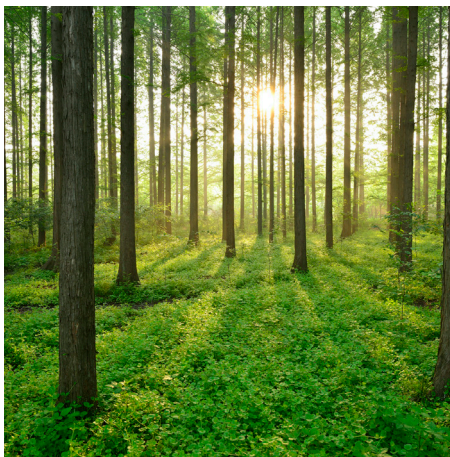


# EROSIONSBESTÄNDIGA BETONGYTOR I VATTENKRAFTSANLÄGGNINGAR

RAPPORT 2026:1180



BETONGTEKNISKT PROGRAM  
VATTENKRAFT



# **Erosionsbeständiga betongytor i vattenkraftsanläggningar**

Mekanismer och styrande materialegenskaper

MANOUCHEHR HASSANZADEH, MÅRTEN JANZ OCH HANNES NORRMAN

ISBN 978-91-89917-23-1 | © Energiforsk april 2026

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



## Förord

**Betongkonstruktioner i vattenkraftanläggningar utsätts för erosion orsakad av vattenflöden (kavitation och vattenburna partiklar), vilket kan påverka långsiktig funktion och beständighet och leda till tekniska risker och höga underhållskostnader. Trots detta beaktas hydraulisk erosion inte tillräckligt vid dimensionering av betongytor i vattenkraftanläggningar, utan ytorna dimensioneras traditionellt för att motstå frost och korrosion.**

Detta projekt har genomförts för att öka kunskapen om hydraulisk erosion och styrande mekanismer och dess betydelse för betongytors beständighet genom att sammanställa vetenskapligt och praktiskt baserad kunskap. Projektet identifierar materialegenskaper och utförandemetoder som kan minska erosion och förebygga skador. Resultaten är avsedda att utgöra ett praktiskt stöd vid nybyggnation och reparation i erosionsutsatta miljöer i vattenkraftens betongkonstruktioner.

Projektet har genomförts av Manouchehr Hassanzadeh (projektledare), Sweco, Hannes Norrman, Sweco och Mårten Janz, AFRY, och har finansierats av Energiforsk genom FoU-programmet Betongtekniskt program vattenkraft, etapp 2022-2024. Programmets intressenter är Fortum Sverige, Holmen Energi, Jämtkraft, Karlstads Energi, Skellefteå Kraft, Statkraft Sverige, Uniper/Sydkraft hydropower, Tekniska verken i Linköping, Umeå Energi och Vattenfall Vattenkraft. Projektets referensgrupp har utgjorts av representanter från programmets styrgrupp: Carl-Oscar Nilsson, Per Fektenberg och styrgruppens tekniska expert Martin Rosenqvist.

Bertil Wahlund

Energiforsk

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

## Sammanfattning

**Syftet med denna rapport är att identifiera och utveckla betongsammansättningar som ökar betongytors motståndskraft mot hydraulisk erosion, särskilt i vattenkraftsanläggningar där ytor utsätts för höga vattenflödes hastigheter och vattenburna partiklar.**

Projektet omfattar mekanismer bakom hydraulisk erosion, faktorer som påverkar betongens motstånd mot hydraulisk erosion, provningsmetoder för undersökning av betongens motstånd mot hydraulisk erosion samt platsbesök och dokumentation av gjutning av fiberarmerad betong i en sektion av ett skibord.

Traditionellt dimensioneras betongytor i vattenkraftsanläggningar för att motstå frost och korrosion, men hydraulisk erosion orsakad av vattenflöde med och utan medburna partiklar beaktas inte tillräckligt. Hydraulisk erosion kan orsaka betydande skador, särskilt vid hög hastighet och högt tryck, vilket kräver kostsamma reparationer och kan äventyra säkerheten och effektiviteten i vattenkraftsanläggningar.

Hydraulisk erosion har två former: abrasion (slitage från partiklar mot ytan) och kavitation (lokala stötar från tryckförändringar i vattenflödet). Abrasion skapar ytliga sprickor och erosion, medan kavitation bildar håligheter från imploderande ångbubblor.

Hydraulisk erosion verkar på betongens yta och eroderar den lager för lager. Om betongytan innehåller svaghetszoner på grund av otillfredsställande materialsammansättning, gjutning och härdning, uppstår områden med snabbare erosionsprocesser vilka även kan påskynda erosionen över stora delar av ytan.

Betongens täthet och hållfasthet, särskilt vid dess yta, är avgörande parametrar för motstånd mot hydraulisk erosion. Betong med lågt vattencementtal ( $vct < 0,45$ ) och hög tryckhållfasthet ( $f_c > 50$  MPa) har visat sig vara mest effektivt mot erosion. Användning av hård och stark ballast och tillsatser som silikastoft och flygaska förbättrar hållbarheten ytterligare.

Provningsresultat indikerar att stålfiberarmerad betong ger bättre motstånd mot friktionsnötning och slag från vattenburna partiklar än vanlig betong, men förbättringen är relativt liten.

Inblandning av luft i betong ökar frostbeständigheten men kan försvaga ytans motstånd mot erosion. En icke frostbeständig betongyta kan samtidigt skadas av frostangrepp, exempelvis i ytuskov, och få reducerat motstånd mot erosion. Därför är det viktigt att luftinblandningen i betong görs med omtanke och optimeras med hänsyn till motståndet mot frostangrepp och hydraulisk erosion. I vattenvägar som inte utsätts för minusgrader ska luftinblandning undvikas.

Metoder och strategier för att öka betongens erosionstålighet kan direkt tillämpas på nybyggnation och reparationer i vattenkraftsanläggningar. För att åstadkomma en yta med högt motstånd mot hydraulisk erosion bör man minimera vct, välja

hård ballast med högt motstånd mot nötning samt vidta gjutningstekniska åtgärder såsom vakuumbehandling och lång tids vattenhärdning.

I samband med utskovsreparationerna i Tåsjö dammanläggning göts en provsektion (tre m lång i flödesriktning) med fiberarmerad betong. Gjutningsarbetet har dokumenterats och presenteras i denna rapport. Rapporten innehåller också förslag på uppföljning av förändringar i provsektionen.

Projektet bidrar till ökad expertis och praktiska verktyg för att skydda vattenkraftsanläggningars betongkonstruktioner mot erosionens utmaningar.

## Summary

**The purpose of this report is to identify and develop concrete compositions with high resistance to hydraulic erosion, especially in hydropower plants where surfaces are exposed to high water flow rates and waterborne particles.**

The project includes mechanisms behind hydraulic erosion, factors that affect the concrete's resistance to hydraulic erosion, test methods for investigating the concrete's resistance to hydraulic erosion, and site visits and documentation of casting of fibre-reinforced concrete in a section of a spillway.

Traditionally, concrete surfaces in hydropower plants are designed to resist frost and corrosion, but hydraulic erosion caused by water flow with and without carrying particles is not sufficiently taken into account. Hydraulic erosion can cause significant damage, especially at high speed and high pressure, requiring costly repairs and can compromise the safety and efficiency of hydropower plants.

Hydraulic erosion has two forms: abrasion (wear from particles towards the surface) and cavitation (local shocks from pressure changes in the flow of water). Abrasion creates superficial cracks and erosion, while cavitation forms cavities from imploding vapor bubbles.

Hydraulic erosion acts on the surface of the concrete, eroding it layer by layer. If the concrete surface contains weakness zones due to unsatisfactory material composition, casting and hardening, areas with faster erosion processes arise, which can also accelerate erosion over large parts of the surface.

The tightness and strength of concrete, especially at its surface, are crucial parameters for resistance to hydraulic erosion. Concrete with a low water-cement ratio ( $w/c < 0.45$ ) and high compressive strength ( $f_c > 50$  MPa) has been shown to be most effective against erosion. The use of hard and strong aggregates and additives such as silica fume and fly ash further improves durability.

Test results indicate that steel fibre reinforced concrete provides better resistance to frictional abrasion and impact from waterborne particles than ordinary concrete, but the improvement is relatively small.

Mixing air into concrete increases frost resistance but can weaken the surface's resistance to erosion. A non-frost-resistant concrete surface can also be damaged by frost attack, for example in the surface of a spillway, and have reduced resistance to erosion. Therefore, it is important that the air entrainment in concrete is done with care and optimized with regard to the resistance to frost attack and hydraulic erosion. In waterways that are not exposed to sub-zero temperatures, air mixing must be avoided.

Methods and strategies to increase the erosion resistance of concrete can be directly applied to new construction and repairs in hydropower plants. To achieve a surface with high resistance to hydraulic erosion, one should minimize  $w/c$ , choose

hard aggregates with high resistance to abrasion and take casting technical measures such as vacuum treatment and long-term water curing.

In connection with the spillway refurbishment in the Tåsjö dam facility, a test section (three m long in the direction of flow) was cast with fibre-reinforced concrete. The casting work has been documented and presented in this report. The report also contains suggestions for follow-up of changes in the test section.

The project contributes to increased expertise and practical tools to protect the concrete structures of hydropower plants against the challenges of erosion.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>9</b>
1.1	Bakgrund	9
1.2	Syfte och mål	10
1.3	Genomförande	10
1.4	Omfattning och Begränsning	11
<b>2</b>	<b>Utsatta anläggningsdelar</b>	<b>13</b>
2.1	Allmänt	13
<b>3</b>	<b>Erosionsmekanismer</b>	<b>22</b>
3.1	Allmänt	22
3.1.1	Olika typer av hydraulisk erosion	22
3.1.2	Inverkan av nedbrytningsmekanismer	23
3.1.3	Betongens motstånd mot erosion	24
3.2	Vattnets stagnationstryck	24
3.2.1	Upptryck	25
3.2.2	Spricktillväxt	25
3.3	Erosion orsakad av kavitation	29
3.3.1	Mekanism	29
3.3.2	Kavitationsindex	30
3.3.3	Inverkande parametrar	30
3.3.4	Samband mellan kavitationsindex och skador	36
3.3.5	Materialsammansättning för ökat motstånd	37
3.4	Erosion orsakad av vattenburna partiklar	38
3.4.1	Allmänt	38
3.4.2	Inverkande parametrar	39
3.4.3	Materialsammansättning för ökat motstånd	40
3.5	Förslag på materialsammansättning för erosionsutsatt betong	45
3.5.1	Betong utan fibrer utsatt för vattenflöde och medförda partiklar	45
3.5.2	Betong med fibrer utsatt för vattenflöde och medförda partiklar	48
<b>4</b>	<b>Praktikfall</b>	<b>49</b>
4.1	Bakgrund	49
4.2	Konstruktion	49
4.3	Belastningar	52
4.4	Materialsammansättning	54
4.5	Utförande	55
4.6	Utvärdering	64
<b>5</b>	<b>Referenslista</b>	<b>67</b>

# 1 Inledning

## 1.1 BAKGRUND

**Betongytor i skibord, stötbotten, strålllyftare, etc. dimensioneras vanligen med hänsyn till deras exponeringsmiljö såsom definieras i svenska och europeiska standarder. Standarderna beaktar enbart materialets motstånd mot frostangrepp och dess förmåga att skydda armeringen mot korrosion. Svårdefinierbara nedbrytningsmekanismer som erosion beaktas inte alls.**

Man har den uppfattningen att om betong är stark så klarar den även dessa angrepp, vilket kan vara en sund inställning. Men problemet är att man inte kan ange hur stark betongen ska vara. Vilken typ av ballast som ska användas eller hur hård ballasten ska vara. Betongen blir sprödare ju starkare den blir vilket kan göra betongen sämre avseende förmågan att ta emot stötar.

Idag tas ingen hänsyn till vattenflödets egenskaper (hastighet, varaktighet och frekvens dvs. hur ofta betongytan utsätts för vattenflöde) när man dimensionerar betongens sammansättning. Man kan observera ytskador på många olika vattenkraftverk. Man kan även notera att skador uppkommer efter korta och begränsat antal spill.

För närvarande pågår FoU på KTH som behandlar det strömmande vattnets erosion av vattenkraftsanläggningar – Guo och Lei (2024), Li m.fl. (2025) och Norström m.fl. (2025). Resultaten visar energiomvandlare är centrala för energiuptag i utskov och för dammsäkerhet, men skador förekommer ofta till följd av konstruktiva brister och hydrauliska effekter. CFD-studier visar att sprick-/gapbredd har begränsad inverkan på lyftkrafter, medan nivåskillnader mellan betongplattor ger markant ökade lyftkrafter. En fördubbling av nivåskillnaden från 1,5 till 3 cm medför cirka 10 % högre lyftkraft. Luftning under plattor reducerar lyftkraften effektivt men ökar samtidigt tryckfluktuationerna, särskilt vid höga flöden.

Skador i svenska anläggningar med låg fallhöjd (< 15 m) har observerats även vid förväntat låga kavitationstal. Inventeringar visar erosion i berggrunden, ofta i svaghetszoner, med en kritisk hastighetsnivå kring 15 m/s. Skalmodellförsök och CFD-modellering visar god överensstämmelse i trycknivåer, men olika bedömningar av kavitation. Sprickor i verkliga konstruktioner har inte modellerats, varför resultaten är preliminära och fortsatt validering pågår.

De arbeten som har rapporterats inom ramen för Energiforsks rapportserier och som har genomförts under de senaste fem åren har inte behandlat erosionsfenomenet i vattenvägar på det sätt som föreliggande studie. Exempel på sådana arbeten är Berglund och Lindblom (2019), Midböe (2019), Nordström och Eriksson (2019), Nordström (2021), Persson och Eriksson (2018, 2020, 2022), Rosenqvist (2023) samt SVC (2023). Enbart (Person & Eriksson, 2018) presenterar en metod som är baserad på en typ av erosionsindex, som beskriver vattnets eroderande effekt genom de energiförluster som utverkas på det strömmande eller

fallande vattnet över en sträcka. Denna metod beskriver erosionen i berg över en relativt lång sträcka. Den inkluderar även de skador som uppstår på grund av stagnationstryck i bergets sprickor. Denna metod är inte lämplig för beskrivning av erosionsskador på betongens yta.

Detta projekt är ett FoU arbete som har genomförts parallellt med ett reparationsarbete som genomfördes vid Tåsjö dammanläggning. Anläggningen ägs av Ångermanälvens Vattenregleringsföretag. Inom ramen för det samarbete som AFRY hade med anläggningsägaren tillät ägaren att två olika betongsammansättningar skulle kunna användas inom ett begränsat område på ett skibord – betonger, med/utan fibrer, skulle gjutas på två intilliggande platser. Det fanns även förutsättningar för att provgjutningarna skulle kunna utföras i en ytterligare gjutetapp.

Detta projekt inkluderade förstudie, framtagning av underlag och motivering för val av material, dokumentering av utförande och utvärdering av genomfört arbete och slutresultat.

## 1.2 SYFTE OCH MÅL

Syftet är kunna producera betongytor med god beständighet. Målet är att ta fram verktyg för sammansättning av betong som är beständig mot erosion i vattenkraftens betongkonstruktioner. Med hjälp av verktygen ska man kunna välja betongsammansättning med hänsyn till de vattentryck, flödes hastigheter och medburna partiklar som betongens yta blir utsatt för.

## 1.3 GENOMFÖRANDE

Projektet genomfördes enligt följande upplägg:

1. **Uppstartsmöte** – Projektets syfte, mål, innehåll och tillvägagångssätt presenterades för referensgruppen.
2. **Litteraturstudie** – för att sammanställa:
  - undersökningar och erfarenheter inom området erosion av betongytor i vattenkraftens vattenvägar,
  - parametrar som styr betongens motstånd mot erosion och förslag på betongblandning som kan motstå erosion i vattenkraftens vattenvägar samt
  - flödesegenskaper som orsakar erosion av betongytor.
3. **Fältarbete i testanläggning** - Samtidigt som litteraturstudien pågick förbereds olika alternativa betongsammansättningar för gjutning i samband med reparationerna vid Tåsjö dammanläggning. Arbetet inkluderade:
  - Bestämning av betongens egenskaper och sammansättning.

- Kontakter med entreprenören och dennes betongleverantör för att utvärdera deras synpunkter och möjligheter att kunna leverera och gjuta betong (med och utan fibrer) med föreskrivna egenskaper.
- Tillsammans med inblandade parter bestämdes betongens sammansättning och placering av testområdena.
- Förslag på provningar för att dokumentera egenskaperna hos de betongsammansättningar som används vid projektet togs fram.

#### 4. Närvaro vid och dokumentation av gjutningar

#### 5. Sammanställning av resultat och slutrapport

#### 6. Utvärdering av resultat

- Enligt ansökan skulle utvärderingen genomföras i två steg:
  1. Den första utvärderingen skulle ske under reparationens utförande och avslutas efter provtappningen, vilket inte har gjorts. Därför, presenteras ingen utvärdering i denna rapport.
  2. Den andra utvärderingen bör genomföras först efter att konstruktionen har upplevt minst två vintrar, för att även inkludera synergien mellan exponeringsmiljön och erosionsmekanismerna. Ett översiktligt program för utvärderingen har bilagts denna rapport.

### 1.4 OMFATTNING OCH BEGRÄNSNING

Arbetet fokuserar enbart på betong- och betongbeklädda konstruktioner (platsgjuten betong, betongelement och sprutbetong) som utsätts för hydraulisk erosion.

Det beskriver de mekanismer som ingår i den hydrauliska erosionen, deras verkningsätt samt de parametrar som styr deras nedbrytande effekt. Vidare anges vilka egenskaper betongen måste ha för att bättre kunna stå emot hydraulisk erosion.

Arbetet tar inte hänsyn till samverkan mellan hydraulisk erosion och andra nedbrytningsmekanismer, såsom alkalisilikareaktioner och frostangrepp.

Arbetet ger sammanfattande vägledning för val av betong i konstruktionsdelar som är utsatta för hydraulisk erosion.

Det dokumenterar gjutning av fiberarmerad betong i en sektion av ett skibord, där projektet valde sektionens placering. Betongens egenskaper presenteras översiktligt, men betongsammansättningen avslöjas inte på grund av konkurrensskäl från betongleverantörer.

Kontroll av den fiberarmerade betongens egenskaper gjordes i betongfabriken, men inga protokoll har överlämnats till rapportens författare.

Vid betongleveransen togs endast prover för kontroll av den färska betongens lufthalt. Resultatet presenteras i rapporten, och inga andra kontroller utfördes.

## 2 Utsatta anläggningsdelar

### 2.1 ALLMÄNT

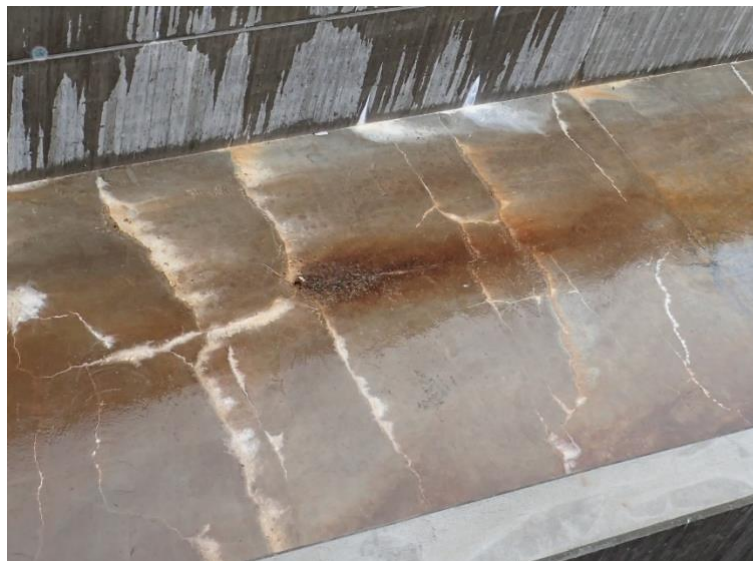
Alla konstruktionsdelar som utsätts för höga flödes hastigheter påverkas av hydraulisk erosion, huvudsakligen i två former: abrasion och kavitation.

- Abrasion är mekaniskt slitage orsakat av friktionen mellan vattenburna partiklar och betongens yta (se avsnitt 3.4).
- Kavitation är erosion orsakad av lokala stötar som uppstår från snabba tryckförändringar i vattenflöden med höga hastigheter (se avsnitt 3.3).

Båda mekanismernas förmåga att bryta ner betongens yta förstärks av nedsatt hållfasthet och täthet samt sprickbildningar och ojämnheter på betongens yta.

Färsk betongs egenskaper och gjutningens utförande styr dess ytas egenskaper efter härdning. Vattenseparation, bruksseparation, plastisk sättning och krympning leder till sprickbildning på och försvagning av ytan, vilket minskar motståndet mot hydraulisk erosion. Även konstruktiv utformning såsom t.ex. placering av och fogutformning kan medföra minskat motstånd mot hydraulisk erosion.

Alla nedbrytningsmekanismer som försämrar betongytans hållfasthet och täthet, samt orsakar sprickbildning, försämrar betongytans motstånd mot hydraulisk erosion. Figur 1 visar sprickbildning på en utskovsränna, vilket sannolikt initierar erosion av ytan.



Figur 1 – Utskovsränna med sprickbildning.

Hydraulisk erosion uppstår där förutsättningar för det finns i en vattenkraftsanläggning. För att erosionen ska ske krävs en optimal kombination av flödes hastighet, partikelmängd i flödet samt betongytans beskaffenhet och egenskaper. De delar i en vattenkraftsanläggning som kan vara utsatta för hydraulisk erosion är:

- Skibord och utskovsränna
- Pelare och ledmur som ansluter till skibord och utskovsränna
- Bottenutskov och tunnlar
- Energiomvandlare och stötbotten
- Kraftverkets vattenvägar såsom spiral och sugrör

Figur 2 visar ett över 40 år gammalt skibord. Den hydrauliska erosionen har frilagt det största ballastkornet, bedömt till över 30 mm. För att undvika stagnation och efterföljande kavitation vid fogar bör den del som är nedströms fogen vara lägre än den del som är uppströms fogen. I det fall som visas i figuren är nedströmsdelen högre än uppströmsdelen, vilket är oklart varför.

Figur 3 – Figur 5 visar hydraulisk erosion kring gjutfogar på långa och branta skibord. Figur 3 visar att även vertikala fogar, fogar i flödesriktningen, kan bli eroderade.

Figur 6 visar erosionsskador vid en gjutfog i en utskovsränna. Figur 7 visar en eroderad skibordsyta och ytan på en anslutande pelare.



Figur 2 – Eroderad skibordsyta.



Figur 3 – Eroderad skibordsyta kring fogar.



Figur 4 – Eroderad skibordsyta kring gjutfog med synliga armeringsstänger.



Figur 5 – Eroderad skibordsyta vid gjutfog med djup och bred erosionsskada.



Figur 6 – Erosionsskada vid en gjutfog i en utskovsränna.



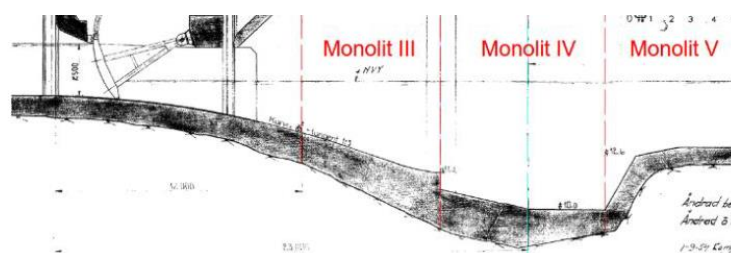
Figur 7 – Eroderad skibordsyta och anslutande pelare.

Figur 8 visar skibord och energiomvandlingsbassängen i ett bottenutskov. Konstruktionen är 70 år gammal. Betongen är armerad med 32 mm stänger, som ursprungligen täcktes av 100 mm betong. Betongen har eroderats i stora delar av energiomvandlingsbassängens botten. Erosionen har nått underkanten av den inre armeringen på flera ställen (Figur 9 och Figur 10).

Figur 11 visar botten i en energiomvandlingsbassäng nedströms ett ytutskov. Skadorna liknar de som visas i Figur 9 och Figur 10.

Figur 12 visar erosionsskador i en energiomvandlare av typen klack som strömningshinder. Figur 13 visar en eroderad stötbotten.

Figur 14 – Figur 16 visar en eroderad yta i ett sugrör. Anläggningen byggdes i slutet av 60-talet.



Figur 8 – Skibord och energiomvandlingsbassäng i ett bottenutskov. Nivå uppströms luckan +15, i botten av energiomvandlaren +10 och nedströms energiomvandlaren +13.



Figur 9 – Eroderad betongyta i energiomvandlarens botten ett par meter från bottenutskovets högra vägg.



Figur 10 – Eroderad betongyta i energiomvandlingsbassängens botten. Den vänstra bilden visar bassängens botten vid utskovets vänstra vägg. Den högra bilden visar bottenytan i mitten av energiomvandlaren.



Figur 11 – Botten i en energiomvandlingsbassäng nedströms ett ytutskov.



Figur 12 – Energiomvandlare av typen klack som strömningshinder.



Figur 13 – En eroderad stötbotten.



Figur 14 – Vy av en sugrörsbotten sett från ett schakt över sugröret.



Figur 15 – Eroderad sugrörsbotten.



**Figur 16 – Närbild av en eroderad sugrörsbotten.**

## 3 Erosionsmekanismer

### 3.1 ALLMÄNT

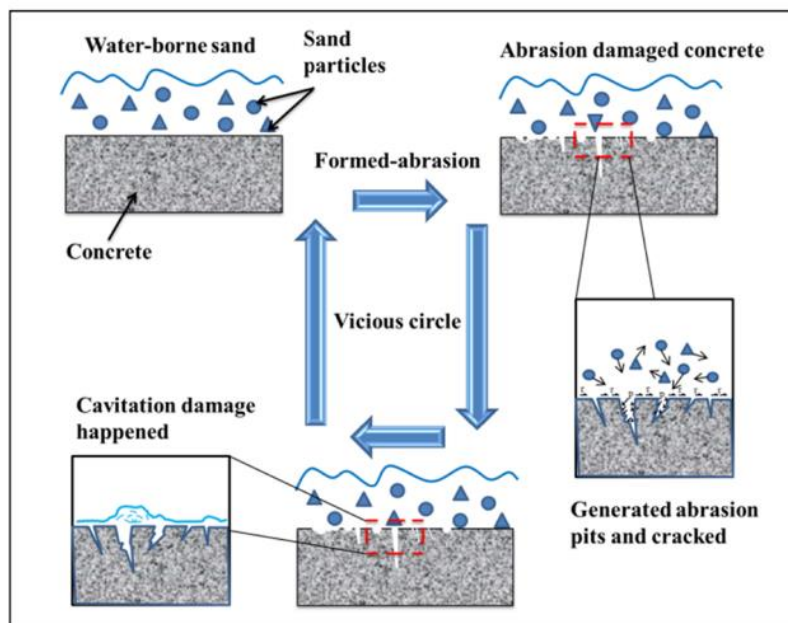
En stor utmaning med betongstrukturer i närkontakt med vattenflöden är de hydrauliska erosionsfenomen som de utsätts för. Hydraulisk erosion kan beskrivas som långsam mekanisk nedbrytning och avlägsnande av partiklar från betongens yta, och sker oundvikligen när vattenflöden med höga hastigheter interagerar med betongytan. Erosionen har en betydande inverkan på betongstrukturens hållfasthet, funktionalitet, säkerhet och därmed livslängd. Hydraulisk erosion kan kräva omfattande och kostsamma underhålls- och reparationsåtgärder, vilket är problematiskt både ur en ekonomisk och miljömässig synvinkel.

För att möta dessa utmaningar är det av största vikt att förstå den hydrauliska erosionens mekanismer, dess konsekvenser och att kunna vidta förebyggande åtgärder. Denna rapport syftar till att öka kunskapen om hydraulisk erosion och dess påverkan på betongstrukturer så att det kan utvecklas strategier och tekniker för att minimera dess negativa effekter. Genom att vidta förebyggande åtgärder är det möjligt att skydda betongstrukturer från erosionsrelaterade skador, förlänga deras funktionella livslängd och säkerställa långsiktig hållbarhet.

I rapporten kommer en översiktlig introduktion till olika nedbrytningsmekanismer som försvagar betongytan att ges följt av en djupare analys om erosion orsakad av kavitation samt erosion orsakad av vattenburna partiklar.

#### 3.1.1 Olika typer av hydraulisk erosion

Hydraulisk erosion förekommer huvudsakligen i två former: Abrasion, vilket kortfattat kan beskrivas som mekaniskt slitage orsakat av friktion mellan vattenburna partiklar och betongens yta; och kavitation, erosion orsakade av lokala stötar som uppstår från snabba tryckförändringar i vattenflöden med höga hastigheter.



Figur 17 - Illustration över samverkan mellan Abrasion och kavitation (Jinjun et al. 2022).

I Figur 17 illustreras den synergi som existerar mellan abrasion och kavitation. Abrasion skapar mikroskopiska sprickor, urgröpningar och andra ojämnheter. Dessa ökar ytans friktionskoefficient och vatteninbromsningen, vilket innebär mer gynnsamma villkor för vidare erosion förorsakad av kavitation.

Nedan refererar termen erosion till hydraulisk erosion, som innefattar både erosion driven av kavitation och erosion driven av abrasion.

### 3.1.2 Inverkan av nedbrytningsmekanismer

Olika typer av nedbrytningsmekanismer förekommer i hydrauliska miljöer och kan försvaga betongens yta och göra den mer sårbar för erosion. De mest vanligt förekommande inkluderar bland andra frostsador, orsakat av inre tryck när vatten i betongens porer expanderar till följd av nedfrysning (VAST, 1991); urlakning, cementpastans viktiga kalciumhaltiga komponenter löses upp av vattnet och transporteras ut från betongen (VAST, 1991); och alkalisilikareaktioner (ASR), sprickor till följd av expansiv reaktionsprodukt som bildas när alkalireaktiva mineraler i ballasten reagerar med cementets alkali (Betongföreningen, 2020).

Samtliga nedbrytningsmekanismer kan bilda sprickor, ojämnheter, delaminera eller på andra sätt försvaga betongens yta och göra den mer mottaglig för erosion. För att skydda betongstrukturen och förhindra erosion är det viktigt att förstå dessa mekanismer och vidta åtgärder för att minimera deras effekter.

### 3.1.3 Betongens motstånd mot erosion

Hur fort en betongstruktur eroderar och hur omfattande skadorna blir vid samma last/vattenhastighet påverkas av många parametrar, där betongens sammansättning är en betydande faktor. Traditionellt god betong med relativt lågt vct (<0,50) ger ett i många fall adekvat skydd mot erosion. För att förbättra motståndet mot erosion kan betongblandningar optimeras genom att använda lämpliga ballastmaterial eller tillsatsmaterial, exempelvis silikastoft, flygaska, slagg eller metallfiber.

Förutom nedbrytningsmekanismer så spelar gjutningen en betydande roll i hur fort strukturen eroderar. Plastisk krympning och sättningar i nygjuten betong medför att sprickor bildas på betongens yta. Vatten- och bruksseparation medför att betongens yta blir svag och på sikt ojämn till följd av erosionen.

## 3.2 VATTNETS STAGNATIONSTRYCK

När ett vattenflöde stoppas eller avstyrs av en konstruktionsyta uppstår ett stagnationstryck. En grov uppskattning av stagnationstrycket kan göras med ekvation (3.1) nedan.

$$P_{stg} = \frac{1}{2} \cdot \rho_v \cdot v^2 \quad (3-1)$$

där

$P_{stg}$  = stagnationstryck (Pa)

$\rho_v$  = vattnets densitet (kg/m<sup>3</sup>)

$v$  = vattnets hastighet (m/s)

En vattenhastighet på 10 m/s medför ett stagnationstryck på 50 kPa (0,05 MPa). Motsvarande värden för vattenhastigheter på 20 m/s respektive 30 m/s är 200 kPa (0,20 MPa) respektive 450 kPa (0,45 MPa). Trycket kan ha en eroderande inverkan på lågkvalitativ eller skadad betong. Ytor som försvagats av frostangrepp eller armeringskorrosion löper också en ökad risk att eroderas av stagnationstryck. Delaminerat täckande betongskikt och instängd luftficka under grova ballastkorn ökar erosionsrisken (se avsnitt 3.2.2).

Stagnationstrycket kan även medföra stötar mot betongkonstruktionen (platta, väggar och tak) som fortplantas mot bakomliggande konstruktion, grund eller luft. Om betongkonstruktionen är vek och inte förankrad mot bakomliggande konstruktion kan stötarna medföra svängningar i konstruktionen som kan leda till utmattningsbrott. Om bakomliggande konstruktionen är styv, t.ex. berg, kan stöten reflekteras tillbaka mot betongkonstruktionen och belasta den från bergssidan.

Andra konsekvenser av stagnationstryck är erosion av konstruktionens yta till följd av kavitation eller delaminering på grund av ett ökat tryck i konstruktionens olika lager när skador fortplantas genom sprickor i konstruktionen.

Noteras bör slutligen att det största stagnationstrycket uppstår där vattenstrålen träffar konstruktionens yta, och till följd därav ändrar riktning. Detta sker t.ex. på strålllyftare, stötbotten, etc.

### 3.2.1 Upptryck

Stagnationstrycket kan orsaka upptryck i utskovens plattor. Se nedan för ett utdrag från ICOLD Bulletin 58.

*“The uplift pressures tending to lift the slabs are caused by the intermittent conversion of kinetic energy into pressure energy through any openings there may be in the channel floor. This mechanism poses a threat especially at high Froude numbers and is accentuated by intense turbulence, or macroturbulence, by which the energy of the water is dissipated in the hydraulic jump. A feature of macroturbulence is the high frequency pressure fluctuations of widely varying amplitude at all points in the flow including the wetted surfaces of the invert and training walls [22, 131, 132, 151, 1641]. In the worst case, the half-amplitude is close to  $0.4 (V^2/2g)$  in which  $V$  is the mean inlet velocity of the turbulent flow. The frequency is around 1Hertz.*

*Statistical analysis of pressure records from surface-mounted instruments gives a mean square range for dynamic fluctuations of 0.10 to 0.12 ( $V^2/2g$ ).”*

Uttrycket  $v^2/2g$  (m) är vattentrycket, angivet som höjden av en vattenpelare. När uttrycket multipliceras med vattnets densitet och tyngdaccelerationen erhålls, Ekvation (3–1). Multipliceras Ekvation (3–1) med faktorerna 0,40 eller 0,10–0,12, erhålls det upptryck som anges i ICOLD bulletinen.

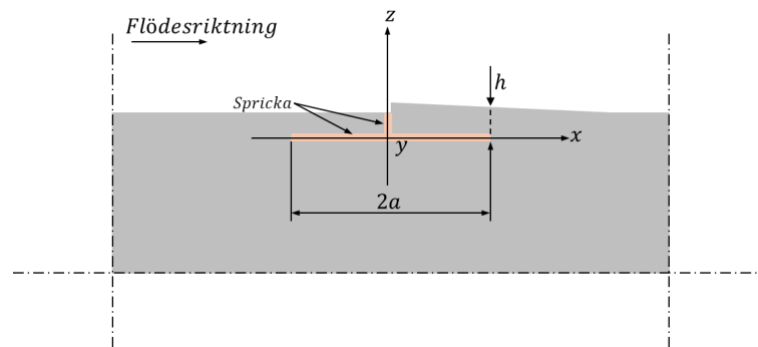
### 3.2.2 Spricktillväxt

Stagnationstrycket kan orsaka spänningar i sprickor och delaminerade skikt. Figur 18 visar gränsskiktet mellan ett delaminerat skikt överst i en platta och resten av strukturen. Det finns två huvudsprickplan:

- 1) Sprickplan (yz-plan) – vinkelrätt mot plattans yta.
- 2) Sprickplan (xy-plan) – parallellt med plattans yta.

Delamineringen beskrivs, för enkelhetsskull, av ett cirkulärt sprickplan i xy-plan med diameter  $2a$ . Flödesriktningen är längs x-axeln.

Flödet störs av ett litet hinder vid  $x = 0$ , vilket orsakar ett tryck i sprickan. Trycket kan uppskattas med hjälp av Ekvation (3–1), där faktorn i ICOLD Bulletin 58 utelämnas.



Figur 18 – Gränsskiktet mellan ett delaminerat lager och resten av konstruktionen (underlaget).

Det tryck som uppstår i sprickan orsakar böj- och skjuvspänningar vid sprickans rand, längs dess periferi. Enligt Timoshenko och Woinowsky (1982) är böjspänningarna:

$$\sigma_r = \frac{3}{4} \cdot \frac{a^2}{h^2} \cdot P_{stg} \quad (3-2)$$

där

$\sigma_r$  = böjspänning vid den cirkulära sprickans rand (MPa)

$a$  = cirkelns radie (m)

$h$  = delamineringens tjocklek enligt Figur 18 (m)

Skjuvspänningen kan beräknas enligt nedan:

$$\tau_r = \frac{1}{2} \cdot \frac{a}{h} \cdot P_{stg} \quad (3-3)$$

där

$\tau_r$  = skjuvspänning vid den cirkulära sprickans rand (MPa)

En jämförelse mellan Ekvation (3-2) och (3-3) visar att  $\sigma_r > \tau_r$  eftersom  $\frac{a}{h} > 1$ .

Dessutom är betongens skjuvhållfasthet större än dess böjdraghållfasthet, vilket innebär att delamineringen bryts på grund av böjspänningar.

Både strömningshastigheten och  $a/h$  förhållandet kan ha stor inverkan på böjdragspänningarna vid sprickans rand. För att bättre förstå  $a/h$  förhållandet kan följande exempel betraktas:

1. Delaminering mellan armering och det täckande betongskiktet

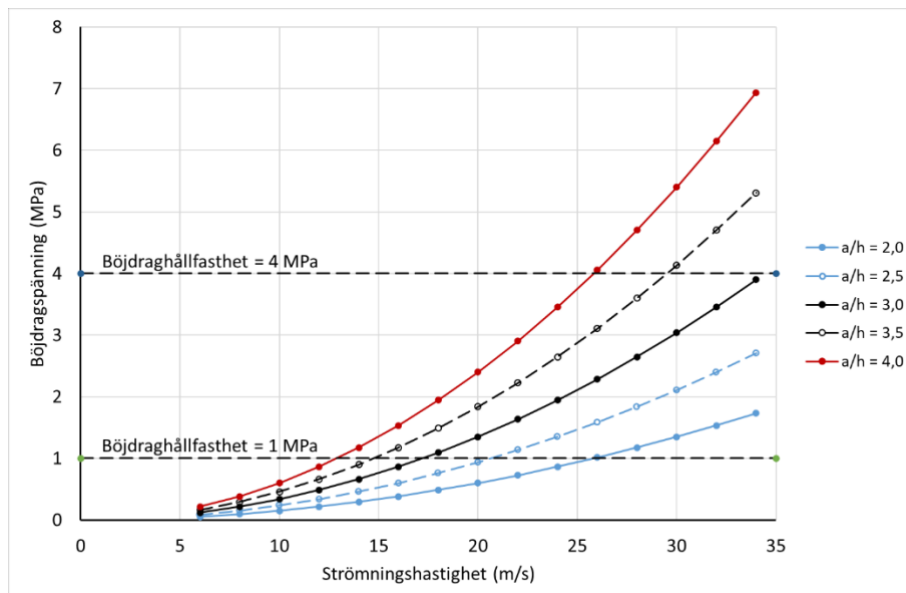
Om det täckande betongskiktet är 50 mm blir  $h = 50$  mm och  $a = 50$  mm för  $a/h = 1$ .

2. Delaminering orsakad av porer mellan grova ballastkorn och cementpasta

Om ballastkornen ligger nära betongens yta och deras storlek är 30 mm blir  $h = 30$  mm och  $a = 30$  mm för  $a/h = 1$ .

Figur 19 visar böjdragspänning som funktion av strömningshastighet vid olika  $a/h$  värden. Dessutom är två spänningsnivåer (4 MPa och 1 MPa) markerade i figuren. Konstruktionsbetong har en böjdraghållfasthet på 4 MPa. Om betongen urlakas eller skadas av frostangrepp minskar böjdraghållfastheten. Plastisk krympning och sättningar före betongens hårdnande kan också leda till hållfasthetsförluster. Anta att böjdraghållfastheten i betongens yttre skikt reduceras till 1 MPa.

Som framgår av Figur 19 klarar oskadad konstruktionsbetong relativt höga strömningshastigheter utan risk för nedbrytning orsakad av delamineringar. Däremot, om betongen har nedsatt hållfasthet på grund av andra nedbrytningsmekanismer, kan den brytas ner vid relativt låga strömningshastigheter.



Figur 19 – Böjdragspänning som funktion av strömningshastighet.

Om trycket är tillräckligt stort kan sprickan växa parallellt med betongens yta, vilket innebär att  $a$  växer. Trycket orsakar spänningar i betongen vid sprickspetsen ( $x = a$ ). Spänningstillståndet vid sprickspetsen kvantifieras med spänningsintensitetsfaktorn  $K_I$  ( $\text{MN}/\text{m}^{1,5}$ ).

$$K_I = \beta \cdot P_{sp} \cdot \sqrt{\pi a} \quad (3-4)$$

där

$K_I$  = spänningsintensitetsfaktor i mod I ( $\text{MN}/\text{m}^{1,5}$ ). I står för modus I spricktillväxt, dvs. att enbart dragspänningar vinkelräta mot sprickplanet förekommer.

$P_{sp}$  = vattentryck i sprickan ( $\text{MN}/\text{m}^2$ )

$a$  = halva spricklängden (m)

$\beta$  = koefficient som beror på konstruktionens geometri, placering av sprickan och belastningsfallet. Här antas  $\beta = 1$ .

Ekvation (3–4) baseras på linjärelastisk brottmekanik, som beskriver spricktillväxt i ett linjärelastiskt material. I ett linjärelastiskt material blir de beräknade spänningarna vid sprickspetsen oändligt stora, vilket innebär att hållfasthetskriteriet ( $\sigma_t \geq f_{tc}$ , *dragspänning*  $\geq$  *draghållfasthet*) inte kan tillämpas för spricktillväxt. Istället tillämpas ett kriterium baserat på spänningsintensitetsfaktorn. Villkoret för spricktillväxt är:

$$K_I \geq K_{Ic} \quad (3-5)$$

där

$K_{Ic}$  = kritisk spänningsintensitetsfaktor i mod I ( $\text{MN}/\text{m}^{1.5}$ ).

När en spricka bildas frigörs elastisk energi ( $G_I$ ,  $\text{MNm}/\text{m}^2$  eller  $\text{MN}/\text{m}$ ). Det är töjningsenergi som frigörs per ytenhet nybildad spricka.  $G_I$  benämns "strain energy release rate" på engelska. Det finns inte vedertagen svensk benämning för denna parameter, utan benämns ibland som sprickenergifrigörelse eller energifrigörelse per sprickarea. Följande samband råder mellan  $K_I$  och  $G_I$ , samt  $K_{Ic}$  och  $G_{Ic}$ :

$$K_I = \sqrt{E \cdot G_I} \quad (3-6)$$

$$K_{Ic} = \sqrt{E \cdot G_{Ic}} \quad (3-7)$$

$$K_{Ic} = \sqrt{E \cdot G_F} \quad (3-8)$$

Där

$E$  = materialets elasticitetsmodul ( $\text{N}/\text{m}^2$ ).

$G_{Ic}$  = kritisk energifrigörelse per sprickarea - critical strain energy release rate på engelska ( $\text{N}/\text{m}$ ).

$G_F$  = brottenergi ( $\text{N}/\text{m}$ ), energi som går åt för att skapa en ytenhet brottyta.

Betong är inte ett perfekt linjärelastiskt material. När modellen ovan tillämpas för betong ersätts  $G_{Ic}$  med brottenergi  $G_F$  ( $\text{MN}/\text{m}$ ).  $G_F$  bestäms experimentellt, se Hassanzadeh et.al. (1998).

Brottenergins ( $G_F$ ) storlek styrs av betongens sammansättning, särskilt av:

- Vattencementtal
- Ballastens största partikelstorlek

Brottenergin kan variera mellan  $30 \cdot 10^{-6} \text{ MN}/\text{m}$  till över  $250 \cdot 10^{-6} \text{ MN}/\text{m}$ .

Brottenergin ökar med betongens partikelstorlek. Betong i dammkonstruktioner har brottenergi som överstiger  $150 \cdot 10^{-6} \text{ MN}/\text{m}$ , vilket beror på de stora ballastkorn som används i betongen. Brottenergin för betong med partiklar mindre än 8 mm

och bruk är omkring  $50 \cdot 10^{-6}$  MN/m. Cementpastans brottenergi understiger  $20 \cdot 10^{-6}$  MN/m.

Brottenergin ökar med minskat vattencementtal. Brottenergin kan minska om vidhäftningen mellan cementpasta och ballastkorn blir så stark att brottet sker genom ballasten. Brottenergin påverkas också av provningsmetoden och provkroppens storlek.

Eftersom delaminering av det yttersta lagret betraktas, antas att betongens större partiklar inte är delaktiga i brottprocessen. Detta leder till antagandet

- $G_F = 50 \cdot 10^{-6} \text{ MN/m}$

Betongens elasticitetsmodul antas vara 25 GPa.  $K_{Ic}$  beräknas med Ekvation (3-7) till  $1,2 \text{ MN/m}^{1,5}$ .

Med hjälp av Ekvation (3-4), (3-5) och (3-8) samt  $P_{sp} = P_{stg}$  kan följande Ekvation för kritisk spricklängd härledas:

$$2a_c = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{E \cdot G_F}{(P_{stg})^2} \quad (3-9)$$

Där

$2a_c$  = kritisk spricklängd (m), samma som  $2a$  i Figur 18.

Strömningshastighet = 30 m/s medför ett vattentryck på 0,45 MPa.

Insättning av vattentrycket samt  $E = 25000 \text{ MPa}$  och  $G_F = 50 \cdot 10^{-6} \text{ MN/m}$  i Ekvation (3-9) leder till  $2a = 3,9 \text{ m}$ .

För att sprickan ska kunna växa parallellt med betongens yta krävs en delaminering på 3,9 m i diameter.

Slutsatsen är att fenomenet inte kan förekomma i vattenkraftsanläggningar.

Det är viktigt att påpeka att under vattenbilning kan tryck på 200 bar (20 MPa) uppmätas. Detta tryck, givet samma omständigheter som nämnts tidigare, resulterar i  $2a = 0,002 \text{ m}$ . Därför är det enkelt att vattenbila betong.

### 3.3 EROSION ORSAKAD AV KAVITATION

#### 3.3.1 Mekanism

Kavitation sker när ångbubblor i vattnet kollapsar (imploderar) nära gränssytan mellan vattenflödet och konstruktionsytan varvid stora stötkrafter utlöses. Skadorna kännetecknas av små gropar och håligheter på ytan. Ångbubblor uppstår vid snabba tryckreduktioner i flödet, t.ex. när flödet passerar sprickor, förskjutningar och ojämnheter på en materialyta. Vattnet börjar då "koka" varvid ångbubblorna bildas. Ångbubblorna kollapsar när trycket återigen ökar, vanligen några centimeter efter den punkt där rubbningen inträffade. En högtrycksstöt våg uppstår i samband med ångbubblornas kollaps vilken kan skada materialets yta, (Falvey, 1990) och (Chapter F-3). "Skador som observeras i hydrauliska konstruktioner

*uppstår nedströms en ojämnhet på avstånd upp till 100 gånger ojämnhetens höjd”, (Falvey, 1990).*

### 3.3.2 Kavitationsindex

Ångbubblor bildas när vattnets tryck blir lägre än dess ångtryck. Därför, finns ett samband mellan vattnets ångtryck och vattnets hastighetstryck (stagnationstryck) vilket nedan anges som ett kavitationsindex, Ekvation (3–11) – se vidare (Falvey, 1990) och (Chapter F-3).

$$\sigma = \frac{P_0 - P_v}{\frac{1}{2} \rho_v v^2} \quad (3-11)$$

där

$\sigma$  = kavitationsindex

$P_0$  = referenstryck (Pa)

$P_v$  = vattnets ångtryck (Pa)

Referenstrycket  $P_0$  motsvarar det lokala statiska trycket inkl. atmosfärtrycket ( $101,3 \cdot 10^3$  Pa). Nämnaren är stagnationstrycket enligt Ekvation (3–1).

Ju lägre index desto större risk för kavitationsskador. I avsnitt 3.3.4 visas samband mellan kavitationsindex och skador.

### 3.3.3 Inverkande parametrar

För att beskriva nedbrytning som orsakas av kavitation bör man liksom andra nedbrytningsprocesser ange en parameter som representerar nedbrytningsmekanismens effekt och ett gränsvärde som representerar strukturens motstånd. Som exempel kan dragspänning (lasteffekt) gentemot draghållfasthet (motstånd) vid mekanisk belastning, vattenmättnadsgrad (lasteffekt) gentemot kritisk vattenmättnadsgrad (motstånd) vid frostangrepp och kloridhalt i armeringsnivå gentemot kloridtröskelvärde vid korrosionsangrepp nämnas. Det har varit svårt att ta fram motsvarande parametrar för nedbrytning orsakad av kavitation.

Det är generellt svårt att ta fram värden för lasteffekt och motstånd för nedbrytningsmekanismer. Till exempel när det gäller korrosion orsakad av kloridinträngning är det svårt att skilja mellan bundna och obundna klorider – det är de obundna kloriderna som orsakar armeringskorrosion – därför väljer man ange den totala kloridhalten som belastning. Vidare, är det svårt att ange kloridtröskelvärdet (motståndet) eftersom det beror på en rad olika faktorer inte minst på fukt- och alkalihalterna i betongen. Liknande svårigheter finns vad beträffar definition av lasteffekt och motstånd för nedbrytning orsakad av kavitation.

I en rapport presenterar U.S. Department of the Interior, (2020) en studie där man bl.a. försöker att ta fram parametrar som styr skadenivån och skadeutvecklingen hos strukturer utsatta för kavitation. I rapporten presenteras även provningsmetod

för att prova betongprovkroppars motstånd mot kavitation. Nedan presenteras några resultat från rapporten.

Figur 20 visar ett försök för att kunna sammanställa erosionsskador observerade på fält. För ändamålet används två dimensionslösa parametrar:

$$\text{Concrete parameter} = \frac{f_c}{\frac{1}{2}\rho_v \cdot v^2} \quad (3-12a)$$

där

$f_c$  = betongens tryckhållfasthet (Pa)

Nämnaren är stagnationstrycket enligt Ekvation (3-1)

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (3-12b)$$

där

$Fr$  = Froudes tal för öppen kanal. I strömmande vatten hinner störningar i vattenflödet fortplanta sig uppströms om  $Fr < 1$ , vilket inte sker om  $Fr > 1$  (Kay & Nedderman, 1979).

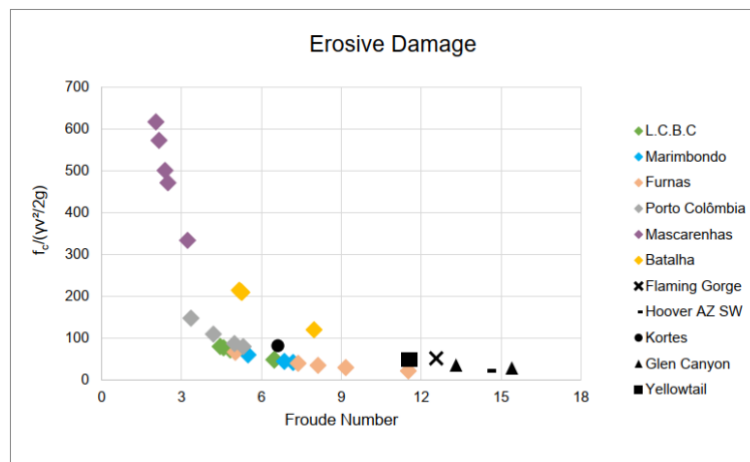
$g$  = tyngdaccelerationen (m/s<sup>2</sup>)

$h$  = karakteristisk längd (m) – vilket motsvarar det strömmande vattnets djup vid en betraktad punkt.

Det bör noteras att det uttryck som anges på den vertikala axeln i Figur 20 är fel. Det rätta uttrycket är det som anges i Ekvation (3-12a).

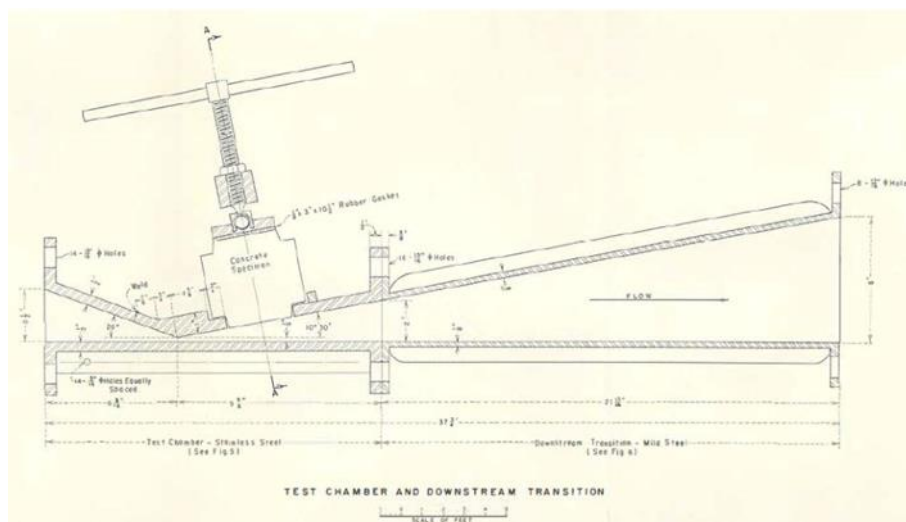
Det som Figur 20 visar är att risken för erosionsskador ökar när "Concrete parameter" respektive Froudes tal understiger 100 respektive överstiger 3. Följande förklaring gäller för figuren. I figuren är skadade (eroderade) anläggningar markerade. De flesta skadade anläggningar har Concrete parameter som understiger 100 och Froudes tal som överstiger 3. Betong i hållfasthetsklass C25/30 har en medeltryckhållfasthet på 33 MPa. Om Concrete parameter är 100 blir stagnationstrycket 0,33 MPa vilket motsvarar 33 meters vattenpelare. Ett stagnationstryck på 0,33 MPa motsvarar en flödes hastighet på 25,7 m/s. Resultatet visar att om betongen är bra så krävs det relativt höga vattenhastigheter för att bryta ner betongen. Sammanställningen säger ingenting om tidseffekten. Det är möjligt att betongen i anläggningarna har varit utsatt för erosion under en längre tid.

Om betongytan utsätts för frostangrepp och urlakning sjunker dess motstånd mot kavitation. Därmed, kan även betong med högre hållfasthet än den som anges ovan brytas ner av kavitation om den inte är frostbeständigt eller tillräckligt tät för att motstå urlakning.



Figur 20 - Diagram som visar preliminär metod med historiska fältdata från olika utskov från Brasilien och USA (Bureau of Reclamation) för att jämföra hydrauliska förhållanden på utskovens ytor med betongens hållfasthet hos allvarligt eroderad betong (Department of the Interior, 2020). Notera att det uttryck som anges på den vertikala axeln är fel. Det rätta uttrycket är det som anges i Ekvation (3–12a).

U.S. Department of the Interior, (2020) presenterar en provningsmetod, Figur 21, för bedömning av olika betongsammansättnings motstånd mot kavitation. Metoden består i princip av att provkroppen (se betongblock i Figur 22) utsätts för höga vattenhastigheter i en kanal/utrustning byggd enligt Venturis princip. Vid en provning som normalt pågår under fyra timmar utsätts provkroppen för en medelflödes hastighet på 27,6 m/s och ett kavitationsindex på 0,06.



Figur 21 – Original ritning av Venturi kavitationsutrustning som användes i de aktuella laborietesterna (U.S. Department of the Interior, 2020). Ritningen är en vertikalsektion av utrustningen. Vattenflödet är från vänster till höger. Provkroppen (betongblocket) är placerat till höger om den trånga öppningen. Vid provning är flödet  $0,053 \text{ m}^3/\text{s}$ , vilket motsvarar en medelhastighet på 27,6 m/s och ett kavitationsindex på 0,06.

Inverkan av kavitation på betongens yta visas i Figur 22. Som framgår av figuren klarar betong med en medeltryckhållfasthet på 54 MPa eller mer testet väl. Vidare, är även de skador som observeras hos betong med en medeltryckhållfasthet på

32 – 37 MPa acceptabla. Vid förlängd provningstid var det möjligt att skadorna skulle kunna växa ännu mer. Det är, dock, svårt att ange den tid som skulle krävas för att skadorna skulle bli omfattande.

Provningens kavitationsindex på 0,06 är lågt, vilket innebär hög belastningsnivå. Det bör noteras att det referenstryck och den temperatur som behövs för att beräkna provningens kavitationsindex, enligt ekvation (3–11), inte har presenterats i referensen. Provningarna har utförts under hårdare förhållanden än de som vanligen förväntas råda i de flesta av vattenkraftens konstruktionsdelar.

I Figur 22 visas också betongens uppskattade tryckhållfasthetsklass, se rad 2. Hållfasthetsklassen har approximativt beräknats genom att minska medeltryckhållfastheten med 8 MPa och avrunda resultatet till närmaste hållfasthetsklass. Metoden är en approximativ metod för att omräkna medelvärdet till ett karaktäristiskt värde när resultaten av enskilda provningar saknas. Observera: Metoden är den omvända av EK2, SS-EN 1992-1-1:2005, där medeltryckhållfastheten beräknas genom att lägga till 8 MPa till tryckhållfasthetsklassen.



	3,890 psi	4,600 psi	5,430 psi	7,850 psi	8,120 psi
1	27 MPa	32 MPa	37 MPa	54 MPa	56 MPa
2	C20/25	C25/30	C30/37	C45/55	C50/60
3	vct=0,70	vct=0,65	vct=0,50	vct=0,35	vct=0,35

SF = Silikastoft

**Figur 22 - Omfattning av kavitationsskador hos betongblock (76×76×26,7 mm) med olika tryckhållfasthet och lufthalt = 0 i vattenflödet (U.S. Department of the Interior, 2020). Tryckhållfasthetsklasserna har uppskattats genom att minska medeltryckhållfastheten med 8 MPa och avrunda resultatet neråt till närmaste hållfasthetsklass.**

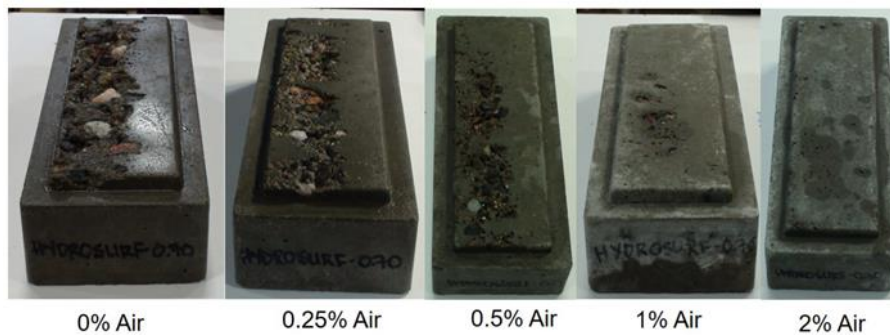
Figur 23 visar provningar utförda med betongblock – med 27 MPa i medeltryckhållfasthet – vid olika luftinnehåll i vattenflödet. Som framgår av figuren har vattnets luftinnehåll stor inverkan på vattnets förmåga att skada betongen.

Enligt resultaten minskar vattnets potential att orsaka skador på betongen markant när luftinnehållet överstiger 1 %. Fenomenet förklaras inte närmare i den refererade undersökningen. Nedan ges dock en möjlig förklaring till hur

Luftinblandning i vattnet kan reducera de erosiva krafter som orsakas av kavitation.

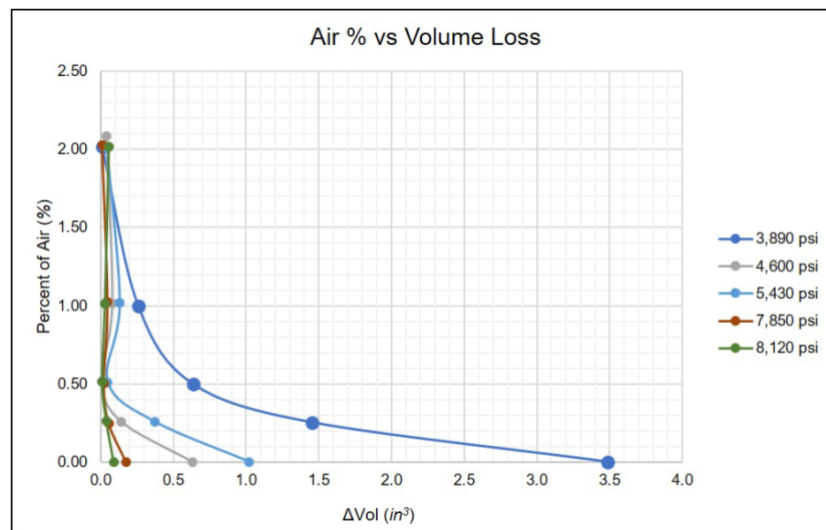
Kavitation uppstår när lokala och snabba trycksänkningar i vattnet leder till att vatten förångas och ångbubblor bildas. När trycket därefter åter ökar kollapsar bubblorna, vilket ger upphov till höga lokala belastningar på angränsande material. Om vattnet innehåller löst eller inblandad luft kan bubblorna delvis fyllas med luft, vilket dämpar kollapsförloppet och därmed minskar de påkänningar som uppstår vid bubblornas sammanfall.

Det bör vidare noteras att provningarna har utförts på den svagaste betongen i provningsserien, vilket kan ha påverkat resultatens storlek och generaliserbarhet.



**Figur 23 - Omfattning av kavitationsskador i betongblock (76×76×26,7 mm) med medeltryckhållfasthet på 27 MPa, vid olika luftinnehåll i vattenflödet (U.S. Department of the Interior, 2020).**

Figur 24 visar inverkan av vattenflödets lufthalt på volymen hos den eroderade betongen. Som framgår av figuren minskar eroderade betongens volym märkbart när vattenflödets lufthalt överstiger 0,5 %. Följaktligen, är inblandning av luft i vattenflödet är ett bra sätt att minska erosionen.



Figur 24 – Inverkan av vattenflödets lufthalt på kavitationsskador under en 4-timmars testperiod på betongprovsningsblock med olika hållfastheter - skadan mäts som volymförlust per provkropp.

Notera följande parametrar:

$$Damage\ Rate = \frac{\Delta Vol}{A} \cdot \frac{1}{t} \quad (3-13a)$$

$$P_c = \frac{P_{dynamic}}{p_0 - P_{vapor}} \quad (3-13b)$$

där

$\Delta Vol$  = den bortroderade betongens volym (in<sup>3</sup>)

$A$  = betongytans specifika yta (in<sup>2</sup> – provkroppens yta vid laborietest)

$t$  = exponeringstid (h)

$P_{dynamic}$  = standardavvikelsen hos tryckfluktuationer på ytan (lb/in<sup>2</sup>)

$P_0$  = medeltrycket vid skadeområdet (lb/in<sup>2</sup>)

$P_{vapor}$  = vattnets ångtryck (lb/in<sup>2</sup>)

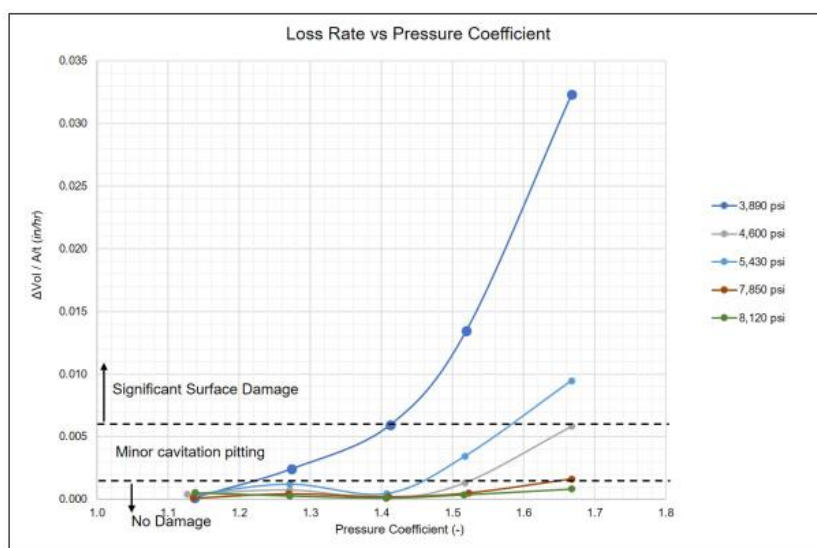
$P_c$  = tryckkoefficient

OBS: 1 in. = 2,54 cm; 1 lb/in<sup>2</sup> = 1 psi = 6,89476·10<sup>3</sup> N/m<sup>2</sup>.

"Damage rate", Ekvation (3-13a) anger volymen hos den bortroderade betongen per yt- och tidsenhet. Tryckkoefficient anger det lokala tryckets variationskoefficient (standardavvikelse/medelvärde). Ökad koefficient ökar amplituden hos de stötar som träffar ytan.

Figur 25 visar visuell bedömning av skadegraden hos provkroppens yta efter genomförd provning; samt mängd eroderad betong per yt- och tidsenhet som funktion av lokal tryckkoefficient. Kurvorna visar att när ytan börjar erodera så ökar tryckfluktuationerna och processen blir accelererande, speciellt när betongens

hållfasthet är låg. Den visuella bedömningen visar att betong med hållfasthetsklass C30/37 och högre har relativt god beständighet mot erosion orsakad av kavitation. Man bör, dock, notera att frostangrepp, urlakning och ASR kan försvaga betongens yta och reducera dess motstånd mot erosion.



Figur 25 – Visuella bedömning av skadegraden hos provkroppens yta efter genomförd provning; och mängd eroderad betong per yt- och tidsenhet som funktion av lokal tryckkoefficient (U.S. Department of the Interior, 2020) – 1 psi = 1 lb/in<sup>2</sup> = 6,89476·10<sup>3</sup> N/m<sup>2</sup>.

### 3.3.4 Samband mellan kavitationsindex och skador

Figur 26 visar sambandet mellan kavitationsindex och tappningstid utifrån dokumenterade skador.

Det kritiska kavitationsindexet, dvs. det index som leder till skador styrs av en mängd olika faktorer. Tid, temperatur, konstruktionsytans struktur och hållfasthet samt sprickor och ojämnheter påverkar alla det kritiska kavitationsindexet. Det kritiska kavitationsindex som vanligen anges är inte relaterat till skadornas omfattning, utan det ska endast betraktas som ett gränsvärde under vilket det föreligger stor risk för att kavitationsskador kan uppstå.

Kavitationsskador i betongmaterial styrs framför allt av betongytans draghållfasthet, täthet och jämnhet. Skadeomfattningen är dock inte kopplad till indexet, därför förekommer många olika kritiska kavitationsindex.

Den kritiska flödes hastighet som anges av olika källor varierar mellan 10–12 m/s. Falvey (1990) anger flödes hastigheten 10 m/s som en gräns under vilken risken för kavitationsskador är minimal. Ett sådant flöde motsvarar ett kavitationsindex på 2. Indexet kan beräknas med hjälp av Ekvation (3–11) och följande antaganden

$$\rho_v = \text{vattnets densitet (kg/m}^3\text{)} = 1000$$

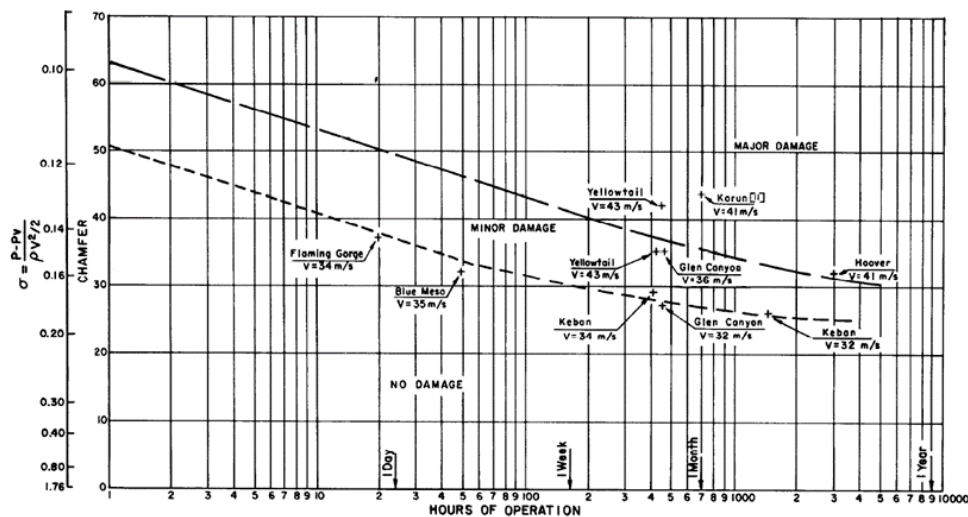
$$v = \text{vattnets hastighet (m/s)} = 10$$

$$P_0 = \text{referenstryck (Pa)} = 101,3 \cdot 10^3$$

$$P_v = \text{vattnets ångtryck (Pa)} = 1,23 \cdot 10^3 \text{ vid } 10 \text{ }^\circ\text{C}$$

I antaganden ovan antas att referenstrycket  $P_0$  är lika med atmosfärstrycket, dvs. att det lokala statiska vattentrycket är försumbart. Det är en rimlig approximation för preliminära handberäkningar. Resultat från CFD-beräkningar ger information om både referenstrycket och vattnets hastighet vilket kan användas för att beräkna fram kavitationsindexet i hela beräkningsmodellen.

(Chapter F-3) anger dock: "I allmänhet, om kavitationsindex är större än 0,5, förväntas ingen betydande skada för en typisk spillränna eller tunnelbeklädnad." Kavitationsindex 0,5 motsvarar en flödehastighet på 20 m/s enligt ovanstående förutsättningar. Denna flödehastighet kan anses vara för hög för en konstruktion som ofta/ständigt är utsatt för långvarig tappning i kombination med låga temperaturer.



Figur 26 - Samband mellan kavitationsindex och tappningstid utifrån dokumenterade skador (Falvey, 1990).

#### Kavitationsmotstånd – val av betongkvalité

För möjligheten att välja betonghållfasthet utifrån ett givet kavitationsindex behövs ett samband mellan dessa storheter – ett sådant samband har inte hittats genom den genomförda litteraturstudien.

#### 3.3.5 Materialsammansättning för ökat motstånd

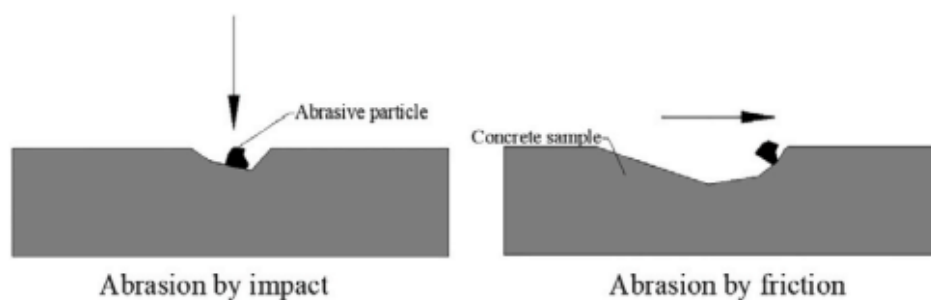
För att öka betongytans motstånd mot kavitation ska den vara jämn, tät och stark. De faktorer och parametrar som styr betongytans egenskaper är desamma som gäller för betongytor utsatta för erosion orsakad av vattenburna partiklar, se 3.4.3.

### 3.4 EROSION ORSAKAD AV VATTENBURNA PARTIKLAR

#### 3.4.1 Allmänt

Erosion i form av mekaniskt slitage orsakad av vattenburna partiklar, exempelvis sand, slam och grus, som slipar eller stöter emot betongytan kallas abrasion (Qiong et al. 2022). Det kännetecknas av en till en början uniform slipning på betongytan och senare ojämna kratrar på grund av betongens heterogena natur (Jinjun et al. 2022). Detta är problem där det finns floder som för med sig stora mängder sediment. De flesta älvar i Sverige har generellt "rent" vatten utan så mycket partiklar. Det finns, dock, anläggningar med bottenutskov där vattnet kan föra med sig eroderande partiklar. Många faktorer påverkar intensiteten av abrasion och dessa kan delas upp i två kategorier. Den första typen är relaterade till egenskaper hos vattenflödet och medburna partiklar – vattnets hastighet, infallsvinkel och turbulens och partiklarnas storlek, geometri, hårdhet. Den andra kategorin är faktorer enbart relaterade till betongen i sig, exempelvis *vct*, hållfasthet och typ av ballast (hållfasthet, hårdhet och storlek) (Hasan, 2015). Genom konstruktiva åtgärder kan man påverka faktorer av typ ett (Jinjun et al. 2022), och genom materialsammansättning i betongen faktorer av typ två. För att göra en konstruktion ordentligt motståndskraftig mot erosion bör båda typerna tas i beaktning.

Beroende på vattenflödets infallsvinkel och partiklarnas storlek sker två olika typer av abrasion. Vid infallsvinklar under  $45^\circ$  sker främst abrasion från inducerade skjuvkrafter orsakade av friktionen mellan partiklar och yta. Vid infallsvinklar över  $45^\circ$  dominerar slagkrafter från partiklar som stöter emot ytan. Figur 27 visar en schematisk bild över två fall, med  $90^\circ$  och  $0^\circ$  infallsvinkel för partikeln. Generellt kan man säga att höga infallsvinklar resulterar i större djup medan låga infallsvinklar leder till ytligare skador över ett större område (Qiong et al. 2022).



Figur 27 - Olika infallsvinklar på partiklarna ger upphov till olika typer av abrasion. (Qiong et al. 2022)

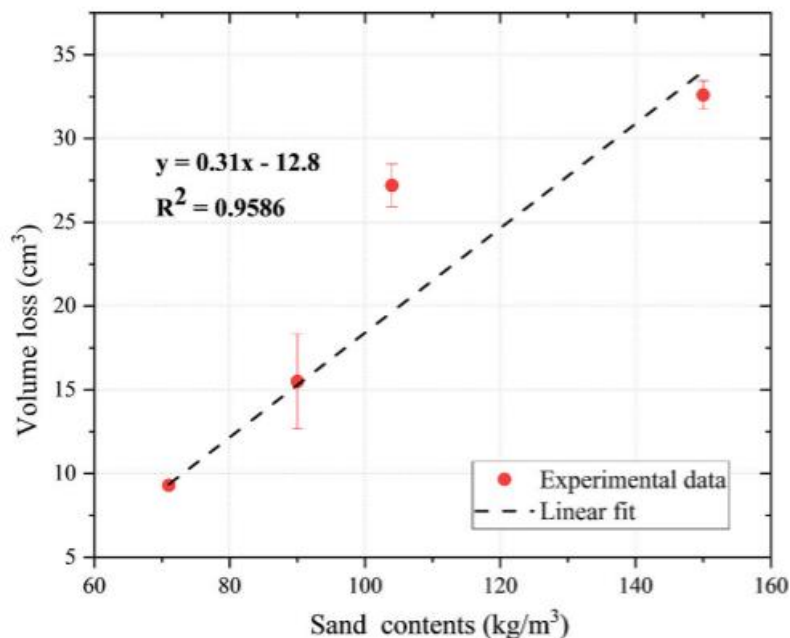
För att karakterisera skadan i studier används vanligen parametrarna volymförlust, massförlust, abradionsdjup och abradionshastighet (Qiong et al. 2022). Abrasionsdjupet är av särskilt intresse då det väl reflekterar skadans allvar och kan användas för att beräkna abradionshastigheten och därmed uppskatta hållbarheten. Likväl kan det vara svårt att med noggrannhet bestämma abradionsdjupet, då skadorna skapar en ojämn yta över ett större område. Därför anges ofta abradionsdjupet som ett medel- eller maximumvärde baserat på ett antal

mätningar över det skadade området (Qiong et al. 2022). Volymförlusten och massaförlusten kan också vara svåra att mäta, och de är oftast inte normaliserade över en area vilket innebär många osäkerheter vid direkta jämförelser mellan experiment. Säkrast är att läsa dessa enheter endast som godtyckligt mått på skadans intensitet.

### 3.4.2 Inverkande parametrar

#### *Partikelhalt i vattenflödet*

En ökad partikelhalt i vattenflödet medför mer kinetisk energi för att driva på formation och propagering av sprickor på betongens yta. Figur 28 visar experiment med varierande partikelhalt av Q. Liu et al. (2022). Samtliga prover använde betong med 31 MPa tryckhållfasthet, 8,01 m/s vattenflödes hastighet, 45° infallsvinkel och utfördes under 24 h. Volymförlusten ökar från 9,3 cm<sup>3</sup> till 32,6 cm<sup>3</sup> när sand-halten i vattnet ökar från 71 kg/m<sup>3</sup> till 150 kg/m<sup>3</sup>. Inom det studerade området finns det ett nästan linjärt samband, vilket visas i Figur 28. Både arean och djupet på skadan var större vid den högre partikelhalten. Det maximala skadedjupet var 3 mm för det lägsta flödet och 12 mm vid det högsta. Den linjära modellen passerar inte origo vilket indikerar ett kritiskt tröskelvärde för partikelhalten, under vilket abrasionen är försumbar (Q. Liu et al. 2022).



Figur 28 - Volymförlust som funktion av partikelhalt i vattenflödet. (Q. Liu et al. 2022)

#### *Vattenflödes hastighet*

Vattenflödes hastigheten är direkt korrelerad med både den kinetiska energin partiklarna träffar betongytan med och mängden partiklar som slår emot betongytan per tidsenhet, den s.k. stöt-frekvensen.

Låga, medelhöga och höga flödes hastigheter korresponderar tre olika nedbrytningsmekanismer (Qiong et al. 2022). Spänningen på underlaget vid låga hastigheter (<6 m/s) är otillräcklig för att orsaka plastisk deformation eller sprickor och därför sker endast en nötning av bruk på ytan. Vid medelhöga hastigheter (~8 m/s) är den kinetiska energin tillräckligt hög för att gradvis nöta och polera både bruk och ballast. Mindre bitar ballast kan rulla ut till flöjd av bristning i gränsskiktet mellan ballast och cementpasta. Höga flödes hastigheter (>10 m/s) medför en stor mängd energi som kan leda till brottskador utöver allvarlig erosion. Stötar blir kraftiga nog för att slå sönder både bruk och ballast, vilket kan skapa stora sprickor.

#### *Infallsvinkel*

Infallsvinkel påverkar djupet, arean och formen på det skadade området. Som nämnts tidigare orsakas abrasion både av stötar och av friktionen från partiklar på betongytan och infallsvinkeln utgör vilka krafter som dominerar. I experimenten av Q. Liu et al. påvisades tre experiment med infallsvinklarna 45°, 60° och 90° att högre infallsvinkel korrelerade med djupare skador och mindre area. Vid analys av volymförlusten framkom att störst total skada skedde vid infallsvinkeln på 60°, trots att den vinkeln gav upphov till varken störst area eller djup (Q. Liu et al. 2022) i jämförelse med 45° och 90°. Detta belyser vikten av att mäta flera parametrar samtidigt.

#### *Turbulens och virvlar*

Turbulens och virvlar i vattenflödet kan orsaka lokala zoner med vattenflödes hastigheter högre än genomsnittet, vilket medför ökad erosion. I virvlar kan partiklar rulla mot ytan och skapa urholkade fördjupningar, likt små jättegrytor.

#### *Partikelstorlek*

Större, mer massiva, partiklar har högre rörelseenergi och orsakar generellt sett mer skada än små. Det finns dock väldigt få studier gjorda som jämför hur storleken på abrasionspartiklarna påverkar erosionens intensitet. I vattenkraftsammanhang kan tilläggas att riktigt stora (gissningsvis partiklar > 4 mm) partiklar är mycket ovanliga vid ytutskov, de förekommer främst vid bottenutskov.

### **3.4.3 Materialsammansättning för ökat motstånd**

I en sammanställning av Jinjun et al. (2022) identifieras tre huvudsakliga sätt att öka betongens resistens mot abrasion. Det första är att öka betongens tryckhållfasthet, det vill säga att ha betong med lågt *vct*. Använda höghållfasthetsbetong (HSC) med eller utan tillsatsmaterial. Det andra sättet är att begränsa sprickor på betongens yta, vilket kan göras exempelvis genom att undvika plastiska krympsprickor i färskt tillstånd, sättningar i färskt tillstånd, höga temperaturer under hårdnaden eller att blanda in fiber. Tredje sättet är att använda hård och slitstark ballast.

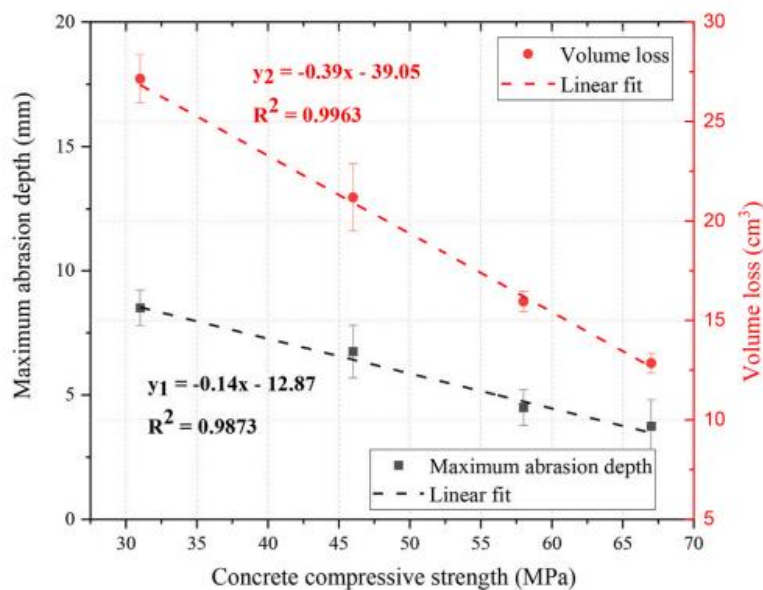
### Tryckhållfasthet

Många studier har visat att betongens resistans mot abrasion kan relateras till dess tryckhållfasthet, trots att abrasionsskador inte orsakas av direkta tryckspänningar på betongytan. I betong utgörs de mest kritiska svagheter vid abrasion vanligtvis av befintliga sprickor, ytzonens egenskaper samt hållfastheten i övergångszonen mellan ballast och cementpasta, den så kallade Interfacial Transition Zone (ITZ) (Qiong et al., 2022).

Betongens fysikaliska och mekaniska egenskaper, och i synnerhet dess tryckhållfasthet, styrs i hög grad av vattencementtalet (*vct*). Ett minskat *vct* leder till ökad hållfasthet och täthet i såväl cementpastan som i övergångszonen mellan cementpasta och ballast. Följaktligen medför ett lägre *vct* en tätare och mer hållfast betongstruktur.

Den ökade tryckhållfasthet som erhålls vid sänkt *vct* är kopplad till en mindre porös och mekaniskt starkare cementpasta samt en förbättrad vidhäftning mellan cementpasta och ballast. Detta kan motverka initiering och spricktillväxt i ytzone och därmed reducera abrasionsskador. I Figur 29 redovisas resultat från Qiong et al. (2022) som påvisar ett starkt samband mellan tryckhållfasthet och resistans mot abrasion.

Det bör även noteras att redovisade resultat avser sprickfria provkroppar tillverkade under kontrollerade laboratorieförhållanden. Vid val av betongsammansättning för en konstruktion bör därför särskild hänsyn tas till att minimera risken för vatten- och bruksseparation samt sprickbildning under såväl gjutning som hårdnande och drift.



Figur 29 - Maximalt skadedjup och volymförlust som funktion av tryckhållfasthet. (Q. Liu et al.)

Även om inverkan av tryckhållfastheten på betongens abrasionsresistans tidigare har bevisats, menar Jinjun et al. (2022) att sambandet överdrivs. Många

materialtillsättningar som ökar betongens tryckhållfasthet har ingen påverkan på abrasionsresistans och att blint sänka *vct* kan i extrema fall minska abrasionsresistansen på grund av den relativt låga mängden ballast, trots att tryckhållfastheten är högre. Det är viktigt att bibehålla andelen ballast i betongen så hög som möjligt. Abrasionresistans är en strikt ytegenskap och kan inte till fullo uppskattas med bulkegenskaper som styrka.

#### *Betongytans egenskaper*

Erosion av olika slag påverkar betongens yta. Erosion har sällan djupverkan utan bryter ner betongen skiktvis från ytan. Om betongens yta är porös och svag eroderas den relativt lätt. Erosionen gör betongens yta ojämn och skrovlig, vilken kan initiera koncentrerade nedbrytningsställen spridda över betongens yta. Efter initieringsfasen är det lättare för vattnet och dess medförda partiklar att erodera cementpastan kring ballastkornen och så småningom lösgöra ballasten. Erosionen kan fortsätta och t.o.m. ta fart allteftersom erosionen tränger djupare in i materialet i det övre skiktet.

Vatten- och bruksseparation som kan uppstå i den nygjutna och färska betongen försvagar betongens yta. Den hårdnade betongens yta kan ha högre *vct*, porositet och lufthalt än den betong som finns djupare i konstruktionen. Materialet på ytskiktet är svagare och mer krympbenägen än bulkmaterialet. Ytskiktet är dessutom utsatt för frostangrepp, urlakning och uttorkning i en större utsträckning än bulkmaterialet. Den sammanlagda effekten är att ytskiktetsmaterial får sämre beständighet mot erosion än bulkmaterialet. Bristfälligt sammansatt betong – betong med låg andel finfraktion – och med högt *vct* ökar risken vatten- och bruksseparation.

Inblandning av luft sänker cementpastans och följaktligen betongens hållfasthet. Minskad ythållfasthet kan leda till sämre motstånd mot erosion. Man bör, dock, notera att inblandning av luft i betong ökar dess frostbeständighet. En betongyta som är frostbeständig försvagas inte p.g.a. frostangrepp. Inblandning av luft i betong kan dessutom öka den färska betongens stabilitet och gjutbarhet, samt minska risken för vatten- och bruksseparation. En betongyta med bristfällig frostbeständighet kan eroderas lätt i de miljöer där de utsätts för omväxlande vattenflöde och låga temperaturer. Lösningen för problemställningen är att betongen måste vara stark och frostbeständig.

All betong sätter sig efter att den har placerats i form. Sättningen orsakas av att betongens partiklar, som är tyngre än vatten, sjunker ner i formen. Sättningen är alltså vattenseparation. Om betongen är välsammansatt sker vattenseparationen långsamt och jämnt och cementet hinner binda och begränsa vattenseparationen. Sättning som sker över armeringsstänger, vid sektionändringar och vid formkanter kan leda till plastisk sprickbildning på betongen yta. Sprickorna på betongens yta kan leda till initiering av en erosionsprocess. Risken med plastiska sättsprickor minskar med den färska betongens stabilitet, välsammansatt betong, och minskat *vct*.

Plastisk krympning – som orsakas av att den nygjutna och färska betongens yta torkar – kan också leda till att sprickor bildas på betongens yta. För att undvika

sprickorna bör betongens yta efterbehandlas och härddas så att betongens yta inte torkar förrän betongen har uppnått tillräcklig hög hållfasthetsnivå.

Nygjuten betong kan utsättas för både fukt- och temperaturgradienter i tidig ålder. Gradienterna kan medföra att ytsprickor bildas på betongens yta. Risken för ytsprickor orsakade av gradienterna minskar med minskad gradient. Ett sätt att minska gradienterna är att fukt-/värmeisolera betongens yta.

#### *Ballastens egenskaper*

Hårdhet, geometri, storlek och ytegenskaper hos ballasten kan ha stor påverkan på betongens förmåga att motstå abrasion (Yu-Wen et al., 2006). Generellt kan sägas att om ballastens motstånd mot erosion är högt, så är betongens motstånd högt, då betong består till ca 70 % av ballast. Vidhäftningen mellan cementpasta och ballast är en kritisk punkt för hållfastheten (Jinjun et al., 2022), och generellt har det visats att hårdare ballast binder starkare till cementen. Utöver hårdheten kan det vara fördelaktigt att använda krossad sten snarare än naturballast som ballast. Eftersom naturballast inte genomgått någon bearbetning (mekanisk bearbetning tar bort svaghetszoner i materialet medan naturliga processer eroderar partikeln) kan de innehålla svagare partiklar mer mottagliga för erosion. När dessa bryts ner blir ytan ojämn och mer mottaglig för erosion. Dessutom skapar geometrin hos krossad sten en större kontaktyta mellan ballasten och cementen.

#### *Inverkan av stålfibrer*

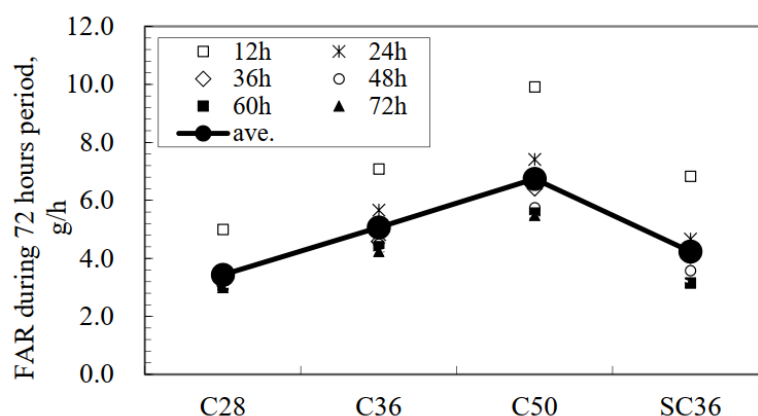
Inblandning av fibrer kan förbättra betongens motstånd mot abrasion. Yu-Wen et al. (2020) visade genom en undersökning som genomfördes med hjälp av ASTM C1138-undervattentestet och sandtestet i vatten att betong med stålfiber och silikastoft har bättre abrasionsmotstånd än betong utan fibrer och silikastoft.

I ASTM C1138-undervattentestet (friktionsnötningstestet) placeras stålkulor på betongens yta och vattnet cirkulerar med en hastighet på 1200 varv/minut. Betongens yta utsätts för friktionskrafter som uppstår mellan stålkulorna och betongens yta. I sandtestet (slagnötningstestet) sprutas ett vattenflöde som innehåller sand på betongens yta. Vattenflödes hastigheten är 10 m/s. Vattenflödets riktning mot betongens yta kan regleras. Vinklarna 45° och 90° användes vid undersökningen.

Figur 30 visar friktionsnötningshastighet (g/timme) för betong vid olika tidpunkter under den 72-timmarsperioden av testet. Den horisontella axeln visar de olika betonger som användes vid provningarna. Betongblandningarna och deras hållfasthet framgår av Tabell 1. SC36 innehåller silikastoft och 1 % stålfibrer. De övriga betongerna innehåller varken silikastoft eller fibrer. C36 och SC36 har samma bindemedeltal och tryckhållfasthet. Som framgår av Figur 30 har inblandning av silikastoft och fibrer förbättrat betongens motstånd mot nötning. Men förbättringen är relativt liten, 17 % enligt Yu-Wen et al. (2020).

När det gäller slagnötningstestet är förbättringen 8 % (för 45° vinkeln) respektive 9 % (för 90° vinkeln) för betong som innehåller stålfibrer och silikastoft jämfört med referensbetongen.

Skillnaden mellan friktionsnötningstestet (C1138) och slagnötningstestet (sandtestet) är att stålfibrerna i friktionsnötningstestet bildar ett "lager" mellan betong som ligger under de och stålkulorna – därmed skyddar de den underliggande betongen. I slagnötningstestet så slås cementpastapartiklar bort från betongens yta – fibrerna har därmed jämfört med fibrerna i friktionsnötningstestet sämre möjlighet att skydda cementpastan.



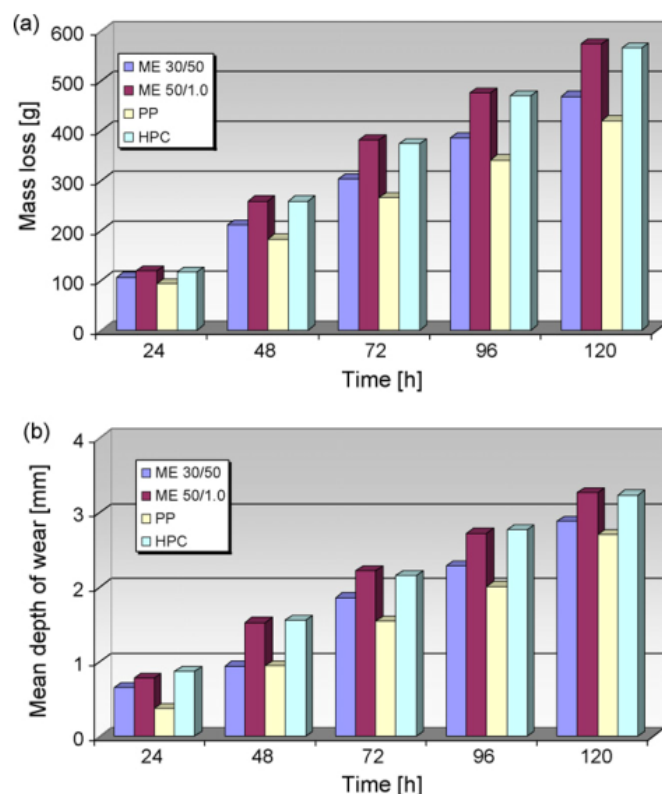
Figur 30 – Friktionsnötningshastighet (g/timme) för betong vid olika tidpunkter under den 72-timmarsperioden av testet (Yu-Wen et al., 2020).

Tabell 1 – Betongens sammansättning och tryckhållfasthet (Yu-Wen et al., 2020).

Batch	w/cm	Quantities, kg/m <sup>3</sup>								Slump, cm	Compressive Strength, MPa
		Water	Cement	GGBFS	SF	Steel Fiber	Sand	Gravel	SP		
C28	0.28	160	457	114	0	0	730	925	12.5	24	90.8
C36	0.36	160	356	89	0	0	780	985	10.9	22	50.3
C50	0.50	160	288	32	0	0	840	1055	0.5	21	30.4
SC36	0.36	160	285	71	89	78	755	945	15	18	51.0

Att stålfibrer inte anmärkningsvärt bidrar till betongens motstånd mot friktionsnötning bekräftas av Horszczaruk (2009), Figur 31.

Provningarna genomfördes enligt ASTM C1138, se ovan. I provningsserien ingick högpresterande betong med och utan fibrer. Två olika stålfibertyper och polypropylenfibrer användes. Betongsammansättningarna framgår av Tabell 2. Stålfibrerna var av typen "hooked" med två olika längd och diameter – ME 30/50 (längd = 30 mm, diameter = 0,5 mm) och ME 50/1.0 (längd = 50 mm, diameter = 1,0 mm).



Figur 31 – Resultaten av friktionsnötningstest av betongprover: (a) massförlust, (b) medeldjup av friktionsnötning, betong med stålfibrer: ME 30/50 och ME 50/1.0, betong med polypropylenfibrer, högpåresterande betong utan fibrer: HPC, (Horszczaruk, 2009), .

Tabell 2 - Betongens sammansättning, (Horszczaruk, 2009).

Type of mix	ME 30/50	ME 50/1.0	PP	HPC
Cement (kg/m <sup>3</sup> )	450	450	450	450
Water (l/m <sup>3</sup> )	135	135	135	135
Sand (kg/m <sup>3</sup> )	535	535	535	535
Basalt (kg/m <sup>3</sup> )	1279	1279	1279	1279
Silica fume (kg/m <sup>3</sup> )	45	45	45	45
Superplasticizer (% mass of cement)	1.0	1.0	1.0	1.0
Steel fibers (kg/m <sup>3</sup> )	70	70	-	-
Polypropylene fibers (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	1.8	-
w/c ratio	0.3	0.3	0.3	0.3
Slump (mm)	130	115	140	140
Compressive strength (MPa)	91.8	99.3	98.2	100.1
Absorbability (%)	1.2	1.2	1.3	1.8

### 3.5 FÖRSLAG PÅ MATERIALSAMMANSÄTTNING FÖR EROSIONSUTSATT BETONG

#### 3.5.1 Betong utan fibrer utsatt för vattenflöde och medförda partiklar

Dolk (2021) anger:

*”Alla faktorer och åtgärder som förbättrar betongens hållfasthet, täthet (porositet) och densitet förbättrar också nötningsmotståndet. De faktorer som främst inverkar är:*

- *hållfastheten och vattencementtalet ( $v_{ct}$ )*
- *ballastens egenskaper, främst dess hållfasthet och hårdhet*
- *betongsammansättningen*
- *härddningen.”*

Betongytor i vattenkraftens vattenvägar utsätts för kavitation, friktion och stötar från partiklar i vattnet. En hård och tät betongyta kan bättre motstå vattenflödets olika nedbrytningsmekanismer. Med minskat  $v_{ct}$  ökar betongytans hårdhet, hållfasthet och täthet och därmed dess motstånd mot kavitation, friktionsnötning och partikelstötar.

Med minskat  $v_{ct}$  ökar vidhäftningen mellan ballast och cementpasta vilket förbättrar ballastpartiklarnas motstånd mot stötar från partiklar i strömmande vatten.

Betongens drag- och tryckhållfasthet ökar med minskat  $v_{ct}$ , vilket förbättrar materialets motstånd mot erosion och kavitation.

Med ledning av de resultat som presenteras i Dolk (2021) bör en betong med bra nötningsmotstånd ha ett  $v_{ct}$  som är lägre än 0,45 och en tryckhållfasthet som överstiger 50 MPa.

Ballastens motstånd mot nötning är också viktigt. Om ballastens motstånd mot nötning är lägre än cementbruket så nöts betongen relativt snabbt eftersom ca 70 % av betongens volym upptas av ballast. Däremot blir betongens nötningsmotstånd högt om ballastens nötningsmotstånd är högt. Ballastens täthet, densitet och hållfasthet är också viktiga parametrar som styr betongens motstånd mot nötning.

I praktiken bestäms ballastens motstånd mot nötning med olika provningsmetoder. Val av provningsmetod styrs av typ av nötning och den funktion som betongbeläggningen har. SS-EN 12620 hänvisar till olika standarder för provning av de grova ballastens motstånd mot olika typer av nötning. Två av standarderna kan vara relevanta för ballast i betong i vattenkraftsmiljöer, nämligen SS-EN 1097-1 och SS-EN 1097-9. Båda metoderna har stålkulor som nöter (slår sönder) ballastpartiklarna.

SS-EN 1097-1 beskriver bestämning av micro-Deval koefficienten, som är procentuell reduktion av ballastens vikt efter genomförd provning. Viktreduktionen motsvarar den materialvikt som passerar 1,6 mm sikten. Provningsen är nötning av ballast i en roterande kvarn som innehåller stålkulor (10 ± 0,5 mm). Tabell 3 visar kategorier för största micro-Devalvärden. Motståndet mot nötning ökar med minskat micro-Devalvärdet.

Tabell 3 - Kategorier för största micro-Devalvärden, Tabell 14, SS-EN 12620:2008.

Micro-Devalvärde	Kategori $M_{DE}$
$\leq 10$	$M_{DE10}$
$\leq 15$	$M_{DE15}$
$\leq 20$	$M_{DE20}$
$\leq 25$	$M_{DE25}$
$\leq 35$	$M_{DE35}$
$> 35$	$M_{DEDeclared}$
Inget krav	$M_{DENR}$

SS-EN 1097-9 beskriver bestämning av motstånd mot nötning av dubbdäck. Metoden kallas även *Nordiskt kulkvarnsvärde*. Metoden liknar i princip metoden för bestämning av micro-Devalvärde. Skillnaderna består i kvarnens utformning (hårdare nötning), kulans storlek (15,0 + 0,1/-0,5 mm), samt siktens storlek (2 mm) för bestämning av viktreduktionen. Tabell 4 visar kategorier för största nötningsvärden enligt nordiska kulkvarnsmetoden. Motståndet mot nötning ökar med minskat nordiskt kulkvarnsvärde.

*”På de svenska betongvägarna märks det tydligt att rätt ballastkvalitet är av yttersta vikt, där ballast med kulkvarnsvärdet 8,5 gett stort spårslitage efter kort tid medan sträckor med kulkvarnsvärde kring 6 har stått emot dubbdäckstrafikens nötning mycket längre tid”,* (Dolk, 2021).

Tabell 4 - Kategorier för största nötningsvärden enligt nordiska kulkvarnsmetoden, Tabell 17, SS-EN 12620:2008.

Nordiskt kulkvarnsvärde	Kategori $A_N$
$\leq 7$	$A_N7$
$\leq 10$	$A_N10$
$\leq 14$	$A_N14$
$\leq 19$	$A_N19$
$\leq 30$	$A_N30$
Mellanliggande värden och värden $> 30$	$A_NDeclared$
Inget krav	$A_NNR$

Med ledning av Dolk (2021) rekommenderas ballast med nötningsmotståndet  $A_N10$  eller lägre för vattenkraftens vattenvägar, men helst  $A_N7$  för bottenutskov, utskovskulvertar, skibord och energiomvandlare. Det bör noteras att det i realiteten är svårt att ställa krav på ballasten om inte mycket stora volymer ska gutas. Betongfabrikerna använder den lokala ballast de har tillgänglig.

Betongens sammansättning, dvs. andel ballast, stenmax, vct, cementmängd och luftvolym påverkar betongens motstånd mot nötning. Om ballastens motstånd mot nötning är större än cementpastans bör ballastens andel maximeras i betongen.

Inblandning av luft försvagar betongen och minskar dess täthet. Om betongytan är ständigt under icke fruset vatten och ytans temperatur inte understiger  $-2\text{ }^\circ\text{C}$  är inblandning av luft inte nödvändigt.

Betongens motstånd mot nötning ökar med ökad stenmax. Däremot finns det risk att ballastens motstånd mot nötning minskar med ökad kornstorlek. Det finns ingen rekommenderad stenmax för betong som är utsatt för nötning.

Vakuumbehandling av nygjuten betongs yta minskar vattencementtalet i ytan, vilket ökar ytans täthet och hållfasthet. Denna metod kan förbättra betongens motstånd mot hydraulisk erosion (Rosenqvist, 2019). Vakuumbehandling kräver dock stor kunskap och skicklighet hos entreprenören samt noggrann planering och utförande. Misslyckad behandling kan försämra betongens motstånd mot erosion.

Härdning har stor inverkan på betongytans hårdhet, hållfasthet och täthet. Vattenhärdning (vattenlagring) förbättrar betongens nötningssmotstånd. Enligt resultat som presenteras i Dolk (2021) krävs minst en veckas vattenlagring för att en given betongsammansättning ska kunna uppnå det högsta möjliga nötningssmotståndet.

Den ovanstående betongkvaliteten är rekommenderad för vattenvägar som är ständigt eller relativt ofta utsätts för strömmande vatten med hastighet över 12 m/s.

- Betongkvaliteten är speciellt rekommenderad för bottenutskov, utskovskulvertar, skibord och energiomvandlare.
- Av produktionstekniska skäl och med hänsyn till ökad risk för misslyckanden rekommenderas inte  $v_{ct} < 0,40$ .
- De betongytor som är utsatta för frostangrepp ska lufttillsättas enligt gällande normer och standarder.
- Vid lufttillsättning rekommenderas att  $v_{ct}$  närmare 0,40 väljs.

För vattenvägar som sällan utsätts för strömmande vatten och vattenvägar som utsätts för hastigheter under 12 m/s rekommenderas  $v_{ct} < 0,50$ .

### 3.5.2 Betong med fibrer utsatt för vattenflöde och medförda partiklar

När det gäller betongmatrisen gäller de krav som anges i avsnitt 3.5.1.

Av produktionstekniska skäl bör fiberinblandningen begränsas till högst 0,5 % (volym) eller 39 kg/m<sup>3</sup>.

## 4 Praktikfall

### 4.1 BAKGRUND

Det praktikfall som varit tillgängligt för denna studie är upprustning av utskoven i Tåsjö som Ångermanälvens Vattenregleringsföretag genomför 2024–2026. En delmängd av projektet omfattar renovering av erosionsskadad betong på skibord, pelarväggar och energiomvandlare. En provyta med fiberarmerad betong har gjutits på skibord tillhörande vänster utskov (U1), se Figur 32 och Figur 33.

### 4.2 KONSTRUKTION

Skibordet är i princip helt horisontellt och gjutet på berg. I projektet har nominellt 180 mm vattenbilats bort och ersatts med ny armerad betong som bergförankrats (Figur 34). Pägjutningen är armerad med  $\varnothing 16s160$  i båda riktningarna (Figur 35).

På konstruktionen har ett område som utgör hela skibordets bredd och som är 3 m långt i strömningsriktningen gjutits med stålfiberarmerad betong, se

Figur 34. Även detta område är bergförankrat och slakarmerat på samma vis som övrig pägjutning på skibordet.

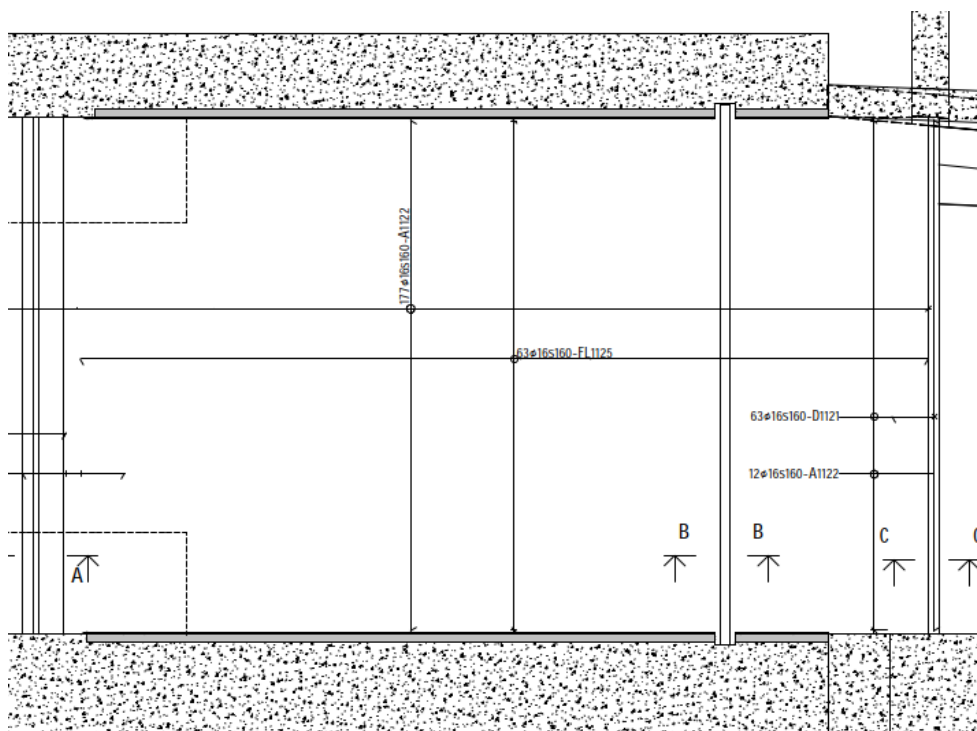


Figur 32 – Nedströmsvy av utskov 1.



**Figur 33 – Skibordets yta. Mittpunkten av den sektion som ska åtgärdas med fiberarmerad betong ligger cirka 5,5 m uppströms från sättfalsens mittpunkt.**





Figur 35 – Armeringsritning – urklipp från ritning K22-1-001, 2024-09-25.

### 4.3 BELASTNINGAR

Belastningar på skibordet är:

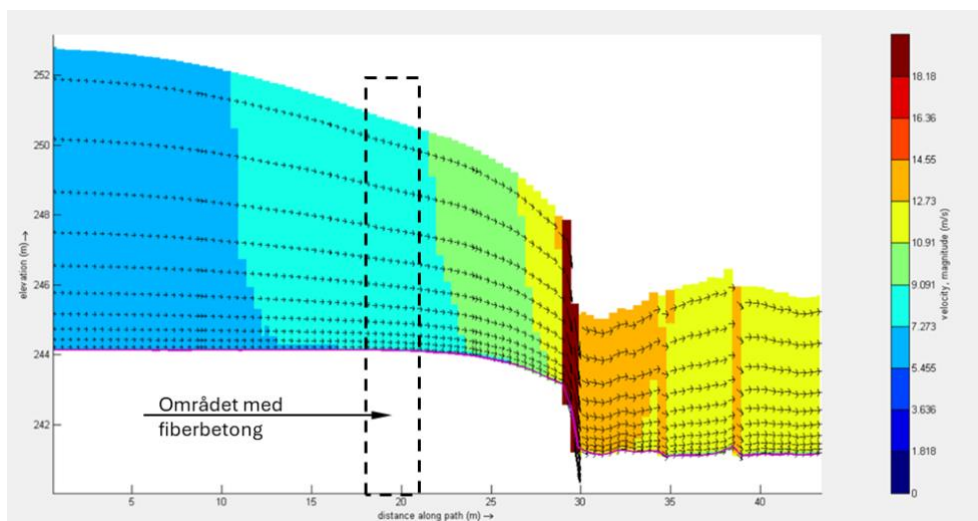
- Upptryck, avsnitt 3.2.1
- Vattentryck i betongens sprickor, avsnitt 3.2.2
- Hydraulisk erosion, avsnitt 3.3 och 3.4
- Miljöbelastning som frostangepp och urlakning

De tre första mekanismerna styrs av strömningshastigheten. Vilka laster de påför konstruktionen beskrivs i respektive avsnitt. Strömningshastigheten påverkar också urlakningen. Den bortför kalciumhydroxiden som diffunderar mot ytan och hindrar bildandet av det i vatten nästan olösliga kalciumkarbonatet.

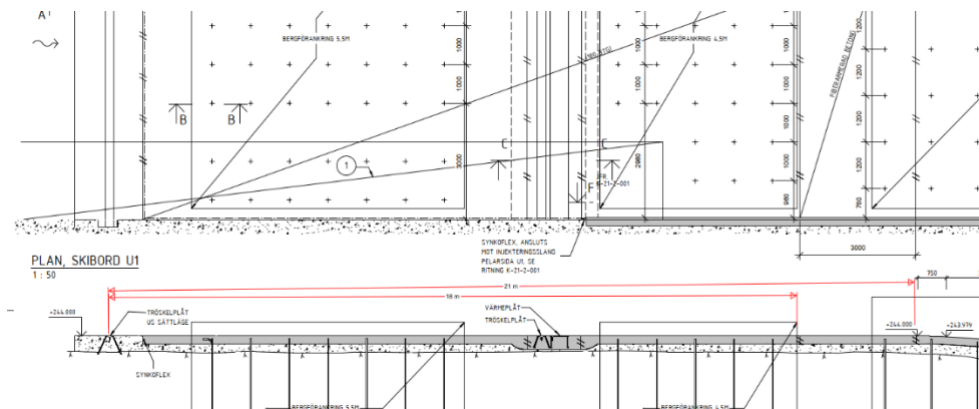
Figur 36 visar strömningshastigheten i utskovsrännan vid fullt öppen utskovslucka och med uppströmsytan vid DG. Origo är vid tröskeln. Området med fiberbetong, som är 3 m brett och visas med en rektangel, är placerat 18 m från tröskeln. Ritningen i Figur 37 visar placeringen av området med fiberbetong. Medelströmningshastigheten inom området varierar mellan 7 m/s och 9 m/s. Turbulent strömning kan lokalt medföra högre strömningshastigheter. Anta en strömningshastighet på 12 m/s. Denna hastighet leder till:

- Upptryck = 0,072 MPa (Ekvation 3-1)
- Vattentryck i betongens sprickor = 0,072 MPa (Ekvation 3-1)

- Enligt Figur 19 är kritisk strömningshastighet vid reducerad hållfasthet 12,5 m/s.
- Hydraulisk erosion, avsnitt 3.3 och 3.4
  - Kavitationsindex = 1,4 (Ekvation 3–11). Indexet är mycket större än det gränsvärdet på 0,2 som kan avläsas på Figur 26.
  - Concrete parameter = 417 (Ekvation 3-12a med  $f_c = 30$  MPa);  $Fr = 1,5$  (Ekvation 3-12b med  $h = 7$  m enligt Figur 36). Enligt Figur 20 är risken för erosionskada låg.
- Miljöbelastning som frostangrepp och urlakning
  - Mekanismerna kan minska betongens hållfasthet och dess motstånd mot frostangrepp. Den betong som har använts är både tät och frostbeständig.



Figur 36 – Strömningshastighet i utskovsrännan. Origin är vid tröskeln och området med fiberbetong är placerat 18 m från tröskeln.



Figur 37 – Placering av området med fiberbetong. Området med fiberbetong är 3 m brett och är placerat 18 m från tröskeln.

#### 4.4 MATERIALSAMMANSÄTTNING

Nedan anges materialsammansättningen enligt den tekniska beskrivningen:

Tryckhållfasthetsklass C30/37

- Exponeringsklass XC4/XF3
- Högsta vctekv 0,5
- Lufthalt 5 % - minst 4,5 % enligt allmänna föreskrifter K-01-0-001, 2024-09-25.
- CEM II/A-V 42,5 N MH/LA/NSR (Anläggningscement FA).
- Härdningsklass 4 enligt SS-EN 13670:2009, dock minst 7 dygn.
- Sprickor skall injekteras enligt EBJ.12. Maximalt tillåten sprickbredd 0,2 mm.
- På en del av skibord U1 ska som i en del av ett Energiforsksprojekt gjutas med fiberarmerad betong. Mängd stålfiber: 30 kg/m<sup>3</sup>.

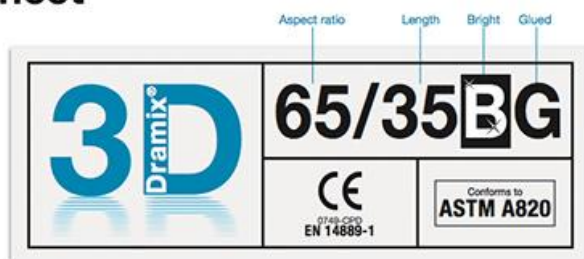
Täckande betongskikt för skibordet är 70 mm enligt allmänna föreskrifter ritning K-01-0-001, 2024-09-25.

Ingen högsta nominella övre kornstorlek anges för fiberarmerad betong. Betongleverantörer redovisar inte betongens sammansättning av konkurrensskäl. Vid ett telefonsamtal den 29 september 2025 berättade dock betongleverantören att den högsta kornstorleken för den levererade fiberarmerade betongen var 16 mm. Vidare berättade leverantören att fibrerna var Dramix 3D 65/35 BG.

Fibrernas datablad presenteras i Figur 38. Fibrernas slankhetstal (aspect ratio) och längd är 65 respektive 35 mm. Fibrernas diameter är 0,55 mm.

**Dramix®****BEKAERT**

better together

**Data Sheet****DRAMIX® 3D**

Dramix® 3D is the reference in steel fibre reinforcement. Combining high performance, durability and ease-of-use, 3D provides you with a time-saving and cost-efficient solution for most common applications.

- > original anchorage
- > standard tensile strength

Dramix® 3D is a cost efficient solution for

- > flooring
- > tunnel applications
- > precast
- > residential applications

Bekaert supplies all of the support you need for your project. We help you determine the most suitable fibre types, calculate optimal dosages, select the right concrete quality. Contact your local support.

Go to [www.bekaert.com/dosingdramix](http://www.bekaert.com/dosingdramix) for our recommendations on handling, dosing and mixing.

Modifications reserved.  
All details describe our products in general form only.  
For detailed information, product specifications available on request.

**PERFORMANCE****Material properties**

**Tensile strength:**  $R_{m,NO.1}$ : 1.345 N/mm<sup>2</sup>  
Tolerances:  $\pm 7,5\%$  Avg

**Young's Modulus:**  $\pm 210.000$  N/mm<sup>2</sup>

**Geometry**

<b>Fibre family</b>	3D	
<b>Length (l)</b>	35 mm	
<b>Diameter (d)</b>	0,55 mm	
<b>Aspect ratio (l/d)</b>	65	

**Fibre network**

8,0 km per m<sup>2</sup> (for 15 kg/m<sup>2</sup>)  
14.531 fibres/kg

**Dramix® range**

	5D	4D	3D
<b>Tensile strength</b>	██████████	██████████	██████████
<b>Wire ductility</b>	██████████	██████████	██████████
<b>Anchorage strength</b>	██████████	██████████	██████████

**PRODUCT CERTIFICATES**

CE  
EN 14889-1

Conforms to  
**ASTM A820**

Dramix® is certified for structural use according to EN 14889-1 (system '1'). Detailed information is available on request.

**SYSTEM CERTIFICATES**

All Dramix® plants are ISO 9001 and ISO 14001 certified.

**PACKAGING**

BAGS 20 kg

BIG BAG 1100 kg

**STORAGE**

71.19.05 - 08/2012

Figur 38 – Datablad för Dramix 3D 65/35 BG.

**4.5 UTFÖRANDE**

Betonggjutningen utfördes 10 september 2025. Vid gjutningstillfället var alla delar av utskovets skibord, förutom den fiberarmerade delen, gjutna (Figur 39-Figur 41).

Betongen transporterades med betongbil från betongfabriken till anläggningen (se Figur 42). Betongen överfördes från betongbilen till betongpumpen (se Figur 43) och pumpades sedan till gjutningsstället.

Före gjutningen bestämdes den färskas betongens lufthalt med betongprov taget från övergången mellan betongbil och betongpumpbil (Figur 43). Figur 45 - Figur 47 visar lufthaltsmätningen. Lufthalten bestäms enligt SS-EN 12350-7:2019. Lufthaltsmätarens behållare fylls med betong enligt standardens procedurer. Därefter monteras mätutrustningens övre del (lock) och behållaren trycksätts med hjälp av en handpump på locket. Genom att släppa övertrycket kan man avläsa lufthalten på mätklockan som är monterad på locket.

En lufthaltsmätning utförs för varje betongleverans. Om lufthalten är godkänd sätts gjutningen i gång. Inga prover togs för kontroll av betongens tryckhållfasthet.

Vid gjutningen den 10 september 2025 mättes en lufthalt på drygt 7 %, vilket är för högt och inte godtagbart. Den betong som hade överförts till pumpbilen pumpades tillbaka till betongbilen. En ny lufthaltsmätning utfördes och visade en lufthalt på knappt 3 %, vilket är för låg och inte godtagbart. Den tredje mätningen visade en lufthalt på 6 %, som godkändes.

En betongleverans räckte för gjutningen av den anvisade sektionen.

Figur 48 – Figur 51 visar gjutning av den anvisade sektionen på skibordet med fiberarmerad betong. Gjutningen startade på den vänstra sidan. Betongen placeras inom det avsedda området, jämnades ut, vibrerades och slodades. Arbetet utfördes snabbt och hela gjutningen tog cirka 30 minuter.

Figur 52 visar glättning av betongens yta med en glättningsmaskin. Glättning utförs när betongen har tillstyvnat tillräckligt för att den kan beträdas och bearbetas. Väntetiden varierar mellan 2 och 8 timmar, beroende på väderförhållandena (temperatur, sol, vind, etc.). Figur 53 och Figur 54 visar den glättade ytan efter härdning.



Figur 39 – Sektionen som gjuts med fiberarmerad betong.



Figur 40 – Närbild av sektionen som gjuts med fiberarmerad betong



Figur 41 – Fotografi av Utskovs 1:s skibord taget från dennes uppströms sidan.



Figur 42 – Betongbil och betongpumpbil.



Figur 43 – Överföring av fiberarmerad betong från betongbil till betongpumpbil.



Figur 44 – Lufthaltsmätare för bestämning av betongs lufthalt.



Figur 45 – Placering av färsk fiberarmerad betong i lufthaltsmätarens behållare.



Figur 46 – Fiberarmerad betong placerad och kompakterad i lufthaltsmätarens behållare.



Figur 47 – Resultatet av lufthaltsmätning.



Figur 48 – Starten på gjutning med fiberarmerad betong.



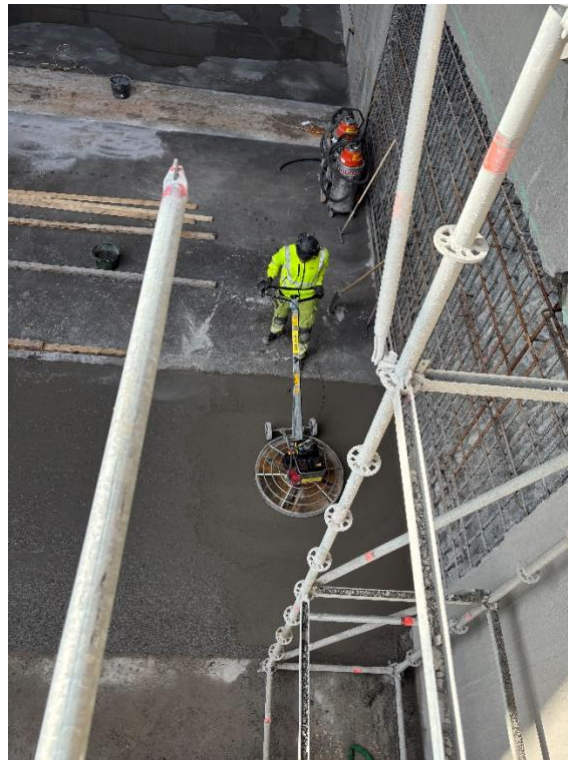
Figur 49 – Betongplacering med hjälp av pumpslang och betongkompaktering med stavvibrator.



Figur 50 – Den nygjutna delen utjämnades med hjälp av manuell slodning.



Figur 51 – Den nygjutna delen efter slodning.



Figur 52 – Glättning av betongytan.



Figur 53 – Glättad yta efter härdning.



Figur 54 – Glättad yta efter härdning.

#### 4.6 UTVÄRDERING

Skibordssektionen är gjuten med stark och frostbeständig betong. Därför kommer det dröja några år innan de första tecknen på hydraulisk erosion dyker upp. Under de inledande åren kan det vara svårt att med experimentella metoder påvisa någon pågående nedbrytningsprocess. Visuell inspektion och fotodokumentation av skibordsytan rekommenderas därför under de första fem åren. Den första inspektionen bör göras senast våren 2027. Om inga märkbara förändringar observeras, genomförs den andra inspektionen tre år senare, dvs. på våren 2030.

Om tecken på nedbrytning upptäcks eller om man vill följa upp förändringar i skibordets betong, bör följande provningar utföras:

##### 1. Tunnslipsanalys

Vid en tunnslipsanalys analyseras en cirka 25  $\mu\text{m}$  tjock betongskiva med ett polarisationsmikroskop. I detta så kallade tunnslip studeras komponenterna som bygger upp betongen. Analysen ger information om potentiella förändringar i cementpastan (kemiska angrepp, reaktiva ballastpartiklar, urlakning, karbonatisering m.m.) och deras effekter på betongens beständighet. Tunnslipet är impregnerat med fluorescerande epoxi för att möjliggöra uppskattning av *vct*, samt kontrollera cementpastans täthet och sprickor. Provkroppens längd (i riktning vinkelrätt mot betongens yta) är 30 – 40 mm. Minst två prover ska analyseras.

Om möjligt utförs liknande provning med betongprover tagna strax uppströms skibordsektionen med fiberarmerad betong. Betongprover tas även på motsvarande punkter som på fiberarmerade sektionen i utskov 2.

## 2. Avflagning vid frysning

Betongytans förmåga att motstå avflagning ska bestämmas enligt SS 137244:2019 (Betongprovning – Hårdnad betong – Avflagning vid frysning) med avjoniserat vatten (metod B), dock med en modifierad provställning, se Figur 55.

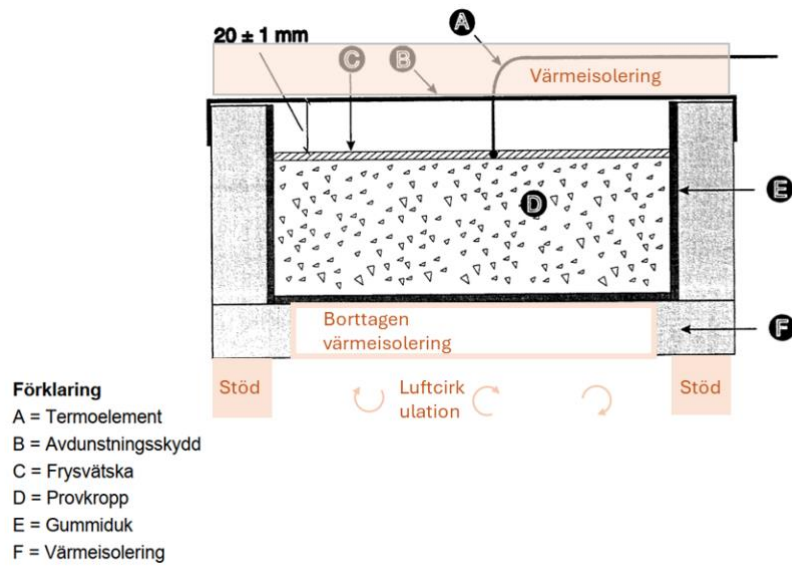
I den modifierade provställningen har undersidans isolering tagits bort medan en isolering har placerats på ovasidan av provställningen. Provställningen placeras på ett stöd som tillåter att klimatkammarens luft kan cirkulera på undersidan av provställningen. Syftet med modifieringen är att låta betongen frysa innan vattnet fryser.

Betongen på ett skibord är vintertid vanligen kallare än vattnet (ofta många minusgrader). När frusen betong kommer i kontakt med ofrusat vatten kan dess yttre porer absorbera vatten och närma sig den kritiska vattenmättnadsgraden, vilket kan leda till avflagning av betongens yta. Utöver denna effekt kan den snabba temperaturändringen på betongens yta medföra skador genom termochock.

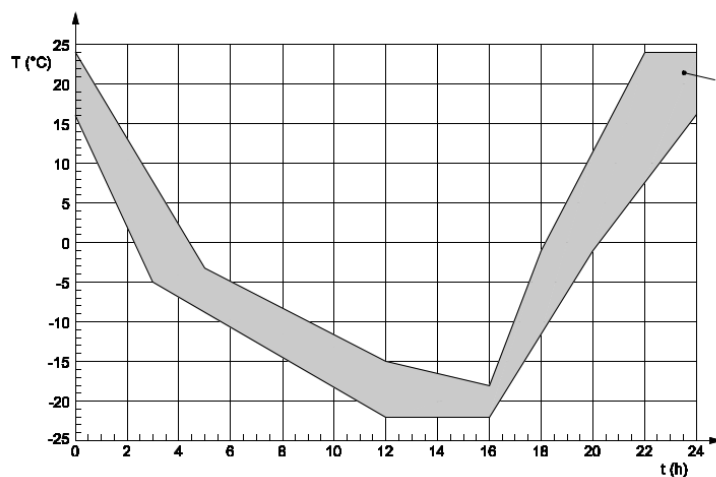
Avskalningsprovningen ska genomföras så att betongen fryser före vattnet. Tid-/temperaturcykeln i frysvätskan enligt SS 137244:2019 (Figur 56) behöver därför inte följas. För att styra fryscyklerna monteras ett termoelement 10 mm djupt i betongen. Temperaturen i termoelementet ska följa tid-/temperaturcykeln enligt SS 137244:2019. Vid upptining kan den övre isoleringen avlägsnas för att möjliggöra snabbare temperaturökning i frysvätskan.

Provkroppen tillverkas av en borrhärla med en diameter på 100 mm. Provkroppens tjocklek ska vara mindre än 60 mm. Två provkroppar provas vid varje tillfälle.

Om möjligt utförs liknande provning med betongprover tagna strax uppströms skibordsektionen med fiberarmerad betong. Betongprover tas även på motsvarande punkter som på fiberarmerade sektionen i utskov 2.



Figur 55 – Provpställning. Provpställningen är en modifiering av den ställning som presenteras i Figur 6 i SS 137244:2019 (Betongprovning – Hårdnad betong – Avflagning vid frysning). Provpställningens bottenisolering är borttagen. Provpställningen placeras på stöd för att cirkulera kall luft på undersidan. Värmeisolering placeras på ovsidan av provställningen. Syftet är att betongen ska frysa före vattnet.



Figur 56 – Tid-/temperaturcykeln i frysvätskan enligt SS 137244:2019.

### 3. Hållfasthetsprovning

Inga hållfasthetsprovningar behöver utföras eftersom hydraulisk erosion medför ytliga skador på betongen.

## 5 Referenslista

- [1] Berglund, J., Lindblom, U., (2019). *Åldrande vattenförande bergtunnlar Förstudie: Ingenjörsgelogisk status*. Energiforsk, RAPPORT 2019:626.
- [2] Betongföreningen, (2020). *ASR i svensk betong - vägledning för nya och befintliga konstruktioner*. Betongrapport nr 18, utgåva 1.
- [3] Chapter F-3 *Cavitation Damage Induced Failure of Spillways*, <https://www.usbr.gov/damsafety/risk/BestPractices/Chapters/F3-CavitationDamageInducedFailureOfSpillways.pdf>
- [4] Dolk, E., (2021). *Nötningsmotstånd*. Kapitel 29, *Betonghandbok Material Del II*. Svensk Byggtjänst.
- [5] Falvey Henry T, (1990). *Cavitation in Chutes and Spillways*. Engineering Monograph No. 42. Bureau of Reclamation, Denver, U.S.A.
- [6] Guo, J., and Lei, C., (2024). *Computational modeling of crack flows in a hydropower stilling basin*. Master of Science Thesis Division of Concrete Structures, KTH, Stockholm, Sweden 2024.
- [7] Hassanzadeh, M., De Place Hansen, E. J., Hansen, E. A., Stang, H, (1998). *Determination of the Fracture Energy of Concrete: A comparison of the three-point bend test on notched beam and the wedge-splitting test*. NORDTEST Project No 1327-97. SP REPORT 1998:09, SP Swedish National Testing and Research Institute, Building Technology.
- [8] Horszczaruk, E., k., (2009). *Hydro-abrasive erosion of high performance fiber-reinforced concrete*. *Wear* 267 (2009) 110–115, journal homepage: [www.elsevier.com/locate/wear](http://www.elsevier.com/locate/wear). Contents lists available at ScienceDirect.
- [9] Hu, X., G., , Momber, A., W., Yin, Y., Wang, H., Cui, D., M., (2004). *High-speed hydrodynamic wear of steel-fibre reinforced hydraulic concrete*. X.G. Hu et al. / *Wear* 257 (2004) 441–450, [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), <http://www.paper.edu.cn>.
- [10] ICOLD Bulletin 58, (1987). *Spillways for dams*. Commission Internationale des Grands Barrages, 151 bd Haussmann, 75008 Paris.
- [11] Jinjun Guo, Minghao Gao, Kun Wang, and Peng Zhang, (2022). *Mechanisms and influential variables on the abrasion resistance hydraulic concrete*. *Nanotechnology Reviews* 11, 2997–3019. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0488>.
- [12] Kraftverksföreningens Utvecklingsstiftelse, VAST, (1991). *Betong i vattenkraftanläggningar*.
- [13] Kay, J.M. & Nedderman, R.M., (1979). *An Introduction to Fluid Mechanics and Heat Transfer*. Third Edition, Cambridge University Press, 1979.
- [14] Li, S., Yang, J., Lej, C., and Guo, J., (2025). *Effects of slab gaps, offsets, and underdrains on uplift forces in a stilling basin*. In the proceedings of

- International Symposium “Common Challenges, Shared Future, Better Dams”, ICOLD-CIGB 2025, Chengdu, China, 16-23 May, 2025.
- [15] Midböe, F., (2019). *Bottenutskov med pulsationsfenomen - Mätning av tryck och vibrationer under prov*. Energiforsk, RAPPORT 2019:597.
- [16] Mohammad Sabbir Hasan, (2015). *Abrasion on Concrete Surfaces Caused by Hydraulic Loading with Water-Borne Sands*. Department of Building, Civil and Environmental Engineering. Concordia University. Montréal, Canada.
- [17] Nadheer S. Ayoob, Sallal R Abid, (2020). *Analysis of abrasion rates in concrete surfaces of hydraulic structures*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 888. 10.
- [18] Nordström, E., Eriksson, D., (2019). *Inventering av inre vattenvägsbesiktningar*. Energiforsk, RAPPORT 2019:566.
- [19] Nordström, E., (2021). *Strategi för förvaltning av inre vattenvägar*. Energiforsk, RAPPORT 2021:730.
- [20] Nordström, E., Yang, J., Lillberg, E., and Angele, K., (2025). *Stilling basin damages at low heads - Experimental investigation*. In the proceedings of Twenty-Eighth International Congress on Large Dams, Chengdu, China: Taylor & Francis, 2025.
- [21] Qiong Liu, Liang Li, Lars Vabbersgaard Andersen, Min Wu, (2022). *Studying the abrasion damage of concrete for hydraulic structures under various flow conditions*. Cement and Concrete Composites, Vol 135, 104849. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104849>.
- [22] Persson, J., Eriksson, P., (2018). *Bergerosion i spillfärör Kunskapssamling kring erosion av berg nedströms utskov*. Energiforsk, RAPPORT 2018:532.
- [23] Persson, J., Eriksson, P., (2020). *Bergerosion i spillfärör – etapp 2*. Energiforsk, RAPPORT 2020:644.
- [24] Persson, J., Eriksson, P., (2022). *Bergerosion i spillfärör – etapp 3 Förstudie inför laboratorietest*. Energiforsk, RAPPORT 2022:892.
- [25] Rosenqvist, M., (2019). *Uppföljning av reparationer på skibord av betong*. Energiforsk, RAPPORT 2019:585
- [26] Rosenqvist, M., (2023). *Uppföljning av sprutbetongreparerade skibord*. Energiforsk, RAPPORT 2023:927.
- [27] SS 137244:2019. *Betongprovning – Hårdnad betong – Avflagnig vid frysning*.
- [28] SS-EN 12350-7:2029. *Provning av färsk betong – Del 7: Lufthalt – Tryckmetoder*.
- [29] SS-EN 1992-1-1:2005. Eurokod 2: *Dimensionering av betongkonstruktioner - Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader*.
- [30] SVC (SVENSKT VATTENKRAFTCENTRUM), 2018–2022, SYNTESRAPPORT Energiforsk, RAPPORT 2023–929.

- [31] Timoshenko, S.P., Woinowsky-Krieger, S., (1982). *Theory of plates and shells*. Second edition. International student edition.
- [32] U.S. Department of the Interior, (2020). *Collaborative Studies to Reduce Flow-Induced Damage on Concrete Hydraulic Surfaces*. Research and Development Office, Final Report No. ST-2020-1885-01, Hydraulic Laboratory Report HL-2020-05.
- [33] US Army Corps of Engineers (USACE) (1980). *Hydraulic Design of Reservoir Outlet Works*. Engineering Manual 1110-2-1602. October 1980.
- [34] US Army Engineers Waterways Experiment Station (1975). *Outlet Works For Beltzville Dam Pohopoco Creek, Pennsylvania*. Prototype Tests. Technical Report H-75-10. May 1975.
- [35] Yu-Wen Liu, Tsong Yen, Tsao-Hua Hsu, (2006). *Abrasion erosion of concrete by water-borne sand*. Cement and Concrete Research 36, 1814-1820.
- [36] Yu-Wen Liu, Yu-Yuan Lin and Shih-Wei Cho (2020). *Abrasion Behaviour of Steel-Fiber-Reinforced Concrete in Hydraulic Structures*. Appl. Sci. 2020, 10, 5562; doi:10.3390/app10165562. [www.mdpi.com/journal/applsci](http://www.mdpi.com/journal/applsci).

# EROSIONSBESTÄNDIGA BETONGYTOR I VATTENKRAFTSANLÄGGNINGAR

Betongkonstruktioner i vattenkraftanläggningar utsätts för erosion orsakad av vattenflöden (kavitation och vattenburna partiklar), vilket kan påverka långsiktig funktion och beständighet och leda till tekniska risker och höga underhållskostnader. Trots detta beaktas hydraulisk erosion inte tillräckligt vid dimensionering av betongytor i vattenkraftanläggningar, utan ytorna dimensioneras traditionellt för att motstå frost och korrosion.

Projektet har genomförts för att öka kunskapen om hydraulisk erosion och styrande mekanismer och dess betydelse för betongytors beständighet genom att sammanställa vetenskapligt och praktiskt baserad kunskap. Projektet identifierar materialegenskaper och utförandemetoder som kan minska erosion och förebygga skador. Resultaten är avsedda att utgöra ett praktiskt stöd vid nybyggnation och reparation i erosionsutsatta miljöer i vattenkraftens betongkonstruktioner.

Resultaten visar att lågt vattencementtal, hög tryckhållfasthet och användning av hårda ballastmaterial samt fiberarmering kan förbättra erosionstålgheten. Genom praktiska provningar och dokumentation av gjutningar presenteras strategier för att förlänga betongens livslängd och minska skador av erosion i vattenkraftmiljöer.

## 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](http://energiforsk.se).