

IGENSÄTTNING AV DRÄNAGE UNDER BETONGDAMMAR

RAPPORT 2017:369



Igensättning av dränage under betongdammar

Orsaker, övervakning och åtgärder

FREDRIK JOHANSSON
ALEXANDRA KROUNIS
MARIE WESTBERG WILDE

ISBN 978-91-7673-369-1 | © ENERGIFORSK april 2017

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

Förord

Syftet med projektet var att få ett bättre underlag för analyser av dränagets funktion samt för beslutsfattande och utförande av åtgärder. Arbetet har utförts av Fredrik Johansson, avdelningen för Jord- och bergmekanik vid Kungliga tekniska högskolan, Marie Westberg Wilde och Alexandra Krounis båda på ÅF.

Projektet ingick i Energiforsks dammsäkerhetstekniska utvecklingsarbete med medverkan från vattenkraftföretag och Svenska kraftnät. Författarna ansvarar för rapportens innehåll.

Stockholm april 2017

Sara Sandberg

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet och publiceringen innebär inte att Energiforsk har tagit ställning till innehållet.

Sammanfattning

Upptryck är av stor vikt för betongdammars stabilitet, särskilt för gravitationsmonoliter och utskovsmonoliter där skibordets bottenyta ligger an mot berg, samt för berggrund där genomgående sprickplan identifierats. I de fall som betongdammens stabilitet är beroende av ett fungerande dränage är det nödvändigt att dränagets funktion säkerställs. RIDAS (Svensk Energi 2012) tillåter exempelvis en reduktion av upptrycket vid ett fungerande dränagesystem. För att dränagehålens upptrycksreducerande effekt skall få tillgodoräknas krävs emellertid att hålens funktion kontrolleras så att det säkerställs att dränagehålen inte sätts igen. Hur denna kontroll ska gå till beskrivs ytterst begränsat och vilka åtgärder som är lämpliga att vidta om dränaget sätts igen tas inte upp alls.

Dränagehålen kan sättas igen på ett flertal olika sätt; på grund av mekanisk igensättning, kemisk utfällning, biologisk utfällning eller en kombination av dessa. Den mekaniska igensättningen orsakas av finmaterial, t ex lerpartiklar, som finns suspenderat i grundvattnet. Igensättning till följd av kemisk utfällning kan exempelvis uppstå till följd av att kalcium som lösts ut från injekteringsridån faller ut i dränagehålen eller att järnhydroxid bildas då järnet oxiderar när den går från en anaerob till en aerob miljö. Ett vanligt exempel på igensättning på grund av biologisk utfällning är när järnoxiderande bakterier oxiderar det lösta järnet och skyndar på utfällningsprocessen. Syftet med denna rapport har varit att få en bättre förståelse för vilka faktorer som påverkar risken för igensättning av dränage under betongdammar samt hur igensättningen kan övervakas och åtgärdas. Det långsiktiga målet med denna rapport är att resultaten ska kunna ligga till grund för en riktlinje för hur övervakning och underhållsåtgärder bör utformas för att säkerställa dränagets funktion.

Hanteringen av dränage kan i princip indelas i tre delfrågor: (i) finns förutsättningar för igensättning av dränage, (ii) hur ska dränagets funktion verifieras, (iii) vilka underhållsåtgärder ska genomföras för att säkra dränagets långsiktiga funktion om igensättning kan misstänkas.

Inledningsvis rekommenderas att en riskbedömning görs för att bedöma förutsättningarna för dränage. Denna kan baseras på okulära observationer, kemiska analys av vattenprover från dränagehålen samt lokala geologiska förhållanden.

Igensättningen sker gradvis över tid och det kan därför vara svårt att bedöma om igensättning har skett om dränaget inte övervakas på lämpligt sätt. Det rekommenderas därför att ett övervakningsprogram tas fram, speciellt om riskbedömningen indikerar att igensättning kan utgöra ett potentiellt problem. För övervakning av dränaget rekommenderas mätning av både porttryck och läckageflöde. Vidare rekommenderas att en referensmätning av dränagehålens funktion med exempelvis vattenförlustmätningar eller pumptest genomförs då dränagehålen tas i drift. Vid indikation av att igensättning sker kan nya vattenförlustmätningar eller pumptester genomföras och jämföras mot referensmätningen.

Om riskbedömningen indikerar att igensättning kan utgöra ett potentiellt problem rekommenderas även att ett underhållsprogram tas fram som utformas efter vilken typ av igensättning som kan förväntas. Beroende på typ av igensättning kan åtgärderna omfatta exempelvis spolning av dränagehålen var 6:e månad eller borrning av nya dränagehål efter uppskattningsvis 10-20 år.

I dagsläget är erfarenheterna i branschen från igensättning av dränage begränsade. Det behövs därför kompletterande kunskap i form av nya erfarenheter från fler väl dokumenterade fall där igensättning av dränage misstänkts eller har konstaterats och åtgärder för att rensa dränaget genomförts. Med dessa erfarenheter kan det tydligare fastställas vilka faktorer som utgör de största riskerna för igensättning av dränage samt vilka underhållsåtgärder som är mest effektiva vid de olika fallen. Det är författarnas förhoppning av denna rapport kan utgöra en inledande del av denna sammanställning och utgöra underlag för en framtida riktlinje för hantering av dränage vid svenska betongdammar.

Summary

Uplift is a parameter that has large influence on the sliding stability of concrete dams, especially gravity dams or spillway monoliths having all of their base area in direct contact with the rock foundation, or if persistent horizontal rock joints exists in the foundation. In case where the stability of the dams is dependent on a functioning drainage, it is necessary that the drainage function properly. RIDAS (Svensk Energi 2012) allows a reduction in uplift pressure when a functioning drainage exists. However, in order to allow for the reduction in uplift pressure it is according to RIDAS necessary that the function of the drainage is monitored. How this should be performed is only briefly described and what maintenance measures that are appropriate to perform is not described at all.

Clogging of drains can occur due to several different causes, such as mechanical clogging, chemical deposits, biological deposits or a combination of these. The mechanical clogging is caused by fine material, such as clay particles, suspended in the ground water. Clogging due to chemical deposits occur when dissolved calcium from e.g. the grout curtain deposit in the drainage holes, or when iron oxides in the water when it is transported from an anaerobe to an aerobic environment creating iron hydroxide which deposits in the holes. A common example of clogging due to biological deposits are iron hydroxide bacteria that oxidizes the iron and speed up the deposit process. The aim with this report has been to obtain a better understanding of which factors that affects the risk for clogging of drains under concrete dams, how the drains should be monitored and which measures that should be undertaken if the drains are clogged. The long-term goal is that the results should be able to constitute a foundation for future guidelines concerning monitoring of the drains and appropriate measures for clogged drains.

In principle, the management of drainage can be divided into three parts: (i) does conditions exists which enables clogging of drains, (ii) how should the function of the drainage be verified and (iii) which measures should be performed in order to secure the long-term function if clogged drains could be expected.

It is recommended that a risk evaluation initially is performed in order to assess the conditions if clogging of drains could be expected. The evaluation could be based on observations at site, chemical analyses of water tests taken from the drainage and local geological conditions.

Clogging of drains occurs gradually over time, and it can therefore be difficult to assess if the drains really have been clogged if proper monitoring is not performed. Therefore, especially if the risk evaluation indicates that clogging of drains could constitute a potential problem; it is recommended that a monitoring program is set up. In this monitoring, it is recommended that both pore pressure and leakage flow are measured. It is also recommended that a reference measurement of the hydrogeological conditions of the drainage hole is performed. This could be performed with water loss measurements or pump tests and should be conducted shortly after the drainage is taken into operation. If the monitoring indicates that

drains have been clogged, a new water loss measurement or pump test could be performed and compared against the reference measurement.

If the risk evaluation indicate that clogging could constitute a potential problem, it is also recommended that a maintenance program of the drains is derived, that are designed with respect to the type of clogging that is expected. Depending on the type of clogging that is expected to occur, the measures could, for example, be flushing of the drains every 6th month or drilling of new drains every 10-20 years.

Today, the experiences from clogged drains in Swedish dams are limited. Additional knowledge from well documented cases where clogging of drains has occurred and measures been undertaken are needed. Based on these new experiences, it can more clearly be determined which factors that are critical with respect to clogging of drains, and which measures to clean the drains that are most effective for the different causes of clogging. It is the authors hope that this report could constitute the basis for a future guideline concerning the management of drainage at Swedish concrete dams in the future.

Innehåll

1	Inledning	9
1.1	Bakgrund	9
1.2	Syfte	9
2	Beskrivning av upptryck	11
2.1	Inledning	11
2.2	Kontinuum betraktelse	11
2.3	Diskontinuum betraktelse	13
3	Litteraturstudie -Igensättning av dränage	17
3.1	Inledning	17
3.2	Orsaker till igensättning hos dräner	17
3.2.1	Mekanisk igensättning	17
3.2.2	Kemisk utfällning	17
3.2.3	Biologisk utfällning	18
3.3	Faktorer som påverkar risken för utfällningar	19
3.3.1	Tid	19
3.3.2	Vattenföring	19
3.3.3	Bergart	19
3.3.4	Surhetsgrad och redoxpotential	20
3.3.5	Bakterier och virus	20
3.3.6	Temperatur	21
3.3.7	Suspenderat material	21
3.4	Åtgärder för att återställa dränernas funktion	21
4	Praktiska erfarenheter vid svenska dammar	23
4.1	Inledning	23
4.2	Resultat från enkätundersökningen	23
4.3	Exempel på Anläggning med Misstänkt igensatt dränage	24
5	Diskussion	29
5.1	Bakgrund	29
5.2	enkätundersökning	29
5.3	Orsaker till igensättning	29
5.4	Verifiering och övervakning av dränerande förmåga	30
5.5	Åtgärder vid igensättning av dränage	30
6	Slutsatser	31
7	Referenser	33
	Appendix A – Svar enkätundersökning	35

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

Upptryck är av stor vikt för betongdammars stabilitet, särskilt för gravitationsmonoliter och utskovsmonoliter där skibordets bottenyta ligger an mot berg, samt för berggrund där genomgående sprickplan identifierats.

I Spross m.fl. (2014) konstateras att underhåll av dränage och mätning av upptryck är avgörande för dammens tillförlitlighet. Att mäta upptryck och beräkna dammens säkerhet mot brott baserat på mätresultat är inte tillförlitligt. Även en mycket låg sannolikhet för igensatt dränage (i kombination med ett läckage) blir i de allra flesta fall styrande för dammens brottsannolikhet. Det är således viktigt att dammens dränerande funktion säkerställs genom övervakning av dränagets funktion i kombination med lämpliga utformning av underhållsåtgärder.

I projektet "Framtagande av översiktlig riktlinje för sannolikhetsbaserad beräkning av betongdammars stabilitet" (Westberg Wilde & Johansson 2016) har det vid definition av lastfall konstaterats att där dammens stabilitet är beroende av ett fungerande dränage, men ingen övervakning av funktionen genomförs, måste ett igensatt dränage förutsättas i beräkningen. Skälet är att dränaget med tiden kan komma att sättas igen och injekteringsridån kan urlakas, men utan övervakning är det inte möjligt att veta om detta inträffat.

Frågor kring dränagets funktion uppkommer ofta i samband med fördjupade inspektioner, FDU:er och andra utredningar för dammar i samtliga säkerhetsklasser och behov finns för bättre information och vägledning för bedömning och åtgärd.

I föreliggande studie analyseras ett antal frågeställningar där resultaten ska kunna ligga till grund för en vägledning i frågan hur dränagets funktion ska säkerställas. Frågor som analyseras är hur kan den dränerande förmågan verifieras, hur och varför sker igensättning under olika förhållanden (bergtyp och vattenkvalitet m.m.), hur snabbt sker igensättningen, hur bör igensättning åtgärdas på bästa sätt, vilket intervall bör åtgärder ha för att dränageförmågan ska kunna säkerställas och under vilka förutsättningar behövs övervakning.

Rapporten inleds med en konceptuell beskrivning av upptryck, vilken följs av en litteraturstudie där orsakerna och möjliga åtgärder vid igensättning av dränage går igenom. Detta följs av ett kapitel med erfarenheter från våra svenska dammar. Inledningsvis beskrivs en sammanställning av hur vanlig igensättning är vid våra svenska dammar och vilka åtgärder som brukar vidtas samt hur de följs upp. Därefter går ett fall igenom mer detaljerat där igensättning av dränage misstänks. Slutligen diskuteras de framkomna resultaten och slutsatser presenteras.

1.2 SYFTE

Syftet med denna rapport är att få en bättre förståelse för vilka faktorer som påverkar risken för igensättning av dränage under betongdammars samt hur igensättningen kan övervakas och åtgärdas. Det långsiktiga målet är att denna

rapport ska ligga till grund för utformning av en tillämpbar riktlinje för hur övervakning och underhållsåtgärder bör utformas för att säkerställa dränagets funktion.

2 Beskrivning av upptryck

2.1 INLEDNING

Upptrycket under en damm, i kontaktytan mellan berg och betong eller i sprickplan i bergmassan, är beroende av ett flertal faktorer. I följande kapitel beskrivs konceptuellt hur olika faktorer påverkar vattentrycket under dammen och därmed det totala upptrycket. Principiellt kan man skilja mellan en kontinuum betraktelse och en discontinuum betraktelse av bergmassan under dammen. I det första fallet betraktas bergmassan som ett homogent material där flödet sker jämnt fördelat genom materialet. Vid kraftigt uppspruckna bergmassor eller vid grundläggning på jord är denna betraktelse i många fall acceptabel. I det andra fallet förutsätts att flödet sker i enskilda sprickor i bergmassan. Denna betraktelse är mer korrekt för en bergmassa med begränsad uppsprickning. Nedan följer en beskrivning av flödet i ett kontinuerligt respektive diskontinuerligt medium. För en mer ingående beskrivning av flödet i bergmassor hänvisas exempelvis till Gustafson (2012).

2.2 KONTINUUM BETRAKTELSE

Flödet i ett permeabelt homogent medium kan beskrivas med Darcys lag

$$Q = KiA \quad (2.1)$$

Där

Q = flödet [m^3/s]

K = materialets hydrauliska konduktivitet [m/s]

i = hydraulisk gradient (tryckskillnad dh /längdenhet dl vid endimensionellt flöde)

$[-]$

A = area vinkelrätt flödesriktningen [m^2]

Den hydrauliska konduktiviteten, K , kan beskrivas med

$$K = k \left(\frac{\rho_w g}{\mu_w} \right) \quad (2.2)$$

Där

k = materialets permeabilitet [m^2]

ρ_w =densitet vatten [kg/m^3]

g = gravitationskonstant [m/s^2]

μ_w =vattnets viskositet [Pas]

Ekvation 2.1 beskriver hur flödet i ett material varierar med dess hydrauliska konduktivitet samt gradienten. Ekvationen beskriver emellertid inte hur trycket i en punkt under dammen varierar. För att beskriva detta kan Bernoullis ekvation användas, där trycket i en punkt A kan beskrivas som:

$$h_A = z_A + \frac{p_A}{\gamma_w} + \frac{v_A^2}{2g} \quad (2.3)$$

Där

h_A =total energinivå i punkt A [m]

z_A =nivå punkt A [m]

P_A = trycket i punkt A [Pa]

γ_w =vattnets tunghet [kN/m³]

v_A = vattnets hastighet i punkt A [m/s]

Eftersom vattnets hastighet är relativt låg i bergmassan kan hastighetstermen försummas och energinivån i punkten A betecknas

$$h_A = z_A + \frac{P_A}{\gamma_w} \quad (2.4)$$

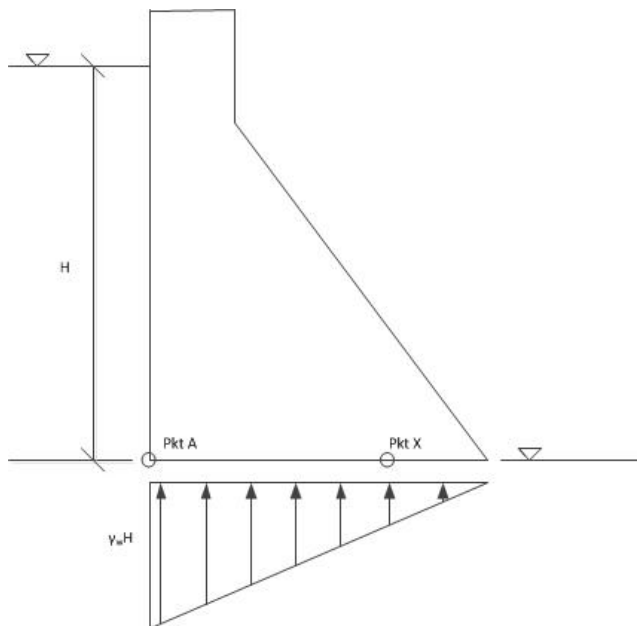
Utifrån ekvation 2.4 kan skillnaden i en godtycklig punkt X skrivas som

$$h_x = z_x + \frac{P_x}{\gamma_w} \quad (2.5)$$

Med hjälp av uttrycket för gradienten kan trycket i punkt X betecknas

$$P_x = (h_A - idL - z_x)\gamma_w \quad (2.6)$$

Studeras uttrycket i ekvation 2.6 kan det ses att en linjär minskning av porttrycket från punkten A kan förväntas med ökad sträcka nedströms, vilket har illustrerats i Figur 2.1. Minskningen av trycket beskriver de friktionsförluster som inträffar vid flöde från punkt A till punkt X. Antagandet gäller under förutsättning att den hydrauliska konduktiviteten inte förändras under dammen p.g.a. injekteringsridåer eller inverkan från dränage.



Figur 2.1 Principiell upptrycksfördelning vid grundläggning på homogent permeabelt material.

2.3 DISKONTINUUM BETRAKTELSE

Vid en diskontinuumbetraktelse kan flödet i en spricka utifrån Darcys lag beskrivas som

$$Q_j = K_j i A_j \quad (2.7)$$

Där

Q_j = flödet i en spricka per enhetslängd [m^3/s]

K_j = hydraulisk konduktivitet för en enskild spricka [m/s]

A_j = sprickans vattenförande area vanligtvis uttryckt som hydraulisk apertur, e , gånger en enhetslängd [m^2]

Sprickans hydrauliska konduktivitet för en enskild spricka kan betecknas

$$K_j = \left(\frac{\rho_w g}{12 \mu_w} \right) e^2 \quad (2.8)$$

Kombinerar ekvation 2.7 och 2.8 samt uttrycket för gradienten erhålls följande uttryck för flödet i en spricka

$$Q_j = \frac{\rho_w g}{12 \mu_w} \frac{dh}{dl} e^3 \quad (2.9)$$

Mellan punkt A och punkt B i Figur 2.1 kan energinivån tecknas som

$$z_B + \frac{p_A}{\gamma_w} = z_B + \frac{p_B}{\gamma_w} + h_f \quad (2.10)$$

Där

h_f =friktionsförlusterna mellan punkt A och punkt B [Pa]

Ovanstående ekvation i kombination med ekvation 2.9 innebär att tryckskillnaden mellan punkt A och B längs en spricka med konstant apertur, e , kan beskrivas som

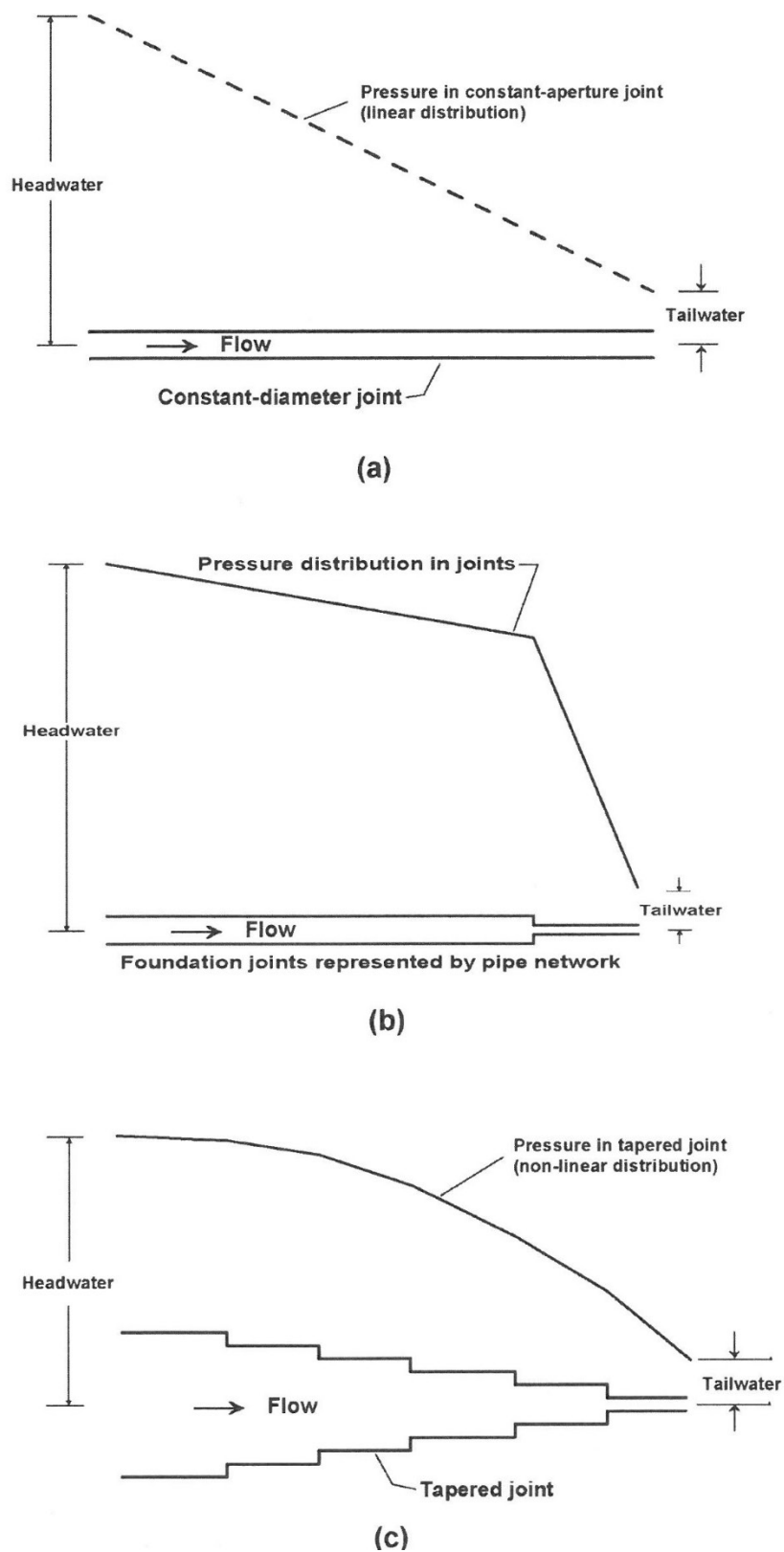
$$P_A - P_B = \frac{Q_j 12 \mu_w dl}{e^3} \quad (2.11)$$

Om uppströmsvattenytan samt nedströmsvattenytan är känd kan flödet i sprickan beräknas. Såsom framgår av ekvation 2.11 kan en linjär förändring i portryck då förväntas längs sprickan, vilket illustreras i Figur 2.2a.

Om det vattenförande nätverket under dammen istället består av två stycken sprickor med varierande apertur kommer trycket istället att minska snabbare per längdenhet för den mindre sprickan, vilket har illustrerats i Figur 2.2b. Om systemet exempelvis består av två sprickor med en apertur på 1 mm respektive 0,5 mm kommer trycket att minska 8 gånger snabbare längs med sprickan med den mindre aperturen. Om aperturen varit 1 mm respektive 0,1 mm skulle trycket minska 1000 gånger snabbare. Tryckförändringar i kontaktytan mellan berg och betong eller i ett spricksystem under dammen är således mycket känsligt för variationer i apertur.

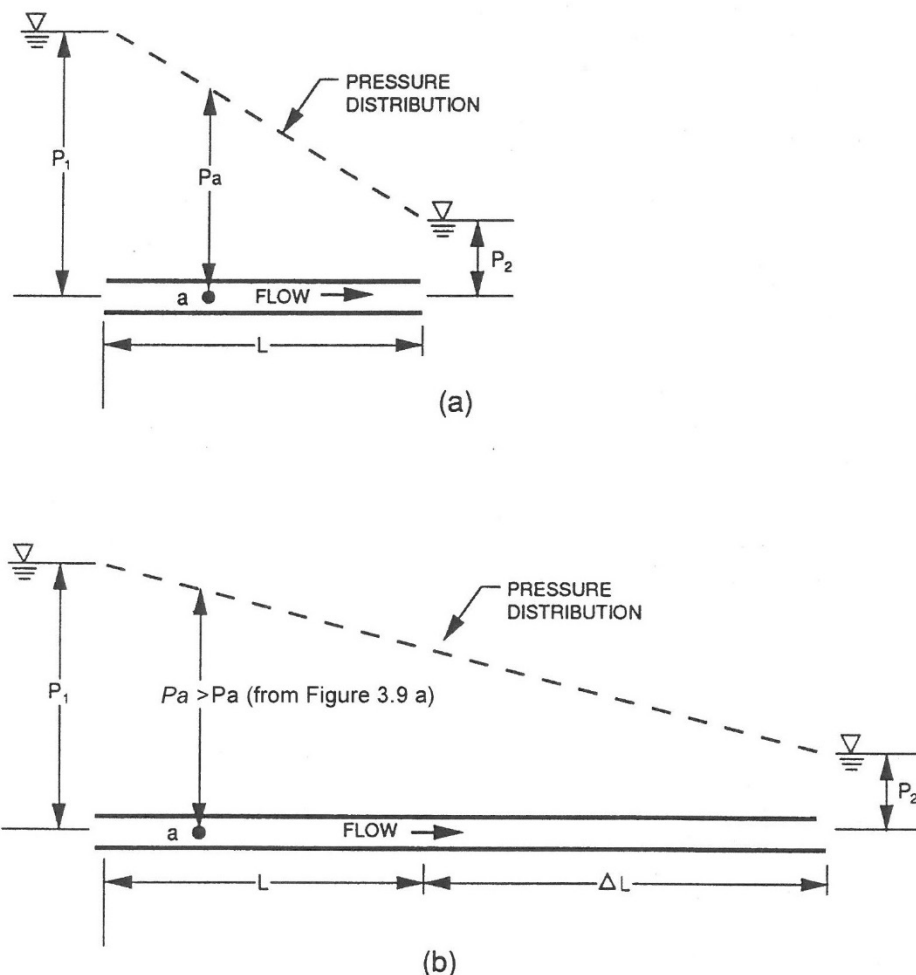
Utifrån detta resonemang är det lätt att förstå hur viktig injekteringsridån under en damm är för sänka portrycket. Vilken minsta sprickapertur som injekteringsbruk av cement fritt kan penetrera brukar ofta definieras med b_{crit} . Enligt Eklund & Stille (2008) är b_{crit} för vanligt cementbruk i storleksordningen 0.1 mm. Den minsta

sprickan som bruket kan penetrera överhuvudtaget benämns $b_{\min}$, och är för cementbruk i storleksordningen 0.05 mm. Om övriga sprickor har en större apertur än dessa värden kommer den huvudsakliga tryckfallet att ske över injekteringsridån. På samma sätt är det också lätt att förstå vikten av ett fungerande dränage. Om dränagehål med exempelvis en diameter på 76 mm borraras med ett jämnt cc-avstånd kommer de effektivt reducera trycket för ett sprickplan med normal apertur på någon millimeter.



Figur 2.2 Fördelning av upptryck i a) en spricka med jämn apertur, b) ett nätverk med två sprickor med varierande apertur (med mindre apertur nedströms), c) en spricka med avsmalnande apertur (från Murphy m fl 2002 efter Grenoble et al. 1995).

Det faktum att förändringar i aperturen kraftigt påverkar hur portrycket varierar innebär att det finns vissa typer av sprickplan som utgör en större risk för att bygga upp höga upptryck i berggrunden under en damm. Vid större flacka slag i berggrunden med aperturer på några millimeter till några centimeter är spricklängden sannolikt några tiotals meter, då det finns en korrelation mellan sprickvidd och spricklängd (Vermilye & Scholz 1995). Om ett sådant plan ligger relativt ytligt på några meters djup under dammen, samtidigt som de vertikala sprickorna har en väsentligt mindre apertur, finns det en stor risk att höga portryck kan byggas upp i slaget. Detta tryck under dammen ökar också med sprickans längd såsom illustrerats i Figur 2.3. Det är således mycket viktigt att identifiera om större genomgående slag existerar i berggrunden under dammar och samtidigt utforma lämpliga åtgärder för att reducera potentiellt höga portryck i dessa slag i syfte att säkra stabiliteten mot glidning.



Figur 2.3 Inverkan av spricklängd på fördelningen av upptryck med a) en kort spricka och b) en längre spricka (från Murphy m fl 2002 baserat på EPRI 1992).

3 Litteraturstudie -Igensättning av dränage

3.1 INLEDNING

För att öka förståelsen för de mekanismer som påverkar igensättning av dräner i berggrunden under betongdammar, har en litteraturstudie genomförts. Denna visar på att publicerat materialet som specifikt behandlar igensättning av dräner under betongdammar är begränsat. EPRI (1992) och Fiedler och Turlington (2010), vilka är baserade på samma erfarenheter, fokuserar i huvudsak på rensningsåtgärder av dräner under betongdammar medan Rutenbeck och Day (1999) koncentrerar sig på rengöring av dränagehål med olika typer högtryckssprutor. Ett antal studier som behandlar igensättning av dräner i bergtunnlar, t ex Johansson och Stille (1996) samt Ekliden (2008) bidrar till ökad kunskap avseende de processer som orsakar igensättning samt de faktorer som tros påverka risken för igensättning då dessa borde vara desamma för dräner i en tunnel som under en betongdamm.

I följande avsnitt redovisas inledningsvis en kort sammanställning av de sätt som dräner kan sättas igen på. Därefter beskrivs de faktorer som tros påverka risken för igensättning. Slutligen redovisas en sammanställning av de åtgärder som tillämpats för att återställa dränernas funktion.

3.2 ORSAKER TILL IGENSÄTTNING HOS DRÄNER

Dräner kan sättas igen på ett flertal olika sätt, såsom mekanisk igensättning, kemisk utfällning, biologisk utfällning eller en kombination av dessa. Fenomenen påverkar även varandra, exempelvis kan en mekanisk igensättning av en drän minska den fria arean så att totalstopp till följd av kemisk/biologisk igensättning uppstår snabbare (Johansson och Stille 1996).

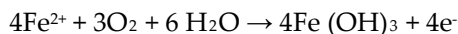
3.2.1 Mekanisk igensättning

Mekanisk igensättning orsakas av finmaterial, t ex lerpartiklar, som finns suspenderat i grundvattnet. Partiklarna transporteras med vattnet och fastnar i sprickor och porer, vilket leder till att storleken hos sprickorna och porerna minskar med tiden (Lindblad-Pässe 1986), d.v.s. delar av vattnets flödesvägar sätts igen.

3.2.2 Kemisk utfällning

Kemiska utfällningar som sätter igen dräner orsakas vanligtvis av järn, mangan eller kalcium som finns löst i grundvattnet (Ekliden 2008). Detta uppnås genom att ämnena frigörs direkt från berggrunden eller från vittringsprodukter i jorden som vattnet passerar igenom. Järn tillförs dessutom grundvattnet i märkbara mängder genom atmosfäriskt nedfall, så kallad våt deposition (Andersson 1991).

Järn i grundvatten förekommer främst som Fe^{2+} . När järnhaltigt vatten strömmar från en anaerob till en aerob miljö, dvs. när syretillgången ökar, oxideras Fe^{2+} till Fe^{3+} samtidigt som det reagerar med vattnet:



Järnhydroxiden som faller ut är en rödbrun elastisk massa som är svårlös i vatten. Med tiden avges vatten som är bundet i utfällningens struktur och istället bildas järnoxider, som exempelvis hematit (Fe_2O_3) eller magnetit (Fe_3O_4). Vid omvandlingen hårdnar utfällningen.

Mangan som är löst i grundvatten med låg syrehalt förekommer som Mn^{2+} . Vid ökad syretillgång bildas liksom för järn en utfällning orsakad av oxidation, Mn^{2+} oxideras till Mn^{4+} .

Kalcium faller ut p.g.a. av ändrade förhållanden när grundvattnet rinner ut i dräneringshålen. En övermättning på kalcium uppstår på grund av till exempel en trycksänkning i hålet jämfört med i berget, eller att eventuellt högre temperatur i dräneringshålet orsakar viss avdunstning av vattnet. Kalcium i form av $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ reagerar då enligt:



Om vattnet innehåller järn kan det på samma sätt falla ut som järnkarbonat (Lindblad-Pässe 1986):



3.2.3 Biologisk utfällning

Biologisk utfällning innebär att den kemiska utfällningen påskyndas av bakterier. Bakterier förknippade med järn i samband med utfällningsproblem brukar indelas i järnreducerande och järnoxiderande (t.ex. Emerson/Revsbech 1994)

Järnreducerande bakterier kännetecknas av att vara fakultativt anaeroba, d.v.s. de kan leva med eller utan syre, samt heterotrofer, d.v.s. de livnär sig på organiska föreningar (Johansson och Stille 1996). Exempel på järnreducerande bakterier är *Geobacter metallireducens* och *Shewanella putrefaciens*. De järnreducerande bakterierna skapar inte själva någon utfällning men reducerar järn i olika föreningar och bidrar på så sätt till att öka mängden Fe^{2+} i grundvattnet.

Järnoxiderande bakterier oxiderar Fe^{2+} till Fe^{3+} vilket skyndar på utfällningsprocessen; Singer och Stum (1970) har angett att bakterier vid låga pH kan öka processhastigheten med en faktor 10^6 . Om bakterien drar nytta av oxidationsprocessen, så kallade järnbakterier, så ökar volymen på utfällningen genom att de själva utgör en del av de bildade massorna. Utfällning av järn vid närvaro av järnbakterier kräver mindre tillgång på syre än rent kemisk utfällning. Dessutom så fastnar utfällningar som orsakats av bakterier lättare på ytor än vad rent kemiska utfällningar gör (Lindblad-Pässe 1986)

Det finns också ett stort antal bakterier som reducerar eller oxiderar manganföreningar i likartade processer som de för järn. Enligt Johansson och Stille (2016) är dock en viktig skillnad järnets förmåga att bilda svårlösliga sulfider vilket mangan mycket sällan gör.

3.3 FAKTORER SOM PÅVERKAR RISKEN FÖR UTFÄLLNINGAR

Faktorer som påverkar risken för utfällningar utgörs bland annat av: tid, vattenföring, bergart, bakterier och virus, vattnets surhetsgrad och redoxpotential, cementinjektering, kolsyra, temperatur, samt suspenderat material (Andersson 1991, Johansson och Stille 1996, Ekliden 2008).

3.3.1 Tid

Tidsaspekten avgör främst om utfällningspotential kan observeras och leda till förebyggande åtgärder. Utfällningar av järnhydroxid kan exempelvis sätta igen dräner i bergtunnlar inom sex månader, men det tar tid för utfällningarna att hårdna. Detta betyder att en dränspolning varje halvår kan räcka för att hålla dränen i funktion, men att längre tid mellan spolningarna inte ger någon effekt på de förhårdnade utfällningarna (Johansson och Stille 1996). När kalcium faller ut som kalcit bildar det direkt en hård avlagring och rensning genom spolning ger troligtvis inte någon större effekt (Ekliden 2008).

3.3.2 Vattenföring

Mängden vatten avgör hur mycket metalljoner som kan transporteras och därmed hur stor volym utfällningar som kan bildas. Hur lång tid mineral och vatten är i kontakt med varandra samt hur stor area som är i kontakt med vatten avgör mängden mineral som går i lösning (Ekliden 2008). Låga flödes hastigheter leder till längre kontakttid vilket i sin tur leder till större mängd jonföreningar som går i lösning. Dock så innebär låga vattenflöden också att det tar längre tid för de vittrade ämnena att transporteras bort, vilket kan hämma fortsatt vittring.

För den bakteriella utfällningshastigheten är flödes hastigheten inte den mest avgörande faktorn (Johansson och Stilles 1996). Den hastighet varmed bakterierna faller t.ex. järn beror av artsammansättning, temperatur och vattenkemi snarare än av hur mycket järn som passerar per tidsenhet. Detta gäller under förutsättning att järnkonscentrationen inte är så låg att den verkar begränsande.

3.3.3 Bergart

Som tidigare beskrivits i avsnitt 3.2.2 och 3.2.3 orsakas igensättning av dräner ofta av utfällningar som är baserade på järn, mangan eller kalcium. För att utfällningarna ska kunna bildas krävs det därför att järn, mangan eller kalcium finns löst i grundvattnet. På lång sikt bestäms grundvattnets kemi av reaktioner med bergets primära mineral (SKB 2004). Dessa vittrar och avger ämnen i löst form till grundvattnet. Berggrunden utgör således en viktig källa för utfällningar baserade på järn och/eller mangan (Ekliden 2008).

Järn är det 4:e vanligaste grundämnet i jordskorpan med en viktprocent av mellan 4 till 6 % och den näst aluminium vanligaste metallen. Silikater som biotit och hornblände, oxider som limonit, hematit och magnetit, sulfider som pyrit och pyrrhotit samt karbonater som siderit är mineral som innehåller järn (Andersson 1991). Järn förekommer i princip i alla bergarter och höga järnhalter återfinns, förutom i järnmalmer, också i basiska bergarter som t.ex. diabas och amfibolit.

Lägre järnhalter förekommer i granit och kan även förekomma i kalksten (Ekliden 2008).

Mangan är det 12:e vanligaste grundämnet i jordskorpan. Mineral som innehåller höga halter mangan är t.ex. manganit och pyrolusit. Små mängder mangan förekommer i exempelvis järn-magnesium mineral som magnetit, biotit, olivin och pyroxen. I de enskilda mineralen är manganets andel låg, men förekomsten av dessa mineral är så utbredd att den sammanlagda manganhalten blir betydande (Ekliden 2008).

Förutom järn och mangan, kan utfällningar också bildas av kalcium som faller ut, se avsnitt 3.2.2. Kalcium är det femte vanligaste grundämnet i jordskorpan, men i injekterande tunnlar har det huvudsakligen sitt ursprung från injekteringsbruket (Ekliden 2008). Det är rimligt att anta att även injekteringsridåer under betongdammar tillför kalcium till grundvattnet och att mängden cementinjektering på så sätt bidrar till igensättning av dräner. Det finns dock inga studier som styrker detta. På liknade sätt skulle också förankringsjärn/stag rimligen kunna bidra till utfällningar genom att tillföra metalljoner till grundvattnet p.g.a. korrosion.

Det bör påpekas att förekomsten av järn eller mangan i berggrunden inte nödvändigtvis leder till igensättningsproblem hos dräner (Ekliden 2008). Viktiga miljöfaktorer för att metalljoner ska lösas i vatten är vattnets surhetsgrad samt hur reducerande miljön är.

3.3.4 Surhetsgrad och redoxpotential

Vattnets pH påverkar vittringsgraden samt vilka bakterier som förekommer. pH-värdet inverkar också på om utfällning sker rent kemisk eller med hjälp av bakterier, t.ex. äger bakteriell manganoxidation till största delen rum vid neutrala pH-värden (Johansson och Stille 1996).

Redoxpotentialen, Eh, är ett relativt värde på en lösnings förmåga att avge eller ta emot elektroner (Andersson 1991). Redoxpotentialen påverkar om kemisk eller biologisk utfällning dominerar, t.ex. vid högt Eh och pH förbrukas det Fe^{2+} som finns löst i grundvattnet snabbt genom kemisk utfällning, vilket hindrar den biologiska utfällningen. Redoxpotentialen avgör också delvis om miljön är gynnsam eller inte för olika bakterier.

3.3.5 Bakterier och virus

Bakterier påverkar grundvattnets kemi genom att de påskyndar reaktioner som annars sker mycket långsamt. Främst påverkas redox-reaktioner, se avsnitt 3.2.3, men även vittringsreaktioner kan katalyseras (SKB 2004). Reduktion av järn kan främst utföras av svavelbakterier som primärt gör vattnet surt eller reducerat, vilket gynnar reduktion och upplösning av järn (Andersson 1991). En översikt av bakterier som förknippas med järn- och mangan-utfällningar ges i Tabell 3.1. Virus motverkar bakterier och begränsar därmed mängden utfällningar (Eydal m fl 2008).

Tabell 3.1. Bakterier som faller ut järn och/eller mangan (Andersson 1991 och Salomonsson 2001).

Släkte	Utfäld metall	Släkte	Utfäld metall
Acidithiobacillus	Fe	Naumaniella	Fe
Arthrobacter	Mn	Ochrobium	Fe
Clonothrix	Fe, Mn	Pseudomonas	Mn
Clostridium	Fe	Siderobacter	Fe
Crenothrix	Fe, Mn	Siderocapsa	Fe, Mn
Desulfovibrio	Fe	Siderocystis	Fe, Mn
Ferrobacterium	Fe, Mn	Sideromonas	Fe, Mn
Ferrobacillus	Fe	Sideronema	Fe, Mn
Gallionella	Fe	Siderophacus	Fe
Hyphomicrobium	Fe, Mn	Siderophaera	Fe
Leptothrix	Fe, Mn	Spaerotilus	Fe
Metallogenium	Fe, Mn	Dulfolobus	Fe
Micromonospora	Fe	Toxothrix	Fe

3.3.6 Temperatur

Temperaturen påverkar i huvudsak vilka bakterier som förekommer. Dess inverkan på utfällningshastighet är dock inom felmarginalen (Andersson 1991).

3.3.7 Suspenderat material

Med grundvattnet transporteras bl.a. lerpartiklar, levande och döda bakterier samt kolloider av olika slag. Dessa fastnar på vägen genom berget i sprickor och porer, vilket sätter igen delar av vattnets flödesvägar såsom beskrivits i avsnitt 3.2.1. Enligt Ekliden (2008) ger troligtvis lermaterial, vilket bildas genom vittring av berggrunden i de sprickor som grundvattnet rör sig, störst bidrag till igensättning av dräner i bergtunnlar.

3.4 ÅTGÄRDER FÖR ATT ÅTERSTÄLLA DRÄNERNAS FUNKTION

För att rensa igensatta dränage finns ett flertal olika metoder som bl.a. beskrivits i EPRI (1992) samt Fiedler & Turlington (2010).

De vanligaste och billigaste metoderna är s.k. *"rodding"* och *"flushing"*. *Rodding* innebär att en stålstång eller liknade används för att bryta igenom utfällningarna som orsakar igensättningen. *Flushing* innebär att mjuka och lösa avlagringar avlägsnas genom att dräneringshålen genomsköljs med vatten eller luft som med tryck rensar hålet. Både dessa metoder har visat sig användbara vid relativt lösa avlagringar för att rensa dränagehålet men någon porttrycksreducerade effekt har inte observerats.

En annan metod för att rensa dränagehålen i syfte att återställa dränagets funktion är genom upprymning, d.v.s. en utvidgning av håldiametern. Denna metod har visat sig kunna reducera porttrycket och öka dränageflödet. Metoden är även effektiv vid hårda avlagringar. Enligt Rutenbeck och Day (1999) är emellertid denna metod som mest effektiv första gången den genomförs medan efterföljande

upprymningar inte visat sig lika effektiva. Som ett alternativ till upprymning av hålen kan även nya dränagehål borraras.

Mekanisk nötning har också använts i syfte att få bort avlagringar i dränagehålen. Olika typer av roterande borstar har då förts ner i dränagehålen. Viss ökning av dränageflöde har påvisats med dessa metoder men ingen portycksreducerande effekt har observerats (EPRI 1992). En fördel med metoden är att den är väsentligt billigare än upprymning av befintliga, eller borrning av nya, dränagehål.

Kemisk rensning vilken utförs genom att tillföra kemiska lösningar in i hålet så att de tränger ut även i kringliggande berg. Kemisk rensning utförs ofta med starka syror och enligt Andersson (1991) samt Fiedler och Turlington (2000) är effekten är ofta begränsad om man inte börjar på ett mycket tidigt stadium och utför det om igen med jämna intervall

Rengöring av dränagehålen med olika typer högtryckssprutor beskrivs i Rutenbeck och Day (1999), där ett flertal olika exempel presenteras där metoden framgångsrikt använts. Enligt rapporten har tekniken att använda högtryck utvecklats kraftigt under slutet av nittioalet. Eftersom det är cirka 15 år sedan denna rapport skrevs är det troligt att ytterligare utveckling skett inom området, men någon sådan information har emellertid inte hittats. För att rensa hårda utfällningar såsom kalcit användes exempelvis enligt Rutenbeck och Day (1999) på Ruskin Dam mycket höga tryck på 35 000 psi (ca. 240 MPa).

4 Praktiska erfarenheter vid svenska dammar

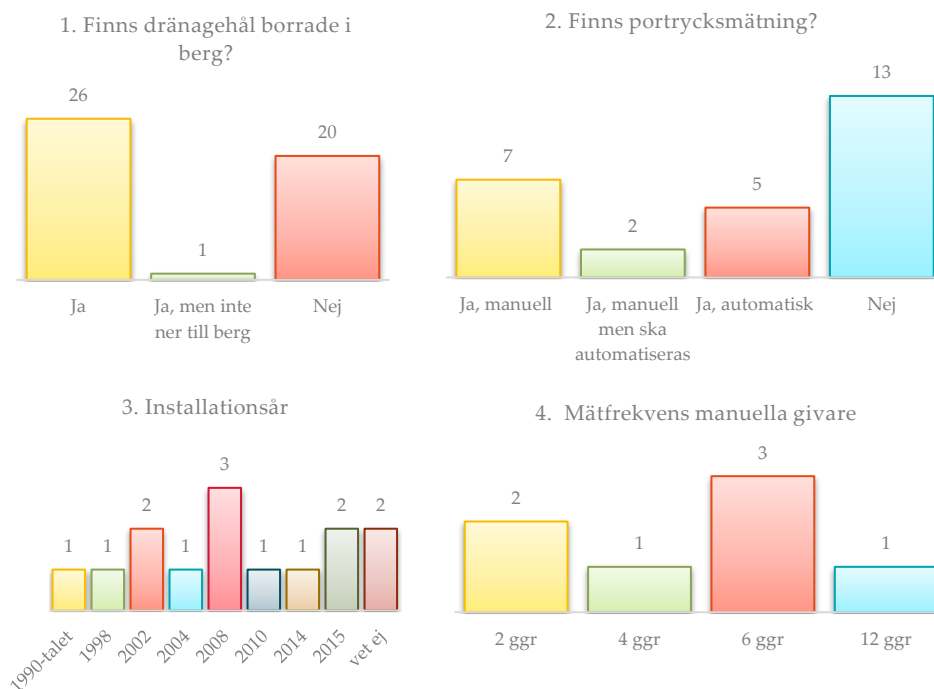
4.1 INLEDNING

För att undersöka hur vanlig igensättning av dränagesystem är i svenska betongdammar grundlagda på berg, samt vilka åtgärder som brukar vidtas, har en enkätundersökning skickats ut till ett antal dammägare. Resultatet från undersökningen presenteras i avsnitt 4.2, medan ett fall där igensättning av dränage misstänks presenteras i avsnitt 4.3.

4.2 RESULTAT FRÅN ENKÄTUNDERSÖKNINGEN

Totalt har information erhållits för 47, i huvudsak, klass 1-anläggningar vilket utgör en begränsad andel av befintligt bestånd av dessa typer av anläggningar i Sverige. Totalt finns cirka 225 klass 1 anläggningar i Sverige, vilket inbegriper både fyllnadsdammar och betongdammar (Svenska Kraftnät 2014). Dammägarna har själva valt vilka anläggningar de lämnat information om, vilket inverkar på studiens validitet. Baserat på ovanstående information ska resultaten av enkätundersökningen inte ses som en komplett redovisning av situationen i Sverige utan snarare som en indikation på hur övervakning och underhållsåtgärder hanteras i dagsläget.

Resultaten av enkäten redovisas i Appendix A. I Figur 4.1 visas en sammanställning av resultaten avseende befintliga dränagesystem samt instrumenteringen av dessa. Totalt har information erhållits för 47 anläggningar och i 26 av de dessa finns dränagehål borrade i berg. I 14 av dessa 26 mäter man portryck, antingen automatiskt eller manuellt med en mätfrekvens som varierar mellan 2 till 12 ggr/år. Majoriteten av portrycksgivarna har installerats under 2000-talet.



Figur 4.1. Sammanställning resultat från enkätundersökning

Tendens till igensättning har observerats i 5 av de 14 dammar där man mäter porttryck. I 4 av dessa har åtgärder i form av rensning med högtryck tillämpats medan åtgärder planeras vid den femte anläggningen. För anläggningar där dränagehål finns men där porttrycksgivare inte finns installerade har tendens till igensättning observerats och åtgärder genomförts för 3 anläggningar. Det framgår dock inte av svaren i undersökningen vad observationerna avseende igensatt dränage är baserade på. För en anläggning anges att rensning enligt underhållsplan utförts.

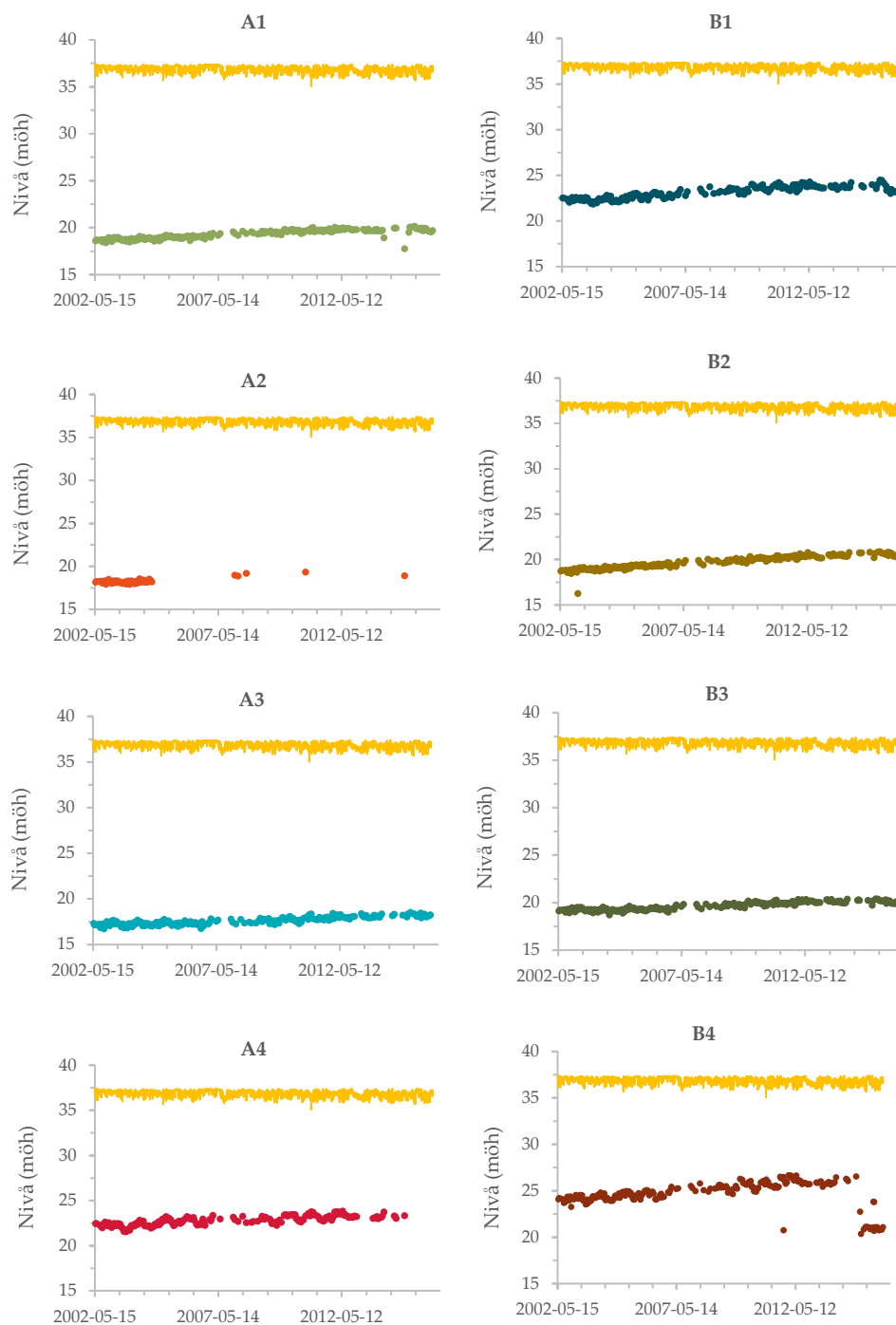
Flera av svaren på frågan om de åtgärder som har utförts för att säkerställa dränagets funktion haft avsedd effekt visar på tveksamhet kring åtgärdens effektivitet. Orsaken till detta är oklar, men en möjlig orsak till detta är att åtgärderna utförts nyligen, de senaste 1-2 åren, och på anläggningar med låga mätfrekvenser, dvs. mätunderlaget som erhållits efter rensningen är för litet för att en trend åt något håll ska kunna observeras.

4.3 EXEMPEL PÅ ANLÄGGNING MED MISSTÄNKT IGENSATT DRÄNAGE

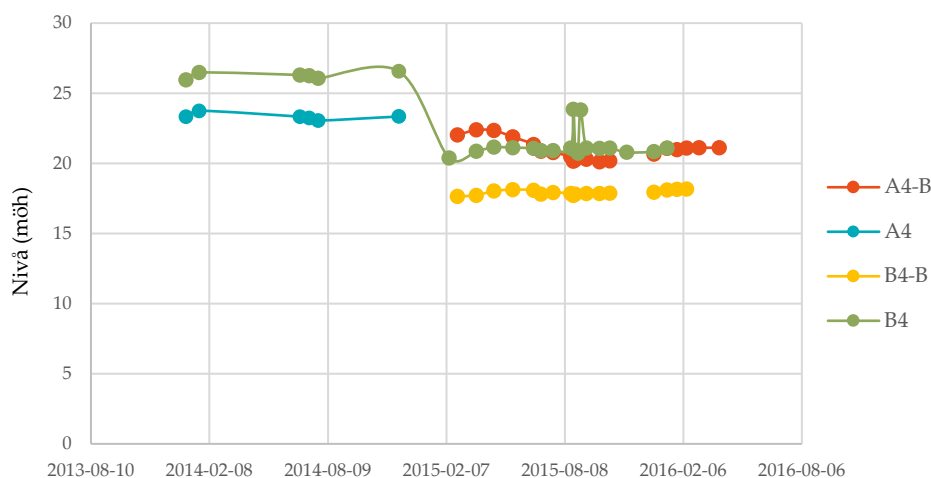
Den studerade anläggningen byggdes under 1950-talet och består av 3 delar, intag, utskov och fyllningsdamm. År 1997-1998 utfördes ett antal åtgärder för att reducera och kontrollera porttrycken i berget under utskoven. Bland annat borrades ett 30-tal stycken vertikala hål med diametern ca 50 mm till 6 – 8 djup i berg och delvis i betong som hålls öppna för att dränera det underliggande berget. Vidare installerades mätare vilka registrerar porttrycket i berggrunden. Mätarna benämns i denna rapport A1-A4 samt B1-B4.

En sammanställning av uppmätta portryck per givare samt ÖVY för perioden 2002-05-24 tom 2016-01-12 visas i Figur 4.2. Resultaten visar på en stigande trend i portryck, varför tre nya portryckgivare installerades med syfte att verifiera mätresultaten. Den första givaren installerades i befintligt hål A4 för portrycksmätning, där den gamla givaren tagits upp. Den nya givaren benämns A4-B. Därutöver borrades ett nytt hål intill givare B4, benämnt B4-1. I samband med installationen lyckades manschetten emellertid inte sluta tätt p.g.a. sämre bergkvalité vid bergytan, varför igengjutningen misstänktes vara bristfällig. En tredje givare installerades därför 2,7 m från B4-1. Denna givare benämndes B4-B.

En jämförelse mellan gamla och nya givare visas i Figur 4.3. I figuren framgår att borrningen för installationen av givare B4-1 och B4-B sammanfaller med en reduktion i portryck för närliggande givare B4 vid årsskiftet 2014 till 2015. A4-B uppvisar initialt något lägre portryck än givare A4, denna skillnad är dock relativt begränsad och kan vara kopplad till borrningen av de nya givarna. Det kan noteras att portrycket för givare A4-B sjunker under 2015 efter att borrningen är utförd. Givare B4-B uppvisar också ett lägre värde än för B4. Skillnaden är emellertid relativt liten och kan bero på lokala skillnader i sprickplan i berget. Det är dock noterbart att portrycket i B4 sjunker markant med upp till 5 mvp efter att borrningen är utförd. Det är troligt att borrhålet för B4-1, där installationen misslyckades och manschetten inte slöt tätt p.g.a. sämre bergkvalité vid bergytan, delvis fungerar som ett kompletterande dränagehål, vilket givit upphov till det reducerade portrycket i B4 och delvis även i A4-B.

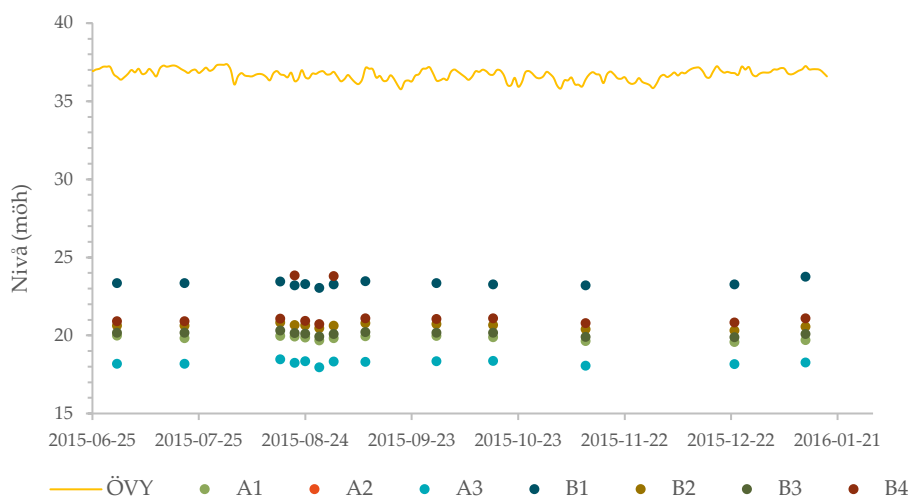


Figur 4.2. Uppmätta porttryck under perioden 2002-05-24 tom 2016-01-12 (gul linje representerar ÖVY).



Figur 4.3. Jämförelse mellan nya (A4-B och B4-B) och gamla (A4 och B4) givare

På grund av den stigande trenden i uppmätta portryck genomfördes under 2015 en urblåsning av dränagehålen med tryckluft. Dränagehålen innehöll relativt mycket material i form av borrhax, mindre stenar och fin svartaktig sand, vilket möjligen kan vara sprickfyllnadsmaterial. Efter urblåsningen sänktes bottennivån i hålen med mellan 0,6-1,5 m för de flesta av dränagehålen. Figur 4.4 visar uppmätta portryck samt ÖVY för perioden 2015-06-25 tom 2016-01-12, d.v.s. perioden i samband med urspolningen. Det kan där observeras att den urspolning som genomfördes inte har gett någon effekt på de uppmätta portrycken, vilket är i linje med tidigare erfarenheter från andra anläggningar internationellt såsom beskrivits i kapitel 3.4. Det planeras därför ytterligare åtgärder för att reducera portrycket.

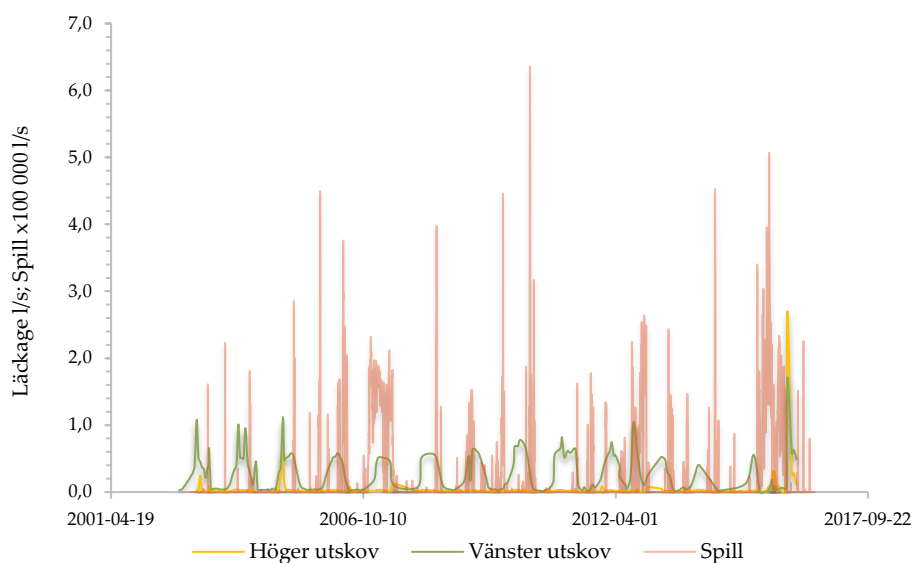


Figur 4.4. Sammanställning uppmätta portryck 2015-06-25 tom 2016-01-12 i samband med urblåsning av dränagehål.

Orsaken till den stigande trenden i observerat portryck är oklar. Det finns emellertid ett antal möjliga förklaringar. En förklaring kan vara felaktiga givare.

Efter en noggrann genomgång har inga defekter kunnat konstateras, varför denna förklaring anses mindre trolig.

En annan möjlig orsak till de ökande portrycken skulle kunna vara en urlakad injekteringsskärm, vilket succesivt ökat läckaget genom berggrunden och därmed resulterat i ett ökande portryck. Det bedöms emellertid mindre troligt att en urlakad injekteringsskärm resulterar i en jämn stigande trend i portrycket för samtliga givare till följd av ett ökat läckage i injekteringsskärmen. Samtidigt kan inga tydliga trender i uppmätt läckage observeras under mätperioden, se Figur 4.5.



Figur 4.5 Uppmätt läckage.

En tredje förklaring till den stigande trenden i uppmätt portryck är igensatt dränage. I samband med installation av de nya portrycksgivarna togs prover på sediment under utskov och intag för analys av förekomsten av tungmetaller. Proverna visade på riklig förekomst av både järn och mangan. Med avseende på järn innehöll proverna 84 200 (utskov) respektive 272 000 (intag) mg/kg TS (torrsubstans) och med avseende på mangan innehöll proverna 2570 (utskov) respektive 9610 (intag) mg/kg TS. Halterna ligger i det övre intervallet i jämförelse med de prover som tagits i svenska referenssjöar av SLU. Proverna visar även på förekomst av andra tungmetaller som överstiger riktvärden för MKM (Naturvårdsverkets riktvärden för mindre känslig markanvändning), såsom Arsenik, Barium, Kobolt och Bly. Inga prover togs emellertid direkt på dränagevattnet eller med avseende på förekomst av kalcium.

Förekomsten av både mangan och järn i tagna sedimentprover innebär att utfällning av både järn och mangan, och kanske även andra tungmetaller, kan utgöra en möjlig förklaring till de med tiden stigande portrycken. Utfällningarna kan ansamlas i hårda avlagringar i anslutning till de sprickor som korsar dränagehålen och successivt reducera deras kapacitet. Det faktum att en långsam ökning i portryck i olika grad kan observeras i samtliga portrycksgivare bedöms stödja denna teori.

5 Diskussion

5.1 BAKGRUND

RIDAS (Svensk Energi 2012) tillåter en reduktion av upptrycket vid ett fungerande dränagesystem. För att dränagehålens upptrycksreducerande effekt skall få tillgodoräknas krävs dock att hålens funktion kontrolleras. Inga riktlinjer avseende hur dränagehålens funktion ska kontrolleras ges i RIDAS men att mäta upptrycket nedströms dränagehålen anges som ett exempel på att kontrollera funktionen. Dock saknas riktlinjer avseende mätfrekvens och utvärderingskriterier. RIDAS ger inte heller rekommendationer avseende lämpliga åtgärder för att återställa funktionen hos igensatta dränagehål.

5.2 ENKÄTUNDERSÖKNING

Erfarenheter från den enkätundersökning som genomfördes inom ramen för denna studie visar på stora brister och variationer avseende övervakning av dränagesystemens funktion. I endast hälften av de dammar där dränagesystem finns installerat sker övervakning av portryck. Det bör påpekas att det är oklart om fungerande dränagesystem tillgodoräknats för att önskad stabilitet ska erhållas för dammen. Stora variationer uppvisas också i mätfrekvens för de dammar där övervakning och indirekt verifiering av dränerande förmåga sker genom mätning av portrycket. I flera fall är det också oklart om igensättning av dränaget förekommer. Med tanke på tidsaspektens betydelse för möjligheten att åtgärda igensättning medelst spolning, vilken enligt enkätundersökningen är den vanligaste åtgärden för att återställa dränagets funktion, är frågan om mätfrekvenser på tex 2 ggr/år är tillräckligt. Låga mätfrekvenser försvårar också utvärderingen av mätdata då det är svårare att utesluta eventuella mätfel eller tillfälliga avvikelser p.g.a. av tex spill.

Enligt svaren som erhöles på enkätundersökningen har tendens till igensättning observerats för ett par anläggningar som saknar mätningar. Det är oklart hur verifiering av dränerande förmåga utförts i dessa fall. Eventuellt kan tendens till igensättning p.g.a. av kemisk och biologisk utfällning samt minskat läckage till viss del avgöras genom okulärbesiktning, det är dock svårt att utesluta inverkan på dränerade förmåga utan mätningar då de processer som orsakar igensättning sker delvis dolt inne i dränen.

5.3 ORSAKER TILL IGENSÄTTNING

Dräner kan sättas igen på ett flertal olika sätt, såsom mekanisk igensättning, kemisk utfällning, biologisk utfällning eller en kombination av dessa

Johansson och Stille (1996) föreslår i sin studie om igensättning av dräner i tunnlar att problemområden identifieras och kategoriseras baserat på bedömning av geologiska förhållanden, provtagningar, analyser och tester av grundvattnet (och befintliga utfällningar) samt observationer av utfällningar efter borrning/upprymning. För dessa områden utformas sedan underhållsprogram för att undvika att igensättning orsakad av hårda utfällningar sker.

En liknade metodik där risken för igensättning av dränagehålen under dammen bedöms baserat på geologiska förhållanden med avseende på vattenkemi och övriga processer som kan bidra till att utfällningar bedöms kunna vara lämplig. Baserat på trolig orsak till igensättning samt uppskattad igensättningshastighet kan sedan behovet av underhåll utvärderas.

5.4 VERIFIERING OCH ÖVERVAKNING AV DRÄNERANDE FÖRMÅGA

Fallstudien som presenteras i avsnitt 4.3 belyser att även i de fall mätningar av portrycket utförs, är det inte alltid enkelt att konstatera om förändringar i uppmätta värden beror på igensättning av dränagesystemet eller på grund av andra faktorer, såsom tex dysfunktionella givare. Det kan dock vara betydelsefullt vid beslut om åtgärder. Det är därför nödvändigt att kontinuerligt mäta både portrycket och läckageflöde. Vidare bör ett referensvärde för dränens genomsläpplighet fastställas, t ex genom vattenförlustmätningar eller pumpförsök där dränagehålet töms och stighastigheten registreras, vid installation av dränagesystemet. Om igensättning av dränagehålen misstänks kan då nya mätningar genomföras och jämföras mot referensmätningen för att kontrollera hålens funktion.

5.5 ÅTGÄRDER VID IGENSÄTTNING AV DRÄNAGE

Litteraturstudien som genomfördes för att öka förståelsen för de mekanismer som påverkar igensättning av dräner i berggrunden samt vilka åtgärder som är lämpliga vid igensättning indikerar att det är svårt att rensa igensatt dränage som orsakas av hårda utfällningar. Av de metoder som beskrivs i avsnitt 3.5 är det endast upprymning av befintliga dränagehål eller borrning av nya som visat sig tillräckligt effektiva vid hårda utfällningar. Övriga metoder lämpar sig framförallt för mjuka och lösa avlagringar. Man bör således i första hand se till att undvika att igensättning orsakad av hårda utfällningar sker t ex genom underhållsplaner där lämpliga åtgärder, t ex spolning av dränagehålen, sker tillräckligt ofta.

Behovet av underhåll beror på trolig orsak till igensättning samt uppskattad igensättningshastighet. Om mjuka utfällningar av exempelvis järnhydroxid misstänks kan spolning av dränagehålen utgöra en lämplig åtgärd men om hårda utfällningar av exempelvis kalcium kan förväntas kan det bli nödvändigt med mer omfattande åtgärder som uppborrning av befintliga dränagehål eller borrning av nya hål. Den riskbedömning som beskrivs i avsnitt 5.3 kan således ligga till grund för utformning av underhållsprogram. Riskbedömning kan också utgöra underlag för att bedöma lämpligheten i att använda reduktion av portryck i syfte att uppfylla RIDAS stabilitetskriterier.

6 Slutsatser

Föreliggande arbete visar att hanteringen av dränage bör indelas i tre delfrågor: (i) finns förutsättningar för igensättning av dränage, (ii) hur ska dränagets funktion verifieras, (iii) vilka underhållsåtgärder ska genomföras för att säkra dränagets långsiktiga funktion om igensättning kan misstänkas.

För att kontrollera om det finns förutsättningar för igensättning av dränaget rekommenderas att lokala förhållanden undersöks och en riskbedömning av igensättning genomförs. Denna riskbedömning kan exempelvis baseras på analys av lokala geologiska förhållanden samt analys av vattenprover tagna från dränagehål med avseende på metaller som bedöms kunna sätta igen dränagehålen. Tidiga observationer av eventuella utfällningar, exempelvis de första sex månaderna efter att dränagehålen borrats, kan också utgöra underlag för att bedöma risken för igensättning.

Att verifiera dränagets funktion är svårt. Samtidigt är igensättning av dränage en process som sker gradvis över tid. Det är därför viktigt att initiala referensmätningar av dränagets funktion sker närmaste månaderna efter att dränagehålen borrats. Exempel på mätningar som kan vara aktuella är vattenförlustmätningar eller pumpförsök där dränagehålet töms och stighastigheten registreras. Vid båda dessa försök är det också viktigt att ha kunskap om portryck samt notera eventuellt läckageflöde från dränagehålet.

För långtidsövervakningen av dränagehålens funktion är det enligt författarnas uppfattning nödvändigt att mäta både portrycket och läckageflöde. Mätningen bör ske kontinuerligt. Om mätningarna indikerar att dränagehålen har satt igen kan nya vattenförlustmätningar eller pumpförsök genomföras i hålen och jämföras mot referensmätningen.

Om riskbedömningen tyder på att igensättning av dränage utgör ett potentiellt problem bör ett underhållsprogram tas fram. Programmet bör baseras på vilken typ av igensättning som bedöms kunna uppkomma. Om mjuka utfällningar av exempelvis järnhydroxid misstänks kan spolning av dränagehålen utgöra en lämplig åtgärd, där åtgärdsintervallet kan förväntas ligga i intervallet 6 mån till 2 år baserat på lokala förhållanden. Om hårda utfällningar av exempelvis kalcium eller mangan kan förväntas bör åtgärdsprogrammet inkludera mer omfattande åtgärder som uppborring av befintliga dränagehål eller borring av nya hål. Åtgärdsintervallet bör även i detta fall baseras på lokala förhållanden men kan förväntas ligga i intervallet 10 till 20 år. Mekanisk rensning av hålen kan även genomföras vid igensättning av hårda utfällningar, men tidigare erfarenheter internationellt tyder på att dessa åtgärder i de flesta fall har en begränsad effekt.

I dagsläget är erfarenheterna i branschen från riskbedömning av igensättning av dränage, övervakning av dränagets funktion samt utformning och implementering av underhållsåtgärder begränsad. Framtida erfarenheter från fler väl dokumenterade fall där igensättning av dränage misstänkts eller har konstaterats, och åtgärder för att rensa dränaget genomförts, är därför viktiga att dokumentera och sammanställa. Det är författarnas förhoppning av denna rapport kan utgöra en

inledande del av denna sammanställning och utgöra en vägledning för hantering av dränage vid svenska betongdammar.

De slutsatser som presenteras är av övergripande karaktär då kunskapen som rör dränagehantering är bristfällig, både nationellt och internationellt. Vår tanke är att denna övergripande vägledning ska kunna ligga till grund för ett antal framtida fallstudier som dokumenteras väl. I takt med att erfarenheten kring denna fråga växer kan därefter mer detaljerade riktlinjer utarbetas.

7 Referenser

- Andersson A-C. (1991). *Förekomst av järn i grundvatten – problem med järnutfällningar i dräneringssystem*. Publikation 2:91. Licentiatuppsats, Institutionen för vattenförsörjnings- och avloppsteknik, Chalmers Tekniska Högskola.
- Ekliden J. (1998). *Igensättning av dräner i bergtunnlar*. Projektarbete B543. Institutioner för geovetenskaper, Göteborgs Universitet.
- Eklund D & Stille H. (2008). Penetrability due to filtration tendency of cement-based grout. *Tunnelling and Underground Space Technology* 23:390–397.
- Emerson D & Revsbech NP. (1994). Investigation of an iron-oxidizing mat community located near Aarhus, Denmark: Field studies. *Applied and Environmental Microbiology* 60(11): 4022-4031.
- EPRI - Electric Power Research Institute. (1992). Uplift pressures, shear strengths, and tensile strengths for stability analysis of concrete gravity dams – Volume 1. EPRI TR-100345.
- Eydal HSC, Ferris FG, Kyle JE, & Pedersen K. (2008). Viruses in granitic groundwater from 69 to 450 m depth of the Äspö hard rock laboratory, Sweden, *The ISME Journal, International Society for Microbial Ecology* 2(5): 571-574.
- Fiedler & Turlington (2010) Dam drain cleaning – Successes and failures. *Water operation and maintenance bulletin*, no 194.
- Gustafson G & Walk L. (2012). *Hydrogeology for rock engineers*. Stockholm: BeFo.
- Johansson J & Stille B. (1996). *Ringens & Yttre Tvärleden*. Projektnr 320 Test av dräner i tunnel vid Hornsberg. Delrapport nr 4, Dränfunktion vid igensättning., Vägverket, Stockholm.
- Lindblad-Pässe A. (1986). *Järnutfällningsproblem i grundvattenvärmesystem*. Byggforskningsrådet rapport R109:1986, Liber Tryck AB, Stockholm.
- Murphy, W. L., Ebeling, R. M., & Anderson, J. M. (2002). Assessment of geology as it pertains to modeling uplift in jointed rock: a basis for inclusion of uncertainty in flow models (No. ERDC-TR-02-2). ENGINEER RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER VICKSBURG MS GEOTECHNICAL AND STRUCTURES LAB.
- Rutenbeck och Day (1999). An evaluation of water jetting for bureau of reclamation use in cleaning concrete dam foundation drains. USBR Dam safety office DSO-98-16.
- Singer PC och Stumm W. (1970). Acidic mine drainage: the rate determining step. *Science* 167:1121-1123. DOI: 10.1126/science.167.3921.1121

- Spross J, Johansson F, & Larsson S. (2014). On the use of pore pressure measurements in safety reassessments of concrete dams founded on rock. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 8(2), 117-128.
- Svenska kraftnät (2014) *Klassificering av dammar – tidplan och fördelningsnyckel. Redovisning av regeringsuppdrag om dammsäkerhet.*
- Svensk Energi (2012). RIDAS Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet, Avsnitt 7.3 Betongdammar, Tillämpningsvägledning.
- Svensk KB. (2004). FUD-program 2004 - Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering av kärnavfall, inklusive samhällsforskning. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Vermilye, J. M., & Scholz, C. H. (1995). Relation between vein length and aperture. *Journal of Structural Geology*, 17(3), 423-434.
- Westberg Wilde M & Johansson F. (2016). *Probabilistic model code for concrete dams.* Energiforskrapport 2016-292.

Appendix A – Svar enkätundersökning

I Tabellen nedan presenteras en sammanställning av svaren som erhöles på den enkätundersökning som skickades ut till ett flertal dammägare.

Anläggning	Porttrycksmätning genomförs	Mätfrekvens	Tendens igensättning	Åtgärd	Effektivitet åtgärd
1	Nej	-	Okänd	-	-
2	Nej	-	Okänd	-	-
3	Ja (sedan 2014)	2 ggr/år	Okänd	Urblåsning (2014)	Till viss del
4	Nej	-	Nej	Rensning (2008)	Sannolikt
5	Ja (sedan 2015)	Manuell (ska automatiseras)	Okänd	-	-
6	Ja (sedan 2015)	Manuell (ska automatiseras)	Okänd	-	-
7	Nej	-	Ja	Spolning vatten	Ja
8	Nej	-	Nej	-	-
9	Ja (sedan 2002)	Automatisk	Okänd	-	-
10	Nej	-	-	-	-
11	Ja	2 ggr/år	Ja	Rensning högtryck (2015)	Svårt att utvärdera
12	Nej, ur drift	-	-	-	-
13	Nej	-	-	-	-
14	Ja	4 ggr/år	Ja, enligt FI 2012	Rensning högtryck (2015)	Svårt att utvärdera
15	Nej	-	-	-	-
16	Ja (ca 2008)	6 ggr/år	-	-	-
17	Ja (ca 2008)	6 ggr/år	-	-	-
18	Ja (ca 2008)	6 ggr/år	-	-	-
19	Nej	-	-	Rensning enligt uh-plan	-
20	Nej	-	Ja, enligt FDU	Rensning spolning (2014)	
21	Ja (ca 2010)	Automatisk			
22	Ja (ca 1990-talet)	12 ggr/år	Ja, enligt FDU	Rensning planeras 2016	
23	Ja (1998)	Automatisk	Ja	Rensning spolning (2015)	
24	Ja	Automatisk	-	-	-
25	Nej	-	-	-	-
26	Ja (2004)	Automatisk	-	-	-

IGENSÄTTNING AV DRÄNAGE UNDER BETONGDAMMAR

Rapporten ger en ökad förståelse för vilka faktorer som påverkar risken för igensättning av dränage under en betongdamm och hur igensättningen kan övervakas och åtgärdas. Till att börja med bör en riskbedömning göras för att avgöra förutsättningarna för dränage. Den baseras på okulära observationer, kemiska analyser av vattenprover och genom kännedom om lokala geologiska förhållanden.

Igensättningen sker gradvis och därför rekommenderas ett övervakningsprogram med kontroll och mätning av både porttryck och läckageflöde. Dessutom rekommenderas att en referensmätning av dränagehålens funktion med exempelvis vattenförlustmätningar eller pumptest genomförs då dränagehålen tas i drift.

Om riskbedömningen visar ett möjligt problem rekommenderas även att ett underhållsprogram tas fram som utformas efter vilken typ av igensättning som förväntas. Beroende på typ av igensättning kan åtgärderna omfatta exempelvis spolning av dränagehålen var 6:e månad eller borrning av nya dränagehål efter ett antal år.

De här resultaten ska kunna ligga till grund för riktlinjer för hur övervakning och underhållsåtgärder ska utformas för att säkerställa dränagets funktion.

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