

# ANSLUTNINGAR I FYLLNINGSDAMMAR

RAPPORT 2020:643





# Anslutningar i fyllningsdammar

Utformning, möjliga skador, detektion och åtgärder

JOHAN LAGERLUND & ÅKE NILSSON



## Förord

**Projektet "Anslutningar i fyllningsdammar" har syftat till att öka branschens kunskap om anslutningar för fyllningsdammar. Rapporten beskriver olika typer av anslutningar, möjliga skadeorsaker i dammar och vid anslutningar samt hur dessa kan detekteras och åtgärdas.**

Studien har genomförts av Vattenfall R&D med Johan Lagerlund som projektledare. Rapporten har författats av Johan Lagerlund (Vattenfall R&D) och Åke Nilsson (WSP). Projektet har haft en referensgrupp knuten till sig under arbetets gång bestående av Peter Viklander (Vattenfall), Carl-Oskar Nilsson (Uniper), Karin Persson (Statkraft), Maria Bartsch (Svenska kraftnät), Gunnar Sjödin (Vattenregleringsföretagen) och Helena Björkman (Fortum). Rapporten har slutgranskats av Sven Knutsson (LTU).

Projektet har genomförts inom det dammsäkerhetstekniska utvecklingsprogrammet som drivs av Energiforsk där vattenkraftindustrin och Svenska kraftnät medverkar.

Författarna ansvarar för rapportens innehåll.

## Sammanfattning

**Runt om och inne i en fyllningsdamm finns olika typer av anslutningar. Marken som dammen är byggd på är en och fyllningsdammens anslutning mot utskovspartier en annan. Dåligt packad tätjord, otillräckliga nedströmsfilter, branta släntkoner mot betongkonstruktioner och sponter är exempel på vanliga svagheter vid en fyllningsdamms olika anslutningar. Skadebildning vid anslutningar har i flera fall gemensamma orsaker som t.ex. sättningar, sprickbildning, inre erosion med ökat läckage, sjunkhål och lägre släntstabilitet.**

De anslutningar som finns i en fyllningsdamm är de mellan tätjord och berg/jord, betong och spontkonstruktioner. Även gränzonen mellan de jordlager som skapas i tätjorden vid dess uppbyggnad kan betecknas som en anslutning. Anslutningar kan även skapas mellan tätjord och installerad övervakningsutrustning (t.ex. porttrycksgivare, vattenståndsrör) samt gamla reparationer (ex. injekteringar).

De skador som kan ske invid anslutningarna kan ha olika orsaker. Mellan damm och berg kan orsaken vara dåligt injekterat berg, bristfällig yttätning eller att injekteringen med tiden försämras. Tätjorden riskerar då att utsätts för ökade hydrauliska påfrestningar. Detta kan i förlängningen leda till att den spolats ut genom bergsprickor. Sättningar kan orsaka uppluckring eller valvbildning av tätjorden vid anslutningar mellan damm/betongkonstruktioner och damm/spont då tätjorden "hänger" upp sig mot anslutningen. Denna process kan leda till att tätjordens tätande förmåga minskar med större läckage och erosionskänslighet som följd. Sättningar kan även leda till liknande problem vid delar av dammen som är grundlagda på berg. Orsaken till sättningar kan vara flera som rörelser i damm/undergrund, våtsättningar, dränering av överskottsvatten från tätjord efter konstruktion, bristfällig packning, frys-/tiningscykler och inre erosion.

För övriga anslutningar som mellan övervakningsutrustning/tätjord och gamla reparationer/tätjord drivs skadeutvecklingen av problem med packning samt att det kan bildas små sprickor i gränzonen mellan gamla injekteringar och tätjord. Detta gäller i synnerhet om injekteringen har skilda mekaniska egenskaper från tätjorden kombinerat med att dammen rör sig.

För att kunna bestämma en anslutnings status bör man först känna till vilka erosionsprocesser som kan ske vid anslutningarna. Dessa erosionsprocesser ger i sin tur upphov till fysikaliska fenomen. Övervakningsmetoder bör därefter väljas så att dessa fysikaliska fenomen kan upptäckas. Utifrån resultaten av övervakningsmetoderna kan man därefter bedöma anslutningens status och om en eventuell åtgärd behöver sättas in samt vad denna åtgärd bör innehålla. Val av åtgärd blir platsspecifik och måste anpassas till den aktuella skadebildningen och lokala förutsättningar. Reparationsåtgärder kan bestå av injekteringar, betongmadrasser, slitsmurar, sekantpålar, dräneringar och förstärkningar av dammtån.

## Summary

**Around and inside an embankment dam there are various types of abutments. The abutment between the underground and dam is one and the abutment between the dam and spillway gates is another. Poorly compacted core soil, insufficient downstream filters, steep slopes towards concrete structures and retaining walls are examples of common weaknesses at various abutments in a dam. Damages at abutments have commonly similar origins like settlements, cracking, internal erosion with increased leakages, sinkholes and lower slope stability.**

Abutments in an embankment dam are those between the core soil and its underground, concrete structures and retaining walls. The layering of the core soil, which are created during the dam construction, may also be regarded as an abutment. Abutments may furthermore arise between core soil and surveillance equipment (pore pressure elements, piezometric standpipes) and between the core soil and old remedial work, e.g. grouting.

Damages at the abutments may have several causes. Between the dam and bedrock (underground) the cause might be poorly grouted rock, flawed surface sealing or deteriorated grout. The core soil is then at risk of being subjected to higher hydraulic loads. This may lead to the washing out of fines through the cracks in the bedrock. Settlements may cause loosening or arching of the core soil at the abutments between the dam/concrete structures and dam/retaining walls as the core soil in the dam tends to cling itself to the concrete structure and/or the retaining walls. This process may lead to higher seepage rates through the core soil and a core soil more prone to internal erosion. Settlements may furthermore be the result of movements in the underground, wet settlements, drainage of excessive pore water from the core soil after construction, poor compaction work, freeze and thaw cycles or internal erosion.

For other types of abutments as those between core soil and surveillance equipment or old remedial work the damage process is driven by poor compaction and cracking of core soil between core soil and grout. This may be the case if the grout and the core soil have different mechanical properties in combination with movements of the dam.

To determine the status of an abutment one must first understand what erosive processes that may occur at the abutment. These processes in turn give rise to certain physical phenomena. Surveillance or investigatory measurements should therefore be chosen so these phenomena may be discovered. From the investigatory results the status of the abutment may be valuated and a suitable remedial method chosen. The choice of remedial method should always be site specific and adapted to the actual abutment. Remedial methods may include grouting retaining walls, concrete mattress, slurry trench walls, secant piles drainage and reinforcements of the dam toe.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>8</b>
1.1	Syfte & Mål	8
1.2	Rapportens disposition	9
<b>2</b>	<b>Introduktion</b>	<b>10</b>
2.1	Typer av Anslutningar	12
2.1.1	Tätjord mot berg/jord	12
2.1.2	Tätjord mot betong	14
2.1.3	Tätjord mot spont	16
2.2	Övriga anslutningar	18
	Tätjord mot tätjord	18
	Tätjord mot övervakningsutrustning	19
	Tätjord mot gamla reparationer	20
<b>3</b>	<b>Skadeorsaker i dammar</b>	<b>22</b>
3.1	Inre erosion	22
3.1.1	Koncentrerad läcka	23
3.1.2	Bakåtskridande erosion	23
3.1.3	Kontakterosion	24
3.1.4	Suffusion/suffosion	25
3.2	Övriga fenomen	25
3.2.1	Sättningar	26
3.2.2	Uttorkning	26
3.2.3	Hydraulisk uppspräckning	26
3.2.4	Frysning av jord	27
3.2.5	Valvbildning	27
3.3	Övriga faktorer för utveckling av skador i fyllningsdammar	28
3.3.1	Filtrets betydelse för erosion	28
3.3.2	Packningens betydelse för erosion	28
<b>4</b>	<b>Möjliga skadeorsaker vid anslutningar</b>	<b>30</b>
4.1	Tätjord mot Berg/Jord	30
4.2	Tätjord mot Betong	31
4.3	Tätjord mot spont	33
4.3.1	Frostpåverkan vid sponter	33
4.3.2	Kemiska reaktioner mellan jord och spont	34
4.4	Tätjord mot Tätjord	34
4.5	Tätjord mot övervakningsutrustning	36
4.6	Tätjord mot Gamla Reparationer	37
<b>5</b>	<b>Diagnostisering av anslutningar och möjliga åtgärder</b>	<b>39</b>
5.1.1	Tätjord mot berg/jord	39
5.1.2	Tätjord mot betong	40



5.1.3	Tätjord mot spont	41
5.1.4	Tätjord mot tätjord	41
5.1.5	Tätjord mot övervakningsutrustning	43
5.1.6	Tätjord mot gamla reparationer	43
<b>6</b>	<b>Fortsatta arbeten</b>	<b>45</b>
<b>7</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>46</b>
<b>8</b>	<b>Referenser</b>	<b>47</b>
<b>Bilaga A:</b>	<b>Praktikfall 1</b>	<b>50</b>
<b>Bilaga B:</b>	<b>Praktikfall 2</b>	<b>59</b>
<b>Bilaga C:</b>	<b>Praktikfall 3</b>	<b>65</b>
<b>Bilaga D:</b>	<b>Praktikfall 4</b>	<b>77</b>
<b>Bilaga E:</b>	<b>Praktikfall 5</b>	<b>89</b>

# 1 Inledning

Lös tätjord, otillräckliga nedströmsfilter och branta släntkoner vid anslutningar mot betongkonstruktioner är exempel på vanligt förekommande svagheter i svenska fyllningsdammar. Dessa svagheter kan leda till exempelvis sättningar, sprickbildning, inre erosion, läckage, sjunkhål och låg släntstabilitet. Även anslutningen mellan tätjord och undergrund kan vara ett svagt område, där sättningar och inre erosion kan uppkomma.

Det är angeläget att öka kunskapen om fenomenen och problem kopplade till befintliga fyllningsdammars anslutningar. Detta för att kunna övervaka, tillståndsbedöma och värdera svagheter

## 1.1 SYFTE & MÅL

Syftet med föreliggande rapport är att öka kunskapen kring vilka typer av anslutningar som finns i en fyllningsdamm, vilka skador som kan inträffa vid dessa, hur skadorna kan diagnostiseras samt hur de kan åtgärdas.

För att uppfylla rapportens syfte ska följande beskrivas:

- Olika typer av anslutningar; vertikala, lutande och horisontella ytor mot angränsande konstruktioner och grundläggningen. Även materialkontaktorna tätjord-naturlig jord, tätjord-betong och tätjord-berg samt anslutningar tätjord-övervakningsutrustning och tätjord-gamla reparationer behandlas.
- Potentiella skador som kan uppkomma i anslutningarna, samt fysikalisk beskrivning av de fenomen som orsakar olika problem. Dvs. beskrivning av vad som kan hända vid en anslutning och varför detta sker. Vidare belyses om olika fenomen kan samverka.
- Hur man kan ställa diagnos, vilka mätningar som bör utföras invid en anslutning och förslag på hur anslutningar lämpligen kan övervakas.
- Möjliga åtgärder vid en skadad anslutning.
- Historiska svenska praktikfall från fyllningsdammar med skadade anslutningar; händelseförlopp och observationer, genomförda undersökningar, åtgärder och erfarenheter.

## 1.2 RAPPORTENS DISPOSITION

Rapporten är uppdelad i två delar där del 1 (kap 2 – 7) är författad av Johan Lagerlund. Den andra delen består av fem praktikfall (bilagor). Dessa praktikfall är författade av Åke Nilsson WSP (uppdragsansvarig och handläggare), Johan Holst WSP samt Ingvar Ekström SWECO.

I kapitel 2 görs en introduktion till ämnet och här beskrivs även vilka olika typer av anslutningar som finns vid en fyllningsdamm.

I kapitel 3 beskrivs de skadeorsaker som kan inträffa vid en anslutning.

I kapitel 4 kopplas skadeorsakerna ihop med de beskrivna anslutningarna. Den centrala frågeställningen är; Vilka skador inträffar var?

I kapitel 5 diskuteras hur man lämpligast upptäcker och åtgärdar de skadeprocesser som kan inträffa vid anslutningarna.

I kapitel 6 diskuteras vilket fortsatt arbete som förordas för att förbättra kunskapen kring anslutningar, hur man bäst diagnostiserar deras status samt åtgärdar eventuella fel.

I kapitel 7 presenteras rapportens slutsatser.

I bilagorna redovisas de fem praktikfallen.

## 2 Introduktion

I en fyllningsdamm finns olika typer av anslutningar, både mot dammens omgivning samt inne i den. Vid dessa anslutningar inträffar oftare olika typer av skador jämfört med andra delar av fyllningsdammen. Med skador menas att tätjorden på ett eller annat sätt påverkas så att dess förmåga att agera vattentätande minskar. Ett samlingsbegrepp på dessa skador är inre erosion. Dåligt packad tätjord, otillräckliga nedströmsfilter, branta släntkoner mot betongkonstruktioner och inbyggd spont är exempel på vanliga svagheter vid en fyllningsdamms olika anslutningar.

En studie från 2010 (Rice et al 2010) visade att fyllningsdammar nästan uteslutande drabbas av ökade läckage vid anslutningar och genom inbyggda defekter med tiden. Internationell statistik presenterad i ICOLD 2013 visar att 1 av 80 fyllningsdammar någon gång under sin livstid havererar eller utsätts för olyckor. Med olyckor avses en incident som utan att en åtgärd satts in skulle leda till ett haveri. Det ska tilläggas att det är vanligare med olyckor än haverier. Erosion (både inre- och yterosion) har historiskt sett legat bakom 94 % av haverier i stora dammar (högre än 15 m) byggda mellan 1800 – 1986, Tabell 1. Ur denna tabell utläses även att inre erosion ligger bakom nästan hälften av alla dammhaverier.

**Tabell 1. Statistik över dammhaverier i fyllningsdammar (ICOLD 2013)**

Brottmekanism Orsak till brott	Erosion		Släntstabilitet		
	Övertströmning	Inre erosion	Statisk instabilitet	Seismisk instabilitet	
% i världen	48 %	46 %	4 %	2 %	
Summa % i världen	94 %		6 %		

En vidare genomgång av statistiken kring dammhaverier och olyckor visas i Tabell 2 där fokus ligger på inre erosion. Vidare preciseras var i dammen inre erosionen inträffat genom att separera inre erosion i dammkropp med inre erosion vid dammens anslutningar. Nästan vart tredje haveri och olycka genom inre erosion inträffar i samband med den första fyllningen. Olyckor är vanligare än haverier och i händelse av ett haveri är det nästan lika vanligt att orsaken är inre erosion vid en anslutning som genom dammkroppen.

**Tabell 2. Orsak till haveri och olycka på grund av inre erosion i fyllningsdammar med krönhöjd >15 m. Total mängd dammar i undersökningen var 11 192 st (ICOLD 2013).**

Händelse	Totalt	I dammen	Vid anslutningar
Haverier inre erosion	36 st	19 st	17 st
Olyckor inre erosion	75 st	52 st	23 st
Olyckor vid genomläckning utan synbar erosion	36 st	30 st	6 st
Summa antal haverier/olyckor	147 st	101 st	46 st
Frekvens för haveri/olycka	1,3 %	0,9 %	0,82 %
Haveri/olycka vid första fyllning	36 %		
Haveri/olycka efter första fyllningen	64 %		

Några exempel på fyllningsdammar som havererat på grund av erosion vid anslutningar följer. Information är inhämtad från ICOLD 2018 om inget annat anges:

1. Teton Dam USA – Havererade år 1976 och var en zonerad fyllningsdamm med krönhöjd om ca 124 m. Vid första uppfyllningen byggdes höga porttryck upp vid den högra anslutningen via sprickor i berget. Detta orsakade inre erosion då även den angränsande tätjorden var upphängd mot anslutningen. Dessa faktorer orsakade inre erosion (piping) vid anslutningen vilket ledde till dammens haveri. Faktorer som indirekt orsakade haveriet var bristfällig tätning av sprickor samt underdimensionerat tätdike (cut-off trench) under dammen.
2. Zoeknog Dam Sydafrika – Havererade år 1993 och var en zonerad fyllningsdamm med krönhöjd om ca 40 m. Höga porttryck uppstod vid första fyllningen på nedströms sida (lika höga porttryck uppströms som nedströms) och piping utvecklades längs med en utskovskulvert som löpte rakt igenom dammens mitt, Figur 1. Faktorer som indirekt orsakade haveriet var att dammen byggdes med dispersiv jord och packades vid en för låg vattenkvot. En dispersiv jord är en typ av jord som bryts ner i mindre partiklar vid kontakt med vatten. Detta gör dispersiva jordar synnerligen erosionsbenägna.



Figur 1. Dammhaveri orsakat av kontaktersion mellan damm och anslutning (utskovskulvert).

Det bör poängteras att statistik presenterad i Tabell 2 baseras på haverier och olyckor. Andra typer av förändringar som inträffat i svenska fyllningsdammar presenteras i Tabell 3. Nilsson (1993) genomförde en undersökning om vilka typer av förändringar som upptäckts. Förändringarna delades in i 13 olika typer och sammanlagt registrerades 171 st händelser på totalt 84 st dammar.

**Tabell 3. Förändringar i 84 svenska fyllningsdammar. Om samma typ av förändring inträffat på flera ställen i samma damm har denna typ av förändring endast räknats en gång i presenterad statistik (Nilsson 1993).**

Typ av förändring	Antal	% av total mängd
Läckage i grund	16	9 %
Läckage i dammkroppen	19	12 %
Skador i släntskydd	45	26 %
Onormala rörelser (sättningar eller sidorörelser)	16	9 %
Inre erosion i grunden	5	3 %
Inre erosion i dammkroppen	13	8 %
Utglidningar (uppströms eller nedströms)	5	3 %
Förändringar vid anslutning mellan fyllningsdamm och betongkonstruktion	16	9 %
Förändringar i dränagesystem eller filter	1	0,5 %
Porttrycksförändringar	4	2 %
Förändringar i injekteringskärn	1	0,5 %
Insjunkningar i dammkrön eller slänter	27	16 %
Annan förändring	3	2 %

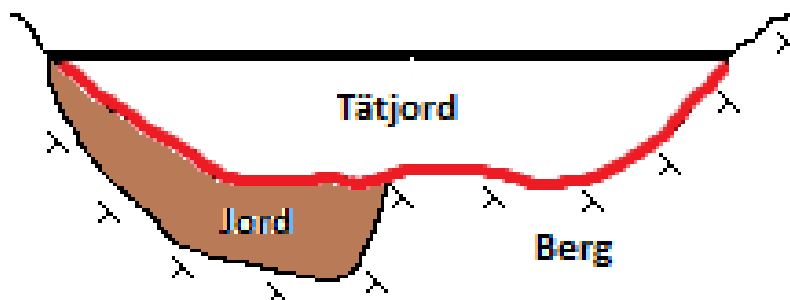
Tabell 3 indikerar att förändringar sker i fyllningsdammar och i regel flera olika förändringar på samma damm. Om en förändring får pågå under en längre tid riskerar denna att leda till en olycka eller ett haveri. Det ska dock poängteras att långt ifrån alla förändringar leder till olyckor eller haverier. Varje händelse måste bedömas och utvärderas individuellt. Det vanligaste sättet att upptäcka skador på är genom direkta observationer (sjunkgropar o dyl).

## 2.1 TYPER AV ANSLUTNINGAR

I detta avsnitt görs en beskrivning av olika typer av anslutningar som kan påträffas i en fyllningsdamm samt hur de utformas.

### 2.1.1 Tätjord mot berg/jord

Området mellan dammens tätjord och berg/jord, Figur 2, utgör normalt sett dammens största anslutning. Enligt RIDAS 2012 beskrivs tillämpningsvägledningarna för detta i avsnitt 7.2.3.1.2 (grundläggning på jord) och avsnitt 7.2.3.1.3 (grundläggning på berg).

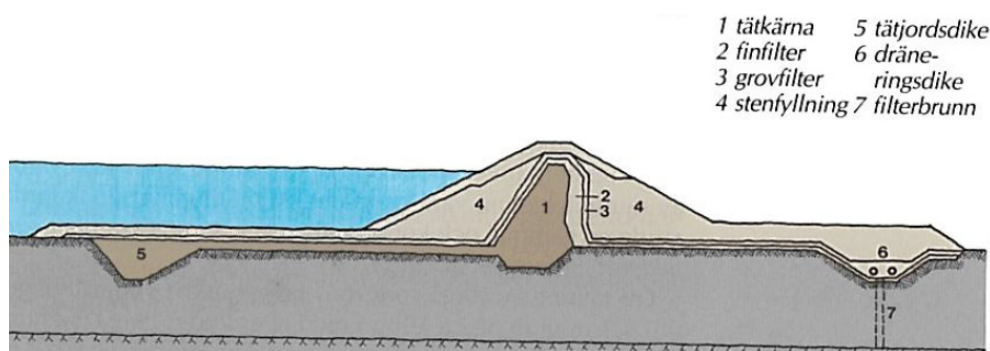


**Figur 2. Anslutning mellan tätjord och berg/jord markerat i rött. Anslutning tätjord/jord till vänster. Anslutning tätjord/berg till höger**

Grundläggning av fyllningsdamm på jord sker om dess tjocklek är större än 2 – 3 m. Understiger jorden denna tjocklek schaktas den bort ner till bergytan (Vattenfall 1988). Om grundläggningen ändå sker på jord gäller det att verifiera att undergrunden har motsvarande täthet som dammens tätjord. Grundläggningen kan då utföras så att markytan avjämnas före utläggningen av det första lagret av tätjord. Därefter packas marken på samma sätt som tätjorden i övrigt. Är jorden mer genomsläpplig än dammens tätjord måste detta åtgärdas. Exempel på åtgärder kan vara:

- Tätmatta av morän (panur) uppströms tatkärnan för att förlänga läckvägen och härigenom minska gradienten i undergrunden.
- Tätskärm i form av tätdike, slitsmur eller injekteringsskärm för att minska undergrundens genomsläpplighet.
- Dränageanordningar i form av filterlager, dränagediken och/eller brunnar. Anordning av dränage kan kombineras med täckning av material med högt erosionsmotstånd för att förhindra erosion i utströmningsområden.

Filterbrunnar och filterdiken installeras vanligen på nedströmssidan. Lös sand och lera bör i största mån undvikas då dessa är erosionskänsliga. De provgropar som utförts vid undersökning av grundläggningsjordens beskaffenhet måste fyllas igen och packas innan konstruktionen av fyllningsdammen påbörjas.



Figur 3. Exempel på damm grundlagd på otät undergrund av jord (Vattenfall 1988). Idag byggss denna typ av damm med ovanpåliggande filter som skydd mot erosion i tätmattn/panuren.

Vid grundläggning av damm på berg behöver berget karaktäriseras och i synnerhet måste sprickor, svaghetszoner och slag bli kända. Sprickor måste tätas vilket lämpligast görs med injektering. Har berget sprickor fyllda med jordmaterial, exempelvis lera, måste dessa sprickor rensas så att de kan tätas. Rensning av berget bör i största mån ske utan sprängning eftersom detta kan orsaka ytterligare sprickbildning.

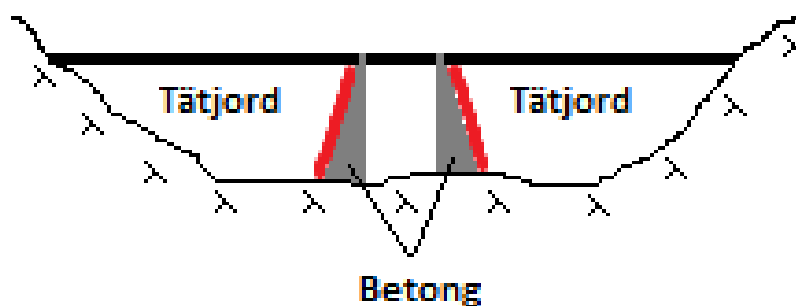
Är berget kraftigt uppsprucket rekommenderar RIDAS 2012 att en betongplatta gjuts varigenom injektering kan utföras. Vattenförlustmätning genomförs därefter för att verifiera att injekteringsarbetet utförts tillfredsställande. Vid anslutning av tätjorden mot berg får maximal stenstorlek i tätjorden inte överstiga 30 mm inom ett område av 200 mm från bergytan.

Bergytan vid dammens sidor bör ej ha en lutning brantare än 1V:1H. Om vertikala avsatser inte går att undvika bör dessa ha en maximal höjd om 0,5 m. Gropar och skrevor fylls med betong och denna betongs överyta ska ges en orientering liknande den omgivande bergytan.

Tjocklek på de första lagren tätjord bör ej överstiga 100 mm och packningen bör genomföras med handvibratörer. Packning med tung vält kan göras först när lagren av tätjord är tjockare än 200 mm. Vattenkvoten i tätjorden ska vara något över den optimala för att minska sättningar vid första fyllningen och luftporhalten bör inte överstiga 10 %.

### 2.1.2 Tätjord mot betong

Anslutningsytor mellan betongkonstruktioner och tätjord, Figur 4, finns i synnerhet vid intags- och utskovspartierna.



Figur 4. Anslutning mellan tätjord och betong (utskovsparti) markerat i rött

Enligt RIDAS 2012, avsnitt 7.2.3.1.4 bör dessa områden utformas enligt nedanstående:

- Anslutande betongkonstruktion ges en lutning av ca 8V:1H (Figur 5) och den traditionellt använda sponten från betongkonstruktionen in i tätkärnan utesluts eller begränsas i längd till ca två plankor. (Begränsningen av sponten avser att tillåta användandet av tung vält nära betongkonstruktionen och begränsa upphängningen mot sponten).





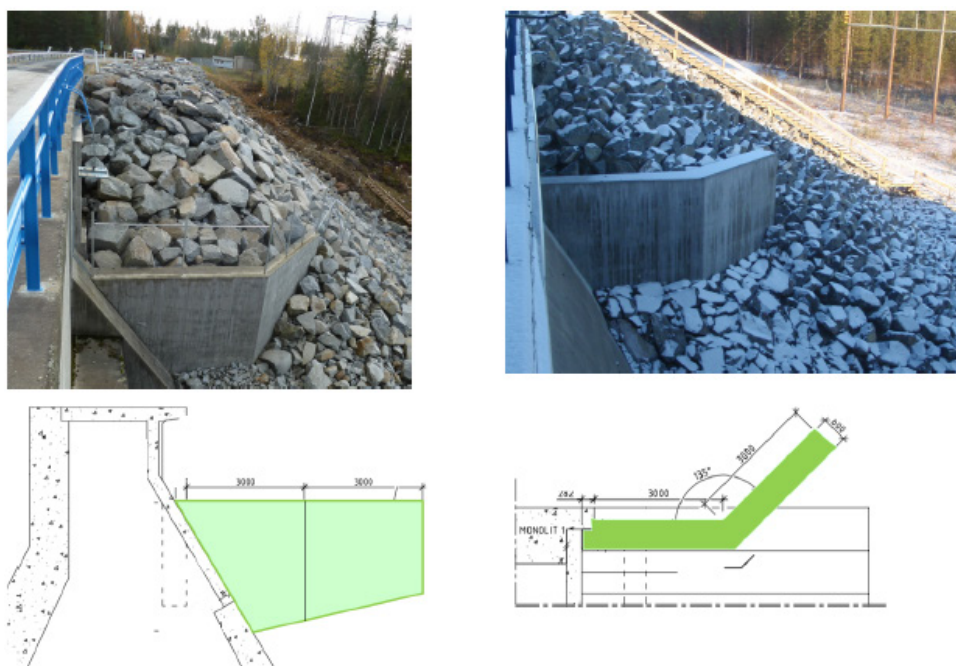
Figur 5. Anslutning enligt dagens krav. Foto: Csaba Prokec.

- Asfaltstrykning av betongytan och eventuell spont (för att minimera friktion och upphängning).
- I området närmast betongkonstruktionen utökas tätjordens och nedströmsfiltrets bredd på bekostnad av stödfyllningens bredd (minskar valvbildning och ökar möjligheten till självläkning om läckage trots allt uppstår).
- Tätjordens vattenkvot ska vid packningen vara högre än den optimala (för att vara plastisk och minska sättningarna vid vattendränkning).

Vid utläggning får tätjorden inte ha en stenstorlek som överstiger 30 mm vid anslutningar.

Tidigare anvisningar för anslutningars utformning enligt Vattenfall 1988 stipulerade lutningar på 10V:1H till 20V:1H med spont vars längd begränsades till tre – fem plankor om anslutningen var vertikal. Både betonganslutningsväggarna samt spont skulle bestrykas med asfalt för att försegla tätjordens kontaktyta och för att motverka upphängning av tätjorden vid sättningar. Filter nedströms anslutningen skulle vidare få en ökad tjocklek.

Vingmurar är en betongkonstruktion, vanligtvis i dammens övre del som byggs för att möjliggöra brantare släntkoner vid anslutningen. Vingmurarnas djup kan ibland gå under dämmningsgränsen (Ekström et al 2016).

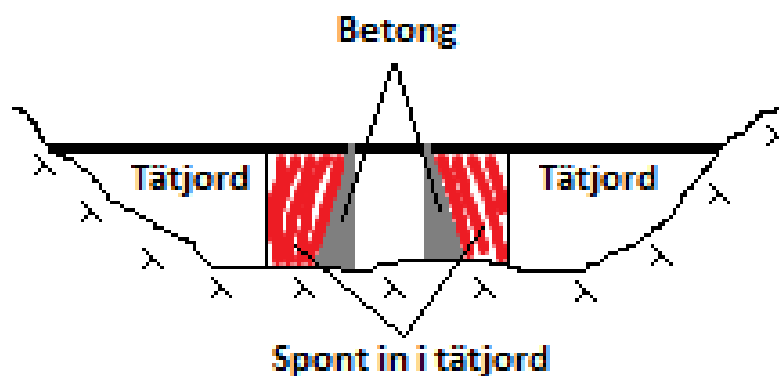


Figur 6. Vingmur utförd för att kunna utföra breddning av stödbanken vid krönnivå (Ekström et al 2016).

Kompaktering av tätjord invid dessa trängre områden bör utföras med tätjord vars vattenkvot är över den optimala. Anledningen till detta är att sättningarna minskar vid uppfyllning av vatten samt att en "våtare" tätjord blir mer plastisk. En plastisk jord fyller enklare ut ojämnheter, hålrum, etc. än en tätjord vid optimal vattenkvot. Dock får vattenkvoten inte vara för hög eftersom det innebär svårigheter att packa jorden.

### 2.1.3 Tätjord mot spont

Spont kan användas i en fyllningsdamms anslutning för att förlänga vattnets läckväg genom tätjorden. Sponten löper vanligtvis från anslutningen in i tätjorden, parallellt med dammens längdriktning, Figur 7.



Figur 7. Anslutning mellan tätjord och spont. I figuren ritas spont in som ett komplement till anslutande betong men spont kan även installeras ensamt som ett tätande skikt.

Tillverkningsmaterial kan vara stål, trä, PVC, etc. Sponter kan även användas som ett komplement till tätskiktet och löper då genom hela dammens längd (Nilsson 2016).

Spont av trä behöver alltid vara under vatten så att de inte förmultnar. Sker detta minskar deras förmåga att hålla vatten eftersom de kan lösas upp. Håligheter kan då uppstå inne i dammen. Spont av PVC bör inte utsättas för UV ljus då det förkortar dess livslängd.

Spont vid anslutningar har som huvudsyfte att förlänga vattnets läckageväg. Den gjuts vanligtvis delvis in i anslutande betong och dras därefter in i tätjorden, Figur 8. Utformning och längd bestäms av dammens design. Spont kan löpa in i tätkärnan rakt men även vara vinklad. Denna form avgörs av platsstillgång. Packning av tätjord runt sponter genomförs oftast med handdrivna verktyg i stället för med större maskiner på grund av platsbrist.



**Figur 8.** Bilder från utgrävning av Lövödammen. I bildens övre vänstra hörn syns en spontkonstruktion som löpt in i tätjorden (Foto av Carl-Oscar Nilsson)

Spont kan även användas för att öka en fyllningsdamms krönhöjd vilket visas i Figur 9. Spont i denna figur är tillverkad av PVC. Notera den handdrivna vibroplattan som står placerad direkt till höger om sponten.



Figur 9. PVC-spont för höjning av tåtkärnan (Nilsson 2016).

## 2.2 ÖVRIGA ANSLUTNINGAR

Övriga anslutningar i en fyllningsdamm kan uppstå i tätjordens lagerlagerföljd, där tätjorden står i direkt kontakt med inbyggd övervakningsutrustning eller vid gamla reparationer.

### 2.2.1 Tätjord mot tätjord

Uppbyggnaden av en fyllningsdamm sker i lager vilket kan orsaka horisontella skiktningar rakt genom dammens tätjord, Figur 11.



Figur 10. Anslutningar mellan tätjordens lager.

När en fyllningsdamm byggs läggs tätjord ut och kompakteras i lager. Processen upprepas till dammens slutliga höjd är uppnådd. Innan nytt lager läggs ovanpå det tidigare ska den redan utlagda tätjordens översta skikt rivas upp. Detta görs för att få en så homogen tätjord som möjligt utan skiktningar. Utbredning och packning av tätjorden ska utföras i dammens längdriktning.

Enligt RIDAS 2012 ska särskild försiktighet vidtas för att undvika stenseparation vid utläggningen. När tätjorden läggs ut kan stenseparation inträffa så att grövre stenar lägger sig som en sträng längs med foten på varje pall. Stenar som separerar på detta sätt ska antingen läggas uppe på den packade tätjorden eller på

intelligande grovfilter. Åtgärdas inte detta så kan zoner med högre hydraulisk konduktivitet byggas in i tätjorden. Tätjorden får då olika hydraulisk konduktivitet i vertikal och horisontell riktning. Denna skillnad i hydraulisk konduktivitet kan uppgå till 100 – 1000 gånger högre i horisontalled än vertikalled efter packning. Utfallet av detta kan bli oväntade porvattentrycksfördelningar i tätjorden. Vid beräkningar av fyllningsdammars porvattenfördelning använder man sig alltid av den hydrauliska konduktiviteten i vertikalled då det är denna man som regel får fram via provning i laboratorium. Risken finns då att man missbedömer porvattnets genomströmningshastighet och tryckfördelning i tätjorden.



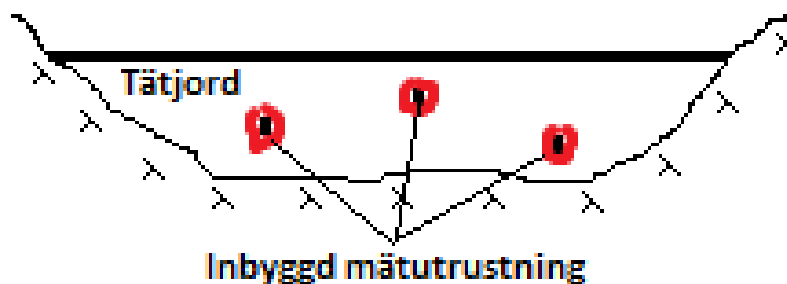
Figur 11. Exempel på lageruppbyggnad i tätjorden. Anslutningarna, pallgränserna, markerade i figur med röda pilar (Lagerlund 2018).

Om arbetet med utläggning av tätkärnan stått stilla vid soligt och torrt väder bör en försiktig vattning av tätjorden ske innan utläggning av nästa lager. Har arbetet stått still under blött väder kan de krävas att det översta materialet skiftas ut helt och ersätts med ny tätjord. Olika väderförhållanden och eventuellt byte av täckt under byggtiden kan vidare orsaka att den utlagda tätjorden får skikt med olika egenskaper

I de fall en fyllningsdamm byggts över en längre tid än ett år måste dammbygget avbrytas för vintern. Detta uppehåll är nödvändigt eftersom det inte är lämpligt att packa tätjord vid frysgrader. Om så blir fallet bör tätjorden isoleras under hela vintern. Efter vinteruppehållet bör de övre delarna av den tätjord som påverkats av frost/tö åtgärdas (skiftas ur) så att zoner med dålig packning ej byggs in i dammen.

### 2.2.2 Tätjord mot övervakningsutrustning

I dammar byggs det in olika typer av övervakningsutrustning för att möjliggöra övervakning av dammens status, Figur 12. Övervakningsutrustning kan antingen byggas in då dammen byggs eller installeras i efterhand. Mellan denna mätutrustning och tätjord uppstår det anslutningar.



Figur 12. Anslutning mellan övervakningsutrustning och tätjord markerat i rött.

Förslag till övervakningsutrustning (enligt Vattenfall 1988) begränsas till tre olika typer av långsiktiga kontrollmätningar:

1. Läckvattenmätningar och terrängobservationer
2. Mätningar av grundvatten- och ytvattennivåer samt portryck
3. Sättnings- och andra deformationsändringar.

År 2012 presenterades nya rekommendationer kring basinstrumentering i en fyllningsdamm enligt RIDAS 2012;

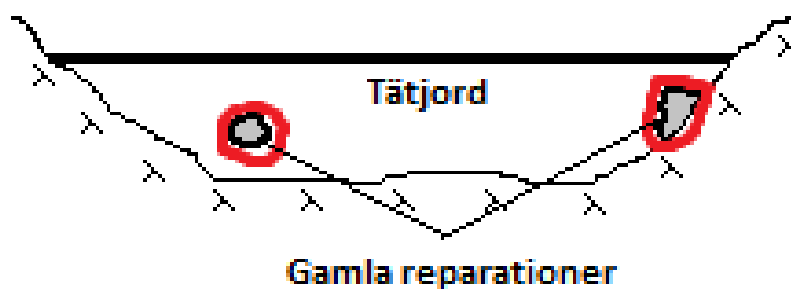
- Läckage (mätöverfall)
- Sättnings- och sidorörelse av krön (mätbrunnar i dammkrön)
- Portryck i tätjord
- Vattenståndsrör i nedströms filter eller i stödfyllning
- Vattenstånd/portryck i undergrund

I RIDAS 2012, avsnitt 7.2.4.1 står det att instrumentering behöver anpassas till aktuella förutsättningar och kommer därför alltid att vara unik för aktuell damm. Detta innebär att platsspecifik instrumentering alltid bör ha företräde över basinstrumentering.

All instrumentering i tätjorden (portryck i tätkärna) bör ha installerats i samband med dammens konstruktion. Placering av dessa portrycksgivare kan då ha försämrat möjligheten att korrekt packa omkringliggande tätjord. Installation av portrycksgivare bör ej ske i efterhand då detta innebär borrhning i tätkärnan såvida det inte bedöms som absolut nödvändigt (RIDAS 2012).

### 2.2.3 Tätjord mot gamla reparationer

Anslutningar mellan tätjord och gamla reparationer kan exempelvis uppstå invid reparationsinjekteringar och tätjord, Figur 13.



Figur 13. Anslutning mellan reparationer (injektering) och tätjord.

Problematiken som kan uppstå vid dessa anslutningar är snarlik den problematik som uppstår mellan tätjord och inbyggd övervakningsutrustning. Anslutningarnas utseende styrs av vilken reparationsmetod som använts. Det finns olika reparationsåtgärder att välja i en skadad fyllningsdamm och enligt Lagerlund 2009 är dessa följande;

- Permeationsinjektering – Utförs i områden med låg hydraulisk konduktivitet. Bruket är tunt och ska tränga in i jordens porstruktur utan att spräcka upp tätjorden.
- Uppspräckningsinjektering – Metoden innebär att jorden avsiktligt spräcks. De av injekteringsbruket skapade sprickorna är tänkta att fungera likt stålspontrar invid anslutningar nämligen att förlänga läckvägarna.
- Kompaktinjektering – Innebär att hålrum fylls ut med ett grovkornigt bruk. Den omgivande jorden kompakteras under injekteringsförloppet.
- Jordinjektering – Metoden påminner om uppspräckningsinjektering men genomförs inte med ett cementbaserat bruk utan med framförallt leror där en liten mängd cement tillsätts.
- Injektering med inert material – Vanligtvis används krossad kalksten som är inert. Inert innebär att det injekterade bruket inte genomgår någon form av kemisk process så som härdning eller svällning.
- Jetinjektering – Metoden innebär att en kolumn skapas nerifrån och upp genom att man under högt tryck och rotation blandar in ett cementbruk i tätjorden.
- Slitsmur – metoden innebär att man installerar en slitsmur genom dammens tätkärna. Denna metod kan vara lämplig om skadorna på dammen är mycket omfattande. Metoden kan även gå under namnet slurry trench wall.

I Sverige har framförallt permeationsinjektering och i viss mån uppspräckningsinjektering utförts vid reparationer i skadade fyllningsdammar (Ekström et al 2016).

Gemensamt för listade metoder är att de kan skapa zoner i fyllningsdammar med skilda mekaniska och kemiska egenskaper än den ursprungliga tätjorden. Dessa skillnader i egenskaper kan kunna ligga bakom framtida följdproblem som sättningar, koncentrerade läckor och maskering av underliggande, pågående erosionsprocesser.

### 3 Skadeorsaker i dammar

Av särskilt intresse för de skadeprocesser som kan ske inne vid en fyllningsdamms anslutningar är inre erosion. Inre erosion betyder att ett genomströmmande vatten eroderar ur ett jordmaterial från den jordkropp vattnet passerar.

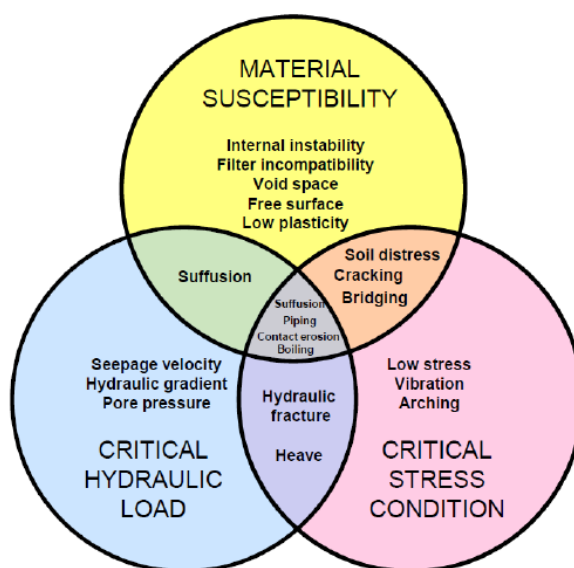
#### 3.1 INRE EROSION

Inre erosionen kan ha flera orsaker och ibland kan den pågå under flera år utan att den upptäcks. Processen kan genomgå fyra steg (ICOLD 2013):

1. Initiering – Något hända som gör att material börjar att erodera, koncentrerad läcka, bakåtskridande erosion, kontakterrosion eller suffusion/suffosion.
2. Fortsättning – Efter initieringen tillåts inre erosion att fortsätta, filtret fungerar dåligt, hydraulisk last är för hög
3. Vidareutveckling – Inre erosionen tillåts fortsätta ytterligare, en pipe kan skapas, finmaterial spolat ur, sjunkhål skapas.
4. Haveri – Inre erosionen har fått pågå så pass länge att dammens struktur ej kan upprätthållas.

Orsaken till inre erosion kan rent fysikaliskt beskrivas utifrån tre huvudsakliga faktorer, Figur 14.

1. Jordmaterialens uppbyggnad (gul cirkel) – kornfördelning av jorden, filterkriterier ej uppfyllda, låg plasticitet.
2. Hydraulisk last (blå cirkel) – vattengenomströmningshastighet, hydrauliska gradienter, porvattentryck.
3. Belastning av jorden (rosa cirkel) – Låga spänningar, dålig kompaktering, valvbildning.



Figur 14. Samband mellan tre olika faktorer för att inre erosion ska ske (ICOLD 2013).



Utifrån Figur 14 kan man utläsa hur olika kombinationer av de tre huvudfaktorerna kan orsaka olika inre erosionsförlopp i en fyllningsdamm. Dessa olika förlopp presenteras i detta avsnitt. Det finns fyra stycken olika mekanismer för initiering av inre erosion (ICOLD 2013);

1. Koncentrerad läcka
2. Bakåtskridande erosion
3. Kontakterosion
4. Suffusion/suffosion

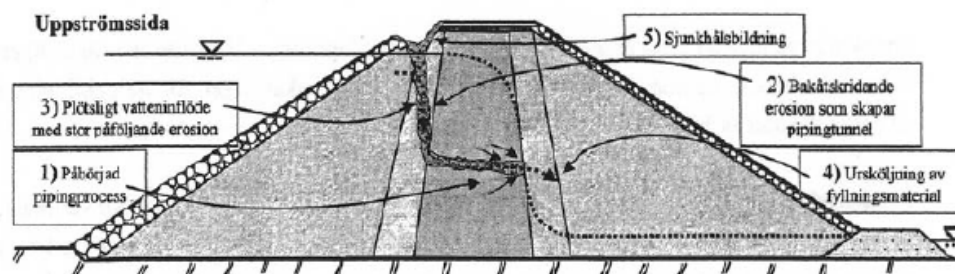
### 3.1.1 Koncentrerad läcka

För att en koncentrerad läcka ska initieras krävs att tätjorden har spruckit upp. Genom denna spricka kan därefter vatten passera. För att den koncentrerade läckan ska erodera dammen krävs vidare att filterzonen nedströms läckvägen inte förmår att stoppa den eventuella materialtransporten i sprickan. Kunskapen om varför sprickor uppstår har historiskt sett varit dålig eftersom sprickor oftast lagats när de upptäckts utan att utreda varför sprickan uppkommit (Sherard et al 1965). Sherard skriver vidare i Sherard (1986) att uppspräckning kan inträffa på grund av borrningsarbeten, differentialsättningar och valvbildningar och att dessa sprickor inte alltid behöver vara farliga.

Initieringen av en koncentrerad läcka sker vanligtvis i en uppsprucken tätjord. För att en koncentrerad läcka ska initieras krävs det att jordmaterialets skjuvhållfasthet överskrids (Fell et al 2007). Sprickor i en dammkonstruktion utvecklas med större sannolikhet nära ytan och anslutningar än inne i dammen (Terzaghi et al 1996).

### 3.1.2 Bakåtskridande erosion

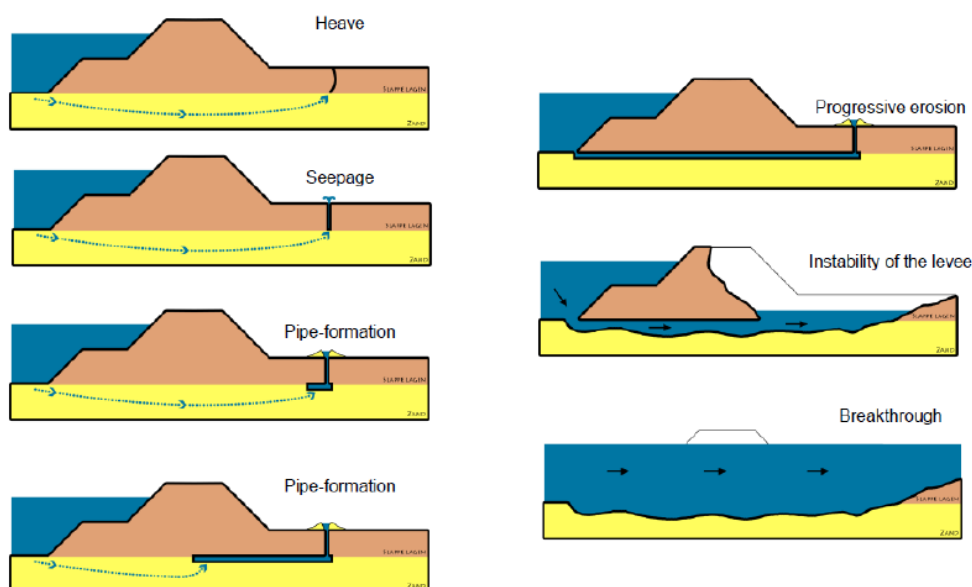
När bakåtskridande erosion sker skapas en kanal inne i jorden liknande ett rör. Av denna anledning är den engelska termen piping. För att bakåtskridande erosion ska inträffa måste den jord i vilken erosionen sker klara av att hålla uppe omkringliggande jord utan att rasa in. Processen visas i Figur 15.



Figur 15. Utveckling av bakåtskridande erosion genom en fyllningsdamm (Rönqvist 2002)

Processen kräver en öppning genom filtret på nedströmssidan och erosionen fortskrider bakåt i fyllningsdammen mot uppströmssidan. Om den bakåtskridande erosionen får fortgå kan den gå genom tätkärnan och orsaka sjunkhål på dammkrönet.

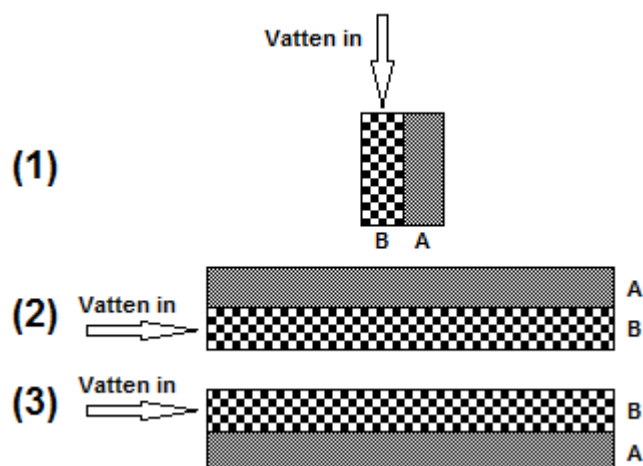
Bakåtskridande erosion kan även inträffa genom dammens grundläggning (Koenders et al 1992). Processen visas i Figur 16. Långt gången bakåtskridande erosion kan leda till att hela dammkonstruktioner havererar.



Figur 16. Utveckling av bakåtskridande erosion under en damm (Sellmeijer et al 2012).

### 3.1.3 Kontakterrosion

Kontakterrosion kan inträffa mellan två zoner med skilda hydrauliska egenskaper. I en fyllningsdam är dessa två zoner vanligtvis filter/dräneringslager och tätjorden. Ett högre flöde kan då uppstå i filter/dräneringslagret varpå den närliggande tätjorden löper risk att eroderas. Vid kontakterrosion är vattenriktningen parallell med ytorna, Figur 17.



Figur 17. Kontakterrosion mellan tätjord (A) och filter (B). Vattengenomströmning sker genom filtret varpå den närliggande tätjorden riskerar att eroderas. Kontakterrosion kan uppstå både i vertikala kontaktzoner (1) som horisontella (2 och 3).

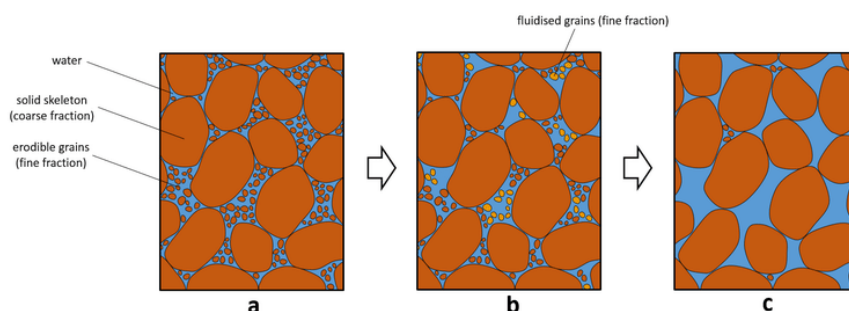
Vid kontaktersosion är vattenhastigheten avgörande då högre flöden ökar risken för kontaktersosion. Kornstorleken på den zon med högre hydraulisk konduktivitet spelar även in på om kontaktersosion initieras eller ej. (Beguin et al 2013). Försök utförda av Pattanaik (2018) indikerade att kontaktersosion ej inträffade om Terzaghis filterkriterier om  $D_{15F}/d_{15b} < 40$  (Terzaghi et al 1996) uppfylldes.

En ytterligare skademekanism på grund av kontaktersosion kan bli hydraulisk uppspräckning. Detta kan orsakas om utloppet för det vatten som enligt Figur 17 passerar filterlagret (lager B) sätts igen. Då kan odränerade förhållanden uppstå med ökade porvattentryck som följd vilket kan spräcka tätjorden (lager A).

### 3.1.4 Suffusion/suffosion

Suffusion/suffosion kan inträffa då vatten passerar en homogen men inre instabil tätjord. Skillnad mellan suffusion och suffosion är att när erosion sker förblir jordens volym oförändrad vid suffusion men minskar vid suffosion (Fannin et al 2014).

I en suffusiv jord saknas en eller flera fraktionsstorlekar. Detta brukar betecknas som att jorden är språnggraderad. Suffusion/suffosion initieras då den hydrauliska gradienten genom materialet ökar (Garner et al 2010). Processen visas i Figur 18.



Figur 18. De mindre kornstorlekarna eroderas ut ur det ursprungliga jordskelettet (a - c). Mellanstore fraktioner saknas i jorden (Yerro et al. 2017).

I en stabil jord sprids vertikalspänningen genom samtliga korn. I den suffusions-/suffosionsbenägna jorden görs inte detta utan endast genom de större kornen. På så sätt kan de finare kornen bli obelastade. Detta innebär att de finare kornen i den suffusions-/suffosionsbenägna jorden löper ökad risk att eroderas vid en hydraulisk last. Eroderas de finare kornen ökar jordens hydrauliska konduktivitet. Resultat av detta kan bli att jorden utsätts för både högre porvattentryck och/eller högre flöden.

## 3.2 ÖVRIGA FENOMEN

Övriga fenomen som kan orsaka skador i en fyllningsdamm presenteras i det här avsnittet. Flera av de här fenomenen kan även leda till att ett inre erosionsförlopp initieras.

### 3.2.1 Sättningar

Sättningar i en damm kan ske av olika anledningar. Ekström et al (2001) nämner sättningar orsakade av bland annat tätjordens dränering efter konstruktion. Detta kan inträffa om vattenkvoten i tätjorden under dess utplacering/packning valts högre än den optimala. Vid anslutningar används vanligtvis något torrare tätjord då dessa torrare jordar vanligtvis packas med lätt utrustning som vibrationsplattor. Vattendränkningssättningar kan då inträffa vid anslutningen i samband med dammens första fyllning.

Om en damm är grundlagd på berg eller jord kan undergrunden sätta sig på grund av dammkonstruktionens egentyngd. Sättningar kan vidare ske om nya laster läggs på en befintlig damm, vid förstärknings- eller höjningsåtgärder.

Om dessa sättningar sker olika (differentialsättningar) riskerar tätjorden att spricka. Även sidostöden till en damm kan vara eftergivliga vilket kan ge sprickor på grund av att jorden vill röra sig horisontellt ut mot det eftergivliga området.

Sättningar kan även inträffa då porvattentrycket i en tätjord sjunker. Sjunker portrycket ökar effektivspänningarna. All last tas då i stället upp av jordskelettet med åtföljande sannolik kompression (konsolidering).

Sker sättningar vid en anslutning kan friktionen som uppstår mellan anslutningen och tätjorden göra att tätjorden spricker. Detta gäller i synnerhet vid anslutningar, ytor där friktionen vanligtvis är hög. Det uppstår därmed skjuvspänningar i tätjorden med resultatet att den spricker/luckras upp. Detta fenomen kallas för upphängning.

### 3.2.2 Uttorkning

Om en tätjord torkar så kan det uppstå sprickor om vattenkvoten understiger tätjordens plasticitetsgräns. Ju lägre finjordshalten är i tätjorden desto mindre blir risken för att den ska spricka på grund av uttorkning.

Då en tätjord torkar töms dess porsystem på vatten och ersätts med luft. När denna uttorkade jord återigen utsätts för vatten kommer vattnet att åter fylla upp jordens porsystem genom kapillära sugkrafter. Då kan den i jorden instängda luften komprimeras så att det skapas ett utåtriktat tryck i jordkroppen. Detta kan resultera i att jorden löses upp (Cernica 1995).

### 3.2.3 Hydraulisk uppspräckning

Hydraulisk uppspräckning kan uppstå om porvattentrycket i en jord överstiger dess överlagringstryck. Höga porvattentryck kan fortplantas in i en damm via sprickor i berggrunden, sprickor i dammkroppen eller via zoner med hög hydraulisk konduktivitet. Vatten som passerar genom dessa sprickor/zoner kan stå i direkt hydraulisk kontakt med dammens uppströmsyta vilket kan resultera i höga porvattentryck inne i tätjorden. Är porvattentrycken större än överlagringstrycket kan vattnet lyfta ovanliggande jord och bilda sprickor. Jord under dränerade förhållanden riskerar sällan att spricka upp (Mitchell et al 2005).

### 3.2.4 Frysning av jord

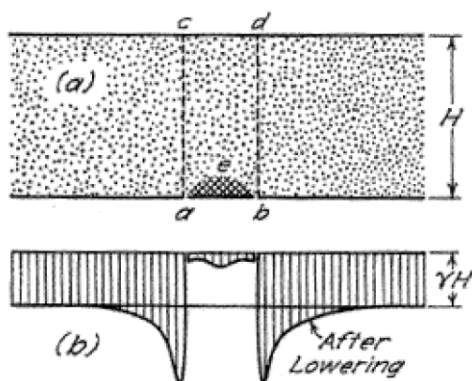
Då vatten fryser i jord ökar porvolymen. Detta orsakar ett undertryck i jorden som får det ofrusna vattnet att röra sig mot det frusna området. Det ofrusna vatten som sugas in mot frostzonen fryser i sin tur varför islinser kan bildas med eventuell tjällyftning som följd. Området utanför frostzonen kan då dräneras om inget nytt vatten tillkommer utifrån. Detta innebär att den jord som dräneras får ökade effektivspänningar med sättningar som möjlig följd. Efter frysning följer en töcykel. När denna inträffar kan ökade portryck uppstå eftersom mer vatten än normalt har bundits i tätjorden. Ökade portryck bidrar till minskade effektivspänningar vilket sänker tätjordens hållfasthet.

Jordens förmåga att suga vatten pga. töcykler minskar med antal cykler. Frysningens expansion av jorden gör den mindre benägen att hålla vatten eftersom dess porositet ökar. Grovkorniga jordar påverkas mindre av töcykler än finkorniga. En stödfyllning i en fyllningsdamm påverkas därför i mindre omfattning än tätjorden om de utsätts för töcykler. Finns det inget fritt vatten tillgängligt påverkas tätjorden i fyllningsdammen minimalt av frysning/tining.

### 3.2.5 Valvbildning

Valvbildning kan ske när jordens underliggande stöd minskar/försvinner. Då kan spänningarna i jordens kornskelett omformas så att ett valv bildas. Valvbildning förutsätter en viss relation mellan området med minskat stöd och höjd på ovanliggande jord. Om den ovanpåliggande jorden inte är tillräckligt mäktig bildas i stället ett sjunkhål. Effektivspänningarna i jorden under en valvbildning blir låga. I kombination med vattengenomströmning riskerar denna jord att eroderas.

I Figur 19 visualiseras valvbildning i en jordprofil om en sättning sker mellan punkt *a* och *b*. Valvbildning uppstår då genom att vertikalspänningarna i jorden omfördelas enligt den nedre bilden i figuren. Resultatet blir då en zon under valvet *e* med mycket låga vertikalspänningar.



Figur 19. Omfördelning av vertikalspänningar i jord då valvbildning har utvecklats (Terzaghi et al 1996).

Fell et al (2008) beskriver att valvbildning kan ske i smala, höga dammar om bredden på tätjorden är en fjärdedel av sin höjd och sidolutningarna är brantare än 60 grader. Är sidorna flackare än 45 grader är denna valvbildning osannolik. Detta fenomen skulle kunna infinna sig mellan utskov och berg eller mellan två utskov där en kortare fyllningsdammsdel är byggd.

### 3.3 ÖVRIGA FAKTORER FÖR UTVECKLING AV SKADOR I Fyllningsdammar

Övriga faktorer som kan bidra till en skadeutveckling i fyllningsdammar är

#### 3.3.1 Filtrets betydelse för erosion

Inget erosionsförlopp fortskrider så länge filtret uppfyller sin funktion. Kriterierna för relationerna mellan filter och tätkärna har undersökts av en stor mängd författare och en sammanfattning över dessa kriterier för svenska dammar är redovisade bland annat i Rönnqvist et al (2015).

Invid anslutningar utformas filter vanligtvis något bredare än i övriga delar av dammen för att bättre fungera om skador uppstår. Filter får enligt RIDAS 2012 ej ha ett  $D_5$  som understiger 0,06 mm, dvs max 5 vikt-% av filtermaterialet får passera 0,06 mm sikten vid en siktanalys. Anledningen till detta är framförallt två; dels måste filtret kunna ha en tillräcklig dränagekapacitet men även att för att sprickor ej ska uppstå.

#### 3.3.2 Packningens betydelse för erosion

Packning av jord är en central aktivitet vid konstruktion av fyllningsdammar. Innan en fyllningsdamm byggs måste de jordmaterial som ingår undersökas med hänsyn till deras packningsegenskaper. En jord är uppbyggd av tre delelement; fasta partiklar, vatten och luft. Vid packning utsätts jorden för en yttre mekanisk påverkan som komprimerar jorden genom att minska dess porvolym. En packad jord får bland annat högre densitet, högre E-modul, blir mindre sättningsbenägen, får en lägre hydraulisk konduktivitet än en mindre packad jord (Cernica 1995).

Faktorer som påverkar hur väl en jord kan packas är exempelvis:

- **Vattenkvot** – Vatten agerar som smörjmedel mellan jordens korn. För lite vatten innebär att jorden inte kan packas tillräckligt på grund av för höga friktionskrafter. För mycket vatten innebär att jorden inte kan packas tillräckligt då vattnet kan bli instängt i porerna. Varje jord har en optimal vattenkvot. Vid denna vattenkvot uppnås maximal densitet på jorden vid packning.
- **Kornfördelning** – Kornfördelningen bör vara jämn och språnggradering ska inte förekomma för optimalt packningsresultat.
- **Packningsmaskiner** – Olika maskiner används vid olika ställen vid en damm. Val av maskiner styrs av närhet till berggrund och närhet till olika konstruktionsdetaljer. Är man nära berggrunden måste man packa jorden mer försiktigt eftersom man annars riskerar att förstöra berget. Är man nära andra detaljer i dammen som exempelvis sponter, dräneringsrör och vingmurar kan

det råda platsbrist varför mindre maskiner måste användas. Generellt sett vill man ha så stora maskiner som situationen tillåter eftersom detta genererar mer packningsenergi till jorden.

- **Pallhöjd** – Vid konstruktion av en damm läggs jordmaterialet ut med en viss höjd innan det packas. Höjden på varje utlagt lager betecknas pall. Är pallhöjden för hög kan jorden packas sämre än förväntat. Vid dammbyggen kontrolleras vanligtvis tätjordens packningsgrad för varje pall. Är packningsgraden för låg (vanligtvis <90 % av optimal packningsgrad) bör pallhöjden minskas eller kan tyngre packningsmaskiner användas.

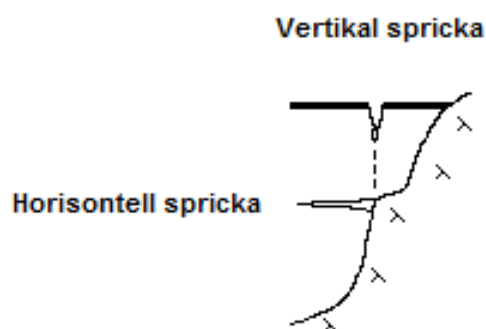
## 4 Möjliga skadeorsaker vid anslutningar

I detta avsnitt följer beskrivningar över olika skador som kan inträffa vid de olika anslutningarna.

### 4.1 TÄTJORD MOT BERG/JORD

Vid gränzonen mellan en damm och undergrund finns det en risk att höga portryck kan fortplantas in i tätkärnan via bergets spricksystem. Även finmaterial från dammen kan eroderas ut via dessa spricksystem. Dessa eventuellt uppkomna sprickor kan leda till kontaktersosion av tätjordens undersida.

I de fall bergets sidor innehåller irregulariteter kan både horisontella och vertikala sprickor skapas i tätjord vid sättningar, Figur 20. Dessa sprickorna kan orsaka koncentrerade läckor. Under odränerade förhållanden kan även portrycket ökas med förhöjd risk för skador.

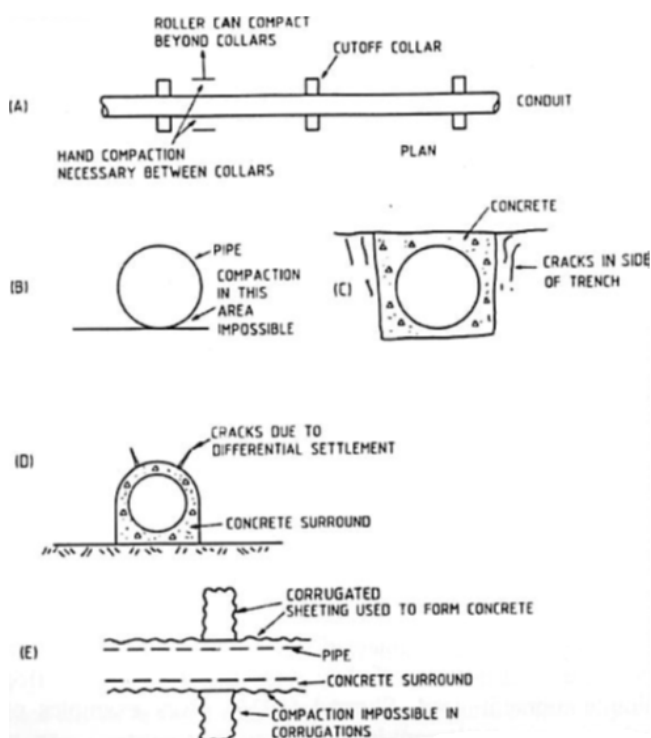


Figur 20. Sprickor i tätjord orsakade av sättningar då upphängning sker mot bergets sidor.

Då dräneringssystem (rör) är nergrävda i dammen kan risken för inre erosion öka i och omkring dessa områden. Dessa typer av dräneringssystem grävs oftast ner vid nedströms dammtå som en slags extra försäkring mot erosion vid kraftiga flöden. Enligt ICOLD 2013 rapporteras det om ett flertal fall då dessa installationer orsakat incidenter. Packningen av jord blir svår vid dessa områden på grund av rörens cirkulära form och dålig packning ökar risken för inre erosion. Effektivspänningarna i omgivande jord kan vidare bli för låga på grund av upphängningar mot rören vilket också kan leda till inre erosion.

I Figur 21 visas var svårigheter med framförallt packning men även eventuell sprickbildning av jord i anslutning till dessa dränagesystem kan uppstå.





Figur 21. Detaljer kring rör nergrävda i dammen. (A) otillräcklig packning runt rören. (B) Otillräcklig packning under rör. (C) Sprickbildning i jord eller dåligt berg vid sidan av diket. (D) Sprickor på grund av differentialsättningar. (E) Användning av korrugerad plåt vid gjutning eller andra metoder för att rugga upp betongytan mot omgivningen. (Fell et al 2005).

## 4.2 TÄTJORD MOT BETONG

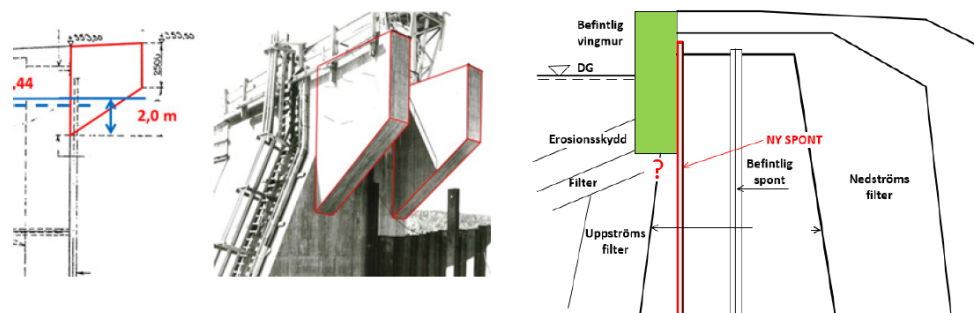
Kontaktytor mellan betong och fyllningsdamm är vanliga vid utskovspartier. Dessa betongpartier ska enligt RIDAS 2012 utformas med en lutning om 8V:1H för att öka möjligheten att packa tätjorden in mot betongen. Det ska dock poängteras att de flesta dammar är byggda innan dessa rekommendationer lanserades varför de flesta anslutningarna i Sverige är mer eller mindre vertikala. Historiskt sett har dessa områden visat sig mycket känsliga för skadebildning (Nilsson et al 1999, Ekström et al 2016). En vanlig skada invid dessa anslutningar är sjunkhål, Figur 22.



Figur 22. Sättning mellan fyllningsdamm och betong (Foto: Uniper).

De flesta diskuterade skadetyperna (kapitel 3) kan uppstå invid anslutningar mellan tätjord och betong. Sättningar kan orsaka upphängning av tätjord mot betongen med låga effektivspänningar som följd (risk för hydraulisk uppspräckning) och/eller sprickor (koncentrerade läckor). Valvbildning kan ske mot betongkonstruktionen (risk för hydraulisk uppspräckning).

Då vingmurar installerats i dammens övre delar kan dessa hindra utförandet av ett korrekt filter, Figur 23. En vingmur är en utskjutande del från betongen som går in i tätjorden. I Figur 23 (höger) illustreras det bristfälliga utrymmet för att kunna bygga ett korrekt uppströmsfilter.



Figur 23. Till vänster visas en utskovspelare försedd med två vingmurar och sponter. Till höger visas en damms anslutning med vingmur och spont. Samtliga figurer i bild är från samma detalj i en damm sedd från olika vinklar (Ekström et al 2016).

### 4.3 TÄTJORD MOT SPONT

Tätjord invid spont är svårare att packa på grund av platsbrist vilket leder till liknande svagheter som för tätjord mot betong. Exempel på dessa svagheter är låga effektivspänningar som orsakas av tätjordens sättning med åtföljande upphängning invid sponten vilket ökar risken för hydraulisk uppspräckning och/eller sprickbildning (koncentrerade läckor). Även valvbildning kan ske mot spontkonstruktionen (risk för hydraulisk uppspräckning).

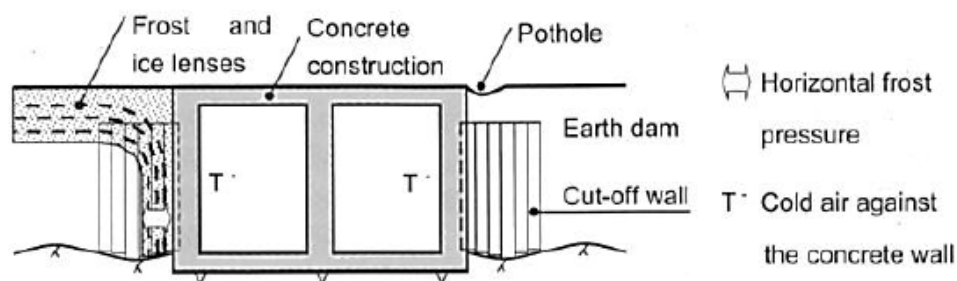
#### 4.3.1 Frostpåverkan vid sponter

Under kallare väder finns det en ökad risk för en större tjälinträngning vid dammens anslutningar. Tjäl djupet beror på flera faktorer. En jord med högre vattenkvot har alltid mindre tjäl djup än en jord med låg vattenkvot under samma förutsättningar i övrigt. Tjälgränsen kan gå djupare ner i dammkroppen/tätjorden via betonganslutningar och stålspont än genom bara tätjorden. En faktor för tjälinträngningen är värmeledningsförmågan i de material man kan finna vid en anslutning med spont, Tabell 4.

Tabell 4. Värmeledningsförmåga för vanligt förekommande delmaterial i fyllningsdammar.

Material	Värmeledningsförmåga $\lambda$ [W/(m °C)]
Betong	1,7
Stål	50
PVC	0,16
Morän (tätjord)	0,5 – 2,5

Värmeledningsförmågan i tätjord styrs framförallt av dess vattenkvot och porositet. Är vattenkvoten i jorden hög förbättras dess värmeledande förmåga jämfört med en torr jord. Är jordens porositet låg ökar dess värmeledningsförmåga jämfört med en jord med hög porositet.



Figur 24. Frysningseffekt vid ett utskovsparti (Vuola et al 2007).

Vid frysning av en anslutning med spont, enligt Figur 24, kan islinser bildas om jorden är tjällyftningsbenägen (tjälfarlig). Islinsernas orientering blir sådan att de tillväxer i värmeflödets riktning och är mer eller mindre parallella med frysfronten.

Islinserna expanderar och skapar ett tryck i tätjorden riktat utåt från betonganslutningen och sponten. När islinserna tinar kan de kvarlämna uppluckrade zoner som i sin tur kan orsaka sprickor i vilka nya läckagevägar för vatten att bildas. En ökad vattengenomströmning leder alltid till en förhöjd risk för erosion av tätjorden i dessa områden. Detta kan i sin tur ytterligare accelerera erosionsförloppet (Viklander 1995). Ett tecken på att denna process pågår vid en anslutning är utveckling av sjunkhål på dammens krön.

#### 4.3.2 Kemiska reaktioner mellan jord och spont

Vid olika dammhaveriförsök i Älvkarleby som beskrivs av Vazques 2014, Enegren 2015 (haveriförsök år 2014) och av Lagerlund 2018 (serie med haveriförsök 2016 – 2017) upptäcktes efter försöken att tätjord reagerat med omgivande stålkonstruktion och bildat hårda, utskjutande grusansamlingar, Figur 25.



Figur 25. Reaktion mellan tätjord och stål som upptäcktes efter ett dammbrottsförsök. Den glatta stålytan fick på flertalet ställen utskjutande delar av grusmaterial som rev upp närliggande tätjord vid lastförändringar.

Brottförsöken skedde i en container vars sidoväggar bestod av stål. Under försöken orsakade läckagevattnet att vissa delar av sidoväggarna rostade. Denna oxidation gjorde att material från tätjord och filter fastnade mot sidoväggen vilket gjorde sidoväggens yta sträv. När dammen under experimentet utsattes för olika belastningsfall (hastig avsänkning, hastig uppfyllning, konsolidering) så uppstod koncentrerade läckor mellan tätjord och sidovägg. Dessa läckor uppstod eftersom de utstickande grusansamlingarna i kombination med dammens rörelse rev upp tätjorden. Liknande skador kan riskera att utvecklas i en verklig fyllningsdamm.

#### 4.4 TÄTJORD MOT TÄTJORD

Då dammens tätjord packas görs detta i pallar. Pallarnas tjocklek är vanligtvis 0,2 – 0,3 m tjocka men är ännu tunnare vid anslutningar. Packning sker i horisontalplanet vilket gör tätjorden skiktad. Packningen sänker portalet, ökar

densiteten och homogeniserar tätjorden. Vid packning av tätjord kan det ske en viss separation som kan leda till att jorden i underkant av den packade massan blir mer finkornig än de övre delarna i samma pall. Detta upptäcktes under ett examensarbete angående kontaktersion (Pattanaik 2018).

Detta innebär att horisontella skikt med högre hydraulisk konduktivitet än den vertikala kan bildas genom tätkärnan. Överdelen i varje pall kan vara mer genomsläppligt för vatten än de lägre delarna.

Om en fyllningsdamm byggs över mer än ett år kommer bygget att behöva pausas under vintern. Under detta vinteruppehåll ska överytan av tätjorden isoleras mot tjäle och efter vinteruppehållet ska den jord som påverkats av tjälen ersättas (RIDAS 2012). Om det slarvas med detta kan horisontella skikt med högre hydraulisk konduktivitet byggas in i dammen. Den erosionsprocess som då kan ske i dessa horisontella skikt bör vara koncentrerade läckor och i viss mån kontaktersion. I de fall stensträngar bildats vid utläggning av tätjorden kan erosionsprocessen bli suffusion/suffosion för att sedan övergå till kontaktersion.

De horisontella skikten genom tätjorden kan även innebära en mekanisk svaghet. Vid haveriförsök beskrivna av Lagerlund (2018) framkom att när dammen havererade så skalades dammens tätjord ner skikt för skikt efter det att dammens krön kollapsat.

Vid höjning av tätkärnan med ny tätjord mot gammal kan en svaghet byggas in då ny tätjord läggs emot den gamla. Vid haveriförsök vid laboratoriet i Älvkarleby (Enegren 2015 och Vazquez 2014) inträffade ett haveri av dammkrönet vid denna typ av svaghet. Haveriet inträffade invid dammens högra anslutning Figur 26.



Figur 26. Haveri av reparerat dammkrön vid höga flöden (Vazques 2014). På vänster sida av bilden syns dammens krön från uppströms sida. På den högra sidan syns dammen nedströms. Haveriet skedde högt upp vid dammens högra anslutning. Pilen visar var källsprånget nedströms haveriet inträffade.

#### 4.5 TÄTJORD MOT ÖVERVAKNINGSTRUSTNING

Skador i anslutning till övervakningsutrustning orsakas framförallt av svårigheterna att packa tätjorden kring dessa. Risken för hydraulisk uppspräckning och sättningar kan då öka i övervakningsutrustningens direkta närhet. Med tiden kan denna skadebildning visa sig som sjunkhål uppe på dammens krön. Så länge mätinstrumenten sitter mitt i dammens tätkärna och inte mot anslutningar bör eventuell skadeutveckling bli lokal, dvs. ej genomgående.

Vid Bennet dam i Kanada finns ett dokumenterat fall då erosion initierades i anslutningen mellan tätjorden och rör för flödeskontroll. Sättningar och höga vattenkvoter noterades från dessa rör och zonen med dessa förhållanden sträckte sig rakt upp genom dammens tätkärna till krönet (Hansson 1999). Liknande skador inträffade även vid Messaure 1963 (Bartsch 1999).

#### 4.6 TÄTJORD MOT GAMLA REPARATIONER

Gamla reparationer med exempelvis cementbruk kan orsaka sprickbildning mellan reparationen och tätjorden. Försök av Lagerlund (2009), där ett sandcementbruk injekterades i jord, visade att cementbruket under härdningsförloppet krympte något vilket skapade mikrosprickor mellan bruket och omgivande jord, Figur 27. Med anledning av detta riskerar koncentrerade läckor att bildas kring injekteringen.



**Figur 27.** Framgrävt prov efter injekteringsförsök. Injektering av ett sandcementbruk i en skadad tätjord. Skadan var cirkulär och anslöt mot nedströmsfiltret. Den sand som syns i bild kommer från nedströmsfiltret och har fastnat mot tätjordsytan. Sprickan mellan injekteringsbruket och tätjorden gick runt hela skadan och markeras med röda pilar mitt i bilden.

Permeationsinjekteringar kan med tiden lakas ur och lösas upp. Om detta sker efterlämnas en zon i tätjorden med dåligt packat material som riskerar att utsättas för hydrauliska uppspräckning. Om en silikatinjektering (vattenglas) använts kommer denna troligen ej att vara beständig då dess bindningar löses upp i våta miljöer (Warner 2004).

Om uppspräckningsinjektering utförs skapas linser av bruk genom den injekterade jorden. Dessa linser skadar tätjorden rent mekaniskt i likhet med frysning men utan att vatten suges in mot den injekterade zonen. Om dammen rör sig riskerar linserna att brytas av då bruket saknar armering och därför är dåligt på att ta upp dragkrafter. Koncentrerade läckor kan då uppstå längs bruket.

Tätskärmar bedöms i framtiden bli mer vanligt förekommande (Ekström et al 2016). Detta gäller i synnerhet dammar där ökade läckage är återkommande. Det finns olika typer av tätskärmar men de har gemensamt att man från krönet gräver sig rakt ner i tätkärnan och installerar en tätande vägg (slurry wall, diaphragm wall, rörpålar, sekantpålar). Härvid skapas en tät barriär genom dammen i längdled. Mot denna vägg kan det ske valvbildningar och om dräneringen ej tillgodoses kan höga portryck uppstå. De ökade portrycken kan bidra till att sänka effektivspänningarna vilket sänker dammens säkerhet mot skred. Tätskärmar bör ligga an mot dammens ursprungliga anslutningar.



**Figur 28. Gammal injektering och efterlämnade injekteringsrör (inom cirkeln) syns mot betongmuren (Foto: Carl-Oscar Nilsson)**

Injektering i anslutning med exempelvis cementinjektering kan skapa utstickande klumpar från anslutningen in i tätjorden, Figur 28. Om sättningar sker i detta område riskerar tätjorden att luckras upp vilket kan leda till både koncentrerade läckor och hydrauliska uppspräckningar. Detta bör då få samma effekt som beskrivits i avsnitt 4.3.2.



## 5 Diagnostisering av anslutningar och möjliga åtgärder

I detta avsnitt följer en diskussion hur man lämpligen diagnostiserar en bristfällig anslutning samt vilka åtgärder man kan sätta in för att förhindra skadans vidare utveckling. Gemensamt för all skadeutveckling är att en hydraulisk last måste finnas tillgänglig samt att filtret måste vara av sådan karaktär att det släpper igenom en del av tät kärnans material. Finns inget vatten tillgängligt kan inte skadan utvecklas och fungerar filtret kan inget material lämna tät kärnan.

För att kunna diagnostisera en anslutning bör man först känna till vilka erosionsprocesser som kan ske vid anslutningarna. Erosionsprocesserna ger upphov till fysikaliska fenomen vilka orsakar olika typer av symptom i jorden vid anslutningarna. Övervakningsmetoder bör därefter väljas så att dessa symptom kan kartläggas. Utifrån denna övervakningsdata kan man sedan bedöma anslutningens status och därefter bedöma om en eventuell åtgärd bör sättas in samt vad denna åtgärd bör innehålla.

Inom detta avsnitt presenteras fenomen som kan inträffa vid respektive anslutningstyp samt hur man kan mäta dessa. Sist följer förslag på åtgärder samt en diskussion angående dessa åtgärders rimlighet.

Läsaren bör vidare göras medveten om att diagnostisering/åtgärder i detta avsnitt avhandlas generellt. Beskrivna fenomen är något som kan hända vid anslutningar men varje fall där detta inträffar måste behandlas individuellt. Detta avsnitt kan dock fungera som en vägledare vid diagnostisering/åtgärd.

### 5.1.1 Tätjord mot berg/jord

I Tabell 5 redovisas de fysikaliska fenomen som kan inträffa vid en anslutning mellan fyllningsdamm och dess undergrund bestående av antingen berg eller jord. Även mätmetoder lämpliga för att upptäcka de fysikaliska fenomenen redovisas.

**Tabell 5. Möjliga fysikaliska fenomen samt föreslagna mätmetoder vid anslutning mellan fyllningsdamm och berg/jord.**

Fenomen	Mätmetod
Sättning	Visuella inspektioner, avvägning, inklinometrar, laserscanning, totalstation, drönare,
Höga portryck	Portrycksmätningar
Läckage i undergrund	Läckageflöden, turbiditetsmätningar, geofysiska mätmetoder
Sprickor	Visuella inspektioner, portrycksmätningar, provtagning in-situ
Rörelser	Se sättningar

Sättning innebär att jorden förflyttas. För att kompensera insjunkning av krönet kan material behövas påföras dammen ovanifrån och tät kärnans nivå bör med marginal aldrig tillåtas understiga dammens dämningssgräns.

Vid höga flöden genom eventuella spricksystem i undergrunden kan dessa åtgärdas genom att undergrunden injekteras med nya tätningar.

### 5.1.2 Tätjord mot betong

I Tabell 6 redovisas de fysikaliska fenomen som kan inträffa vid en anslutning mellan fyllningsdamm och betong. Även mätmetoder lämpliga för att upptäcka de fysikaliska fenomenen redovisas.

**Tabell 6. Möjliga fenomen samt föreslagna mätmetoder vid anslutning mellan fyllningsdamm och betong.**

Fenomen	Mätmetod
Upphängningar	Geotekniska sonderingar
Valvbildningar	Geotekniska sonderingar
Sättningar	Visuella inspektioner, avvägning, inklinometrar, laserscanning, totalstation, drönare, turbiditet, provtagning av jord,
Ökade läckage	Läckagemätningar, turbiditetsmätningar, geofysiska mätmetoder
Smala geometrier ger höga gradienter	Konstruktionsritningar
Frysning/tining	Portrycksmätningar, temperaturmätningar, visuella inspektioner

Upphängningar innebär att jorden luckras upp varför dess densitet kommer att minska. Orsaken till upphängningarna är alltid en rörelse i jorden relativt anslutningen. Ligger en hydraulisk last an mot denna jord kan även vattenkvoten bli högre vilket kan mätas på upptagna jordprover.

Som åtgärd vid upphängningar kan kompaktinjektering beaktas. Vid kompaktinjektering injekteras ett bruk som ej tränger in i jordens porstruktur. I stället resulterar metoden i att omkringliggande jord kompakteras. Fördelen med kompaktinjektering vid denna typ av anslutning är att resultat förbättras om bruket får ta "spjörn" mot den oeftergivliga anslutningen. Detta diskuteras bland annat av El-Kelesh et al (2012). Bruket bör ha en låg vattenkvot och bestå av ett material med så lika egenskaper som möjligt den jord som injekteringen sker i. En låg vattenkvot är viktig för att inte orsaka höga porvattentryck i dammen.

Vid sättningar bör dess orsak noga utredas. Anledningen till sättningar kan vara en rörelse i dammen men även vara ett inre erosionsförlopp. Om inre erosion pågår bör man analysera läckagevattnets turbiditet. Provtagningar av jorden kan även avgöra om den är suffusiv/suffosiv. Att endast utvärdera risk för inre erosion utifrån ursprungliga kornkurvor bör ej rekommenderas eftersom jord lätt ändrar sin kornfördelning vid utläggning/byggnation.

Då frysning/tining skett kan sjunkhål uppstå vilket kan avgöras genom visuella inspektioner. Under våren när eventuellt frusen tätjord tinar kan höga portryck utvecklas i jorden vilka kan mätas.

För att minska risken för frysning/tining kan man installera någon form av uppvärmning i anslutningen eller rörbättra dess isolering. På så sätt kan risken för frysinducerade skador minskas.

### 5.1.3 Tätjord mot spont

I Tabell 7 redovisas de fysikaliska fenomen som kan inträffa vid en anslutning mellan fyllningsdamm och spont. Även mätmetoder lämpliga för att upptäcka de fysikaliska fenomenen redovisas.

**Tabell 7. Möjliga fenomen samt föreslagna mätmetoder vid anslutning mellan fyllningsdamm och spont.**

Fenomen	Mätmetod
Upphängningar	Geotekniska sonderingar
Valvbildningar	Geotekniska sonderingar
Sättningar	Visuella inspektioner, avvägning, inklinometrar, laserscanning, totalstation, drönare, turbiditet, provtagning av jord
Ökade läckage	Läckagemätningar, turbiditetsmätningar, geofysiska mätmetoder
Frysning/tining	Portrycksmätningar, temperaturmätningar, provtagning in-situ, visuella inspektioner

Skador vid spont bör betecknas som snarlika de som sker vid anslutning mot betongkonstruktioner. För upphängningar mot spont kan en ytterligare dimension förekomma jämfört med fallet tätjord/betong då det upptäckts i laboratorieförsök att tätjord har en förmåga att fastna på sponter av stål. Detta innebär att anslutande tätjord kan rivas upp om tätjorden konsoliderar. Sker detta kan läckvattenflöden öka.

Risken för frysning/tining kan eventuellt vara större vid en stålspont än vid en betonganslutning utan spont eftersom stålsporten mer effektivt leder ut värme. Sprickbildning och/eller löst kompakterad jord kan förekomma invid sponten när islinser tinar. Risken för frostproblematik kan minska genom att anslutningen isoleras eller att stålsporten ersätts med en PVC-spont, vilken har en lägre värmeledningsförmåga än en stålspont.

För mätning och åtgärder kring övriga händelser beskrivs dessa i avsnitt 5.1.2. Dock bör eventuell injektering utföras mer försiktigt då sponter är mer eftergivliga än betonganslutningar.

### 5.1.4 Tätjord mot tätjord

I Tabell 8 redovisas de fysikaliska fenomen som kan inträffa mellan tätjordens olika skikt. Även mätmetoder lämpliga för att upptäcka de fysikaliska fenomenen redovisas.

**Tabell 8. Möjliga fenomen samt föreslagna mätmetoder vid anslutning mellan tätjordens skikt.**

Fenomen	Mätmetod
Högpermeabla zoner horisontellt	Läckagemätningar, geofysiska mätmetoder
Suffusion/suffosion	Provtagning av jord in-situ, turbiditetsmätningar
Kontakterosion	läckagemätningar, portrycksmätningar, turbiditet, visuella inspektioner

Eftersom fyllningsdammens tätkärna byggs i lager kan dess horisontella hydrauliska konduktivitet bli högre än den vertikala. Detta kan härröra från själva packningsprocessen och/eller separation av tätjord vid utläggningen. För att finna dessa högpermeabla zoner kan man utföra läckvattenmätningar nedströms. För bästa resultat behöver man dock kunna höja/sänka magasinet för att ta reda på vid vilka nivåer läckaget sker.

Eventuella områden i tätjorden som separerat vid utläggning riskerar att ha inbyggda fel. Vid separation skapas grus-/stensträngar mer benägna att släppa igenom vatten. Igenom dessa strängar kan vatten flöda friare vilket i sin tur kan leda till suffusion/suffosion och/eller kontaktersion. Att mäta portrycket i tätjorden kan komplettera läckagemätningar. Om dessa portrycksmätningar indikerar en sänkning från det normala kan man anta att vattnet har hittat en annan väg genom dammen så att omgivande tätjord på sätt och vis dräneras. Ökar portrycket kan man anta att tätjordens täthet minskat. Porvattentrycket i tätkärnan bör mätas under lång tid eftersom man då enkelt kan upptäcka avvikelser från det normala.

Mer genomsläppliga zoner genom tätjordens lager är svåra att åtgärda. Åtgärdas de inte riskerar de att orsaka ökade läckage genom fyllningsdammen. Injektering kan utföras och om denna metod väljs bör injekteringen påbörjas uppströms för att förhindra av höga portryck i tätjorden. Om det utmed hela fyllningsdammens längd uppstått mer genomsläppliga zoner kan mer extrema lösningar som slitsmurar behöva beaktas.

### 5.1.5 Tätjord mot övervakningsutrustning

I Tabell 9 redovisas de fysikaliska fenomen som kan inträffa vid en anslutning mellan fyllningsdamm och övervakningsutrustning. Även mätmetoder lämpliga för att upptäcka de fysikaliska fenomenen redovisas.

**Tabell 9. Möjliga fenomen samt föreslagna mätmetoder vid anslutning mellan tätjord och övervakningsutrustning.**

Fenomen	Mätmetoder
Sättningar	Visuella inspektioner, laserscanning, totalstation, drönare, sondering, provtagning av jord
Upphängningar	Geotekniska sonderingar

Skador kring installerad övervakningsutrustning sker lokalt men kan orsaka följdskador. Jorden i och omkring övervakningsutrustning är svårare att packa, vilket innebär att den blir mer sättningsbenägen. När den sätter sig riskerar ovanpåliggande jord att dras med vilket kan orsaka löst lagrade zoner i jorden över övervakningsutrustningen. Om misstanke finns att en skadeprocess pågår kan man undersöka om sjunkgrovar uppkommit på fyllningsdammens krön. Hittar man sjunkgrovar kan dessa sonderas för att avgöra dess omfattning. Komplettering av sonderingen kan ske med en provtagning av jorden.

Sjunkgrovar kan åtgärdas med injektering. Brukets sammansättning bör då noga avvägas så att man inte fyller portrycksgivarna med fel injekteringsbruk. Om detta inte beaktas riskerar man att förstöra portrycksgivarna. Injektering av sjunkhål utförs lämpligast nerifrån och upp i dammen (Garner et al 2010).

### 5.1.6 Tätjord mot gamla reparationer

I Tabell 10 redovisas de fysikaliska fenomen som kan inträffa vid en anslutning mellan fyllningsdamm och gamla reparationer. Även mätmetoder lämpliga för att upptäcka de fysikaliska fenomenen redovisas

**Tabell 10. Möjliga fenomen samt föreslagna mätmetoder vid anslutning mellan tätjord och gamla reparationer.**

Fenomen	Mätmetoder
Koncentrerade läckor	Portrycksmätningar, läckagemätningar, turbiditetsmätningar
Upphängningar	Geotekniska sonderingar
Sättningar	Visuella inspektioner, avvägning, inklinometrar, laserscanning, totalstation, drönare, turbiditet, provtagning av jord

Gamla reparationer med exempelvis injekterat cementbruk kan dölja erosionsförlopp som pågår under det tidigare reparerade området. Detta kan innebära svårigheter i att avgöra om ett skadeförlopp sker i fyllningsdammen genom att visuellt inspektera den. Av denna anledning kan läckagemätningar utföras och kompletteras med turbiditetsmätningar för att avgöra dammens status. Om slitsmurar sedan tidigare installerats bör händelser beskrivna i avsnitt 5.1.3 beaktas.

Gammal silikatinjektering kan med tiden lösas upp och om detta sker efterlämnas zoner med löst packat material. Tätjorden riskerar då att sätta sig. Dessa skador kan repareras med injektering där typ av bruk noga bör avvägas från fall till fall.

## 6 Fortsatta arbeten

Fortsatt arbeten bör inkludera följande:

- Utveckling av mätmetoder för att kunna avgöra status på en anslutning. I synnerhet bör oförstörande metoder som geofysiska mätmetoder beaktas.
- Utveckling av provtagning/borrning. I synnerhet bör skonsam borrning i tätjorden utvecklas som möjliggör håltagning i dammar utan att borrhningen i sig själv skadar dammen.
- Utveckling av reparationstinjektering mellan anslutning och tätjord. Val av injekteringsmaterial, utförande och utvärdering av injekteringsresultatet måste beaktas.
- Utvärdera allvarligheten från mätresultat. Hur avgör man när åtgärder måste sättas in.
- Studera beständigheten för gamla injekteringar och hur dessa påverkar dammens funktion.
- Utvärdera hur pass mycket tjälinträngning påverkar en damm vid dess anslutningar och i synnerhet där sponter finns installerade.

## 7 Slutsatser

Anslutningar som finns i en fyllningsdamm är de mellan; tätjord och grundläggning, tätjord och betongkonstruktioner, tätjord och spont, tätjordens skiktade uppbyggnad, tätjord och övervakningsinstrumentering samt mellan tätjord och gamla reparationer.

Vid konstruktion av en fyllningsdamm är det på grund av platsbrist svårare att packa tätjorden korrekt vid en anslutning varför de blir mer känsliga för skador än i övriga dammen. Användandet av spont kan ofta försvåra packningen ytterligare.

Fenomen som kan inträffa vid en fyllningsdammsanslutning är upphängning, valvbildning, sprickbildningar, ökade läckvattenflöden, ökade porvattentryck och löst lagrade zoner. Dessa fenomen kan leda till inre erosionsförlopp som koncentrerade läckor, bakåtskridande erosion, kontaktersion eller suffusion/suffosion. Om dessa erosionsförlopp får fortgå äventyras dammens säkerhet.

Vanliga typer av förändringar vid en drabbad anslutning är sättningar och ökade flöden. Med anledning av detta bör övervakningsutrustning som är utformade för att fånga upp sättningar och läckvattenflöden användas. Visuella inspektioner ska ej underskattas.

Uppkomna skador kan repareras på flera olika sätt. Ytliga skador kan återfyllas av och skador på dammens insida kan åtgärdas med injektering. Val av åtgärd bör noga övervägas innan åtgärden sätts in. Vid all form av återfyllning/injektering bör val av material/bruk beaktas.



## 8 Referenser

- Bartsch, M. (1999). *Messauredammen - Dokumentation samt uppföljning av sjunkhål 1963*. Elforsk rapport 99:9.
- Beguin R., Guidoux C., Faure Y.H., Ho C.C. (2009). *Stability conditions and erosion rates at the contact between two soils, subjected to a water flow parallel to the interface*. Presentation vid ICOLD European Working group on Internal Erosion St Petersburg i april.
- Beguin, R., Guidoux, C., Phillipe, P., Faure, Y.-H. (2013). *Contact erosion between two soils*. Erosion of Geomaterials, 115 – 154. John Wiley & Sons.
- Cernica J. (1995). *Geotechnical engineering – Soil mechanics*. ISBN 0-471-30884-6
- Ekström I., Nilsson Å., Wilén P. (2016). *Reparationsmetoder för fyllningsdammar – Sammanställning av erfarenheter med relevans för svenska förhållanden*. Energiforskrapport 2016:333
- Ekström T., Pusch R. (2001). *Bentonit i fyllningsdammar*. ELFORSK rapport 01:15
- El-Kelesh, A. M., Matsui T., Tokida K. (2012). *Field investigation into effectiveness of compaction grouting*. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering. April 2012, Vol 138 (4), pp 451 – 460.
- Enegren P. (2015). *Surveillance methods for monitoring embankment dams and internal erosion*. Magisteruppsats Göteborgs universitet, Avdelningen för marklära, 2015 B856
- Ericsson J., Jender M. (1998). *Dokumentation och undersökning av skador i Lövödammen*. Examensarbete vid institutionen för Väg- och vattenbyggnad LTU. ISSN:1402-1617
- Fannin J., Slangen P. (2014). *On the distinct phenomena of suffusion and soffosion*. Géotechnique letters, 4, 289 – 294
- Fell R., Wan C. F. (2005). *Methods for estimating the probability of failure of embankment dams by internal erosion and piping in the foundation and from embankment to foundation*. UNICIV Report No R-436, The University of New South Wales, Sydney, Australia 2052. ISBN:85841 413 9
- Fell R., Foster M., Wan C. F. (2007). *A framework for assessing the likelihood of internal erosion and piping of embankment dams and their foundations*. Internal erosion of dams and their foundations, Taylor and Francis, May 2007, 65-70
- Fell R., Foster M., Davidson R., Cyganiewicz J., Sills G., Vroman N. (2008). *A unified method for estimating probabilities of failure of embankment dams by internal erosion and piping*. UNICIV report R 446, The school of civil and environmental engineering, University of New South Wales, Sydney, Australia 2052. ISBN:85841 413 9
- Foster M., Fell R. (2001). *Assessing Embankment Dam Filters that do not satisfy Design Criteria*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 127(4), 398-407

- Garner J., Fannin J. (2010). *Understanding internal erosion: a decade of research following a sinkhole event*. International journal of hydropower and dams, 17(3), 93-98
- Hansson P. (1999). *Reserapport, Bennet dam, BC Hydro, Canada – Teknikbevakning av injekteringsarbeten*. Elforsk rapport 99:37
- ICOLD (2013). *Bulletin 164: Internal erosion of existing dams, levees, and dikes, and their foundations – Volume 1: Internal erosion processes and engineering assessment*. ICOLD.
- ICOLD (2018). *Dam surveillance – Lessons learnt from case histories*. ICOLD bulletin final draft 2018.
- Koenders, M.A. and Sellmeijer, J.B. (1992). *Mathematical model for piping*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.118, No.6, 943-946
- Lagerlund J. (2007). *Reparationsmetoder för dammkropp i relation till inre erosion – kriterier för val av injekteringsmetod och injekteringmaterial*. Elforsk rapport 07:53.
- Lagerlund J. (2009). *Remedial injection grouting of fembankment dams with non-hardening grouts*. Licentiatuppsats KTH. ISSN 1650-951X
- Lagerlund J. (2018). *Fuse plug breach tests*. Energiforskrapport 2018:465
- Mitchell J., Soga K. (2006). *Fundamentals of soil behavior – Third edition*. ISBN-13: 978-0-471-46302-7.
- Nilsson, Å. (1993). *Åldersförändringar i fyllningsdammar*. VASO dammkommittés rapport nr 16. ISSN 1400-7827.
- Nilsson Å., Ekström I., Söder C-O. (1999). *Inre erosion i svenska dammar – Beskrivning och utvärdering av sjunkgropar*. ELFORSK rapport 99:34
- Nilsson Å. (2016). *Vanligt utförda uppgraderingar av fyllningsdammar*. Presentation under SwedCOLD temadag 2016-10-25.
- Pattanaik C. (2018). *Experimental assessment of contact erosion in embankment dams with glacial till core*. Master thesis, Luleå University of Technology, Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering.
- Rice J. D., Duncan M. (2010). *Findings of case histories on the long-term performance of seepage barriers in dams*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering, vol 136, no 1, 2 – 15.
- RIDAS (2012). *Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet*
- Rönnqvist H. (2002) *An evaluation of the internal stability of embankment dams owned by Vattenfall AB*. Master thesis at the Royal Institute of Technology, Stockholm
- Rönnqvist H. (2010). *“Prediction surfacing internal erosion in moraine core dams”*, KTH TRITA-LWR Licentiate degree thesis, Hans Rönnqvist, Royal Institute of Technology, Stockholm,
- Rönnqvist H. (2015). *On the assessment of internal erosion of dam cores of glacial till*. Doctoral thesis, Luleå University of Technology, Department of Civil,

Environmental and Natural Resources Engineering, Division of Mining and Geotechnical Engineering. ISSN 1402-1544

Rönnqvist H., Fannin J., Viklander P. (2014). *On the use of empirical methods for assessment of filters in embankment dams*. Géotechnique letters 4, 272 – 282

Sellmeijer, J.B., Lopez De La Cruz, J., Van Beek, V. M. and Knoeff, J.G. (2012). *Fine tuning of the backward erosion piping model through small scale, medium scale and IJKdijk experiments*. Accepterad för publicering i *European Journal of Environmental and Civil Engineering*.

Sherard J., Woodward R., Clevenger S. (1965). *Earth and earth-rock dams – engineering problems of design and construction*

Sherard J. (1986). *Hydraulic fracturing in embankment dams*. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, vol 112, no 10, 905 – 927

Sundberg J. (1991). *Termiska egenskaper i jord och berg, Information 12*. Statens geotekniska institut

Terzaghi K., Peck R., Gholamreza M. (1996). *Soil mechanics in engineering practice – third edition*. ISBN 0-471-08658-4

Vattenfall (1988). *Jord- och stenfyllningsdammar*. ISBN 91-7186-271-4

Vazques Borrigan A. (2014). *Modelling internal erosion within an embankment dam prior to breaching*. Magisteruppsats KTH, Civil and Architectural engineering, avdelningen för Jord- och bergmekanik

Viklander P. (1995). *Frysnings- och tiningscyklers inverkan på jords permeabilitet – En litteraturundersökning*. Teknisk rapport (1995:12 T) Tekniska Högskolan i Luleå (LTU)

Vuola P., Konrad J-M., Bartsch M. (2007). *Effects of frost and thaw on dams*. Assessment of the risk of internal erosion of water retaining structures: Dams, dykes and levees. Intermediate report of the European working group of ICOLD.

Yerro A., Rohe A., Soga K. (2017). *Modelling internal erosion with the material point method*. Procedia Engineering 175 (2017) 365 – 372.

## Bilaga A: Praktikfall 1

### UPPTÄCKT OCH BESKRIVNING AV SVAGHETERNA

Praktikfall 1 är en fyllningsdamm. Anslutningen närmast betongkonstruktionen har undersökts och flera åtgärder gjorts under årens lopp för att öka dammsäkerheten. Dammarna uppfördes mellan åren 1981 och 1983 varefter anläggningen togs i drift år 1984.

I slutet av maj 1987 uppträdde en sjunkgrop i vänstra dammens anslutning till kraftstationen. Ombyggnader av dammkrönen vid anslutningarna till betongkonstruktionerna genomfördes 1999 – 2000. I första hand gjordes ombyggnaden i detta parti för att höja fribordet som var lägre än för resterande delar av dammarna. Vid anslutningarna ökades också stabiliteten åt nedströmshållet med stödbankar. Åt uppströmshållet gjordes vid anslutningarna av både vänster och höger damm förstärkningar av erosionskyddet med betongmadrasser.

År 2004 – 2005 genomfördes ett flertal ytterligare åtgärder. T.ex. arrangerades läkagemätning både nedströms vänstra och högra fyllningsdammens anslutning till betongkonstruktionerna.

Undersökningar 1999 visade att dammens tätkärna var mjuk och att inre erosion hade inträffat i dammens anslutning till utskovens vingmur. Sjunkgropens area var ca 2 m<sup>2</sup> med ett djup av ca 0,2 m. Gropen återfylldes med vägbyggnadsmaterial i samband med att vägen över dammen reparerades. Enligt uppgift hade sjunkhål i området tidigare fyllts i. En sjunkgrop noterades även i högra fyllningsdammen. Även denna återfylldes, efter inspektion, med vägbyggnadsmaterial. Översta blocken i erosionskyddet i konen hade på vänstersidan också glidit ner ca 0,3 m. 1988 noterades att stenläggningen på uppströmssidan satt sig ca 0,4 m. En möjlig orsak bedömdes vara dålig packning av underlaget vid dammens uppförande. Samma skada noterades för höger fyllningsdammsdel.

Vid FDU-besiktningen 1999 noterades sprickor längs dammkrönet. Sprickbredden var som störst ca 7 cm i området närmast dammens anslutning till utskovet, se Figur 29

Sättningskadorna som uppträtt i vänster och höger damms anslutning var likartade och verkar ha likartade orsaker. Vingmurarna hade också liknande utformning. På vänster sida där konen som är täckt med ordnad sprängsten närmast vingmuren var slänflutningen 1:1,3. Säkerheten beräknades vara låg för glidytor i övergångslagret under stenfyllningen.

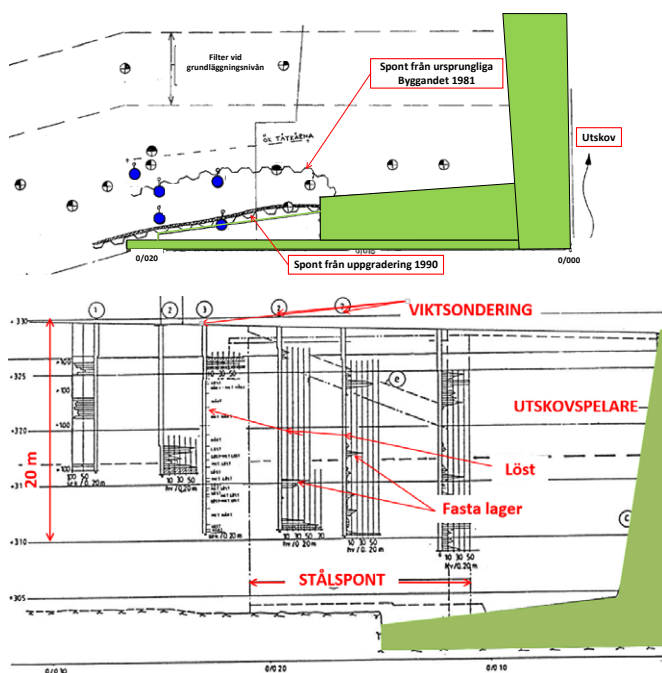
Åt nedströmshållet medförde förstärkningen av sprängsten som utfördes 1990 att stabiliteten är högre än åt uppströmshållet. Sprickor i vägbanan på dammens krön tillsammans med sättningar bedömdes vara orsakade av tung trafik i kombination med låg stabilitet åt uppströmshållet. I samband med besiktningen 1991 indikerade observationer i två vattenståndsrör att rörelser inträffat i tätkärnan på större djup än 7 m djup under dammkrönet. Vid detta djup försvann ljuset från en ficklampa som sänktes ner i röret. Vid besiktningen i juni 1998 uppstod svårighet att med ett

lod med 100 mm längd mäta vattennivån i rören. Rören antogs då ha blivit krökta. Orsaken till svårighet att mäta rören bedömdes tyda på att de rörelser som noterats i uppströmsslänten och i mätbrunnarna i krönet gick djupt ner i dammen. Området för kröken för röret längst bort från betongkonstruktionen bedömdes översiktligt till ca 7 m under krönnivån. Utredningar finns av stabilitet och dokumentation finns som beskriver genomförda åtgärder och installerade instrumenteringar.



**Figur 29. Sprickor i asfalten som visar att rörelser åt uppströmshållet förekom längs hela vänstra dammen. Sprickorna var störst i området närmast anslutningen till utskovet, 1999.**

Fältundersökningar i form av sondering, provtagning och installation av vattenståndsrör utfördes. Det konstaterades att dammens tätkärna var mycket lös invid betongkonstruktionerna och att det hydrostatiska trycket i dammen i en punkt var högre än vad som normalt kan förväntas och avvek från strömningsnätet i övrigt. Resultat från sonderingarna i partiet i närheten av sponten framgår av Figur 30.

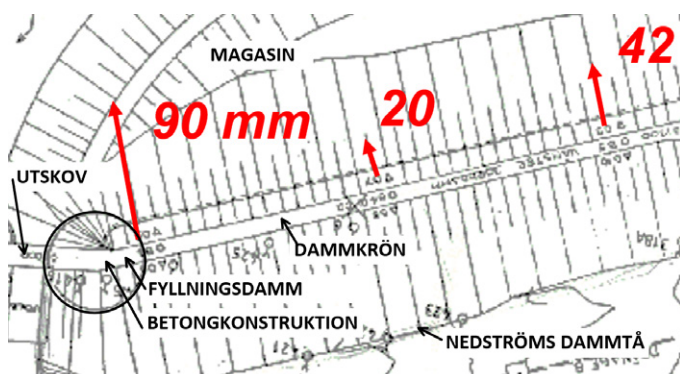


Figur 30. Anslutning till av fyllningsdamm till betongkonstruktion med sonderingar från 1989 (plan överst och profil). Spont från 1990 på planen framgår även i Figur 39.

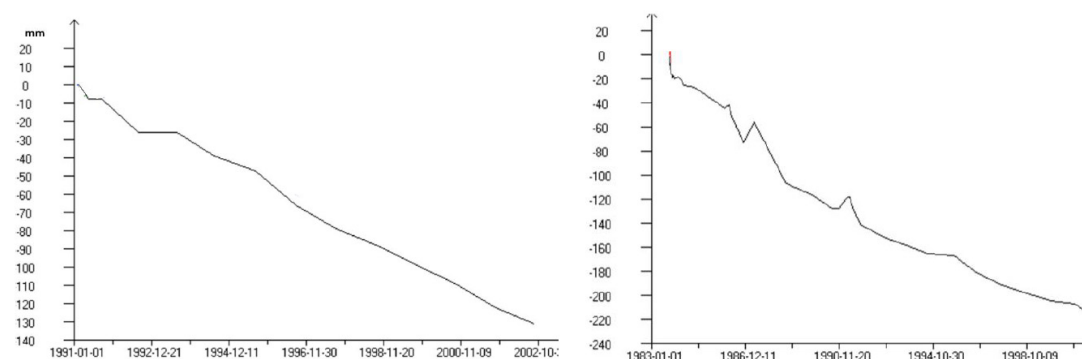
## RÖRELSEMÄTNINGAR

Den största sättningen uppmättes i en krönbrunn som ligger närmast vänstra dammens anslutning till utskovet. Sättningarna utvecklade sig mestadels från dänningsupptagningen 1983 och fram till 1992 – 93, varefter sättningsutvecklingen varit avstannande. De uppmätta sidorörelserna i krönbrunnarna visar mestadels en rörelse åt uppströmshållet. Sidorörelserna är i samma storleksordning som uppmätta sättningar. Den största sidorörelsen har uppmätts, på motsvarande sätt som den största sättningen, närmast vänstra dammens anslutning till utskovet.

Rörelserna uppmätta i vänstra dammens uppströmsslänt var förhållandevis stora. Sättningarna var störst, ca 190 mm, i uppströmsslänten vid släntdubben som finns närmast vänstra dammens anslutning till utskovet. Sättningen var fortgående och hade i denna punkt varit ca 10 mm/år. Sidorörelserna som uppmättes i uppströmsslänten var också fortgående och uppvisade ingen avtagande tendens. Sidorörelsen under en period av åtta år var som störst ca 90 mm närmast övergången till kraftstationen på motsvarande sätt som för sättningarna, se Figur 31 och Figur 32.

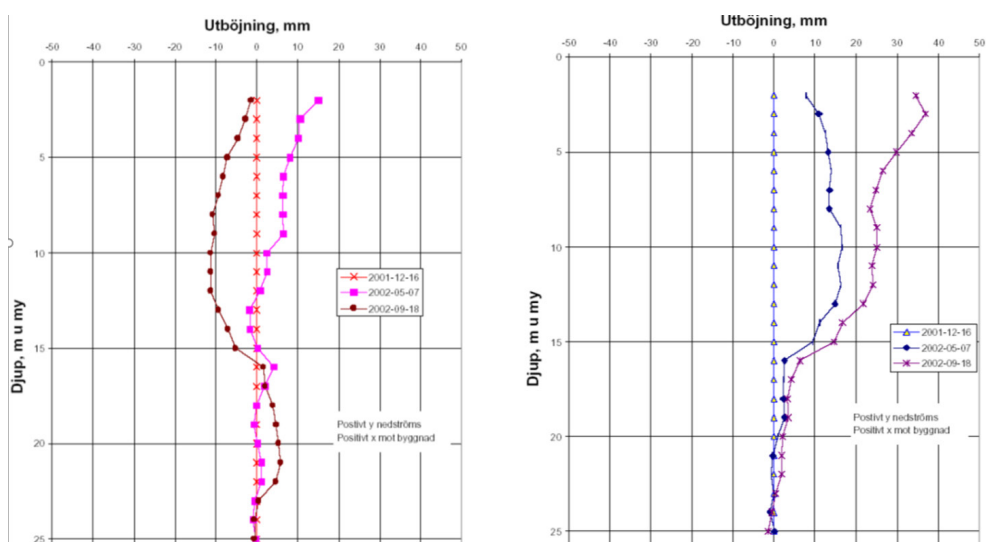


Figur 31. Horisontell krypning av "fixpunkter" i uppströmsslätten (sort mm) under perioden 1990 till 1998.



Figur 32. Sidorörelser till vänster 130 mm 1991 till 2002 (12 mm/år). Sättningar till höger 220 mm 1993 till 2003 (ca 22 mm/år).

Rörelser med djupet närmast anslutningen uppmättes med inklinometer under cirka ett år 2001/2002. En sidorörelse registrerades då med ca 30 mm åt uppströmshållet och förskjutningarna noterades i huvudsak inträffa vid övergången till naturlig mark på ca 15 m djup, se Figur 33.



Figur 33. Rörelser med djupet närmast anslutningen uppmättes under ca ett år (2001 - 2002).

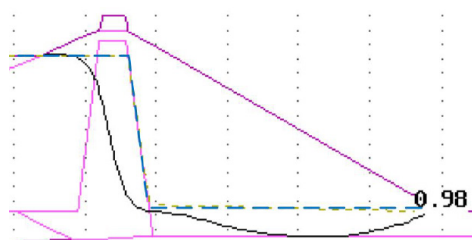
## STABILITET

Rörelserna intill utskovet åt uppströmshållet både i punkter i dammkrönets mitt och i uppströmsslätens övre del antogs bero på låg stabilitet åt uppströmshållet. I nedströmsslätens övre del uppmättes mindre rörelser åt nedströmshållet, vilka antogs bero på låg stabilitet åt nedströmshållet. Den låga stabiliteten åt nedströmshållet värderades som allvarligast ur dammsäkerhetssynpunkt, men samtidigt lättast att säkerställas genom utläggning av stödbankar som beskrivs nedan. Den låga stabiliteten åt uppströmshållet bedömdes utgöra mindre risk att kunna utvecklas till ett fullständigt dammhaveri, men angeläget att rörelser hölls under uppsikt och åtgärder vidtas om förloppet skulle förvärras.

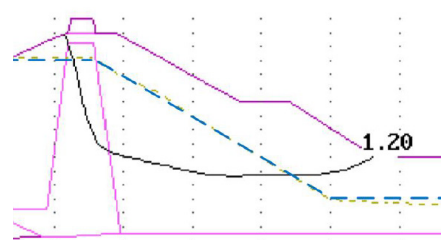
Stabiliteten utan stabilitetshöjande åtgärder och med stabilisering med en stödbank längs nedströmsslätten beräknades i samband med FDU 1999 enligt Figur 34 till Figur 35. Resultaten visar att innan tryckbanken lades ut var stabiliteten åt nedströmshållet god vid normal hållfasthet i tät kärnan och normala porttryck i stödfyllningen. Stabiliteten beräknas dock varit otillräcklig, dvs. i närheten av 1,0 om antingen hållfastheten i tät kärnan var försumbar, eller om extrema porttryck skulle uppstå i stödfyllningen, Figur 36

Efter utläggning av stödbank beräknas säkerhetsfaktorn ha ökat med ca 20%, se Figur 36. Friktionsvinkeln för tätjorden antogs vara någonstans mellan antagandena i Figur 35 och Figur 36 varför stabiliteten bedömdes vara tillfredsställande med den nedsatta hållfastheten i tät kärnan efter utläggningen av stödbanken.

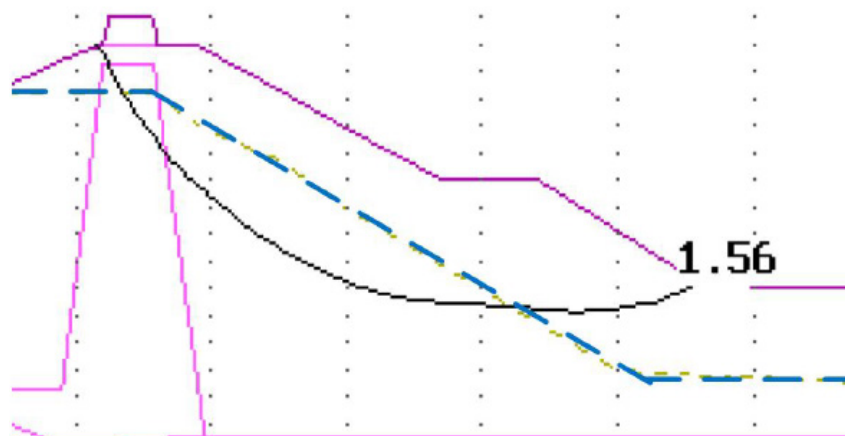




Figur 34. Utan stödbank och nedströmsstabilitet med hållfasthetsänkt till  $\phi = 1^\circ$  i tät kärnan och  $35^\circ$  i stödfyllningen för att få  $F = \text{ca } 1,0$ .

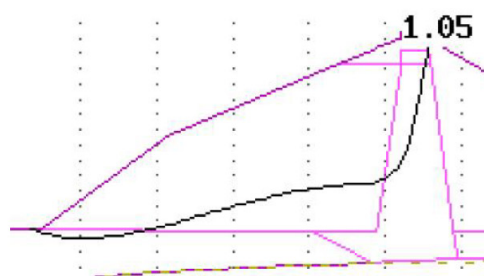
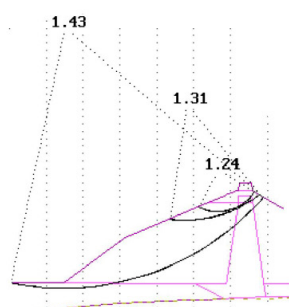


Figur 35. Samma hållfasthet som Figur 34 men med stödbank som ger 20 % förbättring.



Figur 36. Stödbank och nedströmsstabilitet med hållfasthet  $\phi = 30^\circ$  i tät kärnan och  $35^\circ$  i stödfyllningen ger  $F = \text{ca } 1,56$ .

Stabiliteten utan stabilitetshöjande åtgärder åt uppströmsslänten beräknades enligt Figur 37. Resultaten av stabiliteten åt uppströmshållet visar att säkerhetsfaktorn är större än 1,3 om moränen i tät kärnan antas ha friktionsvinkel  $30^\circ$ , dvs ett värde som antagligen var rimligt att anta 1980 i samband med projekteringen av dammen. Om tätjorden däremot antas ha försumbar hållfasthet ( $\phi = 1^\circ$ ) beräknas säkerheten vara i närheten av 1,0, se Figur 37 till höger.



Figur 37. Till vänster med friktionsvinkel med hållfasthet  $\phi = 30^\circ$  i tät kärnan och  $35^\circ$  i stödfyllningen ger  $F = 1,24$  à 1,4. Om hållfastheten i tät kärnan antas ha försumbar hållfasthet ( $\phi = 1^\circ$ ) beräknas säkerheten vara i närheten av 1,0, se figur till höger.

## ÅTGÄRDER

Dammarna som byggda på 1970-talet hade, som ett flertal andra dammar som byggdes på denna tid, lägre dammkrön vid anslutningarna till kraftstation och

utskov än för övriga delar av dammarna. Höjning gjordes därför av betongkonstruktionerna 1989/90. Anslutningarna fick härigenom tätning och våguppspolningsskydd upp till motsvarande nivå som övriga delar av dammarna, se Figur 38.

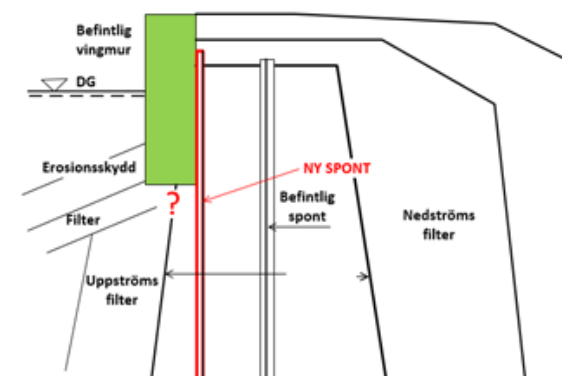
Krönet på dammen invid betongkonstruktionerna byggdes om 1990 för att förhindra överströmning av fyllningsdammarna vid en eventuell överströmning av betongkonstruktionerna. Då svårigheter fanns med att bygga förbi de mekaniska konstruktionerna på uppströmssidan av betongkonstruktionerna uppfördes muren istället på nedströmssidan av krönet.

En spont installerades vid anslutningarna till betongkonstruktionerna. Vidare gjordes i samband med denna förstärkning åtgärder för att höja dammens överdämningsförmåga. Betongmurar byggdes vid anslutningarna invid intag och utskov. Murarna anslöts till fyllningsdammarnas tätkärna med en spont, se Figur 38.



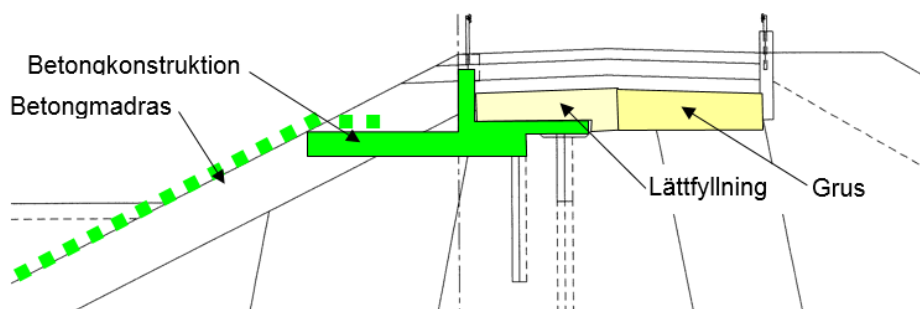
**Figur 38. Exempel på stöd mur för höjning av tätning till motsvarande nivå som tätkärnan för övriga dammen vid anslutning till betongkonstruktion.**

Dammar som byggdes på 1970-talet försågs allmänt med stålsponter i anslutningen och ofta byggdes vingmurar som likaså stack in i fyllningsdammen. Dessa utföranden gjordes för att kunna ha branta släntkoner vid anslutningen på motsvarande sätt som normalt görs för vägbankar som ansluter till brobyggnader. Vingmurarna gick ibland ner under dämningens gränser, vilket dock medförde att otillräckligt utrymme fanns för filter och övergångslager mot uppströms erosionsskydd. Packning kunde vid det ursprungliga byggandet knappast utföras av materialet under vingmuren och sättningar har i flera fall noterats under vingmuren med materialtransport från tätkärnan. Hålrum fanns under vingmuren och material från tätkärnan kunde transporteras ut till erosionsskyddet eftersom filter saknades mellan morän i tätkärnan och blocken i erosionsskyddet. I dammen gjordes 1999 därför en förstärkning med en stålspont som fästes i vingmuren för att täcka hålrummet och förhindra transport av material från tätkärnan mot uppströmssidan genom erosionsskyddet, se Figur 39



Figur 39. En spont monterades 1990 i tättkärnan och fästes i vingmuren från betongkonstruktionen. Sponten avsåg att förhindra att tätjorden i tättkärnan transporteras ut åt uppströmshållet där filterlagren var otillräckliga mellan tätjord och erosionsskydd. Jämför även plan i Figur 30.

Åtgärden bedömdes vid den tidpunkten kunna behöva kompletteras med ytterligare förstärkningar av filterlager och erosionsskydd på uppströmssidan, vilket också gjordes 2004/05 då en betongmadras lades på uppströmsslätten vid vänstra och högra dammens anslutningar, se Figur 40.



Figur 40. Principskiss. Täckning av konen med betongmadras som avslutas i sektion 0/034. Madrassen fästes i en ny betongkonstruktion vid dammkrönets uppströmsdel. Återfyllning gjordes i uppströmsdelen med lättfyllning och med grus i nedströmsdelen.

Vänstra dammens anslutning till kraftstationen stabiliserades och skyddades mot erosion. Befintlig betongkonstruktion i dammkrön förlängdes uppströms. Uppströmsdelen av dammkrönet fylldes med lättfyllning vilket avlastade och därmed förbättrade uppströmsstabiliteten tillsammans med utläggningen av betongmadrassen.

Förstärkningen har genomförts i omgångar 1990 gjordes utläggning av stödbank nedströms vänster damm, som 1999 kompletterades ända upp till dammkrönet. Dammen med slutlig stödbank framgår av Figur 41



Figur 41. Vy över vänstra dammen vid anslutning efter uppbyggnad av stödbank intill betongkonstruktionen. Till höger syns mätkur över mätöverfall för insamling av läckage vid vänstra dammens anslutning till utskovet.

Det fanns även behov av att förbättra stabiliteten åt uppströmshållet. På grund av det begränsade utrymmet valdes att utföra släntförstärkning med betongmadrasser, se Figur 42.



Figur 42. Utläggning av betongmadrass i området för vänster anslutning.

## UTVÄRDERING

Tung trafik på dammen är sedan 90-talet begränsad.

Vid arbetena 2000 till 2006 genomfördes, som ovan beskrivits, ombyggnad av krönet närmast övergångarna till betongkonstruktionerna kombinerat med stödbankar mot nedströmsslänten på vänstra dammen. Åt uppströmshållet lades på betongmadrasser på både på vänstra och högra dammens anslutningar. Stabiliteten bedömdes efter att förstärkningarna genomförts vara acceptabel.

Instrumenteringen uppgraderades också med läckagemätning nedströms de båda anslutningarna. Vidare automatiserades till stor del instrumenteringen. Om rörelserna inte minskade som förväntat beskrevs i förstudien att ytterligare åtgärder i tät kärnan kunde bli aktuella, t.ex. kompaktinjektering.

Rörelserna har hållits under uppsikt. Rörelserna åt uppströmshållet noterades i FDU 2014 fortfarande pågå. Inclinometermätningar under 2006 till 2013 indikerar rörelser åt uppströmshållet.

## Bilaga B: Praktikfall 2

Hela detta avsnitt är författat av Åke Nilsson WSP (uppdragsansvarig och handläggare), Johan Holst WSP (biträdande handläggare) samt Ingvar Ekström SWECO (underkonsult).

### UPPTÄKT OCH BESKRIVNING AV SVAGHETERNA

Praktikfall 2 är taget från en anläggning där fyllningsdamarna vid anslutningarna närmast kraftstationen och utskov har undersökts och åtgärder genomförts för att öka dammsäkerheten. Undersökningarna och studierna av stabiliteten samt projekteringen av förstärkningar sammanfattas i det följande.

Vid inspektion anmärktes på en sättning i vägbanan vid anslutning vänster fyllningsdamm och intaget. En observant skoteråkare upptäckte en spricka i vänster fyllningsdamm i anslutning till intagspartiet. Sprickan bedömdes börja vid betongkanten till kraftstationen och löpte ca 13 m mitt i körbanans mitt. Vidare noterades att sprickan i slutet böjde av nedströms mot räcket. Som djupast mättes sprickan 0,6 m med tumstock, se Figur 43 och Figur 44.



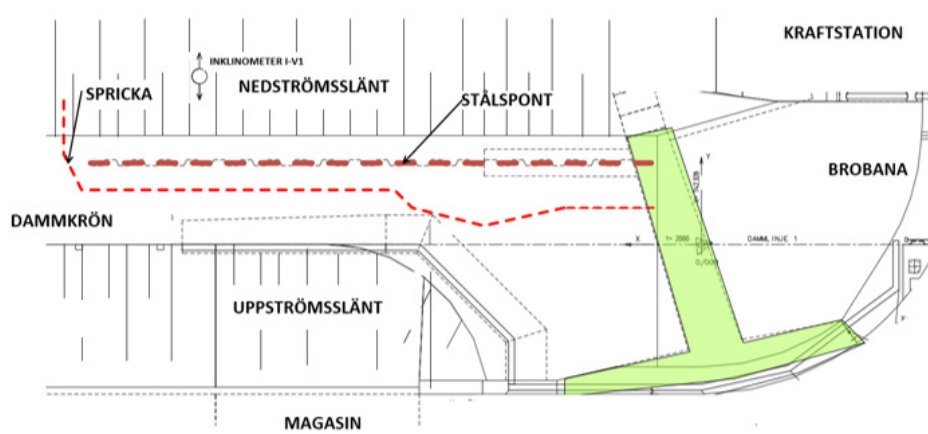
Figur 43. Spricka i vänster fyllningsdamm i anslutning till intagspartiet.



Figur 44. Spricka i vänster fyllningsdamm i anslutning till intagspartiet.



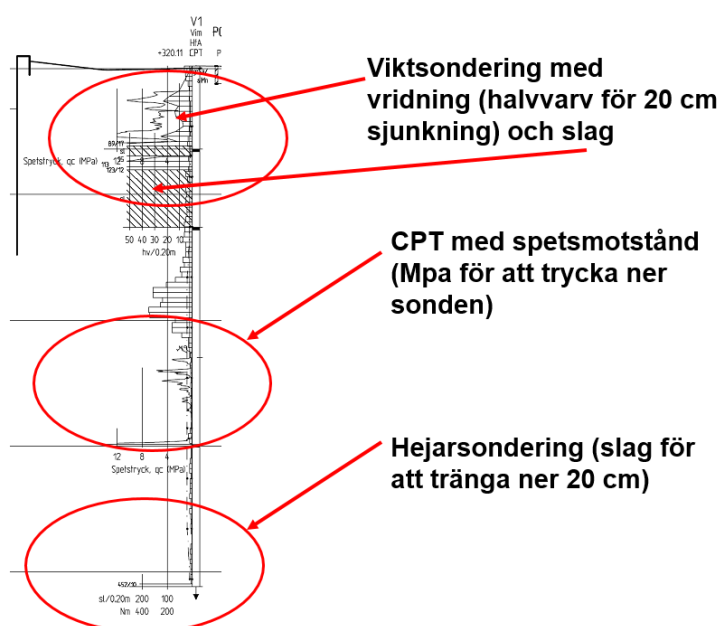
Figur 45. Vänstra fyllningsdammens anslutning. Lutande belysningsstolpe och vägräcke tyder på rörelser. FDU-besiktning.



Figur 46. Plan vänster anslutning till betongkonstruktionen, stålspons och spricka.

## GEOTEKNISK UNDERSÖKNING

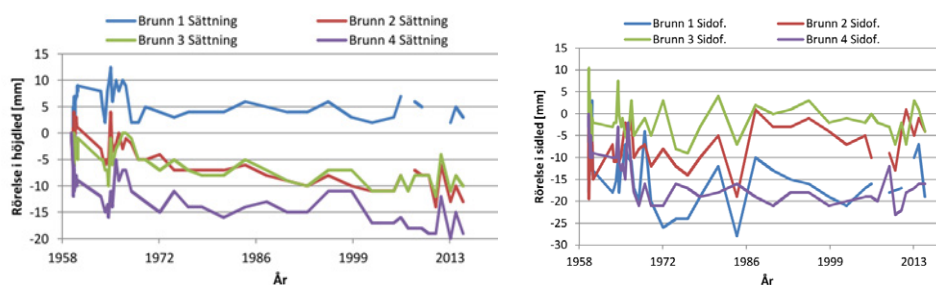
Undersökningar med viktsondering, spetskraftsondering och hejarsondering gjordes i ett tiotal punkter närmast övergångarna till betongkonstruktionerna. I partiet där sponter finns ut från konstruktionerna konstaterades att tät kärnan under grundvattenytan mestadels var mycket lös vilket indikerade mycket låg hållfasthet, Figur 47.



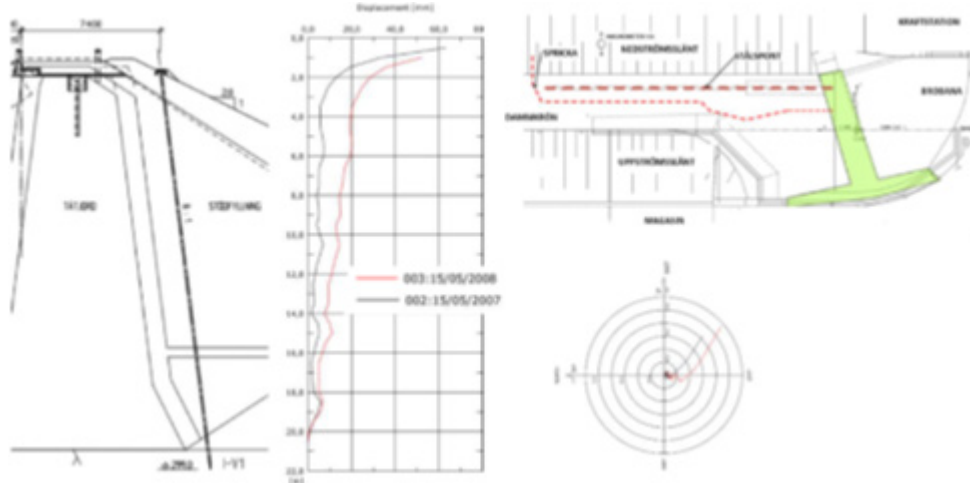
Figur 47. Spetskraftsondering till ca 20 m djup i tät kärnan intill vänster anslutning.

## RÖRELSEMÄTNINGAR

Närmast utskovet finns en mätbrunn mitt i dammkrönet för rörelsemätning. Från det att dammen färdigställdes 1958 fram till 2013 har rörelserna uppmätts vara små. Totalt har uppmätts 20 mm sättning (0,6 mm/år). Sidorörelsen har varit i samma storleksordning totalt ca 20 mm i riktning mot nedströmshållet.



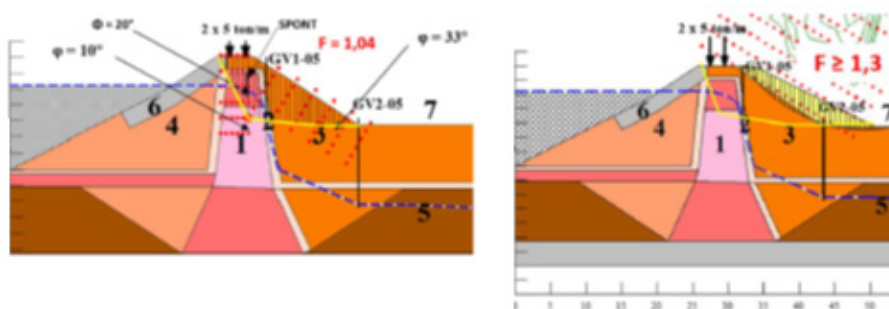
Figur 48. Brunn närmast utskovet, sättning (vänster bild), sidorörelser (höger bild).



Figur 49. Rörelsemätningar med inklinometer – vänster anslutning 2007 – 2008. Till höger i figur indikeras sprickbildningen i plan och rörelseriktning för uppmätta rörelser.

## STABILITET

Vid stabilitetsberäkning antogs att stödfyllningen hade en friktionsvinkel av  $33^\circ$ . Täckkärnans hållfasthet minskades successivt vid beräkningarna tills den beräknade säkerhetsfaktorn blev nära 1,0. Vid en antagen friktionsvinkel av  $20^\circ$  i den övre enligt sonderingen fastare delen och till  $10^\circ$  i den enligt sonderingen mycket lösa delen, erhöles en säkerhetsfaktor på 1,04 i beräkningen. Efter utläggningen av en stödbank enligt högra bilden i Figur 50 beräknades säkerheten till något högre än 1,3 vid användande av samma hållfasthet som antagits utan stödbank. Då befintliga säkerheten i verkligheten var större än 1,0 bedömdes säkerhetsfaktorn 1,3 vara acceptabel. Säkerhetsfaktorn hade enligt beräkningarna ökat med ca 25%, vilket bedömdes vara en acceptabel höjning av säkerhetsfaktorn.

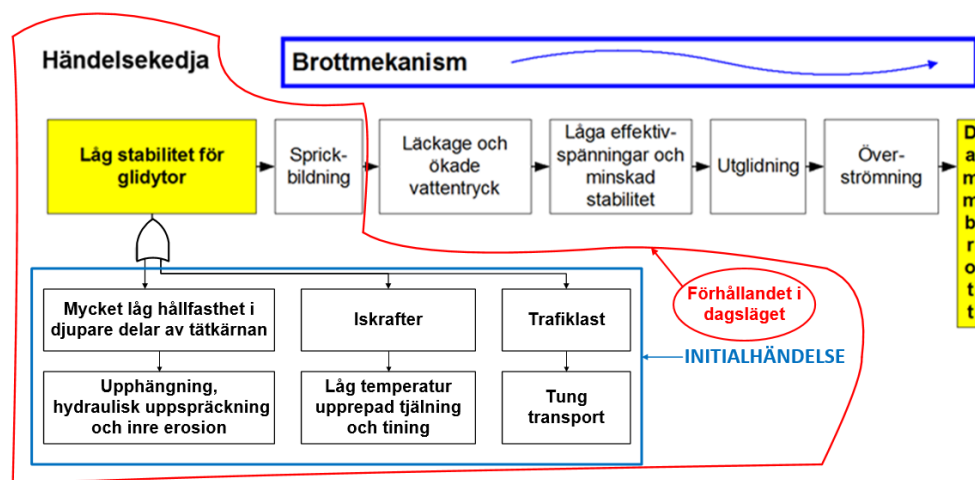


Figur 50. Beräkning av säkerhetsfaktorn före och efter förstärkning med en stödbank.



## FELMODSBESKRIVNING

Med underlag av de ovan beskrivna undersökningarna och utvärderingarna bedöms att möjliga initierande faktorer kan vara valvbildning som ger hydraulisk uppspräckning, tjälskador och/eller tung trafik. Dessa initierande faktorer kan tänkas ge låg stabilitet, som utvecklas vidare enligt vedertagna brottmekanismer för en fyllningsdamm, se Figur 51

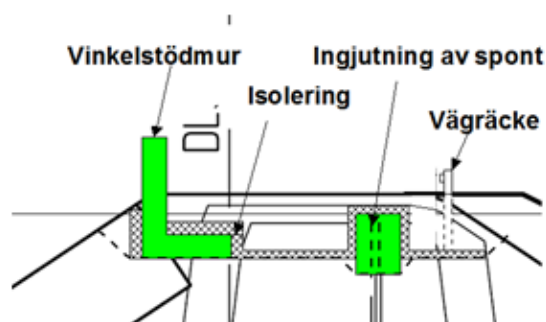


Figur 51. Initialhändelse och brottmekanism indikerad i förstudie.

## ÅTGÄRDER

För att förbättra stabiliteten åt nedströmshållet, som bedömdes ha hög prioritet, lades 2006 stödbankar ut mot nedströmlänterna från dammkrönet både på vänstra och högra anslutningarna till betongkonstruktionerna. Bankarna beräknades höja säkerhetsfaktorn med ca 25% för glidytor som resulterat i noterade sprickbildning i vänstra anslutningen, se Figur 50. Vidare isolerades tät kärnan närmast anslutningarna enligt Figur 52.

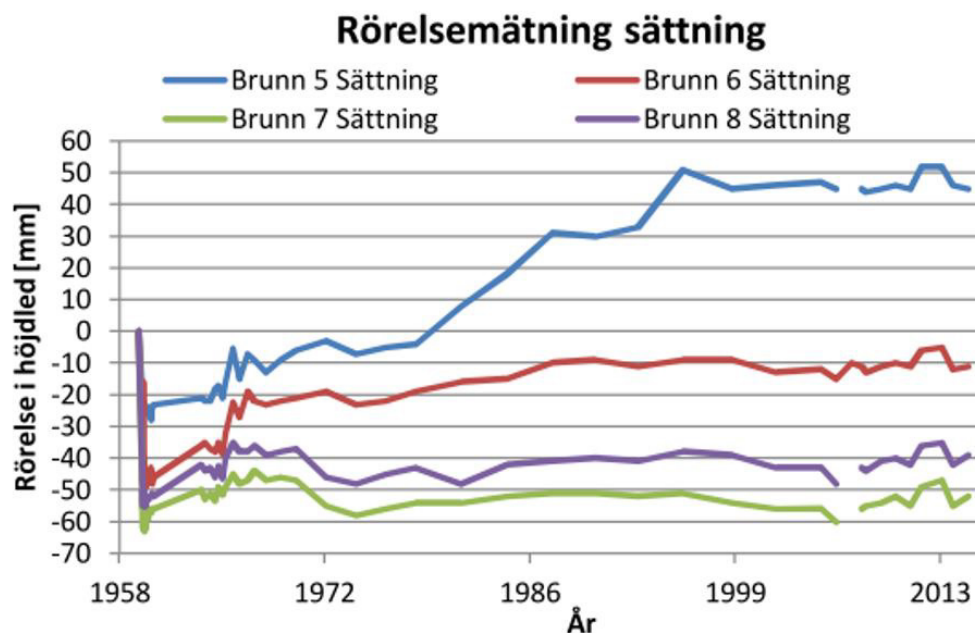
Tillsynen utökades med förtätade inmätningar av dubbar på dammkrönet. Vidare installerades, för att övervaka rörelserna på djupet, två inklinometrar ned till berg i vänstra anslutningen och en inklinometer på högra anslutningen. På uppströmsslänten av högra anslutningen till utskovet utfördes 2011 en förstärkning av filterpunktmadrass (betongmadrass).



Figur 52. Uppgradering 2006 innefattade vinkelstödmur närmast utskovet för att tätningens nivå tillsammans med isolering av tåtkärnan närmast utskovet där överbyggnaden var liten.

## UTVÄRDERING

Vid anslutningarna har inga nya synliga sprickor rapporterats efter det att ovan beskrivna åtgärder genomfördes. Efter utläggning av stödbankar mot nedströmsslänterna närmast dammkrönet visar inmätningar av mätpunkter på dammkrönet intill betongkonstruktionerna avstannande rörelser. En tidigare hävning som tidigare uppmätts avstannade redan 1998, dvs fem år innan sprickbildningen noterades, se Figur 53. Mätningar med inklinometer visade vid senaste mätningen 2009 små rörelser i närheten av mätnoggrannheten, varefter inga nya mätningar utförts.



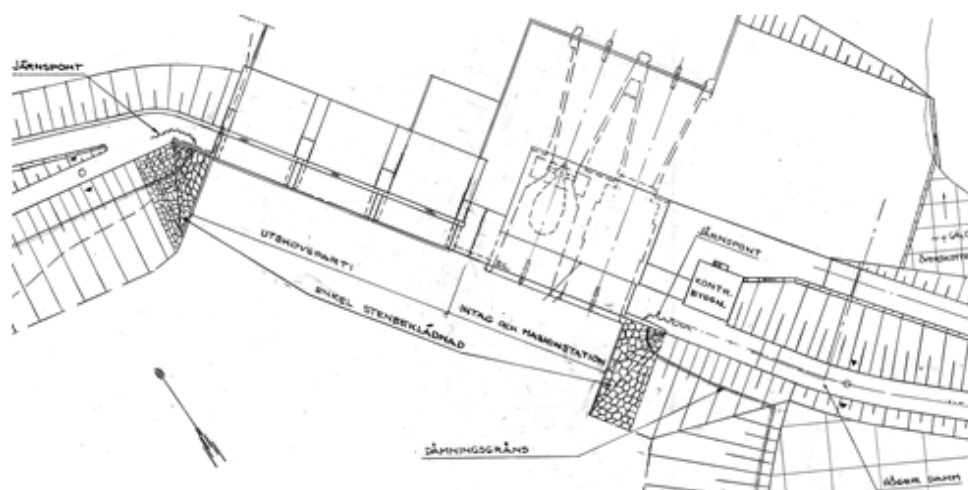
Figur 53. Inmätningar av sättningar på vänstra dammens krön. Brunn 5, som finns närmast betongkonstruktionen och visade markanta hävningar fram till 1998, visar avstannande rörelser.

## Bilaga C: Praktikfall 3

### BESKRIVNING AV ANLÄGGNINGEN

Maskinstationen med utskov uppfördes 1976 – 1980 och jorddammsanslutningarna färdigställdes 1978. Fyllningsdammarerna är av konventionell typ för sin tid med en förhållandevis bred vertikal, central tåtkärna, dock bara försedd med ett filter mot stödfyllningen, som är sandig och grusig. Filterkriterier uppfylls inte jämfört med RIDAS 2012. Berggrunden var kraftigt uppsprucken och rensning utfördes sträckvis till 2 m under ursprunglig bergyta innan grundläggning påbörjades. Bruksåtgången var vid berginjekteringen påfallande stor med mellan 10 – 100 kg cementbruk per bormeter. Stora mängder utflutet bruk trängde under injekteringen upp nedströms vänster dammanslutning.

Konstruktionen är typisk för sent 60-tal och 70-talet när anslutningarna mellan betongkonstruktioner och fyllningsdammar kom att göras allt mindre för att spara utrymme och byggnadsmaterial. I den nedre delen av anslutningen hålls fyllningsdammen uppe till ungefär halva dammens höjd av en berggrundlagd stödmur vinkelrätt dammlinjen åt uppströmshållet. För att hålla uppe övre delen av anslutningarna utfördes en betongvinge som ligger parallellt med dammkrönet med den yttre delen utförd som en konsol, se Figur 54 och Figur 55.

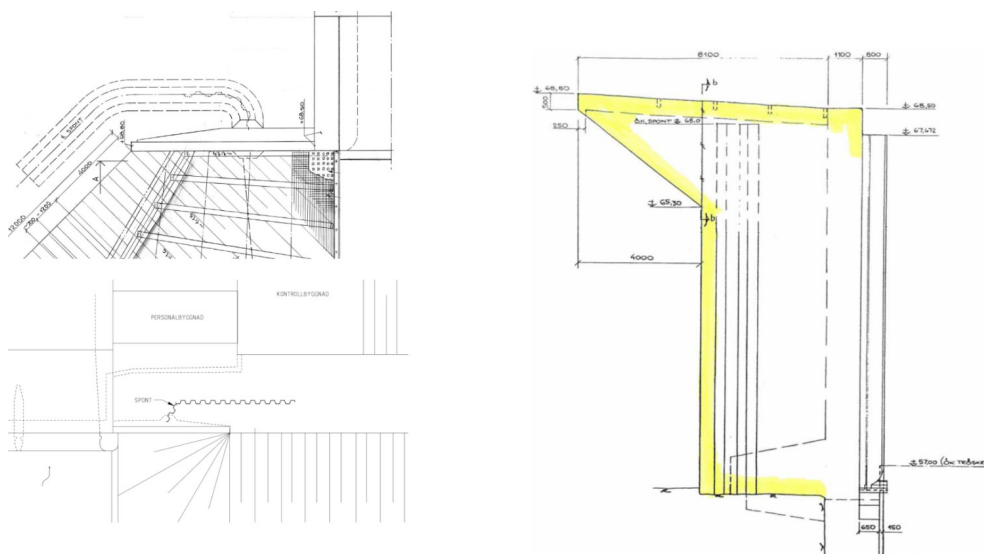


Figur 54. Plan över anläggningen.

Syftet med betongvingen och dess konsol är att kunna ha branta släntkoner mot betongkonstruktionerna, liknande utförandet av vägbankar vid brofästen och GC-tunnlar under vägar. Betongvingarna kom successivt att utföras mindre och mindre vid den tid som dammen byggdes. Konsolens underkant följer släntytan i konan. Detta medför att det inte går att packa fyllningsmaterialen under konsolens undersida, där utrymme också saknas för filter och övergångslager mellan tåtkärna och erosionsskydd, varför tåtkärnan under konsolen kom att i princip ligga an mot erosionsskyddet. Detta leder till att en öppen läckageväg uppkommer mellan

tät kärnan och dammens uppströmsslänt vid vattendränkningsättningar vid dämning, varvid materialet under vingen sjunker ihop.

Betongvingen ansluter till fyllningsdammens tät kärna med en 12 m lång stålspont som står vinklad i en båge från vingen på uppströmssidan på respektive sida om betongkonstruktionerna. Stålsponten är fastgjuten mot bergytan i grundläggningsytan. Både fyllningsdamm och betongkonstruktioner är i anslutningen grundlagda på berg.



Figur 55. Vingmurskonstruktion med konsol (vänster anslutning överst, höger anslutning under) och längdsektion visande vänster vinge (till höger).

## UPPTÄCKT OCH BESKRIVNING AV SVAGHETEN

Några år efter anläggningens färdigställande uppstod sättningar i fyllningsdammarnas krön i farbanan intill intag och utskov, mestadels i vänster anslutning, men även på höger sida. Sättningarna fylldes fortlöpande igen allteftersom de uppträdde, men återkom successivt. Dokumentationen av de första sjunkgroparna är summarisk och enligt uppgift fylldes ett antal gropar igen utan att omfattningen av dessa dokumenterades närmare. Det är oklart om gropar återkom i samma lägen, eller om det var i nya lägen när nya sättningar beskrivs. Under början av 1980-talet började även sättningar uppträda i uppströmsslänten i stenkornerna vid betongvingarna och personal-, och kontrollbyggnaden som är grundlagd i höger damm visade en tendens till en sättningsrotation åt uppströmshället.

## FÄLTUNDERSÖKNINGAR OCH MÄTDATA

För att undersöka omfattningen av avvikelserna i dammarna utfördes 1988 viktsondering, rörborrning, temperaturmätning och spårämnesförsök. Sonderingarna visade att tät kärnan var löst till mycket löst lagrad längs stålsponten på båda sidor om betongkonstruktionerna. Tät kärnan var som lösast vid spontens infästning i betongpelaren, framförallt i vinkeln mellan uppströms

betongvinge och sponten. Det lösa lagret i tät kärnan bredde på vänster sida ut sig från 2 – 3 m under dämmningsgräns och ner till grundläggningsnivån. Förhållandena på höger sida var något bättre.

Tät kärnan på vänster sida var kraftigt urspolad på de understa två metrarna mot grundläggningsytan på uppströmssidan av sponten. Urspolat material påträffades även på nedströmssidan av sponten, men något högre upp. Den hydrauliska konduktiviteten uppmättes i de urspolade zonerna till  $10^{-4}$  m/s, vilket är 1000 gånger högre än uppgifterna från utförandet av dammen. Inga materialprover togs på höger sida.

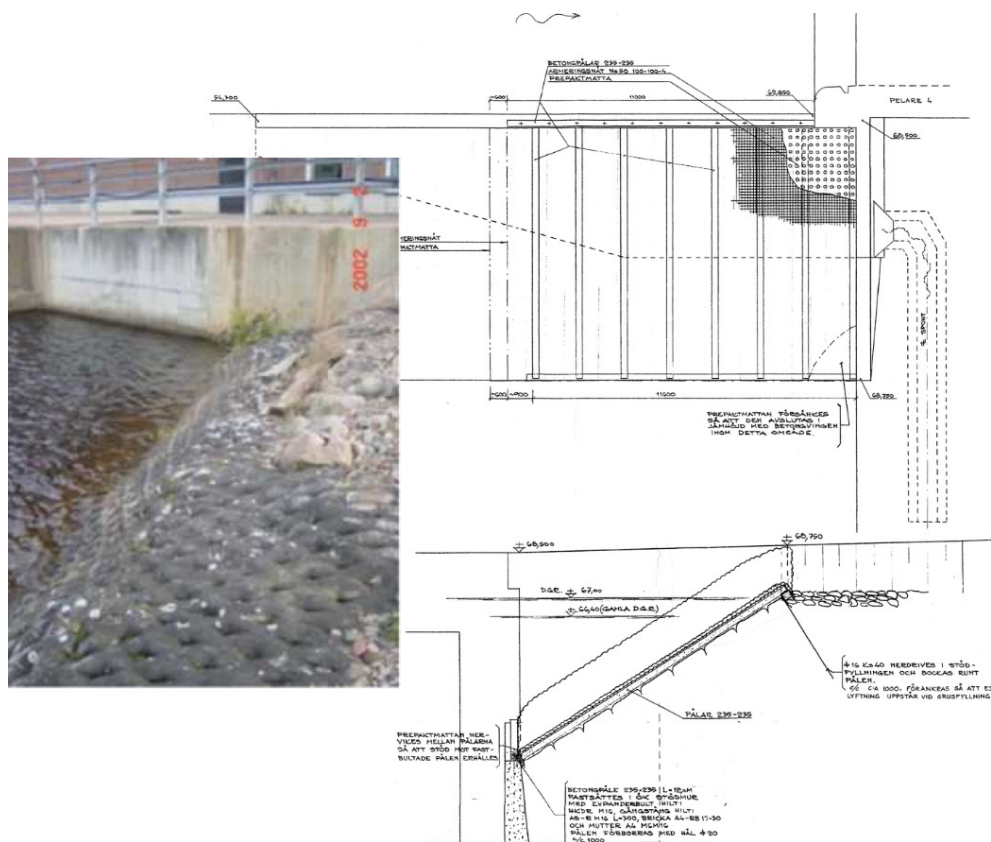
Spårämnesförsök utfördes i vänster damm genom pumpning i vattenståndsroren. Vid detta konstaterades att transporttiden genom tät kärnan var snabb, runt 2m/timme. Försöken visade även att den huvudsakliga läckagevägen befann sig i närheten av betongkonstruktionens sida, vilket också bekräftades av temperaturanalysen.

Två mätdubbar fanns i vänster fyllningsdammsanslutning närmast området där sättningar uppträdde med som mest 34 mm, emedan sättningarna i dammen i övrigt var små. Dessa visade signifikant högre sättningar än övriga mätpunkter. På höger sida fanns inga dubbar i anslutningen.

Nivåmätning i vattenståndsror i anslutningarna gav ingen indikation om inträffade förändringar. Baserat på temperaturmätning i vattenståndsroren beräknades läckaget genom vänster dammanslutning till ca 40 – 60 l/s, med som mest ca 7 l/s m invid utskovsväggen. 20 m från betongväggen var läckageflödet endast någon procent av det invid övergången.

## ÅTGÄRDER

Utifrån skadornas lägen och anslutningens konstruktion bedömdes den huvudsakliga orsaken till sjunkgruparna vara att material från tät kärnan successivt spolats ur åt uppströmshållet under konsolen mellan stenblocken i erosionskyddet vid vattenstånds förändringar och vågrörelser. Detta då de mest omfattande svagheterna och sättningarna förekom uppströms om sponterna mot betongvingarna. Inströmning till vänster utskov, samt till intaget bedömdes kunna ha accelererat förloppet.

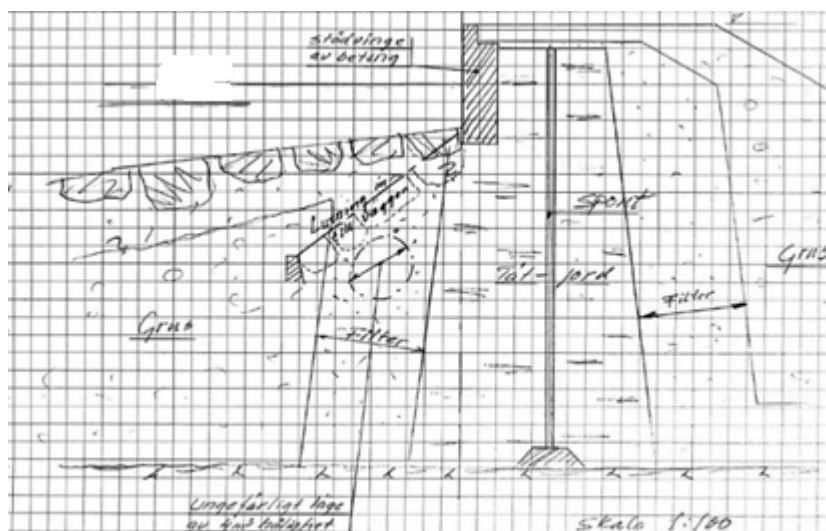


Figur 56. Plan och tvärsnitt över reparation med betongmadrass på höger sida.

För att förhindra fortsatt materialtransport åt uppströmshållet lades hösten 1988 betongmadrassar ut på uppströms stenkonor på fyllningsdammarna, se Figur 56. Madrassen var av typ prepaktmatta, som är en dubbel fiberduk som placeras på slänten fylls med betong. Utrymmet mellan madrassens undersida och stenkonan fylldes med grus för att erhålla en filterverkan. Gruslagret utfördes 35 – 50 cm tjockt.

Erosionsskyddet lyftes bort på delen av konen som var ovanför vattenytan. Betongpålar lades därefter ut i slänten för att utgöra stöd för betongmattan och skapa utrymmet för grusfiltret mot slänten. Balkarna förankrades i slänten med kamstål och bultades ihop med vingmuren i sin överkant, samt mot stödmuren i sin underkant. Erosionsskyddet modifierades i kanten mot betongmattan så att denna kunde försänkas och vikas in i slänten så att de olika materialen därigenom kunde hamna i samma nivå i övergången mellan dessa.

Vid utläggningen av gruslagret påträffades i den vänstra anslutningen ett hålrum på ca 4 m<sup>3</sup> under stenblocken i konans yta invid stödmuren i uppströmssidan av anslutningen till utskovet mellan +60 till +62 m, se Figur 57.

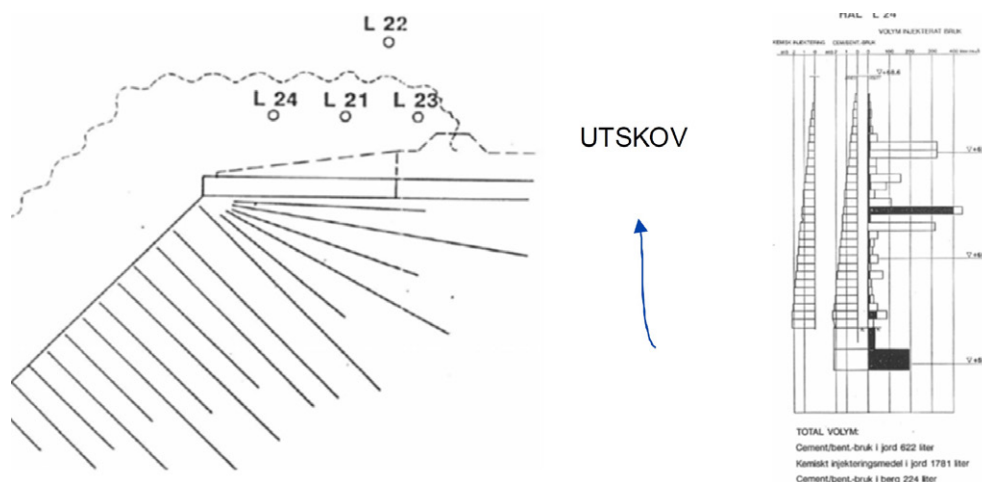


Figur 57. Kavitet i uppströmsfilter i vänster damm invid betongvingens konsol 1988.

## INJEKTERING

För att bromsa den skadeutveckling som sonderingarna antydde så beslutades om en partiell injektering i dammen och i berggrunden under anslutningen. Provinjektering utfördes i fyra punkter i vänster dammanslutning där flest sättningar hade noterats genom åren. Höger anslutning injekterades inte. Borrhålen utfördes till 20 m djup ner i berggrunden. Injekteringen bestod av dels cement/bentonitbruk och dels av jordinjektering med kemiskt injekteringsbruk. Totalt injekterades 8,7 m<sup>3</sup>. I tåtkärnan injekterades 2,4 m<sup>3</sup> cementbruk och 6,1 m<sup>3</sup> kemiskt injekteringsmedel. I berget injekterades 257 liter cementbruk, motsvarande ca 21 l/m borrhål. Tre av injekteringspunkterna var uppströms om sponten och en nedströms. Bruksåtgången var snarlik i samtliga fyra punkter, men en i huvudsak ökande bruksåtgång mot grundläggningsytan och lokalt stor bruksåtgång där lösa lager noterats vid en av sonderingarna.

Relativt stora mängder injekteringsmedel kunde pressas in i tåtkärnan, vilket tyder på att ett flertal uppluckrade lösa skikt förekom i denna. Speciellt stora volymer kunde pressas in vid bergytan, där den maximala volymåtgången på 400 l/nivå uppnåddes i två av de fyra hålen, se Figur 58



Figur 58. Injektering i vänster anslutning, plan och exempel på bruksåtgång.

De injekteringar som utfördes bedömdes ge ett osäkert resultat, men ansågs vara tillräckliga då konsekvenserna av ett dammhaveri i sektionen utifrån dåvarande konsekvensklassning ansågs vara ringa. Det ansågs därför vara möjligt att acceptera den osäkerhet om tätningens utförande som kvarstod efter genomförd reparation då åtgärden kompletterades med ny instrumentering för att kunna fånga upp eventuella nya förändringar.

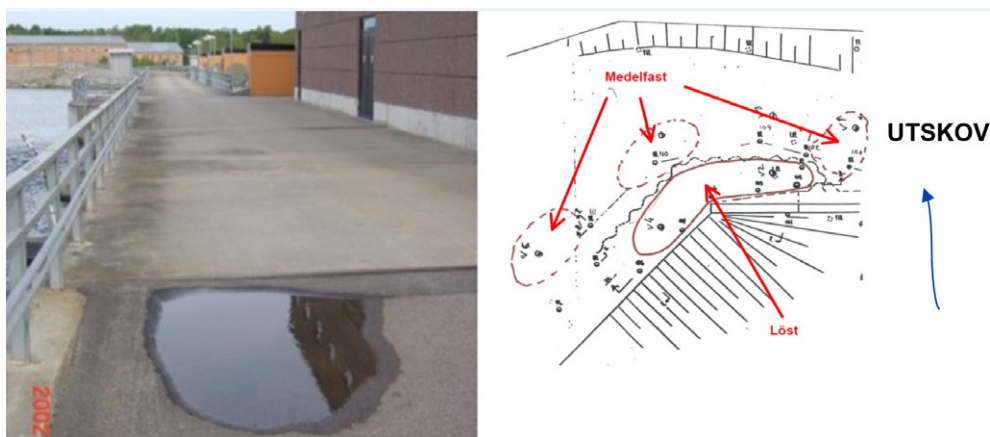
## SÄTTNINGAR OCH FORTSATTA UNDERSÖKNINGAR

Kompletterande instrumentering installerades 1989. Detta omfattade vattenståndsrör och dubbar för deformationsmätning. Enligt ett borrprotokoll påträffades en hålighet med ca 0,5 m djup mellan sponten och betongvingen i höger anslutning när asfalten revs för borringen. När borring sedan utfördes för installation av ett vattenståndsrör i denna punkt sjönk tätkärnan ihop och en grop med ca 1 m djup och måtten 1 × 1 m uppkom. Sponten var synlig i gropen. Efter inledande bormotstånd sjönk borren utan motstånd mellan nivåerna 4 – 11 m under tätkärnans överyta. Även mellan 12 – 17 m djup sjönk borren fritt. Därifrån och ner till bergytans nivå på 18,3 m djup fanns ett svagt bormotstånd. I övrigt finns inga speciella noteringar från instrumenteringen.

Nya sjunkhål och sättningar uppkom i anslutningarna efter åtgärderna 1989 och sättningen i kontroll-, och personalbyggnaden i anslutningen mot den berggrundlagda maskinstationen fortsatte. Från 1992 finns en notering att vägbanans överyta låg något lägre i höger anslutning, se Figur 59.

1996 hade kontrollbyggnaden totalt sjunkit ca 30 mm. Detta år noterades även en sättning i glacisen i släntkonen i vänster damm invid maskinstationen vänster om betongmadrassen. Denna anges till 0,4 × 0,4 m med ca 1 m djup. Ett antal stenar i glacisen lyftes bort med grävmaskin och en del morän placerades enligt uppgift i skadeområdet. Sättningen märktes ut och fylldes i med sand. Insjunkningen i krönet anges till ca 1 × 2 m med 5 cm djup, vilket troligtvis avser höger anslutning. En smärre sättning fanns även vid den närmaste spelkuren på vänster sida.





Figur 59. Till vänster: sättning i höger anslutning 2002. Till höger: sammanställning av sonderingsresultat i vänster anslutning.

Kompletterande undersökningar genomfördes 2004 som en del av en anläggningsövergripande genomlysning inför en flödesanpassning. Anslutningarna mellan fyllningsdammarna och betongkonstruktionerna hade asfalterats över under början av 1990-talet, varför skadeförloppet inte kunde följas lika tydligt i dammarnas överyta som tidigare. Tanken var efter 1988 att eventuella förändringar skulle fångas av instrumenteringen. Sättningar i asfalten i anslutningarna till betongkonstruktionerna kunde dock ses, framförallt på höger sida. Vid provgrovsgrävning i anslutningarna 2004 konstaterades det att sättningen i anslutningen till höger damm successivt asfalterats över, varför asfalten punktvis kunde vara över 25 cm tjock. Dessa åtgärder har dock inte dokumenterats varför det är svårt att veta när sättningarna uppkommit eller när de asfalterats över.

Sonderingarna 2004 fokuserades till ungefär samma punkter som 1988 för att kunna undersöka om förändringar uppträtt och värdera effekten av injekteringen. Sondering utfördes även i punkter där temperaturmätningarna indikerat ökat läckage sedan 1988.

Resultatet visade att den injektering som utfördes i vänster fyllningsdamm 1988 förefaller ha haft en positiv inverkan på tät kärnan. Tät kärnan var 2004 på höger sida lös till mycket lös, medan den på vänster sida var mellanfast till löst lagrad, dvs. i något bättre kondition än motsvarande område i höger fyllningsdamm, men ändå påfallande lös, ner till grundläggningsnivå. Område med lös lagring förekom på både vänster och höger sida i anslutning till sponterna. I höger damm var tät kärnan även mycket löst lagrad i anslutningen till betongkonstruktionen i dammlinjen. Detta är i läget för sättningen i Figur 59. I vänster damm var problemen framförallt fokuserade till sponten och dess uppströmssida.

Sonderingarna i vänster anslutning förefaller visa att tät kärnan förbättrats något efter de reparationsarbeten som genomfördes 1988. Temperaturmätningar indikerade dock en dubblering av läckageflödet genom vänster anslutning i jämförelse med omedelbart efter injekteringen. Detta tyder på en fortsatt urlakning av finmaterial från tät kärnan

Provgropsgrävningarna visade att tätkärnans överyta i höger fyllningsdamm i de undersökta punkterna var belägen upp till ca 0,4 m under projekterad nivå i området mellan kontrollbyggnaden och anslutningen till betongkonstruktionerna på nedströmssidan av sponten. Då tätkärnans krönnivå avvek ungefär lika mycket i de fyra provgropar som utfördes, även i de punkter där sonderingen visade på mycket fast lagring, så drogs slutsatsen att nivåavvikelsen härrörde från återställningen efter åtgärderna 1988. Vidare saknades såväl filter som isolerskivorna som enligt foto från byggtiden båda skulle finnas på tätkärnans överyta. Åtgärder för att återställa tätkärnan planerades till 2007.

### ÅTGÄRDER 2007 OCH 2012

År 2007 genomfördes dammsäkerhetshöjande åtgärder och som en del av dessa ingick justering av anslutningarna mot betongdammen. I anslutningarna schaktades tätkärnan fram närmast betongdammen och så lång ut från denna som krävdes för att träffa på tätkärna med överkant lika som projekterad nivå på +68,0.

Vid den högra anslutningen visade sig tätkärnan närmast betongdammen ligga på en nivå ca 0,8 m lägre än projekterad. Lägsta nivån hade tätkärnan uppströms sponten, precis där denna är fäst i vingmuren. Här var nivån 1,25 m lägre än projekterat, d.v.s. 25 cm under dämmningsgränsen. Tätkärnan var dock i huvudsak relativt fast, även om det uppströms sponten var svårt att packa tätjorden vid återställningen, då vatten trängde upp. Knappt 20 m från betongdammen var tätkärnans nivå mindre än en dm under projekterad och utanför denna punkt utfördes ingen åtgärd. Figur 60 visar framschaktad tätkärna vid höger och vänster anslutning.



Figur 60. Framschaktade anslutningar 2007. Dåligt med utrymme på uppströmssidan av sponten i vänster anslutning för packning.

Vid den vänstra anslutningen var tätkärnans överyta endast 25 cm för låg invid betongen och något lägre uppströms sponten, dock över DG. Åtgärden, som utfördes lika som vid den högra anslutningen, avbröts ca 20 m från betongen då befintlig tätkärna där hade projekterad nivå. Figur 60 visar framschaktad tätkärna vid vänster anslutning. Anslutningarna asfalterades därefter över igen.

För att på ett bättre sätt kunna följa en eventuell skadeutveckling beslutades 2012 att isolerskivorna skulle tas bort och ersättas med ett mer följsamt material för att minska risken för valvbildning under dessa, samt att asfalten skulle tas bort och ersättas med en körbana av grus. Anslutningarna avtäcktes och inspekterades. I höger anslutning påträffades en markant sättning med ca 12 cm djup och en diameter av ca 1,5 m, se Figur 61. Ingen motsvarande deformation kunde ses i överbyggnaden eller i krönet, varför det antogs att denna sättning uppkommit vid packningen av fyllningen ovanför isolerskivorna 2007. Sättningen ligger strax till höger om änden av konsolen i dammens uppströmsslänt, uppströms om sponten, motsvarande området på vänster sida där kaviteten på 4 m<sup>3</sup> påträffades i uppströmsfiltret vid utläggningen av betongmattorna 1988.



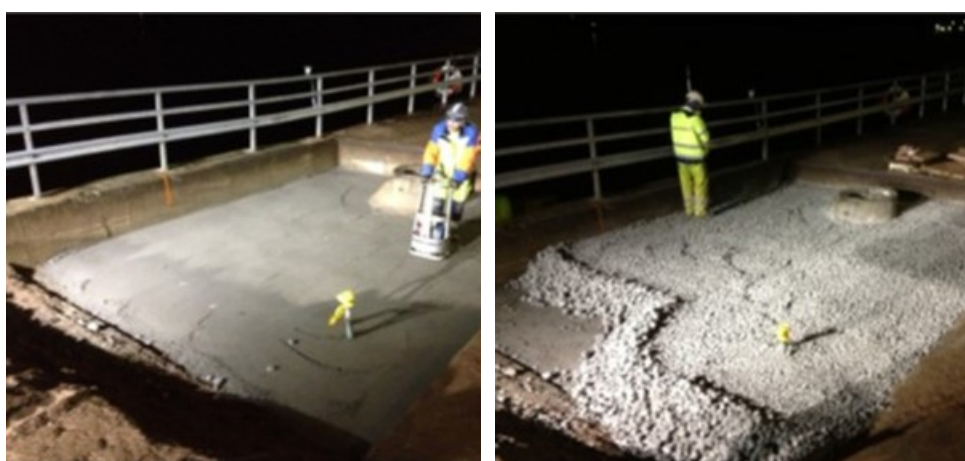
Figur 61. Sättning i höger anslutning 2012.

Även i vänster anslutning påträffades en avvikelse i direkt anslutning till konsolen, där tatkärnan som återstälts 2007 hade ånyo eroderat ut mot uppströmshållet, se Figur 62. Skadan var dock ytlig och bedömdes bero på avrinnande ytvatten. Att erosionen uppkommer beror sannolikt på att detta område ligger mot betongvings underkant där erforderligt stöd för tatkärnan saknas.



Figur 62. Sättning i vänster anslutning 2012.

Tätkärnan återställdes i de skadade partierna. Vänster urspolning försågs med sand mot konsolens undersida. Kompletterande instrumentering i form av slangställningsmätare lades ner längs sponternas sidor och längs betongkonstruktionen i de avsnitt där tätkärnan konstaterats vara lös. Ny isolering av expanderat glas fylldes ut och krönet återställdes utan asfaltering för att underlätta framtida observationer, se Figur 63.



Figur 63. Återställning av dammanslutningar 2012. Till vänster utläggning av filter, till höger av expanderat glas som isolering.

## UTVÄRDERING

Skadorna bedömdes ha flera huvudsakliga orsaker, varierande beroende på skadeområde. Orsakerna bedömdes delvis ha samverkat och manifesterat sig i närheten av varandra. Dessa kan sammanfattas:

- Bristande packning av tåtkärnan kring sponten pga. utrymmesbrist mot betongvingen och svårigheter att packa i spontens vindlingar. Spontens infästning mot uppströms vinge bedöms ha försvårat packningen ytterligare. Foto från byggtiden visar också att tätmaterial fylldes upp förhållandevis högt mot sponten utan mothåll av filter eller stödmaterial från sidorna. Det har inte påträffats några speciella uppgifter eller fotografier från utförandet av tåtkärnan runt sponten. Vedertagen praxis vid utförande av tätning runt sponter vid denna tid innebar att tåtkärnan packades med vibroplatta runt sponten. Utrymmet mellan spont och vingmur är litet varför packning med vält inte kunnat utföras på en så stor yta som vanligtvis varit brukligt. Med den aktuella utformningen går det inte att packa effektivt i utrymmet mellan vingmur och spont. Packningen med vibroplatta utfördes vanligtvis till en högre höjd än den kringliggande tåtkärnan varefter kringfyllning och överfart med vält så nära sponten som möjligt utfördes. Detta medför att tätjorden kring sponten kom att packas på den torra sidan av optimum, vilket medför att sämre packningsgrad uppnås. Vid dämning sker vattenmättningsättningar varvid friktionsvinkeln i området kring sponten sjunker, eventuellt så mycket att effektivspänningen blir noll pga. upphängningar på de kringliggande konstruktionerna. Möjligtvis blir totalspänningarna så låga att ingen konsolidering sker.
- Fri strömning längs spontens yta orsakat av en sidoförskjutning av sponten (beräknad till 3 – 5 mm horisontellt) vid ensidig vattenlast, eventuellt i kombination med skador på spontlåsen. Detta medför en materialförlust och kan orsaka urspolning av tåtkärnan med påföljande förhöjd konduktivitet.
- Filter saknas mellan tåtkärna och erosionsskydd under betongvingens konsol åt dammens uppströmssida. Detta bedömdes främst vara ett lokalt problem, som dock hade potential att fortskrida utan åtgärd. Konstruktionsdefekten påverkar framförallt området mellan sponten och betongvingen ut mot konsolen, där tåtkärnan satt sig upprepade gånger. Detta motverkades till stor del av utläggningen av betongmadrasserna. Denna felmod förklarar dock inte helt kaviteten under erosionsskyddet i vänster damm.
- Brister i injekteringen av berggrundläggningen pga. den uppspruckna bergytan och svårigheter att uppnå erforderliga tryck. Detta kan ha medfört en finmaterialförlust mot grundläggningsytan.
- Packning mot vertikala betongkonstruktioner. Lokala ojämnheter med marginella utåtlutande delar av betongkonstruktioner medför bristfällig packning mot betongen.

## ERFARENHETER

De erfarenheter som drogs utifrån undersökningarna och åtgärderna på dammen sammanfattades enligt nedan:

- Utförande med stödvinge och konsol för att minska anslutningskonstruktionens längd är direkt olämpligt.
- Utrymme för filter och övergångslager måste säkerställas i alla punkter av dammkroppen.
- Injektering av ytberg måste utföras med omsorg och kontrolleras väl.
- Spontar in i tät kärnan som läckageförlängning i anslutning till betongkonstruktioner är olämpligt. Detta pga. svårigheterna att packa tät kärnan tillfredsställande kring spanten, samt risk för upphängning eller läckagevägar och nedsatt hållfasthet i tät kärnan vid deformation av spanten vid uppdämning.

Dammen är idag försedd med omfattande instrumentering och båda anslutningarna är på nedströmssidan skyddade med stödbankar utförda med övergångslager och filter mot stödfyllningen. På uppströmssidan skyddas anslutningarna av betongmadrasserna. Sammantaget har detta bedömts tillräckligt för att ytterligare åtgärder inte ska vara erforderliga i dagsläget. I detta har vägts in att ytterligare sättningar är sannolika med tanke på de kända svagheter som finns, dock inte av sådan omfattning att de med inbyggda skyddsbarriärer inte är hanterbara. Möjligheten till bl.a. kompaktinjektering har dock utretts som ett sätt att öka densiteten i tät kärnan och därigenom minska framtida deformationer i dammkroppen.

## Bilaga D: Praktikfall 4

### UPPTÄCKT OCH BESKRIVNING AV SVAGHETER

En spricka upptäcktes i september 1985 i vägbanans asfalt och en sättning i vänster fyllningsdammsanslutning till betongkonstruktionen. Gropen var belägen i uppströmskanten på krönet och mellan de två stålsponterna som går ut från betongdammen och in i dammkroppen, se Figur 64 till Figur 69. Kratern hade ett djup av ca 0,7 m och uppskattad volym 7 m<sup>3</sup>.

I samband med incidenten mättes med hink och klocka ett läckage på ca 3,3 l/s. Läckaget var klart och slamfritt. Tidigare mätningar (med sammanlagd mätperiod på ca 3 år) visade i medeltal ett läckage på ca 0,3 l/sek, men läckaget mättes dock ej regelbundet och det senaste mättillfället innan incidenten var i maj 1985, dvs. ca 4 månader innan. Sambandet mellan sättningen och det ökade läckaget är alltså oklart. Inga andra tecken på skada kunde noteras.

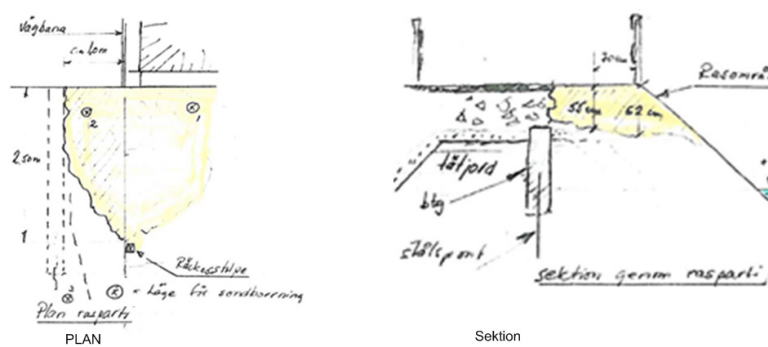
Som första åtgärd sänktes dämningen i magasinet från dämningensgränsen +292,0 till sänkningsgränsen +291,2 m. Denna begränsade minskning av trycket (endast 3 á 4% av tryckhöjden) påverkade inte läckaget, som kvarstod på ca 3,3 l/sek. Läckaget reducerades dock senare med hjälp av injektering.

Tätkärnan i vänster fyllningsdamm undersöktes med provgropsgrävning och sondering. Senare undersöktes även högra fyllningsdammens tätkärna. I de öppna schakterna kunde konstateras att tätkärnans övre del var lös. Vidare konstaterades med sondering att den vänstra dammens djupare delar hade skador, likaså högre upp i tätkärnan. I samband med sonderingen påträffades grusiga lager i tätkärnan, men dessa kan ha berott på att provet störts vid provtagningen.

Efter en veckas undersökningar återställdes området för sjungropen och dämningen togs upp till DG. Ett injekteringsprogram fastställdes och genomfördes. Berget och tätkärnan i vänster och höger fyllningsdamm injekterades med cement-bentonit och silikatbruk. Läckageflödet sjönk då från 3,3 l/sek till 0,6 l/s. Under sommaren och vintern 1987 minskade flödet ytterligare till ca 0,3 l/s utan vidare åtgärd.

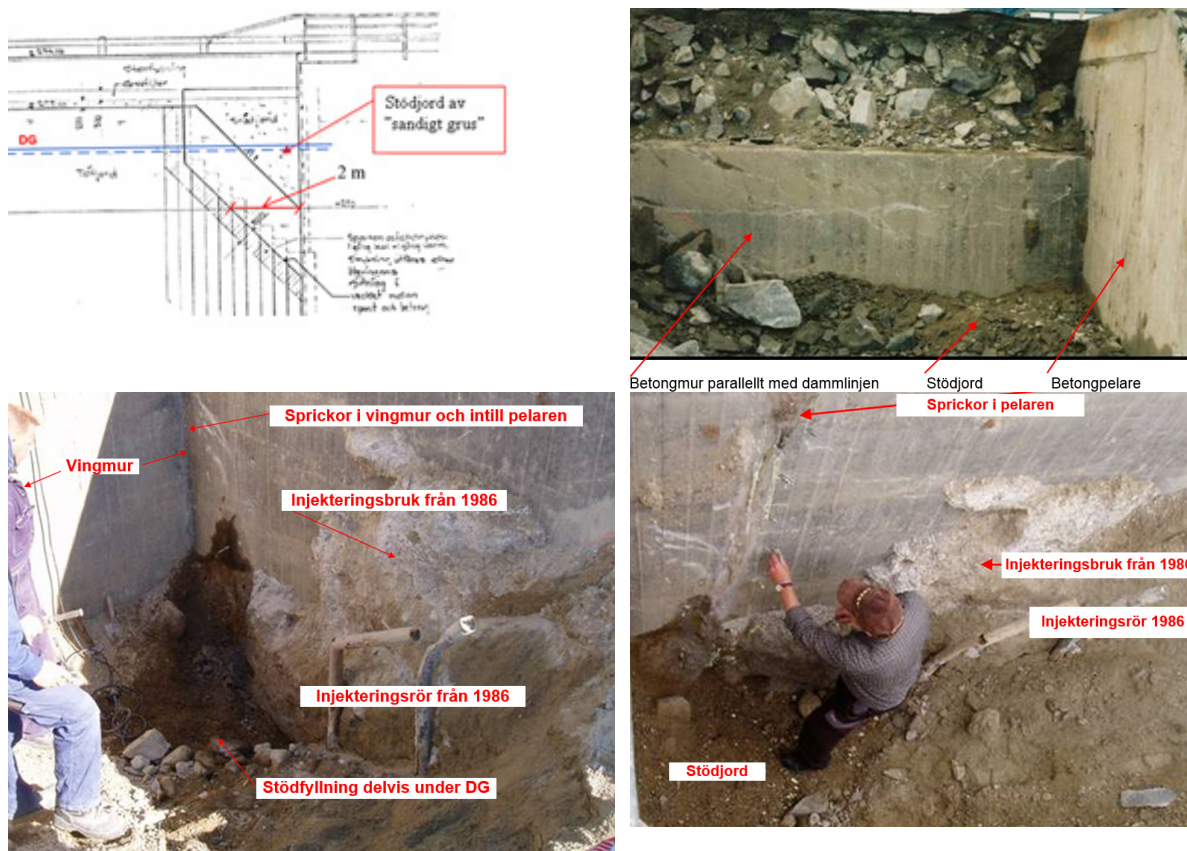


Figur 64. Sjunkgrop vänster fyllningsdamm 1985.

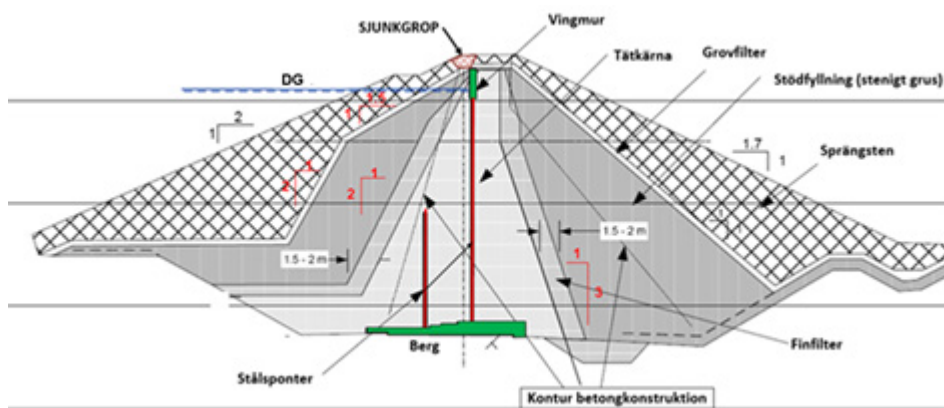


Figur 65. Sjunkgrop vid vänster fyllningsdammens anslutning till betongdammen.

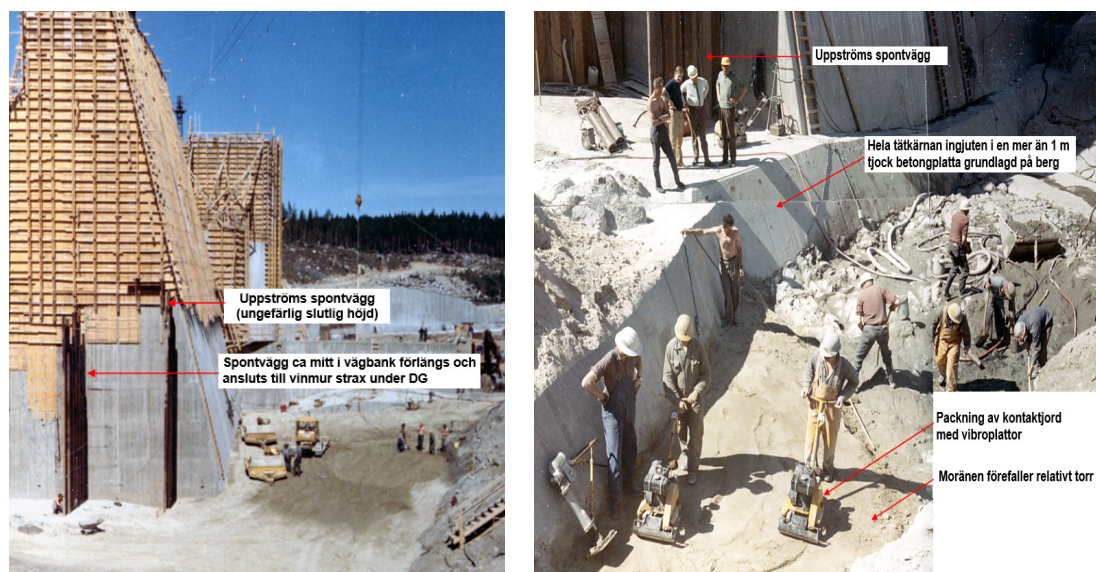




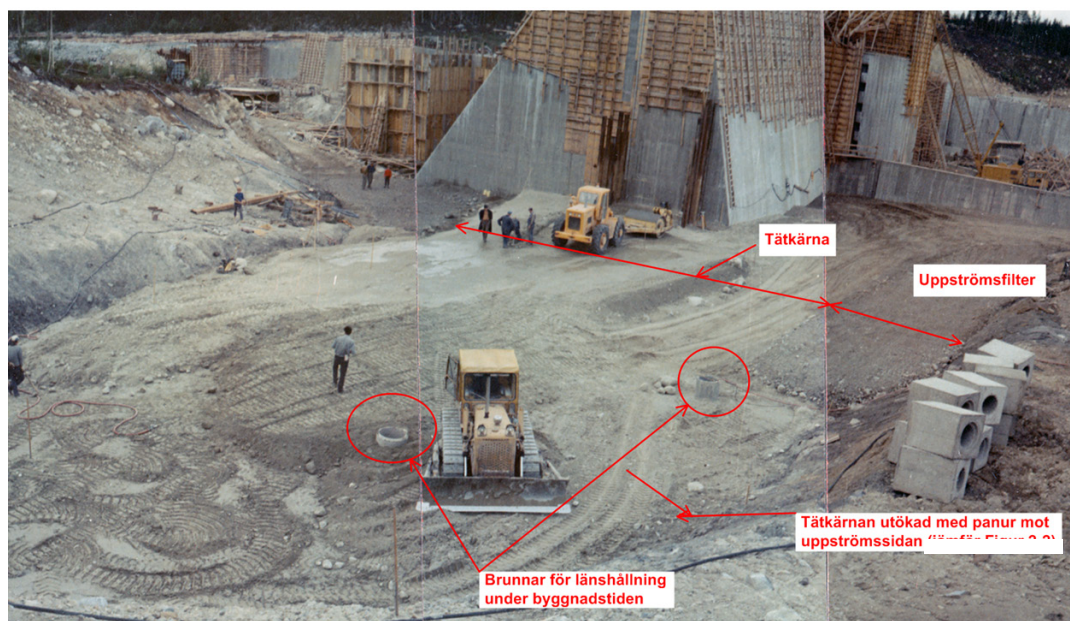
Figur 66. Schakt vid högra dammens anslutning till betongkonstruktionen i samband med höjning av tättkärnan 2004.



Figur 67. Sektion fyllningsdammens anslutning till betongkonstruktion, sjunkgrop, vingmur, dubbla stålsponter och betongplatta över grundläggning på berg.



Figur 68. Ursprunglig uppbyggnad 1968. Vänster bild visar vänster anslutning till betongkonstruktion med två stålsponter som går in i tättkärnan. Höger bild visar betongplattan grundlagd på berg som finns under tättkärnan där sjungropen uppstod 1985.



Figur 69. Uppbyggnad av vänster fyllningsdamm. Notera vibrovälten som bedöms ha svårigheter att packa utrymmet mellan spontraderna vid anslutning till monoliten.

## INJEKTERING

Vänstra fyllningsdammens anslutning till betongkonstruktionen åtgärdades 1985 – 86 med injektering. Inom partiet ca 15 m ut från anslutningen mot betongdammens injekterades totalt en volym av ca 250 m<sup>3</sup>. Injekteringen omfattade jordinjektering, kontaktingektering mellan jord och berg/betong, samt berginjektering. Injekteringen utfördes i 45 hål fördelade i sju rader. Jordinjektering i de yttre hålen avsågs i första hand göras med cement/bentonit för att sedan kontrollinjekteras med silikatbruk. I mellanraderna användes endast silikatbruk.

De maximala injekteringstrycken i tät kärnan begränsades till:

Mindre djup än 4 m	Lägsta möjliga tryck
4 – 15 m djup	2 bar (200 kPa)
15 – 25 m djup	3 bar (300 kPa)

På sträckan 0 – 5 m från kröndammen (d v s på den del där en betongplatta finns på berget) injekterades 100 m<sup>3</sup>. På sträckorna 5 – 10 m respektive 10 – 15 m avstånd från kröndammen injekterades 74 m<sup>3</sup>.

Injekteringsbruket med cement/bentonit innehöll en relativt stor mängd cement och begränsad mängd bentonit, varför hållfastheten kan förväntats blivit hög i förhållande till moränen som var oväntat lös. Olika deformationsegenskaper kan utgöra en framtida risk för nya läckagevägar vid deformationer från belastningar av stödbankar och erosionskydd i kontaktytan mellan injekteringen och den ursprungliga tät kärnan. Långtidsövervakning av läckaget ansågs därför vara den viktigaste instrumenteringen.

I efterhand har det även spekulerats i vart den stora mängd injekteringsbruk ansamlats och om arbetena bidragit till att delvis sätta igen både nedströmsfiltret och dräneringsanordningarna nedströms och därigenom minskat läckagemätningens funktion. Vid inpumpningsförsök 2012 då ett läckage simulerades i vänstra dammen noterades att läckagemätningen från dräneringen som leddes in i kraftstationen inte fungerade som avsett. Utströmning noterades istället i en dränering nedströms dammtån där utflöde kunde noteras från inpumpningen. En kompletterande läckagemätning har där installerats i detta område, se Figur 77 längre fram i rapporten.

## UTVÄRDERING AV FILTERFUNKTIONEN

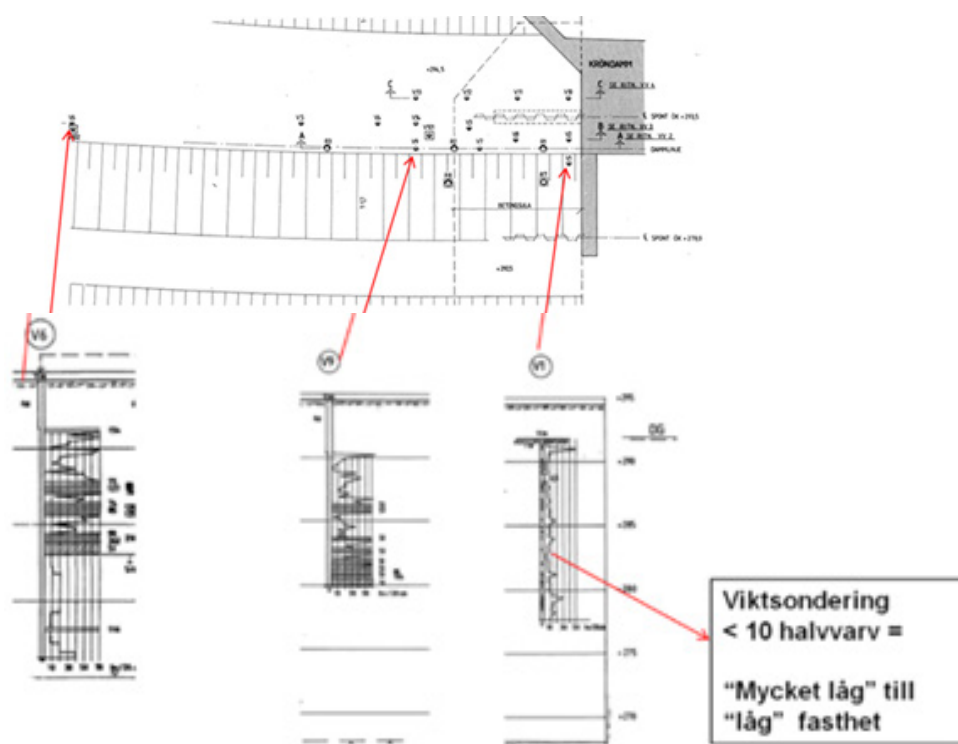
En omfattande analys gjordes 2011 av filterfunktionen där det konstaterades att filtret (stödjorden och övergångsmaterialet) och även tät kärnan är inre stabila (det finns enstaka kurvor som är instabila men dessa avviker från övrig kurvskara). Vidare kan det konstateras att filtret (stödjorden) är månggraderat och delvis uppfyller gällande filterkrav (dvs  $D_{15} \leq 0,7$  mm), men att filtret även gavs grövre gradering som kan tillåta viss erosion av tätjorden.

Förhållanden innebär att potentialen för inre erosion bedöms som "Låg" till "Neutral". Baserat på över 90 dammar med och utan inre erosion i Rönnqvist (2010) så kan nämnas som vägledning att andelen dammar med erosion vid "Neutral" potential endast är ca 10 %. Görs en kontroll av trolig filterfunktion i händelse av ett koncentrerat läckage enligt Foster och Fell (2001) så har stödjorden möjlighet att täta en läcka utan erosion, men om man ser till de grövre graderade delarna av stödjorden kan det även innebära att viss erosion av tät kärnan behövs innan filtret (stödjorden) har förmåga att täta läckaget.

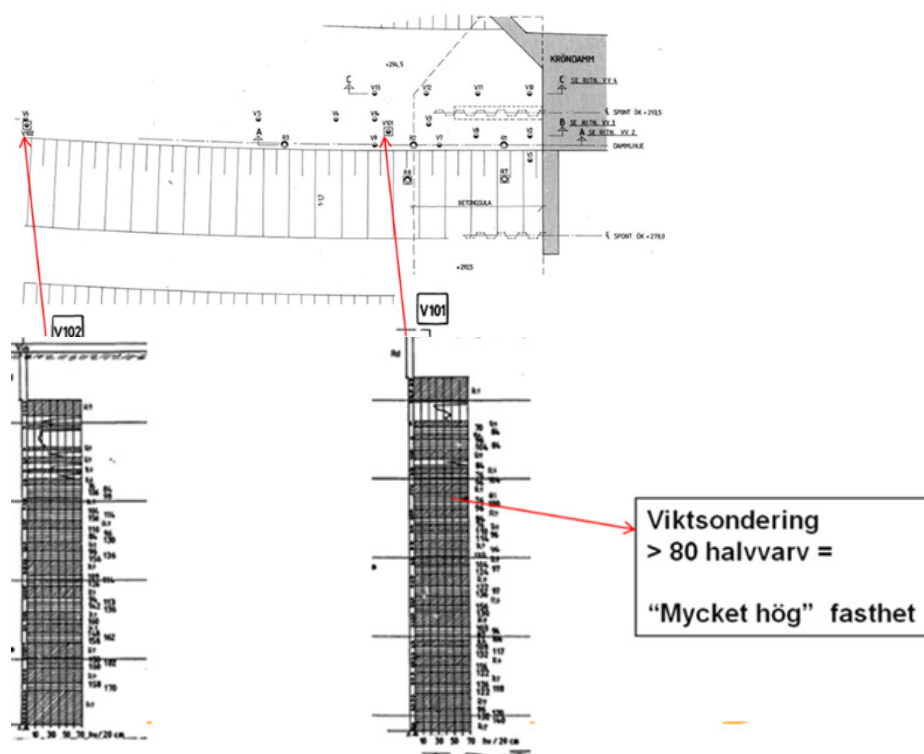
## GEOTEKNISK UNDERSÖKNING

Sonderingsresultat 1986 före injekteringen vid vänstra dammens anslutning till betongkonstruktionen framgår av Figur 70. Närmast konstruktionen visar viktsonderingen att tät kärnan har "Mycket låg" till "Låg" fasthet. På längre avstånd från betongkonstruktionen i sonderingspunkten V6 var tät kärnan fast lagrad även före injekteringen.

Sonderingarna med viktsondering efter injektering visade att det behövdes mer än 80 halvvarv för att tränga ner sonden 20 cm, vilket indikerar "Mycket hög" fasthet. Fastheten ökade således markant till följd av injekteringen, se Figur 71.

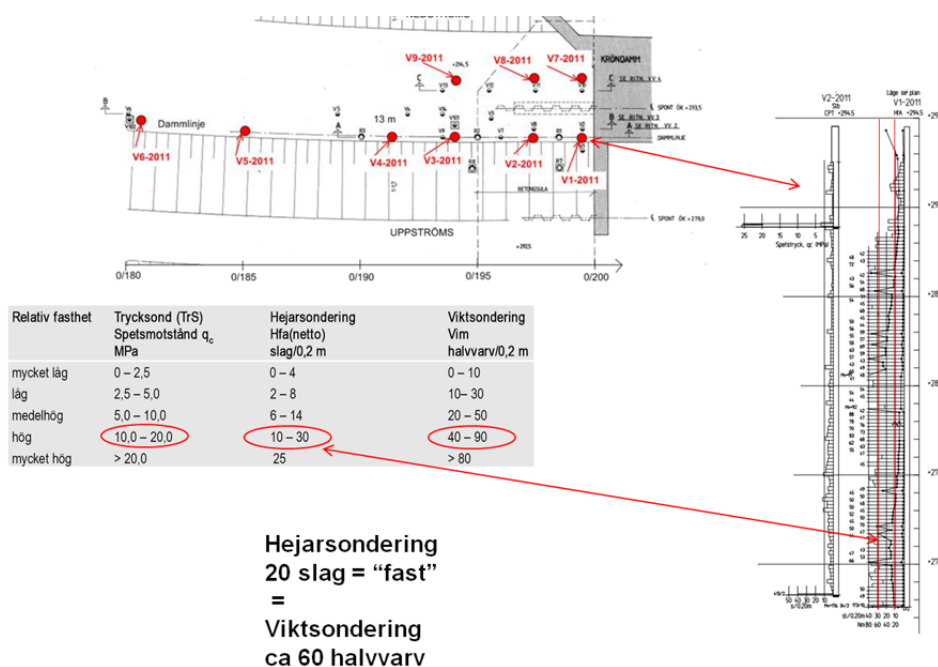


Figur 70. År 1986 före injektering, viktsondering vänster damm.



Figur 71. År 1987 efter injektering, sonderingsresultat viktsondering vänster damm.

För att ge underlag för en bedömning om en ny skada, som den som inträffade 1985, kan förväntas uppträda så bedömdes det vara viktigt att undersöka om effekten av injekteringen 1986/87 har förändrats under årens lopp. Nya sonderingar genomfördes därför 2011 i området för fyllningsdammarnas anslutning till betongkonstruktionerna. Resultaten från undersökningen vid anslutningen framgår av Figur 72. Resultaten visar att materialet under sjungropen 1985 var fast och endast små eller inga förändringar inträffat efter 1986/87.



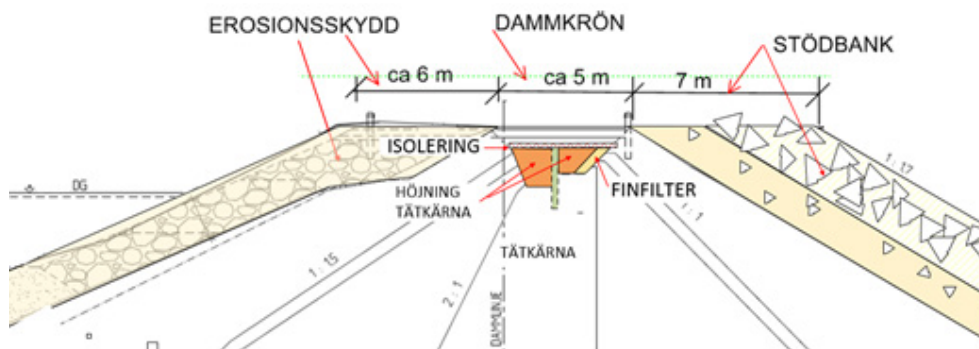
Figur 72. År 2011, vänstra dammen visar sonderingsresultat med hejjarsondering att det behövs mer än 20 slag, vilket indikerar att jorden har "Hög fasthet".

## ÅTGÄRDER

### Byggnadstekniska åtgärder

Större uppgraderingar av anläggningen som berör anslutningarna har gjorts enligt följande:

- Uppsamling av läckage och mätöverfall höger damm genomfördes 2003.
- Uppgraderingar under 2004 omfattade följande delar:
  - × Skyddsvallar byggdes upp mot nedströmssidan av höger och vänster fyllningsdammar för att säkerställa dammarna vid ett dimensionerande läckage.
  - × En ny mur placeras på vänster damms anslutningsmonolit för att ge stöd för skyddsvallen i anslutningen till kraftstationen.
  - × Tätkärnan höjdes med 0,7 m.
- Uppgradering av uppströms erosionsskydd genomfördes 2008.



Figur 73. Åtgärder anslutning: uppströms erosionsskydd, höjning tätkärna med isolering, stödbank med övergångslager och erosionsskydd.



Figur 74. Höjning av tätkärna intill vingmur (vänster bild) och isolering över tätkärna vid övergång till betongkonstruktion (höger bild).



Figur 75. Isolering över tätkärnan.

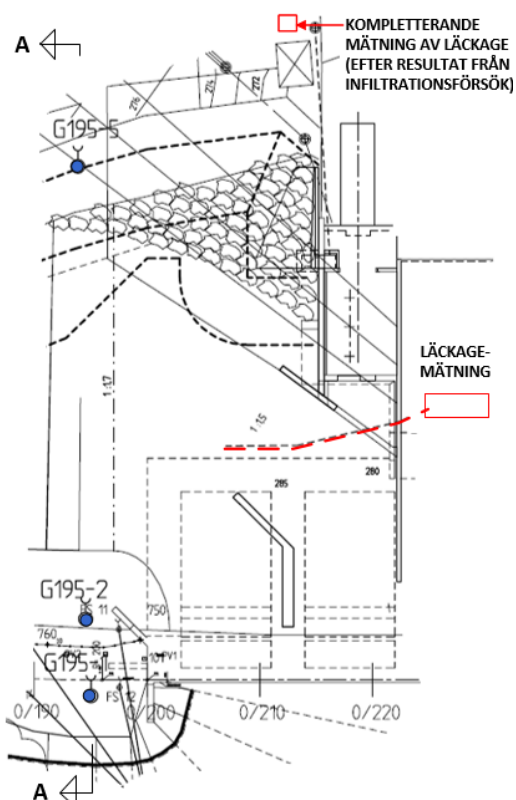


Figur 76. Nedströms stödbank som ur utrymmessynpunkt försetts med stöd av en vingmur för att ge motsvarande bredd vid anslutningen som längs övriga dammen. Den högra bilden visar uppströms erosionsskydd, som förutom att ge skydd mot vågor ger ökad bredd på dammkrönet.

### Instrumentering

Efter det att sjungropen uppstod 1985 vid fyllningsdammarnas anslutningar till betongkonstruktionerna genomfördes omfattande instrumentering bl.a. vid vänster damms anslutning.

År 2008 kompletterades övervakningen av dammarna med temperatur- och vattenståndsrör i dammarnas filter.



**Figur 77. Mätningar med vattenståndsrör och läckagemätning vid vänstra dammens anslutning till betongkonstruktionen. Mätningarna med vattenståndsrör visade att trycken indikerade förväntad funktion hos dammen.**

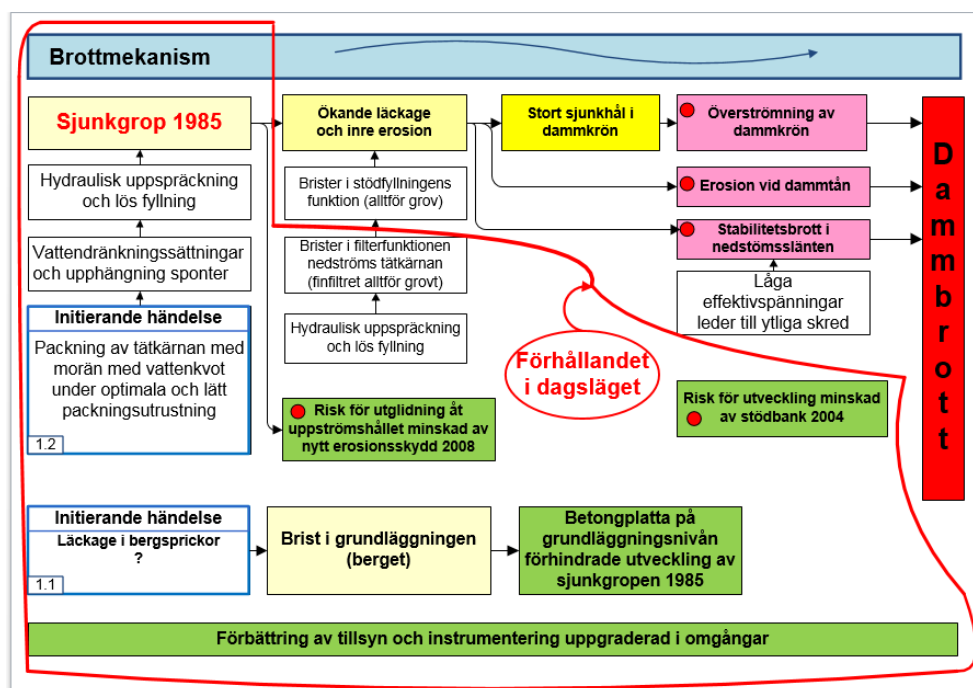
### **FELMODSBESKRIVNING**

Med underlag av de ovan beskrivna undersökningarna och utvärderingarna bedöms att möjliga initierande faktorer för sjungropen som upptäcktes 1985 kan vara vattendränkningsättningar på grund av sättningar i moränen som medför valvbildning och hydraulisk uppspräckning. Vidare kan tjälskador och/eller tung trafik vara en utlösande faktor till gropen. Dessa initierande faktorer kan tänkas ge låg hållfasthet och låg stabilitet, som kan utvecklas enligt vanliga brottmekanismer för en fyllningsdamm, se Figur 78.

Packningen av moränen vid ursprungliga uppbyggnaden kan, med erfarenhet från andra dammbyggnader från denna tid, antas ha gjorts med vattenkvot lägre än den optimala. Lätt packningsutrustning användes, se Figur 74. Laboratorieförsök från morän från dammen, som har liknande kornfördelning, visar att volymminskningar på 2 å 3 % kan inträffa vid dessa förutsättningar.



Volymminskningen i moränen under sjungropen, tillsammans med ifyllningen av hålrum under vingmuren, kan när sättningarna når markytan resultera i sjungropen. Delar av volymminskningen som hänger upp sig på sponterna kan leda till låga spänningar och hydraulisk uppspräckning. Moränen får genom att vatten träcker in en ökad vattenkvot som medför att moränen i tåtkärnan blir mycket lös.



Figur 78. Initierande händelse och fel i händelseträd.

Hydraulisk uppspräckning i kombination med brister i nedströmsfiltret och stödfyllningens funktion kan enligt händelsekedjan i bildens övre del utvecklas vidare med förnyade sjungropar i dammkrönet som kan ge stabilitetsbrott eller ökat läckage med risk för erosion vid nedströms dammtå. Stödbanken som byggdes upp 2004 mot nedströmsslätten gjordes med 7 m bredd vid dammkrönets nivå. Med förstärkning med uppströms erosionsskydd ökades krönets bredd från 5 m till 18 m, se Figur 73. Den ökade bredden reducerade risken för att en stor sjungrop ska leda till överströmning. Vidare reducerade stödbanken risken för förloppet för ett dammhaveri på grund av erosion vid dammtån och risken för ytliga skred i nedströmsslätten.

Vid injekteringen, som beskrivit ovan, minskade läckaget. En stor mängd av injekteringsbruket pumpades in i övergången till berg. Läckaget var dock relativt litet redan innan injekteringen, varför händelsekedjan med läckage i bergsprickor inte bedöms vara huvudorsaken till sjungropen som utbildades 1985.

Denna damm har endast delvis de indikatorer som är typiska för dammar om utvecklat inre erosion (som resulterat i sjunkhål). Inre erosion kan ha initierats,

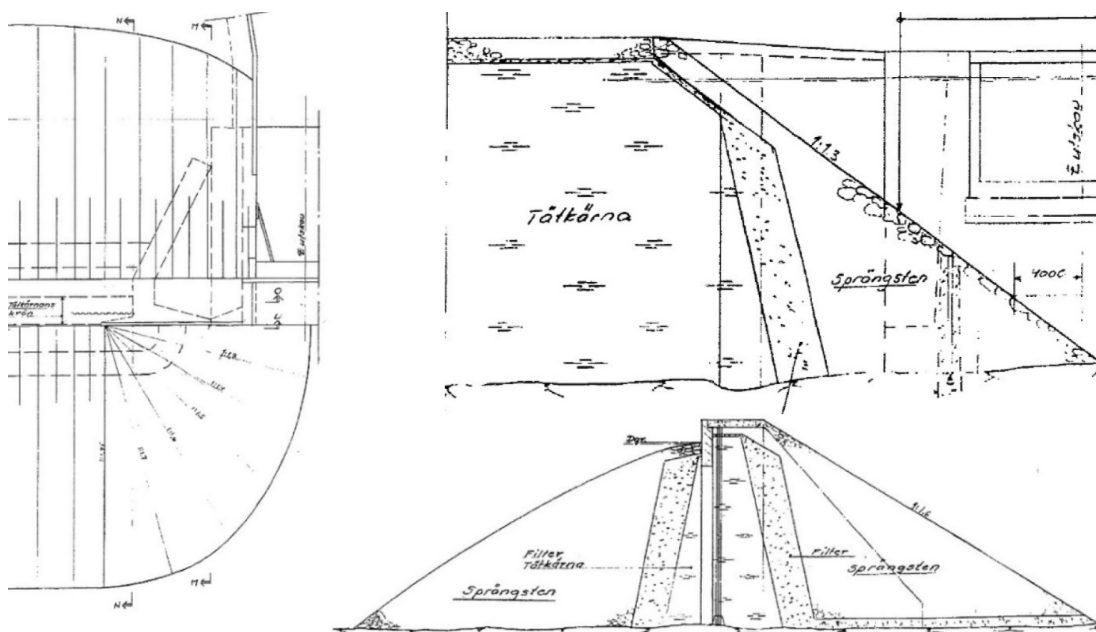
men en fortsatt erosion har dock hindrats av filtret (stödjorden) som då täppts till efter endast viss erosion av tät kärnan.

Bergytan mellan sponterna är täckt med en tjock betongplatta och bildar med sponterna och anslutande betongkonstruktion ett närmast slutet utrymme, se Figur 69. Packning av moränen var svår att utföra i det begränsade utrymmet.

## Bilaga E: Praktikfall 5

### ANLÄGGNINGSBESKRIVNING

Denna anläggning uppfördes i slutet av 1960-talet och har en för denna tid typisk design med uppströms betongvingar i anslutning till betongkonstruktionerna för att kunna hålla nere materielmängderna, se Figur 79. Vänster anslutning utgörs av en betongvinge med en konsol parallellt dammlinjen för att hålla upp fyllningsdammens krön i anslutningen till utskoven. En central stålspont är ingjuten mot berg i tät kärnan och ansluter till livet på lamellen med konsolen på frontplattan. I dammens högra sida, i anslutningen mellan intag och fyllningsdamm, är designen snarlik, men uppströmssläntens nedre del hålls upp av en stödmur som går vinkelrätt dammlinjen åt uppströmshållet, vilket ger en kortare slänt mot magasinet än på vänster sida. Stålsponten ansluter i höger anslutning från baksidan av lamellen och går i en båge in i tät kärnan i höger fyllningsdamm, se Figur 80.

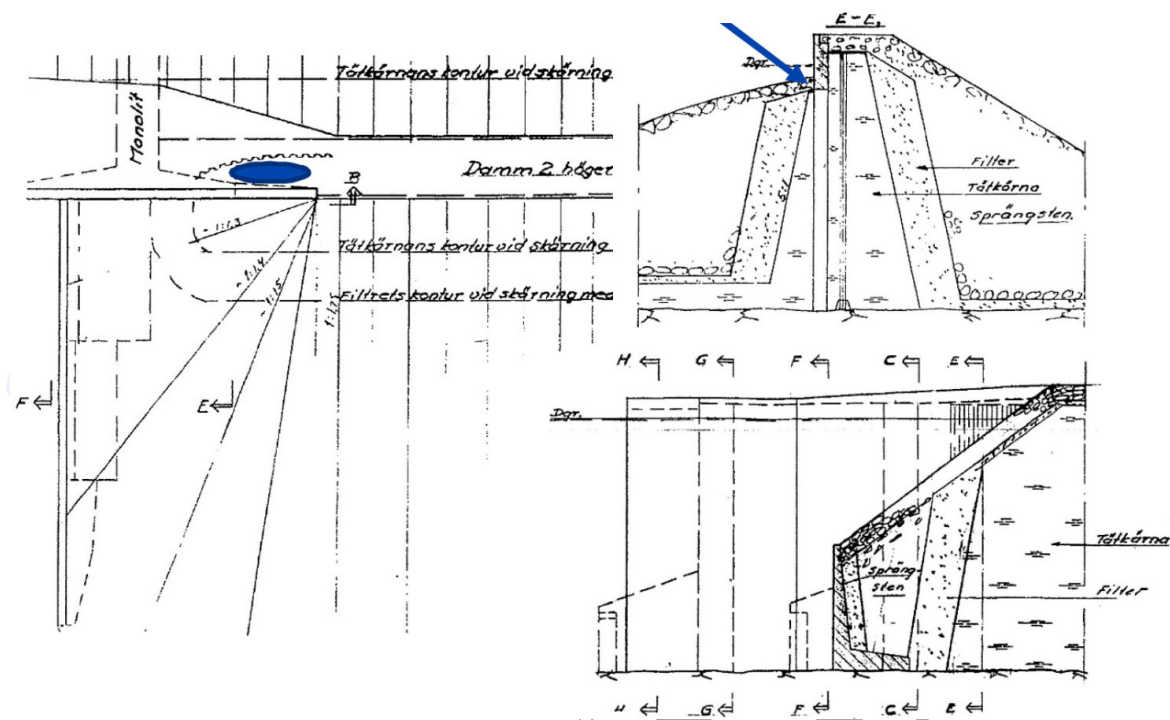


Figur 79. Vänster anslutning till betongkonstruktioner. Till vänster syns konsolens infästning till livet på monoliten.

### UPPTÄCKT OCH BESKRIVNING AV SVAGHETEN

Sättningar i anslutningarna till betongkonstruktionen uppträdde 1971 invid sponten mellan denna och uppströms vinge/konsol, detta troligtvis på båda sidor. Dokumentationen är begränsad. Tät kärnan var synlig i sättningsgroparna. På höger sida hade tät kärnans överyta sjunkit till under dämmningsgräns med som mest ca 0,4 m. Anslutningarna schaktades ner vid detta tillfälle och tät kärnan höjdes till 0,15 m över projekterad nivå, vilken var ca 1,5 m under krönet. Som djupast schaktades tät kärnan bort till 0,5 m under dämmningsgräns på höger sida, innan tätningen började byggas upp igen. Tät kärnan beskrivs som "fuktig och mindre hård".

Orsaken till sättningarna antogs dels vara bristande packning i utrymmet mellan spont och betongvinge, speciellt i höger anslutning där sponten går i en båge från frontplattans baksida och dels att material från tätkärnan spolats ur genom erosionskyddet via utrymmet under konsolen där erosionskyddet förefaller ha haft direktkontakt med tätkärnan utan filterövergång, se Figur 80. Upphängning mot sponten bedömdes också kunna ha förekommit, samt att tätjorden inte gått att packa i spontens vindlingar.



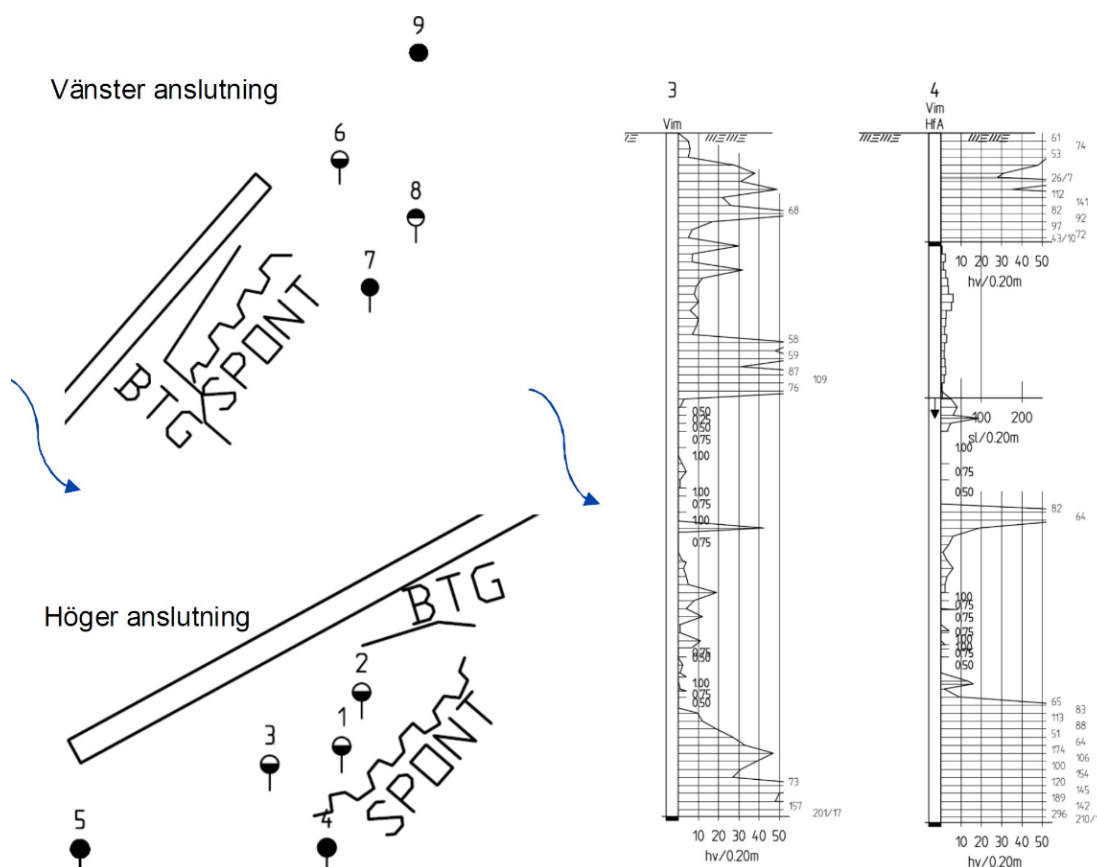
Figur 80. Höger anslutning till betongkonstruktioner, med område för sjunkhål, samt område för direktkontakt mellan tätkärna och erosionskydd, markerat.

Sättningar uppträdde även 1985 mellan sponten och uppströms betongvinge i vänster anslutning. Inga närmare uppgifter om omfattning av dessa sättningar finns, förutom att sättningarna fylldes med sand.

## MÄTNINGAR OCH FÄLTUNDERSÖKNINGAR

Inga mätpunkter fanns inledningsvis i dammens anslutningar. Då det pga. anslutningarnas utformning misstänktes att det kunde förekomma en utbredd svaghetszon invid sponten beslutades 2006 att genomföra en sondering kring sponterna och uppströms vingmur, se Figur 81.

Sonderingarna i tätkärnan visade på lokalt nedsatt hållfasthet. De översta 6–7 m under dammkrönet, ungefär ner till underkant av betongvingen, är dock i huvudsak fast till mycket fast lagrade. Denna lagringstäthet är vad som kan förväntas för en normalt fungerande tätkärna.



Figur 81. Sondiagram i anslutningarna till betongkonstruktionerna kring sponterna utförda 2006. Överst till vänster syns vänster anslutning och under denna höger anslutning. Till höger exempel på sonderingsmotstånd i höger damm invid sponten. Sponterna är inte utritade i sin helhet.



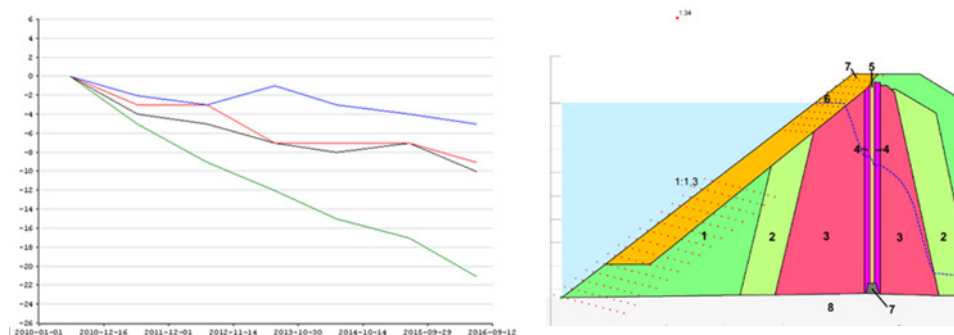
Figur 82. Grumling i vänster anslutning vid spill genom utskov 2010.

Under de översta metrarna av fast lagrad material övergår tätjorden till att vara löst till mycket löst lagrad. Viktsonden frisjönk under denna nivå under avlastning. Belastningar på 0,25 – 0,75 kN registrerades ner till bergytans nivå, med undantag för enstaka stopp, troligtvis beroende stenar i moränen som erfordrat slag för att komma förbi. Vridning görs normalt först vid ca 1 kN belastning. Frisjunkning registrerades vid dessa belastningar trots det friktionsmotstånd mot stängens yta som kan medräknas för den sträcka som sonden passerat genom den överliggande

fast lagrade delen av tätkärnan. Detta indikerar att tätjordens hållfasthet i den undre delen av tätkärnan var mycket låg och kan liknas vid en trögflytande massa. Liknande resultat, med en fungerande tätkärna i dess överdel och en lös konsistens på djupet, har noterats vid sonderingar i jämförbara anläggningar.

2010 och 2016 noterades grumling i anslutning till utskoven under spill med en missfärgning av vattnet från konen i den vänstra anslutningen, se Figur 82. Det kunde konstateras att älvsediment avsattes i erosionsskyddet under övriga delar av året, vilket sedan kan spolats iväg när spill genomförs och finmaterial kan även finnas kvar i erosionsskyddet som lades om 2006, vilket ytterligare bidrar till grumlingen. Då en viss osäkerhet dock fanns om orsaken så genomfördes en utredning för att undersöka om grumlingen kunde bero på finmaterialförlust från tätkärnan. Detta bedömdes inte vara en stor bidragande faktor även om en viss materialtransport av finmaterial från tätkärnans uppströmssida sannolikt pågår. Det huvudsakliga skälet till grumlingen bedömdes vara ytlig avvaskning av konan.

Som ett resultat av beräkningar av stabiliteten 2006 installerades en dubb för rörelsemätning i uppströms kon i vänster anslutning. Mellan 2010 och 2016 hade fortgående deformationer uppmätts i dubben, se Figur 83. Mätserien var dock inte så pass lång att några definitiva slutsatser kunde dras, men deformationerna bedömdes som ogynnsamt stora med tanke på tiden sedan anläggningens idrifttagande. Mätdata från dubben bedömdes dock som osäker då stenen den sitter i inte med säkerhet är väl förankrad i slänten. Vidare lades erosionsskyddet om 2006, vilket kan ha medfört att nya sättningar uppkommit som ännu inte hunnit bli avtagande.



Figur 83. Sättning i damm 1. Grön linje avser dubb i uppströms kon i vänster anslutning. Till höger stabilitetsberäkning 2016 för glidyta med SF > 1,3, orange område ungefärligt läge för glidyta.

Kompletterande sonderingar utfördes 2016 för att ge underlag för stabilitetsberäkningar, kontrollera om förhållandena förändrats sedan 2006 och för att undersöka möjligheterna till åtgärder av konorna med bl.a. spontning. Vid en utvärdering av sonderingsresultaten från 2016 kunde ingen nämnvärd försämring av tätkärnans kondition ses jämfört med 2006, även om inte sondering utfördes i exakt samma positioner, utan nu i huvudsak närmare uppströms betongvinge istället för invid sponterna.

## ÅTGÄRDER

En stödbank utfördes mot dammens nedströmssida 2005 och erosionsskyddet lades om 2006 på dammens uppströmssida genom en inschaktning i befintlig slänt för att inte öka belastningen på slänten, se Figur 84. I samband med detta höjdes tätkärnan, varvid denna avtäcktes och anslutningen till uppströms betongvingar förbättrades med filter för att undvika problemen med den bristande övergången mellan tätkärna och erosionsskydd under betongkonsolerna. Stödbanken på nedströmssidan spetsades ut mot vänster ledmur och försågs med utrustning för temperatur-, och läckagemätning. Dubbar för rörelsemätning monterades i uppströmsslänten i konan mot utskovet och vattenståndsrör för övervakning av gradienten i dammkroppen installerades i nedströmsfiltret.



Figur 84. Nytt erosionsskydd med övergångslager på dammens uppströmssida och till höger ny stödbank på dammens nedströmssida.

Huvudsyftet med sonderingarna 2006 var att kunna beräkna stabiliteten åt nedströmshållet i vänster anslutning, för att verifiera den stödbanksdesign som utförts mot dammens nedströmsslänt. Beräkningarna visade att en större stödbank hade varit lämplig för att uppfylla rekommenderad säkerhetsfaktor för lastfallet dimensionerande läckage. Detta hade dock inte varit möjligt utan en omfattande förstärkning av nedströms vänster ledmur.

Istället monterades enligt ovan ett automatiserat vattenståndsrör i anslutningen på nedströmssidan i filtret för att övervaka trycknivån i anslutningen och i god tid kunna notera förändringar innan detta lastfall uppträdde. Senare beräkningar i 3D förefaller visa att, pga. strömningsutbredningen kring spontens ände, så kan inte trycknivån i nedströms stödfyllning stiga så pass högt att tillåten säkerhetsfaktor för det aktuella lastfallet underskrivs, varför befintlig stödbank skulle ha en tillräcklig utbredning.

Instrumentering för rörelseövervakning monterades även i uppströmsslänten, samt i dammens krön i anslutningen, se Figur 85, där det kunde misstänkas att deformationer fortgick.



Figur 85. Spont framschaktad i vänster anslutning 2005 vid höjning av dammkrönet, samt dubb i uppströmsslänt.

Beräkningarna 2006 visade även att svaghetszonen i tätkärnan enbart hade en begränsad inverkan på säkerhetsfaktorn. Detta då den svaga zonen dels var begränsad till spontens närhet och dels för att den befann sig så pass djupt i dammkroppen att totalstabiliteten ändå bedömdes vara tillfredsställande för normala lastfall. Svagheten i tätkärnan antogs främst kunna utgöra ett framtida problem för dammens dämmande funktion.

Utifrån svagheter nas lägen och resultaten från beräkningarna bedömdes det som tillräckligt att tills vidare övervaka anslutningarna istället för en konkret åtgärd. Om mätningarna visar på fortgående deformationer eller andra avvikelser uppkommer kommer behovet av åtgärder att tas upp till förnyat övervägande.

## UTVÄRDERING

Flera olika orsaker bedöms finnas bakom avvikelserna i anslutningarna, som beroende på deras läge och utbredning påverkar olika delar av konstruktionen. Dessa avvikelser kan sammanfattas enligt följande:

- Sättningar och lös tätkärna kring sponten. Detta bedöms framförallt bero på svårigheter att packa tätkärnan kring sponten. Packningsegenskaperna är sämre invid sponten då svårigheter finns att på ett bra sätt fylla och packa materialet i vindlingarna i sponten och utrymmet mellan uppströms betongvinge och sponten är för litet för tung packningsutrustning, speciellt på höger sida. Även en upphängningseffekt kan ha uppkommit då tätjorden vid packningen kan ha hängt upp sig mot sponten. Brister i den övre delen av tätkärnan som noterades vid sonderingarna 2016 kan även till viss del bero på att tätkärnan påverkats av att tjäle har letts ner via spontplankorna och orsakat uppspräckning av tätkärnan. Denna effekt är dock dåligt känd. Svaghetszonerna kring sponterna är lokal och är inte mer utbredda än vad som kan ses vid andra undersökta dammar med snarlikt utförande av anslutningen. Påverkan på den globala stabiliteten av denna svaghet är begränsad.
- Sättningar invid uppströms betongvinge. Detta beror sannolikt på att det inte funnits adekvat utrymme mellan tätkärna och erosionsskydd för att utföra filter och övergångslager mot tätkärnan, samt att det inte gått att packa under



betongens undersida. Vid vattendränkningsättningar har sannolikt en glipa uppkommit under vingen där tätjord kunnat erodera ut i uppströms stödfyllning eller erosionskydd.

- Lokal instabilitet i uppströmsslätten invid betongkonstruktionerna, orsakat av olämplig geometrisk utformning med för brant släntlutning i förhållande till utförandet av anslutningen, samt med filtret i ogynnsam riktning för glidytor. Enligt stabilitetsberäkningarna är det sannolikt att säkerhetsfaktorn är naturligt låg vid nuvarande utformning på konan, vilket i så fall medför krypdeformation.
- Det är möjligt att en fortlöpande nedbrytning av stödfyllningen pågår, med en påföljande konsolidering, vilket inte behöver vara relaterat till en stabilitetsmässigt låg säkerhetsfaktor. Dammarna har tidigare uppvisat långsgående sprickor i dammkrönet, vilket kan ha orsakats av att stödfyllningen sakta bryts ner. Vid tidigare undersökningar av tät kärnans överkant vid sprickorna har denna visat sig vara intakt och vara belägen på projekterad nivå, varför deformationerna antas i huvudsak vara relaterade till förändringar i stödfyllningen.

Beräkningar som utfördes 2016 pekar på att rörelserna i uppströmskonan troligtvis är relaterade till ytlig instabilitet i konorna, vilket dock inte utesluter tillkommande påverkan av en eventuell nedbrytning av stödfyllningen. Den nedsatta stabiliteten antas främst orsakad av den branta släntlutningen i förhållande till hur materialzonerna i dammen är placerade i konorna. På kort sikt bedöms inte skadescenariot vara ett problem av hög dignitet. Detta då glidytor med låg säkerhetsfaktor beräknas vara ytliga och inte skära av dammkrönet i större omfattning.

Då de brottmoder som studerats inte bedömdes leda till en direkt förlust av den dämmande förmågan utan speciella omständigheter, så ansågs det rimligt att istället för en byggåtgärd initialt utöka befintlig instrumentering.

## ANSLUTNINGAR I FYLLNINGSDAMMAR

Runt om och inne i en fyllningsdamm finns olika typer av anslutningar. Marken som dammen är byggd på är en anslutning och dammens anslutning mot utskovspartier en annan. Dåligt packad tätjord, otillräckliga nedströmsfilter, branta släntkoner mot betongkonstruktioner och sponter är exempel på vanliga svagheter i en anslutning.

Skador vid anslutningar orsakas ofta av samma sak, exempelvis sättningar, sprickbildning, inre erosion med ökat läckage, sjunkhål och lägre släntstabilitet.

Inre erosion kan orsaka att skador utvecklas vid svagheter i anslutningarna. Dessa skador har goda möjligheter att både upptäckas och åtgärdas. Metoder för undersökningar och åtgärder bör alltid vara platsspecifika och utgå från skadornas art.

### Ett nytt steg i energiforskningen

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