftpulsationsfenomenen genom numerisk modellering, och verkar inom den svenska vattenkraftbranschen, förutsatt att resultat och slutsatser delas med Fortum och andra intressenter. För tillgång till mätdata kontaktas författaren.

BOTTENUTSKOV MED PULSATIONSFENOMEN

I samband med avbördning av mindre flöden genom utskovet vid ett pumpkraftverk har luftpulsationer uppstått. En provtappning med större flöde har här gjorts för att mäta tryck och vibrationer i utskovstorn, tunnel och omgivande konstruktioner.

Resultatet av mätningarna visar att tryck och vibrationer inte utgör något hot för anläggningen. Mätinstrumenten förstördes delvis under provet vilket visar att instrument och kablage som monteras i vattenvägarna nedströms ett utskov utsätts för stora påfrestningar och måste förankras och skyddas mycket väl för att fungera, även under en begränsad provtappning.

Data från instrumenten spelades in och lagrades så att de kan jämföras med CFD-modeller av utskovet. På så sätt kan förståelse av och tillit till numeriska modeller förbättras, dels för anläggningen specifikt, men förhoppningsvis också för numerisk modellering av bottenutskov med luftinblandning i allmänhet.

Ett nytt steg i energiforskningen

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



Energiforsk