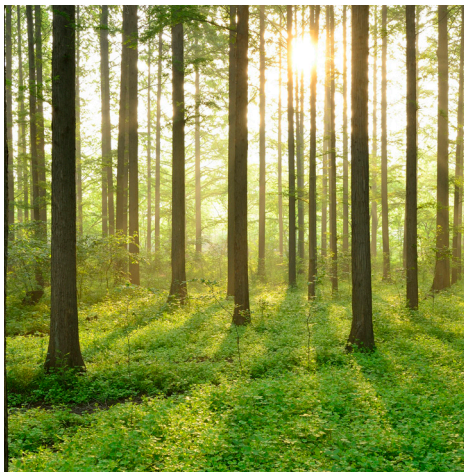


# SANNOLIKHETSBASERAD BEDÖMNING AV BETONGDAMMARS STABILITET

RAPPORT 2016:291





# Sannolikhetsbaserad bedömning av betongdammars stabilitet

Bakgrundsbeskrivning till framtagande av  
”Probabilistic model code for concrete dams”

MARIE WESTBERG WILDE

&

FREDRIK JOHANSSON

ISBN 978-91-7673-291-5 | © 2016 ENERGIFORSK

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



## Förord

I tidigare Energiforskprojekt har konstaterats att ett utvecklingsbehov gällande stabilitetsanalyser för betongdammar föreligger, både med hänsyn till kunskapsläget och till osäkerheter i analysen.

Med utgångspunkt från detta har en metodbeskrivning tagits fram som beskriver hur sannolikhetsbaserad evaluering bör genomföras för betongdammar.

Metodbeskrivningen finns redovisad i Energiforskrapport 2016:292 "Probabilistic model code for concrete dams". Som en del i arbetet med metodbeskrivningen genomfördes beräkningar för ett antal dammar i syfte att testa metodiken samt att definiera acceptabel säkerhetsnivå. Denna rapport beskriver arbetet med metodbeskrivningen samt analys av genomförda beräkningar. Rapport 2016:292 läses med fördel parallellt med denna rapport.

Marie Westberg Wilde, KTH/ÅF, samt Fredrik Johansson, KTH/SWECO, har på uppdrag av Energiforsk genomfört projektet med stöd av examensarbetare samt referensgrupp och expertgrupp.

Projektet har ingått i Energiforsks dammsäkerhetstekniska utvecklingsarbete med medverkan från vattenkraftföretag och Svenska kraftnät.

Stockholm september 2016

Sara Sandberg

## Författarnas förord

Arbetet med metodbeskrivningen har i huvudsak utförts av rapportförfattarna. Doktoranderna Johan Spross och Alexandra Krounis har deltagit i referensgruppen samt i mindre delar av arbetet. Examensarbetarna David Fouhy och Francisco Ríos har genomfört de sannolikhetsbaserade beräkningarna på existerande dammar enligt föreslagen metodbeskrivning med stöd av författarna.

En referensgrupp har följt arbetet och under arbetets gång gett information och bidragit med värdefulla kommentarer. Följande personer har ingått i referensgruppen

Cristian Andersson, Energiforsk

Manouchehr Hassanzadeh, Vattenfall R&D

Richard Malm, KTH/Sweco

Marcus Hautakoski, Vattenregleringsföretagen

Martin Hansson, Statkraft

Mats Persson, Vattenfall Vattenkraft

Viktor Carlsson, Skelleftekraft

Håkan Bond, WSP

Mats Stenmark, Norconsult

Tomas Ekström, ÅF

Erik Nordström, Sweco

En expertgrupp med god kunskap om sannolikhetsbaserade beräkningar har kommit med synpunkter och rekommendationer. Expertgruppen har bestått av

Sven Thelandersson, LTH

Håkan Stille, KTH

För att säkerställa kvaliteten har även Ton Vrouwenvelder, TNO/tidigare TU Delft, Nederländerna anlåtats som extern granskare. Han har internationell erfarenhet av sannolikhetsbaserad dimensionering och framtagande av liknande riktlinjer (bland annat Joint Committee of Structural Safety, JCSS "Probabilistic model code").

## Sammanfattning

På uppdrag av Energiforsks dammsäkerhetstekniska utvecklingsprogram har en metodbeskrivning tagits fram som beskriver hur sannolikhetsbaserad evaluering bör genomföras för betongdammar. Denna rapport beskriver detta arbete samt de analyser som genomförts som en del av arbetet.

I korthet har följande steg ingått i projektet:

1. Ta fram en metodbeskrivning. Metodbeskrivningen kallas "Probabilistic model code for concrete dams" (PMCD) och finns i en egen Energiforskrapport. PMCD är den första metodbeskrivningen i världen för sannolikhetsbaserad stabilitetsberäkning av betongdammar. Den bygger en grund för att kunna genomföra sannolikhetsbaserade beräkningar på ett standardiserat vis.
2. Analys av representativa fall. Syftet med beräkningarna var dels att testa metodbeskrivningen, dels att definiera  $\beta_{\text{target}}$ , se nedan. Urval av dammar för beräkning gjordes genom att tillfråga dammägare och konsulter inblandade i projektet om lämpliga objekt. Beräkningar har utförts för 18 monoliter (10 lamellkonstruktioner och 8 gravitationsmonoliter) med höjder på mellan 10-40 m.
3. Definiera  $\beta_{\text{target}}$ . För att kunna bedöma om en konstruktion är tillräckligt säker behövs ett kriterium att jämföra med. I en sannolikhetsbaserad analys behövs ett minsta tillåtna  $\beta$ -värde, så kallat  $\beta_{\text{target}}$ . En hög brottsannolikhet ger ett lågt  $\beta$ -värde och tvärtom. Inget  $\beta_{\text{target}}$  finns definierat för betongdammar så det fanns ett behov att göra en kalibrering mot existerande säkerhetsnivå. Grundantagandet i detta angreppssätt är att dammar som uppfyller dagens deterministiska krav i medeltal är "tillräckligt" säkra.
4. Formulera en första sannolikhetsbaserad riktlinje. Viss justering genomfördes under projektets gång och den "färdiga" metodiken finns i tidigare nämnd Energiforskrapport. Det måste noteras att fortsatt forskning och erfarenhet kan innebära att förändringar behöver utföras i PMCD.
5. Analys av möjligheten att utveckla riktlinjer till ett partialkoefficient-format och, om möjligt, implementera detta i riktlinjen. Detta gjordes som ett examensarbete.

Kalibreringsberäkningarna i punkt 2 och 3 visade att

- Glidstabiliteten var relativt jämn för dammar grundlagda på sprängd yta ( $\beta = 3,8-5,1$ ). Medelvärde för alla var 4,65. Detta är i linje med SK3 enligt EKS ( $\beta = 4,8$ ).
- Stjälpstabiliteten var mycket hög. Analysen kompletterades därför med ett ytterligare "ställföreträdande" brottgränstillstånd för spänning i uppströmskanten. Det brottgränstillståndet resulterade i  $\beta_{\text{spänning}} = 1,2$  (medelvärde).

Slutligen rekommenderas att  $\beta_{\text{target}}$  differentieras med utgångspunkt från olika dammsäkerhetsklasser enligt följande (referensperiod 1 år):

Dammsäkerhets-klass	Brottgränstillstånd (glidning och stjälpning)
A	5,2
B	4,8
C	4,3

## Summary

On behalf of Energiforsk a methodology for probability-based evaluation of concrete dams has been written. This report describes this work and the calculations and analyses performed as part of the work.

In summary the following activities have been included in the project:

1. Formulate a methodology. The methodology is called "Probabilistic model code for concrete dams" (PMCD) and is presented as a separate Energiforsk report. PMCD is the first methodology for probability-based stability evaluations of concrete dams in the world. It lays the foundation for standardized and systematic probability based evaluations.
2. Analysis of representative cases. The purpose of the calculations was to test the methodology description, and to define a  $\beta_{\text{target}}$ , see below. Dam owners and consultants were asked for suitable examples of dams to analyse. Calculations were performed for 18 monoliths (10 buttress structures and 8 gravity structures), with a height between 10-40 m.
3. Define  $\beta_{\text{target}}$ . To assess if a structure is safe enough, a criteria is needed for comparison. In a probability-based analysis a minimum  $\beta$ -value, called  $\beta_{\text{target}}$  is needed. A high probability of failure gives a low  $\beta$  value. No  $\beta_{\text{target}}$  is defined for concrete dams, and it was decided to do a calibration to existing practice to obtain it. The assumption in that approach is that dams that fulfil the deterministic requirements in today's guideline are (as a mean) safe "enough".
4. Write a "final" probability-based guideline. Some adjustments was done during the project and the "final" methodology is presented in the previously mentioned report. It must be noted that further research and experience may mean that changes of PMCD are necessary.
5. Analysis of the possibility to develop the guideline to a partial factor format, and if possible, implement this into the guideline. This was done as a master thesis work.

Calculations in point 2 and 3 showed that:

- The sliding stability was quite even among the analysed dams ( $\beta = 3,8-5,1$ ). The mean value was 4,65 which is similar to the level of safety in safety class 3 according to EKS.
- Overturning stability was very high. Due to the results, the analyses were complemented by a secondary type of ultimate limit state for stresses in the upstream face of the dam. This limit state gave  $\beta_{\text{stresses}} = 1,3$ .

Finally it was recommended to differentiate  $\beta_{\text{target}}$  depending on dam safety class according to (reference period 1 year):

Dam safety class	Ultimate limit state (sliding and overturning)
A	5,2
B	4,8
C	4,3



# Innehåll

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Metodik</b>	<b>11</b>
2.1	Metodbeskrivning	11
2.2	Analysera ett antal representativa fall	12
2.3	Definiera $\beta$ -target.	13
2.4	Formulera en första sannolikhetsbaserad riktlinje.	14
2.5	Möjlighet att implementera partialkoefficientmetoden	15
<b>3</b>	<b>Probabilistic model code</b>	<b>16</b>
3.1	Innehåll i PMCD	16
3.1.1	Part I: Basis of design	16
3.1.2	Load models	19
3.1.3	Resistance models	21
<b>4</b>	<b>Beräkningar baserade på PMCD</b>	<b>23</b>
4.1	Analys av originalberäkningar och justeringar	24
4.2	Resultat av Justerade beräkningar	29
4.3	Analys av $\beta$ -target	32
4.3.1	Glidning	32
4.3.2	Stjälpning	34
4.3.3	Dragspänning	36
4.3.4	Diskussion kring resultat	37
4.4	Möjlighet till justering av $\beta_{\text{target}}$ utifrån konsekvensklasser	38
4.4.1	Föreslaget $\beta_{\text{target}}$ baserat på beräkning och differentiering av konsekvensklasser	38
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>40</b>
5.1	Erfarenheter från beräkningar och kalibrering	40
5.2	För- och nackdelar samt begränsningar	42
5.3	Implementering	43
5.4	Möjlighet att införa partialkoefficienter	44
5.5	Fortsatt forskning	45
5.6	Branschbeslut	46
<b>6</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>47</b>
<b>7</b>	<b>Referenser</b>	<b>48</b>

# 1 Inledning

Nuvarande riktlinjer för stabilitetsanalyser av betongdammar grundlagda på berg har visat sig vara onyanserade, se t.ex. Gustafsson et al (2008), både i internationell jämförelse och med hänsyn till det faktiska kunskapsläget. I nuvarande riktlinjer tas exempelvis ingen hänsyn till variation i osäkerheter vid val av de parametrar som styr skjuvhållfastheten för glidning, d.v.s. om de är baserade på provning eller empirisk kunskap. Reducering av osäkerheter genom mätningar beaktas inte. Skillnaden i konsekvenser mellan olika dammar, samt att samma acceptabla säkerhetsfaktorer används för alla dammar oavsett konsekvensklass beaktas inte heller. Dessa exempel visar att osäkerheter inom dimensioneringen inte beaktas på ett stringent sätt. Vid stabilitetsanalyser av konstruktioner är detta emellertid av största vikt.

Vid stabilitetsanalyser baserade på sannolikhetsbaserade metoder finns möjlighet att ta hänsyn till ovanstående osäkerheter. Det finns därmed ett utvecklingsbehov gällande stabilitetsanalyser för dammar och en sannolikhetsbaserad dimensionering.

Baserat på detta utvecklingsbehov togs en arbetsplan fram för ett möjligt tillvägagångssätt för arbetet med att utveckla sannolikhetsbaserade stabilitetsanalyser för betongdammar. Detta finns beskrivet i "Probabilistisk metoder för stabilitetsanalyser av betongdammar – förslag till arbetsplan för framtida utveckling" (Westberg Wilde & Johansson, oktober 2012).

På uppdrag av Energiforsks dammsäkerhetstekniska utvecklingsprogram påbörjades därefter arbetet med att ta fram en metodbeskrivning som beskriver hur sannolikhetsbaserad evaluering bör genomföras för betongdammar. Med evaluering menas beräkning samt tolkning av beräkningsresultaten. Då stabiliteten evalueras för en betongdamm kan sannolikhetsbaserade beräkningar användas som hjälpmedel för att få tillräcklig information för att fatta ett beslut gällande huruvida dammens stabilitet är tillräcklig eller om vidare utredning eller förstärkning är nödvändig. Den beräknade brottsannolikheten skall tolkas som ett nominellt mått som ger en bra möjlighet till relativ jämförelse, både för olika åtgärder och möjligheter för en konstruktion och mellan olika konstruktioner. Den ger ett bra beslutsunderlag eftersom osäkerheterna hanteras på ett transparent vis.

Denna rapport beskriver resultat av arbetet med att ta fram en sannolikhetsbaserad metodbeskrivning. I rapporten beskrivs först metodiken för framtagande av metodbeskrivningen. Därefter går "Probabilistic model code for concrete dams" översiktligt igenom. Efter detta presenteras beräkningsresultat för ett större antal betongdammar, vars syfte har varit att erhålla ett målvärde på acceptabel brottsannolikhet då koden tillämpas. Slutligen diskuteras kodens olika för- och nackdelar.

## 2 Metodik

I ”Probabilistiska metoder för stabilitetsanalys av betongdammar – förslag till arbetsplan för framtida utveckling” (Westberg Wilde & Johansson, oktober 2012) föreslogs att framtagande av en ny dimensioneringsriktlinje bör göras enligt följande steg:

1. Ta fram en metodbeskrivning för sannolikhetsbaserad säkerhetsanalys av betongdammar.
2. Analysera ett antal representativa fall.
3. Definiera  $\beta_{\text{target}}$ .
4. Formulera en första sannolikhetsbaserad metodik
5. Analys av möjligheten att utveckla riktlinjen till ett partialkoefficient-format och, om möjligt, implementera detta i riktlinjen.

Föreliggande projekt har genomförts i enlighet med detta förslag. Nedan förklaras mer detaljerat vad de olika stegen inneburit.

För samtliga statistiska fördelningar och  $\beta$ -värden i detta dokument är referensperioden 1 år.

### 2.1 METODBESKRIVNING

Joint Committee on Structural Safety (JCSS 2001) har tagit fram en ”Probabilistic model code” för bärverk. I den beskrivs hur en sannolikhetsbaserad analys kan göras och de krav, principer och modeller för analys, erforderlig säkerhetsnivå m.m. som bör gälla. Dessutom sammanställs relevanta last- och materialparametrar och, baserat på ”best estimates” och bästa möjliga kunskap i nuläget, beskrivs det hur de bör modelleras statistiskt. JCSS är allmänt applicerbar, men till största delen är lastbeskrivningarna fokuserade på byggnader.

Grundtanken i förstudien var att en liknande beskrivning bör göras för betongdammar. Målet är att ta fram en ”rimlig beskrivning” av de parametrar som påverkar en betongdamm, för att sedan kunna använda detta i en sannolikhetsbaserad analys.

Syftet med metodbeskrivningen är att den ska utgöra bakgrundsdokument till arbetet med den i steg 4 (ovan) kommande sannolikhetsbaserade riktlinjen. I metodbeskrivningen skall bakgrunder till samtliga steg noggrant beskrivas så att metodiken i senare skede kan analyseras och uppdateras/revideras. En bra utgångspunkt anses vara JCSS ”Probabilistic model code”, grunddokumenten för Eurocode, EN 1990 och EN 1991, ISO 2394 samt resultatet av EU-projektet ”Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters (PROVERBS)” (Oumeraci et al, 1999). Det som ingår i metodbeskrivningen är i stora drag:

1. **Giltighet.** Definition av metoder godkända för beräkning, t.ex. First-Order Reliability Method (FORM). Giltighet är för både existerande och nya konstruktioner. Fokus är på vanliga dammtyper såsom gravitationsdammar, utskovsdammar och lamelldammar. I första utgåvan inkluderas endast berggrundlagda dammar.

2. **Definitioner av gränstillstånd (brott- och bruksgränstillstånd).** Endast brottgränstillstånd beaktas. Stjälpning analyseras kring en justerad stjälpunkt där hänsyn tas till krossning av berg eller betong. För glidning beskrivs gränstillstånd både för intakt kontakt (med kohesion) och med bruten kontakt (d.v.s. en ren friktionsbetraktelse). Säkerhetsnivå för olika gränstillstånd diskuteras generellt under kapitel 4. Efter den första analysen gjordes ett tillägg och ett gränstillstånd som beskriver uppkomst av nollspänning i uppströmskanten inkluderades. Detta diskuteras mer utförligt under kapitel 4.1.
3. **Laster och Lastkombinationer (i RIDAS kallade lastfall).** Utifrån gränstillstånd, laster och lastkombinationer har gränsfunktioner tagits fram för vilka brottsannolikheten bör beräknas. Utgångspunkt har varit lastfall enligt RIDAS.
4. **Bärförmåge- och lastparametrar.** Utifrån definierade gränstillstånd görs en genomgång av befintlig kunskap för samtliga parametrar som ingår i gränsfunktionen. Utifrån den kunskap som med rimlig arbetsinsats kan tas fram bedöms om det finns underlag för att ta fram förväntat värde (E), Varians (V) och statistisk fördelning.

För att få ett fungerande säkerhetsformat krävs att laster och bärförmågeparametrar finns definierade. Inom projektet har tre nivåer funnits:

- Tillräcklig information om underlag har funnits för att ta fram E och V.
- Visst underlag har funnits och detta har kompletterats med expertbedömningar.
- Begränsat underlag har funnits och enbart expertbedömningar har använts som underlag (i något fall).

Det som tagits fram är en "bästa uppskattning" som möjliggör vidare beräkningar. Denna bästa uppskattning kan sedan komma att behöva uppdateras, särskilt med fokus på de områden där expertbedömningar använts som underlag.

Definitionen av variabler görs utifrån antaganden baserade på nuvarande kunskapsnivå. För samtliga variabler har det noggrant noterats hur variabeln definierats, vilka data som använts och vilka antaganden som gjorts. Detta får därför betraktas som en nulägesbeskrivning av hur det ser ut och vad vi skulle välja idag.

De laster som finns definierade enligt JCSS eller Eurokoderna har antagits i enlighet med dessa. Fokus för JCSS är emellertid inte dammar och Eurokoderna är inte skriven för dammar, vilket innebär att många laster inte finns definierade.

Den färdiga metodbeskrivningen är indelad i tre delar och redovisas i en separat Energiforskrapport.

## 2.2 ANALYS AV ETT ANTAL REPRESENTATIVA FALL

Med hjälp av metodbeskrivningen ovan har analys av ett antal dammar utförts. För att få fram representativa fall har referensgruppen tillfrågats att komma med förslag för att få "en representativ population". Det som eftersträvats är att dammarna skulle ha säkerhetsfaktorer nära acceptanskriterierna i RIDAS, d.v.s. 1,5 och 1,35 för stjälpning respektive glidning.

Syftet med beräkningarna var dels att kontrollera att metoden fungerar och dels att hitta lämpligt  $\beta_{\text{target}}$  (motsvarande maximal tillåten brottsannolikhet), se vidare nedan.

Beräkningarna har genomförts i form av ett examensarbete och efterföljande sommarjobb av två nyutexaminerade civilingenjörer. Kompletterande analyser och justeringar utfördes av rapportförfattarna. Totalt analyserades 9 dammar med sammanlagt 18 monoliter, varav åtta gravitationsmonoliter och 10 lamellmonoliter.

### 2.3 DEFINITION AV $\beta$ -TARGET.

För att kunna bedöma om en konstruktion är tillräckligt säker behövs ett kriterium att jämföra med. I en sannolikhetsbaserad analys behövs en tolerabel brottsannolikhet  $p_{\text{target}}$  eller ett minsta tillåtna  $\beta$ -värde, så kallat  $\beta_{\text{target}}$ . En hög brottsannolikhet ger ett lågt  $\beta$ -värde och tvärtom.

I dagsläget finns inget  $\beta_{\text{target}}$  definierat för dammar, varken i Sverige eller internationellt. Undantaget är Kina (China Electricity Council, 2000) som tagit fram värden på  $\beta_{\text{target}}$  baserat på kalibrering av befintliga konstruktioner och från expertbedömningar (det framgår dock inte mer i detalj hur detta arbetet gått till). I Eurocode finns  $\beta_{\text{target}}$  för strukturella komponenter fastställda för olika "reliability – classes", se Tabell 2-1. Motsvarande siffror finns även i t.ex. JCSS, se Tabell 2-2. I Sverige ska inte värden från Tabell 2-1 tillämpas, utan istället ges krav för säkerhetsindex för brottgränstillstånd i EKS (Boverkets föreskrifter och allmänna råd om tillämpning av europeiska konstruktionsstandarder (eurokoder)) beroende på säkerhetsklass:

- ≥ 3,7 för säkerhetsklass 1,
- ≥ 4,3 för säkerhetsklass 2,
- ≥ 4,8 för säkerhetsklass 3.

Samtliga  $\beta$ -värden avser referenstiden 1 år.

**Tabell 2-1. Acceptabel brottsannolikhet för olika tillförlitlighetsklasser (beroende på konsekvens). Högt  $\beta$  innebär låg brottsannolikhet. Från SS-EN1990:2002 bilaga B (används ej i Sverige).**

Reliability Class	Minimum values for $\beta$	
	1 year reference period	50 years reference period
RC3	5,2	4,3
RC2	4,7	3,8
RC1	4,2	3,3

Tabell 2-2.  $\beta$ -värden från JCSS (2001). Här även kopplade till kostnader att genomföra säkerhetsförbättringar. Referensperiod 1 år.

1	2	3	4
Relative cost of safety measure	Minor consequences of failure	Moderate consequences of failure	Large consequences of failure
Large (A)	$\beta=3.1$ ( $p_F \approx 10^{-3}$ )	$\beta=3.3$ ( $p_F \approx 5 \cdot 10^{-4}$ )	$\beta=3.7$ ( $p_F \approx 10^{-4}$ )
Normal (B)	$\beta=3.7$ ( $p_F \approx 10^{-4}$ )	$\beta=4.2$ ( $p_F \approx 10^{-5}$ )	$\beta=4.4$ ( $p_F \approx 5 \cdot 10^{-6}$ )
Small (C)	$\beta=4.2$ ( $p_F \approx 10^{-5}$ )	$\beta=4.4$ ( $p_F \approx 5 \cdot 10^{-6}$ )	$\beta=4.7$ ( $p_F \approx 10^{-6}$ )

Att definiera en acceptabel årlig brottsannolikhet  $\beta_{\text{target}}$  är i allmänhet svårt. Vilket värde som ska väljas beror bland annat på riskuppfattning och samhällets krav på tolerabla risker. De två huvudsakliga möjligheterna är att:

1. Utgå från tolerabla risker
2. Utföra kalibrering mot befintliga konstruktioner. Grundantagandet i detta angreppssätt är att dammar som uppfyller dagens deterministiska krav är "tillräckligt" säkra.

Vrouwenvelder (2001) beskriver olika tolkningar av sannolikhet. I den Bayesianska tolkningen hävdas att om analyser utförs noggrant kan den beräknade sannolikheten i medel antas vara korrekt. Den Bayesianska tolkningen är därmed den "bästa möjliga beskrivningen av den grad av övertygelse som finns för att en viss händelse ska inträffa" [the best possible expression of the degree of belief in the occurrence of a certain event].

Med utgångspunkt från detta är det logiskt att använda den andra metoden ovan, d.v.s. en kalibrering mot befintliga konstruktioner. Detta är även den vanligaste metoden (Vrouwenvelder, 2001). Beräknade brottsannolikheter anses då med det Bayesiska synsättet vara betingade av de antaganden som gjorts, men om antagandena närmar sig "verkligheten" gör också beräkningsresultatet det. Detta är skälet till att rekommendationerna enligt SS-EN 1990 inte kan tas utan vidare undersökning. Det innebär även att när  $\beta_{\text{target}}$  väl fastställts så bör metodiken för stabilitetsanalys utgå från samma antaganden som användes när  $\beta_{\text{target}}$  togs fram. Resultat och analys av  $\beta_{\text{target}}$  presenteras i kapitel 3.

## 2.4 FORMULERING AV EN FÖRSTA SANNOLIKHETSBASERAD RIKTLINJE

I förstudien rekommenderades att i ett nästa steg formulera en "färdig" sannolikhetsbaserad riktlinje. Slutresultat i detta projekt blir "Probabilistic model code for concrete dams" i tre delar med tillhörande appendix. PMCD har utformats så att den har samma struktur och kontext som normer, t.ex. SS-EN 1990. Det är grundtanken att det även ska vara möjligt att bygga på en del där verifiering med partialkoefficientmetoden ingår om detta är tillämpligt. Det är önskvärt att det då även blir en koppling till tvärsnittsdimensionering. Genom denna metodik blir dammområdet kompatibelt med konstruktions och geoteknikområdet. Även laster skall vara kompatibla där så är tillämpligt. Ordet "färdig" som användes i förstudien har bytts ut mot "första". Skäl till detta är att PMCD kommer behöva uppdateras med tiden; det tillkommer information och kunskap som behöver inkorporeras och

erfarenheter från beräkningar kan komma att leda till att justeringar blir nödvändiga. I t.ex. offshore-industrin görs uppdateringar med ca 5-10 års mellanrum.

## 2.5 MÖJLIGHET ATT IMPLEMENTERA PARTIALKOEFFICIENTMETODEN

Baserat på den sannolikhetsbaserade riktlinjen finns en möjlighet att även utarbeta en dimensioneringsriktlinje baserad på partialkoefficienter. I princip kan partialkoefficientmetoden betraktas som en deterministisk metodik som är ställföreträdande för en sannolikhetsbaserad metodik. Det kan därför uppfattas som lämpligt att en framtida riktlinje bör anpassas mot denna metodik. Detta har tidigare diskuterats, se t.ex. Gustafsson et al. (2008), där författarna var tveksamma till möjligheten att använda fasta partialkoefficienter eftersom varje damm är unik och partialkoefficienter då skulle kunna leda till en överdimensionering.

### 3 Probabilistic model code

Som beskrivet i metodkapitlet togs det fram en "Probabilistic model code for concrete dams" (PMCD) (Westberg Wilde & Johansson, 2016). Den är uppdelad på tre delar och finns i sin helhet i en egen Energiforskrapport. De olika delarna innehåller i korthet följande:

#### Part I: Basis of design

Definition av krav, principer för dimensionering med gränstillstånd, definition av tillförlitlighet, acceptabelt säkerhetsindex (brottsannolikhet), verifiering med sannolikhetsbaserad analys, dimensioneringssituationer och uppdatering av antaganden baserat på provning.

#### Part II: Load models

Innehåller generella principer för lastmodeller samt definition och rekommendationer för statistiska beskrivningar av islast, hydrostatiskt tryck, upptryck och jordtryck.

#### Part III: Resistance models

Innehåller generella principer samt definition och statistiska beskrivningar av egentygnd, skjувkapacitet för berg-betongsnittet, friktionsvinkel i bergsprickor, tryck- och draghållfasthet hos betong och tryckhållfasthet hos bergmassan.

Det är viktigt att understryka att de rekommendationer på definition av bärförmågeparametrarna som ges i PMCD (i viss mån även lastparametrarna) utgår från "vanliga förhållanden". De måste därför rimlighetsbedömas för varje separat konstruktion som analyseras. Med detta menas att för en konstruktion som i något avseende är i betydligt sämre (eller bättre) skick än liknande konstruktioner kan justering av antaganden vara nödvändiga.

I följande delkapitel diskuteras innehållet i PMCD samt de val som gjorts vid definition av bland annat variabler. Vidare beskrivs och diskuteras de beräkningar som genomförts samt hur förslag till  $\beta_{\text{target}}$  tagits fram.

#### 3.1 INNEHÅLL I PMCD

Nedan följer en genomgång av viktigare val som gjorts vid framtagande av PMCD.

##### 3.1.1 Part I: Basis of design

###### *Allmänt*

Basis of design har i stora delar utgått från "Probabilistic model code" (JCSS, 2001) och Eurocode 1990, både gällande struktur och innehåll.

Ett kapitel om risk baserad robusthet från ISO 2394 har inkluderats då dammar, särskilt de med högst konsekvenser bör analyseras utifrån ett robusthetsperspektiv. Det ska dock noteras att en sådan scenarioanalys och riskanalys inte kan förväntas ingå i en sannolikhetsbaserad dimensionering eller utvärdering, utan bör ingå i en genomgripande riskanalys för den aktuella anläggningen.

Gällande dokumentation har vi inkluderat detta baserat på ISO 2394, i syfte att förstärka vikten av bra dokumentation. Det är tyvärr relativt vanligt att analyser



behöver göras men att relevant information saknas på grund av att dokumentationen av t.ex. grundläggningsförhållanden, stabilitet m.m. är otillräcklig.

Då det gäller teoretisk bakgrund till sannolikhetsbaserad beräkning ges endast kortfattad information och hänvisning ges istället till relevant litteratur. Det förutsätts att användaren är bekant med de koncept som diskuteras och har relevant kunskap för att genomföra en sannolikhetsbaserad beräkning.

#### $\beta_{Target}$

Minsta tillåtna säkerhetsindex har definierats från den utförda kalibreringen, se kapitel 4. Det är viktigt att understryka att detta tillåtna säkerhetsindex tagits fram baserat på de antaganden som gjorts av olika parametrar i denna metodbeskrivning, och att beräkningar av  $\beta$  för en konstruktion därmed behöver baseras på samma antaganden för att jämförelse ska kunna göras. Det finns fortsatt stora osäkerheter relaterat till parametrar i PMCD som fortsatt forskning och systematisk kunskapsinsamling kan minska. Det är därmed troligt att vidare forskning och erfarenhet kommer att nödvändiggöra förändringar av PMCD, vilket också kan komma att påverka vilket  $\beta_{target}$  som ska användas. Kalibrering av  $\beta_{target}$  diskuteras mer detaljerat i kapitel 4.4.

Det är önskvärt att göra en differentiering av  $\beta_{target}$  utifrån olika konsekvensklasser och ett förslag till detta diskuteras i kapitel 4.5.

#### Gränstillstånd och felmoder

Avsikten var att endast behandla brottgränstillstånd, detta på grund av att det som hanteras är stabilitet och säkerhet för betongdammar, inte brukskrav. Brottgränstillstånd har definierats utifrån felmoder. Felmoderna för betongdammar har antagits vara relativt väldefinierade. För beskrivning av glidstabilitet gäller att skjuvhållfastheten för en intakt yta kan beskrivas av en inre friktionsvinkel och kohesion. Om sedan en mindre rörelse sker så bryts kontakten och skjuvhållfastheten kan istället beskrivas med basfriktion samt dilatation. Dilatationsvinkeln baseras på ojämnheter och klackar. Grundtanken var att kohesion skulle vara inkluderad, men på grund av stora osäkerheter kring bland annat hur stort område som har kohesion, hur stor kohesionen är och om det finns avståndskorrelation har kohesionens inverkan till slut bedömts som så pass osäker att den helt utelämnats. Framtida förbättrad information och kunskap kan eventuellt ändra detta. Bl.a. har Krounis (2016) detaljerat studerat frågan. Hennes resultat har emellertid inte inkluderats i denna studie, då resultaten presenterades i samband med färdigställandet av denna rapport.

För stjälpning har hänsyn även tagits till krossning av berg/betong genom att stjälpunkten justerats.

I RIDAS (2012) ställs krav på kraftresultantens läge. Grundtanken var att inte inkludera detta i PMCD, eftersom dragspänningar i dammens uppströmskant i sig inte är något brottgränstillstånd. Om dragspänning uppkommer får upptrycket förväntas bli fullt utvecklat i den "dragna zonen", varvid upptrycksantagandet och därmed stabiliteten förändras. Efter de första analyserna och diskussioner med expert och referensgrupp gjordes en komplettering av gränstillstånd och även uppkomst av dragspänningar i uppströmskanten togs med, detta med hänsyn till att gränstillstånd för glid- och stjälpstabilitet inte bedömdes ge en komplett bild av stabiliteten. Uppkomst av dragspänning leder inte i sig själv till brott, men det leder till uppkomst av oönskad belastning vilket ökar sannolikheten för övriga felmoder. Uppkomst av dragspänning är således inte ett brottgränstillstånd i samma mening som glidning och stjälpning,

istället betraktas det som ett "ställföreträdande brottgränstillstånd". Definitionen i PMCD (samma som i EN 1990) är "states prior to structural collapse, which, for simplicity, are considered in place of the collapse itself, may be treated as ultimate limit states".

Då det gäller brott i berget har utgångspunkten varit att för bra berg kommer brott inte inträffa i intakt bergmassa. Däremot kan det finnas sprickplan i berget som kan påverka dammens stabilitet negativt. Då man vanligtvis inte känner till särskilt mycket om berggrunden vid utvärdering av säkerheten för en damm kan antagande först göras om en ofördelaktig spricka under dammen. Beräkning görs sedan för att identifiera på vilket djup sprickan kan vara farlig. Vidare undersökning (arkivsökning, eventuell borming mm) får sedan inriktas på att ta reda på om det finns en spricka inom det identifierade området och, om det finns en spricka, identifiera relevanta egenskaper för sprickan.

#### *Dimensioneringssituationer*

Vid definition av dimensioneringssituationer har utgångspunkten varit de lastfall som beskrivs i RIDAS. Vissa viktiga förändringar har dock gjorts.

Upptrycket antas enligt RIDAS riktlinjer vara linjärt avtagande om inget dränage finns. Om dränage finns får upptrycksreduktionen vid dränaget antas vara 70 % (30 % upptryck efter dränaget) för inspektionsgång på berg. Det står även i RIDAS att dränagehålens upptrycksreducerande effekt ska kontrolleras, men detta görs sällan i praktiken. I PMCD förstärks kravet på detta genom att kontinuerlig övervakning av upptrycket, ett underhållsprogram för att upprätthålla dränagets funktion samt en åtgärdsplan för att hantera eventuell igensättning krävs för att dräneringen ska få tillgodoräknas. Om detta inte finns måste dammen antas ha ett igensatt dränage och fullt upptryck. Skälet till denna ganska drastiska metodik är att ny forskning (Spross et al, 2014) visat att sannolikheten för brott styrs i princip helt av sannolikheten för att dränaget sätts igen. Om ingen övervakning finns är det i praktiken inte möjligt att veta om dränaget verkligen är i funktion. På detta sätt blir kravet tydligare på vad som är nödvändigt för att säkra dammarnas stabilitet över tid.

Då det gäller lastfallet med vattenytan till krön (i RIDAS ett exceptionellt lastfall) har detta behållits i nuläget. Tanken är att detta lastfall i framtiden ska kunna tas bort och att man istället ska använda sig av lastfall 4.2 som innebär att sannolikheten för vattennivåer över dämningssgräns (DG) skattas och modelleras med exponential/triangelfördelning. För vattennivåer över DG skulle en modellering kunna göras som inkluderar såväl flöden som tillförlitlighet hos avbördningssystem och sannolikhet för fränslag. Metodiken beskrivs i PMCD och är möjlig att använda, men det bedömdes att det inte skulle utföras inom projektet då det är lätt att analysen då utökas till en fullständig riskanalys gällande avbördningssystemet.

Det  $\beta_{target}$  som definierats gäller för samtliga definierade dimensioneringssituationer, men för situationer som är sällan förekommande (t.ex. överdämning till krön) ska  $\beta_{target}$  uppdateras med sannolikhet för inträffande av aktuellt lastfall (beskrivs under tabellen för dimensioneringssituationer).

*Uppdatering av antaganden*

Vid sannolikhetsbaserad beräkning beskrivs ingående parametrar med statistiska fördelningar. De fördelningar som föreslagits i PMCD är relativt allmänna, och för en specifik konstruktion kan därför provtagning användas för att uppdatera de statistiska fördelningarna. På så sätt kan ytterligare information användas för att "förbättra  $\beta$ -värdet" genom att osäkerheterna minskas. I vissa fall kan därmed säkerheten förbättras genom att öka kunskapen om konstruktionen snarare än att göra fysiska åtgärder.

Uppdatering av parametrar kan göras utgående från en Bayesiansk metodik där en a priori-fördelning uppdateras med mer data och resulterar i en a posteriorifördelning som används i analysen. Ju fler mätningar som görs, desto mer går posteriorifördelningen mot analysdatas egenskaper. Metodik för att göra denna uppdatering beskrivs kortfattat i PMCD.

## 3.1.2 Load models

I Load models görs genomgång av de lastparametrar som vanligtvis ingår för en svensk betongdamm.

*Islast*

Islasten har beskrivits i relativt omfattande litteratur, men den statistiska fördelningen har inte definierats i någon större utsträckning. Undantag är några examensarbeten (Adolfi & Eriksson, 2013 och Fredriksson & Persson, 2005) samt ett forskningsarbete (Bergdahl och Wernersson, 1978), varav bara det första egentligen syftade till att bestämma denna. Andra arbeten har i stort sett syftat till att hitta en metod för att beskriva islasten så att modellering av islast ska kunna göras, och/eller till att beskriva maximal islast. Verifiering av islast mot verklig långtidsdata saknas.

I PMCD har islastens medelvärde och variation utgått ifrån den sammanställning som Adolfi & Eriksson (2013) gjort av utförda mätningar av islast. Detta har kombinerats med en maximal möjlig islast med hänsyn till buckling av isen som Carter et al (1998) beskriver.

Islasten har som bekant stor inverkan på låga konstruktioner. Den maximala islasten har inverkan på slutresultatet. Om det inte finns någon övre gräns för vilket istryck som kan uppkomma blir  $\beta$ -värden väsentligt lägre.

Det finns en viss risk att denna definition av islast underskattar islasten, detta kan vara fallet om medelvärdet eller standardavvikelsen är större i verkligheten. Fortsatt forskning gällande islast pågår och bör även framgent vara ett prioriterat område, till dess att mer kunskap kring islasten kan reducera de kunskapsluckor som fortfarande finns.

*Hydrostatiskt tryck*

Som tidigare beskrivits har en möjlig modelleringsteknik använts där även avbördningstillförlitligheten inkluderats.

Gällande nedströmsytan så är den beroende på flöde och en bedömning behöver göras från fall till fall.

### Upstryck

Gällande upstryck så finns information kring hur upstrycksfördelningar beror av injektering och dränage samt kring antaganden som görs i olika riktlinjer.

Den stora svårigheten i en sannolikhetsbaserad beräkning är att skatta variationskoefficienten. Variationen hos upstrycket kan anses bestå av två delar: dels den rumsliga variationen som beror av fördelning av den hydrauliska konduktiviteten för den aktuella anläggningen, dels den variation i tiden som påverkas av vattenståndsvariationer, temperatur m.m. För en viss anläggning vid en viss given vattennivå och temperatur har upstrycket en given fördelning som gör att det totala upstrycket i sig kan betraktas som en konstant, men dess värde är inte känt. Eftersom den är okänd måste den därmed modelleras som en variabel. Variationen i tiden innebär också förändringar för den rumsliga fördelningen, då den kan påverka hydraulisk konduktivitet, t.ex. genom att påverka spänningsfördelning i grunden. Variationen i tiden får betraktas som slumpmässig. I slutändan kan därmed de två orsakerna till variationskoefficient inte särskiljas, utan måste behandlas tillsammans.

Westberg (2009 a & b) genomförde modellering av upstrycket utgående från en kontinuum-baserad beskrivning av hydraulisk konduktivitet och kunde på så sätt få fram en möjlig variationskoefficient för upstrycket. Problemet med denna är att det inte är känt vilken varians och avståndskorrelation som finns för den hydrauliska konduktiviteten. Förutom detta tillvägagångssätt finns inte andra beskrivningar av variationskoefficienter för upstrycket, utan vanligen ansätts upstrycket som en konstant (funktion av uppströms och nedströms vattennivå) eller med liten variationskoefficient (Ellingwood et al. & Ajaújo & Awruch (1998), Tekie (2001), Bury & Kreuzer (1985), Royet et al (2009), Altarejos et al (2009)). Peyras et al (2012) föreslår att effekten av dränage modelleras med en stokastisk variabel, men antar att upstrycksfördelningen i övrigt är linjär.

Det första tillvägagångssättet valdes i PMCD och utgick från beskrivningen i Westberg (2009 a & b), där  $C \sim \text{Beta}(2,22; 1,33; 0,08; 1,9)$  (variationskoefficient ca 0,4) valdes. Analyser visade att upstryckets variation då hade mycket stor inverkan på resultatet ( $\alpha$ -värden kring 0,9 och över) vilket inte bedömdes rimligt. Efter diskussion och vidare analyser bedömdes att upstrycket för en gravitationsdamm utan dränage kan antas variera relativt lite mot den linjära upstrycksfördelning som antas i RIDAS och  $V_c = 0,05$  ansattes. För en gravitationsdamm med fungerande dränage ansätts en högre variationskoefficient och ovanstående Betafördelning används. Skälet till den högre variationskoefficienten vid dränage är att ytterligare en osäkerhet då tillkommer avseende dränages funktion.

Kring upstrycket kan sägas att det kvarstår betydande osäkerhet, framförallt gällande variationskoefficient för upstrycket, men också kring den faktiska upstrycksreduktion som ett dränage kan förväntas ge och kring dränages minskande kapacitet över tid.

Mätning av upstrycket rekommenderas ofta och mätvärden stoppas även in i stabilitetsanalyser (Stone and Webster Engineering Corporation 1992; Ruggeri 2004a, 2004b; U.S. Army Corps of engineers 2005) med argumentet att konservativa antaganden då kan undvikas. Som beskrivet under "Dimensioneringssituationer" ovan har dock Spross mfl (2014) visat att sannolikheten för glidning är starkt beroende av funktionen hos dränage och injektering och att även om sannolikheten för att igensättning sker är mycket liten kan det lastfallet ändå vara helt dominerande. Det kan

därmed inte rekommenderas att mätvärden används som indata till beräkningar om inte mätning görs för att säkerställa dränagesystemets funktion över tid.

#### *Jordtryck*

Gällande jordtryck är den viktigaste diskussionen huruvida vilojordtryck eller aktivt/passivt jordtryck skall användas. RIDAS och andra riktlinjer anger att vilojordtryck skall användas. Detta är ett rimligt tillvägagångssätt då samtliga laster ansätts innan själva brottet initieras. I brottögonblicket kommer dammen röra på sig och både laster och bärförmåga ändras (skjuvhållfasthet i berg/betongsnitt bryts, upptrycket ökar p.g.a. uppsprickning, islasten minskar då dammen rör sig bort från isen, jordtrycket övergår till aktivt/passivt osv). Statistiska fördelningar för parametrarna som ingår i beräkningen av jordtryck har baserats på JCSS (2001).

#### 3.1.3 Resistance models

I resistance models görs en genomgång av de bärförmågeparametrar som är av störst vikt för betongdammar i svenska förhållanden.

#### *Egentyngd*

Beskrivning av tyngd av betongkonstruktioner är hämtad från JCSS (2001) och bedöms vara tillförlitlig. En notering kan dock vara att variansreduktionsfaktorn enligt JCSS (2001) är 0,85 för stora betongkonstruktioner. För dammar kan reduktionsfaktorn vara större, vilket kan ge en ytterligare minskning av egentyngdens varians. Detta kan vara av betydelse för dammar där egentyngden har stor påverkan.

Egentyngd av berg har bedömts utifrån relevant litteratur, med viss osäkerhet kring variationskoefficienten. Egentyngd av berg har dock sällan någon avgörande påverkan på betongdammar.

#### *Friktionsvinkel mellan berg och betong*

Basfriktionsvinkeln mellan berg och betong har i resultat redovisade i litteratur uppmätts inom ett relativt smalt spann och en relativt låg variationskoefficient har ansatts.

Bidraget från ytans råhet beror som tidigare beskrivet på större ojämnheter och klackar. Om grundläggning har utförts på en sprängd yta blir bidraget högt, men om grundläggning har utförts på en slät bergyta blir den lägre. Beräkningar har visat att dammar grundlagda på slät yta generellt har ett betydligt lägre säkerhetsindex än dammar grundlagda på sprängd yta (skillnad ca 1,5-2 steg i  $\beta$ -värde, vilket motsvarar en skillnad i brottsannolikhet på flera tiopotenser).

Osäkerheter finns i beskrivning av bidraget från ytans råhet och bättre beskrivningar kan fås baserat på uppmätning och optisk scanning av grundläggningsytor.

#### *Friktionsvinkel i bergssprickor*

Friktion i bergssprickor är komplext då de kan vara såväl ofyllda som fyllda med material med olika egenskaper. Dessutom är friktionsvinkeln beroende av skala och passning. På grund av detta är friktionsvinkeln associerad med stora osäkerheter och det rekommenderas därför att egenskaper definieras för varje identifierat sprickplan baserat på undersökningar och provning från det specifika planet.

*Hållfasthet hos betong*

Beskrivningen baseras på JCSS (2001).

*Bergbultar*

Bergbultar får enligt RIDAS (2012) medräknas för dammar i konsekvensklass 2 och 3. Då de medräknas ansätts en maximal kapacitet på 140 MPa. Detta beror troligen på att kapaciteten då antas inkludera osäkerheter även i brottmod (brott kan ske i såväl bulten som i berg, kontakt mellan berg och injektering, mellan injektering eller i betongen) och osäkerhet i hur många bultar som är intakta.

I en sannolikhetsbaserad metodik bör osäkerheterna inkluderas var för sig. För analys av bergbultar rekommenderas därför att samtliga felmoder inkluderas och att stålhållfastheten sätts enligt JCSS (2001). För att undersöka inverkan av antal intakta bultar rekommenderas att en parameterstudie utförs. I fall då säkerheten är kraftigt beroende av att andelen intakta bultar är hög får vidare analys göras utifrån detta. Det finns också en betydande kvarstående osäkerhet avseende bultarnas beständighet. Denna fråga studeras för närvarande i ett pågående projekt vid Avdelningen för Betongbyggnad och Avdelningen för Jord- och bergmekanik vid KTH. Förhoppningen är att resultaten från denna studie i ett senare skede kan implementeras i PMCD.

*Spännstag*

För spännstag rekommenderas i JCSS (2001) att spännkraften reduceras på grund av relaxation mm. Uppspänning görs vanligen till ca  $0,6 \cdot P_{\text{brott}}$ , men i vissa fall görs även ett test till högre laster (ibland upp till ca  $0,8-0,9 \cdot P_{\text{brott}}$ ).

I projektet har diskussioner förts med referensgruppen kring vilka spännkrafter som kan medräknas. Förspänningen gör att en kraft läggs på konstruktionen. Det är först då belastningen på konstruktionen blir så stor att uppspänningskraften i staget överskrider som spännkraften förändras och ytterligare töjning sker i staget. Spännkraften (och töjningen) kommer sedan öka ända till dess att brott sker i staget. Brott i staget sker vid relativt stora deformationer, även om höghållfasta spännstag inte har en uttalad flytgräns. Den förda diskussionen har i korthet gällt vilken kraft som kan medräknas som stabiliserande; är det uppspänningslasten, brottlasten eller något däremellan?

Slutsatserna har varit att i brottögonblicket är det visserligen brottlasten hos staget som verkar, men då har även andra laster förändrats: det kan förväntas att spänningar uppkommit i uppströmskanten som gett ökat upptryck, islasten kan ha minskat på grund av rörelser hos konstruktionen osv. Då samtliga analyser utgår ifrån ett statistiskt fall och syftar till att förhindra att brott uppkommer så ansågs det därför rimligt att inte ansätta brottlasten för staget som ingående last. De deformationer som uppkommer vid en lastökning från  $P_{\text{uppspänning}}$  till  $0,8-0,9 \cdot P_{\text{brott}}$  är inte försumbara, detta på grund av stagets styvhet relativt styvheten för hela konstruktionen. Även om staget provats till högre belastning än  $P_{\text{uppspänning}}$  vid installation bör den provbelastningen inte användas i beräkningen, istället är det uppspänningslasten som betraktats som maximal kapacitet.

Vanligtvis sker en viss relaxation och krypning och nivåer på spännförluster på ca 10% brukar tillåtas, vilket också är i samma storleksordning som de spännkrafter som enligt deltagare i referensgruppen noterats från några större dammar. I den sannolikhetsbaserade analysen ansätts en spännförlust som kan beräknas enligt Eurokoderna.

## 4 Beräkningar baserade på PMCD

Inom ramen för projektet genomfördes beräkningar baserat på de definitioner av last och bärförmåga som gjorts i PMCD. Syfte med detta var dels att få erfarenheter och testa PMCD, dels att kalibrera  $\beta_{\text{target}}$ .

För att få bra indata för kalibrering identifierades anläggningar där säkerhetsfaktorer för glidning respektive stjälpning skulle ligga nära det rekommenderade enligt RIDAS (2012). Beräkningar utfördes sedan för 18 monoliter från nio olika dammanläggningar. Av dessa var 10 lamellkonstruktioner och 8 gravitationsdammar. För de flesta dammarna låg säkerhetsfaktorn för antingen glidning eller stjälpning nära rekommendationen.

Urval av beräknade dammar har gjorts genom att tillfråga dammägare och konsulter inblandade i projektet om lämpliga objekt. Dammarna ligger i höjdintervallet 10-28 m (gravitationsdammar) samt 13-40 m (lamelldammar). Dammarna bedöms som någorlunda representativa med avseende på utformning och stabilitet. Vissa dammar har förstärkning med spännstag för att uppfylla rekommendationerna i RIDAS (2012).

Beräkningarna utfördes inom ramen för ett examensarbete samt efterföljande sommarjobb av David Fouhy och Francisco Ríos. Efterföljande analys och justeringar har gjorts av rapportförfattarna.

Beräkningar har utförts för lastscenario 1 enligt PMCD (motsvarande lastfall 1 i RIDAS), för lastscenario 4 (finns ej i RIDAS, vattennivån tar hänsyn till sannolikhet för flöden m.m.), samt för några dammar även för lastscenario 5 (vatten vid dammkrön, LF 6 enligt RIDAS). Beräkningar har även utförts för sprickor i undergrunden på olika djup. Resultat och analys av beräkningar visas kortfattat nedan. Fullständiga beräkningar kan fås genom rapportförfattarna.

Då lastscenario 4 och 5 inträffar med betydligt lägre sannolikhet än lastscenario 1 kan brottsannolikheten givet att lastscenariot inträffar förväntas vara högre (total brottsannolikhet, d.v.s. sannolikhet för brott givet lastscenario multiplicerat med sannolikhet för lastscenario förväntas bli ungefär densamma för olika lastscenarion). Det angreppssätt som ansågs rimligt var därmed att i detalj analysera beräkningar för lastscenario 1. Beräknings- och analysgången har varit:

1. Beräkningar baserat på originalantaganden i PMCD
2. Analys av resultat och analys av behov av justeringar
3. Justeringar av PMCD
4. Uppdaterade beräkningar
5. Analys
6. Definition av  $\beta_{\text{target}}$ .

Syfte med punkt 2 var att kontrollera om beräkningarna gav rimliga resultat eller om någon eller några variabler gav upphov till resultat som inte bedömdes rimliga. Orimliga resultat kan till exempel vara att mindre förändringar i en variabel ger mycket stora förändringar av  $\beta$ -värde, eller att känslighetsvärden för en specifik parameter helt dominerar (utan att den parametern bedömts som extra osäker).

#### 4.1 ANALYS AV ORIGINALBERÄKNINGAR OCH JUSTERINGAR

De första analyserna visade

- mycket stor spridning i  $\beta$ -värde för samtliga dammar (trots likartad säkerhetsfaktor beräknad enligt RIDAS (2012)).
- Betydligt lägre  $\beta$ -värde för gravitationsdammarna än lamelldammarna

##### *Inverkan av dilatationsvinkel samt justering av originalberäkning*

Sex monoliter (fyra lamellmonoliter och två gravitationsmonoliter) hade räknats med en dilatationsvinkel som gäller för naturlig plan yta, trots att de var grundlagda på sprängd yta. Korrigering med hänsyn till detta ökade  $\beta$ -värdena väsentligt. Grundläggning på naturlig yta ger låga  $\beta$ -värden. För en av de som i praktiken grundlagts på berg med slät yta blev  $\beta = 3,23$ . Hade grundläggning istället utförts på sprängd yta hade konstruktionen haft  $\beta = 5,26$ .

##### *Inverkan av upptryck samt justering av originalberäkning*

Känslighet för upptryck var mycket stor (känslighetsvärdet  $\alpha$  var ca 0,9 för flertalet gravitationsmonoliter, d.v.s. upptrycket var den variabel som hade den största inverkan på  $\beta$ ). Den första definitionen av upptryck var att den skulle antas ha en Beta-fördelning med en variationskoefficient på ca 0,4 vilket är mycket stort.

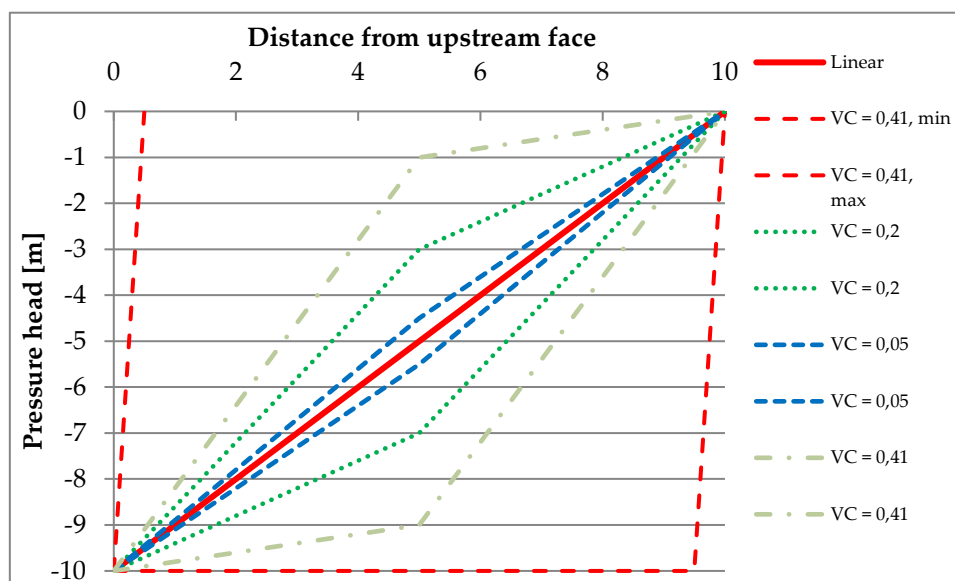
En mycket stor variationskoefficient kan förväntas för upptrycket om berggrunden har hydraulisk konduktivitet med stor varians och korrelation på ett stort avstånd. I ett sådant fall skulle upptrycket teoretiskt kunna vara nästan dubbelt så stort som i det linjära fallet (eller nära noll). Sådana förhållanden för den hydrauliska konduktiviteten kan t.ex. förväntas om berget har omfattande horisontella slag avskurna av vertikala slag. Vår bedömning är dock att det vid sådana bergförhållanden vore olämpligt att uppföra en gravitationsdamm utan att säkerställa ett fungerande dränage. Vid tiden för byggandet av de flesta av de analyserade dammarna var kunskaperna kring lämplig utformning god varför det får antas att variation i hydraulisk konduktivitet är relativt låg.

Då det gäller upptryck för en damm som har dränagehål i berg görs antagande om en trycksänkning vid dränagehålen. Med hänsyn till att dränagehålen kan ha alltifrån god upptrycksänkande förmåga till relativt dålig, beroende på deras placering, bergets lokala egenskaper, eventuell begynnande igensättning m.m. förväntas variationskoefficienten för upptryck i detta fall vara relativt stor.

Med hänsyn till ovanstående resonemang gjordes förändringar kring antagande för variationskoefficient för upptrycket. Variationskoefficienterna reducerades till 0,05 för fall med fullt upptryck och bibehölls på 0,4 för dränage. Figur 4-1 nedan visar schematisk upptrycksfördelning för en gravitationsdamm utan dränage. Röd linje visar linjärt avtagande fördelning (som sedan antas kunna variera). Blå streckad linje visar  $-1\sigma$  och  $+1\sigma$  för variationskoefficient 0,05, grön prickad linje visar  $-1\sigma$  och  $+1\sigma$  för variationskoefficient 0,2 och lila streckprickad linje visar fördelningen för variationskoefficient 0,41. Röda streckade linjer visar begränsning uppåt och nedåt för variationskoefficient 0,41. Observera att detta är en illustration av upptrycksförhållanden, de kan variera även på annat vis.

Kunskaperna kring variationskoefficienten för upptrycket har konstaterats vara dåliga, varför vidare kunskapsinhämtning och forskning rekommenderas.





Figur 4-1. linjär upptrycksfördelning (röd) samt  $+1\sigma$  och  $-1\sigma$  för olika variationskoefficienter. X-axeln visar avstånd från uppströms, y-axeln visar tryck i respektive punkt. Min är det lägsta upptrycket som en viss variationskoefficient kan resultera i, max är det högsta.

Baserat på ovanstående resonemang genomfördes förändringar gällande variationskoefficient för upptryck samt uppdatering av dilatationsvinklar. Efter dessa förändringar i beräkningsförutsättningarna uppdaterades beräkningarna, vilka analyseras nedan.

#### Justering av gränsv funktioner

Till en början utfördes beräkningar, som tidigare beskrivits, endast för gränsv funktionerna glidning och stjälpning. Vid de första analyserna upptäcktes att  $\beta_{\text{target}}$  för stjälpning och glidning blev olika, med betydligt högre värden för stjälpning (medel  $\beta_{\text{target}}$  8,6 för stjälpning jämfört med 4,6 för glidning, vilket motsvarar ca 6 tiopotenser i brottsannolikhet). Diskussion av dessa resultat fördes med referensgrupp samt expertgrupp där det framgick att:

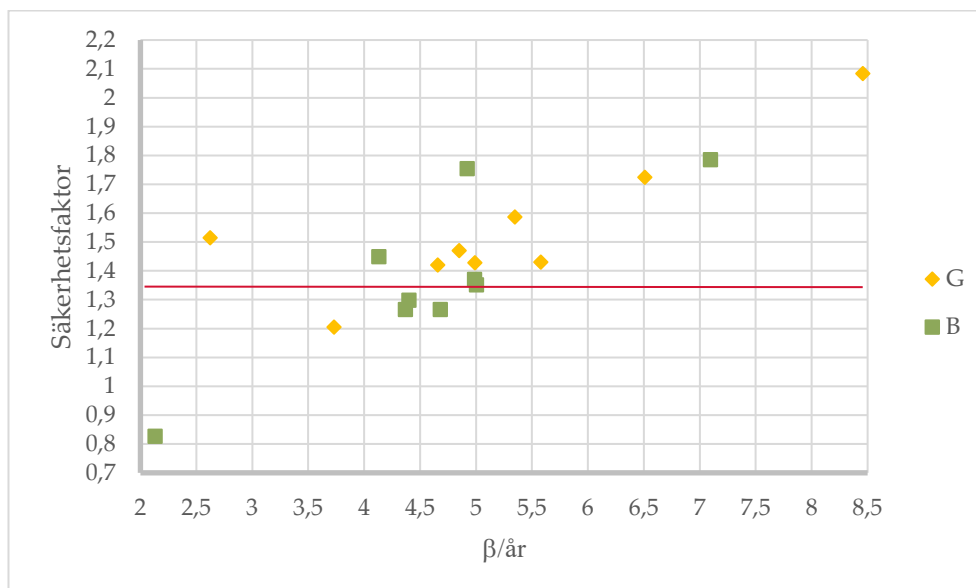
7. Det är möjligt att ha olika säkerhetskrav på olika felmoder, men det bör vara motiverat, t.ex. genom olika konsekvenser (så kan inte förutsättas i detta fall).
1. Då det är nominella värden som beräknas och beräknat säkerhetsindex är beroende av ingående parametrar och antaganden kan det tänkas att osäkerheter i glidfallet har överskattats och/eller osäkerheter i stjälpningsfallet har underskattats.
2. Den stora skillnaden kan tyda på att någon viktig parameter missats, alternativt att något fall inte är relevant.
3. Rekommenderad säkerhetsfaktor för stjälpning i nuvarande riktlinje är högre än säkerhetsfaktorn för glidning, vilket kan vara ett skäl till högre säkerhetsindex för stjälpning. Skälet till denna högre säkerhetsfaktor är inte känd, men den tros bero på relationen mellan stjälpning och nollspänning i uppströmskanten.
4. Det kan vara så att brottmoden stjälpning inte är lika väldefinierad t.ex. i och med att krossning eller bärrighetsbrott kan förväntas inträffa innan stjälpning gör det. Modellosäkerheten för stjälpning anser dock såväl författarna som expert- och referensgruppen vara större för glidning än för stjälpning.

5. Det är ologiskt att ansätta olika säkerhetskrav för olika felmoder för samma konstruktion. Det finns ingen anledning att konstruktionen ska ha högre säkerhet mot stjälpning än mot glidning eftersom konsekvensen kan antas likartad.
6. Det kan eventuellt vara möjligt att ersätta stjälpfallet med krav på att resultanten skall falla inom kärngränsen, d.v.s. att dragspänning inte ska uppkomma i uppströmskanten. Så har tidigare brottvillkor varit formulerade.

Med hänsyn till dessa delvis motstående synpunkter och oklara tolkningar genomfördes kompletterande beräkningar med ytterligare en gränsfunktion: överskridande av draghållfasthet i uppströmskanten (draghållfastheten sattes till noll, d.v.s. analysen gäller uppkomst av dragspänning). Uppkomst av dragspänning är i sig inte ett brottgränstillstånd; det kommer inte per automatik leda till att dammen går till brott. Dragspänning leder däremot till att sprickor kan formas i uppströmskanten och att fullt upptryck kan uppkomma i den spruckna delen, vilket genom progressiv sprickutveckling kan leda till instabilitet. Med hänsyn till detta tolkas dragspänning i uppströmskanten som ett "ställföreträdande brottgränstillstånd".

#### 4.2 RESULTAT AV BERÄKNINGAR EFTER JUSTERING AV UPPTRYCK SAMT GRÄNSFUNKTION

Figur 4-2 visar resultat av beräkningar efter justering av dilatationsvinkel samt upptryck.



Figur 4-2. Resultat av beräkning av glidstabilitet. G = gravitationsdamm, B = lamelldamm. Rött streck indikerar rekommenderad säkerhetsfaktor enligt RIDAS.

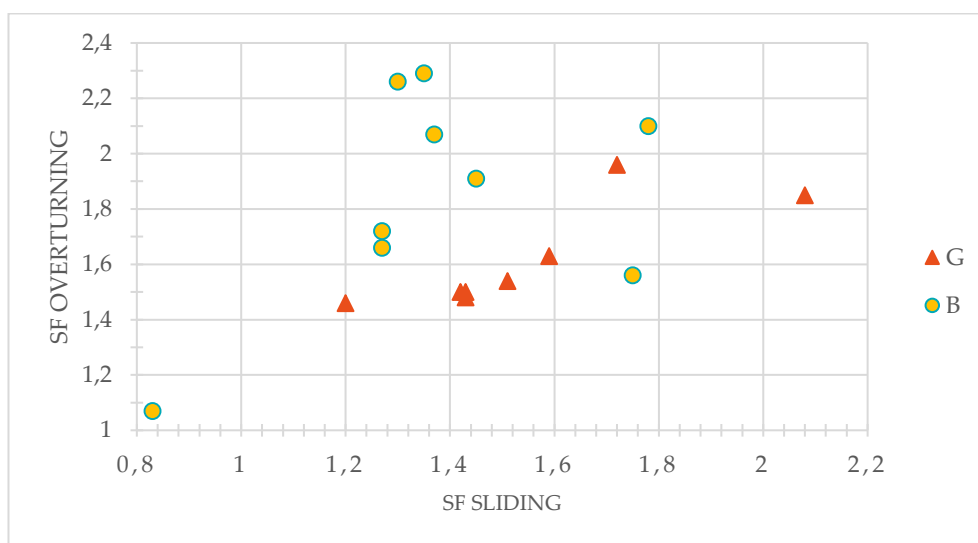
Figuren uppvisar en linjär trend mellan säkerhetsfaktor och  $\beta$ -värde. Det är dock stor spridning mellan resultaten i övrigt. För en damm med säkerhetsfaktor kring 1,35 (enligt rekommendationen i RIDAS) kan  $\beta$  variera mellan ca 4-5,5.

Resultaten visar också att säkerhetsfaktor över 1,5 inte heller behöver innebära att  $\beta$  är högt; för en av dammarna i beräkningen med säkerhetsfaktor 1,5 är  $\beta$  endast ca 2,5.

Samma  $\beta$ -värde betyder inte heller att dammarna har samma säkerhetsfaktor. Se t.ex.  $\beta = 4,8$  i Figur 4.1, vilket kan innebära säkerhetsfaktor mellan ca 1,25-1,75.

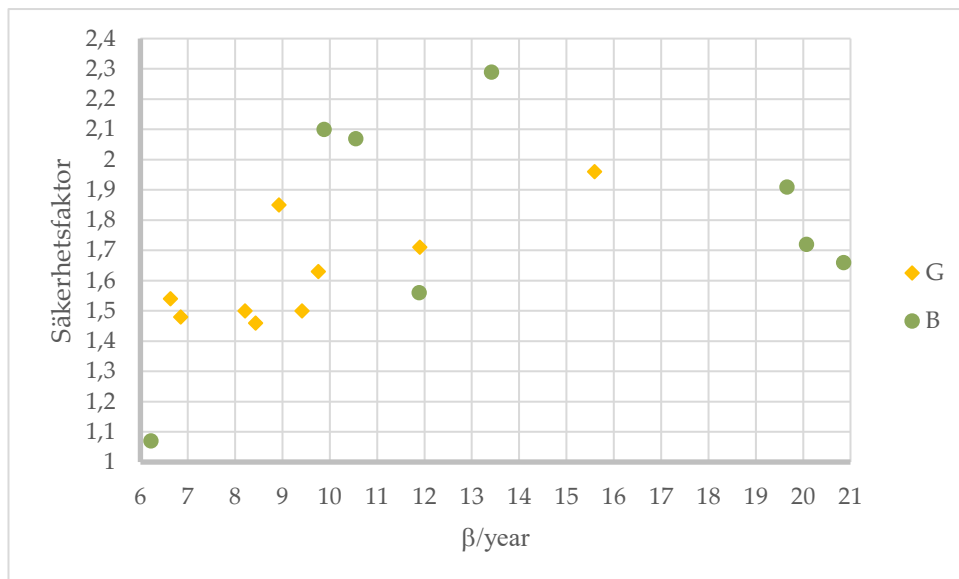
Medelvärde för  $\beta$  i figuren för samtliga resultat är i medel  $\beta = 4,9$ . Om de högsta värdena (som i princip motsvarar mycket höga säkerhetsfaktorer) och de lägsta värdena (motsvarande mycket låga säkerhetsfaktorer) bortses ifrån blir medelvärdet  $\beta = 4,8$  (spannet reducerat till 4,1-5,6).

Intentionen med de valda dammarna var att de skulle ha säkerhetsfaktorer i närheten av 1,35, men av olika anledningar visade det sig i praktiken svårt. I nästa avsnitt diskuteras detta mer i detalj och resultat av ytterligare justerade beräkningar redovisas. I Figur 4-3 visas relationen mellan säkerhetsfaktor i stjälpfallet och i glidfallet.



Figur 4-3. Resultat av beräkning av stjälpstabilitet. G = gravitationsdamm, B = lamelldamm.

Figur 4-4 visar resultat för beräkningar av stjälpning, efter justering av upptryck.



Figur 4-4. Resultat av beräkning av stjälpstabilitet. G = gravitationsdamm, B = lamelldamm.

Stjälpssäkerheten är mycket hög, även för låga säkerhetsfaktorer. Det är även relativt stor spridning; säkerhetsfaktor 1,5 ger  $\beta$  mellan ca 6,5 och 10. Lamelldammarna har generellt högre säkerhetsindex än gravitationsdammarna.

För stjälpning är medelvärdet av  $\text{medel}_\beta = 11,1$ . Om de lägsta och högsta värdena bortses ifrån blir  $\text{medel}_{\beta\text{mitt}} = 10,2$ .

#### 4.3 JUSTERING AV SÄKERHETSFAKTOR

Det ursprungliga urvalet av (bergrundlagda) dammar baserades, som tidigare beskrivet, på att deras säkerhetsfaktorer skulle ligga i närheten av 1,35 för glidning samt 1,5 för stjälpning. I praktiken visade det sig vara svårt att få till; vissa dammar hade en säkerhetsfaktor för glidning på ca 1,35 och betydligt högre än 1,5 för stjälpning. För vissa andra dammar var förhållandet det omvända. Ett antal monoliter har även spännstag installerade för att uppnå stabilitetsvillkoren. Vissa dammar har dränage, andra har det inte. För att få jämförbara värden gjordes därför "justeringar" så att dammarna precis skulle uppfylla stabilitetsrekommendationen. Justeringen gjordes genom att lägga på en "densitetsfaktor" (volymfaktor) på betongen i den deterministiska analysen för att få precis  $sf = 1,35$  i glidfallet (fall 1), 1,5 i stjälpfallet (fall 2) och nollspänning i uppströmskanten (fall 3). I de flesta fall blir densitetsfaktorn olika i fall 1, fall 2 och fall 3 (dvs ett av villkoren är dimensionerande) och analysberäkningarna har därvid gjorts för alla tre fallen.

För vissa av (gravitations) dammarna finns spännstag installerade, varvid en "inspänningsfaktor" lades på för att få  $sf = 1,35$  för glidning,  $sf = 1,5$  för stjälpning samt nollspänning i uppströmskanten.

För vardera damm har då beräkningsgången varit följande:

1. En justeringsfaktor  $F1$  läggs på betongvolym (om  $sf > 1,35$  är justeringsfaktorn  $< 1,0$ , om  $sf < 1,35$  är justeringsfaktorn  $> 1,0$ ),

2. Iterativ beräkning görs av eventuell spricka under konstruktionens uppströmssida. Spricklängd beräknas med hjälp av Navier's formel och en förenklad linjär spänningsfördelning antas.
3. Ytterligare justering görs av betongvolymen och spricklängd till dess att säkerhetsfaktorn 1,35 uppnås för glidfallet. Justeringsfaktor F1 och spricklängd används som indata i den sannolikhetsbaserade beräkningen och säkerhetsindex  $\beta$  för glidning beräknas.
4. Steg 1-3 upprepas men under förutsättning att säkerhetsfaktorn 1,5 för stjälpning ska uppnås. Justeringsfaktor F2 och spricklängd används som indata i den sannolikhetsbaserade beräkningen och säkerhetsindex för stjälpning beräknas.
5. En justeringsfaktor F3 läggs på betongvolymen och denna faktor justeras till dess att nollspänning fås i dammens uppströmskant (Navier's formel enligt ovan). Justeringsfaktorn F3 används som indata i den sannolikhetsbaserade beräkningen för att erhålla säkerhetsindex mot uppkomst av dragspänning.

#### 4.3.1 Resultat av beräkningar med justerad säkerhetsfaktor

Justeringen av säkerhetsfaktorer kan som beskrivet ovan göras på olika sätt. Här har justeringen gjorts genom att modifiera betongvolym. För de dammar där förspända stag finns har justeringen även gjorts på stagkraft. Resultatet för glidfallet visar att justeringsparameter inte spelar någon större roll för erhållet  $\beta$ -värde, se Tabell 4-1. Det finns en liten skillnad mellan  $\beta$ -värde justerat på stagkraft och  $\beta$ -värde justerat på betongvolym, men skillnaden är så liten att den inte påverkar slutresultatet i nämnvärd omfattning.

**Tabell 4-1. Resultat av glidstabilitet vid justering av förspänningskraft respektive betongdensitet.**

	Typ	Förspänning		Betong	
		sf	$\beta$	sf	$\beta$
Damm 4.1	G	1,33	4,41	1,34	4,71
Damm 4.2	G	1,35	4,99	1,34	5,07
Damm 5.1	G	1,33	4,09	1,35	4,23
Damm 5.2	G	1,33	3,80	1,33	4,08
Damm 5.3	G	1,33	4,03	1,33	3,80

Resultat av beräkningar där säkerhetsfaktorn justerats för att precis uppfylla rekommendationerna visas i Tabell 4-2.

Tabell 4-2. Resultat av beräkningar där betongvolymen justerats så att säkerhetsfaktorerna 1,35 samt 1,5 uppnås för glidning respektive stjälpning och spänningen blir noll i uppströmskanten för spänningsfallet. G = gravitationsdamm, B = lamelldamm.

			Glidning	Stjälpning	Spänning
	Dammtyp	höjd	$\beta$	$\beta$	$\beta$
Damm 1	G	15	3,82	15,62	0,01
Damm 2	G	15	3,87	9,22	1,34
Damm 3.1	G	17	4,79	8,67	1,86
Damm 4.1	G	10	4,71	4,22	0,58
Damm 4.2	G	18	5,07	9,85	1,87
Damm 5.1	G	26	4,23	8,04	-0,11
Damm 5.2	G	25	4,08	8,86	0,70
Damm 5.3	G	28	3,80	9,15	1,01
Damm 3.3	B	19	5,24	9,30	0,35
Damm 6.1	B	13	2,03	7,75	1,65
Damm 6.2	B	5,6	2,22	4,69	-
Damm 7.1	B	19	5,00	9,00	1,52
Damm 7.2	B	19	4,79	7,09	1,70
Damm 7.3	B	19	5,26	9,35	1,71
Damm 8.2	B	34	5,22	18,28	0,19
Damm 8.1	B	26,6	4,83	20,11	-1,23
Damm 9	B	40	5,22	22,34	1,58

Glidstabiliteten är relativt jämn om resultaten för damm 6 bortses i analysen. Det är rimligt att bortse från denna då det är den enda dammen i analysen som grundlagts på en naturlig yta (dvs ingen sprängning gjordes). Säkerhetsindex för övriga konstruktioner ligger mellan 3,87-5,26, vilket motsvarar en brottsannolikhet i intervallet  $5,4 \cdot 10^{-5}$ - $7,2 \cdot 10^{-8}$ .

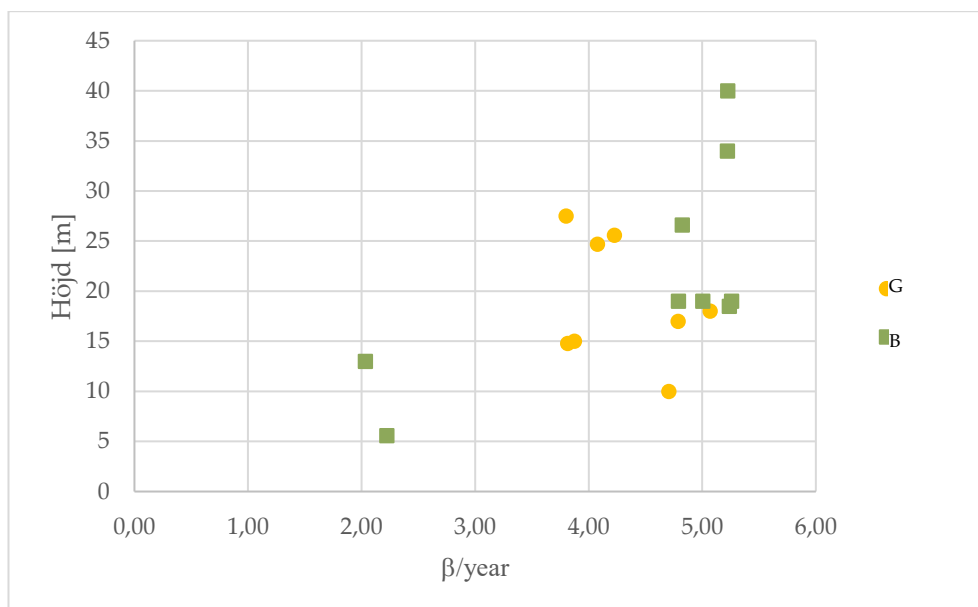
Det kan också konstateras att det är olämpligt att grundlägga på en naturlig, icke sprängd, yta (om damm 6.1 grundlagts på sprängd yta skulle  $\beta = 3,7$  erhållits) om detta inte beaktas i dammens dimensionering

Stjälpsäkerheten är för de flesta monoliter mycket hög. De som har lägst stjälpssäkerhet är de låga konstruktionerna (10 respektive 5,6 m höga). Dessa konstruktioner har en hög känslighet mot istryck, både istryckets variation och dess maximala värde. För de högre konstruktionerna är känsligheten mot islast mindre och den variabel som dominerar känslighetsanalysen är betongdensiteten.

För de högre konstruktionerna är brottsannolikheten mycket låg avseende stjälpning, med  $\beta$ -värden 7,1-9,8, motsvarande  $6 \cdot 10^{-13}$ - $5 \cdot 10^{-23}$ .

Spänningsanalysen visar att säkerhetsindex är relativt jämnt (-1,23 till 1,8, motsvarande sannolikhet för överträdelse ca 0,03-0,8). Fyra av dammarna har  $\beta_{\text{spänning}} < 0,5$ , sju har  $\beta_{\text{spänning}} > 1,5$ .

Tidigare analyser (Ahlsén & Holmberg, 2007) har indikerat att säkerhetsindex verkade avta med ökande höjd. Figur 4-5 visar relation mellan höjd och säkerhetsindex för de analyserade dammarna (justerade så att säkerhetsfaktorn är 1,35). De två lägsta värdena (kring 2) är relaterat till dammar grundlagda på icke-sprängd yta och bör ej beaktas. För övriga dammar syns ingen uppenbar skillnad mellan dammar av olika höjd, däremot noteras att det finns en spridning i  $\beta$ -värde för dammar av liknande höjd.



Figur 4-5. Relation mellan  $\beta$ -värde och höjd för glidning. G = gravitationsdammar, B = lamelldammar.

Känslighetsvärden för två gravitationsdammar (damm 4.2 och 5.1) samt en lamelldamm (damm 7.1) visas i Tabell 4-3. Vissa skillnader finns, men de följer samma mönster. Lamelldammen har naturligt mindre känslighet mot upptryck och egentyngd, men i övrigt är relationerna relativt lika mellan dammarna.

Tabell 4-3. Känslighetsvärden för två dammar i glidfallet. Positiva värden innebär att de verkar positivt (bärförmåga), negativa värden att de verkar negativt (lastparametrar).

Parameter	Beskrivning	Damm 4.2	Damm 5.1	Damm 7.1
$\beta(-)$	Beta-värde	5,1	4,2	5,0
H (m)	Dammhöjd	18	25,6	19
$\delta_c$	Betongdensitet	0,49	0,58	0,37
C	Upptryckskoefficient	-0,23	-0,31	-0,02
Ice	Islast	-0,41	-0,26	-0,49
Max (ice)	Parameter för trunkering av islastens maxvärde	-0,08	-0,01	-0,18
Tan ( $\phi_b$ )	Basfriktion kontaktyta	0,48	0,44	0,51
Tan ( $i_c$ )	Friktionsbidrag från kontaktytans råhet	0,55	0,55	0,58

#### 4.4 ANALYS AV $\beta$ -TARGET

Enligt Melchers (1999), JCSS (2001) med flera kan ett  $\beta_{\text{target}}$  kalibreras utgående från existerande praxis.

Processen för detta beskrivs i China Electricity Council (2000) och går kortfattat ut på att:

- Välja typiska konstruktioner och gruppera dem baserat på konsekvenser
- Välja en viktningskoefficient  $\omega_i$  för vardera konstruktioner i respektive konsekvensklass baserat på kostnad, användning m.m.  $\sum \omega_i = 1,0$ .
- Beräkna  $\beta_i$  för vardera konstruktion
- Beräkna ett viktat  $\beta_{\text{target}}$  utifrån  $\beta_T = \sum \beta_i \omega_i$  för vardera konsekvensklass

Det är önskvärt att göra en uppdelning på konsekvensklass, men i denna analys har endast två konsekvensklass 2-dammar ingått (damm 1 och damm 6). Utvärdering av dammarna görs enligt RIDAS med samma kriterier för konsekvensklass 1 som för lägre konsekvenser och därmed bör det inte finnas systematiska skillnader mellan konsekvensklass 1 och lägre konsekvensklasser (dock tillåts medräknande av slaka förankringar för lägre konsekvenser). Analys av  $\beta_{\text{target}}$  har därför inkluderat alla dammar. Uppdelning har dock gjorts för gravitationsdammar respektive lamelldammar och för felmoderna glidning respektive stjälpning.

Alla dammar har tilldelats samma viktningskoefficient, detta då det enligt rapportförfattarna inte finns skäl att vikta på annat sätt. Detta innebär att  $\beta_{\text{target}}$  med denna metodik sätts lika med medelvärdet av alla  $\beta$ -värden.

Det finns även en annan möjlighet till beräkning av det viktade  $\beta_{\text{target}}$ ; nämligen att basera det på viktad brottsannolikhet. Eftersom viktningsfaktorerna här satts lika innebär det att  $\beta_{\text{target,pf}}$  beräknas från medelvärdet av brottsannolikheten. Dammar med hög brottsannolikhet får med denna metodik betydande genomslag.

I den slutliga analysen nedan har en damm utelämnats, detta på grund av oklarheter i beräkningarna.

##### 4.4.1 Glidning

Resultat av de volymsjusterade beräkningarna för gränstillståndet glidning visas i Tabell 4-4. I tabellen redovisas resultat för de olika dammtyperna (gravitationsdammar överst och lamelldammar nederst). Säkerhetsfaktorn är för samtliga dammar enligt det som rekommenderas enligt RIDAS och justering för att nå detta värde har gjorts genom att öka eller minska betongvolym/densitet. Säkerhetsindex  $\beta$  och brottsannolikhet  $p_f$  visas. Även den parameter som är viktigast i känslighetsanalysen och dess storlek samt känslighet mot upptryck (C) redovisas.

I Tabell 4-5 visas analys av gravitationsdammarna och lamelldammarna för sig, samt analys av alla dammarna. Medelvärdet avser det aritmetiska medelvärdet, median avser medianvärdet. Med " $\beta$  baserat på  $p_f$ " avses det värde som fås då medel  $p_f$  och median  $p_f$  omräknas till  $\beta$ . Om någon damm har mycket hög brottsannolikhet påverkar det medelvärdet av  $p_f$  i stor utsträckning och " $\beta$  baserat på  $p_f$ " blir betydligt lägre än medelvärdet av  $\beta$ . Exempelvis blir medelvärdet för  $\beta=4,9$  (glidning, gravitationsdammar), men medelvärdet i  $p_f = 2,3 \cdot 10^{-5}$  vilket ger  $\beta_{pf} = 4,07$ .



Tabell 4-4. Resultat av beräkningar avseende glidning.

	höjd	Typ	sf	$\beta$	pf	Justeringsfaktor	Känslighetsanalys		
							dominerande parameter	storlek	storlek C
Damm 1	14,8	G	1,33	3,82		1,07	is	0,57	0,45
Damm 2	15	G	1,35	3,87	5,35E-05	1,03	tan ic	0,58	0,24
Damm 3.1	17	G	1,33	4,79	8,51E-07	0,99	tan ic	0,55	0,32
Damm 4.1	10	G	1,34	4,71	1,27E-06	1,15	is	0,55	0,16
Damm 4.2	18	G	1,34	5,07	1,99E-07	1,21	tan ic	0,55	0,23
Damm 5.1	25,6	G	1,35	4,23	1,18E-05	1,18	tan ic	0,55	0,31
Damm 5.2	24,7	G	1,33	4,08	2,29E-05	1,09	tan ic	0,56	0,31
Damm 5.3	27,5	G	1,33	3,80	7,21E-05	1,13	tan ic	0,56	0,42
Damm 3.3	18,5	B	1,33	5,24	8,16E-08	0,94	tan ic	0,59	0,16
Damm 6.1	13	B	1,33	2,03	2,10E-02	1,88	is	0,81	0
Damm 6.2	5,6	B	1,33	2,22	1,31E-02	0,8	is	0,92	0
Damm 7.1	19	B	1,35	5,00	2,82E-07	1,0	tan ic	0,58	0,02
Damm 7.2	19	B	1,33	4,79	8,34E-07	0,8	is	0,55	
Damm 7.3	19	B	1,35	5,26	7,24E-08	1,0	tan ic	0,5	0,02
Damm 8.2	34	B	1,33	5,22	8,95E-08	1,06	tan ic	0,63	0,16
Damm 8.1	26,6	B	1,33	4,83	7,00E-07	0,9	tan ic	0,67	0,18
Damm 9	40	B	1,35	5,22	8,80E-08	0,99	tan ic	0,66	0,03

Tabell 4-5. Sammanställning av resultat avseende glidning.

	Gravitationsdammar			Lamelldammar			Alla		
	$\beta$	$p_f$	$\beta_{pf}$	$\beta$	$p_f$	$\beta$ baserat på $p_f$	$\beta$	$p_f$	$\beta_{pf}$
min	3,80	2,0E-07		2,03	7,2E-08		2,03	7,2E-08	
max	5,07	7,2E-05		5,26	2,1E-02		5,26	2,1E-02	
medel	4,29	2,3E-05	4,07	4,42	3,8E-03	2,67	4,36	2,1E-03	2,86
median	4,15	1,2E-05	4,23	5,00	2,8E-07	5,00	4,79	8,3E-07	4,79
Bortsett från damm 6.1 och 6.2									
				$\beta$	$p_f$	$\beta$ baserat på $p_f$	$\beta$	$p_f$	$\beta$ baserat på $p_f$
min				4,79	7,2E-08		3,80	7,2E-08	
max				5,26	8,3E-07		5,26	7,2E-05	
medel				5,08	3,1E-07	4,99	4,66	1,2E-05	4,23
median				5,22	8,9E-08	5,22	4,79	7,7E-07	4,81

Analys av resultatet visar att två dammar (damm 6.1 och 6.2) som är grundlagda på naturlig (ej sprängd) yta får mycket låg glidstabilitet. Detta indikerar att grundläggning på en naturlig yta kan innebära risk för stabiliteten och att denna grundläggning därmed kräver extra stabiliserande åtgärder för att stabiliteten skall bli

tillfredsställande. Sprängning och anordning av ordentliga bergsklackar är att föredra för att få en tillfredsställande glidstabilitet.

För övriga dammar är glidstabiliteten relativt jämn,  $\beta$  varierar mellan 3,8-5,07 (skillnad knappt 3 tiopotenser i brottsannolikhet). Gravitationsdammarna har i allmänhet något lägre stabilitet än lamelldammarna, vilket troligtvis beror på deras större känslighet mot upptryck. Det kan också konstateras att samtliga av de lägre konstruktionerna har störst känslighet mot is, medan de högsta konstruktionerna har störst känslighet mot dilatationsvinkeln i kontaktytan (bidrag från råheten).

Om damm 6.1 och 6.2 utesluts ur analysen har lamelldammarna ett medelvärde på  $\beta = 5,12$  (5,03 om det baseras på medel av  $p_f$ ). Gravitationsdammarna har  $\beta = 4,3$  (4,07). För alla dammar ingående i studien fås ett medelvärde på  $\beta = 4,65$  (4,2).

Detta är i princip samma nivå som då medelvärdet togs av alla dammar inom intervallet [4,1-5,6] i avsnitt 4.2. Medelvärdet var då 4,8.

De säkerhetsklasser som finns i EKS (2015) kan kortfattat beskrivas som (referensperiod 1 år)

- Säkerhetsklass 3: stor risk för allvarliga personskador,  $\beta_{\text{target}} = 4,8$
- Säkerhetsklass 2: någon risk för allvarliga personskador,  $\beta_{\text{target}} = 4,3$
- Säkerhetsklass 1: liten risk för allvarliga personskador,  $\beta_{\text{target}} = 3,7$

Glidstabiliteten för beräknade betongdammars ligger därmed i linje med kraven enligt EKS (2015).

#### 4.4.2 Stjälpning

Resultat av volymsjusterade beräkningar för gränstillstånd avseende stjälpning visas i Tabell 4-6. I tabellen redovisas resultat för de olika dammtyperna (gravitationsdammars överst och lamelldammars nederst). Säkerhetsfaktorn är för samtliga dammar enligt det som rekommenderas enligt RIDAS och justering för att nå detta värde har gjorts genom att öka eller minska betongvolym/densitet. Säkerhetsindex  $\beta$  och brottsannolikhet  $p_f$  visas. Även den parameter som är viktigast i känslighetsanalysen och dess storlek samt känslighet mot upptryck redovisas.

I Tabell 4-7 visas analys av gravitationsdammarna och lamelldammarna för sig, samt analys av alla dammarna. Medelvärdet avser det aritmetiska medelvärdet, median avser medianvärdet. Med " $\beta$  baserat på  $p_f$ " avses det värde som fås då medel  $p_f$  och median  $p_f$  omräknas till  $\beta$ . Om någon damm har mycket hög brottsannolikhet påverkar det medelvärdet av  $p_f$  i stor utsträckning och " $\beta$  baserat på  $p_f$ " blir betydligt lägre än medelvärdet av  $\beta$ .

Tabell 4-6. Resultat av beräkningar avseende stjälpning.

	Höjd	Typ	sf	$\beta$	pf	Justeringsfaktor	Känslighetsanalys ( $\alpha$ -värden)		
							dominerande parameter	Storlek	Storlek C
Damm 1	14,8	G	1,50	15,62	2,66E-55				
Damm 2	15	G	1,51	9,22	1,44E-20	1,1	$\rho_c$	0,85	0,36
Damm 3.1	17	G	1,51	8,67	2,17E-18	1,05	$\rho_c$	0,83	0,19
Damm 4.1	10	G	1,50	4,22	1,22E-05	1,21	is, max is	0,7514	0,22
Damm 4.2	18	G	1,51	9,85	3,46E-23	1,35	$\rho_c$	0,81	0,35
Damm 5.1	25,6	G	1,50	8,04	4,49E-16	1,23	$\rho_c$	0,67	0,5
Damm 5.2	24,7	G	1,55	8,86	4,07E-19	1,15	$\rho_c$	0,76	0,51
Damm 5.3	27,5	G	1,51	9,15	2,79E-20	1,08	$\rho_c$	0,69	0,66
Damm 3.3	18,5	B	1,50	9,30	6,89E-21	0,49	$\rho_c$	0,76	0,13
Damm 6.1	13	B	1,50	7,75	4,74E-15	1,04	max is, is	0,5989	0,02
Damm 6.2	5,6	B	1,50	4,69	1,37E-06	1,88	is, max is	0,845	0,04
Damm 7.1	19	B	1,50	9,00	1,18E-19	0,71	$\rho_c$	0,76	0,09
Damm 7.2	19	B	1,50	7,09	6,56E-13	0,83	$\rho_c$	0,65	0,01
Damm 7.3	19	B	1,50	9,35	4,25E-21	0,82	$\rho_c$	0,74	0,01
Damm 8.2	34	B	1,50	18,28	5,75E-75	0,79			
Damm 8.1	26,6	B	1,50	20,11	3,07E-90	0,55	Upptryck	0	0,73
Damm 9	40	B	1,50	22,34	8,26E-111	0,54			

Tabell 4-7. Sammanställning av resultat avseende stjälpning.

	Gravitationsdammar			Lamelldammar			Alla		
	$\beta$	$p_f$	$\beta$ baserat på $p_f$	$\beta$	$p_f$	$\beta$ baserat på $p_f$	$\beta$	$p_f$	$\beta$ baserat på $p_f$
min	4,22	2,7E-55		4,69	8E-111		4,22		22,33
max	15,62	1,2E-05		22,34	1,4E-06		22,34		4,22
medel	9,20	1,5E-06	4,67	11,99	1,5E-07	5,12	10,67	8,0E-07	4,80
median	9,01	2,2E-19	8,93	9,30	6,9E-21	9,30	9,15	2,8E-20	9,15
Bortsett från låga dammar									
	$\beta$	$p_f$	$\beta$ baserat på $p_f$				$\beta$	$p_f$	$\beta$ baserat på $p_f$
min							7,09	8,3E-111	
max							22,34	6,6E-13	
medel							11,51	4,4E-14	7,46
median							9,22	1,4E-20	9,22

Säkerhetsindex för stjälpning blir väldigt hög för de flesta dammarna. Två låga dammar ger relativt låga säkerhetsindex.

Även resultat redovisade i avsnitt 4.2 (medel $\beta$  = 10,2) visar mycket höga  $\beta$ -värden för stjälpning.

Med hänsyn till dessa mycket höga värden konstaterades efter diskussion med referensgrupp och expertgrupp att analys även behövde göras av kärngränskravet, eller gränstillståndet som beskriver uppkomst av dragspänning i uppströmskanten.

#### 4.4.3 Dragspänning

Resultat av beräkningarna för gränstillstånd för uppkoms av dragspänning i Tabell 4-8 och Tabell 4-9. I Tabell 4-8 redovisas resultat för de två dammtyperna (gravitationsdammar överst och lamelldammar nederst). I samtliga fall har justering i de deterministiska beräkningarna genomförts så att spänningen i uppströmskanten är precis 0. Liksom för stjälpning och glidning har detta gjorts genom att öka eller minska betongvolym/densitet. Säkerhetsindex  $\beta$  och brottsannolikhet  $p_f$  visas.

I Tabell 4-9 visas analys av gravitationsdammar och lamelldammar var för sig, samt analys av alla dammarna. Observera att beteckningen  $p_v$  införts istället för  $p_f$ , detta då  $p_f$  står för "probability of failure". För uppkomst av dragspänning är det inte ett brott som uppkommer och därför används istället  $p_v$  som här står för "probability of violation of limit state". Medelvärde avser det aritmetiska medelvärdet, median avser medianvärdet. Med " $\beta$  baserat på  $p_v$ " avses det värde som fås då medel  $p_v$  och median  $p_v$  omräknas till  $\beta$ . Om någon damm har mycket hög  $p_v$  påverkar det medelvärdet av  $p_f$  i stor utsträckning och " $\beta$  baserat på  $p_v$ " blir betydligt lägre än medelvärdet av  $\beta$ .

**Tabell 4-8. Sammanställning av resultat för uppkomst av dragspänning.**

Damm	Typ	höjd	$\beta$	$p_v$
Damm 1	G	14,8	0,01	0,496
Damm 2	G	15	1,34	0,0906
Damm 3.1	G	17	1,86	0,0318
Damm 4.1	G	10	0,58	0,283
Damm 4.2	G	18	1,87	0,0309
Damm 5.1	G	25,6	-0,11	0,546
Damm 5.2	G	24,7	0,70	0,243
Damm 5.3	G	27,5	1,01	0,157
Damm 3.3	B	18,5	0,35	0,362
Damm 6.1	B	13	1,65	0,0498
Damm 6.2	B	5,6	-	-
Damm 7.1	B	19	1,52	0,0649
Damm 7.2	B	19	1,70	0,0450
Damm 7.3	B	19	1,71	0,0433
Damm 8.2	B	34	0,19	0,426
Damm 8.1	B	26,6	-1,23	0,891
Damm 9	B	40	1,58	0,0575

Tabell 4-9. Sammanställning av resultat för uppkomst av dragspänning.

	Gravitationsdammar			Lamelldammar			Alla		
	$\beta$	$p_f$	$\beta$ baserat på $p_v$	$\beta$	$p_f$	$\beta$ baserat på $p_v$	$\beta$	$p_f$	$\beta$ baserat på $p_v$
min	-0,114	0,03		-1,23	0,04		-1,23	0,03	
max	1,868	0,55		1,71	0,89		1,87	0,89	
medel	0,90425	0,23	7,2E-01	0,93	0,24	0,70	0,92	0,24	0,71
median	0,8515	0,20	8,4E-01	1,55	0,06	1,54	1,17	0,12	1,16
Bortsett från damm 5.1 och 8.1 som ger väldigt låga resultat									
				□			$\beta$	$p_f$	$\beta$ baserat på $p_v$
min							0,19	0,03	1,87
max							1,87	0,89	-1,23
medel							1,23	0,20	0,85
median							1,52	0,08	1,42

Det kan konstateras att dammarna uppvisar förhållandevis jämna  $\beta$  avseende uppkomst av dragspänning. Det är inte klarlagt varför några konstruktioner får väldigt låga säkerhetsindex avseende detta, men det kan tänkas att en noggrannare analys är nödvändig i de fall då låga värden uppkommer.

Medelvärde av  $\beta$  är i ovanstående beräkningar ca 1,2. Detta är lågt för ett vanligt brottgränstillstånd, men då detta är ett "ställföreträdande brottgränstillstånd" som i sig inte innebär brott bedöms det som acceptabelt.

#### 4.4.4 Diskussion kring resultat

För glidning förefaller resultaten rimliga. Det finns en variation mellan de olika dammtyperna som sannolikt beror på gravitationsdammarernas större känslighet mot upptryck.

Gällande stjälpstabilitet är säkerhetsindex i de flesta fall mycket högt och det är inte möjligt eller lämpligt att ställa krav på så höga säkerhetsindex.

Genomgång av det "styrande" villkoret för vardera damm visar att:

- I den deterministiska analysen är det antingen spänningskravet eller glidkravet som är styrande (samtliga fall utom för damm 1, där det är stjälpning, i två ytterligare fall uppkommer stjälpning och spänningskriteriet samtidigt). Med styrande menas det villkor som först uppkommer, baserat på justeringsfaktor. Det lastfall som har störst justeringsfaktor antas uppkomma först. Om justeringsfaktorerna för glidning, stjälpning och spänning som exempel blir 0,9 (glidning); 1,0 (stjälpning); 1,1 (spänning) antas spänningsvillkoret först uppkomma.
- I den sannolikhetsbaserade beräkningen är det glidning eller spänning som är styrande (d.v.s. ger lägre  $\beta$ -värde än  $\beta_T = 4,8$  som definierats ovan). I ett fall är det både stjälpning och spänning som är styrande.

Sammantaget innebär analysen av de styrande faktorerna och de mycket höga säkerhetsindex som fås för stjälpning att stjälpfallet sannolikt inte är dimensionerande.

I de allra flesta fall fångas stjälpstabiliteten in i analysen av dragspänning i uppströmskanten.

Med hänsyn till att denna analys är av begränsad omfattning kan det inte uteslutas att det kan finnas fall där stjälpning är dimensionerande även vid den sannolikhetsbaserade beräkningen. Säkerhetsindex för stjälpning bör därvid analyseras på samma vis som för glidning, d.v.s. med samma säkerhetsindex.

#### 4.5 MÖJLIGHET TILL JUSTERING AV $\beta_{\text{TARGET}}$ UTIFRÅN KONSEKVENSKLASSER

I SS-EN 1990 görs uppdelning av konstruktioner för olika konsekvensklasser. Som beskrivet ovan har detta inte varit möjligt här då endast två konsekvensklass 2-dammar ingick och den deterministiska analysen utgår från samma rekommendationer för klass 1 som för klass 2.

Utgångspunkten i SS-EN 1990 och även i JCSS (2001) gällande olika säkerhetsklasser är att brottsannolikheten ska spegla konsekvenserna. Tabell 4-9 visar  $\beta_{\text{target}}$  för olika säkerhetsklasser enligt EKS (Boverkets föreskrifter och allmänna råd om tillämpning av europeiska konstruktionsstandarder (eurokoder)).

Tabell 4-10.  $\beta_{\text{target}}$  för säkerhetsklasser enligt EKS.

Säkerhetsklass	$\beta_{\text{target}}$	$p_f$
Säkerhetsklass 3	4,8	$10^{-6}$
Säkerhetsklass 2	4,2	$10^{-5}$
Säkerhetsklass 1	3,7	$10^{-4}$

Det kan noteras att det därmed skiljer en tiopotens mellan den högsta säkerhetsklassen och den näst högsta, och att det skiljer ytterligare en tiopotens mellan den näst högsta och den lägsta.

##### 4.5.1 Förslaget $\beta_{\text{target}}$ baserat på beräkning och differentiering av konsekvensklasser

Baserat på beräkningarna ges här förslag på  $\beta_{\text{target}}$ . Det måste noteras att detta förslag endast är baserat på de beräkningar som hänvisas till i denna rapport. Det kan mycket väl finnas andra avvägningar som bör göras innan ett  $\beta_{\text{target}}$  definieras, t.ex. detaljerade analyser av konsekvenser.

Det är inte heller självklart att medelvärdet av  $\beta$  för de beräknade dammarna ska sättas som  $\beta_{\text{target}}$ . Det är även möjligt att sätta  $\beta_{\text{target}}$  som ett lägre värde, detta med utgångspunkt ifrån att alla dammar enligt nuvarande rekommendationer anses tillräckligt säkra och att därmed de flesta bör vara säkra även enligt en sannolikhetsbaserad metodik. Att sätta medelvärdet innebär per definition att hälften av alla analyserade dammar hamnar under  $\beta_{\text{target}}$ . Det är viktigt att understryka att det inte innebär att alla dessa dammar borde förstärkas, utan snarare att denna nivå är lämplig för nya konstruktioner. För befintliga dammar där resultatet av en beräkning ger ett  $\beta$ -värde lägre än  $\beta_{\text{target}}$  bör ytterligare analys utföras. Om erhållet värde för en befintlig damm är långt under det rekommenderade bör vidare åtgärder vidtas.

För de volymsjusterade dammarna för glidfallet var resultatet  $\beta = 5,12$  för lamelldammarna (medel av  $\beta$ , 5,03 om det baseras på medel av  $p_f$ ) och  $\beta = 4,3$  för gravitationsdammarna (medel av  $\beta$ , medel av  $p_f$  gav 4,07). För alla tillsammans fås

medelvärde på  $\beta = 4,65$  (4,2). Utan volymsjustering var medelvärdet på  $\beta = 4,82$  (4,9 då alla togs med).

Med utgångspunkt från att flertalet av de analyserade dammarna tillhör konsekvensklass 1 (dammsäkerhetsklass B) bör det vara möjligt att ansätta erhållet  $\beta$ -värde som rekommenderat  $\beta_{\text{target}}$  för denna konsekvensklass. Värden i SS-EN 1990 överensstämmer i hög grad med resultaten av denna analys. Det förefaller därför mer lämpligt att hålla samma nivå som i SS-EN 1990. Med denna utgångspunkt anses det rimligt att ansätta  $\beta_{\text{target}} = 4,8$  för dammar i dammsäkerhetsklass B.

Vidare anser författarna att en differentiering av brottsannolikhet för betongdammar i olika dammsäkerhetsklasser bör göras på likartat vis som i SS-EN 1990 och att dammar i dammsäkerhetsklass A bör ha högre säkerhet än enligt EKS. Med detta angreppssätt föreslås erforderliga värden på  $\beta_{\text{target}}$  för betongdammar enligt följande:

**Tabell 4-11. Möjligt  $\beta$ -värde för betongdammar. Referensperiod 1 år.**

Dammsäkerhetsklass	Brottgränstillstånd (glidning och stjälpning)
A	5,2
B	4,8
C	4,2

För det ställföreträdande brottgränstillståndet dragspänning i uppströmskanten rekommenderas  $\beta_{\text{target}} = 1,3$  för samtliga dammsäkerhetsklasser.

Det beskrivs även i PMCD att nya konstruktioner bör designas för en klass högre, om det inte kan visas att det är fullständigt obefogat. Vid byggande är extrakostnaderna för att uppnå en högre säkerhet små i relation till de kostnader som uppkommer då åtgärder vidtas i efterhand. Då förutsättningar för t.ex. konsekvensklassning kan ändras med tiden bör detta beaktas i samråd med dammägaren.

## 5 Diskussion

I följande delkapitel diskuteras PMCD-kodens giltighet, förväntad nytta samt möjliga svårigheter vid framtida implementering. Det ges även en kortare sammanfattning av de punkter där stora oklarheter finns och där fortsatt forskning bedöms nödvändig.

En viktig punkt som inte nog kan understrykas är att de svårigheter och oklarheter som beskrivs nedan är inbyggda i nuvarande riktlinje RIDAS, men det "märks" inte lika tydligt då det "göms" av säkerhetsfaktorn. Med detta menar vi att det i nuvarande rekommendationer byggts in ett antal oklarheter och osäkerheter där antaganden gjorts (förhoppningsvis på "säker sida"), och sedan hanteras med en "stor" säkerhetsfaktor. I PMCD har vi försökt ge bakgrund och motiv till varför en parameter bör beskrivas på ett visst sätt och varför vissa antaganden om statistisk fördelning bör ansättas. De frågetecken som fanns redan innan kvarstår i större eller mindre utsträckning fortfarande då frågeställningen är densamma. Ett exempel är islasten som i RIDAS sätts till 50-200 kN/m, men där bakgrunden till detta är höjd i dunkel (teorier om bakgrund finns). Det har inte varit möjligt att lösa dessa frågor inom ramen för projektet, men däremot har den utförda analysen identifierat vilka parametrar som är de mest kritiska och vilka frågor som viktigast att besvara.

På samma sätt som andra dimensioneringsriktlinjer/rekommendationer så utgår vi i PMCD från att dimensionering och byggande utförs på ett fackmannamässigt vis. Mänskliga fel kan naturligtvis uppkomma, men det är inte rimligt att vid dimensionering ta hänsyn till det som brukar kallas "gross errors", utan detta måste hanteras genom en granskningsprocess vid projektering/analys samt en kontrollprocess vid genomförande av ny/ombyggnad. Det är även av yttersta vikt för bibehållen stabilitet och uppfyllande av säkerhetsnivå att dammarna underhålls på ett adekvat sätt.

### 5.1 ERFARENHETER FRÅN BERÄKNINGAR OCH KALIBRERING

Något som varit tydligt i analys av beräkningsresultat är att säkerheten inte är jämn och att samma säkerhetsfaktor därmed kan innebära väldigt olika säkerhetsindex (exempelvis gav 1,35 i glidstabilitet  $\beta = 4-5,5$  vilket motsvarar brottsannolikhet  $3 \cdot 10^{-5}$ - $2 \cdot 10^{-8}$ ). I förstudien (Westberg Wilde & Johansson, 2012) beskrevs följande komponenter för en god dammsäkerhet:

- Att dammarna har en tillräcklig säkerhet
- Att dammarna har en jämn säkerhetsnivå (oberoende av dammtyp och höjd)
- Goda beslutsunderlag som kan användas för att prioritera åtgärder på ett sätt som ger största möjliga riskreduktion i relation till kostnader.

Om den deterministiska analysen gav ett bra beslutsunderlag skulle hög säkerhetsfaktor ge högt  $\beta$  (låg brottsannolikhet) och låg säkerhetsfaktor ge lågt  $\beta$ . Detta illustreras i Figur 5-1. Om en hög säkerhetsfaktor leder till ett  $\beta$  som är lågt innebär detta att säkerheten är lägre än önskat, trots att den deterministiska analysen påvisat en god säkerhetsnivå. Detta kan då innebära att åtgärder inte vidtas som egentligen skulle behöva vidtas. En låg säkerhetsfaktor kan även resultera i ett  $\beta$  över  $\beta_{\text{target}}$ , vilket innebär att åtgärder inte behöver genomföras i samma utsträckning som den deterministiska analysen visar.



I Figur 5-2 visas förhållandet mellan  $s_f$  och  $\beta$  i glidfallet för de analyserade dammarna i sin verkliga utformning (dammarna med förspänning är förspända, alla volymfaktorer är 1). Figuren visar att av de analyserade dammarna ligger tio i det godtagbara området (högra röda rektangeln). En av dessa kan dock noteras extra då den har mycket hög säkerhetsfaktor och trots detta ett säkerhetsindex på bara strax över 4,8.

Övriga dammar är i ej godtagbart område (vänstra röda rektangeln). För tre av dessa är säkerhetsfaktor såväl som säkerhetsindex strax under det godtagbara. Med fördjupad analys, undersökning av viktiga parametrar och eventuellt användning av Bayesiansk uppdatering är det troligt att den beräknade säkerheten på dessa, genom minskad osäkerhet, kan ökas.

En damm har klart lägre säkerhetsfaktor än 1,35 vilket innebär att ett lågt  $\beta$  är väntat. Två dammar har säkerhetsfaktor klart över 1,35 och trots detta väsentligt lägre säkerhetsindex än 4,8, vilket särskilt bör noteras.

Eftersom  $\beta_{target}$  satts som medelvärdet av alla erhållna  $\beta$ -värden så är det naturligt att flera av de analyserade dammarna hamnar i ej godtagbart område. Enligt diskussionen under 4.5.1 innebär inte detta automatiskt att befintliga dammar som får  $\beta$ -värde under 4,8 bör förstärkas, utan att de bör analyseras mer noggrant. För nya konstruktioner bör  $\beta_{target}$  uppfyllas.

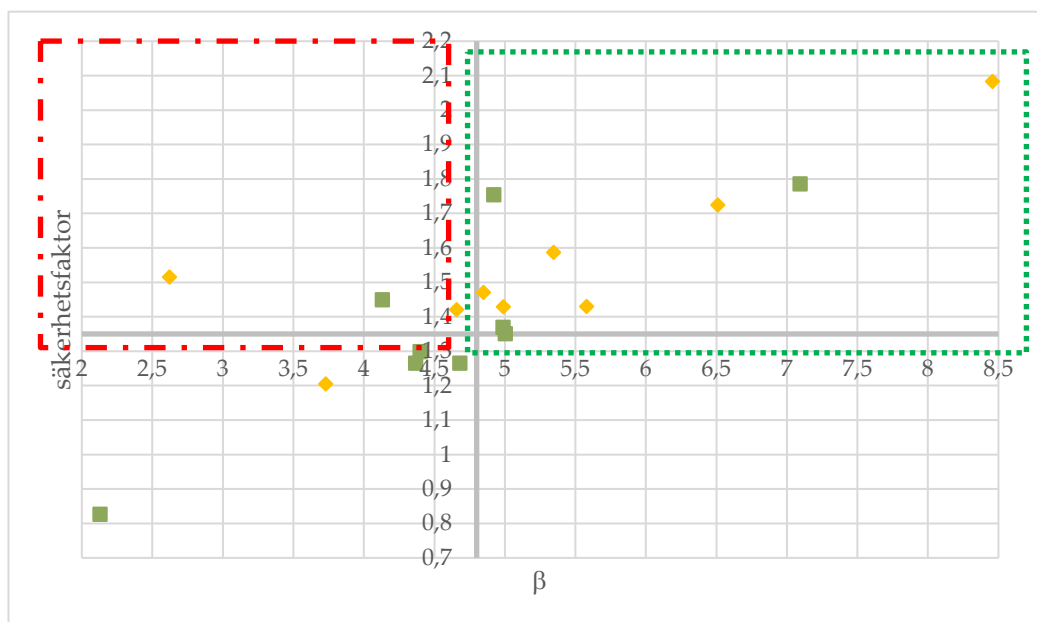
Det är uppenbart att det för de flesta dammarna finns ett någorlunda linjärt samband mellan säkerhetsfaktor och säkerhetsindex, men det är också uppenbart att det inte gäller för samtliga konstruktioner. Analys av de två konstruktioner som har högre säkerhetsfaktor än 1,35, men lägre säkerhetsindex än 4,8 visar att båda dessa är skibordsdammar. Gravitationskonstruktionen har skibord och pelare som är sammangjutna, denna konstruktion är ca 15 m hög. Lamellkonstruktionen är en hög friliggande skibordskonstruktion. Gemensamt för båda dessa konstruktioner är att de är förhållandevis lätta och att de har vertikalt verkande vattenlast.

För övriga konstruktioner kan säkerheten betraktas som mycket god. Det kan dock konstateras att säkerhetshöjande åtgärder med spännstag är överdrivna med hänsyn till glidning för några konstruktioner då  $\beta$  för åtminstone tre konstruktioner är klart över  $\beta_{target}$  (för dessa är  $\beta > ca 5,5$ ).

Sammantaget tyder analysen på att den deterministiska beräkningen ger olika säkerhetsnivå och att alla dammar därmed inte når en tillräckligt låg brottsannolikhet, alternativt att onödigt stora förstärkningsåtgärder i vissa fall utförs.



Figur 5-1. Schematisk bild över betydelsen av förhållandet mellan  $\beta$  och säkerhetsfaktor.



Figur 5-2. Förhållande mellan  $\beta$  och säkerhetsfaktor i glidfallet för analyserade dammar, faktisk förspänning/dränage inkluderad. Gravitationsdammarna visas med grön kvadrat, lamelldammarna med gul romb. Axlarna skär på 1,35 (säkerhetsfaktor) samt 4,8 ( $\beta_{target}$ ). Område som är godtagbart med hänsyn till  $\beta$  visas med grön prickad linje. Område som är godtagbart med hänsyn till säkerhetsfaktor men ej med hänsyn till  $\beta$  visas med röd streck-prickad linje.

## 5.2 FÖR- OCH NACKDELAR SAMT BEGRÄNSNINGAR

Efter genomfört projekt anser vi att det går att säga att sannolikhetsbaserade beräkningar går att utföra på ett systematiskt sätt för betongdammar.

En sannolikhetsbaserad beräkning kan förväntas ge ett svar på om konstruktionen är tillräckligt säker. Det går även att inkorporera analysvaret i en kvantitativ (eller

kvalitativ) riskanalys, även om det då är viktigt att notera att beräkningarna resulterar i nominella värden på brottsannolikhet och inte faktiska.

Vid analys har vi sett tydliga tecken på att de analyserade konstruktionerna kan hamna både långt över och under önskvärd maximal brottsannolikhet då dimensionering görs med säkerhetsfaktorer. Den sannolikhetsbaserade metodiken minskar risken för att konstruktionen bedöms som säkrare än den egentligen är.

Genom identifiering av de viktigaste parametrarna kan åtgärder sättas in där de ger mest effekt. I vissa fall är det bättre att undersöka egenskaper hos t.ex. berg och uppdatera rekommenderade statistiska fördelningar jämfört med att spänna fast en konstruktion. Den beräknade säkerheten kan ökas genom att minska osäkerheten.

Förutom bättre bedömning av faktisk säkerhet och möjlighet till mer effektiva åtgärder finns det även en drivkraft hos dammägare att bättre känna sina konstruktioner och deras svagheter. En sannolikhetsbaserad metodik ger sådana möjligheter.

Med utgångspunkten att våra dammar i nuläget är "i genomsnitt säkra" och en definition av  $\beta_{\text{target}}$  utifrån detta kommer en del dammar som idag anses tillräckligt säkra att betraktas som mindre säkra än vad som är önskvärt. Detta innebär inte att dessa i första hand bör förstärkas, utan snarare att vidare utredningar kan behövas. För dessa dammar kan en kostnads-nyttanalyser av förstärkning kontra inte förstärkning vara nödvändig. Det kan noteras att det i Nederländerna utförts denna typ av analyser med jämförelse mellan säkerhetsindex för nya kontra existerande konstruktioner där kostnads-nyttanalyser visat att säkerheten för existerande konstruktioner är ca  $\beta(\text{ny konstruktion})-1,5$ . Detta kan dock inte användas rakt av, utan vidare analyser behöver utföras för existerande konstruktioner som inte uppfyller  $\beta_{\text{target}}$  fullt ut.

För nybyggnad bör högre krav övervägas och det rekommenderas i PMCD att minst en klass högre  $\beta$ -värde bör väljas. Syftet med detta är att säkerställa tillräcklig säkerhet mot framtida justeringar, samt att säkerställa tillräcklig säkerhet om konsekvensklassningen i framtiden ändras. Vid nybyggnad är det relativt sett billigt att höja säkerheten jämfört med de kostnader som uppkommer vid förstärkningsåtgärder efter idrifttagning.

Nackdelar med en sannolikhetsbaserad metodik är att den är något mer omfattande och att kunskap om beräkningsmetodiken är begränsad i branschen i dagsläget.

I nuvarande utformning gäller PMCD endast för brottgränstillstånd för lamellkonstruktioner och gravitationskonstruktioner som grundlagts på berg.

### 5.3 IMPLEMENTERING

Framtagandet av PMCD har påvisat ett flertal områden där kunskapen är otillräcklig. Denna kunskapsbrist/informationsbrist finns även med i den deterministiska analysen, men döljs "effektivt" av säkerhetsfaktorn. Med den deterministiska metodiken läggs en säkerhetsfaktor på alla laster, oberoende av om de har en osäkerhet eller inte. En sannolikhetsbaserad metodik tar bättre hänsyn till de faktiska osäkerheterna.

I en sannolikhetsbaserad metodik möjliggörs även att inkorporera information från provning på ett tydligt sätt och osäkerheter kan därmed minskas genom ökad kunskap. Vi anser därför att det är önskvärt att sannolikhetsbaserade beräkningar utförs för betongdammar, åtminstone i vissa fall. Som exempel kan det vara lämpligt att göra analyser då den deterministiska analysen visat att åtgärder krävs, detta för att verifiera

den slutsatsen, identifiera effektiva åtgärder samt att säkerställa att en tillräcklig åtgärd sätts in. Även vid standardmässiga stabilitetsanalyser kan det vara fördelaktigt att göra en sannolikhetsbaserad analys, då den utgör ett komplement till den deterministiska analysen genom att den möjliggör identifiering av faktorer som tidigare blivit förbisedda.

Vi anser att det för vissa dammar, särskilt i högre konsekvensklasser, är önskvärt att utföra sannolikhetsbaserad beräkning då befintlig säkerhetsnivå är osäker eller inför beslut rörande dammsäkerhetshöjande åtgärder.

Analysen är något mer omfattande än endast en deterministisk analys. Till en början är det mest effektiva att först göra en deterministisk beräkning och sedan, baserat på denna upprätta ekvationer för gränsfunktionen och definiera variabler (t.ex. är flertalet volymer för betong, vatten, upptryck m.m. desamma), för att slutligen göra den sannolikhetsbaserade analysen. På detta sätt kommer även bättre kunskap byggas upp om kopplingen mellan en deterministisk och en sannolikhetsbaserad analys, vilket kommer kunna möjliggöra en framtida utveckling av PMCD.

Det är nödvändigt att utföraren av en sannolikhetsbaserad beräkning har kunskap inom dimensioneringsmetodik och förstår bakgrunden och innebörden av en sannolikhetsbaserad beräkningsmetodik. För att möjliggöra sannolikhetsbaserade beräkningar rekommenderas därför en utbildningsinsats inom branschen.

Lämpliga steg i en implementering kan vara att göra "skarpa" analyser av några dammar, t.ex. där förstärkningsåtgärder är tänkta att utföras. Syfte med detta är att ytterligare samla kunskap kring PMCD samt att påvisa metodens användbarhet.

Som ytterligare steg har diskuterats att vid kommande branschträffar (tex SVC-dagarna) ha seminarium och eventuellt en workshop för att sprida kunskapen om sannolikhetsbaserad bedömning till en vidare skara.

#### 5.4 MÖJLIGHET ATT INFÖRA PARTIALKOEFFICIENTER

Gustafsson et al. (2008) ställer sig tveksamma till möjlighet att införa partialkoefficienter för betongdammar grundlagda på berg, eftersom varje damm är unik. Sensitivitetsfaktorerna kan variera med de faktiska förhållandena i grunden. I vissa fall har jords eller bergs egenskaper en mycket stor påverkan på konstruktionens brottsannolikhet och i andra fall en mindre påverkan vilket *"leder detta till att användande av fasta partialkoefficienter såsom rekommenderas i Eurocode inte låter sig göras utan en rejäl överdimensionering"*. Det är även värt att notera att det med denna skrivning i åtanke är olämpligt att använda en och samma säkerhetsfaktor för att hantera alla osäkerheter (så som rekommenderat i RIDAS).

I föreliggande arbete har noterats att det visserligen är skillnader i sensitivitetsfaktorer, men de får ändå betraktas som mindre än författarna i förväg förväntat och tidigare analyser pekat på.

Ett examensarbete har utförts (Wängberg, 2015) där de i detta projekt räknade dammarna användes för att ta fram partialkoefficienter för dammar. Målet med examensarbetet var att undersöka möjligheten att kalibrera fram partialkoefficienter för stabilitetsanalys av betongdammar med avseende på glidstabilitet med hjälp av sannolikhetsbaserade metoder. Säkerhetsnivån som användes var  $\beta_{\text{target}} = 4,6$ .

Slutsatsen var att de höga osäkerheterna i några av variablerna, t.ex. islast, resulterade i att partialkoefficienten för dessa variabler blev dominerande. Nästan hela säkerhetsmarginalen från säkerhetsfaktorn i RIDAS översattes till en partialkoefficient på den enskilda variabeln (för islast) vilket medförde att de andra variablernas partialkoefficienter närmade sig ett. Bättre kunskap kring islast för att minska osäkerheterna är därför nödvändigt för att kalibrera fram partialkoefficienter med sannolikhetsteori. Det konstaterades att det även skulle vara intressant att undersöka flera lastfall där islast inte ingår och studera resultatet. Stora skillnader i resultat av partialkoefficienter märktes även utifrån dammarnas egenskaper och utförande.

I ett annat examensarbete (Broberg & Thorwid, 2015) togs partialkoefficienter fram genom en anpassning så att RIDAS och Eurokoderna gav likartade resultat. Partialkoefficienterna i Eurokoderna kunde på så sätt modifieras. Det konstaterades att resultaten av lasterna måste användas, att olika partialkoefficienter behövs för glidning och stjälpning och att det därför skulle finnas utrymme för många misstag i beräkningen. Denna metodik för framtagning av partialkoefficienter kan vara möjlig. Det vanliga tillvägagångssättet är dock liknande det som utfördes av Wängberg (2015) där partialkoefficienterna tas fram baserat på en sannolikhetsbaserad metodik. Med den metoden är det möjligt att någorlunda korrigera en ojämn säkerhetsnivå.

Från branschen finns önskemål om att ta fram en partialkoefficientbaserad riktlinje, men det är nödvändigt att för- och nackdelar först analyseras. Fördelar som metodiken bör ge är exempelvis enkelhet i analys och att den överensstämmer med Eurokoderna. Nackdelar kan vara att även den, likt den deterministiska, kan ge en ojämnhet i säkerhetsnivå och eventuell överdimensionering, detta om känslighetsvärden för vissa parametrar skiljer mellan olika dammar. Från expertgruppen ges även rekommendationer att se över möjlighet att för denna typ av unika konstruktioner istället för att införa partialkoefficientmetoden använda den sannolikhetsbaserade metodik som beskrivs i PMCD. Som beskrivs i inledningen syftar bedömningen av dammen till att fatta beslut kring om den är tillräckligt säker eller ej. Detta beslut fattas under osäkerhet (ibland stor, ibland mindre) och det är lämpligt att då på ett systematiskt sätt undersöka vad som är känt, vad som inte är känt och fatta beslutet på ett så bra underlag som möjligt. En sannolikhetsbaserad metodik tillhandahåller ett bra beslutsunderlag.

I nuläget förefaller det bästa alternativet vara att ta reda på mer information kring islast för att minska osäkerheter i bedömning av dessa. Efter detta kan det göras en vidare analys av möjlighet att införa partialkoefficienter.

## 5.5 FORTSATT FORSKNING

I diskussionen ovan nämns ett antal olika forskningsfrågor som är viktiga inom detta område. De faktorer som vi bedömer som mest viktiga är:

- Islasten. Hur ser den statistiska fördelningen ut? Hur stort är maxvärdet?
- Effekt av dränage, modell för igensättning av dränage.
- Variationskoefficient för upptrycket.

Vidare bör det noteras att beräkningarna har utgått ifrån ett begränsat urval av dammar och att det därmed kan finnas skäl att göra fortsatta analyser. Framförallt bör fokus då ligga på "andra typer" av konstruktioner, som t.ex. låga dammdelar och utskov.

## 5.6 BESLUT FÖR BRANSCHEN

Gällande några frågeställningar är det nödvändigt med branschgemensamma beslut.

Islast har under en längre period varit en last som leder till omfattande åtgärder, samtidigt som det varit välkänt att kunskapsläget är alltför dåligt. Nu pågår ett arbete med syfte att driva denna fråga framåt och resultatet av detta projekt styrker ytterligare behovet av att förbättra kunskapsläget.

Kommande arbete bör också inriktas på att klargöra skillnader mellan konstruktioner i olika dammsäkerhetsklass. Det är inte rimligt att dammar i dammsäkerhetsklass B och C (1 och 2) analyseras med samma rekommendationer som dammar i dammsäkerhetsklass A (1+). Det i denna rapport föreslagna säkerhetsnivåerna möjliggör differentiering mellan olika dammsäkerhetsklasser, men det behöver förankras i branschen för att kunna användas i praktiken.

För att en sannolikhetsbaserad metodik ska få ordentligt fäste krävs också att dammägarna i relevanta fall låter genomföra denna typ av beräkning. Fördelar för dammägaren finns såväl i potential till besparingar vid åtgärder som i att förbättra kunskapen om sin damm. I nuläget finns kompetens för utförande hos minst två konsultföretag samt på KTH, dock är kunskapen hos dammägarna begränsad. En möjlig väg framåt kan vara en utbildning för konsulter och dammägare på området.

## 6 Slutsatser

Den upprättade "Probabilistic model code for concrete dams" är troligen den första metodbeskrivningen för sannolikhetsbaserad beräkning av betongdammar i världen. Den bygger en grund för att kunna genomföra sannolikhetsbaserade beräkningar på ett standardiserat vis.

God dammsäkerhet bygger på att dammarna har en tillfredsställande stabilitet. Den deterministiska beräkningsmetodik som används idag har visat sig kunna ge dammar som är såväl mindre säkra än önskvärt, som betydligt säkrare än nödvändigt, då en sannolikhetsbaserad utvärdering görs. Det första leder till högre risknivå än önskvärt, det andra kan leda till överdrivet stora insatser för åtgärder. Det genomförda projektet visar att PMCD har en möjlighet att reducera dessa skillnader i säkerhetsnivå och hantera ingående osäkerheter på ett systematiskt sätt.

Baserat på beräkningsresultat föreslås här att säkerhetsindex för dammar sätts enligt EKS, med en högre nivå för dammarna med högst dammsäkerhetsklass. Detta innebär:

Figur 6-1. Föreslagna  $\beta$ -värden för betongdammar. Referensperiod 1 år.

Dammsäkerhetsklass	Brottgränstillstånd (glidning och stjälpning)
A	5,2
B	4,8
C	4,3

För det ställföreträdande brottgränstillståndet relaterat till dragspänning i uppströmskanten sätts  $\beta_T = 1,3$  för samtliga dammsäkerhetsklasser.

Framtida utveckling behövs. Frågor som bör utredas vidare är bl.a. islast och upptryckets variationskoefficient och dränagets effektivitet. Dessutom kan kompletterande beräkningar behövas för vissa konstruktioner, t.ex. låga trösklar. Krounis (2016) har presenterat en lovande metodik för att inkludera kohesion i kontaktytan. Det krävs emellertid kompletterande forskning innan metodiken kan implementeras fullt ut.

## 7 Referenser

- Ahlsén Farell, L. & Holmberg, J. (2007). *Utvärdering av säkerhet för betongdammar*. Master thesis. Avd för Konstruktionsteknik. Lund University. TVBK-5150. ISSN 0349-4969.
- Adolfi, E. & Eriksson, J. (2013) *Islastens inverkan på brottsannolikheten för glidning och stjälpning av betongdammar*. Master Thesis. KTH Royal institute of technology, Stockholm.
- Altarejos, L. , Escuder, I., Membrillera, M.G. & Serrano, A. (2009). Risk analysis and probability of failure of a gravity dam. *Proceedings from ICOLD Conference, Brasilia*.
- Araújo, J.M. & Awruch, A.M. (1998) Probabilistic finite element analysis of concrete gravity dams. *Advances in Engineering Software*, Vol 29, No. 2, p 97-104.
- Bergdahl L. & Wernersson, L (1978). *Calculated and expected thermal ice pressures in five Swedish lakes*. Department of Hydraulics, Chalmers University of Technology, Sweden. ISSN 0348-1069.
- Boverket (2015). EKS Boverkets föreskrifter och allmänna råd om tillämpning av europeiska konstruktionsstandarder (eurokoder). In Swedish.
- Bury, K.V. & Kreuzer, H. (1985). Assessing the failure probability of gravity dams. *Water Power & Dam Construction*. November 1985
- Carter D., Sodhi D., Stander E., Caron O., Quach T. (1998) Ice Thrust in Reservoirs. *Journal of Cold Regions*, Vol. 12, No. 4, pp. 169-183.
- CFBR (2006) *Recommandations pour la Justification de la Stabilité des Barrages-Poids – Propositions de Recommandations*.
- China Electricity Council (2000) *The Standards Compilation of Water Power in China*. China Electric Press, Beijing. ISBN 7-5083-0392-X.
- Ellingwood, B. & Tekie, P.B. (2001) *Fragility analysis of concrete gravity dams*. Journal of infrastructure systems, June 2001. ASCE, ISSN 1076-0342.
- EN 1990 (2004) Eurocode – Basis of structural design. CEN. Brussels.
- Fredriksson M. & Persson J. (2005) *Modellering av extrema istryck – studie av Pajala och Frösön*. Master thesis. Avd för Konstruktionsteknik och Teknisk Vattenreserslära, Lunds Tekniska Högskola, Lund, Sweden. TVBK-5131. In Swedish.
- Gustafsson, A., Johansson, F., Rytters, K., & Stille, H. (2008) *Betongdammars glidstabilitet – förslag på nya riktlinjer*. Elforsk Rapport 08:59.
- ISO 2394 (2015). General principles on reliability for structures.
- JCSS (2001) Probabilistic model code. <http://www.jcss.ethz.ch/>
- Krounis, A. (2016). *Sliding stability re-assessment of concrete dams with bonded concrete-rock interfaces*. Doctoral thesis, KTH Royal Institute of Technology Architecture and the Built Environment, Department of Civil and Architectural Engineering, Soil and Rock Mechanics Division.



- Melchers R.E. (1999) *Structural Reliability Analysis and Prediction*. Second Edition. John Wiley & Sons. ISBN 0-471-98771-9.
- De Groot, M.B., Crouch, R.S. Vrijling, J.K. (1999) *Proverbs: Probabilistic design tools for vertical breakwaters*, ISBN 9058092496
- RIDAS TA (2012). Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet, tillämpningshänvisningar (Swedish Hydropower companies guidelines for dam safety, application guideline). Svensk Energi. In Swedish.
- Ruggeri, G & European Working group (2001). Uplift Pressures under Concrete Dams – Final report. *In Procs. From ICOLD European Symposium in Geiranger, 2001*. <http://cnpqb.inag.pt/IcoldClub/index.htm> under working groups
- Ruggeri, G & European Working group (2004). *Sliding safety of existing dams*. ICOLD European Club.
- Stone and Webster Engineering Corporation. 1992. *Uplift Pressures, Shear Strengths, and Tensile Strengths for Stability Analysis of Concrete Gravity Dams*. Vol. 1, Report TR-100345. Palo Alto, CA: EPRI (Electric Power Research Institute).
- Svensk Energi (2008) RIDAS, Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet.
- Johan Spross, Fredrik Johansson and Stefan Larsson (2014). One the use of pore pressure measurements in reassessments of concrete dams founded on rock. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards* 8(2): 117-128.
- Peyras, L., Carvajal, C., Felix, H., Bacconnet, C., Royet, P., Becue, J.P. & Boissier, D. (2012) Probability-based assessment of dam safety using combined risk analysis and reliability methods – application to hazards studies. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. Volume 16, Issue 7, 2012
- Royet, P., Peyras, L., Becue, J.P. & Carvajal, C. (2009). Analytical review of gravity dam stability: from novel French limit-state guidelines to a probabilistic assessment of structural safety. *ICOLD Congress, Brasilia, May 2009*.
- Tekie, P.B. & Ellingwood, B.R. (2003) Seismic fragility assessment of concrete gravity dams. *Earthquake engineering and structural dynamics*. 32: 221-2240
- US Army Corps of Engineers. 2005. *Stability Analysis of Concrete Structures*. Washington, DC: US Army Corps of Engineers.
- Vrouwenvelder, T (2002) Developments towards full probabilistic design codes. *Structural Safety*, 417-432.
- Vrouwenvelder, T (2001) The fundamentals of structural building codes. *Structural Engineering, Mechanics and Computation* (Vol. 1). Elsevier.
- Westberg, M. (2009) Geostatistical approach for statistical description of uplift pressures. Part I. *Dam Engineering*, Vol XIX, Issue 4.
- Westberg, M. (2009) Geostatistical approach for statistical description of uplift pressures. Part II. *Dam Engineering*, Vol XIX, Issue 4.

Westberg Wilde, M. & Johansson, F. (2012). *Probabilistisk metoder för stabilitetsanalys av betongdammar – förslag till arbetsplan för framtida utveckling*. Förstudie åt Elforsk.

Westberg Wilde, M. & Johansson, F. (2016). *Probabilistic model code for concrete dams*. Energiforskrapport Report No. 2016:292. ISBN 978-91-7673-292-2



# SANNOLIKHETSBASERAD BEDÖMNING AV BETONG- DAMMARS STABILITET

Här beskrivs arbetet med att ta fram en metodbeskrivning för hur sannolikhetsbaserad bedömning bör genomföras för betongdammar. I arbetet har det ingått att utveckla en metodbeskrivning kallad Probabilistic model code for concrete dams vilken beskrivs i Energiforskrapport 2016:292. Det är den första metodbeskrivningen i världen för sannolikhetsbaserad stabilitetsberäkning av betongdammar.

Representativa fall har också analyserats och utförarna har gjort sannolikhetsbaserade beräkningar av befintliga dammar för att definiera ett kriterium för att bedöma stabilitet och definiera ett minsta tillåtna  $\beta$ -värde, så kallat  $\beta_{\text{target}}$ . Arbetet har även inneburit att formulera en första sannolikhetsbaserad riktlinje och att utveckla riktlinjer till ett partialkoefficient-format som implementerades i riktlinjen.

## Ett nytt steg i energiforskningen

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