

DIMENSIONERANDE LÄCKAGE FÖR FYLLNINGSDAMMAR

RAPPORT 2019:584



Dimensionerande läckage för fyllningsdammar

**INGVAR EKSTRÖM
MAGNUS LJUNGGREN
ÅKE NILSSON**

ISBN 978-91-7673-584-8 | © ENERGIFORSK maj 2019

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

Förord

I den nuvarande tillämpningsvägledningen avseende fyllningsdammar, RIDAS TV 7.2, 2012, beskrivs hur lastfallet dimensionerande läckage kan beräknas och åtgärdas för jordfyllningsdammar med tät kärna av morän. Denna beräkningsmetod är inte alltid applicerbar på fyllningsdammar med en annan utformning. Därav har ett behov av alternativa eller kompletterande beräkningssätt identifierats.

I denna rapport beskrivs ett förslag på beräkningsmetodik för bedömning av dimensionerande läckage och förstärkning av fyllningsdammar. Utredningen har genomförts av projektledare Ingvar Ekström (Sweco), tillsammans med Magnus Ljunggren (Sweco) och Åke Nilsson (WSP). Den referensgrupp som följt projektet har utgjorts av Maria Bartsch (Svenska kraftnät), Gunnar Sjödin (Vattenregleringsföretagen), Peter Viklander (Vattenfall) och Carl-Oscar Nilsson (Uniper).

Projektet har ingått i Energiforsks dammsäkerhetstekniska utvecklingsarbete med medverkan av vattenkraftsindustrin och Svenska kraftnät.

Författarna ansvarar för rapportens innehåll.

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

För att förhindra att en fyllningsdamm snabbt utvecklar ett haveri vid ett större genomgående läckage, så förses svenska dammar som har stora haverikonsekvenser med en nedströms stödbank. Denna är avsedd att stabilisera dammen i en skadesituation, samt förbättra erosionsbeständigheten, så att det i händelse av inre erosion och ett större läckage ska finnas tillräcklig tid för att sätta in motåtgärder. Den schablonmässiga beskrivningen i nuvarande tillämpningsvägledning (RIDAS TV, 2012) ger dock inte underlag för bedömning i sådana fall då dammen avviker från ett standardiserat utförande med central vertikal tätning och med begränsad höjd. Det är också svårt att utifrån underlaget beräkna ett realistiskt läckageflöde som dammen ska tåla, för stenfyllningsdammar och höga dammar av alla typer.

Denna rapport beskriver ett förslag till felmodsbaserad beräkningsgång vid projektering av åtgärder för lastfallet dimensionerande läckage. Grundläggande för att lastfallet ska uppkomma och var det uppstår, är att inre erosion har initierats i dammkroppen. Stor vikt läggs därför vid analysen av de faktorer som påverkar den processen, allt från initieringen av förloppet, utvecklingen, möjlighet att förloppet stannar upp, designfaktorer som påverkar förloppets hastighet, samt hur förhållandena i dammens nedströmstå i utströmningspunkten inverkar på förloppet.

Den föreslagna beräkningsmetodiken för bedömning av dimensionerande läckage och förstärkning av fyllningsdammar kan kort beskrivas enligt följande:

- Förhållanden för att inre erosion ska utvecklas i olika delar av dammen och dess undergrund studeras.
- En felmodsanalys genomförs, som ger antaganden för beräkning av dimensionerande läckage, läge för skadan och portryckslinje i dammkroppen.
- Designfaktorer som påverkar förstärkningens omfattning och placering går igenom.
- 'Dam breach initiation time', som uppskattar tiden från initiering till okontrollerat brott, studeras.
- Beräkning av läckageflöde och stabilitet utförs och eventuella förstärkningsåtgärder projekteras utifrån resultatet, med beaktande av resultatet från ovan listade punkter.

Rapporten ger även förslag på modifieringar i RIDAS TV, speciellt avseende erosionsbeständigheten i dammtån i förhållande till läckageflödet, samt läge för glidytan för acceptabel säkerhetsfaktor.

Summary

To obtain additional time for intervention and prevent a rapid breach mechanism development in case of excess leakage through embankment dams, it's in Sweden common practice to fit high-consequence dams with a downstream supporting berm that stabilizes the downstream slope and prevents excessive erosion.

In the national dam safety guideline, RIDAS, a standard approach for the design of the supporting berm is described. However, the guideline does not provide any substantial support in regard of specific design features such as type of embankment dam, dam zoning, site condition, topography etc. Nor does the guideline provide any specific advice regarding rockfill dams.

The design leakage is a specific design load case in the Swedish dam safety guidelines. This report presents a possible failure-mode based approach to adapt the design of the supporting berm to this load case and the specific conditions of the embankment dam. The failure mode related to this loading case is internal erosion. A significant part of this report is therefore related to the analysis of the potential of this failure mode initiating and developing and how and where in the dam it can be expected to most likely occur.

The suggested approach can synoptically be described as follows:

- A failure mode analysis is carried out to determine the “design leakage” scenario in regard of leakage per second and meter of the dam, location of the damage and phreatic surface in the dam.
- The conditions for internal erosion to develop is studied.
- Factors influencing the progression of leakage are addressed.
- Dam breach initiation time is determined.
- Leakage flow is calculated, and stability conditions are investigated. The supporting berm is designed accordingly.

The report also addresses suggested revisions of the current standard design approach, particularly in regard of criteria for erosion resistance of the dam toe and the location for the critical slip surface determining the acceptable safety factor against catastrophic sliding.

Innehåll

1	Inledning	8
1.1	Uppdrag	8
1.2	Syfte	9
1.3	Arbetsgrupp och arbetsmetod	9
1.4	Disposition	10
1.5	Avgränsningar	11
2	Lastfallet dimensionerande läckage	12
2.1	Bakgrund	12
2.2	Brottmoder kopplade till dimensionerande läckage	13
2.3	Bakgrund till nuvarande riktlinjer avseende dimensionerande läckage	15
2.4	Nuvarande riktlinjer för bedömning av dimensionerande läckage	17
2.4.1	Vägledning enligt ridas	17
2.4.2	Generella referensvärden	17
2.5	Nuvarande riktlinjer för förstärkning	18
3	Bedömning av dimensionerande läckage genom analys av felmoden inre erosion	20
3.1	Allmänt	20
3.2	Föreslagen metodik	20
3.3	Felmoden inre erosion	22
3.3.1	Allmänt	22
3.3.2	Beskrivning av felmoden	23
3.3.3	Värdering av potential för initiering av inre erosion och läckage med avseende på filter	25
3.3.4	Exempel på faktorer som påverkar utvecklingen av inre erosion	33
3.3.5	Dam brech initiation time för felmoden inre erosion	40
4	Geometriska överväganden som underlag för dimensionering av förstärkningsåtgärder	43
4.1	Allmänt	43
4.2	Aspekter på stabilitetsberäkningar och glidyntans läge	43
4.3	Probabilistisk analys av dammens säkerhetsfaktor	45
4.4	Geometrisk dimensionering av stödbank	46
5	Dimensionering av dammtåförstärkning med hänsyn till dimensionerande läckage	51
5.1	Allmänt	51
5.2	Beaktade lastfall	51
5.3	Dimensionering av storlek på material i dammtåförstärkning	52
5.4	Dammbrottsförsök som underlag för ny vägledning vid dimensionering	54
5.4.1	Allmänt	54
5.4.2	Simulering av dammhaveri genomförda av energibedriftenes landsforening (ebl)	55

5.4.3	Slutsatser från försöken och förslag till modifieringar av nuvarande riktlinjer	56
6	Vägledning för specialfall för hantering av dimensionerande läckage	58
6.1	Allmänt	58
6.2	Hög stenfyllningsdamm	58
6.2.1	Beskrivning av anläggningen	58
6.2.2	Resonemang kring dimensionerande läckage	59
6.2.3	Undersökta skadescenarion	59
6.2.4	Dimensionering av stödbank	62
6.3	Hög jordfyllningsdamm	65
6.3.1	Beskrivning av anläggningen	65
6.3.2	Resonemang kring belastningsfall	66
6.3.3	Anläggningsspecifika specialfall	68
6.3.4	Förbättrade indata	70
6.3.5	Möjlig utformning av stödbank	70
6.4	Fyllningsdamm med tätkärna av betong	71
6.4.1	Utformning	71
6.4.2	Svaghetspunkter och åtgärder	73
6.4.3	Speciella varianter	75
7	Slutsatser och diskussion	76
7.1	Allmänt	76
7.2	Slutsatser	76
7.3	Rekommendationer	76
7.4	Utvecklingsbehov	78
8	Referenser	79

1 Inledning

1.1 UPPDRAG

Arbetet med denna rapport har utförts inom projekt VK12114 inom Dammsäkerhetstekniskt Utvecklingsprogram 2016 – 2019.

Målet med denna rapport är att ta fram en handling som ger stöd vid beräkning av dimensionerande läckage i fyllningsdammar och vid planering av förebyggande förstärkningsåtgärder. Den ska också ge förslag till modifiering av rådande beräkningsmetodik, där så ses som motiverat. Avsikten är att beskriva alternativa eller kompletterande analysmetoder och beräkningssätt för att säkra fyllningsdammar vid ett större läckage genom eller under dammen. Detta brottsförlopp beaktas idag vanligtvis genom det teoretiska lastfallet 'dimensionerande läckage' som det redovisas i RIDAS TV (2012) och innebär att dammens nedströmsslänt säkras erosions-, och stabilitetsmässigt för lastfallet. Det belastningsfall och den beräkningsmetodik som idag anges ger oftast en mycket god förstärkning av dammsäkerheten. I vissa fall kan detta dock medföra att en oproportionerligt stor stödbank designas, eller i värsta fall resultera i en otillräcklig förstärkning, som inte på ett tillfredsställande sätt täcker in de delar av dammens tvärsnitt där en skada har störst potential att utvecklas.

En stor del av inträffade dammhaverier i fyllningsdammar är orsakade av inre erosion (Foster et. al, 1998). Inre erosion kan initieras i en fyllningsdamm på grund av otillräcklig filterkompabilitet mellan materialzoner i dammen eller undergrunden eller på grund av inre instabilitet i dammens fyllningsmaterial, så kallad suffusion. Stödbanksförstärkningar motverkar således inte initiering av inre erosion. Tanken med dessa är istället att ge tid för självläkning eller för att vid behov kunna vidta fysiska åtgärder för att motverka den initierande händelsen för läckaget, eller för att vid behov ge tid att minska läckageflödet t.ex. genom att sänka magasinsnivån.

Riktlinjerna i RIDAS TV är idag generella och ingen tydlig vägledning ges för lokal anpassning där dammen avviker från ett typutförande med en central tåtkärna av morän och med en stödfyllning av sand och grus. Endast begränsad information finns om hur inverkan av de topografiska förhållandena i dammläget, förhållandena i undergrunden, fyllningsdammstyp och materialgradering i de olika zonerna i dammen kan betraktas för att erhålla en funktionell designlösning. Det finns därför ett behov av att redovisa anpassade beräkningsmetoder för att möjliggöra ett bättre nyttjande av dammsäkerhetsresurserna, där realistiska lastfall beaktas. Vidare bidrar detta till att erhålla en harmonisering i säkerhetsnivå inom anläggningen, samt mellan olika anläggningar. Med detta avses att de här redovisade metoderna ska ge stöd för en lokalt anpassad analys, så att det undviks att överskatta eller underskatta säkerhetsnivån.

Denna rapport ger utifrån dessa förutsättningar exempel på möjliga lösningar hur man på ett anläggningsanpassat sätt, där lokala förutsättningar beaktas, kan projektera en förstärkning som ger den avsedda och önskvärda höjningen av dammsäkerhetsnivån. Detta även när den generella beräkningsmetodiken som den idag redovisas i RIDAS TV frångås. Rapporten tillgängliggör nytt

kunskapsunderlag och vägleder om metodik för att utvärdera och säkra befintliga fyllningsdammar, med avseende på lastfallet dimensionerande läckage.

1.2 SYFTE

Syftet med rapporten är att översiktligt beskriva hur olika faktorer, såsom de topografiska och geologiska förhållandena i dammläget, dammens geometri, typ av dammtätning, stödfyllningens sammansättning, grundläggningens utformning undergrundens förhållanden, utformning av anslutningar mm., kan inverka på nuvarande beräkningsmetodik av dimensionerande läckage. Vidare är avsikten att belysa hur dessa parametrar kan beaktas för alternativa beräkningsmetoder, för att erhålla en önskvärd förstärkning och dammsäkerhetsnivå. Rapporten är tänkt att ge stöd för dimensionering av förstärkningsåtgärder ur ett tekniskt perspektiv.

Rapporten syftar även till att ge slutsatser som ska kunna användas som ett kunskapsunderlag för modifieringar av RIDAS TV, eller som ett stöd för det dammsäkerhetshöjande arbetet där RIDAS används som grund. Rapporten ger även förslag på vidare forskning och utveckling som har identifierats i denna rapport.

Rapporten är avsedd att vara övergripande och beskriva de olika parametrarna i generella termer och inte kvantifiera parametrarnas inverkan på stödbankens utformning.

1.3 ARBETSGRUPP OCH ARBETSMETOD

Uppdraget omfattar att ta fram en Energiforskrapport enligt ordinarie mall.

Studien genomförs främst som en skrivbordsstudie med genomgång av relevant litteratur och dokumentation av historiska åtgärder på svenska fyllningsdammar, i synnerhet av praktikfall från dammar där alternativa lösningar valts jämfört med typfallet i RIDAS TV.

Utredningen har letts av Ingvar Ekström, Sweco Energy, som varit projektledare. Han är svensk deltagare i ICOLD:s arbetsgrupp E avseende inre erosion och fyllningsdammar och har 25 års erfarenhet från arbete med svenska fyllningsdammar.

Åke Nilsson medverkar i egenskap av att ha skrivit det nuvarande avsnittet om dimensionerande läckage i RIDAS TV och har kännedom om bakgrunden till den beskrivna metodiken, samt har specialkompetens inom inre erosionsförlopp och systemanalys.

Från Sweco Energy har även Magnus Ljunggren medverkat. Han har mer än 10 års erfarenhet från design av fyllningsdammar och dammsäkerhetsprojekt i Sverige och internationellt.

Rapportens innehåll och inriktning har fortlöpande stämts av med en referensgrupp inom Energiforsk. Denna har utgjorts av Maria Bartsch (SvK), Peter Viklander (Vattenfall), Gunnar Sjödin (Vattenregleringsföretagen) och Carl-Oscar Nilsson (Uniper).

Förutom dessa har Per Fektenberg (Fortum) medverkat, som granskare av de projekt som avser Fortums anläggningar.

1.4 DISPOSITION

Inledningsvis redovisas i kapitel 2 nuvarande tankegång i RIDAS TV om dimensionerande läckage. Detta görs som grund till de förslag för att förbättra bedömningen av åtgärdsbehovet, som ges senare i rapporten. Kort ges även typexempel på använd beräkningsmetodik för olika varianter av befintliga stödbankar på dammar i Sverige.

Rapporten redovisar i kapitel 3 en subjektiv bedömning av händelsekedjan för inre erosion från "initiering" och fram till "brottskede" enligt Figur 7.2 - 5 i RIDAS TV kap 7.2. Avsikten med detta är att ge vägledning om att olika dammar har olika behov av en stödbanksförstärkning och att åtgärden inte bara ska vara styrd av konsekvensklass, vilket är utgångspunkten som det nu står i RIDAS TV. Efter detta redovisas översiktligt den geomekaniska processen och brottförloppet för fallet dimensionerande läckage.

Då den här föreslagna dimensioneringen förutsätter anpassning till den lokala utformningen av den aktuella dammen, kan en felmodsanalys med händelsekedjor och felträd vara till hjälp för att identifiera dessa förlopp och därigenom bestämma lämpliga beräkningsförutsättningar för dimensionerande läckage. Detta redovisas översiktligt i kapitel 3.

I kapitel 4 kommenteras stabilitetsmässiga aspekter avseende lastfallet dimensionerande läckage.

I kapitel 5 görs en genomgång av dimensioneringsprocessen. Vidare diskuteras, utifrån modern forskning, aspekter på erforderlig stenstorlek i nedströms dammtå i relation till beräknad genomströmning.

Metoder för anläggningsanpassade lösningar, baserade på felmodsanalys av anläggningen, beskrivs därefter i kapitel 6 ur ett generellt perspektiv och vilka huvudsakliga typvarianter av förstärkning som kan ses utifrån detta. Alternativa angreppssätt än 'dimensionerande läckage' för att säkra fyllningsdammar mot stora läckage, har enbart diskuterats i ett fåtal fall i Sverige. För att exemplifiera hur metodiken som föreslås i denna rapport kan tillämpas, redovisas tre teoretiska exempel på möjliga lösningar, utgående befintliga fyllningsdammar, där åtgärderna har anpassats till dammens individuella utformning. I detta behandlas olika sorter av utförande av fyllningsdammar, som t.ex. med tätskärm av betong, med olika typer av tätjord och zoner och varierande stödfyllning, eller andra specialfall som gör att upplägget i nuvarande utgåva av RIDAS TV kan ge realistiska resultat eller vara otydligt.

Ett av exemplen redovisar en ovanlig lösning med en betongdamm i nedströms dammtå för att säkra fyllningsdammen för ett mycket högt koncentrerat läckage i nedströmsslant och dammtå genom att läckaget sprids ut över en längre sträcka istället för att koncentreras till ett begränsat område. Det andra praktikkallet avser en hög fyllningsdamm där utformningen av tvärsnittet medför att åtgärder kan vara erforderliga på en högre höjd uppe i dammslanten än vad typfallet 'dimensionerande läckage' visar på. Det tredje fallet redovisar aspekter att beakta

för fyllningsdammar med tätskärm av betong. Avsikten med dessa specialfall är att läsaren ska få insikt i hur verktygen i denna rapport kan tillämpas och behöva modifieras för att erhålla en rimlig designlösning.

I kapitel 7 ges en sammanfattning med förslag till vidare forskning inom området.

Nya referenser inkluderas där så ses som relevant i rapporten, som erfarenheter från norska försök att demonstrera dammhaveri. I rapporten diskuteras även aktuell forskning om erosionsförlopp och potential för initiering och utveckling av läckageförlopp i dammkroppar.

1.5 AVGRÄNSNINGAR

Rapporten omfattar fyllningsdammar till vattenmagasin, exempelvis vattenkraftverksdammar, regleringsdammar eller klarningsmagasinsdammar i gruvindustrin, som omfattas av riktlinjerna i RIDAS. Gruvdammar till sandmagasin, d.v.s. sådana som dämmer in anrikningssand och vatten med t.ex. dränerande dammar, har inte behandlats i denna rapport. För gruvdammar behövs ett delvis annat angreppssätt, då dessa fortlöpande höjs och därigenom har ett skiftande utförande och utsätts för en successivt förändrad belastning.

Systemrelaterade frågor för en dammanläggning, som kan ha koppling till felmoden inre erosion och dimensionerande läckage, omnämns bara översiktligt i denna rapport. Exempel på detta är samverkan mellan förstärkningsåtgärder för dimensionerande läckage och t.ex. övervakning, instrumentering, beredskapsåtgärder och avbördningsförmåga. En anläggnings utskovssystem kan påverka möjlighet till magasinsavsänkning och minskad belastning på en eventuell skada i dammen. Dessa och liknande frågor kan fångas upp i en dammsäkerhetsutvärdering, baserad på en felmodsanalys av hela dammanläggningen.

2 Lastfallet dimensionerande läckage

2.1 BAKGRUND

Internationell statistik visar att i storleksordningen en tredjedel av antalet inträffade dammhaverier för fyllningsdammar orsakas av att det läcker för mycket genom dammkroppen eller undergrunden (ICOLD, 1995), (Foster et. al, 1998) och (Foster et. al, 2000). Ytterligare en tredjedel av dammhaverierna orsakas av intensiv nederbörd, eller andra faktorer som kan orsaka problem för avbördningsystemen, med påföljande överströmning av dammen. Den återstående tredjedelen beror på varierande och mer ovanliga orsaker. Läckage genom och under dammkroppen är därför en viktig aspekt i det förebyggande dammsäkerhetsarbetet.

På 1960- och 1970-talet var det i Sverige vanligt att bygga fyllningsdammar med central, ofta närmast vertikal tätkärna, omgiven av filter och stödfyllning av mer genomsläppligt material av grus eller sprängsten. I flera fall användes filtermaterial som var alltför grovt och som inte uppfyller dagens krav på filtrerande förmåga. Bristande filterutförande med ofta bredgraderade och för grova material är utmärkande för denna tidsperiod. De grova nedströmsfiltren medförde att dammarna blev känsliga för bakåtgripande erosion (piping) och/eller inre erosion i själva tätningen, eftersom filtren inte förmådde fånga upp finmaterial som transporterades från tätkärnan. Initieringen av inre erosion inne i tätkärnan utvecklades i flera dammar till sjunkgröpar i dammkrönet (Nilsson et. al, 1999) och (Rönnqvist, 2010).

Sjunkgröparna, som oftast uppstod i dammkrönets uppströmskant, orsakades av att filtret uppströms tätkärnan successivt kollapsade när det naturliga vattenflödet genom dammen transporterade in material från uppströmssidan av dammen in i tätkärnan. Dammar som var känsliga redan för små läckage och som skulle medföra stora konsekvenser vid ett haveri, försågs med kompletterande dränage och tåbankar mot dammens nedströmsslänt. I några få dammar, där svagheter och konsekvenserna för ett dammhaveri var stora, infördes ny tätning (Ekström et. al, 2016). Vanliga inbyggda svagheter i befintliga dammar från denna period behandlas i (RIDAS TV, 2012).

RIDAS TV benämner dimensionerande läckageflöde som det största läckageflöde som kan tänkas uppkomma genom en fyllningsdamm under dammens livslängd. Beroende på konsekvensklass rekommenderas att ett dimensionerande läckage genom dammen uppskattas för att bedöma erforderlig omfattning av åtgärder som kompenserar för möjliga eller kända inbyggda brister i dammen. Konsekvensklass 1+ och 1 samt 2 har i det följande ersatts med dammsäkerhetsklass A och B respektive C enligt RIDAS (2016), med följande hantering av dimensionerande läckage:

"För damm i dammsäkerhetsklass A och B skall den stödjande och dränerande zonen säkerställa dammens bestånd och stabilitet vid varje tänkbart läckage genom grund, tätkärna eller filterzonen över tätkärnan. Speciellt viktigt är att dammtån säkras".

I RIDAS framgår vidare att:

”För dammar i dammsäkerhetsklass C där det finns tveksamheter om tåtkärnans och filtrens funktion rekommenderas att dimensionerande läckage bestäms och vid behov t.ex. en skyddsvall läggs ut”.

Bestämning av dimensionerande läckage och att vid behov genomföra förstärkning för att säkerställa dammen mot brott för detta lastfall, är en åtgärd som främst är avsedd för dammsäkerhetsklass A och B, oberoende av drifterfarenheter sedan byggnadstiden.

Vid dammsäkerhetsklass C bedöms vägledningen vara tillämplig för de fall där tveksamheter finns om dammens kondition eller kända svagheter förekommer. Tveksamheten kan t.ex. bero på om läckage och/eller sjunkgropar har noterats under drifttiden, eller om avvikelser finns i kompatibiliteten mellan dammens olika materialzoner. Tecken på inre erosion har en korrelation främst med nedströmsfiltrets gradering, vilket i många dammar inte uppfyller dagens krav (Nilsson et. al, 1999). Detta kan medföra att åtgärder kan vara lämpliga även på åtskilliga dammar tillhörande dammsäkerhetsklass C.

Det kan även föreligga behov av att förstärka dammar tillhörande dammsäkerhetsklass D och E mot förhöjda läckage. Storleken på dammarna tillhörande dessa klasser är oftast begränsad med små potentiella läckageflöden. En förstärkningsåtgärd mot erosion i dammtån eller nedströmsslänten p.g.a. läckage kan därför oftast tas fram inom en översiktlig utredning, även om tankesättet i denna rapport givetvis kan utgöra stöd även i det utredningsarbetet.

Dränerande och stabiliserande stödbankar i förebyggande syfte är inte så vanliga utomlands. Där är det istället vanligare att man litar mycket på felmodsanalyser och anpassar sin instrumentering för att kunna detektera en felmod redan i initieringsskedet. Avsikten är att i god tid kunna sätta in riktade åtgärder på de dammar där det behövs, istället för att ha genomfört preventiva åtgärder. Detta innebär att instrumenteringen ofta är betydligt mer omfattande i andra länder än vad som är normalfallet i Sverige.

I Sverige har man genom RIDAS för dammar med höga haverikonsekvenser, istället för att direkt åtgärda svagheter i dammen, valt att lägga resurser på förebyggande arbete i form av stödbankar. Tanken är att för höga dammar och för anläggningar med stora konsekvenser vid ett haveri, så ska stödbanken ge en extra tid för att sätta in motåtgärder. Detta förhållande är rimligt med tanke på de kända inbyggda svagheter som finns i många svenska fyllningsdammar, framförallt avseende filterkompatibilitet, och den historiska skadefrekvens som förekommer i bredgraderade moränkärnor. Därtill är inställetiden relativt lång till vissa dammanläggningar.

2.2 BROTTMODER KOPPLADE TILL DIMENSIONERANDE LÄCKAGE

Läckageflödet genom en fyllningsdamm ökar om inre erosion uppkommer i fyllningsdammens tåtkärna eller i dammens undergrund. De brottmoder som bör beaktas enligt RIDAS TV utifrån fallet inre erosion i dammen, med påföljande förhöjt läckage, kan sammanfattas enligt följande:

Fall 1: *Erosion vid dammtån* eller nedströmsslänten där materialstorlek där läckaget mynnar ut blir dimensionerande.

Fall 2: *Ytliga skred i nedströmsslänten* där ökat porvattentryck i nedströms stödfyllning medför stabilitetsbrott.

Fall 3: *Kanal/pipe i tät kärnan kollapsar* och en stor sjunkgrop uppkommer i dammkrönet, med påföljande överströmning av dammen.

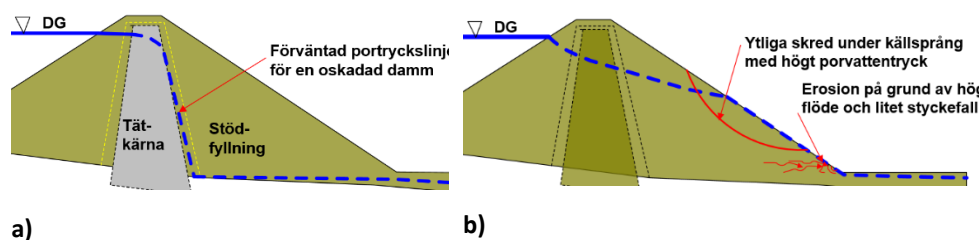
Internationell statistik över dammhaveri tyder på att Fall 1 och Fall 2 är markant vanligare än Fall 3 (Foster et. al, 1998) och (Fell et. al, 2015).

Fall 1, med erosion i dammtån, kan antas leda till fortlöpande bakåtskridande erosion. Detta eftersom materialet längre in i dammtån antagligen har liknande eller finare kornfördelning än i dammtån. Läckageflödet förblir liknande eller möjligen gradvis något större, eftersom läckvägen från inläckagepunkten successivt minskar desto längre erosionen fortskrider. Detta orsakar en gradvis ökad gradient i dammkroppen.

I Fall 2 inträffar ett ytligt skred. Lastfallet kan även avse djupa glidytor. Den övre delen av glidytan blir brantare än vad slänten var innan skredet inträffade. Detta medför risk för fortsatta utglidningar och att ett progressivt brott uppträder, som till slut kan påverka dammkrönet med risk för överströmning. Tiden för att brottet utvecklas är beroende av materialet i stödfyllningen.

Fall 1 och fall 2 kan också utvecklas i kombination med varandra.

Antagandena i Fall 1 och 2 illustreras i Figur 2 - 1 där bild a) visar portryckslinje för en tät kärna som inte är skadad. Bild b) visar portryckslinje för en skadad tät kärna där både tät kärna med filterlager antas ha samma genomsläpplighet som uppströms och nedströms stödfyllning, dvs. dammen fungerar som en homogen zon.



Figur 2 - 1 Principfigurer för portryck i oskadad damm och skadad tät kärna.

I RIDAS TV beskrivs också ett Fall 3, där en kanal/tunnel öppnas genom tät kärnan och att håligheten successivt utvidgas tills den kollapsar. Kaviteten i dammkroppen medför ofta en progressiv hopsjunkning upp till dammens krön, där ett sjunkhål uppkommer. Vid en kanal med stor diameter kan det inte uteslutas att sjunkgropen i dammkrönet blir så stor att fribordet påverkas. Detta kan i sin tur medföra en direkt risk för överströmning och påföljande dammhaveri. Fall 3 kan också uppträda genom att läckage och materialerosion återkommande uppkommer längs läckvägen genom dammen. För var gång läckvägen eller

kanalen kollapsar, så reduceras dammens fribord, även om den initiala kollapsen inte medför omedelbar överströmning av tåtkärnans eller dammens krön.

Vid förloppen för Fall 1 och Fall 2 erhålls ett läckage som strömmar ut i dammtån eller i nedströmsslänten. Om läckaget medför erosion i dammtån/nedströmsslänten eller förhöjda porttryck i nedströms stödfyllning som orsakar utglidning i slänten, kan förloppet utvecklas till ett dammhaveri relativt snabbt vid ogynnsamma förhållanden.

Vid Fall 3 utbildas en sjunkgrop i krönet. I detta fall är vidgningen av gropen vanligtvis ett långsamt förlopp, medan ett haveri kan utvecklas snabbt om överströmning av tåtkärnan eller dammkrönet inträffar.

I (RIDAS TV, 2012) ges en indikation på möjlig förstärkning av en fyllningsdamm med en stödbank. Avsikten är att dammen i ett brottskede ska förväntas vara stabil för ett belastningsfall med större genomströmning genom dammen. I vägledningen behandlas endast brottskedet och förstärkning för detta olyckslastfall. Detta beskrivs vidare nedan.

2.3 BAKGRUND TILL NUVARANDE RIKTLINJER AVSEENDE DIMENSIONERANDE LÄCKAGE

Arbetet med kapitlet fyllningsdammar i nuvarande TV (RIDAS TV Kap 7.2 i RIDAS 2012) påbörjades 1999 och en av de första versionerna benämndes "Tillämpningsanvisning Kap 3.2 Preliminär 2000-04-19". Under årens lopp har uppdaterade versioner givits ut. I utgåvan daterad 2004-08-16 "Tillämpningsvägledning, kap 3.2, 2004" utvecklades avsnittet om "stödfyllning", där dimensionerande läckage behandlades. Avsnittet fick vid denna utgåva en mer handbokskaraktär än tidigare.

Avsnittet har sedan dess inte uppdaterats, förutom att det anpassats till ändringar i konsekvensklasser och kapitelindelning. Den nuvarande versionen av RIDAS TV för fyllningsdammar, där dimensionerande läckage behandlas under stödfyllning avsnitt 7.2.3.4, är benämnd "Avsnitt 7.2, Fyllningsdammar Tillämpningsvägledning, 2011-12-15" (RIDAS, 2012).

När RIDAS togs fram 1999 och i början av 2000-talet fanns det nära kontakter med Norge, där nybyggnad av dammar fortfarande pågick i relativt stor omfattning. Detta medan nybyggnad av dammar i Sverige hade varit liten sedan början av 70-talet. Under arbetet med RIDAS Tillämpningsanvisningar (senare Tillämpningsvägledning) följdes arbetet med de norska riktlinjerna, som vid denna tid också var under fortlöpande förändring under ledning av NVE (Norges Vassdrags og Energidirektorat). Det var därför naturligt att tillämpliga delar i de norska riktlinjerna togs in närmast ordagrant i RIDAS Tillämpningsanvisningar, utan större anpassningar. Underlaget utgjordes, förutom av de norska riktlinjerna, av handboken "Jord och stenfyllningsdammar, Vattenfall, 1988", som följde efter handboken Vattenfalls riktlinjer från 1958.

Specifikt gällande kraven på att kunna hantera ett dimensionerande läckageflöde angav de norska riktlinjerna en punktlast som enbart var beroende av konsekvensklass. NVEs Retningslinje från 2007 (NVE, 2007) föreskrev att

totalflödet, som en fyllningsdamm ska säkras för, ska vara minst 10 m³/s för den högsta konsekvensklassen, Klasse 3; 5 m³/s för Klasse 2 och 1 m³/s för Klasse 1. Vidare angavs att stenstorleken i stödbankens ytlager kan dimensioneras för ett läckage per breddmeter på minst 0,5 m³/s,m för de två högsta klasserna (klass 2 och 3) och 0,3 m³/s,m för klass 1. NVEs senare riktlinjer som framgår av (NVE, 2012) anger samma vägledning som (NVE, 2007), klassindelningen har dock ändrats.

Eftersom vägledningen i Norge var helt oberoende av dammtyp, t.ex. stenfyllningsdamm, jordfyllningsdamm eller homogen damm, blir sannolikheten mycket varierande efter det att dessa åtgärder genomförts, för att dammen ska gå till brott på grund av hög genomströmning. Ett flertal dammar blev sannolikt överdimensionerade, medan ett fåtal dammar kan ha blivit underdimensionerade. T.ex. kan en mycket hög och lång damm med genomsläpplig stödfyllning, där utflödet vid ett större läckage kan tänkas kanaliseras till en begränsad sträcka av dammtån, erhålla ett jämförelsevis stort koncentrerat utflöde.

I RIDAS Tillämpningsanvisningar beskrevs därför en metod med möjligheten att på ett konservativt sätt beräkna ett dimensionerande läckage per längdmeter damm. Beräkningsmetoden är beroende av dammens geometriska utformning och de ingående materialen. Detta resonemang byggde i huvudsak på att tät kärnan, samt nedströmsfiltren om dessa hade begränsad bredd, antogs vara urspolade och att dessa materialzoner antogs ha samma hydrauliska konduktivitet som dammens stödfyllning.

I Sverige var det dock betydligt vanligare att utföra stödfyllningszonerna av sand och grus från schaktningar för anläggningen, medan man i Norge oftast använde sprängsten. Detta inverkar på hur behovet av förstärkning bör värderas, både avseende på materialfördelning och konsekvenser av ett dammhaveri.

Den vanligaste dammtypen som byggdes i Sverige på sent 1960-tal och tidigt 70-tal hade central, närmast vertikal, tät kärna, med stödfyllning av varierande gradering. Även där denna anges som stenfyllning hade stödmaterialet ofta ett markant innehåll av sand och grus. Flera av dessa dammar har drabbats av inre erosion, vilket har visat sig som sjunkgropar, främst i dammkrönet (Nilsson et. al, 1999). Principerna som först presenterades i RIDAS Tillämpningsanvisningar 2004 bedömdes ge konservativa värden på enhetsläckaget för dessa problemdammar. Vid tillämpning av den beskrivna principen för att beräkna dimensionerande läckage för specialfall som t.ex. en hög sten- eller jordfyllningsdamm överstigande runt 30 m, uppträder dock beräkningsmässigt förhållanden som det ingenjörsmässigt inte bedöms vara realistiskt att de kan inträffa.

Utförandet som beskrivs i nu aktuella RIDAS TV (2012) är detsamma som i 2004 års version och var avsett som ett stöd vid projektering av förstärkningsåtgärder. Det avsåg ge ett stort utrymme för alternativa, lokalt anpassade, lösningar. Inga sådana lösningar redovisas dock i vägledningen, utan utförande konsulter tenderar att följa den beskrivna beräkningsmetodiken i detalj, vilket inte var avsikten med tillämpningsanvisningarna.

2.4 NUVARANDE RIKTLINJER FÖR BEDÖMNING AV DIMENSIONERANDE LÄCKAGE

2.4.1 VÄGLEDNING ENLIGT RIDAS

Nedan ges en kortfattad beskrivning av nuvarande riktlinjer, som utgångspunkt och orientering inför föreslagna förändringar.

RIDAS TV anger att för jordfyllningsdammar kan en uppfattning av möjligt läckageflöde erhållas genom en grov beräkning av den genomläckning som skulle erhållas om läckaget endast begränsas av stödfyllningens vattengenomsläpplighet. RIDAS TV anger att beräkningsprincipen också kan vara tillämplig för stenfyllningsdammar där stödfyllningen av sprängsten har ett så litet styckefall att den kan liknas vid exempelvis en grusfyllning.

Beräkningen av dimensionerande läckage görs utan hänsyn till materialet i tätkärnan och även utan hänsyn till omgivande filter, om dessa är tunna, eller om de kan tänkas erodera ut i stödfyllningen vid kraftigt läckage. Tätjorden och även omgivande filter antas i denna beräkning vara skadade av inre erosion, så att de i en beräkning antas ha samma hydrauliska konduktivitet som omgivande stödfyllningsmaterial.

För höga fyllningsdammar har detta beräkningsförfarande ofta visat sig ge mycket höga teoretiska läckageflöden per längdmeter damm. Även vid fall där RIDAS föreslagna metodik har applicerats på stenfyllningsdammar har ofta höga teoretiska läckageflöden erhållits. Effekten är som tydligast för höga stenfyllningsdammar (läckage genom en sprängstensvall), med en genomströmning som kan anses vara betydligt högre än vad som avsågs när metodiken för dimensionerande läckageflöde för fyllningsdammar först fördes in i tillämpningsanvisningen.

För stenfyllningsdammar med grövre stödfyllning anger RIDAS TV inte någon liknande vägledning för dimensionerande läckage som för jordfyllningsdammar. Däremot ges några referensvärden från tidigare rapporterade läckage i fyllningsdammar som vägledning vid bestämning av dimensionerande läckageflöde. Dessutom anges att högre stenfyllningsdammar förväntas bli dimensionerande för ett totalt läckageflöde på ett antal kubikmeter per sekund, men det poängteras att varje läckageflöde som kan tänkas uppstå genom en damm är unikt. Se vidare nedan för generella referensvärden.

2.4.2 GENERELLA REFERENSVÄRDEN

I RIDAS TV ges ett antal subjektiva kommentarer som t.ex. hjälp vid dimensioneringen;

”Stenfyllningsdammar som dimensioneras för ett dimensionerande läckage av 0,5 m³/s,m eller ett totalt läckage av 5 m³/s, kan antas vara stabila en lång tid efter läckagets initiering. Om totalläckaget genom geometrin i utströmningsområdet beräknas kunna ge ett mer koncentrerat läckage, dvs en större utläckage per breddmeter, bör detta värde användas vid dimensioneringen”.

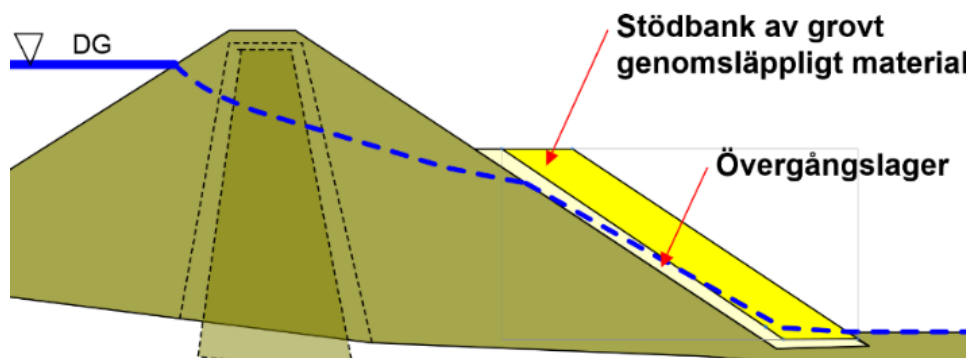
Vid bestämning av läckageflödet som en fyllningsdamm ska dimensioneras för kan viss ledning fås från läckage som rapporterats under årens lopp, jämför (RIDAS TV, 2012).

- Bolidens damm för Ryllshytttemagasinet i Garpenberg, juni 1997, läckage 3 m³/s
- Juktandammarna, ett flertal läckage 1966–77 före ombyggnad, läckage i storleksordning 1 m³/s före snabb avsänkning
- Bastusel, 1972: 70 l/s, 1988: 40 l/s, 1993: 40 l/s
- Suorva Östra dammen, 1983, grop 30 m³, läckage ca 200 l/s
- Hällbydammen, 1985: grop 7 m³, uppmätt läckage ca 4 l/s
- Porjusdammen, ett flertal incidenter, den senaste 1993, några 10-tal l/s

Dessa värden måste dock användas med mycket stor försiktighet. Alla dammar har en unik utformning och sina individuella förutsättningar. För att dessa värden ska vara tillämpbara måste en studie av likheter med den berörda dammen göras och en förståelse finnas för felmoden som ledde fram till läckaget i det aktuella fallet. Med den informationen som underlag kan dessa historiska läckagevärden användas som en fingervisning om förväntad magnitud på det dimensionerande läckaget.

2.5 NUVARANDE RIKTLINJER FÖR FÖRSTÄRKNING

I RIDAS TV anges hur förstärkningar kan göras för att dimensionera dammen för de ovan nämnda tre lastfallen (Fall 1, 2 och 3), som betraktas som olycksfall. I Figur 2 – 2 visas principen för en förstärkning med en stödbank för att erhålla tillräcklig stabilitet och erosionsmotstånd i nedströmsslänten och vid dammtån.



Figur 2 - 2 Principfigur för portryck i skadad tåtkärna med förstärkning med stödbank.

När förstärkningsmetoder utreds, bör flera förhållanden än de som nämnts ovan beaktas. Detta kan t.ex. vara dammens uppbyggnad med zoner eller homogent tvärsnitt, filtrens gradering och tjocklek, om dammen haft incidenter med sjungropar och läckage, samt eventuella tidigare utförda förstärkningar och deras sammansättning. Det är också relevant att titta på hur dammar av likartad design

klarat sig historiskt. Exempel på förstärkningar finns tidigare behandlat av Energiforsk i (Ekström et. al, 2016).

Det kan vidare finnas behov av att studera risken för att de olika delarna i relevanta händelsekedjor utvecklas till ett dammhaveri. Det kan också finnas behov att studera kombinationer av förstärkningar med möjligheter att vid behov sänka magasinet samt övervakning med instrumentering. Studier av det övergripande systemet behandlas dock inte i föreliggande rapport. Det är dock viktigt att beakta möjligheterna att minska belastningen på dammkroppen när förstärkningen utreds, eftersom detta starkt påverkar hur kraftigt och långvarigt läckage, med tillhörande belastning, som dammen behöver dimensioneras för.

Den metod- och åtgärdsbeskrivning för dimensionerande läckage som finns i RIDAS TV är en bra utgångspunkt, men det är en fördel att anpassa resonemanget efter var damms egna förutsättningar. En bra utgångspunkt att göra detta är genom en betraktelse med en felmodsanalys, vilket beskrivs i nästa kapitel.

3 Bedömning av dimensionerande läckage genom analys av felmoden inre erosion

3.1 ALLMÄNT

Detta kapitel beskriver föreslagen ansats för att ge ett underlag till beräkning av ett anläggningsanpassat dimensionerande läckage genom en utvärdering av felmoden inre erosion. Analysen är avsedd att lokalisera var och hur förstärkningen bör utföras, utifrån anläggningens lokala förutsättningar.

Därefter görs en översiktlig genomgång av parametrar som bör beaktas för att bestämma om sannolikheten för att felmoden inre erosion ska initieras och utvecklas är större eller mindre för den aktuella dammen jämfört med en genomsnittlig damm av den aktuella typen. För dammar där det, efter en genomgång av momenten som listas i föreliggande kapitel, bedöms finnas en större sannolikhet för initiering och utveckling av felmoden inre erosion, bör en ökad förstärkning eftersträvas och tvärt om. Detta används sedan som indata i kapitel 4 och 5 för anpassning av det läckageflöde som räknas fram och som stöd för modifiering av förstärkningen.

3.2 FÖRESLAGEN METODIK

Förhöjda läckage genom en fyllningsdamm uppstår på grund av inre erosion i dammens tät kärna eller i undergrunden. Detta är centralt för skadeförloppet och skadans utbredning. Analys av felmoden inre erosion är därför lämplig att använda som utgångspunkt för att ta fram förutsättningar för bedömning av dimensionerande läckage för fyllningsdammar. Denna operation är avsedd att ge svar på frågan om sannolikheten för inre erosion, samt var och hur denna främst kan antas uppträda i dammen. Felmodsanalysen kan vara förenklad eller mycket omfattande, beroende på dammens komplexitet och utformning.

Följande metodik föreslås för att utvärdera dimensionerande läckageflöde och eventuella associerade förstärkningsåtgärder för fyllningsdammar:

1. Avgör, enligt nuvarande beskrivning i RIDAS TV, om fyllningsdammen är en jordfyllningsdamm eller en stenfyllningsdamm. Om objektet är en jordfyllningsdamm av begränsad höjd så kan RIDAS metod för att bestämma dimensionerande läckageflöde vanligtvis användas och en schablonmässig förstärkning av dammen kan normalt utföras. För de flesta jordfyllningsdammar under 10 – 15 m höjd är det oftast kostnadseffektivt att tillämpa den schablonmässiga metoden, medan det för större jordfyllningsdammar är lämpligt att följa ett resonemang liknande det nedan för stenfyllningsdammar. För mindre dammar blir de tillkommande kostnaderna för att variera höjd och tjocklek på förstärkningen, tillsammans med den ökade projekteringskostnaden, inte sällan dyrare än den generella förstärkningen.

Det bör dock tilläggas att felmodsanalys ofta är lämpligt att tillämpa även för jordfyllningsdammar. Detta för att bedöma sannolikheten för felmoden inre

erosion och därigenom säkerställa att viktiga aspekter och lokala förhållanden inte förbises i den schablonmässiga designen. Detta kan t.ex. gälla utformningen på anslutningar där förutsättningar kan finnas för att läckaget mynnar på en högre nivå eller gälla förstärkningsbehovet med hänsyn till att erosionsförloppet i en jordfyllningsdamm generellt är betydligt snabbare än i en stenfyllningsdamm, vilket ger mindre tid för självläkning och att vidta åtgärder.

En minsta begränsning för läckageflödet som dimensionering utförs för bör alltid beaktas. Fyllningsdammar med finkornig stödfyllning erhåller teoretiskt ett förhållandevis lågt läckageflöde. För dessa kan det vara mer relevant att dimensionera stödbanken för en genomgående punktskada, alternativt viss urspolning av stödfyllningsmaterialet om det är inre instabilt. Ska en stödbank läggas ut för att öka erosionsbeständigheten är det sällan relevant med material < 200 mm som största materialstorlek. Räcker teoretiskt en mindre materialstorlek för det framräknade läckaget, bör minst denna materialstorlek ändå användas.

Förekommer det lermaterial i stödfyllningen i en sådan omfattning att den kan antas hålla en kanal öppen så rekommenderas en särskild utredning av möjlig kanaldiameter. Sådan stödfyllning är dock ovanlig i Sverige.

Om det är en stenfyllningsdamm som betraktas så föreslås att analys utförs av främst felmoden inre erosion för den aktuella dammen, enligt nedan följande punkt.

2. Analysera felmoden inre erosion för stenfyllningsdammen. Den i särklass viktigaste aspekten att beakta i utredningsarbetet inför förstärkningen är sannolikheten för att inre erosion ska initieras i dammen, samt var och hur detta fenomen kan antas uppträda och utveckla sig. Även tiden för felmoden att utvecklas till dammhaveri är en viktig aspekt vid dimensionering av förstärkningsåtgärder (se punkt 1 ovan). Dessa aspekter behandlas i nästa kapitel, tillsammans med en genomgång av övriga parametrar som kan påverka utvecklingen av felmoden och utformningen av de förstärkande åtgärderna. Flera standardiserade varianter för att studera den aktuella felmoden finns utvecklade av bl.a. USBR, USACE, FEMA m.fl. (ASDSO, 2016). Den angivna referensen ger en grundlig genomgång av de metoder som används av USBR och USACE, samt ger ett antal referenser för ytterligare tolkningar. En översiktlig beskrivning av felmoden inre erosion och hur den kan betraktas ges i nästkommande kapitel.
3. Bedöm möjliga skadeutbredningar i stenfyllningsdammen utifrån felmodsanalysen. Skadebilden används därefter som indata i genomströmningsberäkningar, för att identifiera läckageflöden genom stenfyllningsdammen. Utifrån beräkningsresultaten motiveras sedan stenfyllningsdammens dimensionerande läckageflöde, som används för att ta fram lämplig förstärkningsåtgärd. Det dimensionerande läckageflödet kan variera längs dammen. Ett exempel på detta förfaringssätt redovisas i ett av exemplen i kapitel 6.

3.3 FELMODEN INRE EROSION

3.3.1 Allmänt

Internationellt baseras dammsäkerhetsarbetet till stor del av resultat från riskanalyser av dammanläggningar. I riskanalyserna används felmodsanalys för att bedöms sannolikheten för att potentiella felmoder leder till dammhaveri, vilket sedan ställs förhållande till haveriets konsekvens mot människor för att få fram risken. Dammägarna använder sedan riskanalysens resultat för att bestämma vidare utrednings- och förstärkningsbehov för dammanläggningen, samt även prioritering av dessa mellan ägarens egna dammar.

Då dimensioneringen av en förstärkning förutsätter anpassning till utformningen av den aktuella dammen, är analys av felmoden inre erosion ett lämpligt verktyg för att bedöma dimensionerande läckage för dammen. Felmodsanalysen syftar till att bedöma sannolikheten för att dammen går till brott för en felmod kopplad till inre erosion. Den kvantifierar inte storleken på ett dimensionerande läckage, men i och med att analysen kan peka ut speciellt känsliga delar av dammen, kan den ge ett underlag till en beräkningsmodell, t.ex. SEEP/W, där storleken på läckaget kan beräknas för dimensioneringen av dammens förstärkning. Felmodsanalysen kan också ge stöd i hur snabbt händelsekedjan kan utvecklas, vilket är en viktig aspekt. Den kan också identifiera instrumenteringspunkter som stöd för att kunna detektera felmoden redan i initieringsfasen.

Ett vanligt problem med äldre dammar är att dokumentationen från byggtiden ofta är bristfällig, vilket medför att bakgrundsinformation som behövs för att upprätta en korrekt felmodsanalys kan saknas. För att kunna avgöra om en felmod ska kunna initieras och utvecklas vidare i händelsekedjan, erfordras då kompletterande geotekniska undersökningar av dammen. Fältundersökningarna kan ge ytterligare underlag för att förbättra bedömningen av felmodsanalysen, men det är i stort sett omöjligt att utesluta felmoden inre erosion för befintliga fyllningsdammar om heltäckande dokumentation från byggtiden saknas, eftersom det inte går att i efterhand undersöka varenda del av en fyllningsdamm.

Lokala inbyggda svagheter kan även förekomma i dammkroppen, oavsett hur god dokumentationen är från uppförandetiden. Detta rör t.ex. separation vid utläggning, eller stora skillnader i horisontell och vertikal konduktivitet, som kan styra läckageflödets väg. Beroende på utformningen av dammens tvärsnitt kan sättningar och valvbildning skapa förutsättningar för att förloppet ska utvecklas till minskad stabilitet och/eller inre erosion med läckage med ökande erosion. Osäkerheten i indatan måste alltid beaktas. För detta kan den statistiska datan som redovisas nedan utgöra ett stöd vid bedömning av hur sannolikt det är att inbyggda svagheter förekommer.

Nedan beskrivs som utgångspunkt hur en felmodsanalys kan genomföras av fallet inre erosion. För att bedöma dammens sårbarhet för att utveckla inre erosion och läckage vid olika konstruktiva utformningar, kan hela förloppet för inre erosion från initiering till dammhaveri studeras.

3.3.2 Beskrivning av felmoden

Inre erosion genom dammkroppen, eller inre erosion i undergrunden, har i internationell statistik värderats vara de viktigaste felmoderna för haveri i en fyllningsdamm (Foster et. al, 1998). Vid bedömning av sårbarhet för läckage och inre erosion kan en analys baseras på arkivinventering, drifterfarenheter och bedömningskriterier enligt (Corps of Engineers, URS & UNSW, 2008). Detta är en bra utgångspunkt för att initialt bedöma sårbarheten för den damm som betraktas.

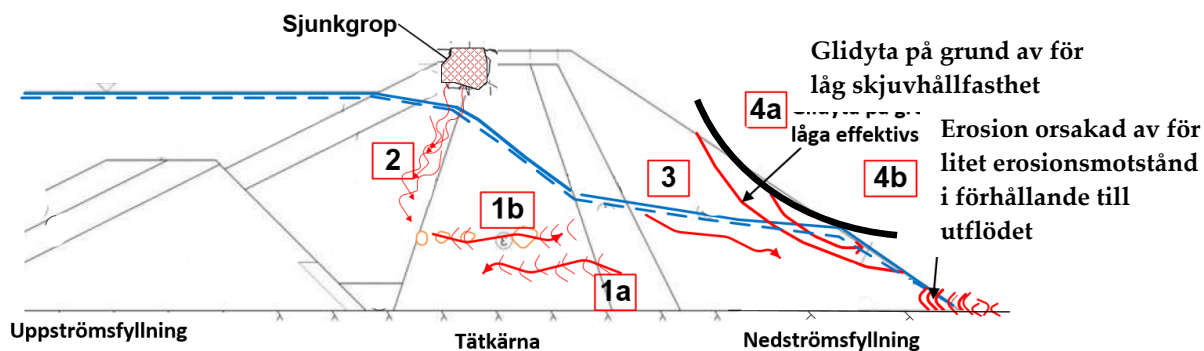
Inre erosionsprocessen indelas vanligtvis i fyra faser. De engelska beteckningarna har skrivits inom parantes. Detta eftersom metoden för riskbedömning till stor del är hämtad från Fells arbeten, samt (ICOLD, 2015 & 2017) och översättningarna ökar förståelsen.

- Startfas (Initiation)
- Tidig utvecklingsfas, (Continuation)
- Vidare utvecklingsfas (Progression) eller alternativt motåtgärder misslyckas (Not intervene)
- Brottfas (Formation of breach mechanism)

För att inre erosion ska kunna utvecklas till ett dammhaveri behöver processen utvecklas från initieringsfas till brottfas. Utvecklingen från en fas till nästa är i huvudsak beroende av de olika materialens korngradering. Sannolikheten för att processen ska fortsätta och inte bromsas upp, värderas utifrån hur stor avvikelse korngraderingen har jämfört med en ideal gradering inom respektive material, samt relationen mellan två material i övergången mellan dessa.

För att utveckla inre erosion behövs, förutom brister i filterfunktionen, en tillräckligt pådrivande gradient. Även en låg gradient kan dock vara tillräcklig för att utveckla inre erosion, om svagheter finns i tät kärnan, i undergrunden, eller om bristande materialkompatibilitet finns mellan dessa.

Felmoden inre erosion kan utvecklas mot olika brottfaser, vilka åskådliggörs i Figur 3 – 1. Denna figur kan tillsammans med standardiserade analysprinciper av felmoden inre erosion, enligt referenser i punkt 2 i kapitel 3.2, användas som utgångspunkt när ett tvärsnitt studeras. I figuren illustreras felmoden för en fyllningsdamm med central, närmast vertikal, tät kärna omgiven av filter på nedströmssidan följt av stödfyllning av mer genomsläppligt material av grus eller av sprängsten. Detta är en design som är typisk för svenska dammar.



Figur 3 – 1 Inre erosion initierad i tätkärnan och med tänkbar utveckling till dammhaveri illustrerat på en berggrundlagd fyllningsdamms sektion. Inre erosion (1b) kan även uppstå ner i öppna sprickor i en berggrundläggning. I en jordgrundlagd damm kan bakåtgripande erosion (1a) och inre erosion (1b) även inträffa i undergrunden.

Förloppen indikerade i figuren avser följande faser:

- [1a] Bakåtgripande erosion (piping)
- [1b] Inre erosion (suffusion)
- [2] Inströmning av stödfyllning uppströms och utbildning av sjungkrop
- [3] Höjning av grundvattenytan i nedströms stödfyllning
- [4a] Utglidning av yttlig glidyta
- [4b] Erosion vid dammtån pga. stort flöde och litet erosionsmotstånd

De fall av inre erosion som noterats i svenska dammar, har vanligtvis utvecklats sjungkropar i dammkrönet (Nilsson et. al, 1999), (Rönnqvist, 2010) och (Ekström et. al, 2016). I några fall har läckaget utbildat källsprång i nedströmsslänten. De fall som beskrivs i referenserna kan betraktas som incidenter. Förloppet har i förekommande fall stannat upp, antingen av sig själv eller efter det att åtgärder vidtagits i form av avsänkning av magasinet, utläggning av uppströms moräntätning och/eller injektering, vilket succesivt minskat läckaget. Vid jämförelse med Figur 3 – 1 har förloppet för förekommande fall i Sverige oftast avstannat i fas [3].

Det bör betonas att felmodsförloppet är individuellt. Dammhöjd, dammtyp och 'dam breach initiation time', dvs. tiden från initiering av felmod till okontrollerad utveckling, har stor inverkan på hur förloppet utvecklas och vilka motåtgärder och övervakning som är lämpliga. Tiden i brottförloppet kan vara svår att bestämma, eftersom felmoden i de dokumenterade fallen ofta redan hunnit utvecklas till senare faser när den väl har upptäckts.

Till felmoden hör även möjligheterna att påverka och övervaka förloppet. I detta vägs in tillträdesmöjligheterna i en höglödessituation och t.ex. försämrade möjligheter att sänka av magasinet. Detta kan bero på t.ex. bortfall av spänningen på nätet, eller att vägarna fysiskt inte är framkomliga pga. höga flöden eller fallna

träd. Svårtillgängliga eller avlägset belägna dammar motiverar en kraftigare förstärkning för att fördröja tiden till att ett haveri kan utvecklas.

Resultatet från felmodsanalysen bör utgöra underlag för övervakning av dammen, där lämpliga punkter övervakas för att i ett tidigt skede kunna uppmärksamma ett initierat förlopp. Detta är en parameter att avväga mot förstärkningens omfattning, då det påverkar tiden för att sätta in motåtgärder. Övervakning och instrumentering behandlas inte i denna rapport.

3.3.3 Värdering av potential för initiering av inre erosion och läckage med avseende på filter

Filtrens betydelse

En förutsättning för att en förhöjd genomströmning ska uppträda i en fyllningsdamm är att någon form av inre erosion, som omlagrat dammens tätning och filter (zon mot tätkärna), alternativt undergrund, har inträffat. Filtrens kompetens och komplementaritet med intilliggande materialzoner är därför en faktor som bör beaktas. Potentialen för inre erosion i en fyllningsdamm beror till stor del av finfiltrets (här avses materialzonen närmast dammens tätning) gradering i förhållande till tätkärnans eller undergrundens sammansättning. Det kan här även vara relevant att studera hur filterkriterier uppfylls mellan undergrund och nedströms stödfyllning, för att fastställa om okontrollerad materialtransport kan uppträda denna väg.

En tätjord med stort innehåll av finmaterial behöver t.ex. ett mer fingraderat nedströmsfilter än en tätjord med en lägre andel finmaterial. Dessutom minskar förutsättningarna för att erosionsförloppet fortsätter, om det nedströms om finfiltret finns en god övergång till nedströmsliggande material, t.ex. ett grovfilter som är väl anpassat till graderingen på nedströms stödfyllning (Foster et. al, 1998), (Foster et. al, 2001) och (Wan et. al, 2007).

Beskrivningar av internationellt vedertagna riktlinjer för filterdesign framgår bl.a. av (FEMA, 2011) och (USBR, 2011). De vanligaste historiska referenserna som utgör grunden för dessa resonemang framgår av (Sherard et. al, 1984a), (Sherard et. al, 1984b) (Sherard et. al, 1985) och (Sherard et. al, 1989).

Förhållandet mellan dessa faktorer och hur de påverkar risken för att en skada ska utvecklas är individuell och beror på utformningen av den betraktade dammen. Olika möjligheter att utvärdera hur nedströmsfiltrets kornfördelning inverkar på sannolikheten för att inre erosion utvecklas och påverkar dammsäkerheten beskrivs i följande kapitel.

Historiska data

Närmast nedan behandlas nedströmsfiltrets förväntade påverkan på erosionsförloppet utifrån statistiska data.

Dammens uppförandetid är en faktor att ta i beaktande, då den ger en indikation om vilka graderingar på filtret som normalt tilläts och hur dessa redovisades. Mer information om detta finns i (Nilsson et. al, 1999).

Förutsättningarna för att initieringsskedet av inre erosion, som orsakar sjunkgropar och eventuellt även källsprång i nedströmsslänten, kommer att utvecklas vidare är främst beroende av nedströmsfiltrets kornfördelning och skillnaden mellan basmaterialets, dvs. moränen i tät kärnan, och nedströmsfiltrets kornfördelning.

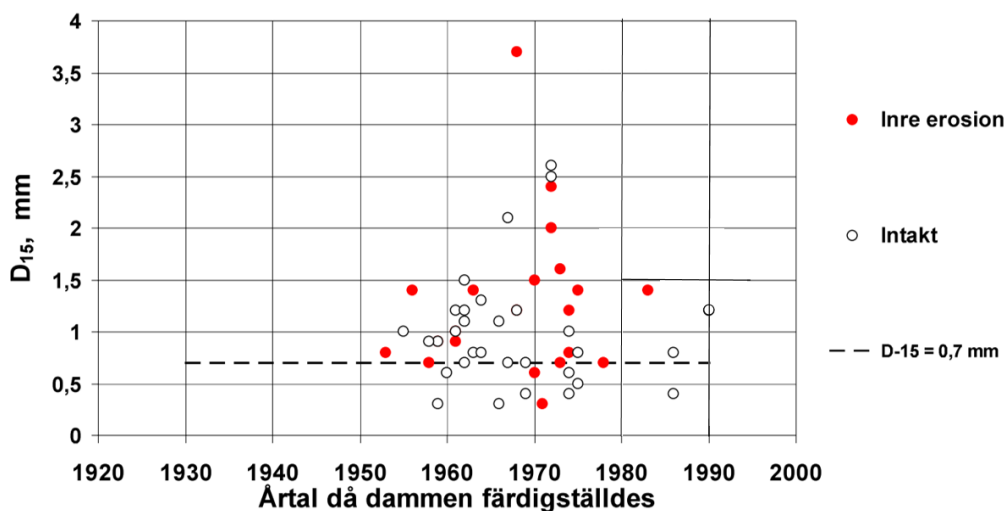
För att förhindra inre erosion av tätjord ut i filtret används vid design ett filterkriterium för filtermaterialets D_{15} . För att undersöka vilken inverkan D_{15} -måttet historiskt har haft på de svenska dammarnas status har en sammanställning gjorts i referens (Nilsson et. al, 1999). Denna sammanställning ger stöd för bedömning om dammen, utifrån jämförbara anläggningar i Sverige, har en större eller mindre sannolikhet att drabbas av inre erosion.

Sammanställningen kan användas som en grov första screening för att bedöma om det finns anledning att gå vidare med en fördjupad materialanalys eller kompletterande fältundersökningar. I rapporten redovisas D_{15} både för dammar där sjunkgropar rapporterats och för dammar som inte uppvisat några sådana skador.

Resultatet av filterinventeringen av svenska dammar visas i Figur 3 – 2, där även nuvarande filterpraxis ($D_{15} < 0,7$ mm) är inlagd med en streckad linje. Angivna mått på D_{15} avser den grövsta rapporterade siktkurvan i en kurvskara. Vid utvärderingen har man dock bortsett från enstaka ”udda” kurvor.

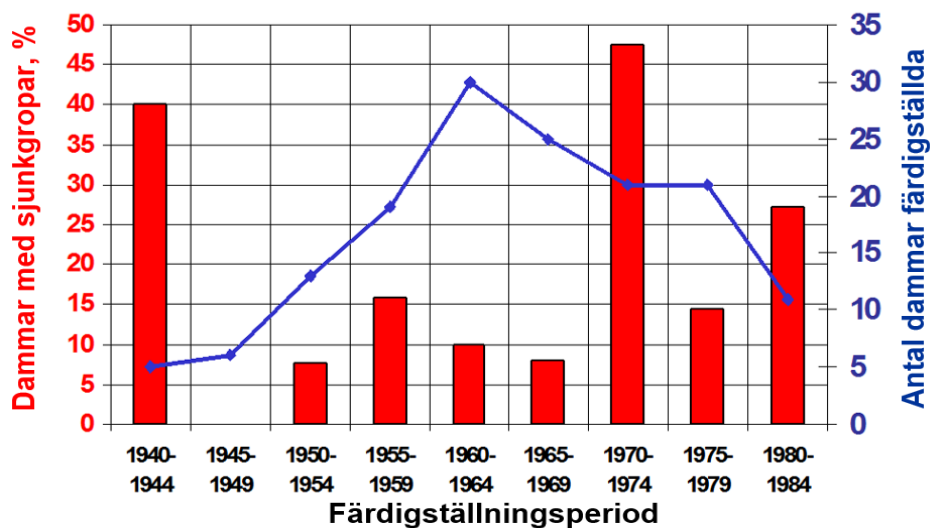
Siktkurvorna som använts som underlag för studien av filtren avser normalt inte totalsiktning, utan har ett $D_{\max}$ på t ex 16 mm eller 64 mm, vilka var de maxgränser som normalt dokumenterades. Filtren innehåller dock många gånger grövre material av okänd mängd utöver den materialfördelning som redovisats, vilket ibland angivits som stenhalt i dokumentationen. Normalt var fram till 1980-talet att stenhalten i filterkurvan inte beaktades, utan en allmänt utbredd tanke var att det var de finare fraktionerna som var styrande för funktionen. I praktiken innebär detta att angivna värden för t ex D_{15} och D_{50} ska ökas med något okänt värde för att vara representativa för hela materialet.

Sammanställningen i figuren visar att dammar som uppfördes 1970 till 1975 i allmänhet har grövre filter i jämförelse med dammar som färdigställdes under tidigare och senare år. I (Nilsson et. al, 1999) framgår att en stor del av dammarna som färdigställdes i Sverige under denna period har haft sjunkgropar, vilket är en indikation på att inre erosion har initierats. I dessa fall har förloppet antingen avstannat av sig själv eller så har åtgärder vidtagits, som har stannat upp förloppet.



Figur 3 – 2 Storleken på D₁₅ för dammens nedströmsfilter i förhållande till året då dammen färdigställdes (Nilsson et. al, 1999). Redovisningen utgör ett urval av dammar och behöver inte vara representativ för den totala populationen av dammar uppförda i Sverige under dessa år.

Utifrån detta kan sägas att sammansättningen på dammens nedströmsfilter är viktig för bedömningen för hur läckage kan utvecklas i dammkroppen. I detta bör uppgifterna om filtrets sammansättning analyseras och beroende på angivna siktstorlekar, så bör den troliga materialfördelningen beaktas. I Figur 3 – 3 redovisas antalet uppförda dammar i Sverige mot antalet dokumenterade fall av sjunkhål och/eller inre erosion, vilket tydliggör vilka historiska perioder som är speciellt problemtyngda.



Figur 3 – 3 Byggnadsår för dammar i Sverige med dokumenterad inre erosion (sjunkropar), jämförda med byggnadsår för alla byggda fyllningsdammar högre än 15 m under perioden (Nilsson et. al, 1999).

I detta kapitel gavs en historiks betraktelse, där en första gallring av dammens status görs utifrån dess statistiska förutsättningar. Nedan presenteras flera moderna metoder för materialanalys för att bedöma sannolikheten för att inre erosion ska uppkomma utifrån dammens zonerings.

Värdering enligt Foster och Fell m.fl.

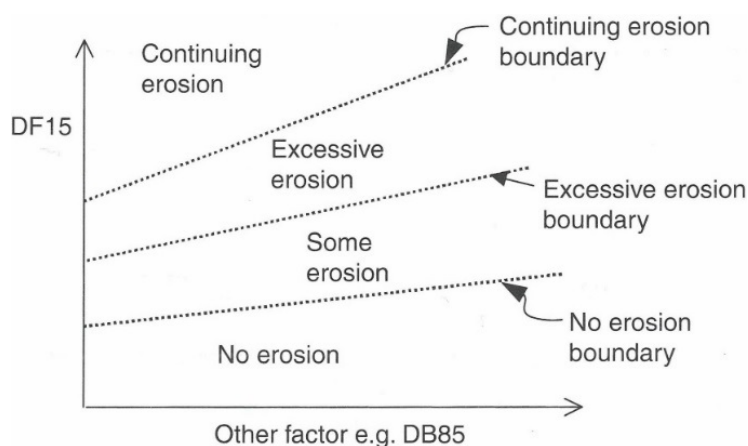
Det finns olika sätt att betrakta sannolikheten för att inre erosion ska uppträda och fortgå. Utifrån ett större statistiskt underlag, baserat på Sherards testdata, tillsammans med kompletterande erosionstester, har Robin Fell vid UNSW utvecklat ett antal mallar för att bedöma filtrets kompetens och motståndsförmåga att självläka i det fall att erosion väl uppkommit. Detta kan vara en hjälp för att bedöma olika delar av dammen mot varandra.

I (Foster et. al, 1998) och (Foster et. al, 2001), samt (Fell, 2015), definieras, utgående från kornfördelningen för tät kärnan och nedströmsfiltret, fyra nivåer för att inre erosion ska utvecklas; från "ingen erosion" till "kontinuerlig erosion".

Termerna i handledningarna definieras vanligtvis enligt följande:

- (I) Ingen erosion (no erosion): filtret läker med praktiskt taget ingen erosion av basmaterialet som det ska skydda. Den tillfälliga ökningen av läckagemängden är sannolikt för liten för att kunna detekteras med vanliga metoder.
- (II) Viss erosion (some erosion): filtret läker efter "viss" erosion av basmaterialet som filtret skyddar. Punktläckage kan förväntas på upp till 100 l/s, men dessa självläker och upphör utan åtgärd.
- (III) Stor erosion (excessive erosion): filtret läker, men först efter omfattande erosion av basmaterialet i samband med kraftigt ökande läckage upp till 1000 l/s, men självläkning uppträder normalt. Som en följd av skadan uppkommer sjunkhål i dammens krön och piping genom tät kärnan.
- (IV) Kontinuerlig erosion (continuing erosion): filtret är för grovt för att tillåta det eroderade basmaterialet från att täta filtret. Det är sannolikt att erosionen fortgår obegränsat, med successivt ökande läckage tills ett haveri uppträder.

Principen för gränserna beskrivs i Figur 3 – 4 utifrån filtrets D_{15} och storleken på basmaterialet.



Figur 3 – 4 Principskiss visande erosionsgränser utifrån filtrets och basmaterialets materialfördelning (Fell et. al, 2015) och (Foster, 2007).

Som vägledning nämner (Fell et. al, 2015) att dammar med filter som tillåter viss erosion (dvs med filter som hamnar mellan gränsen för ingen erosion och stor erosion), kan det förekomma läckage upp till storleksordningen 100 l/s. Vad gäller filter som inte kan förhindra att stor erosion uppkommer (mellan gränsen för stor erosion och fortgående erosion), så visar fallstudier av befintliga dammar att läckage på upp till 1000 l/s förekommit, innan läckaget tätats av filtret. Detta avser punktläckage och inte skador över större ytor av dammens tätning. För fortgående erosion, där det inte sker någon läkande filterverkan, kan läckage på upp till 2000 l/s förväntas. Bakgrunden till denna siffra är oklar och bör användas med en viss försiktighet.

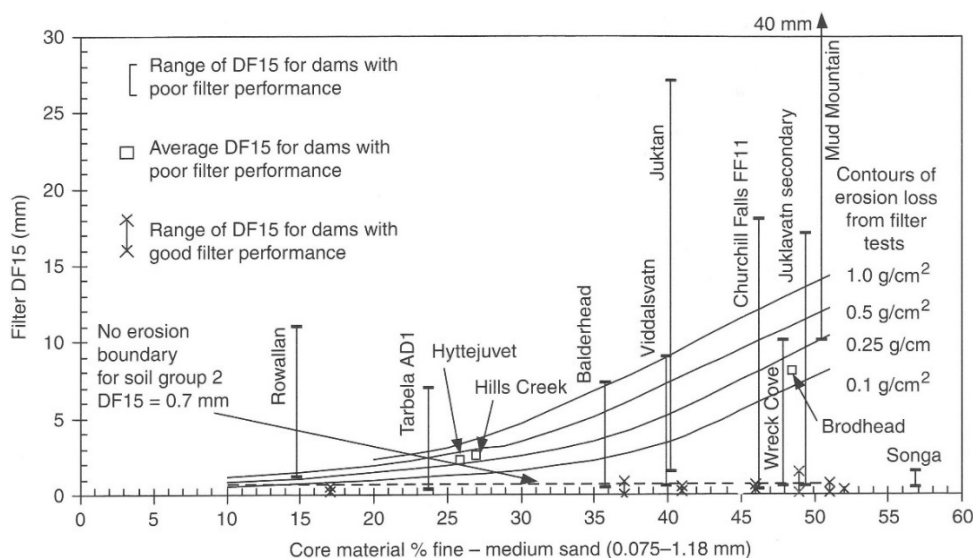
För filter som uppfyller gränsen för ingen erosion (dvs. filter $D_{15} \leq 0,7$ mm) uppkommer normalt praktiskt taget ingen erosion av tätkärnan innan läckaget tätas av uppströms filter. För tätkärnor med mycket stort finmaterialinnehåll kan dock mer fingerade filter och fler filterzoner vara erforderliga.

Som styrande faktor för förloppet har i denna handledning satts mängden fin- och mellansand i fraktionen 0 – 4,75 mm i tätjorden, i förhållande till D_{15} för filtret. Erosionsmängderna, som anges i Figur 3 – 5, avser olika mängder för eroderat material i laborietest som kalibrerats mot förlopp i praktikfall. I figuren märks den tidigare dammen vid Juktans pumpkraftstation, där omfattande kontinuerlig erosion uppträdde omedelbart efter dämningssupptagning.

En viktig lärdom är att om en damm drabbats av inre erosion som självläkt, så är sannolikheten stor att denna ska drabbas av en förnyad skada. Sannolikheten är förhöjd i det redan påverkade området, eftersom den ursprungliga skadan vanligtvis medför att tryckfördelningen i dammkroppen ändras så att gradienten ökat på den kvarvarande tätande zonen med tillhörande filter i detta avsnitt av dammen. Även om turbiditeten i läckagemängderna nedströms dammen avtagit, betyder detta inte att skadan har läkt eller att grumling inte återkommer. Dammen bör beaktas på samma sätt fram till det att skadan identifierats och åtgärdats.

Detta är viktigt att beakta för en damm där en skada inträffat och det i flödesdimensioneringen för älven kanske ingår att överdämning uppträder vid

högflöde. Denna ökade belastning överstiger den gradient som fick skadan att utlösas vid det första tillfället. Det är därför lämpligt att kända skadeområden speciellt beaktas och eventuellt förses med större förstärkning än övriga delar av dammen, som förberedelse för en högflödessituation.



Figur 3 – 5 Bedömning av möjligheten att initieringen av inre erosion kommer att utvecklas från kornfördelningen för nedströmsfiltret (Fell et. al, 2015).

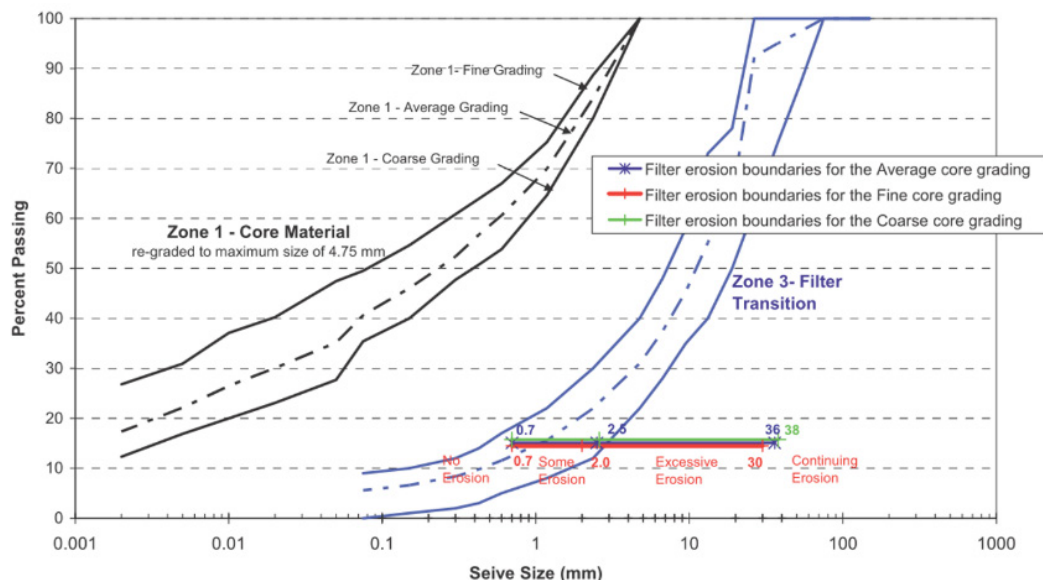
I Tabell 3 - 1 redovisas föreslagna kriterier för gränserna stor erosion och kontinuerlig erosion enligt (Fell et. al, 2015) vid jämförelse mellan ett basmaterial (tätjord) och ett filtermaterial. Basmaterial har delats upp i olika typer beroende på dess gradering.

Tabell 3 – 1 Föreslagna kriterier för stor och kontinuerlig erosion (Fell et. al, 2015). B avser basmaterial och F avser filter.

Basmaterial	Föreslaget kriterium för stor erosion	Föreslaget kriterium för kontinuerlig erosion
$D_{95B} < 0,3 \text{ mm}$	$D_{15F} > 9 \times D_{95B}$	$D_{15F} > 9 \times D_{95B}$
$0,3 < D_{95B} < 2 \text{ mm}$	$D_{15F} > 9 \times D_{90B}$	
$D_{95B} > 2 \text{ mm}$ med en finmaterialhalt $> 35 \%$	$D_{15F,MEDEL} > D_{15}$ som medför en materialförlust på $0,25 \text{ g/cm}^2$ eller Grövre begränsningslinjen för $D_{15F} > D_{15F}$ som medför en materialförlust på $1,0 \text{ g/cm}^2$	
$D_{95B} > 2 \text{ mm}$ med en finmaterialhalt $< 15 \%$	$D_{15F} > 9 \times D_{85B}$	
$D_{95B} > 2 \text{ mm}$ med en finmaterialhalt på $15 - 35 \%$	$D_{15F} > 2,5 \times D_{15F,DESIGN}$ där $D_{15F,DESIGN} = (35 - pp\% 0,075 \text{ mm}) (4D_{85B} - 0,7)/20 + 0,7$	

pp = passerande viktprocent

Bedömning av "ingen erosion", "viss erosion", "stor erosion" och "kontinuerlig erosion" kan enligt t.ex. (Fell et. al, 2015) visas i ett exempel i Figur 3 - 6. Materialfördelningen i basmaterialet (tät kärnan) utvärderas på material mindre än 4,75 mm.



Figur 3 – 6 Bedömning av möjligheten att initieringen av inre erosion kommer att utvecklas från kornfördelningen för nedströmsfiltret (Fell et. al, 2015).

Figur 3 - 6 kan användas för att formulera sannolikheten för hur en specifik damm kan komma att presterar vid ett koncentrerat läckage genom tät kärnan (Foster et. al, 2001), se Tabell 3 – 3. Filterfunktionen värderas i denna tabell i fem olika grupper (Fell, et. al, 2015).

Tabell 3 – 3 Bedömning av filterfunktionen för befintliga dammar.

Grupp	Aktuellt D15 i jämförelse med erosionsgränser i filtertester		Sannolikhet för filterfunktion vid ett koncentrerat läckage genom dammens tätning		
	Medel D15 i dammen	Största D15 i dammen	Avstannar utan erosion	Självläker med viss erosion	Ingen självläkning med stor erosion
1	< I E	< I E	Högst sannolikt	Osannolikt	Högst osannolikt
2	< I E	> I E och < K E	Lika sannolikt		
3	> I E	< K E	Osannolikt	Lika sannolikt	
4	> I E och < K E	> K E	Osannolikt	Osannolikt	Sannolikt
5	> K E	> K E	Högst osannolikt	Osannolikt	Högst sannolikt

I E = Gräns för Ingen Erosion K E = Gräns för Kontinuerlig Erosion

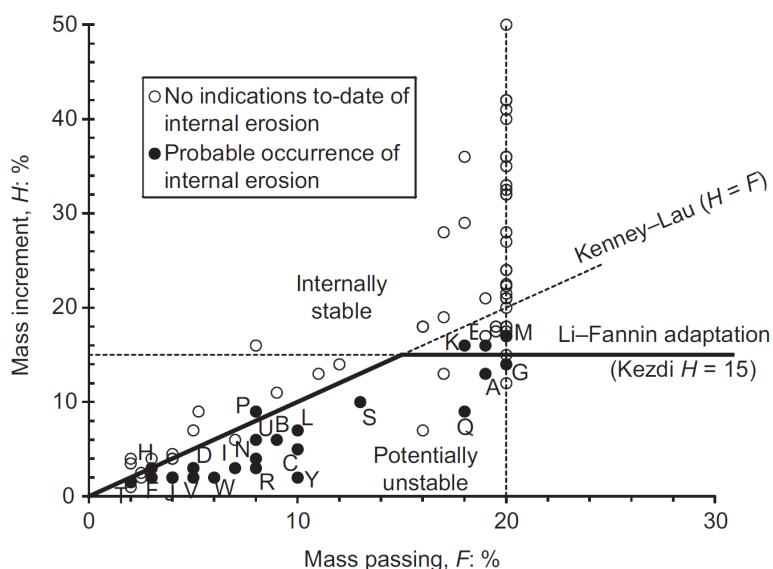
Filtrets inre stabilitet och värdering enligt Rönqvist

Filterfunktionen påverkas av om filtermaterialet är inre stabilt eller inte. Faktorer som påverkar om ett filtermaterial blir inre instabilt vid uppförandet av dammen är exempelvis:

- Filtret mot basmaterialet är bredgraderat. Ett finfilter mot ett basmaterial med 15 – 40 % finmaterial, bör normalt inte innehålla partiklar > 32 mm.
- Filtret innehåller en låg andel finsand (< 40 % utvärderat på material under 4,75 mm).
- Bristande utförande. Detta kan t.ex. vara ändtippning direkt från lastbil på platsen där materialet ska packas, höga pallhöjder eller ojämn höjningsnivå längs dammen. Alla dessa utförandebriter kan orsaka stenseparation och ansamlingar av de grövre fraktionerna i filtret (stenränder).
- Bristande hantering i upplag, där segregation kan uppkomma under mellanlagring och vid upplastning.

En betraktelse för analys av förutsättningarna för inre erosion, som utgår från de etablerade metoderna med fokus på inre stabilitet, har tagits fram av (Rönqvist, 2010). Resultatet har baserats på utvärderingar av över 90 dammar i Sverige med och utan inre erosion.

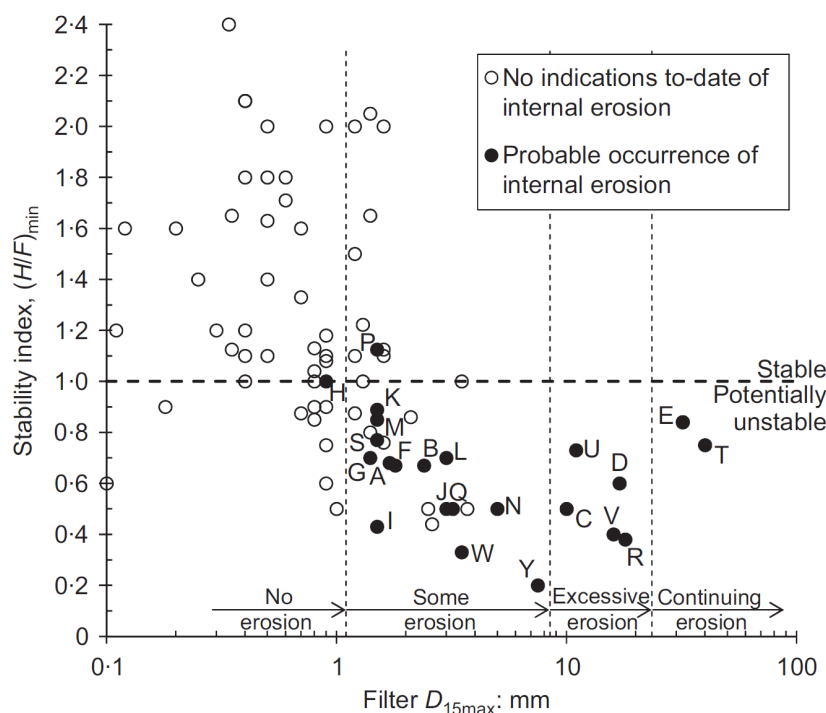
Inre stabilitet för filtret bestäms utifrån kombination av (Kenney & Lau, 1985), (Kenney & Lau, 1986) och (Kezdi, 1979), enligt förslag av (Li & Fannin, 2008), se Figur 3 – 7. Filtret och tätkärnematerialet kan med denna metod utvärderas för att fastställa om materialen har potential för att vara stabila eller instabila.



Figur 3 – 7 Utvärdering av inre stabilitet (H/F) hos filter (Rönqvist, 2010, 2014).

Resultaten för materialet i filtret och för tätkärnan kan på motsvarande vis som beskrivs ovan i figuren kombineras, varigenom förutsättningarna kan värderas för att en initierad inre erosion ska bli fortskridande.

Om både tätkärnmateriel och filter är instabila är det en hög potential för fortskridande erosion, medan om båda materialen är stabila är det troligt att en initierad inre erosion självläker, se Figur 3 - 8. Vidare finns mellanformer där en kombination av olika metoder kan ge ökad information för bedömning av filterfunktionen.



Figur 3 – 8 Värdering av filtrets och tätkärnans inre stabilitet (Rönnqvist, 2014).

3.3.4 Exempel på faktorer som påverkar utvecklingen av inre erosion

Allmänt

Förutom kornstorleksfördelningen för nedströmsfiltret finns ett flertal andra faktorer som påverkar förutsättningarna för att inre erosion ska kunna utvecklas till ett dammhaveri. Typen av fyllningsdamm är av betydelse. T.ex. tål en sprängstensfyllningsdamm mer läckage vid en skada jämfört med en jordfyllningsdamm och förloppet tar längre tid att utvecklas, vilket ger tid för självläkning och större möjlighet att vidta åtgärder.

I det följande ges exempel på faktorer att beakta vid värdering av behovet och utformning av åtgärder för att förbättra motståndskraften och motverka sannolikheten för att inre erosion i dammen ska få ett fortsatt skadeförlopp. Detta är relevant vid den övergripande analysen av dammens tvärsnitt, för att identifiera den svagaste punkten i konstruktionen och bedöma omfattning av lämplig åtgärd. Faktorerna är sådana som kan påverka var och hur ett ökat läckage kan manifesteras.

De faktorer som nedan anges påverka sannolikheten för dammhaveri är i huvudsak hämtade från utvecklingsarbete avseende forskning om dammar vid University of New South Wales (Fell et. al, 2015) och underlag för riktlinjer för att

bedöma sannolikheten för utveckling av dammhaveri som utarbetats av (USBR, 2015b), (FEMA, 2015) och Corps of Engineers (USACE) och som återges i (UNSW, 2008).

Dammens klassning vid val av dimensionerande läckageflöde

I RIDAS TV anges att dammsäkerhetsklassen påverkar behovet att beakta dimensionerande läckage och överväga åtgärder om ett stort läckage skulle inträffa. Åtgärder kan t.ex. vara kompletterande tätningar för att minska läckaget, utökad övervakning eller stödbankar för att förhindra ett snabbt förlopp mot ett dammhaveri. Detta är relaterat till konsekvenserna av ett dammhaveri och inte till dammens individuella förutsättningar. En högre säkerhetsnivå är rimlig för dammar som medför mer omfattande skador i samband med ett haveri.

Detta kan t.ex. beaktas med att en stödbank dras upp till dammens krön för att förbättra både den globala stabiliteten och erosionsskydda nedströmsslänten. Detta kan utgöra ett begränsat överströmningsskydd som skydd mot överspolande vågor.

Fribord och dammkrönets bredd med hänsyn till risk för lokal överströmning

Storleken på fribordet och bredden på dammkrönet anges som ett exempel på påverkande faktorer för risken för dammhaveri. Påverkan kan kvalitativt värderas som "mer trolig", "neutral" eller "mindre trolig" beroende på storleken på fribord och dammkrönets bredd enligt Tabell 3 – 4.

Att dessa aspekter bör beaktas beror främst på att skador orsakade av materialförlust i dammkroppen ofta visar sig som en uppåtpropagerande insjunkning som manifesterar sig som ett sjunkhål ovanför uppströmsfiltret, eller i dammens krön.

Skador av denna typ förekommer vanligast under de första åren efter dämningssupptagande, men har noterats i upp till 100 år gamla dammar (Foster, 2008).

Vid en uppgradering med hänsyn till dimensionerande läckage med t.ex. en stödbank bör, förutom erosionsmotståndet vid dammtån och stabiliteten av nedströmsslänten, även beaktas fribord och bredden på dammkrönet enligt Tabell 3 – 4.

Tabell 3 – 4 Faktorer som påverkar risken för dammhaveri för "Insjunkning i dammkrönet, lokal överströmning".

Faktor	Påverkan på risken för dammhaveri		
	mindre trolig	neutral	mer trolig
Fribord vid tillfället för incidenten, m	> 3 m	ca 3 m	< 2 m
Bredd på dammkrönet, m	> 9 m	ca 6 m	< 3 m

Överväganden bör göras om det finns behov av att dra upp stödbanken till dammkrönet, för att härigenom erhålla ett bredare dammkrön, eller att en höjning av tåtkärnan kan göras för att öka fribordet mellan tåtkärnans överyta och dämningsslänt.

Filtrets utformning nära dammkrön

Filtrets läge och tjocklek i krönet bör beaktas särskilt. I äldre dammar förekommer det att ett eller flera filter utelämnats i dammens övre del, varvid tät kärnan blir sämre skyddad i detta parti. Det förekommer också att tät kärna och/eller filter ligger an direkt mot uppströms erosionsskydd, vilket noterats i snäva koner mot betongkonstruktioner, där utrymmet är begränsat. I analysen av detta bör också de praktiska möjligheterna att lägga ut och packa materialpallarna vid dammens uppförande beaktas.

Vid smala materialzoner finns det risk att överlappning uppkommer vid utläggning och att det inte erhålls en sammanhängande filterzon mot tät kärnan, eller att denna blir mycket tunn.

Dammar med dessa sämre förutsättningar kan rimligtvis anses värderas allvarligare vad det gäller inverkan av krönets utformning på risken för dammhaveri.

Det är normalt att filterzonerna utformas smalare mot dammens krön. Dock ska tät kärnan skyddas i hela sin höjd med filter och övergångszoner av adekvat sammansättning och bredd.

Påverkan av tät kärnans bredd och dammhöjd på risken för initiering av inre erosion

En bred tät kärna i förhållande till dammhöjden ger en minskad risk för initiering och fortskridande av inre erosion, även i zoner med dålig packning, eller med hög genomsläpplighet. Detta då sannolikheten för att en svaghet ska vara genomgående minskar med ökad bredd på materialzonen.

Förhållandet mellan tät kärnans bredd och dammens höjd, enligt Tabell 3 – 5, kan ge vägledning vid värdering av behovet av åtgärder. För höjden kan tas höjden för den hydrauliska belastningen i undersökt punkt och inte dammkroppens höjd från lägsta grundläggningsnivå.

Tabell 3 – 5 Tät kärnans bredd (B) och dammhöjd (H) påverkan för initiering av inre erosion.

Sannolikhet	mindre trolig	neutral	mer trolig	mycket mer trolig
Bredd tät kärna i förhållande till dammhöjd (hydraulisk belastning)	Bred tät kärna $B/H > 1,5$	$0,5 < B/H < 1,5$	Smal tät kärna $0,25 < B/H < 0,5$	Mycket smal tät kärna $B/H < 0,25$

I många svenska dammar byggda på 1960 och 70-talet är tät kärnans bredd 3 - 4 m i dess krön. Vid anslutningen till betongkonstruktioner finns ofta även en stålspons som från betongkonstruktionen sticker in 5 - 20 m centralt in i tät kärnan. Sponten monterades i samband med uppbyggnaden av dammen, där tät kärnan vanligtvis byggdes upp på båda sidor om sponten. Sponten är oftast monterad i en betongfals och fastgjuten mot berg. Bredden på tätjorden blev härigenom ibland endast 1,5 å 2 m. Sponten och dess placering kan i sig vara en svaghetszon som bör beaktas.

Behov av stödbankar och säkring av nedströms dammtå får ökad aktualitet vid mycket smal tät kärna. Tät kärnans bredd har dock enligt (Fell et. al, 2015) mindre betydelse för initieringen för inre erosion, än nedströmsfiltrets funktion enligt kapitel 3.3.3.3 och 3.3.3.4 ovan.

Påverkan av dåligt packat tätjärnmaterial vid anslutning till utskov

En stor del av de sjunkgropar som rapporterats i svenska dammar har inträffat i fyllningsdammars anslutning till betongkonstruktioner. Gemensamma konstruktiva orsaker har haft en inverkan (Ekström et. al, 2016). Detta är dels sådana som ingår i betongkonstruktionen, t.ex. utstickande vingmurar och stålspontar, dels andra svagheter som ingår i fyllningsdammen, t.ex. uppbyggnad av tätjärnan av morän med låg vattenkvot och otillräcklig packning i kombination med otillräckliga nedströmsfilter.

Även utrymmesbrist är en faktor, då fyllningsdammens avslutning mot betongdammen, i form av en kon, från 1960 och framåt blev allt smalare och brantare, vilket begränsade utrymmet för materialzonerna.

Materialet i tätjärnan spreds, vid packning kring spontar i anslutningarna, normalt ut i tunna lager som packades med vibrationsplatta. Moränens vattenkvot valdes ofta relativt låg för att underlätta arbetet, vilket begränsade packningsgraden och medför risk för upphängning mot kringliggande material.

Vibroplattan i sig medförde också att det var svårt att packa materialet lika bra som det gjordes med tung vält utanför spontområdet. I många fall var det svårt att komma åt att packa i trånga sektioner eller i spontens vindlingar. Tätmaterialet blev härigenom känsligt för vattendränkningssättningar och valvbildning, som också påverkar risken för läckage, se Tabell 3 – 6.

Dammarna som färdigställdes på 1960 och 70-talen utformades ofta vid anslutningarna mot betongkonstruktionerna med brantare släntkoner i kombination med lägre krönnivå i jämförelse med övriga delen av dammen. Detta för att erhålla en farbar övergång till brobanan på betongkonstruktionerna och för att spara betong. Den lägre krönnivån vid anslutningen till intilliggande utskov medförde också att anslutningen och tätjärnan fick mindre isolering mot tjäle än övriga delen av dammen.

Internationell statistik över dammhaverier visar att övergången mellan fyllningsdammen och betongkonstruktioner, t.ex. utskov, är ett utsatt parti i dammkonstruktionen och är betydligt mer skadeutsatt än fyllningsdammens anslutning mot naturlig mark.

I (Foster et. al, 2001) ges en indikation på hur sannolikheten för utveckling av dammhaveri påverkas genom att ange kvalitativa värderingar "mer trolig", "neutral" eller "mindre trolig" för olika påverkande faktorer, främst avseende utformningen i övergången till betongkonstruktioner.

Exempel på faktorer avseende utförandet av anslutningen och som anges påverka sannolikheten för dammhaveri listas i Tabell 3 – 6.

Tabell 3 – 6 Faktorer som påverkar risken för läckage vid anslutning till betongkonstruktioner.

Faktor	Påverkan på risken för dammhaveri			
	mindre trolig	neutral	mer trolig	Mycket mer trolig
Lutning på betongväggen (utskovspelare etc.)	Flackare än 0,5H till 1V	Lutning 0,1H till 1V till 0,5H till 1V	Vertikal eller vertikal med flackare lutning på lägre del.	Överhäng inom ytan där tät kärnan ansluter.
Stålsponter eller betonglameller	Korta och goda detaljer med bra packning omkring i tät kärnan instickande del.	Inga instickande konstruktioner med god packning av tät kärnan omkring instickande del.	Instickande del med vertikala sidor och dåligt med bevis på god packning.	Flera instickande delar i tät kärnan, som förhindrar god packning.
Vattenkvot för materialet vid uppbyggnad	Packning med vibrovält > 95% packningsgrad och 0 till +4% vattenkvot över optimal för tung laboratoriepackning.	Packning med handhållen vibroplatta till > 95% packningsgrad och 0 till +4% vattenkvot över optimal för lätt laboratoriepackning.	Packning med handhållen vibroplatta av tjocka lager med vattenkvot under optimal vattenkvot.	Ingen formell kontroll av packning längs betongväggen som tät kärnan ansluter mot.
Dammhöjd	Dammar lägre än 15 m	Dammar 15 m till 30 m höga.	Dammar 30 m till 60 m	Mycket höga dammar > 60 m

Sannolikheten för att inre erosion ska initieras vid anslutningen till betongkonstruktioner är, som ovan nämnts, oftast avsevärt högre än för övriga delar av fyllningsdammen. Behov av stödbankar och säkring av nedströms dammtå bör därför särskilt övervägas vid fyllningsdammens anslutning till betongkonstruktioner.

Beräkning av dimensionerande läckage, erforderlig stenstorlek vid nedströms dammtå och stabilitet kan göras som indikerats i kapitel 4 och 5. Det kan dock, på motsvarande sätt som vid lutande profil för dammens tät kärna, finnas behov av att studera inverkan i tre dimensioner i anslutningszonen. Inverkan av 3D-effekter kan ge en koncentration av utläckaget t.ex. i en lågpunkt intill betongkonstruktionen, vilket motiverar en större blockstorlek för dammtåförstärkningen i detta parti och att stödbanken tjockas på. Detta är ett vanligt fenomen, då betongkonstruktionerna för mindre och medelstora dammar ofta uppförts i lågpunkten för indämningsområdet.

Inverkan av 3D-effekter kan också ha en positiv effekt på grund av att läckvägen kan antas bli längre på grund av instickande stålsponter i tät kärnan eller där tätningen i övergången mellan dammtyperna utgörs av frontplattan på en kringfylld betonglamell. Detta kan medföra att grundvattenytan i stödfyllningen blir lägre i nedströmstån mot betongkonstruktionen än vid en strömningsberäkning i 2D.

Påverkan av skillnader i hydraulisk konduktivitet och pallhöjd

Det är också viktigt att beakta aspekter som skillnader i horisontell och vertikal hydraulisk konduktivitet. Den naturliga skillnad i strömningshastighet som uppkommer genom att packningen utförs i horisontellt utbredda lager, medför att

gradienten genom dammen kan få ett avsevärt flackare utseende än vad som normalt antas teoretiskt.

Moderna stabilitetsberäkningsprogram har vanligtvis inbyggda funktioner för att beakta denna skillnad, vilken ofta uppgår till minst en tiopotens i högre horisontell konduktivitet än den vertikala.

Påverkan av överdämning och eventuella svagheter i filterfunktion i dammkrönet

Vid dimensionering av stödbankar och säkring av nedströms dammtå, bör övervägas om utformningen av dammkrönet påverkar dimensioneringen.

Parametrar som den hydrauliska konduktiviteten och inre stabilitet i materialet som överlagrar tätkärnans överyta bör beaktas, om det föreligger risk för överdämning av tätningen vid ett högflöde och att en strömningsväg därigenom kan öppnas i dammkroppen ovanför den avsedda dämmande dammdelen.

Material med en förhållandevis låg hydraulisk konduktivitet ovanför tätkärnan kan för en begränsad tid förutsättas fungera dämmande, medan en permeabel överbyggnad kan medföra en påtaglig strömning ut i nedströms stödfyllning, utan att dammens tätning skadats, utan att någon inre erosion uppträtt. Detta är en viktig aspekt när t.ex. tätkärnans krön isoleras med expanderat glas, vilket blivit en allt vanligare lösning under senare år. Detta kan ge en förhöjd konduktivitet i dammens krön jämfört med övriga delar av dammen.

Detta fall gäller även för dammar som är försedda med krönskydd av grova block. Med detta avses stenblock inne i dammkrönet.

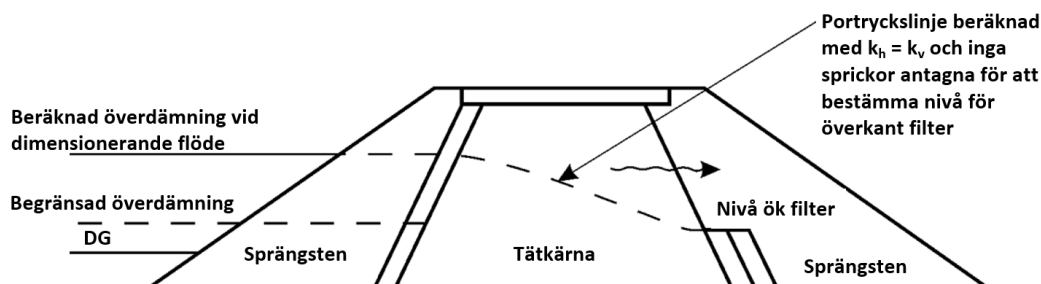
Inbyggda svagheter i fyllningsdammens krön kan öka sannolikheten för att inre erosion eller kontaktersosion ska initieras inne i dammkrönet ovan tätkärnans överyta. Detta speciellt i de fall då dammen förutsätts kunna klara en viss överdämning i samband med extrema flöden. Svagheter i dammkrönet kan bero på materialomlagring orsakat av tjäle, eller som tidigare nämnts, skillnader i horisontell och vertikal hydraulisk konduktivitet, som en följd av utläggning och packning i lager.

Då överdämning förutses kunna uppträda, kan det som komplement till säkring av dammtån mot läckage och stödbankar ur stabilitetssynpunkt, vara aktuellt att höja tätkärnan och/eller komplettera krönet med utökade filterzoner. Detta för att vattendränkningssättningar eller sjunkhål orsakade av överdämningen inte skall orsaka en överströmning av tätkärnan.

Vid ökad känslighet för nedträngande tjäle, eller då begränsat med utrymme gör det svårt att höja dammkrönet på ett konventionellt sätt, finns det exempel på installation av en uppstickande plastspont i tätkärnans övre del som sticker upp som en dämmande del i den ovanförliggande fyllningen.

Vid bedömning av behovet och val av åtgärder mot dimensionerande läckage bör för fastställande av nivå för stödbankens överkant och eventuellt behov av kompletterande åtgärder, förutom det befintliga dammkrönets bredd enligt ovan, även andra eventuella inbyggda svagheter beaktas. I (ICOLD, 2015 & 2017) anges t.ex. att dammkrönets utformning, när dammen byggdes, kanske inte

projekterades för en överdämning som den som beräknas uppkomma i samband med det dimensionerande flöde som dammen förväntas kunna motstå idag, jämför Figur 3 – 9. Det individuella tvärsnittet är viktigt att betrakta utifrån de olika förekommande belastningsfallen.



Figur 3 – 9 Exempel på detalj i dammkrönet som kan resultera i relativt hög sannolikhet för inre erosion (Fell et. al, 2015).

Valvbildning i tättkärnor

Utveckling av koncentrerade läckage genom en tättkärna är beroende av materialets förmåga att genom valvbildning hålla taket uppe för en erosionskanal. Detta har även koppling till dammens tvärsnitt enligt exemplet i Figur 3 – 9. I (Nilsson & Rönqvist, 2004) ges indikation på olikas materials förmåga att kunna bilda valv över en kanal, se Tabell 3 – 7.

Tabellen bör användas konservativt. Detta då svenska tättkärnor nästan uteslutande uppförts av bredgraderade moräner. Detta är internationellt sätt ovanligt, där man istället har en preferens för tättkärnor med en förhållandevis hög ler- och silthalt. Den svenska praxisen med sandiga moräner som tätning, vanligtvis utan något inslag av lerfraktion, medför att sannolikheten för valvbildning ofta är begränsad, även om detta förekommer.

Sannolikheten för att valvbildning ska uppkomma mot ojämn grundläggningsyta bör dock inte negligeras, eller andra geometriskt ogynnsamma partier som dammens tätning är ansluten mot och som kan orsaka differentialsättningar och förändrade effektivspänningsförhållanden. Se även kapitlet ovan rörande vattendränkningssättningar och upphängning mot sponter i anslutningar till betongkonstruktioner.

Tabell 3 – 7 Faktorer som påverkar sannolikheten för jord att bilda valv utan att kollapsa.

Typ av material*	Finmaterial < 0,063 %	Plastiskt/ icke plastiskt	Sannolikhet*
1- Sandig lera, grusig lera	> 50	plastisk	högst sannolikt
2- Siltig sand	> 15	plastisk	hög sannolikhet
3- Siltig sandigt grus	5 - 15	något plastisk	neutral
4- Grusigt material med ingen halt av plastisk finmaterial	5 - 15	icke plastisk	osannolikt

*Viss anpassning har gjorts till material i svenska dammar som ofta utförs av siltiga moräner liknande typ 3 och 4.

Materialiet i de tät kärnor i svenska dammar som bedöms vara av typ 1 och 2 i Tabell 3 – 7, kan enligt ovan nämnda referens antas kunna hålla en kanal öppen under vattenytan. Erfarenheter från kända incidenter indikerar att en utbildad kanal ofta kollapsar innan den blir stor. Att notera är att den normala finjordshalten i svenska dammar är 20 – 50 %, dock utan lerfraktion, varför internationella referenser ibland kan vara vanskliga att använda.

Vid tät kärnans övre del, där grundvattenytan i tät kärnan gränsar mot torrare material ovanför magasinsvattenytan, visar information från inträffade plötsliga läckage att moränen genom valvbildning kan bilda större kanaler genom tät kärnan från uppströmsfiltret till nedströmsfiltret. Stationära kanaler av mindre dimension kan förekomma. Detta är en viktig aspekt vid planering av överdämning, där detta område av tätningen för första gången belastas av den stigande magasinsvattenytan.

3.3.5 DAM BRECH INITIATION TIME FÖR FELMODEN INRE EROSION

Det kan finnas behov, i samband med bestämning av dimensionerande läckage, att studera hur lång tid det kan ta för olika typer av dammhaveri att utvecklas. Detta är en central faktor i hur de förebyggande åtgärderna ska disponeras, bl.a. för att kunna jämföra hastigheten med hur ett brott kan antas utvecklas med möjligheten att sänka av magasinet. Denna information kan ge underlag för en studie av systemfunktionen, t.ex. samverkan mellan förstärkningsåtgärder för dimensionerande läckage och eventuellt behov av ökad avbördningsförmåga, kompletterande beredskapsåtgärder och instrumentering.

'Dam breach initiation time' är en viktig parameter vid bedömning av erforderlig förstärkningsåtgärd mot dimensionerande läckage för felmoden inre erosion i den aktuella dammen. Till exempel kan en svåråtkomlig damm behöva omfattande förebyggande åtgärder så att den inte havererar innan motåtgärder hinner sättas in. En damm med begränsade tillfartsvägar, som kan antas påverkas i en skadesituation, kan behöva en större förstärkning och mer omfattande förebyggande åtgärder för att säkerställa att den är beständig under en längre tid, än den genomsnittliga dammen med större åtkomstmöjligheter.

Vid långsamma magasin är kraven på att tåla långvarig belastning i dammtån rimligtvis större än för snabba magasin där belastningen på den skadade dammkroppen och gradienten genom denna snabbt kan minskas genom att sänka av magasinsvattenytan. Det senare förutsätter dock att anläggningen har utskov (låg nivå på utskovströsklar) som kan sänka av magasinsvattennivån tillräckligt. I nuvarande RIDAS TV finns inga rekommendationer om möjlighet att kunna sänka av magasinet och hur snabbt detta ska kunna göras för olika klassificeringar av dammar.

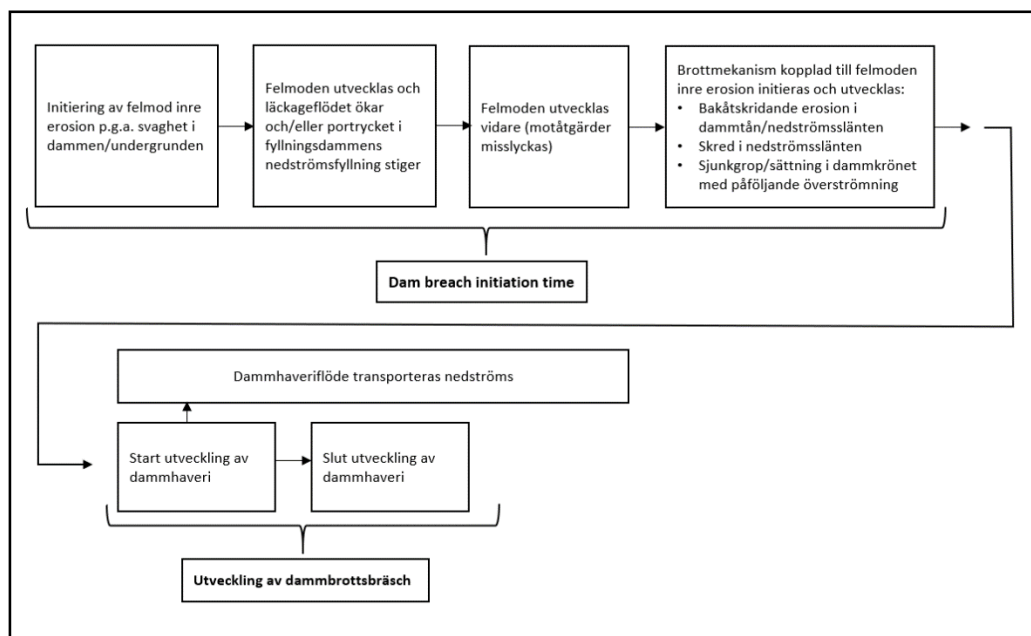
Detta är ett viktigt övervägande och en förstärkning för anläggningar med begränsade åtkomstmöjligheter är en viktig åtgärd. Resultatet av detta resonemang bör dock i första hand behandlas som en del i hela anläggningens systemfunktion inklusive behovet av beredskapsåtgärder och övervakning vid dammen. Att enbart

förbättra erosionsbeständigheten kan ge en falsk trygghet och övertro på dammens beständighet.

Med 'dam breach initiation time' avses i den här rapporten den förflutna tiden från det första förhöjda läckaget genom fyllningsdammen, till utveckling av någon av de tre brottmoderna kopplade till felmoden inre erosion och dimensionerande läckage (se kapitel 2.2), vilket illustreras i Figur 3 - 10.

I många svenska fyllningsdammar har förhöjt läckage på grund av inre erosion i tåtkärnan eller undergrunden redan observerats (jämför Figur 3 – 10 och Figur 3 - 2). För dessa dammar har felmoden inre erosion redan initieras, men utvecklingsfasen är antingen mycket långsam, eller så har motåtgärder satts in för att stoppa upp eller fördröja utvecklingsfasen. I dessa fall måste 'dam breach initiation time' bedömas från fasen som felmoden befinner sig i.

Vid bedömningen av 'dam breach initiation time' måste hänsyn även tas till ovanliga laster som dammen normalt inte utsätts för, t.ex. höga vattennivåer och jordbävningar.



Figur 3 – 10 Schematisk beskrivning av dammhaveri med definition av "dam breach initiation time" för felmoden inre erosion.

I (Foster et. al, 2000) och (Fell et. al, 2003) föreslås bedömning av 'dam breach initiation time' utifrån en approximativ metod, baserad på data från historiska haverier av fyllningsdammar. Svenska stenfyllningsdammar med tåtkärna av morän hamnar ofta i kategorin "weeks - even months or years". Vid behov kan således en mer detaljerad utredning krävas för att bedöma om 'dam breach time' är veckor, månader eller år för dessa dammar.

Möjligheten att upptäcka att en felmod avseende inre erosion initieras eller håller på att utvecklas beror på dammens tillsyn. Välplanerad damminstrumentering kan

ofta fånga upp initiering av felmoden inre erosion eller ett förändrat tillstånd i fyllningsdammar där inre erosion redan initierats. Detta till skillnad mot visuell tillsyn där felmoden oftast måste utvecklats längre innan den kan detekteras på dammens yta eller i dammtån, genom exempelvis synlig sättning, sjunkhål, läckage/läckageförändring, eller grumligt läckage.

Dammens förstärkningsbehov bör ta hänsyn till 'dam breach initiation time' för den aktuella dammen, i förhållande till möjligheten att sätta in motåtgärder. Detta kan exempelvis vara förmågan till snabb avsänkning av magasinet (där det är möjligt), dammens åtkomlighet, avstånd till tillgängliga reservmassor, förmåga till tätning av skadan genom uppströms åtgärder, eller ytterligare förstärkning av dammtån för att få mer tid till motåtgärder.

4 Geometriska överväganden som underlag för dimensionering av förstärkningsåtgärder

4.1 ALLMÄNT

I detta kapitel behandlas den geometriska utformningen av förstärkningen.

I ett inledande kapitel 4.2 beskrivs teoretiska aspekter på framförallt glidyntans läge vid beräkning av erforderlig säkerhetsfaktor för aktuellt lastfall och hur skrivningarna i RIDAS kan tolkas. Detta berör inte direkt dimensioneringen av lastfallet dimensionerande läckage, men ger vägledning för den praktiska utformningen av stödbanken.

I kapitel 4.3 behandlas därefter kortfattat ett probabilistiskt angreppssätt för att analysera materialparametrarnas inverkan på säkerhetsfaktorn.

4.2 ASPEKTER PÅ STABILITETSBERÄKNINGAR OCH GLIDYTANS LÄGE

Vid beräkning av stabiliteten i en dammkropp är glidyntans läge av relevans för bedömningen. Det kommer beräkningsmässigt alltid att finnas ytliga glidyntor med låg säkerhetsfaktor. Dessa är dock vanligtvis inte styrande för dammsäkerheten. Det är istället djupa glidyntor som påverkar dammens totalstabilitet och kan ha en direkt inverkan på den dämmande förmågan, som bör ligga till grund för den huvudsakliga dimensioneringen.

Ytliga glidyntor behöver dock beaktas utifrån speciellt två aspekter. Detta är dels sådana glidyntor som kan antas medföra progressiva utglidningar som successivt leder till ett haveri. Dels är det sådana som tar bort vitala delar av dammen, som t.ex. dammtåförstärkningens yttre, grova del och minskar erosionsbeständigheten.

För jordfyllningsdammar är säkerheten låg för ytliga skred redan vid normala belastningar, jämför Figur 4 – 1. Säkerheten har i exemplet i figuren teoretiskt beräknats till ca 1,3 för en specifik släntlutning, med stödfyllningen uppbyggd av material som är vanligt förekommande för en svensk jordfyllningsdamm.

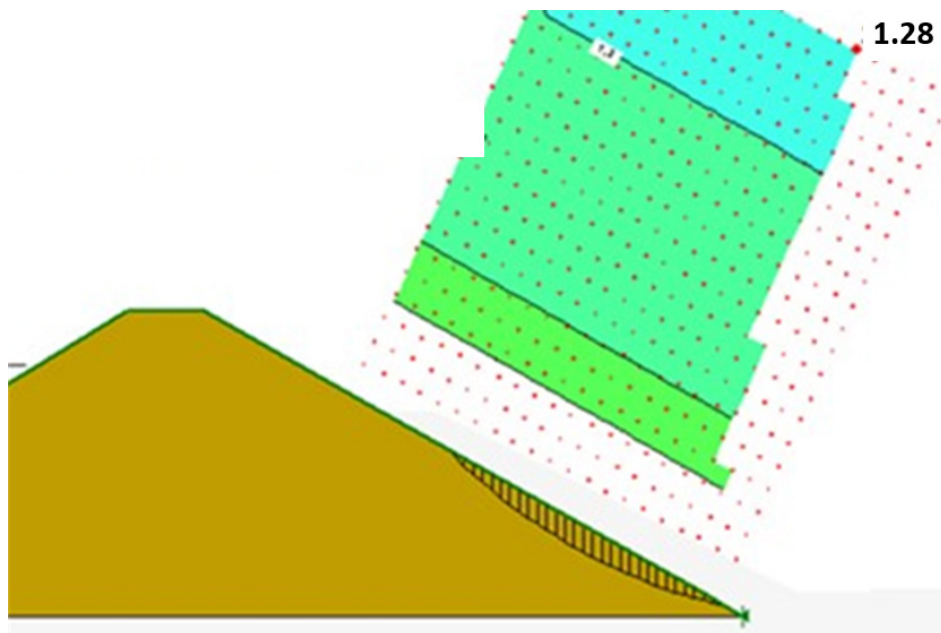
I riktlinjer anges både i Sverige och internationellt ofta att säkerheten ska vara minst för 1,5 för normala belastningar, se t.ex. (Fell et. al, 2015) och (RIDAS, 2012). Den angivna säkerhetsfaktorn i riktlinjerna avser enligt ovan dock utglidningar som kan påverka dammens förmåga att hålla uppe magasinet och är inte direkt tillämplig för ytliga skred i nedströmsslänten. Risken för att ytliga skred i nedströmsslänten, inklusive följskred, ska påverka dammens förmåga att hålla uppe magasinet är normalt liten. Detta förhållande är inte helt tydligt i gällande vägledning.

Inget läge för den glidynta som ska ha en säkerhetsfaktor på minst 1,5 beskrivs heller i RIDAS TV. En ej dokumenterad internationell tumregel är att det vid en utvecklad glidynta inte ska finnas risk för omedelbar förlust av den dämmande förmågan, samt att skadeområdet ska kunna passeras på krönet för att snabbt kunna sätta in åtgärder från båda hållen av skadan. Detta anges ibland till ca $\frac{1}{3}$ av

krönets bredd, men ska ställas i relation till den unika utformningen för respektive damm.

För att ha en rimlig möjlighet att kunna passera ett skadeområde kan det vara önskvärt med minst 3 m kvarstående bredd av dammens krön. Det bör påtalas att detta är en teoretisk gräns med en inbyggd marginal genom säkerhetsfaktorn. Avsikten är att beakta inbyggda osäkerheter i dammen och inte att tillåta ett skred i exakt detta läge av dammen.

Vid kraftiga regn kan den låga teoretiska säkerheten för ytliga glidytor resultera i erosionsskador, i fall släntens ytlager är uppbyggt av finkornigt material. För att minska behovet av underhållsåtgärder vid erosion och ytliga skred, kan nedströmsslänten flackas ut eller förses med en täckning av mer erosionsstabil material. Det bör dock betonas att dessa ytliga glidytor inte ska ses som dimensionerande för dammens stabilitet, utan vanligtvis är en underhållsfråga. Det som skall ses som allvarligt för en damm är antingen om summan av ett antal ytliga skred överskrider ett kritiskt värde för dammen, eller om djupgående skred hotar vitala delar av den dämmande förmågan med ett haveri som följd.



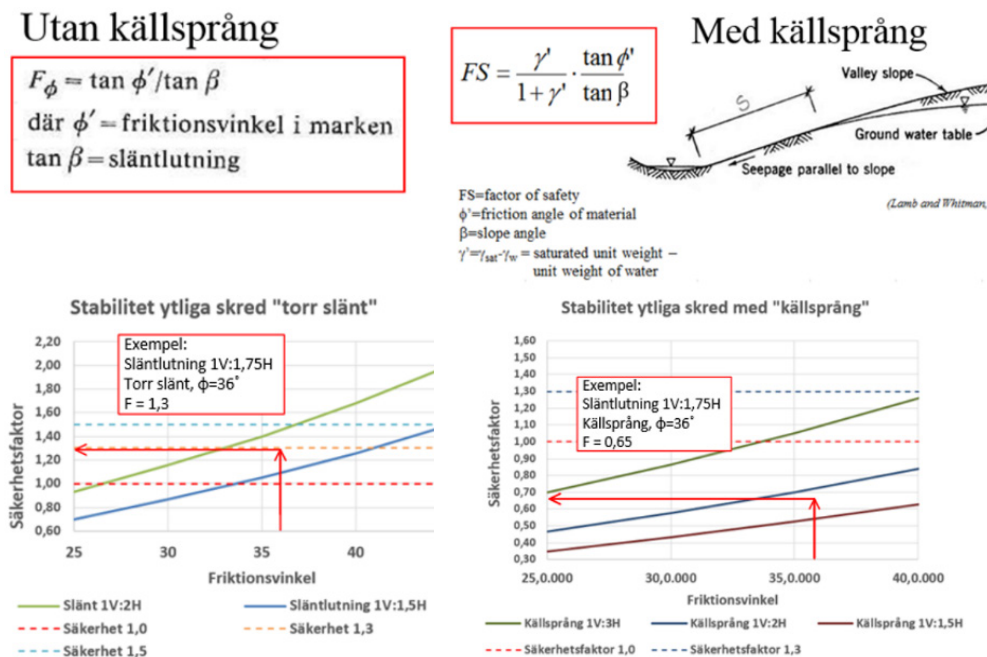
Figur 4 – 1 Säkerhet för ytliga skred i vid normala belastning.

I en homogen damm utan inre zoner bestäms säkerheten för ytliga skred av släntlutningen och materialets inre friktionsvinkel, som visas i Figur 4 – 1. Redan vid normala belastningar kan dammen behöva förses med någon form av dränering vid nedströms dammtå för att undvika att källsprång utbildas i nedströmsslänten, oavsett om denna är försedd med en yttäckning för att förhindra ytlig erosion eller inte. Det finns olika sätt för att arrangera dräneringen (Ekström et. al, 2016). Många befintliga dammar saknar dock, eller har brister i dräneringen vid nedströms dammtå.

Dimensionering för att säkerställa en homogen damm, både ur stabilitetssynpunkt och risk för erosion vid dammtån, är tillämpbar även för en zonerad damm. Denna kan behöva beaktas som en homogen damm för belastningsfallet dimensionerande läckage.

Från allmän geoteknik framgår att säkerheten för ytliga skred i friktionsjord kan bestämmas som förhållandet mellan tangenten för inre friktionsvinkeln och tangenten för släntlutningen, jämför Figur 4 – 2.

Det kan här noteras att säkerhetsfaktorn vid normala släntlutningar och friktionsvinklar för normalt använda material i nedströmsslänten oftast kan accepteras om slänten inte har källsprång, medan stabiliteten blir otillräcklig om källsprång skulle uppstå.



Figur 4 – 2 Säkerhetsfaktor för ytliga skred, dels för en slänt utan vattentryck, dels för en slänt med källsprång.

4.3 PROBABILISTISK ANALYS AV DAMMENS SÄKERHETSFAKTOR

Sannolikhetsbaserade beräkningar har börjat användas i ökad utsträckning inom dammsäkerhet runt om i världen, dock framför allt avseende betongkonstruktioner. I Sverige har tillämpningen av denna metod hittills varit begränsad (Westberg Wilde & Johansson, 2016) och (Westberg Wilde, 2010). Nedan ges en övergripande bild av metodiken. En mer omfattande förklaring finns i (USACE, 1999), (Griffiths & Fenton, 2004) och (Xu et. al, 2017), där processen beskrivs mer ingående.

Sannolikheten för att en konstruktion inte är stabil är en funktion av ingående parametrar i en jämviktsekvation mellan pådrivande och mothållande krafter. Från

de ingående parametrarnas sannolikhetsfördelningar kan en sannolikhetsfördelning för jämviktsekvationen beräknas.

Sannolikhetsindex ("reliability index") β för en sannolikhetsfördelning definieras som:

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} \quad \text{Ekvation 4 - 1}$$

I detta är μ medelvärde och σ är standardavvikelse för sannolikhetsfördelningen för de ingående materialparametrarna.

Eftersom sannolikhetsfördelningens medelvärde och standardavvikelse beror på medelvärdet och standardavvikelsen i ingående materialparametrar, så påverkar osäkerheten i ingående materialparametrar (dvs standardavvikelsen) resultatet som benämns β . En större standardavvikelse i ingående parametrar ger i sin tur en större standardavvikelse i resultatet, vilket ger ett lägre β . Därmed kan β beskrivas som ett mått på osäkerhet i indata, där en större osäkerhet ger ett lägre β och därför även en högre brottsannolikhet.

Sannolikhetsindex β kan användas direkt för att bedöma släntstabilitet via brottsannolikhet, eller som ett komplement till en deterministisk säkerhetsfaktor (där β används för att beskriva osäkerheterna i indata).

Sannolikhetsbaserade beräkningar kan vara ett bra alternativ för att ta hänsyn till osäkerheter i materialegenskaper vid dimensionering av förstärkningsåtgärder. Detta är relevant då dokumentationen av ingående material och utförande av många dammar är begränsad.

Ett utvecklingsarbete behövs dock, då bl.a. gränsvärden för en säkerhetsfaktor i form av sannolikhetsindex än så länge saknas för fyllningsdammar. Ett sannolikhetsbaserat angreppssätt för stabilitetsberäkningar har dock många fördelar, inte minst som ett komplement till deterministiska beräkningar, och kommer säkerligen att bli vanligare i framtiden. I dagsläget är möjligheterna att använda denna metod begränsad, då allmänna riktlinjer saknas inom aktuellt tillämpningsområde.

En slutsats som kan dras är dock kopplingen mellan säkerhetsfaktorn och ingående materialdata. Där kunskapen om de ingående materialen är låg, är probabiliteten för brott högre, vilket bör beaktas i dimensioneringen, oavsett om en probabilistisk beräkning utförs eller inte. En utförd beräkning skulle bidra med en möjlighet till optimering av förstärkningen, där det av spridningen i säkerhetsfaktor framgår när en åtgärd har relevant inverkan på säkerhetsfaktorn eller inte. Ett liknande resultat kan erhållas genom en omfattande känslighetsanalys där indata varieras.

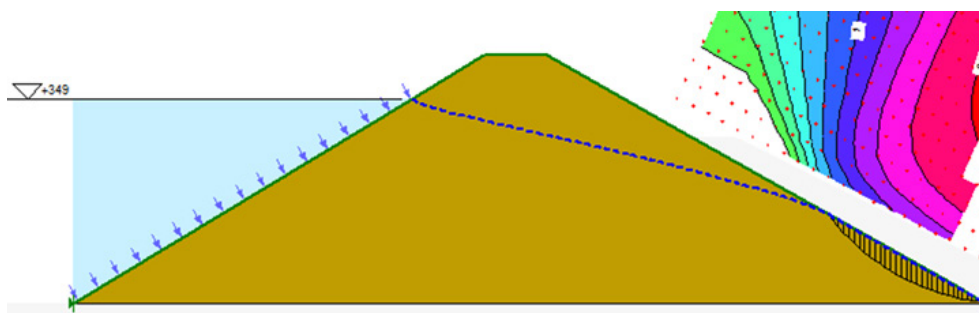
4.4 GEOMETRISK DIMENSIONERING AV STÖDBANK

I exemplet som indikerats i Figur 4 – 1 har slänten en lutning 1:1,75 och inre friktionsvinkeln är 36° för materialet i dammkroppen. För denna kombination erhålls säkerheten ca 1,3 för en torr slänt, medan säkerheten för slänten, vid ett källsprång, sjunker till 0,57, dvs. att ett haveri utvecklas. Exemplet visar att ytliga

skred kan förväntas om källsprång finns i dammslätten, vilket även illustreras i Figur 4 – 3, baserad på en beräkning utförd i Geostudio.

Påverkan på säkerheten för ytliga skred om dammen i Figur 4 – 3 förses med en stödbank av material, som har markant högre hydraulisk konduktivitet än den befintliga stödfyllningen, framgår av Figur 4 – 4. I exemplet är dammhöjden 18 m och stödbanken som har mäktigheten 1,0 m (räknat vinkelrätt mot slänten).

Säkerheten för ytliga skred beräknas genom utläggning av stödbanken öka från 0,57 till 1,11 för samma förhållanden som medför ett källsprång utan stödbank. Samma resultat erhålls om höjden och tjockleken ändras till en annan skala. Detta då gradientens läge är geometriskt betingad och inte beror på den hydrauliska konduktiviteten när beräkningen rör en homogen dammkropp.

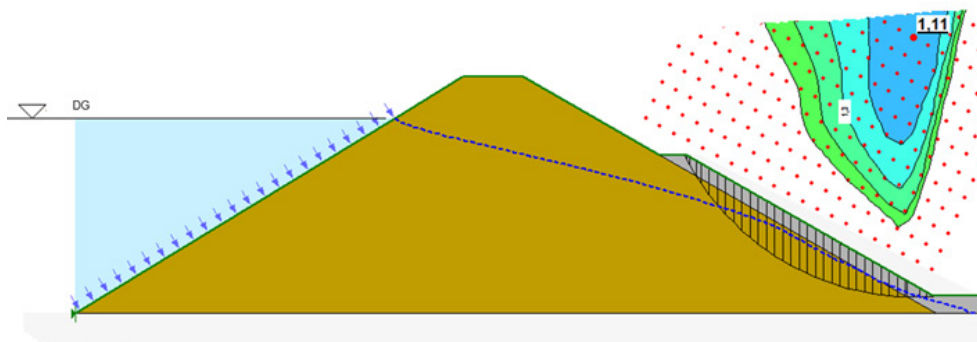


Figur 4 – 3 Beräkning av ovan nämnda exempel med Geostudio. I Figur 4 – 1 syns motsvarande damm med torr bank ($F = 1,3$) och här efter dämning och utbildat källsprång i nedströmsslätten med nedsatt säkerhetsfaktor ($F = 0,57$).

Det är dock viktigt att beakta sannolikheten för skillnad mellan horisontell och vertikal konduktivitet i denna beräkning. Normalt uppkommer en skillnad på en tiopotens pga. den packning som utförs vid uppförandet av dammen, samt genom den skiktning med ackumulering av finmaterial i den packade ytan som vältningen medför.

En riklig bevattning av stödfyllningen under utläggning i tunna pallar kan motverka detta, men går enbart att utföra för grövre stödfyllning. Skillnaden i konduktivitet bör beaktas i att källsprånget kan mynna högre upp i slänten än om samma förhållanden antas i båda riktningar. Detta kan normalt beaktas i moderna beräkningsprogram.

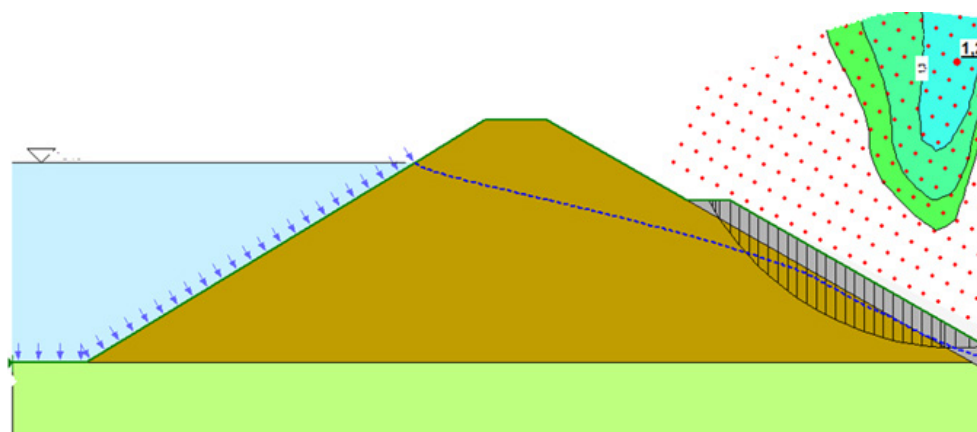
En avgörande faktor för att öka stabiliteten är att stödbanken ska ha en hydraulisk konduktivitet som är minst 10 gånger större än den befintliga stödfyllningen. Man kan i beräkningen försumma att det teoretiskt behövs en viss del av stödbankens tjocklek för att leda bort flödet från utläckaget under källsprånget. Normalt kan hela stödbanken antas vara dränerad, om kravet på skillnad i konduktivitet uppfylls.



Figur 4 – 4 Exempel; med 1 m tjock stödbank erhålls säkerhetsfaktorn 1,11.

Om den vinkelräta tjockleken 1 m för stödbanken i exemplet i Figur 4 – 4 ökas till 2 m, höjs säkerheten i ovan beskrivna fall från 1,11 till 1,24, se Figur 4 – 5.

Vid projekteringen av stödbanken bör praktiska förhållanden beaktas. En minimibredd på ca 3 m bankens överyta är att föredra för att möjliggöra framdrift med grävmaskin och lastfordon under uppförandet. Detta om banken är för hög för att nå från dammfoten, eller om det inte går att nå ner från dammkrönet. Av utförandetekniska skäl är det dock i princip alltid önskvärt för entreprenören att kunna arbeta från stödbankens krön medan denna uppförs.

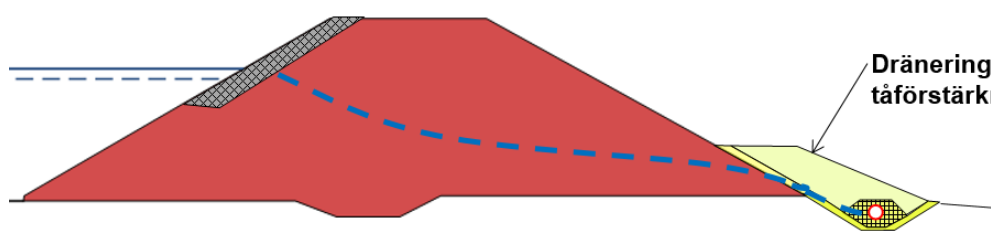


Figur 4 – 5 Exempel med 2 m tjock stödbank erhålls säkerheten till 1,24.

Ett källsprång längs dammtån (från damm eller undergrund) kan utbildas som visas i Figur 4 – 6. En förstärkning behöver här göras för att minska risken för bakåtgripande erosion som kan påverka dammsäkerheten. Exempel på förstärkning med nedsänkt dränagesystem visas schematiskt i Figur 4 – 7.



Figur 4 – 6 Källsprång i dammtån som saknar dammtåförstärkning.



Figur 4 – 7 Förstärkning med dränering och dammtåförstärkning.

Vid en förstärkning enligt Figur 4 – 7 behöver alltid material väljas så att ett mer nedströms utlagt lager är genomsläppligare än angränsande material uppströms. Härigenom undviks risk för att bygga upp ogynnsamma vattentryck i stödfyllningen. Vidare bör alla materialövergångar uppfylla filterreglerna i RIDAS TV. Dessa krav kan medföra att flera lager med olika kornfördelning behövs för att överbrygga skillnaden mellan materialet i dammkroppen och yttersta materialet i tåförstärkningen, se även exempel på utformning i (NVE, 2006).

Slutligen behöver materialet i utläckagepunkten vara tillräckligt grovt för att motstå erosion vid ett utflöde vid nedströmstån, t.ex. om dränet sätter igen och källsprånget trycks upp till markytan ovanför detta. Flödet i dränageledningen bör om praktiskt möjligt samlas in och ledas till en brunn där flödet kan mätas.

Dammtåförstärkningar utförs normalt försänkta i undergrunden. Detta för att förhindra att erosion uppkommer mot grundläggningsytan, vilket kan underminera dammtån. Detta är speciellt viktigt när dammen är grundlagd på genomsläppliga marklager, eller horisontella skikt med varierande hydraulisk konduktivitet. Vid ogynnsamma förhållanden kan läckagevatten transporteras förbi dammen, under denna, och mynna nedströms, där bakåtskridande erosion initieras.

En felmod kan också vara instabilitet i materialen i undergrunden, vilket får finmaterial från dessa att transporteras mot nedströmssidan och skapa öppna läckagevägar genom undergrunden. För att motverka detta kan dammtån behöva förlängas ut från dammen, med omvända filter mot marken. Utbredningen av en sådan förstärkning kan bestämmas med en strömningsberäkning, vilket kan simuleras i SEEP/W eller annat program där flöde i mark kan beaktas. För att övervaka förhållanden av denna typ är instrumentering viktig. Detta för att kontrollera om ogynnsamma portryck uppkommer som kan medföra hävning i dammtån eller instabilitet i dammkroppen.

Riktlinjer och stöd för faktorer som inverkar på stabilitetsberäkningen och genomförandet av denna finns bl.a. i (USACE, 2003), (USACE, 2004), (USBR, 2011) och (USBR, 2015a). Stöd för design av tån med tillhörande dränage, med beaktande av framtida underhållsparametrar finns bl.a. i (Hart et. al, 2018) och (Pabst et. al, 2013).

Som ovan beskrivits grundläggs stödbanken ofta på en dränering längs dammtån där arrangemang görs för läckagemätning. En samordning behöver då göras mellan de olika funktionerna och dränagediket kan behöva tätas mot nedströmshållet för att flödet från dammen inte ska påverkas av grundvattenytan nedströms dammen. För att kunna mäta flödet från dammen med t.ex. ett Thomsonöverfall behöver för normalförhållandena en viss uppdämning arrangeras i dräneringen i förhållande till grundvattenytan nedströms dammen.

För områden med hög järnhalt i marken bör det övervägas att försöka utföra dränaget indämt för att undvika flockning som sätter igen dränagesystem och mätöverfall.

Ytterligare en aspekt att beakta vid designen av stora, grova stenfyllningar är risken för tjälnedträngning och den ansamling av kyla mot dammens nedströmsslänt som detta kan medföra. Detta kan eventuellt öka frostinträngningen i den ursprungliga stödfyllningen. Denna effekt drivs av konvektion vintertid, då kall luft sjunker i stenfyllningen. Konvektionen upphör sommartid och uppvärmning sker enbart genom värmeledning och strålning, vilket inte är lika effektivt. Det kan inte uteslutas att detta i vissa fall medför uppkomst av permafrost. Detta kan i sin tur höja nivån för ett källsprång om nedströmstån under stödbanken är frusen.

Även för dränage och inspektionsbrunnar är det viktigt att hantera risken för frysning. Brunnar bör lokalt kringfyllas med finkornigt material och förses med isolering. Isolering inne i brunnen bör göras med försänkta lock under marknivån.

5 Dimensionering av dammtåförstärkning med hänsyn till dimensionerande läckage

5.1 ALLMÄNT

I detta kapitel diskuteras riktlinjerna för dimensionering av tåsten och de erfarenheter som tillkommit sedan nuvarande skrivning i RIDAS TV gjordes. Baserat på detta ges förslag på modifiering av den beräkningsformel som normalt tillämpas vid dimensionering av stenstorlek.

5.2 BEAKTADE LASTFALL

Erosion i dammtån kan redan vid normala belastningar uppstå om inte utläckageområdet täcks med filter för att förhindra ytliga skred som beskrivits ovan. Det material som ligger ytterst vid utläckageområdet behöver vara tillräckligt grovt för att inte erosion ska starta. Beaktandet av erosion i dammtån kan delas in i två olika fall.

Det första är normala belastningar under ordinarie drift. Dammar behöver oftast förses med arrangemang längs nedströms dammtå som dimensioneras för normala belastningar. De normala belastningarna är dels bakgrundsläckaget genom dammen, dels flödet från nederbördsområdet uppströms dammtån, dvs. från dammens krön och nedströmsslänt, samt eventuellt från intilliggande anslutningar till naturlig mark om detta inte kan kanaliseras förbi dammens dränagesystem.

Dräneringen dimensioneras enligt praxis för ett flöde som är i storleksordningen fem gånger större än vad det normala bakgrundsläckaget beräknas till, t.ex. från genomströmning av dammen med användande av uppskattade värden på den hydrauliska konduktiviteten.

Vidare adderas flödet från nederbörd som beräknas med ingångsdata som är beroende av områdets storlek med beaktande av dammens konsekvensklass liksom konsekvenserna av en överbelastning av dräneringssystemet. Vanligtvis brukar dräneringen dubbleras med minst två parallella rör, för att dränagesystemet inte omedelbart ska förlora sin funktion vid ett brott på en ledning.

Det andra är ökad belastning i samband med en avvikelse i dammkroppen. I det fall dimensionerande läckage ska beaktas, vilket är ett betrakta som ett olycksfallsfall, är bestämningen av flödet beroende av ett flertal faktorer. I denna rapport behandlas t.ex. dammens tvärsektion och ingående material, samt dammens höjd. Antaganden av tänkbara förlopp som leder till dammhaveri med förutsättningar för initiering, tidig utvecklingsfas, fortsatt utvecklingsfas, som beskrivits ovan i kapitel 3, påverkar det dimensionerande flödets storlek.

5.3 DIMENSIONERING AV STORLEK PÅ MATERIAL I DAMMTÅFÖRSTÄRKNING

Solviks formel anges i RIDAS TV för att bestämma materialstorleken från beräknat/valt dimensionerande läckage per längdmeter damm. Denna vägledning har funnits i RIDAS Tillämpningsanvisning sedan 2000-04-19 och har varit oförändrat under årens lopp.

Det angavs inte helt klart i RIDAS anvisning om erforderlig stenstorlek representerar D_{20} eller D_{50} , men det har under årens lopp blivit praxis att stenstorleken som anges av Solviks formel representerar D_{50} för blocken, jämför Ekvation 5 – 1. Detta medför att Solviks formel resulterar i stenstorlekar som är påtagligt konservativa jämfört med andra metoder för att beräkna erosionsstabilitet vid genomströmning (EBL, 2007).

$$D = 1,5 \cdot q^{2/3} \cdot (\sin\alpha)^{7/9} \quad \text{Ekvation 5 - 1}$$

där D = erforderlig stenstorlek (m)

q = utflöde (m^3/s , m)

α = vinkeln mellan slänt och horisontalplanet

För att enkelt kunna jämföra Ekvation 5 – 1 med andra referenser anpassade Solvik formeln till Ekvation 5 – 2. Denna ekvation är en mindre anpassning av laboratorieresultat som genomförts i en ca 0,5 m bred försöksränna med krossmaterial och singel med kornfördelning mellan 13 till 59 mm.

Vid försöken visade sig brottförloppet ha två trösklar. Den första tröskeln var när enstaka korn fick viss rörelse, dock utan att rubbas ur sitt läge mellan andra korn för att orsaka ett fortskridande förlopp. Den andra tröskeln var när ett brottskede startade. Flödet vid brottskedet uppges ha inträffat vid 80% högre flöde än vid det första tröskelvärdet, då enstaka korn började att röra sig. Ekvation 5 – 1 som Solvik presenterar har härigenom en inbyggd säkerhetsfaktor av 1,8 och ska inte direkt jämföras med andra referenser där brottvärdet har bestämts.

$$d_s = 1,46 \cdot q_t^{2/3} \cdot S_o^{7/9} \quad \text{Ekvation 5 - 2}$$

där d_s [m] = d_{50} dvs medelstorleken för tröskelvärdet då enstaka korn flyttas

q_t [m^3/s ,m] = första tröskelvärde där enstaka korn med diametern får rörelse

S_o [$\sin \alpha$] = lutning av nedströmsslänten, t.ex. slänt 1V: 1,5H är $S_o = 1/1,5$

Solviks modifierade formel (Ekvation 5 - 2) grundar sig på laboratorieförsök på olika graderingar av grus, med i huvudsak strömning genom en flack slänt. EBLs (Energibedriftenes Landsforening; nuvarande Energi Norge) försök, som beskrivs i kapitel 5.3, genomfördes i markant större skala med blockstorlek upp till 500 mm på en för var försök uppbyggd damm med höjden 5 m och längden ca 40 m. EBLs försök bedöms härigenom bättre efterlikna förhållandena för befintliga dammar än Solviks försök. Solviks försök utfördes i liten skala på i huvudsak grus och är därigenom mindre representativa för verkliga förhållanden. Släntlutningarna använda av EBL är representativa för verkliga dammar och de skaleffekter som uppträder i modellförsök undviks härigenom.

Slutrapporter från EBL-försöken finns dokumenterade i (EBL, 2005a), (EBL, 2005b) och (EBL, 2007). I (EBL, 2005a) anges att Ekvation 5 – 3 bedöms kunna användas vid dimensionering av sten och block i utströmningsområdet.

$$D_{50, \text{critical}} = 0,43 \cdot S_o^{0,43} \cdot q^{0,78} \quad \text{Ekvation 5 - 3}$$

där $D_{50, \text{critical}}$ = är blockstorleken i meter vid kollaps

S_o = släntlutningen t.ex. slänt 1V: 1,5H är $S_o = 1/1,5$

q = utströmningen i $\text{m}^3/\text{s}, \text{m}$

Ekvationen 5 – 3 rekommenderas i EBL-projektet vara tillämpbar för att bestämma kritisk dimension eller förhållandena vid kollaps.

Eftersom överströmning eller läckage är en olycksfallsbelast är lastfaktorn normalt nära noll. I detta fall rekommenderas att tillämpa en lastfaktor av ca 1,5. Detta ger en viss marginal till brott i sprängstensfyllningen (skador accepteras, men inga brott med utglidningar i slänten eller att enstaka stenar flyttas ur sitt läge så att matrixen bryts upp och stenar börjar falla ur sina positioner) och en marginal för osäkerheten i uppskattningen av flödet. Vid tillämpning av denna lastfaktor erhålls ekvationen 5 - 4

$$D_{50, \text{diml}} = 0,60 \cdot S_o^{0,43} \cdot q^{0,78} \quad \text{Ekvation 5 - 4}$$

där $D_{50, \text{dim}}$ = blockstorlek i m (lastfaktor 1,5)

S_o = nedströmssläntens lutning, t.ex. slänt 1V: 1,5H är $S_o = 1/1,5$

q = utströmningen, $\text{m}^3/\text{s}, \text{m}$

Tanken var att de försök som EBL utförde skulle utgöra grund för revidering av de norska riktlinjerna för dammsäkerhet, som ges ut av NVE. NVE Retningslinje har dock inte fullt accepterat denna ekvation, utan anger en kurva med en högre säkerhetsfaktor. NVE:s kurva visas som den svarta heldragna kurvan i Figur 5 – 1 (EBL, 2005). Figuren visar en sammanställning av erforderlig materialstorlek i förhållande till beräknat läckageflöde för de här redovisade beräkningsmodellerna.

Den minsta storleken för blocken anges här vara 1,0/0,6, dvs. 1,66 gånger större än vad som EBL-projektet anser tillräckligt. NVE föreskriver följande formel, som är samma som i Ekvation 5 - 4, men har konstanten 1,0 istället för 0,6 som i EBLs formel:

$$D_{\min} = 1,0 \cdot S^{0,43} \cdot q^{0,78} \quad \text{Ekvation 5 - 5}$$

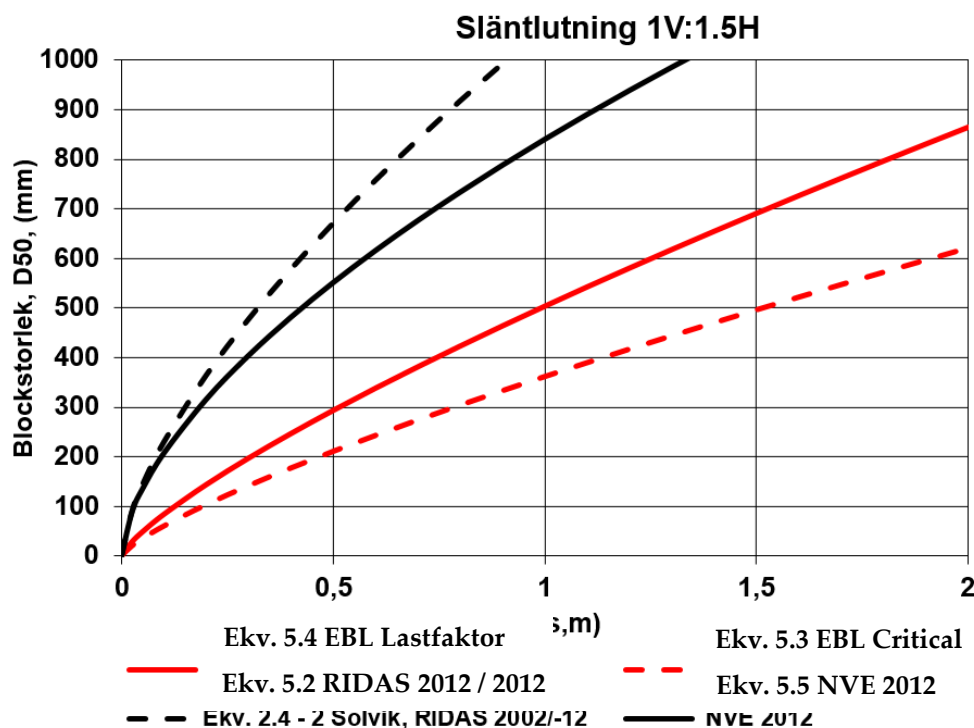
Her er

$D_{\min}$	= minimum diameter for stein [m]
S	= skråningshelning [tangens til helningsvinkelen]
q	= enhetsvannføring i [m^3/s pr. m]

Skillnaden i erforderlig dimension i förhållande till flöde är dock större än skillnaden i koefficient. Detta eftersom NVE anger att formeln ska avse minsta tillåtna blockdimension, medan EBL anger att den angivna Ekvation 5 – 4 ovan

avser D_{50} , dvs att minst hälften av blocken ska uppfylla dimensionen som beräknas i ekvationen.

Enligt NVEs utvärdering bestämmer den valda ekvationen den första lokala rörelsen av blocken vid de mest relevanta försöken i NVEs referenser, dvs. en påtagligt konservativ ansats.



Figur 5 – 1 Blockstorlek med olika dimensioneringsformler. Kurvan beskrivande formeln i RIDAS 2012 avser lutning från dammtå på 1V:1,5H.

Som förtydligande till diameter, så avser detta den näst längsta diametern för en sten, dvs, den minsta sikt som partikeln kan passera. För att förenkla proceduren vid utförande och minska osäkerhetsintervallet, bör detta kompletteras med en viktangivelse vid upphandling. Detta för att säkerställa att respektive sten har en viss minsta tyngd för att kornstrukturen i stödbanken ska vara beständig vid belastning.

5.4 DAMMBROTTSFÖRSÖK SOM UNDERLAG FÖR NY VÄGLEDNING VID DIMENSIONERING

5.4.1 Allmänt

I detta kapitel ges en kortfattad sammanställning av genomförande av och erfarenheterna från EBLs dammbrottsförsök 2002 – 2006, som ger bakgrunden till den alternativa kurvan för bestämmande av erforderlig stenstorlek i dammtån som redovisas ovan. Dessa försök ger motiv till att frånga Solviks påtagligt konservativa formel, då dessa fullskaletester kan antas på ett bättre sätt motsvara

verkliga förhållanden än de som utförts i laboratorium och legat till grund för hittillsvarande vägledning.

5.4.2 Simulering av dammhaveri genomförda av Energibedriftenes Landsforening (EBL)

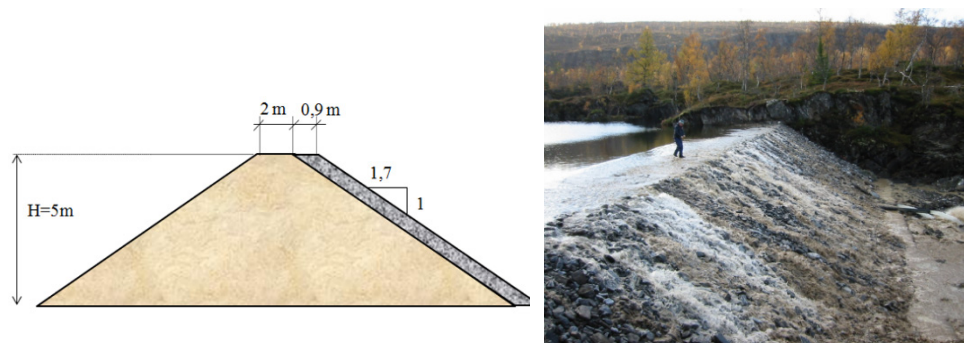
Ett flertal rapporter och uppsatser finns publicerade som beskriver de norska försöken med att demonstrera förloppet vid ett dammhaveri, orsakat av erosionsskador i nedströms dammtå, se (EBL, 2007), (Nilsson & Johansson, 2000), (Eriksson & Yang, 2004), (Rönnqvist, 2005) och (Høeg, 2004). Nedan ges en kort, sammanfattande beskrivning av genomförandet, som en orientering.

Ett flertal provningsdammar byggdes upp, se Figur 5 – 2. Stenkonstruktionerna utfördes som 5 m höga, homogena dammar av sandigt grus. Dessa försågs med en 0,5 m tjock stödbank av sprängsten på dammens nedströmssida. Dammen dämades till krönnivån, där dammen sedan belastades under ett dygn. Endast mindre urspolning erhöles under denna tid, se Figur 5 – 2 och 5 – 3.

Magasinsnivån avsänktes efter det att dammen varit dämnd upp till krönnivån. Stödet av sprängsten på nedströmsslänten togs bort inom ett parti på dammens mitt, se Figur 5 – 4. Magasinet fylldes på nytt och efter ett par timmar noterades ett källsprång ett par meter upp i slänten från nedströms dammtå i det avklädda området. Några utglidningar förekom inte under ett par timmar, under vilka dammen belastades med fullt vattentryck.



Figur 5 – 2 Ett flertal tester genomfördes med olika styckefall på sprängsten för att få fram förhållandet i EBLs ekvation.



Figur 5 – 3 Testkonstruktionen utgjordes av en 5 m hög homogen damm av sandigt grus, försedd med 0,5 m stödbank av sprängsten på dammens nedströmssida (vänster bild). Dammen dämde till krönnivån och endast mindre urspolning erhöles under ett dygn (höger bild).

Utifrån de observationer som gjordes, bedömdes det dock sannolikt att utglidningar med påföljande haveri skulle ha uppträtt, om dammen hade fått vara fortsatt belastad under en längre tid.

Dammen övertoppades dock utan att några större utglidningar uppträtt i nedströms-slänten och den gick snabbt till brott i form av bakåtgripande erosion från dammtån mot dammkrönet, orsakat av de överströmande vattenmassorna. När erosionen slutligen nådde magasinet, utvecklades förloppet snabbt mot ett dammhaveri.



Figur 5 – 4 Stödbanken borttagen på dammens mittre del (vänster bild) och efter några få timmar uppstod källsprång ett par meter upp från nedströms dammtå (höger bild).

5.4.3 Slutsatser från försöken och förslag till modifieringar av nuvarande riktlinjer

Utifrån den samlade kunskapen som redovisas från EBLs försök kan bedömningen göras att den relation mellan erforderlig stenstorlek och flöde som anges i RIDAS TV är onödigt konservativ, se Figur 5 – 1.

Det bedöms vidare rimligt att acceptera en mindre säkerhetsmarginal än den som anges i NVEs retningslinje från 2012, då dubbla säkerhetsfaktorer lagts på jämfört med EBLs formel.

Förslagsvis frångås i en reviderad utgåva av RIDAS TV nuvarande vägledning för bestämning av erforderlig stenstorlek och nya gränsvärden upprättas utgående från

slutsatserna från EBLs försök. Det kan givetvis hävdas att en starkare dammtå alltid är till gagn för dammen, men det behöver också vara en rimlig balans mellan olika åtgärder, för att erhålla en jämn nivå på dammsäkerheten över anläggningens olika ingående delar. Åtgärder måste vara dammsäkerhetsmässigt motiverade och spegla realistiska lastfall.

Det bör dock tilläggas att NVE i detta inte beaktar behovet av att säkerställa de lägsta delarna av stödbanken vid övergången till naturlig omgivande mark. Dessa behöver bedömas från fall till fall, med hänsyn till vattenflödet och fribordet, för att i ett slutstadium av förloppet mot ett dammhaveri förhindra överströmning.

Vidare behöver hänsyn tas till dalgångens geometri längs dammens grundläggningsyta och om koncentrerings av läckageflödet kan uppträda, som gör att värden angivna för tvådimensionellt fall kommer att överstigas.

6 Vägledning för specialfall för hantering av dimensionerande läckage

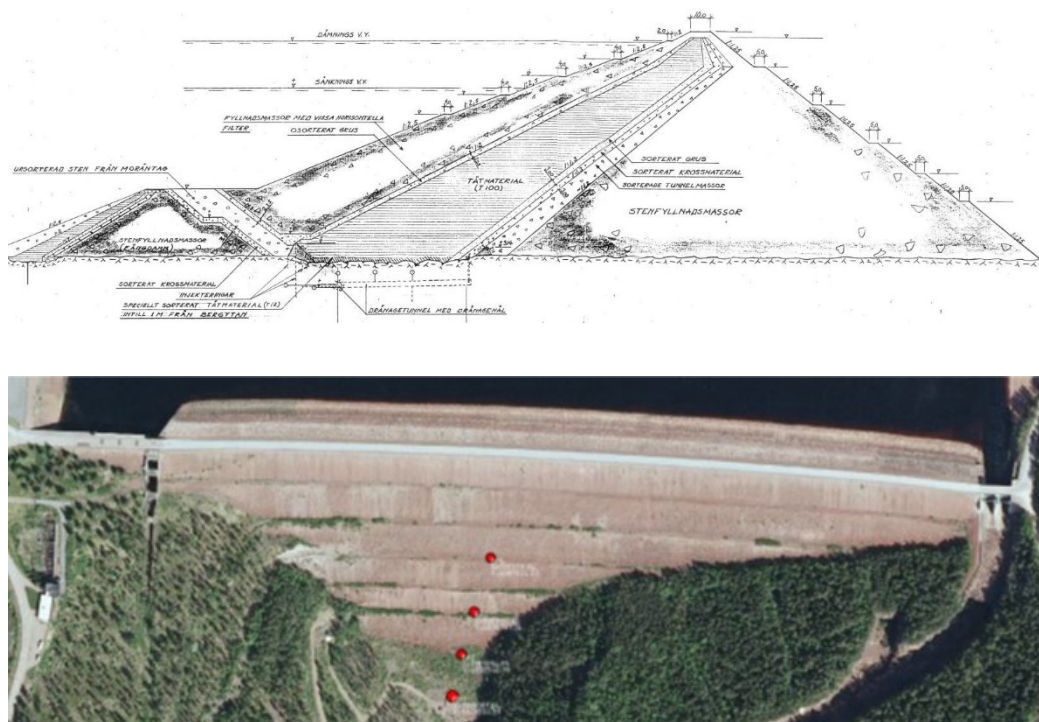
6.1 ALLMÄNT

I föreliggande kapitel redovisas specialfall där alternativa lösningar diskuteras, eller i olika sammanhang har övervägts, för att säkerställa dammens erosionsbeständighet vid Q_{dim} . Fokus har lagts på fall där den standardiserade beräkningsmetodiken i RIDAS TV inte visat sig tillämplig, eller ger orimliga beräkningsresultat. Med detta avses när resultatet kraftigt avviker från ett realistiskt lastfall pga. begräsningar i beräkningsmetoden. Förslag ges för anpassade analyser för att motivera de föreslagna förstärkningsförslagen.

6.2 HÖG STENFYLLNINGSDAMM

6.2.1 Beskrivning av anläggningen

Den aktuella dammen är belägen i en förhållandevis smal dalgång där en tydlig koncentration av ett eventuellt läckageflöde till dammtån i älvfåran i dammens högsta del kan antas uppkomma. Dammen har en tätkärna av morän som lutar åt nedströmshållet, trippla filter, samt en förhållandevis högpermeabel stödfyllning. Dammen är berggrundlagd i sin helhet.



Figur 6 – 1 Plan och tvärsektion.

Dammens höjd och utförande medför att den schablonmässiga beräkningen enligt RIDAS TV för urspolad tåtkärna ger ett ohanterligt stort läckage med risk för omfattande erosion i dammtån, utan att stabilitetsmässiga problem uppkommer, varför en anläggningsanpassad analys genomfördes.

RIDAS TV förespråkar bara den schablonmässiga beräkningsmetodiken för jordfyllningsdammar. I branschen har dock samma metod normalt använts för att på ett mycket konservativt sätt bestämma storleken på det dimensionerande läckaget per längdmeter damm. I föreliggande fall blir dock resultatet av detta en orimlig volym, pga. dammens höjd.

6.2.2 Resonemang kring dimensionerande läckage

Ett antal olika skadescenarion utreddes. De sannolikaste förloppen identifierades utifrån en översiktlig analys baserad på statistik (främst hämtas från USSD och ICOLD) för hur skador i likartade dammar historiskt uppkommit och utvecklats, med beaktande av utformningen av olika delar av fyllningsdammen och dess anslutningar. Som grund användes analyser av dammens känslighet för inre erosion med beaktande av bl.a. filterutförande, materialsammansättning, inre stabilitet, global stabilitet, erosionsförlopp mm.

Fokus lades på de förlopp som i en analys av rimliga händelsekedjor bedömdes kunna leda fram till ett dammhaveri. Syftet med studien var att beräkna det som kunde anses vara "rimligt största läckage". Detta vägdes mot hur stort läckage som med rimliga byggåtgärder kunde hanteras i dammtån.

6.2.3 Undersökta skadescenarion

Varianter på urspolning av tåtkärnan

Det traditionella utgångsläget som redovisas i RIDAS med urspolning av tåtkärnan så att både den och kringliggande filter har antagit ha samma hydrauliska konduktivitet som stödfyllningen modifierades. En rimlighetsbaserad, men ändå mycket konservativ, ansats gjordes om en rimlig felmod i form av en urspolad zon med 30 m bredd och 30 m höjd. Denna gavs en laminär konduktivitet på 0,1 - 1 m/s, respektive en turbulent konduktivitet på 0,005 - 1 m²/s². Konduktiviteten sattes utifrån storskaliga inpumpningsförsök i nedströms stödfyllning.

För att undersöka inverkan på dammen och skadeförloppets utveckling i förhållande till skadans läge, utfördes beräkningar med skadeläget i ett antal olika positioner i dammkroppen. Fokus låg på de områden där det statistiskt sett är störst skaderisk. Detta är mot vertikala betongkonstruktioner (intag/utskov) och mot kraftigt lutande grundläggningsytor eller där brytningar i topografin förekommer. Dessa beräkningar gav, relativt oberoende av läge i dammkroppen, som mest ett läckageflöde per breddmeter skadad damm på ca 1,4 m³/s, dvs. totalt ca 42 m³/s för den antagna skadezonens bredd, med viss variation för skadepunktens läge.

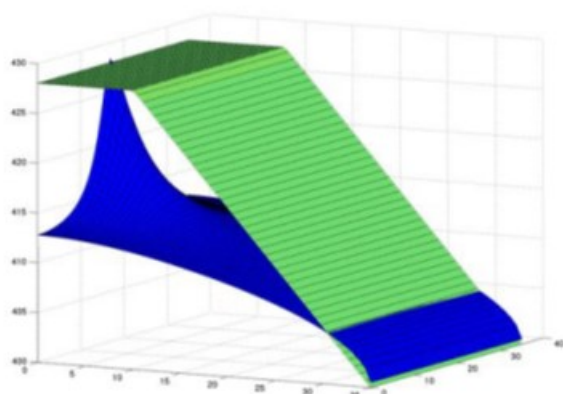
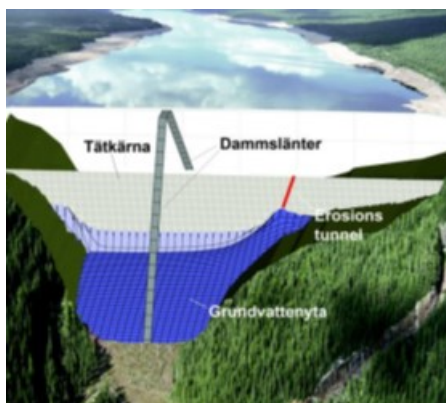
Öppen kanal genom tät kärnan

Det andra skadescenariot avser en öppen kanal genom tät kärnan, med olika dimensioner och läge beroende på förutsättningar och antaganden om tät kärnans sammansättning. Dimensionerna för denna läckagekanal bedömdes bl.a. utifrån möjligheterna till valvbildning mot grundläggningsytan och innehållet av lerpartiklar i tätjorden. Pga. osäkerheterna i beräkningen användes flera olika metoder. Anledningen till detta var att kunna bedöma källsprångets läge och hur stor avlänkning mot dalgångens mitt, av ett läckageflöde inne i stödfyllningen, kunde antas vara. Följande beräkningar genomfördes:

- Tredimensionell laminär modell som tog hänsyn till dalgångsgeometrier och placering av erosionskanalen
- Endimensionell modell med hänsyn till variation i strömningsregim
- Semi 3D-modell som beaktade 1D friktionsförluster i erosionskanalen och tredimensionella friktionsförluster i nedströmsfyllningen

Baserat på historiska skadedata och beräkningar för dammar med snarlik materialfördelning i tät kärnan, antogs att en maximal kanaldiameter på ca 2 m kunde vara ett rimligt konservativt antagande. En kanal av denna dimension bedömdes kunna stå öppen för vattenhastigheter kring 10 – 12 m/s, med kortare toppar större än detta, utan att gå till omedelbart brott och att kanalen därigenom kollapsar. En sådan kollaps medför ett fortsatt läckage då packningsgraden satts ner, följt av en successiv uppåtgående kollaps vertikalt i dammen som skapar ett sjunkhål. Detta fortsatta läckage når inte samma maximala flöde som den ursprungliga kanalen.

Den högsta konduktiviteten på 1 m/s i stödfyllningen gav ett läckageflöde kring 80 m³/s genom kanalen. Detta är inte realistiskt då strömningshastigheterna blir för stora för att kunna utvecklas. Detta då inflöde och utflöde begränsas av stödfyllningens kapacitet, samt att sådana vattenhastigheter medför en omedelbar kollaps i tät kärnan kring skadeområdet. Utifrån erosionsmotståndet i kanalen beräknades det maximala flödet till kring 40 m³/s.



Figur 6 – 2 Exempel på 3D-strömningsberäkning. Blått visar utbredning av läckageflödet i dammkroppen. Även läckage upp mot bergssidan avlämnas inne i dammkroppen ner mot dalgångens mitt.

Slutligen utfördes en 3D-beräkning med antagande av en öppen erosionskanal med

3,4 m diameter genom tätkärnan, vilket även det gav ett läckageflöde i paritet med de ovan beräknade. Detta då stödfyllningen är begränsande för kapaciteten för kanalen genom tätkärnan. Skillnaden i kanaldiameter över en viss dimension gav därför ingen avgörande skillnad i flöde.

Huvudsyftet med 3D-analysen var att bedöma om ett teoretiskt läckage kan antas länkas av inne i stödfyllning och ledas till planerad stödbank, eller om det skulle kunna mynna i dammtån uppe på dammens sidor. Beräkningen visade att läckagevatten från de undersökta skadelägena skulle transporteras inne i stödfyllningen i befintlig dammkropp och oavsett skadeläge i tätkärnan mynna koncentrerat i dammtån i dalgångens botten.

Denna beräkning beaktade av praktiska skäl dock inte skillnaderna i horisontell och vertikal konduktivitet, eller lokala avvikelser, varför det inte bedöms helt säkert att förutsätta att stödbankens övre ändar inte skulle kunna belastas i en skadesituation. Beräkningen visade dock att det finns marginaler i den föreslagna förstärkningen och att dimensioneringen inte görs på gränsen av anläggningens kapacitet.

Bedömning av resultat

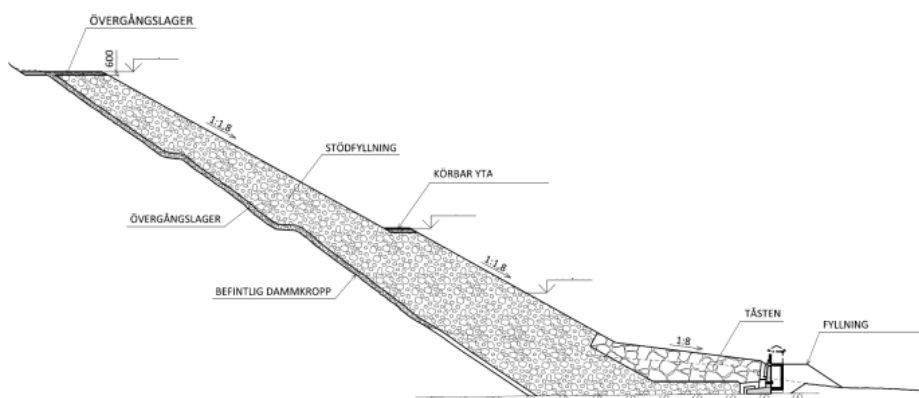
Båda beräkningsmetoderna gav efter en rimlighetsbedömning ungefär samma flöde genom dammen. Båda beräkningarna bedöms vara mycket konservativa och motsvara en mycket hög säkerhetsnivå för dammen.

Beräkningarna där skadans läge varierades visade att det mest ogynnsamma lastfallet var med skadan i den översta delen av dammen. Detta då sträckan från dammens tätning till nedströmsslänten är som minst där, vilket beror på tätningens utformning i dammen. Marginalen är som minst vid en högt belägen skada, men samtidigt visade beräkningarna att flödet oavsett läget teoretiskt avlänkas inne i stödfyllningen för att mynna i dammtån.

På grund av inbyggda osäkerheter, främst avseende förhållandet mellan vertikal och horisontell konduktivitet som uppkommer vid packning, bedömdes det önskvärt att utföra stödbanken längs hela dammtån. Dammtån gavs i förslaget till projektering dock ett enklare utförande utanför den djupa delen av dammen med en erosionsbeständighet på minst $0,75 \text{ m}^3/\text{s}, \text{m}$, baserat på antagande om radiell utströmning genom stödfyllningen från en skadepunkt i tätningen.

För dammens centrala delar förutsattes konservativt att ingen radiell fördelning uppkommer pga. den ansatta skadans bredd (urspolning) i förhållande till dalgångens bredd. Designkraven sattes därför till ca $40 \text{ m}^3/\text{s}$, med ett mål att hantera ett koncentrerat utflöde på ca $1,4 \text{ m}^3/\text{s}, \text{m}$. För en släntlutning på 1:1,8 gav detta en önskvärd materialdiameter på 1,1 m för stabiliserande tästenar.

Stödbanken planeras med avsatser för att skapa accessvägar till nya konstruktioner för luckor i dammens vänstra del, samt för att öka inspekterbarheten, se Figur 6 – 3.

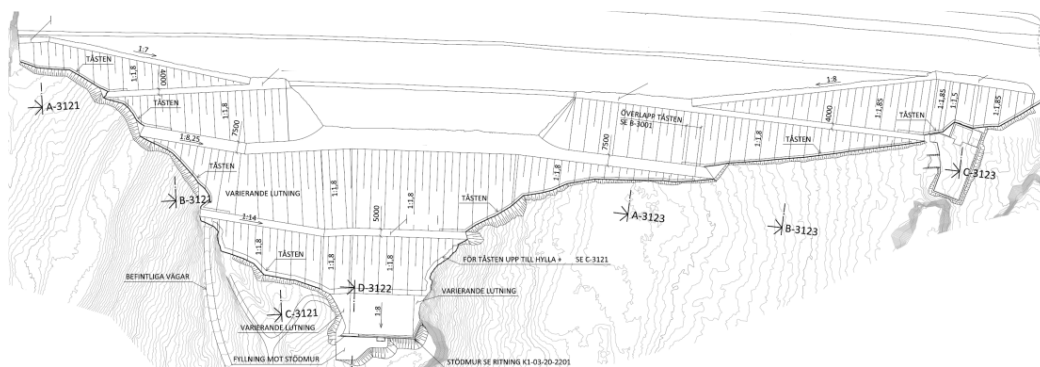


Figur 6 – 3 Typsektion för stödbank i dammens högsta del.

6.2.4 Dimensionering av stödbank

Källsprångets läge beräknades i dammens djupaste del i endimensionella beräkningar där skillnaderna i konduktivitet i olika riktningar kunde beaktas. Utifrån detta sattes stödbankens krönnivå ca 10 m högre än framräknad nivå i dammens centrala delar. Detta för att med god marginal täcka in högsta teoretiska

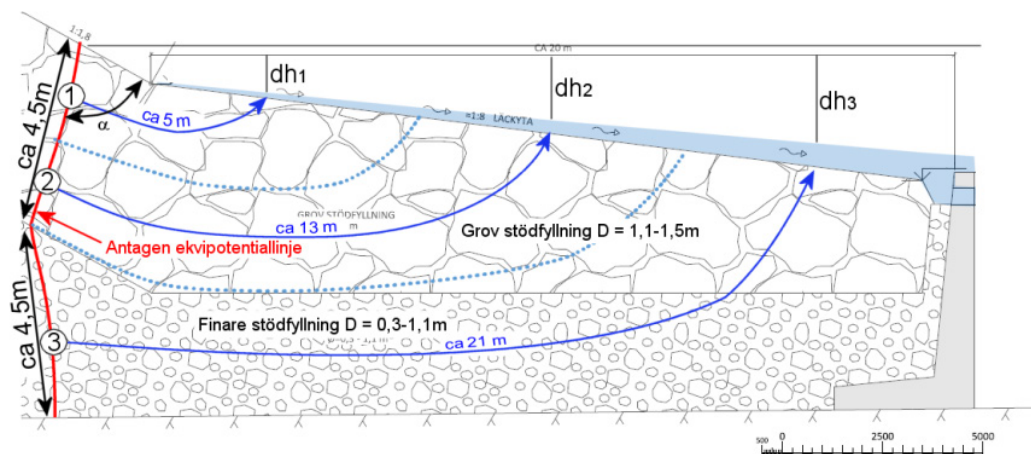
nivå för källsprånget, även med beaktande av lokala variationer i dammens sammansättnings. Stödbankens krön mot dammens anslutningar bestämdes utifrån detta att täcka in ungefär halva dammhöjden, se Figur 6 – 4.



Figur 6 – 4 Principiell utformning av stödbank. Lokal anpassning av släntlutning har gjorts invid befintliga konstruktioner.

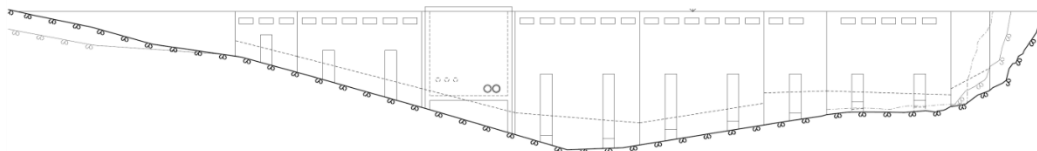
Utströmningsytan i dammtån planerades flack för att minska belastningen vid ett större läckage, se Figur 6 – 5. I denna del avses hela ytan av stödbanken ett par meter ovanför den flacka utströmningsytan (1V:8H) bli skyddad av tåsten (1,1 – 1,5 m). Med en antagen porositet ej understigande 0,3 kommer det fastställda dimensionerande flödet beräkningsmässigt att kunna avbördas genom dammtån, utan att källsprånget tvingas upp till brytpunkten där den brantare och därigenom mindre erosionsbeständiga slänten vidtar. Denna brantare slänt i 1:1,8 är teoretiskt beständig för ca 1,4 m³/s,m, vilket var kravet på dammtåns beständighet.

Den lösning som redovisas har en teoretisk dubbel kapacitet jämfört med det framräknade dimensionerande flödet. Detta bedömdes som ett rimligt förhållande eftersom schablonberäkningen i RIDAS TV frångåtts. Tåsten planeras upp till ett par meter ovan brytpunkten i släntlutning, förutom för att beakta utströmning, även för att erhålla en önskvärd marginal och skydda vid extrema nedströmsnivåer vid hög avbördning. Genom utförande av stödmuren i dammtån säkerställs att utströmningen vid en skada kommer att uppträda jämnt fördelat över en sträcka av minst 50 m, vilket gör att koncentrerad punktbelastning på dammtån kan undvikas.



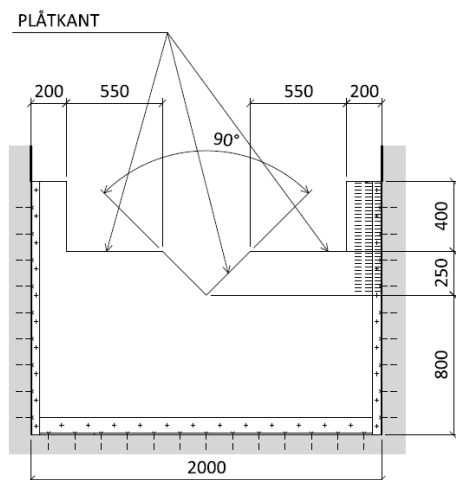
Figur 6 – 5 Utförande av utströmningsyta i dammtåns centrala delar dit ett läckageflöde teoretiskt koncentreras.

Som en del i att avlasta dammtån så långt som möjligt utförs stödmuren som håller tåbanken uppe med genomföringar i sin övre del. Syftet med dessa är att avleda eventuellt läckagevatten i stor omfattning innan murens krön överströmmas och slänten innanför belastas, se Figur 6 – 6. Detta höjer ytterligare nedströmståns kapacitet att hantera stora läckageflöden.



Figur 6 – 6 Längdsektion av stödmur i dammens fot. Genomföringar syns övers längs murkrön.

Det naturliga bakgrundsläckaget genom dammen fångas upp via en genomföring i muren och leds till ett mätöverfall. Flöde på upp till ca 0,5 m³/s kan mätas innan uppdämning bakom muren uppträder. Murens läge är fastställt utifrån ett antal faktorer som att ge tillräcklig bredd för stödbankens flacka del, undvika förhöjd sidolast från dammkroppen, samt bibehålla läckagemätningen i samma område som innan ombyggnad. Vidare gör placeringen utanför dammfyllningen att muren vid behov är tillgänglig för åtgärder, samt att en kollaps av muren inte påverkar dammens nuvarande slänt. Murens och genomföringarnas krönnivå styrs av högsta beräknade nedströmsvattenyta vid spill genom utskoven.



Mätöverfallet anpassas för att ge hög precision vid normala bakgrundsflöden. Vid höga flöden är precisionen mindre, men fullt tillräcklig. Upp till ca 43 l/s mäts i den vinklade delen, medan mätkapaciteten tillsammans med den rektangulära delen uppgår till ca 950 l/s.

Figur 6 – 7 Anpassat mätöverfall utformat med triangulär och rektangulär sektion för att möjliggöra mätning av stora läckage.

6.3 HÖG JORDFYLLNINGSDAMM

6.3.1 Beskrivning av anläggningen

Anläggningen är utförd över en nästan två kilometer bred dalgång utan distinkta slänter i anfangen. Dammens tätkärna är i sin helhet grundlagd på berg. Stödfyllningen är delvis grundlagd på naturliga marklager eller tippmassor, men dess nedströmssida är i dammens centrala, högsta, delar även den nedförd till berg.

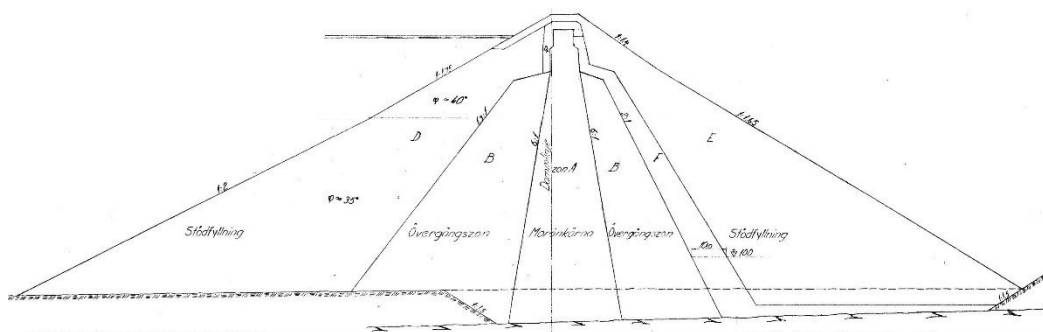
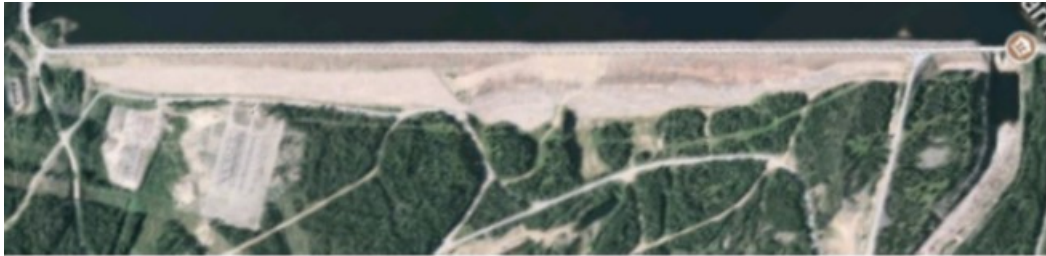
Stödfyllningens kan beskrivas som varvig då dess sammansättning varierar beroende på tillgången på material under uppförandet. Materialet i uppströms stödfyllning kan närmast beskrivas som varierande mellan sandig, grusig sten och stenig, grusig sand, även om avsnitt med stödfyllning av sprängsten förekommer, framförallt på dammens nedströmssida. En variation i sammansättningen och utförandet finns över dammens längd med flera olika typsektioner. Denna betraktelse avser en av sektionstyperna.

Upp-, och nedströms släntlutning varierar, både över tvärsektion, samt beroende på stödfyllningens sammansättning. Slänterna är brantare i dammens högre delar och är ställvis branta i relation till de friktionsvinklar som anges på ritningar från byggtiden. Plan och ursprunglig tvärsektion i dammens högsta del framgår av Figur 6 – 8.

Materialbeskrivningar från byggtiden har utvärderats som underlag för inledande beräkningar. Utifrån detta har den hydrauliska konduktiviteten i stödfyllningen i huvudsak bedömts som låg. Detta påverkar den dränerande kapaciteten, vilket medför att nedströms stödfyllning riskerar att trycksättas vid ett läckage, vilket pga. materialsammansättningen kan medföra nedsatt stabilitet.

Samtliga materialzoner bedöms sakna förmågan till långvarig valvbildning, varför en genomgående kanal genom dammen inte bedöms kunna stå öppen någon längre tid. Utifrån de begränsade vattenvolymer som därför kan transporteras

genom dammkroppen vid ett läckage, bedöms stabiliteten vara det huvudsakliga problemet och inte erosionsbeständigheten i nedströmsslänt eller dammtå.



Figur 6 – 8 Längdsektion och tvärsektion.

Baserat på detta har tre alternativ för extremt lastfall avseende läckage i dammen tagits fram (partiell urspolning av tätkärna, generellt förhöjd konduktivitet i tätkärna, samt punktläckage), för vilka en förstärkning av nedströmsslänten översiktligt projekterats.

6.3.2 Resonemang kring belastningsfall

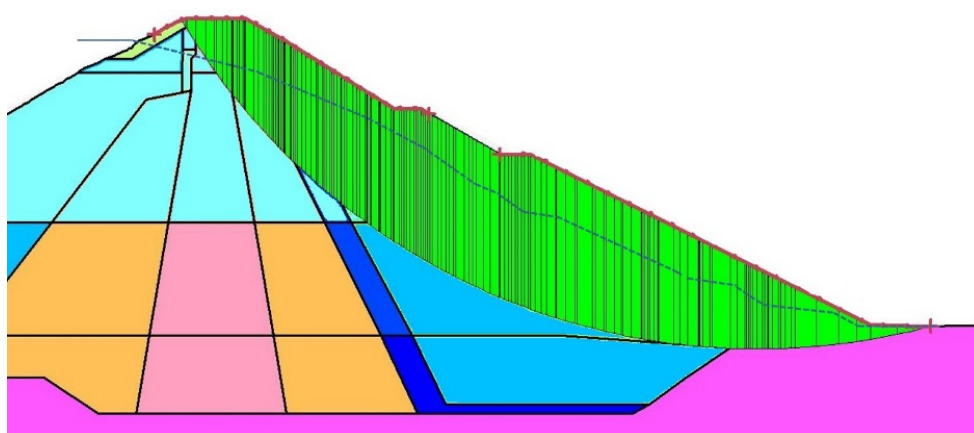
För en låg damm är det ofta inte kostnadseffektivt att finräkna en stödbank utifrån lokala förhållanden. Den schablonmässigt beräknade stödbanken utgående från fallet urspolad tätkärna är då en rimlig lösning som går snabbt att designa. De pengar som vid en optimering kan sparas på stödbanken går till viss del till en ökad projekteringskostnad, vilket tar resurser från de fysiska åtgärderna på dammen. För en hög damm blir dock med samma metod stödbanken väldigt stor.

I det aktuella fallet beror detta dels på släntlutningen och dels på fraktionen på materialet i stödfyllningen som i detta beräkningsexempel antas vara finkornigt, vilket påverkar dess inre friktionsvinkel och dess hydrauliska konduktivitet. Rent geometriskt blir säkerhetsfaktorn beräkningsmässigt låg för fallet dimensionerande läckage, speciellt om skillnaden mellan vertikal och horisontell hydraulisk konduktivitet beaktas, vilket medför att källsprånget teoretiskt uppträder högt upp i nedströmsslänten.

För att hela dammens tätning enligt lastfallet dimensionerande läckage ska erhålla samma hydrauliska konduktivitet som stödfyllningen ska en mycket stor materialtransport ha uppträtt över hela dammens höjd och längd.

Som jämförelse kan uppskattas att en urspolning av tätkärnans finmaterial över dammens hela höjd i en av dess högre sektioner, på en sträcka av omkring 50 m bredd, skulle kräva att ca 5000 - 10000 m³ finsand och silt spolats ut i stödfyllningen för att erhålla en hydraulisk konduktivitet liknande sammansättning i stödfyllningen i detta exempel. Detta är inte en realistisk utgångspunkt, även om en lokal urspolning kan uppkomma i tätkärnan.

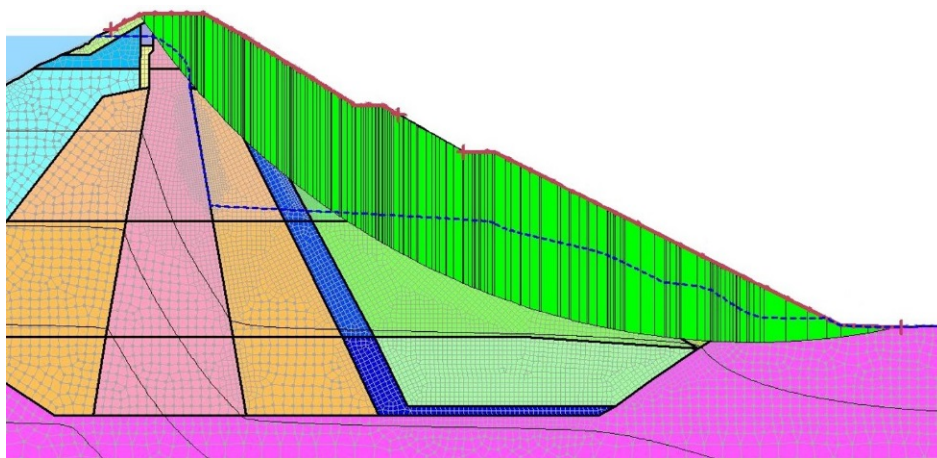
Givetvis ger den icke anläggningsanpassade lösningen en mycket hög säkerhetsnivå, men erfordrar en mycket stor stödbank, vilket innebär en obalanserad resursfördelning vad det gäller den totala dammsäkerheten för höga anläggningar.



Figur 6 – 9 Utformning av lastfall med övre delen av tätkärnan urspolad med samma hydrauliska konduktivitet som stödfyllningen, undre del av tätkärnan är intakt. Stödbanken är översiktligt framtagen. Detta alternativ medför svårigheter att utan en omfattande stödbank erhålla en tillräckligt hög säkerhetsfaktor.

Ett mer troligt skadescenario kan vara att enbart delar av dammens tätning påverkats, eller att ett punktläckage uppkommer. Utgående från dessa antaganden kan ett par speciella lastfall som är anpassade till dammens verkliga utformning ställas upp.

- Partiell urspolning av tätkärnan (dimensionerande läckage för t.ex. tätkärnans övre halva), se Figur 6 – 9. Detta är en lokalt anpassad variant av fallet dimensionerande läckage. Även detta lastfall förutsätter en stor urspolning av finmaterial från tätkärnan.
- En generell höjning av den hydrauliska konduktiviteten i tätkärnan till värden mellan den nuvarande ($K \approx 10^{-8}$ m/s) och den för stödfyllningen, vilket beräkningsmässigt antagits till kring 10^{-5} m/s, se Figur 6 – 10. Detta är ett mellanalternativ där tätkärnan förutsätts fungera som en sand, även om den inte har en förhöjd hydraulisk konduktivitet i samma omfattning som för fallet dimensionerande läckage. Även detta alternativ förutsätter att mycket stora volymer material transporterats ur tätkärnan. Båda dessa alternativ är dock betydligt mer realistiska än grundantagandet med samma hydrauliska konduktivitet i stödfyllning och tätkärna.



Figur 6 – 10 Utformning av lastfall med förhöjd hydraulisk konduktivitet i hela tät kärnan till ungefär mitt emellan den som anges för tät kärna och stödfyllning. Stödbanken är översiktlig. För detta alternativ är det stabilitetsmässigt mindre problematiskt, men kraven ökar avseende erosionsbeständigheten i nedströms dammtå.

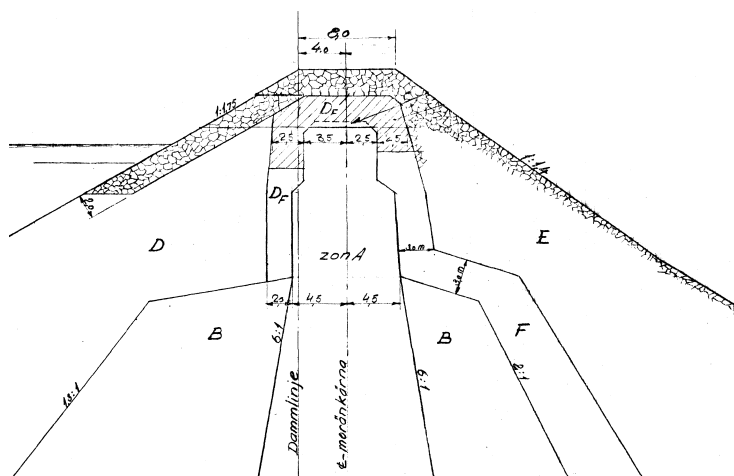
Normalt motverkas konsekvensen av dessa skadescenarion genom utförande av en traditionell stödbank av grovt material och övergångslager mot dammens nedströmsslänt och som i detta fall hade dragits ända upp till dammens krön. Stödbanken utförs av helt dränerande material som uppfyller filterkriterierna mot befintlig stödfyllning och görs tillräckligt bred för att en trycksättning av stödfyllningen fram till övergången till ny stödbank inte ska kunna medföra stabilitetsbrott.

Stödbankens två utförs med material av en dimension som är erosionsbeständig för beräknad utströmmade läckage per breddmeter, med hänsyn tagen till topografiska förhållanden som kan koncentrera utläckageområdet, samt med hänsyn tagen till en lokal punktskada eftersom flödet från denna kan antas överstiga det som stödfyllningen normalt kan transportera.

6.3.3 Anläggnings specifika specialfall

Som en del i en anläggningsanpassad analys granskades, som komplement till de två specialfallen ovan, dammens utformning för att lokalisera potentiella svaghetszoner som grund för bedömning av åtgärdsbehovet.

Som många dammar från den epok då den uppfördes är antalet filterzoner begränsade i dammens övre del, se Figur 6 – 11. I just detta fall är även slänterna brantare i tvärsnittets övre del än i övrigt. Under tät kärnans översta del skyddas den av en övergångszon B mellan tät kärna och filter. Detta bidrar till att minska sannolikheten för att en skada ska uppkomma där, samtidigt som zonernas bredd är större och släntlutningen flackare vid lägre nivåer i dammen. Den svagaste punkten bedöms mot bakgrund av detta vara dammens översta del, trots att magasinlasten där är låg.



Figur 6 – 11 Krönutformning.

Problemställningar som bör beaktas i området nära krönet kan sammanfattas enligt nedan:

- Svagheter i filterfunktion. Många äldre dammar uppfyller sällan moderna filterkrav. Vid läckage genom dammen är det inte självklart att befintligt filter kan förhindra fortgående materialtransport, dels från tätkärna och dels från filtret. Vid låg hydraulisk konduktivitet i stödfyllningen och skillnader i horisontell och vertikal konduktivitet pga. packningsutförandet, kan detta medföra ett högt beläget källsprång vid en skada.
- Brant nedströmsslänt. Vid ett läckage och en trycksättning av nedströms stödfyllning kan stabilitetsbrott uppkomma.
- Finmaterial i stödfyllningen. Stödfyllningen innehåller i beräkningsexemplet en förhållandevis stor andel material av finare fraktioner. Detta medför att fortgående bakåtskridande erosion kan uppkomma om ett läckage mynnar högt upp i slänten, samt att det kan vara svårt att uppnå önskvärd säkerhetsfaktor mot skred. Detta kan orsakas av stor skillnad i vertikal och horisontell hydraulisk konduktivitet och är relaterat till dammens geometri.

Detta ger för den aktuella anläggningen följande specialfall:

Punktläckage genom tätkärnan på en hög nivå i dammkroppen med en genomgående skada där tätkärnan är som smalast, med övriga delar av tätkärnan intakta. Denna skada avser tätkärnan på den nivå där filterbredden är inskränkt. Inbyggda svagheter finns i tätkärnan och genom valvbildning i tätkärnan är det inte orimligt att förutsätta att en genomgående kanal kan uppkomma tvärs denna. I filter och stödfyllning som består av friktionsmaterial är förmågan att valvbilda dock liten. Kortvarigt kan det trots det förutsättas att ett punktläckage ska kunna uppkomma och nedströmssläntens och stödfyllningens stabilitet och erosionsbeständighet bör dimensioneras efter denna toppnivå.

Som nämnts medför skillnaden i hydraulisk konduktivitet i horisontell och vertikal riktning sannolikt att grundvattenytan vid en skada skulle kunna mynna högt upp i slänten. Eftersom detta fall avser en punktskada och att en tredimensionell dränerande effekt uppkommer, så blir dock gradienten i stödfyllningen

beräkningsmässigt lägre än för fallen med partiellt urspolad tät kärna. Detta då dessa förutsätter en jämnt fördelad last längs dammen. Fallet med en genomgående punktskada kan även medföra att normala driftförhållanden blir dimensionerande för stabiliteten, eftersom kravet på säkerhetsfaktorn där är högre än vid extrema lastfall.

För att hårdra detta alternativ kan ett värsta tänkbart scenario målas upp att läckagevattnet transporteras mer eller mindre horisontellt ut genom dammens stödfyllning. Detta kan möjligtvis anses vara ett rimligt extremfall då packning ofta medför att den horisontella konduktiviteten blir avsevärt högre än den vertikala. En gradvis trycksättning av nedströms stödfyllning pga. läckaget kan också medföra att gradienten flyttas successivt allt längre ut i stödfyllningen innan dränagekapaciteten är tillräcklig för att sänka av denna. Detta bortser dock från den positiva tredimensionella dränerande effekten, men kan som ovan beskrivits ansättas som ett rimligt extremfall för att ge önskvärda och ändå rimliga marginaler i stödbankens utformning.

Detta alternativ ses som det mest realistiska extremfallet att säkra dammen för, även om de två tidigare beskrivna alternativen också bör beaktas genom jämförande studier.

6.3.4 Förbättrade indata

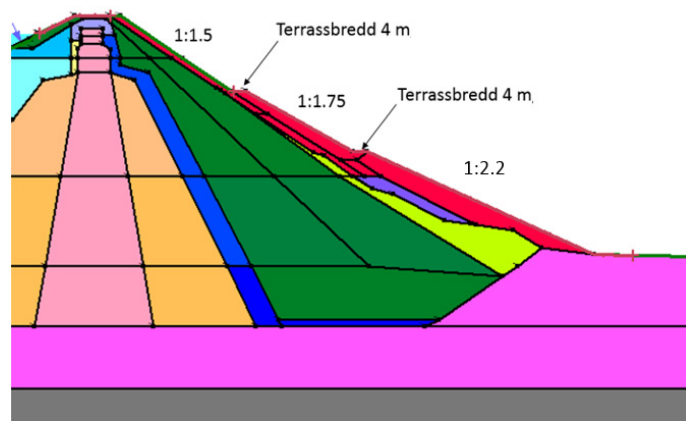
Då den inre friktionsvinkeln i stödfyllningen är avgörande för vilken volym som stödbanken behöver ha, är det av intresse att studera denna närmare. Detta speciellt som det för höga dammar rör sig om avsevärda kostnader att utföra en förstärkning. För detta fall kan t.ex. en petrografisk analys genomföras, samt bedömning av kornform och vittringsgrad av materialet ingående i stödfyllningen. Vidare kan inverkan på stödfyllningens hållfasthetsegenskaper studeras utifrån packningsgrad, porositet och bedömd enaxial tryckhållfasthet.

För att ytterligare förfinas bedömningen av den inre friktionsvinkeln kan storskalig provborrning genomföras i dammen för att ge underlag för en optimering av stödbanken. Standardiserad utrustning som klarar av att ta upp material med upp till ca 180 mm diameter vid lutande borrning finns numera kommersiellt tillgängligt. Vid vertikal borrning kan även större material tas upp.

Vanligtvis kan fraktionen 0 – 150 mm eller däromkring vara tillräcklig för att bedöma materialets hållfasthetsegenskaper, även om inte en totalsiktningsskurva erhålls. Detta ger en möjlighet att minska osäkerhetsintervallet och därigenom kunna sänka kraven i en annars påtagligt konservativ design.

6.3.5 Möjlig utformning av stödbank

För att motverka effekterna av en större läckageskada som mynnar i slänten, enligt lastfallet punktläckage som det beskrivs ovan, föreslås att en stödbank utförs över hela släntens höjd upp till dammens krön, se Figur 6 – 12. Med beaktande av antagna inre friktionsvinklar för befintlig stödfyllning, erfordras detta beräkningsexemplet även för att erhålla en tillräckligt hög säkerhetsfaktor för släntstabiliteten för att uppnå erforderliga säkerhetsmarginaler under normala driftförhållanden.



Figur 6 – 12 Typsektion för nedströms stödbank. Det bör övervägas att flacka av den övre delen av slänten för att beakta specialfallet "genomgående skada i tät kärnans övre del". Det stabiliserande behovet är mindre i de lägre delarna av dammens slänt, varför volymerna nedanför den lägre avsatsen kan optimeras ytterligare.

Syftet med stödbanken är dels att erhålla en tillfredsställande säkerhetsfaktor för det normala lastfallet. Dels att motverka yterosion vid en skada, samt dels att avleda eventuellt läckagevatten till dammens tå på ett kontrollerat sätt genom att stödbanken görs tillräckligt grov för att läckagevattnet ska kunna avledas inne i denna och på så sätt förbättra stabiliteten. För att på ett fullgott sätt beakta lastfallet 'genomgående punktläckage' bör den översta delen av slänten i exemplet göras flackare.

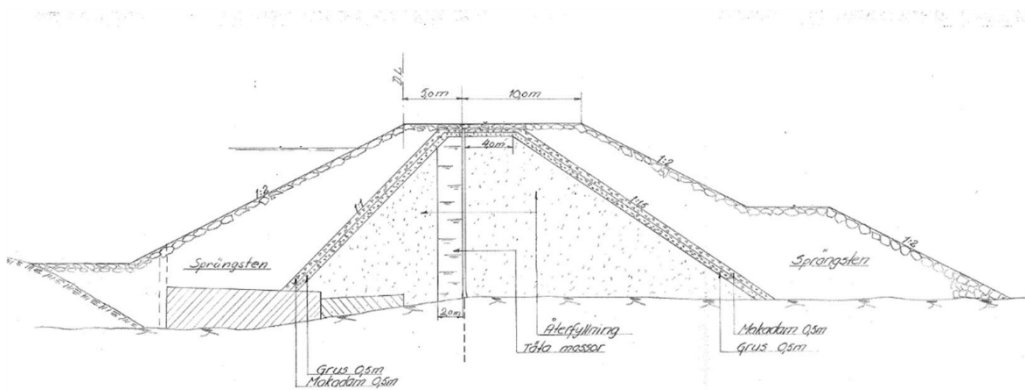
Detta görs dels för att förbättra stabiliteten och dels för att detta område ska skyddas mot skador i den svagaste zonen av dammen, där övergångslager saknas.

I figuren har ett antal terrasser lagts in på olika nivåer i stödbanken. Detta är för att behovet av material minskar på höjden och för att skapa en möjlighet till åtkomst på flera nivåer i dammslätten med entreprenadfordon, vilket är gynnsamt för en damm av denna storlek.

6.4 Fyllningsdamm med tatkärna av betong

6.4.1 Utformning

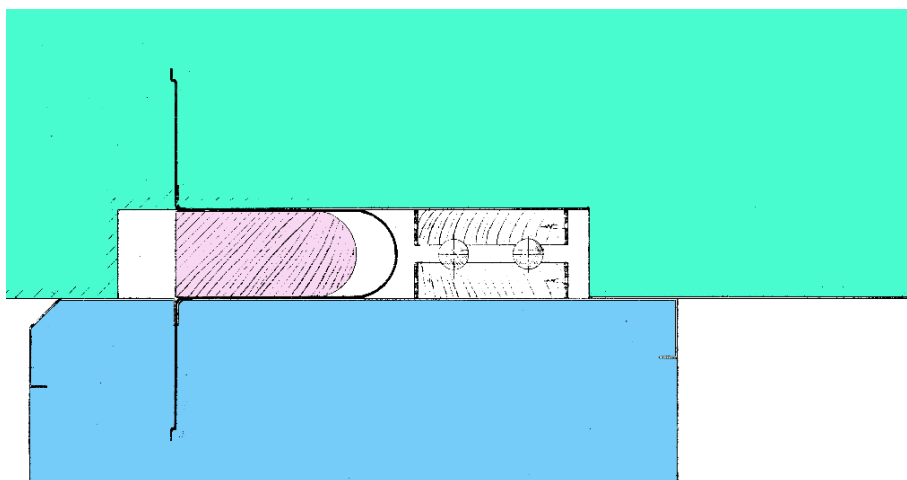
Under en period i svensk dammbyggnadskonst utfördes fyllningsdammar i vissa fall med en central, vertikal betongskärm som huvudsaklig tätning, mestadels under 1940- och 1950-talen. Detta berodde delvis på en osäkerhet om de moräner som användes som tätning var tillräckliga. För vissa dammar valdes därför att montera en betongskärm, som på framförallt uppströmssidan, men ibland även på nedströmssidan, omgärdades av finkornig morän eller lerjord. En typisk variant ses i Figur 6 – 13.



Figur 6 – 13 Tvärsnitt av fyllningsdamm med tätkärna av betong.

Betongskärmen grundlades vanligtvis på rensat berg på en gjuten plint, och anslöts vertikalt ledat till angränsade betongkonstruktioner med dubbelvikta bleck som i sina ändar göts in i betongskärmen och anslutande betongpelare. Blecken var avsedda att fungera som en fritt rörlig anslutning, där bleckets utvikta längd anger deformationsmånen med bibehållen tätningsförmåga i kontakten med betongkonstruktionerna.

Betongskärmen avslutades i de flesta fall strax ovanför dämningsskärmen, tillsammans med anslutningsblecken. Krönen utfördes dock nästan uteslutande med normal överhöjning för en fyllningsdamm, vilket medförde att bleckens överyta begravnades. I många fall göts dessutom bleckens överyta över, vilket omöjliggjorde inspektion av anslutningen. Under senare tid har flera av dessa anslutningar borrats fram i ett antal dammar för att kunna övervaka deformationerna i övergångszonen. Vanligtvis har deformationerna varit små, men det finns exempel på dammar där hela bleckets rörelsemån tagits i anspråk pga. rörelser i betongskärmen.



Figur 6 - 14 Plan visande rörelsebleck i anslutning mellan betongpelare (grön) och betongskärm (blå). I det bågformade blecket syns en träplugg format efter blecket. Nedströms blecket till höger i bild, i strömningsriktningen, syns vertikala stående plankor med mellanliggande stavar som extra tätning. Dessa stavar består ibland av trä och ibland av asfalt eller gummi. Material som sväller i kontakt med vatten eftersträfvades normalt i designen.

Principiellt utförande framgår av Figur 6 – 14. Blecket är ingjutet i betongskärm och sidopelare. Blecket är vikt i en båge för att underlätta rörelse utan att blecket skjuvas av. Utrymmet i det dubbelvikta blecket fylldes ofta med trä, med tanken att detta skulle svälla vid kontakt med vatten och täta fogen. Andra lösningar med asfaltstavar förekommer också.

I Figur 6 – 15 visas ett framborrat bleck där rörelsemånen i princip är helt utnyttjat och blecket är utsträckt längs betongpelarens sida.



Figur 6 – 15 Plan över framborrat bleck i anslutning. Borrning har utförts i betongskärm. Sidopelaren syns till höger i bild. Blecket är i princip helt utnyttjat och utsträckt. Anslutningspunkten där blecket är ingjutet i sidopelarens syns till höger. Magasinets vattenyta syns mot blecket nederst i bild.

6.4.2 Svaghetspunkter och åtgärder

Den svagaste punkten i konstruktionen är i anslutningen mellan betongkonstruktion och sidopelare, där deformationer uppkommer, orsakade av den naturliga förskjutningen av fyllningsdammen i nedströms riktning under belastning från magasinet.

Möjligt läckage i den vertikala fogen beror på bredden av denna och påverkas av den fyllning som ligger mot anslutningen på upp-, och nedströmssidan. För att beräkna möjligt läckage bör en strömningsberäkning genomföras där konstruktionens utformning i anslutningen betraktas. Dvs. en analys görs av hur stor öppning som kan uppkomma genom en förskjutning av betongskärmen i nedströms riktning, eller utifrån vilken rörelsemarginal som finns parallellt dammlinjen.

Som en grov utgångspunkt kan antas att en fog med ca 10 mm bredd över en höjd av ca 10 m kan antas ge ett flöde av minst 200 l/s. Detta förutsätter att eventuell tätjord på uppströmssidan av fogen eroderats bort. Detta bör betraktas som ett punktläckage och de topografiska förhållandena i grundläggningen studeras för att försöka avgöra var läckaget kan antas mynna i dammtån. Det är lämpligt att

utföra en lokal förstärkning så att nedströms dammtå och slänt är stabil för de flöden som är aktuella för den fog som betraktas.

Andra punkter i konstruktionen som ägnats speciell vikt vid uppförandet är betongskärmens fog mot grundläggningen. För att undvika risk för upphängning med påföljande nedkrossning mot skärmens fundament var det vanligt att asfaltsbetryka betongskärmens sidor innan kringfyllning utfördes. Generellt bedöms risken för detta fenomen som liten. Större krav ställs istället på utförandet av anslutningen till berget och tätningen av detta, eftersom designen med en smal tätning medför att en hög gradient ska tas ut över en kort sträcka under skärmen.

I vissa fall har betongskärmen grundlagts på en horisontell platta för att förlänga läckvägen, vilket är vanligt för CFRD (Concrete Face Rockfill Dam). Främst bedöms skador på injekteringsskärm kunna uppkomma genom gradvis urlakning. Urspolning av slag kan även förekomma. Bristande utförande av grundläggningen kan medföra ytlig strömning genom sprickigt berg, vilket dock sällan kan antas medföra risk för omfattande urspolning av nedströms stödfyllning. För att risk för dammens fortbestånd ska uppkomma måste nedströms stödfyllning i princip skadas i sådan omfattning av stödet för betongskärmen försvinner och den knäcks, med påföljande förlust av magasinet.

För högkonsekvensdammar är det dock rimligt att båda dessa felmoder övervakas. Detta kan göras genom att placera vattenståndsrör eller tryckgivare omedelbart nedströms om den vertikala fogen. En liknande lösning kan göras för bergets övre del nedströms betongskärmens grundläggning, där det övervakas om stigande portryck förekommer nedströms skärmen.

För komplicerade fall där motdämning eller andra fenomen som försvårar mätning förekommer, kan temperaturmätning i vattenståndsrör vara en metod att detektera förändringar. Enklast och med tydligast utslag om en skada uppkommer är att förse dammen med mätning av uppsamlat läckage nedströms dammen, om detta är möjligt. Instrumentering ska dock främst ses som en metod att övervaka förändringar och kunna planera för eventuella åtgärder, inte som en designlösning.

Lämpligast är att redan från början dimensionera nedströmsslänt och dammtå för att vara erosionsbeständig och stabil mot skred för de läckageflöden och portryck som kan uppkomma i nedströms stödfyllning pga. en skada i betongskärmens anslutningar mot sidokonstruktioner och undergrund.

Även den vertikala fogen bör övervakas direkt och inte bara indirekt genom mätning av portryck nedströms denna. För högkonsekvensdammar är det lämpligt att täckta bleck tas fram och görs mätbara, t.ex. med dubbar för deformationsmätning på respektive sida om fogen. Detta är ofta ett omfattande arbete som kräver en planerad avschaktning av krönet i anslutningspunkten.

6.4.3 Speciella varianter

Även andra varianter av utförande förekommer, med t.ex. uppströms lutande betongskärm, mer likt betongdäcksdammar (CFRD). En skada i betongdäcket kan medföra en successiv urspolning av nedströms stödfyllning som leder en knäckning av betongskärmen. För moderna CFRD är risken för detta liten, då materialet i stödfyllningen är zonerat och utgörs av gradvis större material åt nedströmshållet. Det finkornigare materialet längst uppströms mot betongskärmen begränsar det maximala genomflödet och dammtån förses normalt med block av en sådan dimension att den är beständig för de teoretiskt största läckageflödena.

För äldre dammar med uppströms betongdäck föreligger dock en viss risk för urspolning. Detta då dessa ofta saknar den moderna zoneringen och istället kan ha en mer homogen stödfyllning som kan vara betydligt mer känslig för fortgående erosion.

En annan inte helt ovanlig variant i äldre svenska dammar är tätsponter av trä. Dessa kan ofta även efter lång tid vara intakta om de konstant befunnit sig under grundvattenytan. Träsponten som tidvis befinner sig över grundvattenytan tenderar ofta att ruttna bort.

I vissa fall kan dessa träsponten utgöra den huvudsakliga hydrauliska barriären, men förekommer oftast i kombination med tätkärna av morän. Då träspontens kondition ofta är komplicerad att bedöma kan det ofta vara lämpligt att bortse från denna vid beräkningen av dimensionerande läckage. Detta såvida inte det uttryckligen går att vidimera att den är vid god funktion. I så fall kan det vara aktuellt att betrakta denna på liknande sätt som betongsponten, där den huvudsakliga läckagevägen bedöms vara genom fogar.

7 Slutsatser och diskussion

7.1 ALLMÄNT

I föreliggande rapport ges, utgående från felmodsanalys, förslag till anpassning av förstärkningsåtgärder för att säkra fyllningsdammar mot större läckage, utifrån lokala förutsättningar. Tanken är att projektören med stöd av denna rapport ska kunna gå ifrån det generella förfarandet i RIDAS TV och istället göra en individuell bedömning av dammens behov.

7.2 SLUTSATSER

Allmänt noteras att förstärkningar med stödbankar i nedströms dammtå och nedströmsslänt avser att stabilisera dammen mot felmoden inre erosion i ett senare utvecklingsskede, d.v.s. när felmoden har initierats och utvecklas till ett större läckage genom dammen.

Stödbankar ska därför betraktas som en förstärkningsåtgärd som ger tid för att sätta in motåtgärder eller naturlig självläkning i dammen. Motåtgärder kan exempelvis vara att utföra åtgärder för att motverka den initierande orsaken till läckaget och/eller att minska läckageflödet t.ex. genom att sänka av magasinsnivån eller få till en tätning på uppströmssidan.

7.3 REKOMMENDATIONER

Förslagen som ges i denna rapport beaktar dammens lokala förhållanden på ett tydligare sätt än vad som beskrivs i RIDAS TV.

För jordfyllningsdammar och för låga stenfyllningsdammar kan nuvarande RIDAS TV ofta ge i en kostnadseffektiv, rimlig och säker design av en nedströms förstärkning med stödbank. Någon form av felmodsanalys rekommenderas dock för att i största möjliga mån säkerställa att den schablonmässiga stödbanken har avsedd verkan och täcker de avsnitt av dammen där sannolikheten för en skada är som störst.

För stora eller höga fyllningsdammar, såväl jordfyllnings- som stenfyllningsdammar, kan den schablonmässiga angreppsmetoden med urspolning av tätjord i RIDAS TV ge orimliga resultat som beräkningsmässigt divergerar från realistiska lastfall. För dessa dammar, samt fyllningsdammar tillhörande dammsäkerhetsklass A eller B, rekommenderas analys av dammens individuella förutsättningar och vilket dimensionerande läckage detta ger, samt i vilket läge i tvärsnittet den högsta belastningen beräknas uppkomma.

För att ta fram förutsättningarna för bedömning av dimensionerande läckage i fyllningsdammar rekommenderas analys av felmoden inre erosion. Denna analys avser att ge svar på frågan om sannolikheten för att inre erosion skall uppträda, samt var och hur denna främst kan antas initieras i dammen. Felmodsanalysen kan vara förenklad eller mycket omfattande, beroende på dammens komplexitet och

utformning. Denna rapport har hänvisat till flera olika dokument som beskriver ett lämpligt upplägg för analys av felmoden inre erosion.

Centralt i denna rapport är även att gränsvärdena för erosionsbeständighet för bestämning av erforderlig stenstorlek i dammtån föreslås justeras utifrån de praktiska försök som genomförts i Norge av EBL. Detta innebär ett mindre konservativt resonemang än dagens laboratoriebaserade formel för erforderlig materialstorlek och en tydligare anpassning till verkliga förhållanden.

En annan faktor som bör noteras är den farligaste glidytans läge vid det extrema lastfallet. Frånsett risken för progressiva skred, är ytliga glidytor normalt inte styrande för dammens dämmande förmåga. Huvudspåret bör vara en $SF > 1,1$ för glidytor som lämnar minst 1/3 av dammkrönet, eller minst 3 m kvarstående bredd. Denna bredd är rimlig för att på ett effektivt sätt kunna åtgärda en skada, utan att vara helt avskuren från åtkomst över skadeområdet.

Detta betraktelsesätt för glidytans läge förutsätter dock att indata till beräkningsmodellen är väl undersökt och definierad. Om materialparametrarna inte är det, kan en första ansats vara att anta konservativa värden utifrån facklitteratur och dammfyllningsmaterialens jordartklassificering (kornstorleksfördelning). I detta kan också krav på en högre säkerhetsfaktor vara en tänkbar slutsats, i det fall att kunskapen om dammens utformning och ingående materialparametrar är begränsad.

En probabilistisk stabilitetsutredning kan också vara lämplig för att studera dammens säkerhet avseende stabiliteten.

Om en säkerhetsfaktor överskridande 1,1 är uppnådd för djupa glidytor, kan säkerheten beräknad för ytligare glidytor och normala belastningar, dvs utan påverkan av porttryck, oftast accepteras ha en något lägre beräknad säkerhetsfaktor. Detta är rimligt då de inre friktionsvinklar som normalt tillämpas avser en högre normalspänning än vad som förekommer ytligt i närheten av dammens slänter. Vid låga överlagringstryck blir friktionsvinkeln för ett friktionsmaterial markant högre än de generella värden som anges i referenslitteratur. Att tillämpa samma säkerhetsfaktor för ytliga glidytor utan att beakta den ytligt högre inre friktionsvinkeln blir då onödigt konservativt. I läget för glidytan bör slutligen geometrin eller zoneringsen av dammen beaktas. Om en glidytas som lämnar 1/3 av krönet intakt samtidigt påtagligt påverkar den dämmande förmågan, så är detta givetvis inte acceptabelt.

I rapporten ges vidare ett antal parametrar som bör beaktas vid dimensionering av förstärkningsåtgärden, parametrar som påverkar dammens dämmande förmåga eller funktion under ett extremt lastfall. Dessa parametrar är avsedda att användas för att modifiera utformningen av förstärkningsåtgärden i det att den bör vara större eller om en mindre åtgärd kan vara tillräcklig.

Instrumenteringens omfattning vid en dammanläggning och visuell övervakning har inte diskuterats i detalj i denna rapport. Denna bör vara fastställda i relation till anläggningens specifika övervakningsbehov. Instrumenteringen utreds lämpligheten i en anläggningsspecifik felmodsanalys, och har på så sätt en koppling till eventuella åtgärder för att förbättra erosionsbeständigheten. För vissa anläggningar av lägre

dammsäkerhetsklass kan en väl genomtänkt övervakning kompensera för en åtgärd, medan det för andra anläggningar kan krävas både en fysisk åtgärd, en förbättrad instrumentering och utökad tillsyn.

7.4 UTVECKLINGSBEHOV

Nedan listas ett antal potentiella områden för fortsatt utvecklingsarbete inom ämnesområdet. Dessa har identifierats i föreliggande rapport som ämnen där en fördjupad kunskap bedöms kunna bidra till ytterligare utveckling av RIDAS TV.

- Att utveckla en metodik och bestämma gränsvärden för probabilistisk säkerhetsfaktor är intressant för att möjliggöra att denna arbetsmetod introduceras i Sverige, även avseende fyllningsdammar.
- För att den probabilistiska metoden skall komma till sin rätt är det i vissa fall erforderligt med ett förbättrat underlag jämfört med idag. I Sverige används vanligtvis schablonvärden för materialparametrar för t.ex. stödfyllning. Internationellt är det vanligt att materialparametrar avseende stödfyllningens hållfasthet bestäms med en större noggrannhet än de förhållandevis vida spann som finns i SGIs referensvärden. Det är relevant att det befintliga underlaget förbättras med verkliga data för de konstruktionsmaterial som vanligtvis ingår i svenska stödfyllningar. För detta kan t.ex. skjuvtester genomföras för olika sammansättningar av stödfyllning. Detta kan ge tydligare vägledning än idag, om materialreferenser finns som möjliggör en erfarenhetsbaserad avstämning mot t.ex. Leps forskning om inre friktionsvinkel för sand, grus och sten. Detta kan även bidra med referensvärden för hållfasthet och beständighet för material ingående i erosionsskydd.
- Forskning på piping i svenska moräner och hur moränmaterialet beter sig mot olika typer av undergrunder. Det finns en hel del arbete utfört runt om i världen inom detta område. Detta avser dock nästan uteslutande leriga och siltiga jordar, som inte är representativa för de bredgraderade moräner som vanligtvis använts i Sverige vid dammbyggnad. Detta är intressant för uppkomsten och tidsaspekten av inre erosion, piping, sjunkhål samt filtrens sammansättning och funktion.

8 Referenser

- ASDSO [2016] Technical Workshop on Definition and Evaluation of Internal Erosion Potential Failure Modes.
- Corps of Engineers, URS and UNSW [2008] A Unified Method for Estimating Probabilities of Failure of Embankment Dams by Internal Erosion and piping, Guidance Document, Version 2.
- EBL [2005a] Stability and breaching of embankment dams. Report on Sub-project 2. Stability of downstream shell and dam toe during large through-flow. Publication nr: 186-2005, EBL Kompetense AS.
- EBL [2005b] Stability and breaching of embankment dams, Report on Sub-project 2, Stability of downstream shell and dam toe during large through-flow, Publication nr 186-2005 – Appendixes, EBL Kompetense AS.
- EBL [2007] Stability and breaching of embankment dams, Report on Sub-project 3 (SP3): Breaching of embankment dams, Publication nr: 231-2007, EBL Kompetense AS.
- Ekström, Nilsson & Wilén [2016] "Reparationsmetoder för fyllningsdammar, Sammanställning av erfarenheter av relevans för svenska förhållanden, Energiforsk Rapport 2016:333.
- Eriksson & Yang [2004] Dammsäkerhet – Dam-Breach Project in Norway, CFD Evaluation of Test Results, ELFORSK Rapport 05:02.
- Fell, MacGregor, Stapledon, Bell & Foster [2015] "Geotechnical Engineering of Dams", 2nd Edition.
- Fell, Wan, Cyganiewicz & Foster [2003] Time for Development of Internal Erosion and Piping in Embankment Dams, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, p 307 – 314, April 2003.
- FEMA [2011] Filters for Embankment Dams Best Practices for Design and Construction.
- FEMA [2015] Evaluation and Monitoring of Seepage and Internal Erosion, Interagency Committee on Dam Safety (ICODS), P-1032.
- Foster [2007] Application of no, excessive and continuing erosion criteria to existing dams, Internal erosion in dams and their foundations.
- Foster & Fell [1998] Filter Testing for Dams - No Erosion and continuing Erosion Boundaries, University of New South Wales, Australia.
- Foster & Fell [2001] Assessing Embankment Dam Filters That Do Not Satisfy Design Criteria, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, p 398 – 407, May.
- Foster, Fell & Spannagle [1998] Analysis of Embankment Dam Incidents, UNSW report R-374.

- Foster, Fell & Spannagle [2000] A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping, *Canadian Geotechnical Journal* 37:1025–1061, 2000.
- Foster, Fell and Spannagle [2000] "The Statistics of Embankment Dam Failures and Accidents", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37 No 5, National Research Council Canada, Ottawa, 1000 – 1024, ISSN: 0008-3674.
- Griffiths & Fenton [2004] Probabilistic Slope Stability Analysis by Finite Elements, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, p 507 – 518, May 2004.
- Hart, Freeman, Lowe, Pabst & Proctor [2018] Considerations for Embankment Dam Toe Drain Design: An Inspection and Maintenance Perspective, ASDSO, 2018.
- Høeg, Løvøll & Vaskinn [2004] Stability and Breaching of Embankment Dams; field tests on 6 m high dams, *Hydropower and Dams*, issue 1, 2004.
- ICOLD [1995] Dam Failures Statistical Analysis, Bulletin 99.
- ICOLD [2015, 2017] Internal Erosion of Existing Dams, Levees and Dikes, and their Foundations, Bulletin 164 part 1 and 2 (preprint).
- Kenney & Lau [1985] Internal stability of granular filters, *Canadian Geotechnical Journal*. 22, pp. 215-225, 1985.
- Kenney & Lau [1986] Internal stability of granular filters - reply, *Canadian Geotechnical Journal*. 22, pp. 215-225, 1986.
- Kezdi [1979] Soil physics – selected topics, Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 160 pp.
- Li & Fannin [2008] Comparison of two criteria for internal stability of granular soil, *Canadian Geotech. J.* Vol. 45, pp. 1303-1309, 2008.
- Nilsson, Ekström & Söder [1999] "Inre erosion i svenska dammar, Beskrivning och utvärdering av rapporterade sjunkgropar", *Elforsk rapport 1999:34*.
- Nilsson & Johansson [2000] Dammsäkerhet – Brottförlopp vid genomströmning av en fyllningsdamm, *Elforsks rapport 00:10*.
- Nilsson & Rönnqvist [2004] Measures to strengthening Embankment Dams in order to stop or control a possible through-flow process, *International Seminar, Stability and Breaching of Embankment Dams*, Oslo, Norway, 21 - 22 October 2004.
- NVE [2006] Små dammer, Veiledning för planering, byggande og vedlikehold, Grethe Holm Midttømme (red), NVE 2.
- NVE [2007] Retningslinjer for fyllningsdammer till § 4-7 og §§ 5-2 og 5-3 i forskrift om sikkerhet og tilsyn med vassdragsanlegg, NVE, Utgave 1 - mars 2007.
- NVE [2012] Veileder for fyllningsdammer til § 5-10 og § 6-1 i forskrift om sikkerhet ved vassdragsanlegg.

- Pabst, Robbins, Engemoen, Hanneman, Redlinger & Scott [2013] Heave, Uplift and Piping at the Toe of Embankment Dams – A New Perspective, Journal of Dam Safety.
- RIDAS [2012] Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerheten och Avsnitt 7.2 Fyllningsdammar "Tillämpningsvägledning för fyllningsdammar", daterad 2011-12-15.
- RIDAS [2016] Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet, Kap 1 – 3.
- Rönnqvist [2005] Dammsäkerhet – Dam-Break Project in Norway, Slope Stability Analysis on Rockfill and Gravel Test dams in correlation with the test results, ELFORSK Rapport 05:13.
- Rönnqvist [2010] "Prediction surfacing internal erosion in moraine core dams", KTH TRITA-LWR Licentiate degree thesis, Hans Rönnqvist, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Rönnqvist, Fannin & Viklander [2014] "On the use of empirical methods for assessment of filters in embankment dams", Geotechnical Letters 4, p. 272-282.
- Sherard, Dunnigan & Talbot [1984a] Basic Properties of Sand and Gravel Filters, Journal of Geotechnical Engineering 110, no. 6: 684-700. June 1984.
- Sherard, Dunnigan & Talbot [1984b] Filters for Silts and Clays, Journal of Geotechnical Engineering 110, no. 6: 701-718. June 1984.
- Sherard & Dunnigan [1985] Filters and Leakage Control in Embankment Dams, Seepage and Leakage from Dams and Impoundments, ASCE Symposium, Denver, CO. May 1985.
- Sherard & Dunnigan [1989] Critical Filters for Impervious Soils, Journal of the Geotechnical Engineering Division 115, no. 7: 927-947. July 1989.
- UNSW [2008] Risk Analysis for Dam Safety. A Unified Method for Estimating Probabilities of Failure of Embankment Dams by Internal Erosion and Piping, Guidance Document, Version: Delta, Issue 2 August 2008 Reclamation Document: Risk Analysis Methodology – Appendix E Corps of Engineers Document: UFC URS Document: 22238839 UNSW Document: UNICIV R 446.
- USACE [1999] Probabilistic Analysis Geotechnical Engineering", USACE, ETL 1110-2-556.
- USACE [2003] Slope Stability", EM-1110-2-1902.
- USACE [2004] General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams, EM 1110-2-2300.
- USBR [2011] Reclamation Design Standards No. 13 – Embankment Dams.
- USBR [2015a] Dam Safety Risk Analysis Best Practices Training Manual, Chapter IV-3: Embankment Slope Stability.
- USBR [2015b] Dam Safety Risk Analysis Best Practices Training Manual, Chapter IV-4: Internal Erosion Risks for Embankments and Foundations.

- Wan & Fell [2007] Investigation of Internal Erosion by the Process of Suffusion in Embankment Dams and their Foundations, European Club on internal erosion in embankment dams, Aix les Bains.
- Westberg Wilde [2010] Reliability-based Assessment of Concrete Dam Stability, Dr. Thesis, Lunds Universitet.
- Westberg Wilde & Johansson) [2016] Sannolikhetsbaserad bedömning av betongdammars stabilitet, Energiforsk Rapport 2016:291.
- Xu, Yang, Zhang & Yang [2017] Reliability analysis for slope stability of embankment dam. 85th Annual Meeting of International Commission on Large Dams. Prag, Tjeckien.

DIMENSIONERANDE LÄCKAGE FÖR FYLLNINGSDAMMAR

Fyllningsdammar, som kan medföra allvarliga konsekvenser vid ett haveri, har enligt standardiserad praxis en stödbank nedströms som stabiliserar dammen och som ökar erosionsmotståndet om det sker ett större läckage.

Den här rapporten ger stöd i designprocessen, framför allt för höga dammar och dammar med stenfyllning. Resultaten underlättar för projektörer att ta hänsyn till lokala förhållanden och faktorer som påverkar läckagets läge och storlek.

Tidigare har det bara funnits begränsad vägledning för hur stödbanken ska utformas och det har därför funnits ett behov av att hitta utföranden som är mer anpassade efter olika anläggningar.

Ett nytt steg i energiforskningen

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



Energiforsk