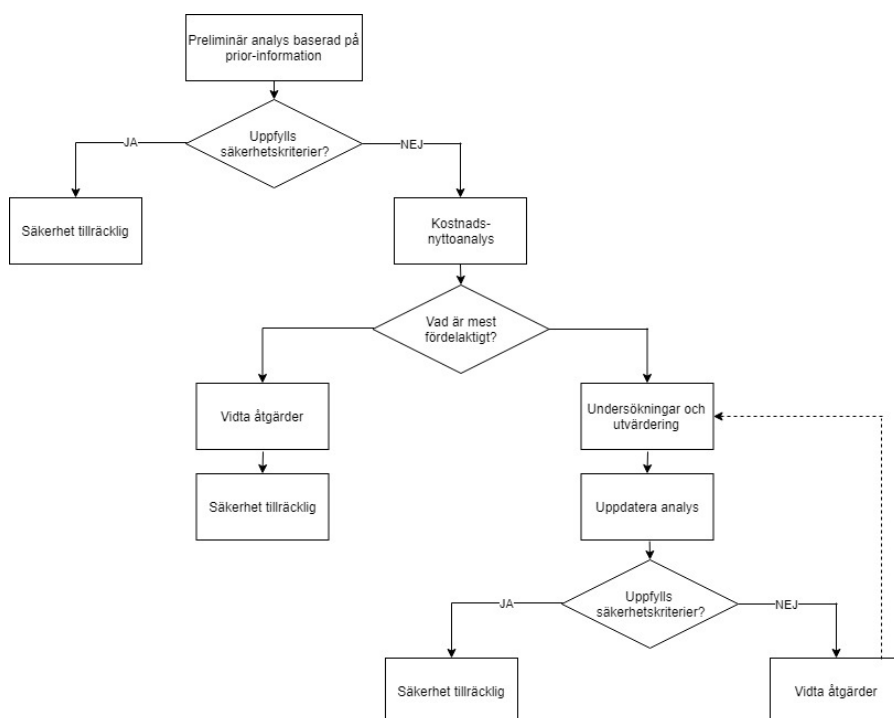


SANNOLIKHETSBASERAT RAMVERK FÖR BESLUTSSTÖD

RAPPORT 2020:642



DAMMSÄKERHET



Sannolikhetsbaserat ramverk för beslutsstöd

En metodik och en fallstudie

MARIE WESTBERG WILDE

ALEXANDRA KROUNIS

FREDRIK JOHANSSON

ISBN 978-91-7673-642-5 | © Energiforsk januari 2020

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

Förord

Sannolikhetsbaserade beräkningar kan ge en nyanserad bild av en damms stabilitet och har identifierats som ett möjligt och värdefullt verktyg för dammägare. I detta projekt har ett sannolikhetsbaserat ramverk för beslutsstöd demonstrerats på en fiktiv damm.

Studien har genomförts på KTH med Marie Westberg Wilde, Alexandra Krounis och Fredrik Johansson som utförare. Projektet har haft en referensgrupp knuten till sig under arbetets gång bestående av Romanas Wolfsborg (Vattenfall), Linda Ormann (Fortum) och Carl-Oscar Nilsson (Uniper).

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

Författarna ansvarar för rapportens innehåll.

Sammanfattning

För att anses tillräckligt säkra ska konstruktioner uppfylla vissa rekommenderade kriterier avseende till exempel stabilitet. Vid otillräcklig säkerhet ställs anläggningsägaren inför beslut om åtgärd, ofta med ett flertal olika åtgärdsalternativ och osäkerheter i såväl möjliga utfall som kostnader. Denna rapport syftar till att illustrera ett sannolikhetsbaserat ramverk för beslutsfattande som kan användas för att fatta informerade beslut.

Ramverket innefattar tre delar. I en *preliminär analys* görs bedömning av säkerheten jämfört med gällande kriterium. Vid otillräcklig säkerhet görs *kostnads-nyttoanalys* där olika åtgärds- och undersökningsalternativ analyseras och utfall och kostnader skattas. Då det bedöms effektivt utförs undersökningar varefter en *uppdaterad analys* tas fram.

Ramverket bedöms kunna användas på olika beslutsproblem så som undersöknings/åtgärdsbehov hos utloppstunnlar i berg och stabilitet för dammar. I rapporten redovisas ett exempel där ett sprickplan i berg analyseras.

Kostnads-nyttoanalysen föreslås utföras på följande vis: 1. Upprätta ett beslutsträd där samtliga alternativ till åtgärd och undersökning inkluderas. För att en åtgärd, eller en serie av åtgärder, ska vara ett möjligt alternativ måste resultatet bli att tillräcklig säkerhet uppnås. För att ta fram beslutsträdet behövs därmed ett antal olika beräkningar av olika åtgärdsalternativ och deras utfall. 2. Skatta sannolikhet för utfall för samtliga delar i trädet där så är nödvändigt (tex. utfall av framtida undersökningar). 3. Skatta kostnader för olika åtgärder och undersökningar. 4. Beräkna och bestäm vilket beslut som är mest fördelaktigt.

I fallstudien analyseras en fiktiv damm, en 17 meter hög lamelldamm med fyra monoliter. Den preliminära analysen visar att dammen uppfyller stabilitetskriterier för glidning i kontaktytan mellan berg och betong, men inte för potentiella sprickplan i berget. Den sannolikhetsbaserade beräkningen baseras på resultat av ett tidigare Energiforskningsprojekt.

Resultatet av kostnads-nyttoanalysen redovisas i ett beslutsträd. Då flera alternativa åtgärder finns i samma gren görs en minimering av kostnader. Resultatet visar att det bästa beslutet i fallstudien är att först undersöka sprickförekomst och utbredning. Med en konservativ skattning av sprickförekomst innebär det en kostnad på 1 300 kSEK. Att direkt göra åtgärd kostar 2 000 kSEK (dränage och isfrihållning) eller 2 300 kSEK (spännstag). Med en mindre konservativ skattning av sprickförekomst är totalkostnaden endast 600 kSEK. Vidare visar analysen att det är effektivt att göra en första skattning av friktionsegenskaperna, men att det inte är effektivt med ytterligare undersökningar för att bestämma dessa egenskaper.

Slutsatsen är att det systematiska arbetssätt som presenteras i rapporten möjliggör att i förväg kunna jämföra olika åtgärder ur ett kostnads-nyttoperspektiv och tydliggör vikten av att fatta beslut baserat på existerande och möjlig framtida information.

Summary

To be considered safe enough structures should fulfil certain criteria regarding e.g. stability. In case of inadequate safety the owner faces rehabilitation measures, often with several different possibilities and uncertainty in both possible outcome and costs. This report aims at illustrating a probability-based framework for decision-making that is possible to use for informed decisions.

The framework consist of three parts. In a *preliminary analysis* the safety is assessed in relation to requirements. In case of inadequate safety a *cost-benefit* analysis is performed, where different measures and investigations are analyzed and outcomes and costs are estimated. When it is found efficient investigations are performed, resulting in an *updated analysis*.

The framework is expected to be possible to apply on different types of decision-problems, such as investigations/rehabilitation for discharge tunnels in rock and stability of dams. In this report an example is given where stability for a rock joint is analyzed.

The following procedure is proposed for a cost-benefit analysis: 1. Establish a decision-tree where all possibilities for rehabilitation and investigation are included. For a measure, or a series of measures, to be possible the end-result must be that the required safety level is reached. To derive a decision-tree, calculations of the different measures and their outcome is necessary. 2. Estimate probability for outcome of all parts of the tree where it is necessary (e.g. outcome of different investigations). 3. Estimate costs for different measures and investigations. 4. Determine the most beneficial decision.

In the case study a fictious dam, a 17 m high buttress dam with four monoliths, is analyzed. The preliminary analysis show that the dam fulfils stability requirements for sliding in the contact between rock and concrete, but not for potential joints in the rock mass. The probabilistic analysis is based on the result of the previous Energiforsk project.

The result of the cost-benefit analysis is shown in a decision tree. Where there are several different measures in one branch costs are minimized. The result shows that the best decision in the example is to first investigate the presence and extent of joints. A conservative estimate of this result in a cost of 1 300 kSEK. Direct measure result in a cost of 2 000 KSEK (drainage and ice prevention) or 2 300 kSEK (stressed tendons). With a less conservative estimate of joint extent the cost is only 600 kSEK.

The analysis also shows that it is efficient to perform a first estimate of friction properties, but that it is not efficient with further investigations of those properties.

The conclusion is that the systematic approach presented in the report enables to, beforehand, compare different measures from a cost-benefit perspective and that this clarifies the importance of taking decisions based on existing and possible future information.

Innehåll

1	Introduktion	7
1.1	Bakgrund	7
1.2	Syfte	8
2	Beskrivning av ramverket	9
2.1	Preliminär analys	10
2.2	Kostnads-nyttoanalys och beslut	11
2.3	Uppdaterad analys	11
3	Teori	13
3.1	Preliminär analys	13
3.2	Kostnads-Nyttoanalys och beslut	17
3.3	Undersökningar och uppdatering	22
4	Kostnads-nytto analys för stabilitetsproblem	24
4.1	Beskrivning allmänt beslutsträd	24
4.2	Skattning av sannolikhet	29
4.3	Skattning av kostnader	30
4.4	Bedömning av mest effektivt beslut	30
5	Fallstudie med analys av fiktiv damm	31
5.1	Beskrivning av analysobjekt och problembeskrivning	31
5.2	Preliminär analys	32
5.3	Kostnads-nyttoanalys	34
5.4	Diskussion kring fallstudien	48
6	Slutsatser	49
7	Referenser	51
Bilaga A:	Initial deterministisk analys	53
Bilaga B:	Resultat av beräkningar för olika åtgärder	56

1 Introduktion

1.1 BAKGRUND

För att anses tillräckligt säkra ska konstruktioner uppfylla vissa rekommenderade kriterier avseende till exempel stabilitet. I fall då analyser visar att säkerheten är otillräcklig eller oklar ställs anläggningsägaren inför beslut om åtgärd. I många fall finns olika åtgärdsalternativ och vanligt är att en enkel kostnadsuppskattning görs för att fatta beslut. I de flesta fall finns ett flertal osäkerheter, såsom vilket resultat åtgärden kommer leda till, hur stora kostnaderna kommer att bli, vilka underhållskostnaderna blir över tid mm. Om utfallet är osäkert tar man ofta till en mer omfattande åtgärd "för säkerhets skull".

Inom ramen för SVC och tidigare satsningar har flera projekt behandlat sannolikhetsbaserade beräkningsmetoder för stabilitetsanalys av betongdammar och grundläggning. Johansson (2009) analyserade bland annat inverkan av råhet i storskaliga sprickor. I Westberg (2010) beskrivs hur sannolikhetsbaserade beräkningar för betongdammar kan utföras och en systematisk genomgång av olika parametrar ges. Krounis mfl. (2017) tog fram en metodik för hur kohesion kan medräknas i kontaktytan mellan berg och betong. Spross mfl. (2016) applicerade observationsmetoden på bland annat injektering under en damm. Ett Energiforskprojekt färdigställdes 2016 och resulterade i "Probabilistic model code for concrete dams" Westberg Wilde & Johansson (2016a) som beskriver hur sannolikhetsbaserade beräkningar för betongdammars stabilitet bör utföras; vilka designsituationer och gränstillstånd som bör analyseras, hur parametrar bör skattas (och varför), hur uppdatering av kunskap kan inkluderas samt vilket minsta säkerhetsindex (eller maximal brottsannolikhet) som bör uppnås.

I ett paper som presenterades på ICOLD-kongressen i Wien, se Johansson, mfl. (2018), kombinerades ovanstående arbeten till ett sannolikhetsbaserat ramverk för beslutsfattande. Ramverket baseras på observationsmetoden i kombination med tillförlitlighetsbaserade beräkningar och beslutsteori. Observationsmetoden är en metod godkänd i Eurokoderna för geokonstruktioner och bygger i korthet på att först ta fram en preliminär design för olika utfall, sedan göra observationer under uppförandet av konstruktionen och anpassa slutlig lösning utifrån observerade förhållanden.

Det sannolikhetsbaserade ramverket möjliggör att i förväg kunna jämföra olika åtgärder ur ett kostnads-nytt-perspektiv genom att på ett systematiskt sätt analysera olika utfall baserat på skattade sannolikheter för att de olika utfallen inträffar kombinerat med kostnader för möjliga åtgärder.

Avseende stabilitet kan sannolikhetsbaserade beräkningar ge ett mervärde och förbättra såväl kunskap om viktiga parametrar som att ge en mer nyanserad bild av dammars stabilitet. I kombination med observationsmetoden och beslutsteori kan detta bli ett värdefullt verktyg i dammägarnas arbete genom att hjälpa ägarna att fatta informerade beslut. Ramverket kan även användas för beslutsfattande inom andra områden, även om ett större bakgrundsarbete kan behövas för att

definiera gränstillstånd och parametrar för anläggningsdelar som inte beskrivs i "Probabilistic model code for concrete dams" (Westberg Wilde & Johansson, 2016a).

1.2 SYFTE

Denna rapport syftar till att illustrera det ovan beskrivna sannolikhetsbaserade ramverket för beslutsfattande. För att visa hur ramverket kan användas och vilken nytta det kan ge dammägaren används ett fiktivt fall som demonstrationsexempel. I det fallstudien demonstreras metodiken för en fiktiv lamellmonolit med låg stabilitet för glidning längs en bergspricka. Olika möjliga åtgärder och insatser för att öka stabiliteten undersöks och förväntat resultat samt förväntade kostnader bedöms. Exempel på möjliga åtgärder som inkluderas är borrhäns av dränage i kombination med övervakning av upptryck, isfrihållning, undersökningar/provborrningar och fastspänning med förspända linstag.

2 Beskrivning av ramverket

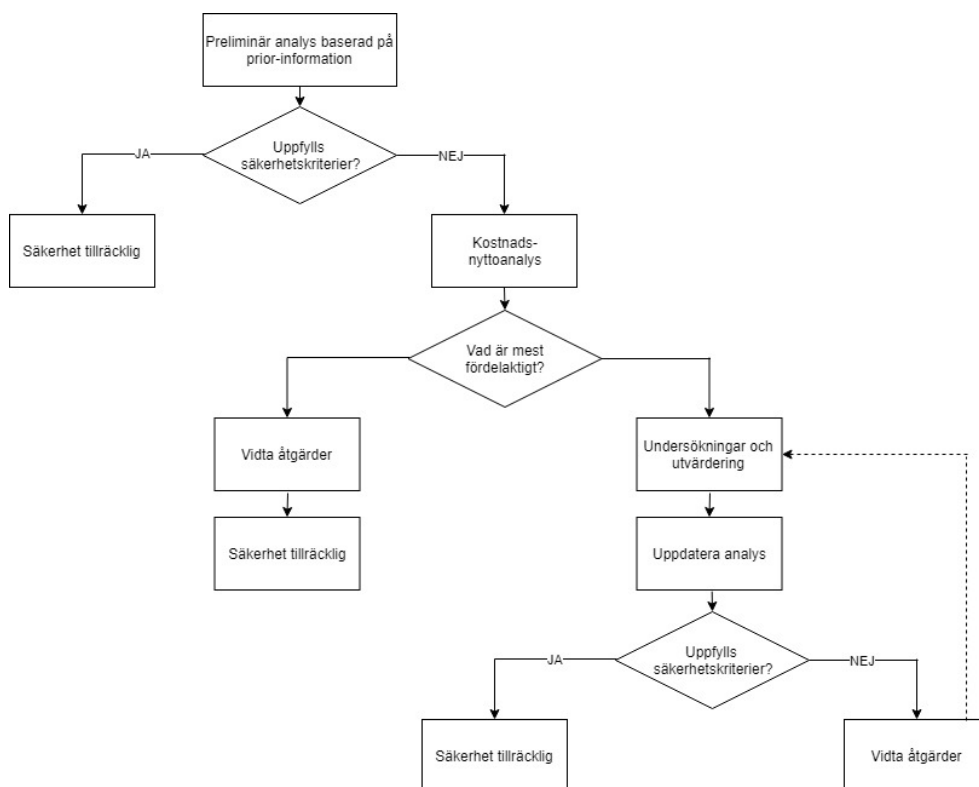
Vid design av en ny konstruktion, eller utvärdering av en existerande, finns i de flesta fall begränsad kunskap om geologiska förhållanden i undergrunden, eller av andra parametrar med stor påverkan på konstruktionen. Det blir då nödvändigt att göra konservativa antaganden. När en analys visar att rekommenderade villkor inte uppfylls behöver ytterligare analys göras för att bedöma behov av åtgärd. Om beslut angående åtgärder fattas baserat på konservativa antaganden finns stor risk att åtgärd vidtas trots att den egentligen inte är nödvändig, alternativt blir åtgärden onödigt omfattande. Det kan därför vara fördelaktigt att genomföra undersökningar för att erhålla kompletterande information av viktiga parametrar och därmed reducera de epistemiska osäkerheterna (kunskapsosäkerhet). I en deterministisk analys (där säkerhetsfaktorer ska uppfylla ett rekommenderat värde) finns inget teoretiskt stöd för att inkorporera tillkommande information. Detta beror på att osäkerheter i bedömningen inte inkluderas i analysen, utan att all säkerhet ligger i säkerhetsfaktorn. Det är då oklart vad originalantagandets parametervärde motsvarar (är det t.ex. ett medelvärde, ett karakteristiskt värde, eller något annat), och utan sådan information blir användandet av tillkommande information endast en gissningslek.

I en sannolikhetsbaserad metodik beskrivs respektive parameter med sin fördelningsfunktion, medelvärde och varians. I en sådan metodik finns teoretiskt stöd för hur tillkommande information från undersökningar kan användas för att uppdatera antaganden om en parameter, genom till exempel Bayesiansk uppdatering. Detta beskrivs vidare i avsnitt 3.

Förutom möjligheten att utföra undersökningar för att förbättra antaganden kring ingående parametrar står ägaren ofta inför ett flertal möjliga åtgärdsalternativ som vardera har ett troligt utfall, ibland andra möjliga alternativa utfall. Vardera alternativ har relaterade kostnader, såväl initialkostnader som underhållskostnader över tid. Den åtgärd som ger erforderlig säkerhetsnivå till lägst totalkostnad, sett över en fördefinierad tidsperiod, kan betraktas som den bästa och mest fördelaktiga åtgärden.

I det föreslagna ramverket ingår en preliminär analys, kostnads-nyttoanalys samt, då det bedöms effektivt, en uppdaterad analys baserad på tillkommande information från tex. undersökningar. Ramverket bedöms vara möjligt att applicera för olika typer av beslutsfattande. Ramverkets uppbyggnad visas i Figur 2-1. Den beskrivning som redovisas i denna rapport är upprättad för ett allmänt fall av stabilitetsanalys för sprickplan i berg. Utöver stabilitetsanalys är ramverket troligen även användbart för att bedöma undersöknings/åtgärdsbehov hos t.ex. utloppstunnlar i berg eller stabilitet för fyllningsdammar.

I avsnitt 3 ges en mer detaljerad teoretisk beskrivning av de olika ingående delarna; såväl av sannolikhetsbaserad beräkning som beslutsteori och Bayesiansk uppdatering.



Figur 2-1. Schematisk bild av ramverkets huvudsakliga delar.

2.1 PRELIMINÄR ANALYS

Det första steget är att göra en *preliminär analys* av konstruktionen. Den preliminära analysen görs så noga som möjligt, med konservativa antaganden i de fall oklarhet/osäkerhet föreligger. Resultatet av analysen jämförs mot ett fastställt kriterium och bedömning görs om resultatet är tillfredsställande eller ej. Den preliminära analysen kan i ett inledande skede vara deterministisk. Om det visar sig att säkerhetsnivån är potentiellt dålig bör emellertid analysen kompletteras med en sannolikhetsbaserad analys för att på ett bättre sätt beakta ingående osäkerheter.

Vid sannolikhetsbaserad stabilitetsanalys för en betongdamm kan den sannolikhetsbaserade analysen baseras på PMCD (Probabilistic Model Code for concrete dams) (Westberg Wilde & Johansson, 2016a). I PMCD framgår vilka designsituationer som ska analyseras samt hur parametrarnas fördelningsfunktioner ska beskrivas.

Resultatet av den preliminära sannolikhetsbaserade analysen är ett beräknat säkerhetsindex (som kan göras om till skattnings av brottsannolikhet). Detta jämförs därefter med rekommendationerna som finns redovisade i PMCD.

2.2 KOSTNADS-NYTTOANALYS OCH BESLUT

Om resultatet av den preliminära analysen visar att konstruktionen inte uppfyller rekommenderade kriterier görs en kostnads-nyttoanalys. Olika åtgärds- och undersökningsmöjligheter kontrolleras baserad på, vid tillfället för analysen, tillgänglig information. Detta görs genom att upprätta ett beslutträd där samtliga möjligheter till åtgärder och undersökning ingår och där vardera gren leder fram till ett acceptabelt beteende. Därefter uppskattas kostnader för möjliga undersökningar och åtgärder och sannolikheten skattas för olika utfall av de möjliga undersökningarna och åtgärderna. Utifrån detta är det möjligt att beräkna vilket beslut som är mest fördelaktigt.

Avseende stabilitet kan exempel på olika åtgärder vara åtgärder som fastspänning, undersökning av de parametrar som identifierats som viktiga (t.ex. friktionsvinkel mellan berg/betong), installation av porttrycksgivare för att övervaka porttryck mm. I de fall då undersökningar är ett möjligt alternativ görs i kostnads-nyttoanalysen en känslighetsanalys av olika möjliga utfall. På så vis är det möjligt att i förväg skatta om det är sannolikt att utfallet av en sådan undersökning ger tillräckligt mycket information för att det inte ska behövas ytterligare åtgärder, alternativt att åtgärdernas omfattning kan minskas.

Det finns även möjligheten att åtgärder kommer vara nödvändiga trots undersökningarna, och i ett sådant fall leder undersökningen till en extra kostnad, men bidrar inte till minskat åtgärdsbehov. I många fall kommer dock undersökningarna leda till minskat behov av åtgärder, eller att åtgärderna kan anpassas till faktiska förhållanden på ett bättre sätt.

Om åtgärder vidtas utan undersökning finns möjligheten att de är onödiga och att vidare undersökning skulle kunnat påvisa tillräcklig stabilitet.

Samtliga av dessa utfall behöver finnas med i analysen. För att en åtgärd ska vara möjlig måste den, i sig själv eller i kombination med andra åtgärder, leda till att konstruktionen uppnår erforderlig säkerhet.

Baserat på kostnads-nyttoanalyserna fattas beslut kring vidare steg. Detta kan vara en direkt åtgärd såsom installation av förspända linstag eller, om det visat sig mest fördelaktigt, undersökningar såsom kärnborrning för att undersöka förekomsten av potentiella glidplan i berggrunden.

2.3 UPPDATERAD ANALYS

Uppdaterad analys utförs i de fall där vald åtgärd baserad på kostnads-nyttoanalysen är att utföra vidare undersökningar. Syfte med den uppdaterade analysen är att integrera tillkommande information från undersökningarna i beslutsprocessen och kontrollera att ställda krav på säkerhet uppfylls. Om den uppdaterade analysen visar på otillräcklig säkerhet behövs även andra åtgärder. Resultatet från den uppdaterade analysen används då för att uppdatera kostnads-nyttoanalysen och fatta det mest fördelaktiga beslutet kring vidare åtgärder.

Vilken eller vilka av de ingående parametrar som har störst vikt för resultatet och som, om möjligt och lämpligt, bör undersökas vidare erhålls ur den preliminära

analysen. För att kombinera informationen från undersökningarna med tidigare förväntningar/information till en samlad slutledning används Bayesiansk uppdatering.

3 Teori

3.1 PRELIMINÄR ANALYS

3.1.1 Introduktion till probabilistisk analys

Analys av betongdammar görs vanligen med deterministiska metoder. Principen är att dimensionera konstruktionen med tillräcklig säkerhetsmarginal så att eventuella osäkerheter i bedömning av bärförmåga eller last inte riskerar att orsaka brott. Beslutet fattas därmed genom att jämföra en beräknad säkerhetsfaktor med en tillåten säkerhetsfaktor. Vanligen sätts den tillåtna nivån utifrån erfarenhet eller ingenjörsmässiga bedömningar. För denna beräkningsmetodik krävs ett fixt värde för vardera ingående parameter och det finns ingen möjlighet att inkludera osäkerhet i ingående parametrar. En hög säkerhetsfaktor behöver därför inte nödvändigtvis innebära att konstruktionen har en låg risk, eftersom stora osäkerheter kan ge en mycket hög risk. Det innebär även att risken för två konstruktioner med samma säkerhetsfaktor kan vara fundamentalt olika beroende på deras utformning och miljö så som bl.a. diskuterats av Phoon mfl. (2003) och Ellingwood (1982).

Sannolikhetsbaserade metoder (på engelska reliability-based) ger möjlighet att hantera osäkerheterna, vilket kan bidra till en jämnare säkerhetsnivå. En svårighet med denna typ av metod är att tillgänglig information ofta är bristfällig vilket försvårar bedömningen.

I korthet bygger en sannolikhetsbaserad metod på att ett gränstillstånd definieras. Gränstillståndet beskriver övergången från acceptabelt beteende till oacceptabelt och är vanligen ett brottgränstillstånd eller ett bruksgränstillstånd. Gränstillståndet skrivs:

$$Z = G(\mathbf{x})$$

där $\mathbf{x} = x_1, \dots, x_n$ är ingående stokastiska variabler. Alla parametrar av intresse bör beskrivas som stokastiska variabler och all väsentlig osäkerhet inkluderas.

Osäkerhet indelas vanligen i inneboende osäkerhet (inherent) och kunskapsosäkerhet (epistemisk osäkerhet). Den inneboende osäkerheten, till exempel höjden på vågor eller snödjup, kan inte reduceras. Epistemisk osäkerhet kan reduceras genom observationer, mätningar eller tester.

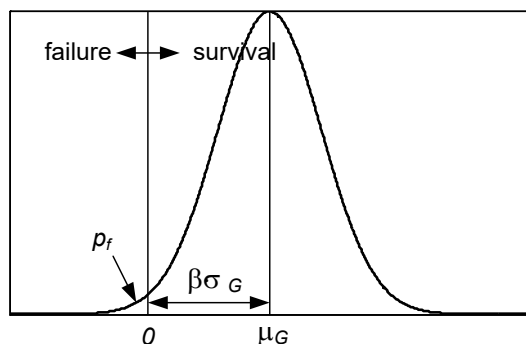
Negativa värden på Z innebär att gränstillståndet överskrids, vilket för ett brottgränstillstånd innebär att brott inträffar. Sannolikheten för att detta inträffar ges av

$$P_f = P(G(\mathbf{x}) \leq 0) = \int_{G(\mathbf{x}) \leq 0} f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}) d\mathbf{x}$$

Där $f_{\mathbf{x}}(\mathbf{x})$ är den multivariata fördelningsfunktionen av $\mathbf{x}$. Om $G(\mathbf{x})$ kan approximeras med en normalfördelning kan säkerhetsindex β beräknas som

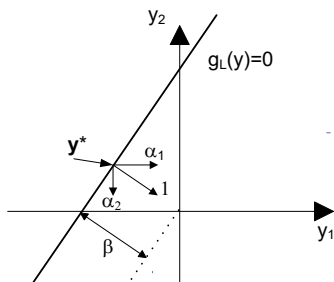
$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f)$$

Där Φ är standard normal frekvensfunktion med medelvärde noll och standardavvikelse 1. Med denna tolkning är β antalet standardavvikelser mellan gränstillståndets medelvärde och 0, se Figur 3-1.



Figur 3-1. Geometrisk tolkning av β .

Beräkning av β kan göras på olika sätt, vanliga metoder är första ordningens beräkningar (first-order), eller Monte Carlo-simulering. En av de vanligaste första ordningens beräkningar är Hasofer-Lind's säkerhetsindex. Då görs en transformering av $G(x)$ till standard-normal-rummet, där den blir $g(y)$. Därefter görs en linjärisering av den transformerade gränsfunktionen kring en designpunkt y^* . Avståndet mellan origo och designpunkten är säkerhetsindex β . Koordinaterna på designpunkten ger känslighetsvärden α_i , vilka visar hur stor inverkan ändringar i en parameter har på β . Detta kan illustreras enligt Figur 3-2.



Figur 3-2. Schematisk bild av designpunkt och känslighetsvärden α i ett 2D standard-normal-rum.

3.1.2 Probabilistic model code for concrete dams

På uppdrag av Energiforsks dammsäkerhetstekniska utvecklingsprogram togs en metodbeskrivning fram som beskriver hur sannolikhetsbaserad evaluering bör genomföras för betongdammar. Arbetet presenterades i Westberg Wilde & Johansson (2016b) och metodbeskrivningen presenteras i Westberg Wilde & Johansson (2016a).

Metodbeskrivningen kallas "Probabilistic model code for concrete dams" (PMCD) och 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. PMCD är indelad i tre avsnitt: Basis of design, Load models och Resistance models. Modeller

och parametrar har definierats utifrån bästa tillgängliga kunskap vid skrivandet av modellbeskrivningen och val beskrivs och motiveras. Alla detaljer går att läsa direkt i PMCD, och nedan följer en kort sammanfattning av respektive del.

Part I: Basis of design

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

Avsnittet innehåller 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.

Minsta tillåtna *säkerhetsindex* (β_T) har definierats från kalibrering mot existerande praxis (analys av existerande svenska betongdammar med en säkerhetsnivå som anses acceptabel). Följande säkerhetsnivå rekommenderades i Westberg Wilde & Johansson, 2016b):

Tabell 3-1. Rekommenderat lägsta säkerhetsindex, β_T .

Dammsäkerhetsklass	β_T
A	5,2
B	4,8
C	4,2
U	3,8

Gränstillstånd definieras utifrån felmoder. Felmoderna för betongdammar har antagits vara relativt väldefinierade och utgörs av glidning längs kontaktytan mellan berg och betong, stjälpning samt glidning i bergsprickor.

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. Enligt nu gällande riktlinjer medräknas inte kohesion vid kontroll av betongdammars stabilitet utan skjuvhållfasthet i kontaktytan beskrivs med basfriktion och dilatation.

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

I RIDAS (Svensk Energi, 2012) ställs också 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 brottsannolikheten 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 Eurokod (CEN, 2001)) 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 hårt kristallint berg kommer brott inte inträffa i bergmassan om inte potentiella glidplan. Då man vanligtvis inte känner till särskilt mycket om berggrunden vid utvärdering av säkerheten för en damm kan antagande först göras att en ofördelaktigt orienterad spricka existerar under dammen. Beräkning görs sedan för att identifiera på vilket djup sprickan kan vara farlig. Vidare undersökning (arkivsökning, eventuell borrhning 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 har definierats baserat på RIDAS, men med vissa justeringar.

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 ett lastfall där sannolikheten för vattennivåer över dämmningsgräns (DG) skattas och modelleras med exponential/triangelfördelning. Denna modellering skulle kunna inkludera såväl flöden som tillförlitlighet hos avbördningssystem och sannolikhet för frånslag. Metodiken beskrivs i PMCD.

Part II: Load models

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

Islasten är förknippad med stora osäkerheter. Ett antal arbeten som syftat till att hitta en metod att modellera eller beskriva maximal islast har genomförts internationellt och det pågår projekt i Sverige i dagsläget. Modellen för islast i PMCD är baserad på rapporterade uppmätta istryck kombinerat med teoretiska maximitryck.

Upptrycket beror på grundläggningen, dess hydrauliska konduktivitet, injektering och dränage. Det modelleras med en variationskoefficient. 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 dränagehållens upptrycksreducerande effekt ska kontrolleras, men detta görs sällan i praktiken. I PMCD förstärks kravet på detta genom krav på kontinuerlig övervakning av upptrycket, ett underhållsprogram för att upprätthålla dränagets funktion samt en åtgärdsplan för att hantera eventuell igensättning 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.

Part III: Resistance models

Resistance models innehåller generella principer samt definition och statistiska beskrivningar av egentygnd, skjuvkapacitet för anliggningsytan mellan betong och berg, friktionsvinkel i bergsprickor, tryck- och draghållfasthet hos betong samt 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.

För glidning är friktionsvinkeln i kontaktytan samt friktionsvinkeln i bergsprickor viktig. 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 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 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.

Friktion i bergsprickor 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.

3.2 KOSTNADS-NYTTOANALYS OCH BESLUT

3.2.1 Litteraturgenomgång

Effektivt beslutsfattande bygger på maximering av nytta i kombination med minimering av kostnader. Ett flertal olika angreppssätt finns för att uppnå detta. Nedan redovisas en delmängd av de metoder som presenteras i litteraturen och fokus är på beslutsfattande och kostnads-nyttoanalys för infrastruktur.

Thoft-Christensen (2012) beskriver olika analysverktyg för att skatta det mest fördelaktiga angreppssättet att åtgärda byggnadsverk (underhålla, bygga om, ersätta...). Han beskriver följande metoder;

- Life-Cycle (LC) analysis som en enkel analys av tillståndet för ett byggnadsverk som inte tar hänsyn till kostnader för underhåll, brott eller miljömässiga kostnader.
- Life-Cycle Cost tar även hänsyn till kostnader för underhåll och brott.
- En Life-Cycle Cost-Benefit Analysis som även inkluderar användarkostnader och miljömässiga kostnader (alternativt fördelar).

Thoft-Christensen pekar på vikten av att användarkostnader inkluderas och visar exempel där analysen för en broupprustning inkluderar användarkostnaderna och tar hänsyn till allmänhetens faktiska kostnader (extratid p.g.a. förseningar, extratid och kostnader p.g.a. omledningar, ökad olycksrisk etc.). Han visar att användarkostnaderna ofta är högre eller mycket högre än de direkta kostnaderna för underhåll och reparationer.

Thoft-Christensen beskriver en optimeringsmetod för att bestämma vilken typ av reparation som är optimal efter en åtgärd av en bro. Optimeringen skrivs, för vardera reparationsmetod, som

$$\max \sum_{t=0}^{n_L} B(t_R, n_R) - C_{repair}(t_R, n_R) - C_{failure}(t_R, n_R) - C_{user}(t_R, n_R)$$

Där B är den totala förväntade fördelen under bronns återstående livslängd, t_R av den första reparationen, C_{repair} förväntade reparationskostnader, $C_{failure}$ förväntade kostnader om brott inträffar och C_{user} är användarkostnader. Samtliga kostnader och fördelar räknas om till tidpunkten $t = 0$.

En stor svårighet med denna metod är att skatta total förväntad fördel. I vattenkraftsammanhang och särskilt gällande dammsäkerhet innebär förbättrad säkerhet en sänkning av risken, men eftersom konsekvenserna sällan kvantifieras i detalj blir det mycket svårt att kvantifiera den förväntade riskminskningen och därmed förväntad fördel.

Baji mfl. (2017) beskriver en risk-kostnads strategi för underhåll av vägtunnlar.

De använder en tidsberoende probabilistisk modell och minimerar risken för ett system av flera komponenter, där vardera komponent har flera möjliga felmoder. Den tidsberoende sannolikheten för brott för systemet jämförs med en acceptabel nivå; såväl brottgräns som bruksgräns (sprickvidd och läckage) analyseras. Tack vare att modellen inkluderar tidsberoende parametrar är det möjligt att inkludera nedbrytning. Utifrån detta kan nödvändiga underhålls-/reparationsåtgärder, för att säkerställa att system och komponenter håller sig inom acceptabel nivå under tunnelns livstid, definieras.

I Baji mfl. (2017) definieras när i tid olika åtgärder bör sättas in. Frågeställningen är en annan än den som är aktuell i föreliggande projekt, men delar av tankesättet är applicerbart. För en komplett analys bör tidsberoende aspekter, som nedbrytning, tas med.

Goulet mfl. (2015) presenterar en så kallad pre-posterior beslutsanalys, där planering av åtgärder baseras på en probabilistisk prior-modell med osäkerheter. Kostnader för olika möjliga utfall av en åtgärd vägs mot sannolikheten för att det utfallet inträffar. En optimering görs baserat på en sekvens av åtgärder, där kostnaderna minimeras.

Initialt överskrider sannolikheten för brott, p_f^{prior} den erforderliga brotts sannolikheten p_f^t . Det antas att en följd av åtgärder, $A = a_1, \dots, a_n$ utförs (i den ordningen). Åtgärderna kan vara förbättrade beräkningsmetoder, mätningar, belastningstester, förstärkning, ombyggnad mm. Efter åtgärd a_1 finns ytterligare information/kunskap, vilket kan påverka den efterföljande åtgärden a_2 . Ordningen på åtgärder kan varieras och beslutsanalysen hittar den optimala sekvensen av åtgärder för att nå p_f^t och samtidigt minimera kostnaderna.

Analysen utförs innan observationer har utförts, därför måste alla möjliga utfall beaktas. Det är det som gör den till en pre-posterior analys.

Sannolikheten att en förstärkning eller ombyggnad leder till att p_f^t uppnås är antingen ett eller noll. Att vidta åtgärder av den typen utan att uppnå p_f^t görs endast i fall där även ytterligare åtgärder ska vidtas. Att utföra undersökningar innan en ombyggnad eller förstärkning kan reducera nödvändig omfattning av förstärkningsåtgärder. Undersökningar kan minska p_f , men kan också, om prior-skattningarna var felaktiga, öka p_f . De utfall av undersökningar som gör att kraven uppfylls är en delmängd av alla möjliga utfall. Om det möjliga utfallet av undersökning a_i är M är det endast om utfallet är delmängden m_1 som undersökningen är framgångsrik. För övriga delmängder, $m_2 - m_i$ krävs ytterligare åtgärder.

$$M(a_i) = \{m_1: p_f < p_f^t \ m_2: p_f > p_f^t \ \dots \ m_i: p_f > p_f^t \}$$

Spross & Johansson (2016) föreslog en metodik för Bayesianskt beslutsfattande för observationsmetoden, även detta är en pre-posterioranalys.

I observationsmetoden görs en preliminär analys baserad på det som är känt vid den aktuella tidpunkten. En övervakningsplan för att verifiera att strukturen beter sig acceptabelt under uppförandet förbereds. Förberedelser görs för vilka åtgärder som ska vidtas om oacceptabelt beteende upptäcks under arbetet. Preliminär design väljs på ett sådant sätt att sannolikheten för kostnads- och tidsdrivande åtgärder hålls på en tillräckligt låg nivå. Metodiken för Bayesianskt beslutsfattande kan beskrivas med följande fyra delar:

1. Beslut att utföra experiment, mätningar eller undersökningar, e.
2. Ett utfall, z , av utförd e.
3. Beslut att vidta åtgärd a , baserad på z .
4. Inträffande av händelse θ .

Syftet med den metodik som Spross & Johansson (2016) presenterar är att finna en optimal design; en design som maximerar förväntad nytta samtidigt som brotts sannolikheten är acceptabel, dvs. $p_f \leq p_f^t$. Detta görs genom att jämföra förväntat resultat vid användande av observationsmetoden med förväntat resultat av användandet av en annan designmetod. I design enligt observationsmetoden

inkluderas en preliminär design, ett mätprogram som planeras och utförs samt planering för åtgärder som vidtas om oacceptabelt beteende upptäcks. Förberedelserna är därmed mer omfattande än för konventionell design. Å andra sidan är konventionell design mer konservativ för att säkerställa att tillförlitligheten uppnås överallt. Den optimala designlösningen att förbereda ges av:

$$e_{opt} = \arg \min \left\{ \left\{ \sum_{j=1}^n P(z_j|e_i) C(e_i, z_j, a_j) \middle| p_f^{(e_j, z_j, a_j)} \leq p_f^t \right\} \right\}$$

Där $P(z_j|e_i)$ är sannolikheten att få mätresultat z_j när någon design-lösning e_i används. $C(e_i, z_j, a_j)$ beskriver förväntade kostnader för vardera designutfall och ges av:

$$C(e_i, z_j, a_j) = \sum_{k=1}^m C(e_i, z_j, a_j, \theta_k) P(e_i, z_j, a_j)$$

Där $C(e_i, z_j, a_j, \theta_k)$ är förväntade kostnader för händelse θ_k (inkluderat kostnader för att utföra design, samt åtgärder som är nödvändiga vid denna händelse), och $P(e_i, z_j, a_j)$ är sannolikheten att händelse θ_k inträffar, givet den utförda designen, åtgärderna och med hänsyn till tillkommande information som förväntas förvärfvas.

Endast designlösningar för vilka acceptabel brottsannolikhet uppnås inkluderas, vilket säkerställs genom kriteriet $p_f^{(e_j, z_j, a_j)} \leq p_f^t$.

I observationsmetoden är det nödvändigt att definiera larmnivåer för att identifiera när acceptabla nivåer på beteende överskrids och när åtgärder behöver sättas in. I ovan beskrivna metodik kan dessa beräknas med utgångspunkt från den acceptabla brottsannolikheten.

Spross & Johansson (2016) använder ett beslutsträd för att illustrera beslut om huruvida observationsmetoden eller konventionell design ska användas.

Serrano-Lombillo mfl. (2013) presenterar en strategi för att prioritera riskreducerande åtgärder för en dammportfölj.

Principen för riskreduktion är baserad på rättvisa (equity, d.v.s. rätten för individer och samhälle att skyddas till en viss nivå; begreppet relaterar till individuell risk) och effektivitet (efficiency, behovet av resurser att ge maximal nytta; den åtgärd som producerar större riskreduktion till lägre kostnad är mer effektiv, både samhällsrisk/effektivitet samt ekonomisk effektivitet inkluderas). De poängterar att resultat från dessa olika principer kan slå olika; en riskreducerande åtgärd som är optimal från ett rättviseperspektiv kan vara oförnuftig från ett effektivitetsperspektiv.

I en fallstudie prioriterar Serrano-Lombillo mfl. (2013) mellan åtgärder i en portfölj av 27 dammar. Totalt inkluderas 93 möjliga åtgärder. Först beräknas risknivån i den faktiska situationen med hjälp av en riskmodell. Därefter beräknas risknivån i en situation då en viss åtgärd vidtagits, detta görs för samtliga åtgärder.

Olika riskindikatorer används för att kvantifiera hur stor riskreduktionen blir för en specifik åtgärd. De riskindikatorer som används är kostnad per räddat statistiskt liv, justerad kostnad per räddat statistiskt liv, kostnads-nyttto förhållande, minimerad individuell risk, minimerad samhällsrisk och minimerad ekonomisk risk.

Kostnads-nyttto förhållandet ges av

$$CBR = \frac{C_{an}}{R_E^{ini} - R_E^{mea}}$$

Där C_{an} är kostnaden, R_E^{ini} är den initiala risken och R_E^{mea} är risken efter att åtgärden vidtagits.

Sex olika optimala sekvenser av åtgärder togs fram, en för varje princip av riskreduktion.

Prioriteringsprocessen beskrivs vidare i Morales-Torres mfl. (2016) och Serrano-Lombillo mfl. (2017) enligt följande: I varje steg beräknas riskindikatorn för vardera åtgärd. Den åtgärd som ger lägst riskindikator väljs. I nästa steg av sekvensen antas att den åtgärd som valdes i föregående steg har implementerats, så den riskreduktion som ges av vardera tidigare åtgärd inkluderas då nästa åtgärd väljs. Denna process visade sig ge bättre resultat än då 1000 slumpmässiga sekvenser analyserades.

Olika typer av riskindikatorer provades. I Morales-Torres mfl. (2016) visades att CSLS (Cost per statistical life saved) och ACSLS (Adjusted cost per statistical life saved) var de metoder som gav bäst resultat ur ett effektivitetsperspektiv, medan för ekonomisk effektivitet var ECCR (Economic cost -benefit ratio) eller ACSLS de bästa. Ur ett rättviseperspektiv var CFSP (Cost per statistical failure prevented) eller ACSLS de bästa.

Serrano-Lombillo mfl. (2017) presenterar och testar en ny riskindikator där rättvisa och effektivitet kombineras (EWACSL) och visar att denna indikator gav lika bra resultat som de bästa av de tidigare beskrivna indikatorerna. Den kan även justeras för att ytterligare ta hänsyn till samhällelig effektivitet eller individuell/ekonomisk effektivitet, medan de andra fortsatt hålls på en hög nivå.

Morales-Torres mfl. (2016) förklarar processen för ekonomisk hänsyn. Två olika typer av kostnader används; kostnader på årsbasis (av utförande, underhåll, driftkostnader) och justerade kostnader på årsbasis (total kostnadsreduktion i ekonomisk risk). För vardera riskreducerande åtgärd togs kostnader fram för utförande, underhåll och drift. Kostnaderna beräknades på årsbasis genom att spridas ut över livslängden med en diskonteringsränta av 5%. Författarna pekar på att om en kostnad-nytttoanalys görs, där värdet på liv sätts till 1.26 M€, är det endast de 10 första åtgärderna (av totalt 93) som ger positiva nettofördelar. När ACSLS-indikatorer jämförs med riktlinjer för tolerabel risk (enligt USBR och USACE) konstateras att 31 åtgärder (av 93) bör implementeras. Morales-Torres m.fl. poängterar att beslut rörande rättvisa och tolerabel risk kan inkludera åtgärder som inte är berättigade från enbart ett effektivitetsperspektiv.

3.2.2 Sammanfattande kommentarer och användning för kostnads-nyttanalys

Såväl Goulet mfl. (2015) som Spross & Johansson (2016) beskriver problem som är närliggande det som är aktuellt i föreliggande rapport. Spross & Johanssons metodik syftar till att välja bästa möjliga angreppssätt för utförande, medan Goudet mfl. försöker identifiera den optimala sekvensen. Problemet som beskrivs i föreliggande rapport är att nå erforderlig säkerhetsnivå samtidigt som kostnaderna minimeras. Jämfört med Serrano-Lombillo mfl. (2013), Serrano-Lombillo mfl. (2017) och Morales-Torres mfl (2016) är problemet delvis ett annat. De optimerar vilka åtgärder som utförs samt i vilken ordning. De har inte en fast slutpunkt, utan de åtgärder som vidtas beror av olika riskindikatorer. I vårt fall finns ett slutmål; att nå tillräckligt högt β (tillräckligt låg brottsannolikhet) och det är önskvärt att hitta den sekvens som mest troligt ger minst kostnad baserat på, vid tillfället för analysen, existerande information.

Det problem som analyseras i denna rapport skiljer sig mot de optimeringsproblem som beskrevs i avsnitt 3.2 på några viktiga punkter: i varje möjligt beslut så finns en känd slutpunkt, β_{target} , som ska uppnås. Utmaningen är att i förväg bedöma vilken insats som krävs och hur stor sannolikheten är för att få ett visst resultat, och därmed hur många olika steg som krävs för att erforderligt slutresultat ska uppnås. Det finns därmed element av flera av ovanstående beskrivningar. En skillnad är att syftet i detta fall inte är att hitta den optimala sekvensen, utan det finns ett antal möjliga sekvenser (vägar/grenar) varav vi önskar hitta den av dessa som mest troligt till lägst kostnad tar oss fram till slutmålet – en konstruktion med acceptabel säkerhet.

En beskrivning av grundidén för en kostnadsnyttanalys för ett stabilitetsproblem visas i avsnitt 4.

3.3 UNDERSÖKNINGAR OCH UPPDATERING

Epistemisk osäkerhet, eller kunskapsosäkerhet, beror på otillräcklig kunskap/information. Det innebär att osäkerheten kan reduceras genom att uppdatera kunskapen om en parameter. Detta kan göras genom undersökningar och mätningar, eller genom så kallade "proof load". Genom att använda statistiska variabler för att beskriva de ingående osäkerheterna kan Bayesiansk uppdatering används för att integrera den tillkommande informationen från undersökningarna med förhandskunskapen och på så sätt uppdatera *a priori*-skattningen av en parameter (dvs den skattning som görs innan undersökningar/tester utförs).

Den enklaste typen av Bayesiansk uppdatering är inferens av medelvärdet, μ , när standardavvikelsen, σ , är känd för en normalfördelad variabel $X \sim N(\mu_0, \sigma_0)$. Den totala osäkerheten, σ_0 , beaktar dels medelvärdets spridning σ' , dels parameters spridning:

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma^2 + (\sigma')^2}$$

och för medelvärdet gäller

$$\mu_0 = \mu'$$

Eftersom medelvärdet är känt, kan det behandlas som en slumpmässig variabel som följer en normalfördelning med *prior* $N(\mu', \sigma')$. Baserat på konjugerade priors (koppling mellan prior och posterior), är posterior fördelningen (fördelningen då den tillkommande informationen inkluderats) av parameterns medelvärde också normalfördelat med medelvärde μ'' och standardavvikelse σ'' . Posterior fördelningens medelvärde och standardavvikelse kan beräknas enligt:

$$\mu'' = \frac{m \cdot (\sigma')^2 + \mu' \cdot \frac{\sigma^2}{n}}{(\sigma')^2 + \frac{\sigma^2}{n}}$$

och

$$\sigma'' = \sqrt{\frac{(\sigma')^2 \cdot \frac{\sigma^2}{n}}{(\sigma')^2 + \frac{\sigma^2}{n}}}$$

där m är medelvärdet av testerna och n antalet tester.

Genom att använda ovanstående ekvationer reduceras den statistiska osäkerheten av genomsnittsvärdet och den totala osäkerheten kan därefter beräknas enligt

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma^2 + (\sigma'')^2}$$

och för medelvärdet gäller

$$\mu_p = \mu'$$

Det finns i verkliga ingenjörsfall ett fåtal fall där parameterns spridning är känd. Enligt Lee (2004) är dock skillnaden i resultat vanligen liten om antagandet görs att variansen är känd, jämfört med fall då variansen är okänd, och skillnaden minskar med ökande informationstillgång. Av dessa anledningar antas tillvägagångssättet ovan vara godtagbart.

Ekvationerna ovan kan användas för att uppdatera normalfördelade och log-normalfördelade variabler. För andra typer av fördelningar kan uppdatering göras med hjälp av konjugerade prior, men detta beskrivs inte vidare här utan kan studeras närmare i tex Lee (2004).

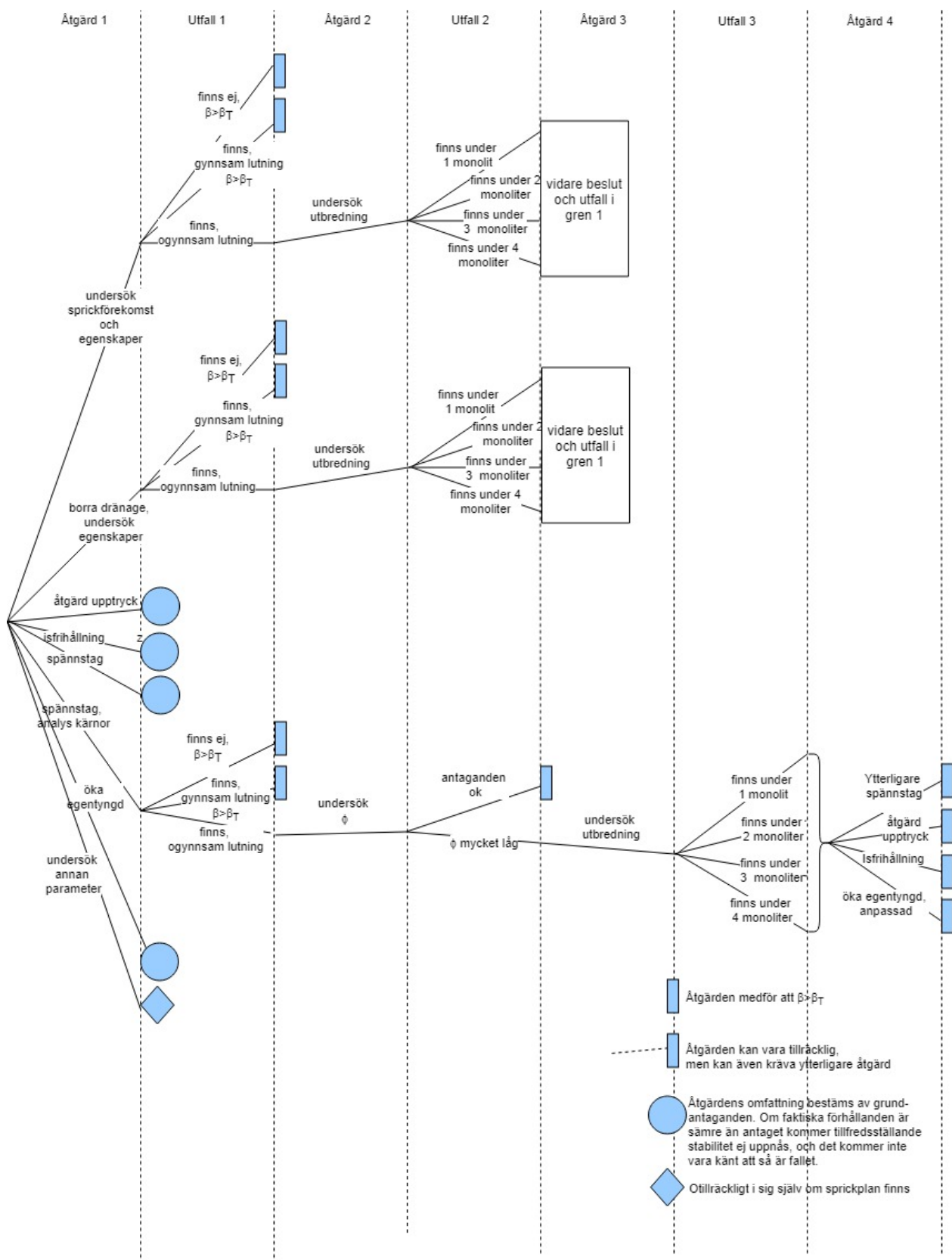
4 Kostnads-nytto analys för stabilitetsproblem

Kostnads-nyttoanalysen i föreliggande rapport baseras på följande delar:

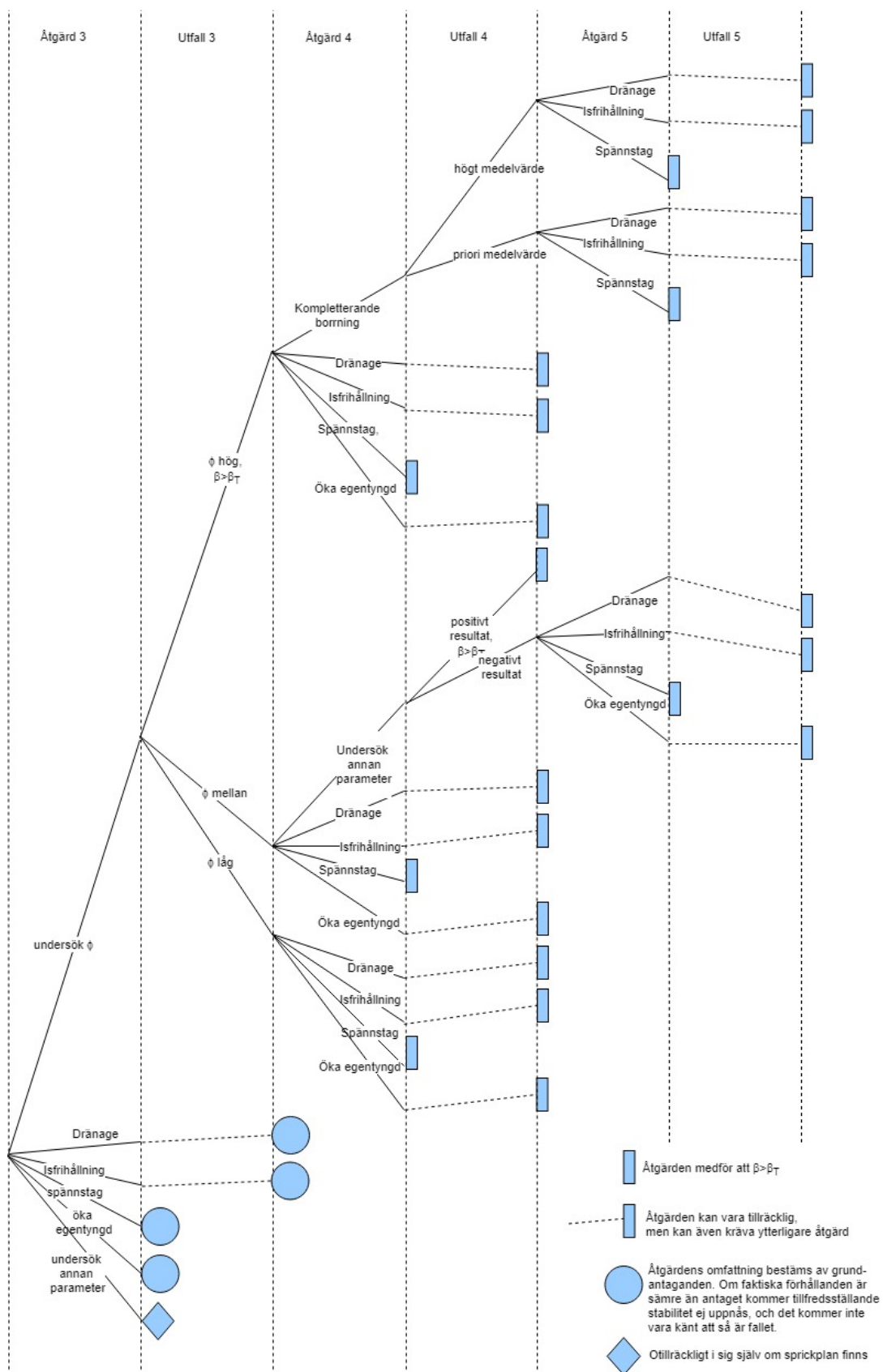
1. Upprätta ett beslutsträd där samtliga möjligheter till åtgärd, undersökning m.m. inkluderas. Vardera gren leder fram till ett acceptabelt beteende (i kommande fallstudie acceptabel brottsannolikhet)
2. Skatta sannolikhet för utfall för samtliga delar i trädet där så är nödvändigt (t.ex. utfall av undersökningar).
3. Skatta kostnader för olika åtgärder och undersökningar
4. Beräkna vilket beslut som är mest fördelaktigt.

4.1 BESKRIVNING ALLMÄNT BESLUTSTRÄD

Följande allmänna beslutsträd har upprättats för ett fall där det misstänks finnas sprickplan i berget under en konstruktion, och där den preliminära analysen visat att stabiliteten då är otillräcklig (se Figur 4-1). Vissa av grenarna presenteras för sig för att möjliggöra redovisande av alla detaljer.



Figur 4-1. Beslutsträd i sin helhet. Vissa beslut och utfall kommer redovisas vidare i Figur 4.2.



Figur 4-2. Gren 1. Försättning av beslut då ett sprickplan och dess utbredning är känt.

4.1.1 Gren 1 (undersök sprickförekomst och egenskaper)

Här görs en undersökning med kärnborrning, kartering och BIPS-loggning eller liknande för att bedöma om sprickplan finns eller ej. Antalet hål är i storleksordningen 1 per monolit.

Om sprickplan inte finns eller om lutningen är gynnsam är $\beta > \beta_{target}$ och ytterligare åtgärd behövs inte.

Om sprickans lutning är ogynnsam görs ytterligare analys för att definiera sprickans utbredning. Som utgångspunkt för detta kan den korrelation mellan sprickvidd och spricklängd som presenteras av (Vermilye, o.a., 1995) användas. Borrningen kan då visa om sprickan finns under flera monoliter eller endast en.

I nästa steg (se träd 2) står valet mellan att direkt göra en åtgärd eller att undersöka sprickans friktionsvinkel. En direkt åtgärd baseras då på den tidigare, konservativa, bedömningen av sprickans egenskaper.

Om undersökning görs är det såväl medelvärdets storlek som variansen som är av vikt; ett lågt medelvärde och en låg varians kan ge lika goda resultat som ett högre medelvärde och en högre varians. I korthet kan utfallet exempelvis bli enligt följande:

- Om den totala friktionsvinkeln är hög kan resultatet bli att $\beta > \beta_{target}$, d.v.s. att det är tillräckligt att ta reda på mer om egenskaperna och på så sätt minska osäkerheterna för att uppnå tillräckligt högt β . I vissa fall krävs åtgärder, men dessa kan då anpassas till faktiska egenskaper och blir därmed mindre omfattande än utan vidare undersökning.
- Om den totala friktionsvinkeln är mellanhög eller låg behövs troligen ytterligare åtgärder. Vilka åtgärder som är möjliga och deras omfattning måste beslutas utifrån behovet. Vid mellanhöga resultat kan det räcka med mindre åtgärder, t.ex. isfrihållning eller dränagehål, medan det vid låg friktionsvinkel krävs mer omfattande åtgärder, t.ex. spännstag eller kombination av isfrihållning och dränage.

Varje gren slutar med att $\beta > \beta_{target}$ uppnås; om det inte går att komma dit så är den grenen inte möjlig, alternativt måste ytterligare åtgärder vidtas. Exempelvis vid låg friktionsvinkel så kan isfrihållning införas, men även dränagehål och en viss mängd spännstag krävs för att nå slutmålet $\beta > \beta_{target}$.

Utgångspunkten av om åtgärden är tillräcklig är bästa möjliga antagande om egenskaperna.

4.1.2 Gren 2 (borra dränagehål och undersök samtidigt egenskaperna)

Denna gren är i stort sett densamma som gren 1, förutom att det direkt borrar dränagehål. För att möjliggöra detta krävs att ett antal hål kärnborrar för att möjliggöra undersökning (lika många som i gren 2 ovan), övriga kan hammarborras.

Om ett sprickplan finns kan dränagehålsborrningen vara tillräcklig för uppnå $\beta > \beta_{target}$. Om sprickplanet har låg friktionsvinkel krävs ytterligare åtgärder, men av mindre omfattning än i gren 1 eftersom upptrycket nu har reducerats.

Denna åtgärd kan vara fördelaktig om det finns behov av upptrycksreduktion av andra anledningar, t.ex. för att säkerställa stabilitet i kontaktytan.

Utgångspunkten vid bedömning av om åtgärden är tillräcklig är bästa möjliga antagande om egenskaperna.

4.1.3 Gren 3 (Dränage/åtgärd upptryck)

Åtgärder för upptrycksreduktion är i första hand utförande av dränagehål. I vissa fall kan urlakade injekteringsskärmar behöva åtgärdas, men då detta främst påverkar läckagemängden har detta ej inkluderats.

I denna gren hammarborras dränagehål. Insatsen är snabbare och billigare än kärnborrning, men ger ingen information om egenskaper, eller huruvida ett sprickplan finns. Vid beräkning av om åtgärden är tillräcklig görs ett mer konservativt antagande om egenskaper än i gren 1 och 2, detta eftersom någon utvärdering av faktiska egenskaper inte görs. För att åtgärden ska kunna bedömas tillfyllest måste sannolikheten att sprickplanet har sämre egenskaper än så vara tillräckligt låg för att brottsannolikheten givet detta ska kunna accepteras. Dvs

$$P(\text{sämre egenskaper}) \cdot P(\text{brott} | \text{sämre egenskaper}) < P_{ftillåten}$$

Vidare måste det påpekas att en insats för åtgärd av upptryck måste övervakas för att kunna säkerställas över tid. Utan övervakning kan inte dränagets funktion inräknas.

Utgångspunkten vid bedömning av om åtgärden är tillräcklig är konservativa antaganden om egenskaper, vilket i första hand innebär en större spridning av parametrarnas egenskaper jämfört med om egenskaperna bestämts utifrån undersökningar och provning.

4.1.4 Gren 4 (isfrihållning)

På samma vis som för gren 3 kan isfrihållning i sig vara tillräckligt, men även här finns en viss sannolikhet att sprickplanet har sämre egenskaper än det som antagits och ovanstående angreppssätt med konservativa antaganden används.

Utgångspunkten vid bedömning av om åtgärden är tillräcklig är konservativa antaganden om egenskaper.

4.1.5 Gren 5 (spännstag)

På samma vis som för gren 3 och 4 görs här antagande om egenskaper för ett sprickplan och utifrån detta planeras och installeras spännstag. Sannolikheten för att sprickplanet har sämre egenskaper än det som antas måste beaktas.

Utgångspunkten vid bedömning av om åtgärden är tillräcklig är konservativa antaganden om egenskaper.

4.1.6 Gren 6 (spännstag, analys av borrhärnor)

Vid installation av spännstag görs först ett konservativt antagande om egenskaper i eventuell spricka. Under borrhningen kontrolleras sedan kärnorna och om det finns ett sprickplan kontrolleras egenskaper för dessa så gott det går. Om faktiskt utfall är bättre än de konservativt antagna så är resultatet tillfredsställande. Om faktiskt utfall är sämre än de antagna kan ytterligare spännstag behöva placeras, alternativt behövs ytterligare åtgärd (uppretryck, isfrihållning).

En process för spännstagsinstallation kan med fördel även utföras enligt observationsmetoden; en preliminär design anpassas efter de bästa antaganden som kan göras för förhållanden på platsen. Undersökningar görs och slutlig design väljs baserat på utfall av undersökningarna. I detta fall skulle förhållanden på platsen kunna leda till att stagen inte behövs (om sprickplan ej finns), eller att staglängder/stagdimensioner/antal stag kan justeras (om förhållanden är bättre eller sämre än väntat).

Detta angreppssätt är troligen mer fördelaktigt om spännstag är nödvändiga för att säkra stabilitet mot stjälpning eller glidning i kontaktytan men det inte är klarlagt om de även behövs för att säkra stabilitet mot en spricka i grunden. Det finns då möjlighet att anpassa längd och antal efter resultat av borrhning.

Utgångspunkten vid bedömning av om åtgärden är tillräcklig är bästa möjliga antagande om egenskaperna.

4.1.7 Gren 7 (öka egentyngd)

Denna åtgärd kan vara aktuell, men oftast är den svår genomförd. På samma vis som för gren 3-5 måste utgångspunkten vara konservativa antaganden.

4.1.8 Gren 8 (undersök annan parameter)

Parametrar som kan undersökas är i första hand betongens densitet som enkelt kan testas. Detta är i de flesta fall otillräckligt för att i sig själv säkerställa stabiliteten, däremot kan det vara möjligt att använda som en kompletterande undersökningsmetod. Kärnor kan med fördel tas om borrhning i berg utförs och sparas för senare labbundersökningar.

Om denna metod används måste utgångspunkten precis som för gren 3-5 och 7 vara konservativa antaganden.

4.2 SKATTNING AV SANNOLIKHET

Skattning av sannolikhet för olika utfall har i vissa fall stor påverkan på slutresultat och det kan därför vara nödvändigt att göra känslighetsanalyser.

En första skattning av sannolikhet för att sprickplan finns kan i många fall bedömas utifrån geologin i området. Förekomst av bankningsplan eller sprickor med större apertur och/eller tydliga strukturer som kan tyda på att sannolikheten är större än vid avsaknad av tydliga strukturer och sprickor med större apertur.

Likaså är bedömningen av hur många monoliter som påverkas beroende av bedömningen av sprickornas utbredning; vid större apertur och tydliga strukturer är det mer troligt att en spricka har större utbredning och således påverkar fler monoliter.

Skattningen av egenskaper bör även det baseras på en första geologisk bedömning. Generellt så bör den preliminära analysen baseras på relativt konservativa antaganden, vilket gör att sannolikheten för att stöta på ett sprickplan med mycket dåliga egenskaper (sämre egenskaper än antaget) är låg. Det måste dock påpekas att sprickplan kan ha kraftigt vittrad yta eller sprickfyllnadsmaterial som ger mycket låga friktionsegenskaper, men att det i förväg är mycket svårt att bedöma vilka egenskaper den faktiskt har. Eftersom den preliminära analysen baseras på relativt konservativa antaganden så finns en inte försumbar sannolikhet att egenskaperna är bättre, och att stabiliteten därmed är bättre.

4.3 SKATTNING AV KOSTNADER

Det är viktigt att kostnadsskattningen är realistisk och innefattar såväl direkta kostnader som driftkostnader under konstruktionens livslängd.

Vissa åtgärder är kostnadsdrivande endast vid utförandet (undersökningar, stabilisering med ökad egentyngd), medan andra är kostnadsdrivande under hela livslängden (dränage som behöver spolats, borrar upp och övervakas), isfrihållning som är igång varje år, spännstag som behöver kontrolleras med jämna intervall).

4.4 BEDÖMNING AV MEST EFFEKTIVT BESLUT

Beslut om vilken åtgärd som utförs baseras på den åtgärd som från kostnadsnyttoanalysen har lägst trolig kostnad.

Då det mest effektiva beslutet identifierats kan det faktiska arbetet påbörjas. Efter varje åtgärd finns sedan ett utfall och en ny möjlighet att, från den punkten, fatta det mest effektiva beslutet för det fortsatta arbetet.

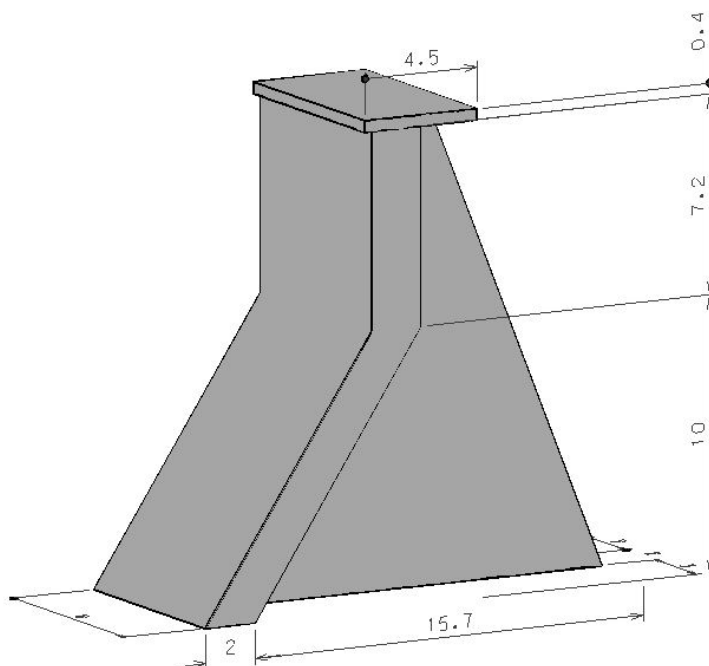
5 Fallstudie med analys av fiktiv damm

I syfte att illustrera ramverket genomförs nedan analys av ett fiktivt fall. Följande delmoment beskrivs:

1. Preliminär deterministisk analys (görs vanligen som ett första steg och då utfallet är att dammens stabilitets ifrågasätts görs vidare analyser)
2. Preliminär probabilistisk analys (beräkning av brottsannolikhet, om β_{target} ej nås görs vidare analyser)
3. Kostnads-nyttoanalys
 - a. Skattning av inverkan av dammsäkerhetshöjande åtgärder (dvs. vilka åtgärder är nödvändiga för att nå β_{target})
 - b. Skattning av sannolikhet för olika utfall
 - c. Skattning av kostnader
 - d. Analys av resultat

5.1 BESKRIVNING AV ANALYSOBJEKT OCH PROBLEMBESKRIVNING

Analysobjektet utgörs av en 17 m hög damm bestående av 4 stycken monoliter med en sammanlagd längd på 32 m. Monoliternas geometri baseras på en typisk svensk lamelldamm, se Figur 5-1. I syfte att förenkla beräkningarna antas samtliga monoliter vara identiska.



Figur 5-1. Fiktiv damm.

Kännedomen om berggrunden under dammen antas begränsad. Det finns dock, baserat på geologin i området, skäl att misstänka att ytliga, flacka sprickplan skulle kunna förekomma under dammen. Utöver en kontroll av dammens stabilitet i anliggningsytan mellan betong och berg görs därför också en kontroll av stabiliteten i ett antaget, ytligt sprickplan i berggrunden på djupet 4 m.

Den deterministiska analysen redovisas i sin helhet i Bilaga A. Resultaten sammanfattas i Tabell 5-1 och Tabell 5-2 för anliggningsytan mellan betong och berg respektive ett brottplan i berggrunden. Det kan där ses att med givna förutsättningar uppfyller monoliten ställda kriterier för alla lastfall i anliggningsytan mellan betong och berg medan stabiliteten är otillräcklig vid förekomst av sprickplan i berggrunden.

Tabell 5-1. Resultat stabilitetsanalys i anliggningsyta mellan betong och berg

Lastfall	μ	s
1	0,71	2,01
2	0,69	2,33

Tabell 5-2. Resultat stabilitetsanalys för antaget brottplan i berggrunden*

Lastfall	μ	s
1	1,35	1,05
2	1,35	1,10

*Justerade värden där hänsyn tagits till drag i framkant

5.2 PRELIMINÄR ANALYS

Då den deterministiska analysen indikerar att monoliterna är stabila i anliggningsytan mellan betong och berg kontrolleras monoliterna endast för brott i berggrunden. De sannolikhetsbaserade beräkningarna baseras på de definitioner av last och bärförmåga som gjorts i PMCD med vissa undantag vilka redovisas nedan.

5.2.1 Acceptanskriterier

I en sannolikhetsbaserad analys bedöms om en konstruktion är tillräckligt säker baserat på en tolerabel brottsannolikhet p_f^t eller på ett minsta tillåtet β , så kallat β_{target} såsom beskrivet i avsnitt 3.1.2. Då den studerade dammen antas tillhöra dammsäkerhetsklass B sätts β_{target} i fallstudien till 4,8.

5.2.2 Gränstillstånd och felmoder

Gränsfunktionen för glidning i ett svaghetsplan i berggrunden beskrivs av:

$$G_{R_j} = N' \cdot \tan \tan (\phi_{b,F} + i_F) - H$$

där $\phi_{b,F}$ är basfriktionsvinkeln för en makroskopisk slät men mikroskopisk rå yta och i_F är bidraget från sprickytans makroskopiska råhet.

Gränsfunktionen för justerad stjälpning uttrycks enligt

$$G_O = M_R - M_S$$

där M_R och M_S är mothållande och stjälpande moment.

5.2.3 Dimensioneringssituationer

Beräkningarna utförs för lastscenario 1 enligt PMCD (motsvarande lastfall 1 i RIDAS) samt lastscenario 5 (vatten vid dammkrön, motsvarande lastfall 6 enligt RIDAS). Lastscenario 5 inträffar med betydligt lägre sannolikhet än lastscenario 1 och det antas i fallstudien att sannolikheten för att lastscenario 1 inträffar är 99/100 och sannolikheten för att lastscenario 5 inträffar är 1/100.

Totalt säkerhetsindex β_{12} för respektive monolit beräknas därefter enligt ekvationen föreslagen för parallella system av Hohensbichler & Rackwitz (1983):

$$\beta_{12} = -\Phi^{-1}[\Phi_2(-\beta_1, -\beta_2; \rho_{12})]$$

där β_1 och β_2 är beräknade säkerhetsindex för respektive komponent (i detta fall lastlastscenario), Φ är den kumulativa normalfördelningsfunktionen och Φ_2 är fördelningsfunktionen för bivariat normalfördelning i två dimensioner, definierat enligt:

$$\Phi_2(x_1, x_2; \rho) = \int_{-\infty}^{x_2} \int_{-\infty}^{x_1} \varphi_2(t_1, t_2; \rho) dt_1 dt_2$$

där φ_2 är densitetsfunktionen för bivariat normalfördelning med väntevärde 0, uppskattad enligt:

$$\varphi_2(t_1, t_2; \rho) = \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} \exp \exp \left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)} (t_1^2 + t_2^2 - 2\rho t_1 t_2) \right]$$

Korrelationsfaktorn ρ_{12} mellan komponenterna ges av $\rho_{12} = \{\alpha_1^T \alpha_2\}$ där α_1 and α_2 är vektorerna innehållandes känslighetsfaktorerna för de ingående stokastiska variablerna.

5.2.4 Indata

Statistiska beskrivningar för ingående parametrar baseras i huvudsak på rekommendationer i PMCD (Westberg Wilde & Johansson, 2016a), se sammanställning av stokastisk variabler i Tabell 5-3. I och med att syftet med metoden är att illustrera metodiken så har samma antaganden gjorts för parametrarna oavsett gren.

För skjuvhållfastheten i bergsprickor har en total friktionsvinkel framräknad som summan av basfriktionsvinkeln och sprickytans råhet använts i beräkningarna:

$$\phi = \phi_{b,F} + i_F$$

Anledningen till detta är dels att undvika transformationsfel då det är den totala friktionsvinkeln som erhålls ur prover och dels att tydligt kunna illustrera inverkan av provtagningen. Friktionsvinkelns medelvärde sätts till 40 grader i enlighet med avsnitt 5.1. Medelvärdets standardavvikelse antas till 3,6 grader medan parameters standardavvikelse antas till 4,1 grader.

För upptrycket antas samma upptrycksparametrar C och C_m som för en gravitationsdamm utan dränage då inget fungerande dränage förekommer. Samma upptrycksparameter antas vid kontroll av dränage som eventuell säkerhetshöjande åtgärd i kostnadsnyttoanalysen.

Tabell 5-3. Sammanställning av stokastiska variabler

Beskrivning	Beteckning	Enhet	Fördelning	E	$V^{0,5}$	COV
Tunghet betong	γ_c	kN/m ³	Normal	23,5	0,799	0,034
Tunghet berg	γ_{berg}	kN/m ³	Normal	26,5	0,54	0,02
Max islast	I_{max}	kN	Normal	250	25	0,1
Islast trunkering	I_{trunc}	-	Normal	0	1	
Upptrycksparameter - last	C	-	Normal	1	0,05	0,05
Upptrycksparameter - moment	C_m	-	Normal	1	0,05	0,05
Tryckållfasthet bergmassa	σ	kPa	Normal	20 000	800	0,04
Friktionsvinkel bergspricka	$\tan \phi$	-	Normal	0,839	0,095	0,113

5.2.5 Resultat preliminär analys

Resultatet från den preliminära analysen redovisas i Tabell 5-4. β_i har beräknats för vardera lastfall och sedan kombinerats med sannolikhet för att just det lastfallet ska inträffa. Därefter har de kombinerats till β_{sys} . Beräknat β_{sys} är lägre än β_{target} , d.v.s. dammen uppfyller inte ställda krav utan åtgärder.

Tabell 5-4. Resultat från preliminär analys.

Lastscenario	β_i	P_i	β_{komp}	ρ	β_{sys}
1	2,434	0,99	2,438	0,984	2,438
5	1,958	0,01	3,480		

5.3 KOSTNADS-NYTTOANALYS

I kostnads-nyttoanalysen har ett antal olika åtgärder analyserats, dels med avseende på dammsäkerhetshöjande inverkan och dels med avseende kostnaden. De åtgärder som studerats är:

- 1. Undersökning av sprickförekomst och egenskaper
- 2. Borrning av dränage och samtidig undersökning av sprickförekomst och egenskaper
- 3. Borrning av dränage (utan undersökning)
- 4. Isfrihållning
- 5. Installation av spännstag.

5.3.1 Skattning av dammsäkerhetshöjande inverkan

I syfte att skatta effekten av respektive åtgärd beräknas säkerhetsindex för monoliterna inkl. inverkan av åtgärd. I det fall tillräckligt hög säkerhetsnivå inte uppnås med en åtgärd studeras kombinationen av en eller flera åtgärder.

Undersökning av sprickförekomst och dammsäkerhetshöjande inverkan

Syftet med undersökningar är dels att bekräfta sprickplanens förekomst och utbredning och dels att bekräfta sprickplanets orientering men även att öka kunskapen om sprickplanets materialparametrar och därmed reducera osäkerheten kopplad till dessa. I de fall undersökningarna visar på att sprickplanet inte finns eller att det har en gynnsam orientering så antas att dammsäkerheten för dammen uppfylls utan vidare beräkningar.

I de fall det antagna sprickplanet återfinns i ett eller flera prover så uppdateras *a priori*-skattningen av glidyttans friktionsvinkel (dvs den skattning som görs innan tester utförs) baserat på Bayesiansk uppdatering såsom beskrivet i avsnitt 3.3. I denna fallstudie har tre fall studerats, provernas medelvärde m_{prov} överstiger *a-priorifördelningens* medelvärde, provernas medelvärde är lika med *a-priorifördelningens* medelvärde samt provernas medelvärde är lägre än *priorifördelningens* medelvärde. Posterior fördelningens förväntade värde och varians för de olika fallen redovisas i Tabell 5-5, Tabell 5-6 och Tabell 5-7.

Tabell 5-5. Posteriorfördelningens förväntade medelvärde och medelvärdets varians för $\tan \phi$ då $m_{prov} = 46^\circ$

Antal prov:	1	2	3	4	8
μ_p	0,920	0,954	0,972	0,984	1,006
σ_p	0,086	0,082	0,079	0,078	0,075

Tabell 5-6. Posteriorfördelningens förväntade värde och varians för $\tan \phi$ då $m_{prov} = 40^\circ$

Antal prov:	1	2	3	4	8
μ_p	0,839	0,839	0,839	0,839	0,839
σ_p	0,086	0,082	0,079	0,078	0,075

Tabell 5-7. Posteriorfördelningens förväntade värde och varians för $\tan \phi$ då $m_{prov} = 36^\circ$

Antal prov:	1	2	3	4	8
μ_p	0,788	0,769	0,759	0,753	0,749
σ_p	0,086	0,082	0,079	0,078	0,075

I de fall då spänntag inkluderas skattas den spännlast som erfordras för att uppnå önskad säkerhetsnivå d.v.s. $\beta_{target} = 4,8$. I beräkningarna antas spännkraftens och relaxationens statistiska fördelningar baserat på PMCD.

I Tabell 5-8 visas beräknade säkerhetsindex samt den spännlast som erfordras för att uppnå β_{target} för olika åtgärds kombinationer för *a-priorifallet*. I Bilaga B redovisas resultat och erforderlig spännlast för samtliga beräknade fall (olika åtgärder, olika friktionsvinklar och olika antal prov). Erforderlig spännlast sammanfattas i Tabell 5-9.

Tabell 5-8. Resultat då a-priorifördelning antas för $\tan\phi$

Åtgärd	Lastscenario	β_i	P_t	β_{komp}	β_{sys}	Spännlast för att uppnå β_{sys} $\geq 4,8$
Ingen åtgärd	1	2,434	0,99	2,438	2,438	5200
	5	1,958	0,01	3,480		
Dränage	1	2,824	0,99	2,827	2,827	4500
	5	3,950	0,01	4,940		
Isfrihållning	1	3,137	0,99	3,140	3,140	3600
	5	1,958	0,01	3,480		
Dränage + isfrihållning	1	4,818	0,99	4,820	4,820	-
	5	3,950	0,01	4,940		

Tabell 5-9. Sammanfattning av erforderlig spännkraft vid olika provresultat och olika antal prover.

	Resultat med a-priori- fördeln.	Resultat av provning och antal prover													
	m = 40 grader	m _{prov} = 46 grader					m _{prov} = 40 grader					m _{prov} = 36 grader			
Åtgärd	n = 0 st	n = 1 st	n = 2 st	n = 3 st	n = 4 st	n = 8 st	n = 1 st	n = 2 st	n = 3 st	n = 4 st	n = 8 st	n = 1 st	n = 2 st	n = 3 st	n = 4 st
Ingen åtgärd	5200	2700	1800	1200	1000	400	4400	4000	3800	3700	3500	5500	5600	5500	5600
Dränage	4500	1900	900	300	-	-	3600	3200	3000	2900	2700	4800	4800	4800	4800
Isfrihållning	3600	1600	700	300	-	-	3200	2900	2700	2600	2400	4300	4400	4600	4500
Dränage + isfrihållning	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		450	450	350	400

5.3.2 Skattning av kostnader

Kostnader har bedömts utifrån information från projekt som rapportförfattarna med kollegor samt referensgruppen genomfört de senaste åren. I syfte att ge en rättvisande bild av kostnaderna har även driftkostnader inkluderats.

Antagandet har varit att dammen är byggd på 1950-talet (ca 70 år gammal) och har ca 50 års kvarvarande livslängd. Driftkostnader har därmed skattats för 50 år.

Den använda metodiken har varit att dagens kostnader räknas upp med 2% per år (för kostnader framåt i tiden), dvs kostnaden för en åtgärd som i år är 10 kSEK är om 5 år $I = 10 \cdot 1,02^5$. Nuvärdesberäkningen har sedan baserats på en kalkylränta på $p = 5\%$ enligt följande formel $NV = \frac{I}{(1+p)^2}$. Detta har använts såväl på årliga driftkostnader som på övriga åtgärder som återkommer (t.ex. kontroller av spännstag vart 5:e år).

För flera av åtgärderna finns dels engångskostnader som t.ex. etableringskostnader som inte påverkas av om åtgärden är liten eller stor (om det borras ett hål eller åtta). Det gör att kostnaderna för att göra ett borrhål eller sätta ett spännstag är förhållandevis högre än att borra flera hål eller sätta flera spännstag.

Antalet spännstag kan optimeras om det endast finns sprickplan under en eller ett par monoliter, vidare kan de optimeras om undersökningar visar att behovet är lägre. För en förenklad analys har det antagits att uppspänningslast på upp till 2500 kN kan tas med ett stag, men att större laster än så kräver fler stag. För riktigt små spännkrafter (<500 kN) antas något lägre kostnader med hänsyn till förväntade mindre betongarbeten, kortare borrlängd och ingjutning. För ett verkligt fall behöver denna fråga beaktas mer i detalj.

För borrhållning av dränering har antagits att detta utförs för hela dammen (fyra monoliter).

Isfrihållning har även det antagits utföras för hela dammen (fyra monoliter), detta eftersom det finns risk för valvbildning om isfrihållning endast införs för en monolit. Valvbildningen kan då leda till försämrad stabilitet för kringliggande monoliter.

De kostnader som inkluderats i analysen redovisas i Tabell 5-10.

Tabell 5-10. Kostnader som inkluderats i analys.

Undersökning	Kostnad	Enhet	Antal	enhet	kostnad
Kärnborrning 8 m/hål	2000	kr/m	4	st	64000 kr
etablering borrning	40000	kr			40000 kr
BIPS-loggning, kärnkartering					90000 kr
Totalt kärnborrning och undersökning					194000 kr
Undersökning utbredning					
Genomgång av underlag från kärnkartering och BIPS-loggning	10000	kr			10000 kr
Totalt undersökning utbredning					10000 kr
Skjuvförsök					
Labbförsök	15000	kr/försök	1	st	15 000 kr
Ett försök	15000		1	st	15 000 kr
Två försök	15000		2	st	30 000 kr
Tre försök	15000		3	st	45 000 kr
Fyra försök	15000		4	st	60 000 kr
Kompletterande borrning och skjuvförsök (8 hål antas nödvändiga)					
7 kompletterande hål inkl skjuvförsök	257000	kr			257 000 kr
6 kompletterande hål inkl skjuvförsök	226000	kr			226 000 kr
5 kompletterande hål inkl skjuvförsök	195000	kr			195 000 kr
4 kompletterande hål inkl skjuvförsök	164000	kr			164 000 kr
Dränage					
Engångskostnader					
Hammarborrning	150	kr/m	8	m	1 200 kr/hål
Hammarborrning 12 hål	1200	kr/hål	12	st	14 400 kr
Hammarborrning 16 hål	1200	kr/hål	16	st	19 200 kr
etablering borrning	40000	kr	1	st	40 000 kr
Projektering	40000	kr	1	st	40 000 kr
Portrycksgivare					
Skåp, programmering, kabeldragning	210000	kr	1	st	210 000 kr
Montage	50000	kr	1	st	50 000 kr
Givare	10000	kr/st	4	st	40 000 kr
Underhållskostnader (framtida)					
Övervakning och analys portryck	8000	kr/år	50	år	196 457 kr
Spolning ca vartannat år	8000	kr/år	50	år	196 457 kr
Uppborrning ca vart 20 år (16 hål)	150	kr/m	8	m	26 731 kr
Utbyte givare ca vart 10 år	15000	kr	4	st	122 469 kr
Totalkostnad 12 hål					936 513 kr
Totalkostnad 16 hål					941 313 kr

	Kostnad	Enhet	Antal	enhet	kostnad
<u>Spännstag</u>					
<u>Engångskostnader</u>					
Kärnborrning 140 mm kärnborrhål	3500	kr/m	30	m/hål	105 000 kr/stag
Kärnborrning per stag	105000	kr/stag	1	stag	105 000 kr
etablering borrning	40 000	kr	1	gång	40 000 kr
BIPS-loggning, kärnkartering	Se ovan				
Labbförsök	Se ovan				
Kringliggande betongjobb, 1 st	30000		1	st	30 000 kr
Kringliggande betongjobb, 2 st	25000		2	st	50 000 kr
Kringliggande betongjobb, 3 st	20000		3	st	60 000 kr
Kringliggande betongjobb, 4 st	20000	kr/stag	4	st	80 000 kr
Kringliggande betongjobb, 8 st	15000	kr/stag	8	st	120 000 kr
Stag inkl installation, per stag	100000	kr/stag	1	stag	100 000 kr
Projektering 1 stag	200000		1	gång	200 000 kr
Projektering 2 stag	240000		1	gång	240 000 kr
Projektering 3 stag	280000		1	gång	280 000 kr
Projektering 4 stag*	320000	kr	1	gång	320 000 kr
Projektering 8 stag	392000	kr	1	gång	392 000 kr
<u>Underhållskostnader</u>					
Kontroll vart 5:e år	25000	kr/gång			116 799 kr
Totalkostnad 1 stag					591 799 kr
Totalkostnad 2 stag					856 799 kr
Totalkostnad 3 stag					1 111 799 kr
Totalkostnad 4 stag					1 376 799 kr
Totalkostnad 6 stag					1 842 799 kr
Totalkostnad 8 stag					2 308 799 kr
Totalkostnad 9 stag					2 543 799 kr
Totalkostnad 12 stag					3 463 199 kr
Totalkostnad 1 litet stag					355 080 kr
Totalkostnad 2 små stag					514 080 kr
Totalkostnad 3 små stag					667 080 kr
Totalkostnad 4 små stag					826 080 kr
<u>Isfrihållning</u>					
Bubbelridå, installation med sidokanalfläkt och rördragning, hål i bordläggningsplåt samt fläkt**	500000	kr	1	gång	500000 Kr
Årsdrift (effekt 5kW*2 fläktar)	21600	kr/år	50	år	510449 kr
Ersätta gamla fläktar (25 år)	60000	kr			12112 kr
Totalkostnad bubbelridå					1022561 kr
Strålvärmare, installation	166666		1	gång	166666 kr
Årsdrift (effekt 10 kW*2 fläktar)	43200		50	år	1020898 kr
Ersätta gamla värmare vart 15 år	55555	kr/gång			33445 kr
Totalkostnad strålvärmare					1221010 kr

5.3.3 Skattning av ingående sannolikhet

I syfte att illustrera ramverket har några olika skattningar gjorts för förekomst av spricka samt utbredning. Denna skattning är svår och blir subjektiv. I allmänhet bedöms, som tidigare beskrivits, att om större strukturer och större apertur inte finns i omgivningen är det mindre sannolikt att stöta på ogynnsamma sprickplan. Erfarenheter från olika anläggningar har bekräftat sambandet. Om det å andra sidan finns större strukturer och det av någon anledning bedöms troligt att sprickplan finns är det mer troligt att stöta på ogynnsamma plan och det är även mer troligt att de har större utbredning.

De skattningar som har använts för att illustrera vilken påverkan dessa antaganden ger visas i Tabell 5-11.

Tabell 5-11. Sannolikhet för förekomst och utbredning av spricka givet geologisk struktur.

	A) Större strukturer och stora sprickvidder bedöms mindre troliga	B) Större strukturer eller stor sprickapertur bedöms troligt
P(Spricka finns ej)	0,5	0,2
P(Spricka finns, är gynnsam)	0,2	0,1
P(Spricka finns, är ogynnsam)	0,3	0,7
P(Spricka under 1 monolit)	0,4	0,1
P(Spricka under 2 monoliter)	0,3	0,2
P(Spricka under 3 monoliter)	0,2	0,3
P(Spricka under 4 monoliter)	0,1	0,4

Skattningen av friktionsegenskaper ska från början vara konservativ men "trolig". Baserat på detta skattas sannolikheten för hög, mellanhög respektive låg friktionsvinkel för det förväntade fallet som 0,3; 0,6; 0,1.

I fallstudien antas att beslut om vidare undersökning endast tas om ett positivt utfall förväntas. Denna förväntan bygger på utfallet i den första provningen. Den undersökning som görs till en början innefattar fyra borrhål, ett per monolit. Om ett sprickplan endast finns under en monolit innebär det att det endast finns en provkropp på vilken friktionsegenskaper kan kontrolleras. Om sprickplanet finns för fyra monoliter finns fyra provkroppar att kontrollera friktionsegenskaper på. Som avsnitt 5.3.1 (Tabell 5-9) visar behövs höga resultat i minst 4 provkroppar för uppdateringen ska ge en sådan påverkan att vissa åtgärder kan undvikas. Med 8 provkroppar är resultatet mer stabilt och det har därför antagits att det vid sprickplan under färre än 4 monoliter alltid borrar så att 8 provkroppar finns. I fallstudien har sannolikheten för positivt utfall av de efterföljande sju vid ett positivt originalresultat satts till 0,5. Med positivt utfall från fyra provkroppar bedöms sannolikheten för positivt utfall för de efterföljande fyra som 0,8. För en korrekt analys av detta bör en djupare analys baserad på Markovteori utföras, något som ej varit möjlig inom ramen för denna studie. Sammanfattningsvis sätts sannolikheter för olika utfall enligt Tabell 5-12.

Tabell 5-12. Sannolikhet för hög friktionsvinkel eller bekräftande av prioriantagandet i 8 prov, givet positivt utfall i 1-4 fall.

Hög ϕ givet 1 prov	0,5
Priori ϕ givet 1 prov	0,5
Hög ϕ givet 2 prov	0,6
Priori ϕ givet 2 prov	0,4
Hög ϕ givet 3 prov	0,7
Priori ϕ givet 3 prov	0,3
Hög ϕ givet 4 prov	0,8
Priori ϕ givet 4 prov	0,2

5.3.4 Resultat av kostnads-nyttoanalys

Med utgångspunkt från skattning av dammsäkerhetshöjande inverkan, kostnadsskattning och ovanstående skattningar av sannolikhet för olika utfall kan beslutsträden ritas upp i sin helhet.

Analysen har till största delen utförts i Excel, men i syfte att illustrera utfallet redovisas nedan beslutsträden med ifyllda siffror. För att kunna följa beslutsvägen visas även hur kostnadssummeringen gjorts.

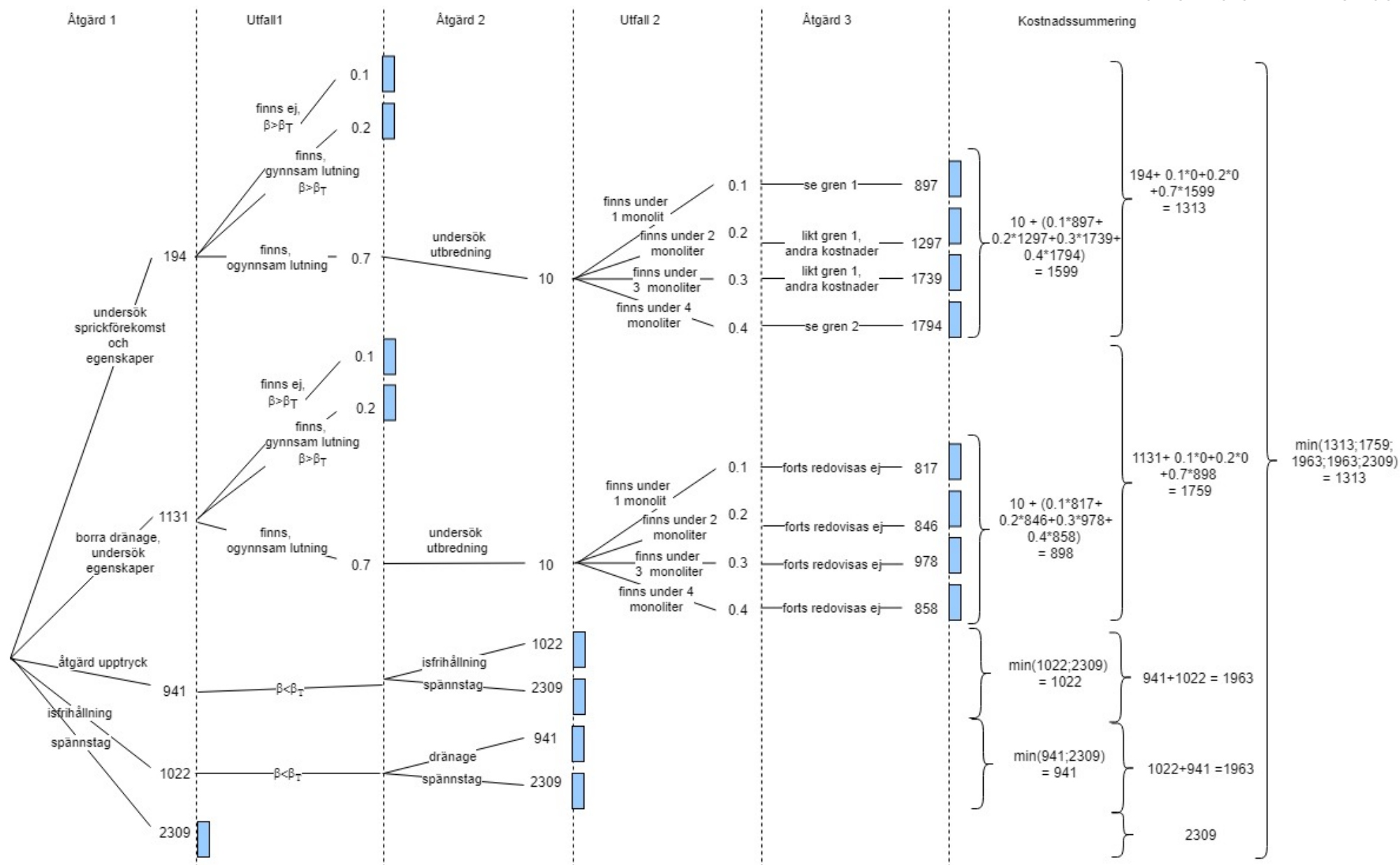
De redovisade träden består av ett huvudträd (Figur 5-2) där slututfallet visas, samt underliggande grenar. För enkelhetens skull visas endast grenarna för utfallet "spricka finns under en monolit" (Figur 5-3) och "spricka finns under fyra monoliter" (Figur 5-4). Grenarna för spricka under två respektive tre monoliter är likartade som den för en monolit, men med högre kostnader.

Kostnadssummeringen är gjord på så sätt att där två möjliga åtgärder finns har den som ger lägst kostnad valts. Minimerade kostnader har sedan multiplicerats med sannolikheten för att just det utfallet inträffar.

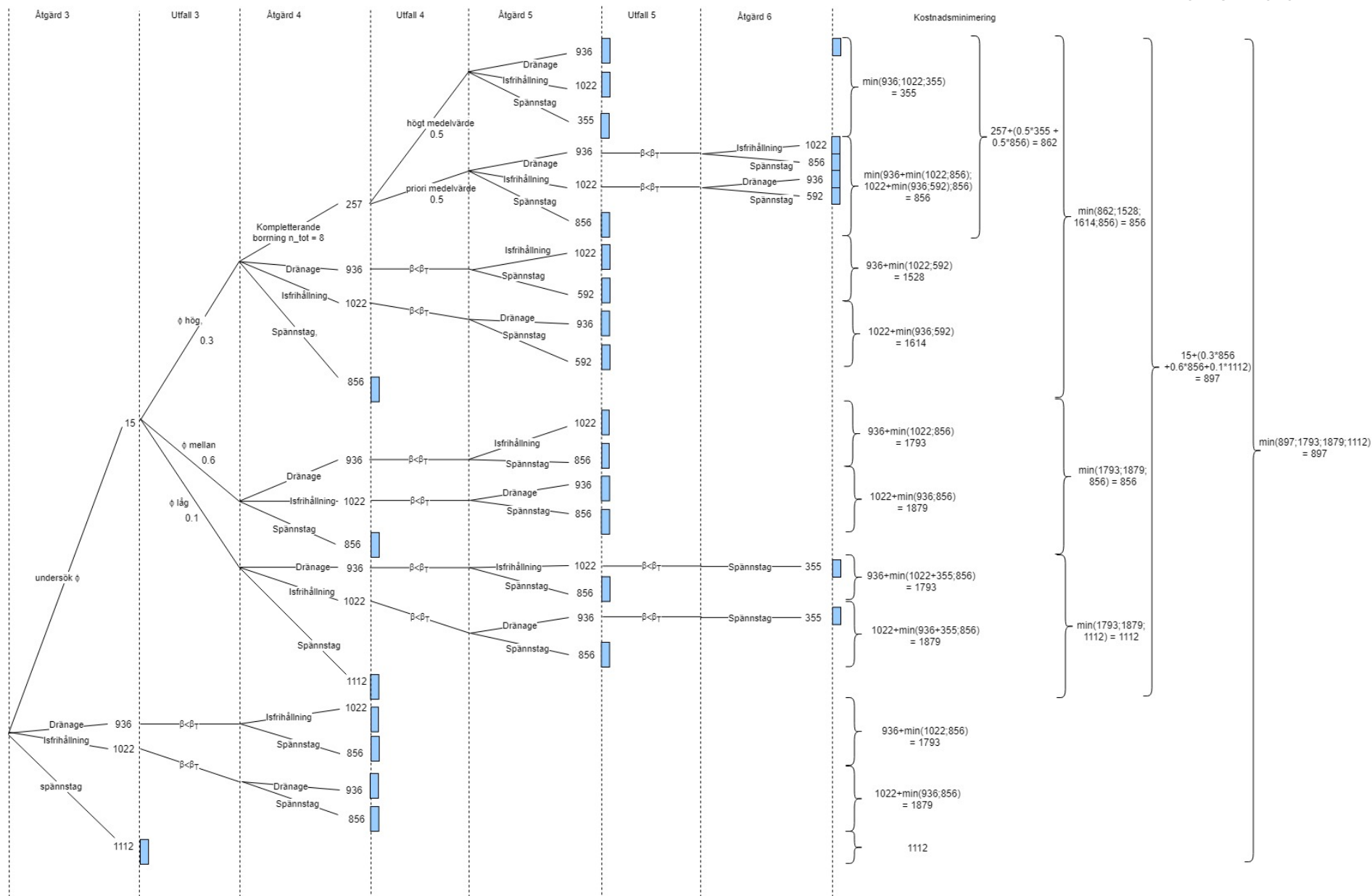
Analys av huvudträdet visar att om det är stor sannolikhet för förekomst av sprickor med stor utbredning (sannolikheter enligt alternativ B i Tabell 5-11) så är det bästa beslutet att först undersöka sprickutbredningen och därefter vidta eventuellt ytterligare erforderliga åtgärder. Kostnadsskattningen är 1 313 kSEK.

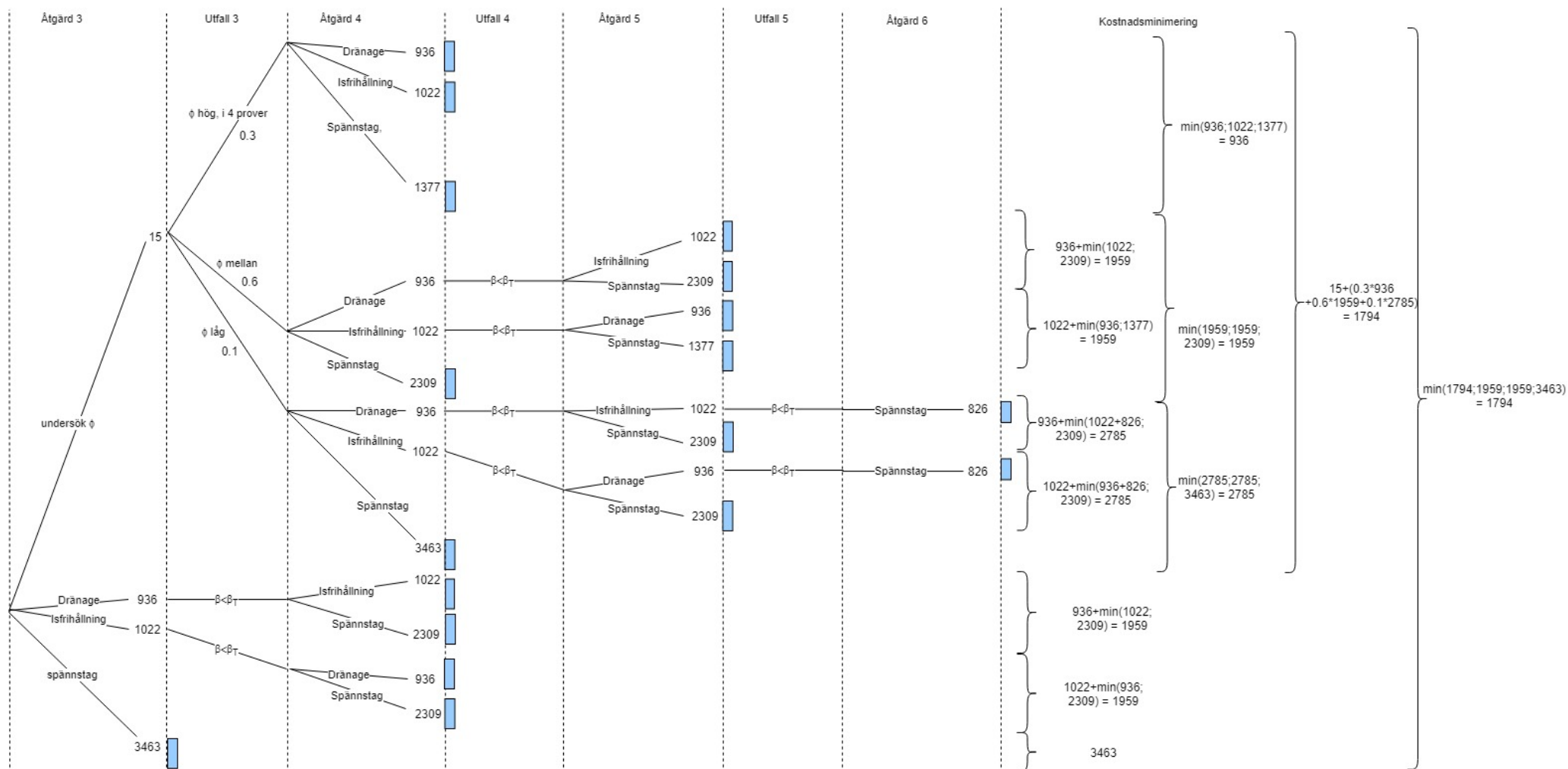
Att istället borra dränage och samtidigt undersöka är näst mest effektivt, med en kostnadsskattning på 1 759 kSEK.

Det är mindre effektivt att gå direkt på åtgärd baserat endast på a-prioriantagandena. Kostnaderna för direkt åtgärd är 1 963 kSEK (dränage + isfrihållning) – 2 309 kSEK (spännstag). Om direkt åtgärd väljs är det också viktigt att beakta att faktiska omständigheter inte är kända och att det därvid finns sannolikhet att faktiska förhållanden är såväl bättre som sämre än de antagna. Friktionsvinklar som är mycket låga (pga. sprickplan med kraftigt vittrad yta eller innehållandes sprickfyllnad) kan inte uteslutas. I ett sådant fall är åtgärden inte tillräcklig, men eftersom sannolikheten för förekomst av ett sprickplan med både ogynnsam lutning och låg friktionsvinkel är mycket låg är det orimligt att designa åtgärder med dessa som utgångspunkt. Det mer troliga är dock att egenskaperna är bättre än de antagna och därmed finns sannolikhet att åtgärden utförs i onödan eller görs onödigt omfattande.



Figur 5-2. Huvudträd. Sannolikhet för förekomst av sprickplan och utbredning enligt alternativ B i Tabell 5-11.





Figur 5-4. Gren 2, då sprickutbredning konstaterats för fyra monoliter.

Analys av underliggande grenar

För grenen *"spricka under en monolit"* (Figur 5-3) ger kostnadsminimeringen en kostnad på 897 kSEK. Det bästa valet är då att undersöka friktionsvinkeln och baserat på utfallet spänna fast konstruktionen.

Om den första provningen visar på hög friktionsvinkel kan det vara frestande att göra ytterligare undersökningar. Detta är dock inte effektivt eftersom det krävs ytterligare 7 prover med positivt utfall för att ge tillräckligt stöd för att kunna minska storleken på spännstaget.

Att gå direkt på åtgärd, utan att undersöka friktionsvinkeln, är mindre effektivt. Det krävs då tre spännstag, medan det vid hög eller mellanhög friktionsvinkel (baserat på ett prov) endast krävs två spännstag. Tre spännstag och stora spännkrafter kan även innebära problem vid installation eftersom det kan ge stor påfrestning på betongen och kräva mer omfattande åtgärder. Analys av detta har inte gjorts i denna fallstudie, men bör beaktas.

Att borra dränage eller installera isfrihållning är inte särskilt effektivt, detta eftersom båda dessa åtgärder utförs för hela dammkonstruktionen medan fastspänning kan göras endast för den del av dammen där så krävs.

För grenen *"spricka under fyra monoliter"* (Figur 5-4) ger kostnadsminimeringen en kostnad på 1 794 kSEK. Det är även i detta fall mest effektivt att undersöka friktionsegenskaperna. Om utfallet visar på en hög friktionsvinkel i samtliga fyra prover är detta tillräckligt för att få minska behovet av åtgärd och det är då tillräckligt att endast borra dränage eller installera isfrihållning (dränage billigast). Vid lägre friktionsvinkel är åtgärdsbehovet större och det är mest effektivt att borra dränage och installera isfrihållning.

En viktig observation är att valet av åtgärd ändras jämfört med en spricka under endast en monolit. Eftersom sprickan har så stor utbredning är det mer effektivt att borra dränage och installera isfrihållning än att installera spännstag. Kostnadsskillnaden med a-prioriantaganden är ca 1 500 kSEK.

Grenarna i huvudträdet för att *"borra dränage, undersök egenskaper"* redovisas ej i rapporten men följande noteringar kan göras: dränage som ensam åtgärd är endast tillräckligt då minst fyra prover visat en hög friktionsvinkel. Det innebär ytterligare kostnader för underökningsborrning, alternativt att ytterligare åtgärder måste vidtas. Det är endast i fallet med sprickutbredning under samtliga monoliter som detta är effektivt. Med andra förutsättningar än i den redovisade fallstudien kan dock denna åtgärd vara mer effektiv. Sådana förutsättningar kan vara

- Att dränage i sig för många fall är en tillräcklig åtgärd (här krävs även i de flesta fall isfrihållning/spännstag).
- Att dränage krävs av annan anledning, t.ex. för att säkerställa stabilitet mot glidplan längs med kontaktytan mellan berg och betong.

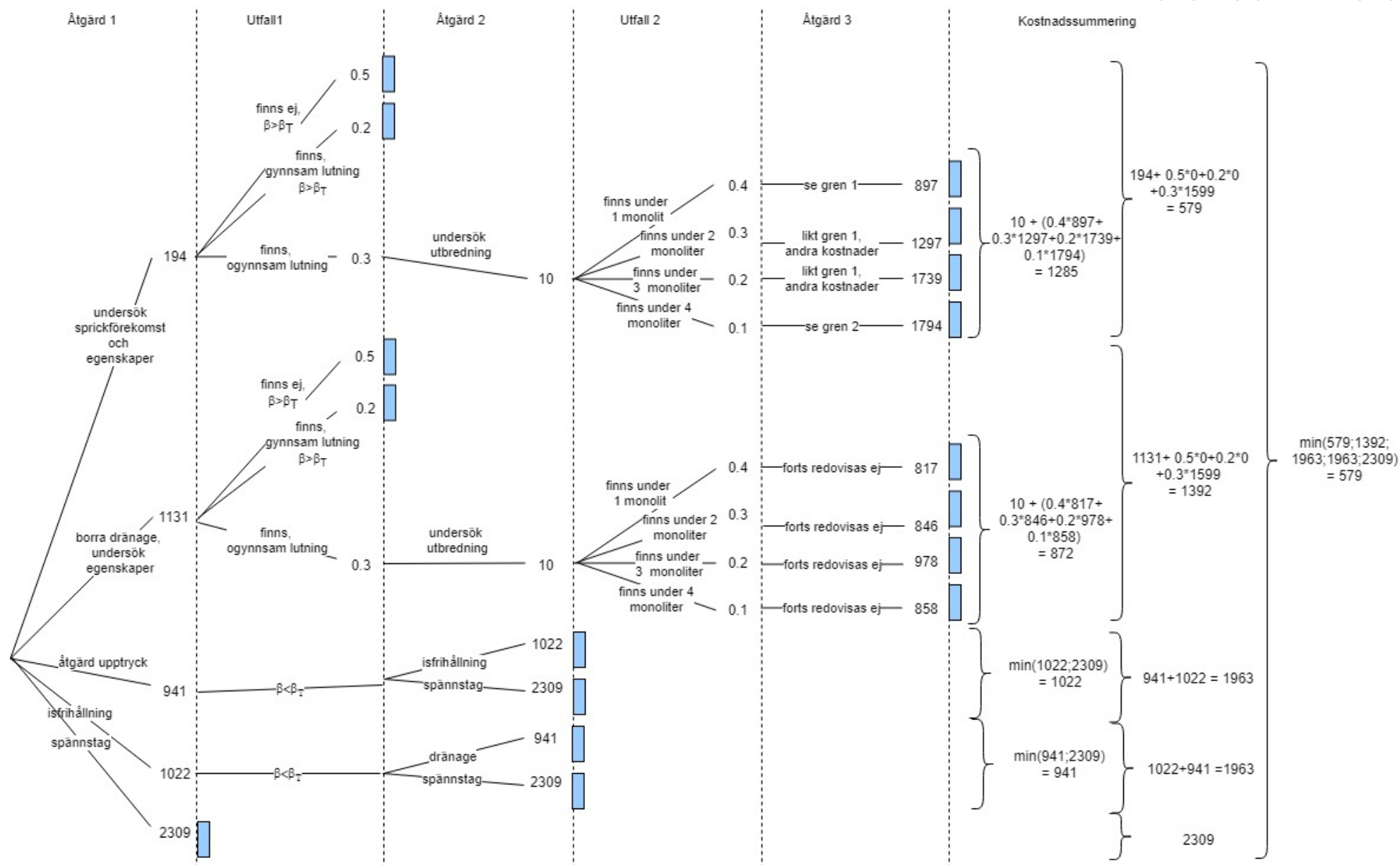
Känslighetsanalys

För att illustrera känsligheten mot grundantaganden visas huvudträdet för fallet då det är liten sannolikhet för förekomst av sprickplan med stor utbredning

(sannolikheter enligt alternativ A i Tabell 5-11). Underliggande grenar är desamma som tidigare.

I detta fall är det än mer tydligt att det mest effektiva beslutet är att först undersöka sprickutbredningen och därefter vidta eventuellt ytterligare erforderliga åtgärder. Kostnadsskattningen är där 579 kSEK, att jämföra med kostnadsskattningen då dränage borras samtidigt med undersökning (1 392 kSEK) eller då direkt åtgärd görs (1 963 kSEK för dränage och isfrihållning, 2 309 kSEK för spännstag).

Det är tydligt att grundantagandet har stor påverkan på kostnadsskattning. Om det antas att det är stor sannolikhet för förekomst av sprickor med stor utbredning (alternativ B i Tabell 5-11) var kostnadsskattningen 1 313 kSEK, att jämföra med 579 kSEK om det är liten sannolikhet för förekomst av sprickplan med stor utbredning (alternativ A i Tabell 5-11).



Figur 5-5. Huvudträd. Sannolikhet för förekomst av sprickplan och utbredning enligt alternativ A i Tabell 5-11. Gren 2 och 3 är de tidigare redovisade.

5.4 DISKUSSION KRING FALLSTUDIEN

I fallstudien är det mest fördelaktigt att utföra undersökningar för att identifiera hur många monoliter som har sprickplan. Vidare är det fördelaktigt att utföra en första bedömning av friktionsegenskaperna. Även med endast ett resultat kan osäkerheten i friktionsegenskaper minskas tillräckligt mycket för att nödvändiga åtgärder ska kunna minskas jämfört med behov utan undersökningar. Detta gäller både då det skattas vara hög förekomst av sprickplan och de har stor utbredning och då det skattas vara låg förekomst av sprickplan och de har liten utbredning.

Kostnadsskattningen av införande av isfrihållning innehåller stor osäkerhet eftersom det finns olika metoder för detta. I skattningen i fallstudien har antagits att en åtgärd tänkt att hålla under lång tid utförs som en fast installation, men det finns även möjlighet att använda tex sänkbar utrustning fäst på vajer där kostnaderna kan minskas.

Kostnadsskattningen för dränage innehåller även det stor osäkerhet. I syfte att säkerställa dränagets funktion över tid krävs att upptrycket övervakas. Utan övervakning är det inte möjligt att verifiera att en upptrycksreduktion sker. Med tanke på att igensättning av dränaget kan förväntas ske (det tar dock olika tid beroende på förutsättningarna vid aktuell anläggning) måste fullt upptryck antas om övervakning inte finns. Övervakningen kan då användas för att bedöma behov av spolning och uppborrning av dränagehålen. Kostnader för samtliga dessa åtgärder kommer vara såväl ägar- som anläggningsspecifika.

6 Slutsatser

Det sannolikhetsbaserade ramverket möjliggör att i förväg kunna jämföra olika åtgärder ur ett kostnads-nytt-perspektiv genom att på ett systematiskt sätt analysera olika utfall och sannolikheten för att de olika utfallen inträffar.

Detta möjliggör ett systematiskt arbetssätt där många aspekter beaktas och tydliggör vikten av att fatta beslut baserat både på existerande och möjliga framtida information där de epistemiska osäkerheterna reducerats.

I syfte att visa möjlig användning av ett sannolikhetsbaserat ramverk för kostnads-nyttanalys redovisades här en fallstudie med en fiktiv lamelldamm där säkerhet mot potentiellt sprickplan i berget var otillräcklig. Ramverket är även möjligt att använda för andra typer av beslutsproblem. Det är även möjligt att använda kostnads-nyttanalysen på deterministiska analyser, även om möjligheterna till att inkludera kompletterande provningar då kraftigt försämras. Med en sannolikhetsbaserad metodik är det möjligt att göra en Bayesiansk uppdatering av originalantagande avseende medelvärde och standardavvikelse för viktiga parametrar. I en deterministisk analys är det inte tydligt vad ingående värden symboliserar och någon osäkerhet i skattningen finns inte beskriven. Det är därmed inte möjligt att göra en uppdatering baserat på provning. Exempelvis om det första antagandet kring friktionsvinkel är på 40 grader och resultat från borrning visar på en friktionsvinkel på 46 grader. Ska det första antagandet antas motsvara ett medelvärde eller en konservativ skattning? Vilken skattning kan göras av friktionsvinkeln? Hur många prov behövs för att få en tillförlitlig skattning? Med en sannolikhetsbaserad metod är det möjligt att på ett tillförlitligt vis uppdatera en parameterskattning och även att bestämma hur många prover som behövs för uppdateringen.

Kostnads-nyttanalysen är en del i beslut kring vilken åtgärd som är mest lämplig, men även andra avvägningar är nödvändiga. Vidare undersökningar är (som fallstudien visar) i många fall kostnadseffektiva och ger en optimering av åtgärdens omfattning, men även i fall då de inte är den mest kostnadseffektiva åtgärden kan de vara lämpliga i syfte att öka kunskapen och minska osäkerheterna. I fallstudien har såväl kostnader vid själva utförandet som driftkostnader över tid inkluderats. Det kan självklart finnas avvägningar avseende detta som gör att en mer kostsam åtgärd kan vara fördelaktig, eller att en högre framtida driftkostnad kan vara att föredra.

En vidareutveckling som kan göras, och som är nödvändigt att väga in vid beslut, är att även inkludera en riskkostnad vid åtgärd, dvs. att i analysen inkludera risken för brott vid åtgärd. Ett rimligt antagande är då att en liten höjning av säkerheten (β) som samtidigt innebär en stor riskkostnad blir tydligt ogynnsam.

I fallstudien framgick att undersökningar kan minska åtgärdsbehovet, genom att minska behovet av spännkraft eller säkerställa att endast dränage eller endast isfrihållning var nödvändig. I fallstudien var β ca 2,7 i den preliminära analysen, vilket är lågt. I ett fall då den preliminära analysen resulterat i ett högre β är det möjligt att undersökningar som resulterat i minskade osäkerheter hade lett till att

enbart detta varit tillräckligt för att uppnå $\beta_{\text{target}} = 4,8$. I fallstudien var dammen i dammsäkerhetsklass B. För en damm i dammsäkerhetsklass A hade åtgärdsbehoven varit än större och det är inte troligt att fyra positiva provresultat skulle kunnat minska åtgärdsbehovet på samma vis som i fallstudien. För en damm i dammsäkerhetsklass A är det dock än viktigare att ha kontroll på de osäkerheter som finns, och av denna anledning vore undersökningar en lämplig åtgärd.

För många dammar är det betonghållfasthet och berghållfasthet som begränsar uppspänningslast och i undersökningar kan då bidra till att bättre precisera faktiskt behov.

Övriga erfarenheterna från de genomförda analyserna är även att:

- Trädet som beskriver möjliga åtgärder blir lätt väldigt stort. I fallstudien ville vi belysa ett flertal möjligheter, i ett verkligt fall kan man troligen av olika skäl på ett tidigare stadium utesluta vissa åtgärder (till exempel kan man göra skattning av hur många/stora stag och spännkraft som är möjliga och på så vis begränsa åtgärdsalternativen).
- Kostnadsskattningen innehåller även den osäkerheter. I fallstudien har dessa inte inkluderats, och det är endast möjligt att göra känslighetsanalys (dvs variera en kostnad uppåt och nedåt). I en framtida utveckling kan kostnader läggas in som en fördelningsfunktion varvid även utfallet ges som en fördelning med medelvärde och standardavvikelse.

7 Referenser

Baji H, Li C-Q, Scicluna, S (2017) Risk-cost optimized maintenance strategy for tunnel structures. *Tunneling and Underground Space Technology*, ss. 72-84.

CEN (2001) Eurocode 1990. - 2001.

Ellingwood B. (1982) Probability-based criteria for structural design. *Structural Safety*.

Goulet J-A, Der Kiureghian A och Li B (2015) Pre-posterior optimization of sequence of measurement and intervention actions under structural reliability constraint. *Structural Safety*, ss. 1-9. .

Hohensbichler M. och Rackwitz R (1983) First-order concepts in system reliability. *Structural Safety*. ss. 1(3):177-188.

JCSS (2001) Joint Committée of Structural Safety: Probabilistic model code.

Johansson, F. (2009) *Shear Strength of Unfilled and Rough Rock Joints in Sliding Stability Analyses of Concrete Dams*, Doktorsavhandling Stockholm : KTH, TRITA-JOB. PHD, 1013, 2009.

Johansson, F., Westberg Wilde, M., Krounis, A., Spross, J. & Rios Bayona, F. (2018) Some recent developments in reliability based sliding stability assessment for concrete dams. 23rd ICOLD Congress, Wien.

Krounis A., Johansson, F., Spross, J. & Larsson, S (2017) Influence of Cohesive Strength in Probabilistic Sliding Stability Reassessment of Concrete Dams. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2 : Vol. 143.

Lee P.M. (2004) *Bayesian statistics: an introduction*. - New York : Oxford University Press, 2004.

Morales-Torres, A; Escuder-Bueno, I; Altarejos-Garcia, L; Serrano-Lombillo, A. (2016) Building fragility curves of sliding failure of concrete gravity dams integrating natural and epistemic uncertainties. *Eng. Struct.* Vol. 125. - ss. 227-235.

Phoon K.K., Kulhawy F.H. och Mircea D.G. (2003) Development of a reliability-based design framework for transmission line structure foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.

Serrano-Lombillo, Armando; Morales-Torres, Adrián; Escuder-Bueno, Ignacio; Altarejos-Garcia, Luis (2017) A new risk reduction indicator for dam safety management combining efficiency and equity principles. *Structure and Infrastructure Engineering*. ss. 1157-1166.

Serrano-Lombillo, Armando; Morales-Torres, Adrián; Escuder-Bueno, Ignacio; Altarejos-Garcia, Luis (2013) Review, analysis and application of existing risk reduction principles and risk indicators for dam safety management.

Spross Johan & Johansson Fredrik (2017) When is the observational method in geotechnical engineering favourable. *Structural Safety*. ss. 17-26.

Spross, J., Johansson, F. & Larsson, S. (2014) On the use of pore pressure measurements in safety reassessment of concrete dams founded on rock. *Georisk: Assessment and Management of Risk For Engineered Systems and Geohazards*. Taylor & Francis.

Svensk Energi (2012) *RIDAS - Kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet*.

Thoft-Christensen Palle (2012) *Infrastructures and Life-Cycle Cost-Benefit Analysis. Structure & Infrastructure Engineering*.

Vermilye J.M. och Scholtz C.H. (1995) Relation between vein length and aperture. *Journal of Structural Geology*. ss. 17:423-434.

Westberg Marie (2010) *Reliability-based evaluation of concrete dams*. Lund, Sweden : Lund Institute of Technology, Lund University, Doctoral Thesis, 2010.

Westberg Wilde Marie och Johansson Fredrik (2016a) *Probabilistic model code for concrete dams*: Energiforsk, report 2016:292, 2016a.

Westberg Wilde Marie och Johansson Fredrik (2016b) *Sannolikhetsbaserad evaluering av betongdammars stabilitet*: Energiforsk, rapport 2016:291, 2016b.

Bilaga A: Initial deterministisk analys

Laster och lastfall

I de deterministiska beräkningarna, behandlas två huvudsakliga RIDAS-lastfall:

Lastfall 1: ÖVY vid DG, maximalt istryck

Lastfall 6: ÖVY vid DK, inget istryck.

De laster som inkluderas i beräkningar utgörs utav dammens samt bergets egentyngd där tillämpligt, hydrostatisk tryck, islast samt upptryck. Islastens intensitet sätts i enlighet med RIDAS till 200 kN/m då dammen antas lokaliserad i norra Sverige. Upptryckets utbredning beaktas i enlighet med RIDAS. I anliggningsytan mellan berg och betong antas upptrycket under frontskiva som för en massivdamm utan dräner medan det försummas för den stödjande pelaren då pelartjockleken ≤ 2 m samtidigt som nedströmsvattenytan antas i nivå med grundläggningsnivån. För brottplan i berggrunden antas upptrycket avta linjärt från fullt vattentryck vid uppströmssidan till atmosfäriskt tryck på nedströmssidan. För de delar av bottenarean som beräkningsmässigt inte är tryckta antas fullt upptryck.

Acceptanskriterier

Dammens stabilitet kontrolleras med avseende på glidning och stjälpning.

Rekommenderade tillåtna värden på stjälpssäkerhetsfaktorn s_{till} enligt nu gällande version av RIDAS, se 7-1 tillämpas för anliggningsytan mellan betong och berg samt för stjälpning i det antagna sprickplanet i berggrunden.

Tabell 7-1. Säkerhetsfaktor s mot stjälpning enligt RIDAS.

	Vanligt lastfall	Exceptionellt lastfall	Olyckslastfall
s_{till}	1,5	1,35	1,1

För glidning i anliggningsytan mellan betong och berg används rekommenderade tillåtna värden på glidfaktorn μ_{till} vid grundläggning på "bra berg" enligt nu gällande version av RIDAS, se 7-2.

Tabell 7-2. Rekommenderade tillåtna värden på glidfaktorn μ_{till} vid grundläggning på "bra berg", enligt nu gällande version av RIDAS.

	Vanligt lastfall	Exceptionellt lastfall	Olyckslastfall	Brottvärde
Glidfaktor μ_{till}	0,75	0,90	0,95	1,0
Motsvarande friktionsvinkel $\phi(^{\circ})$	37	42	43,5	45

Vid kontroll av glidplan i grunden föreskriver RIDAS att tillåten friktionskoefficient bestäms med hänsyn till gjorda grund-undersökningar. Tillåtna värden på μ_{till} erhålls därefter genom att brottvärdet för friktionskoefficient i glidytan $\tan \delta_g$ divideras med en säkerhetsfaktor s_g enligt:

$$\mu_{till} = \frac{\tan \tan \delta_g}{s_g}$$

Säkerhetsfaktorer s_g enligt RIDAS för beräkning av μ_{till} baserat på undersökningar enligt denna ekvation redovisas i tabell 7-3.

Tabell 7-3. Säkerhetsfaktor s_g för beräkning av μ_{till} enligt RIDAS.

	Vanligt lastfall	Exceptionellt lastfall	Olyckslastfall
s_g	1,35	1,10	1,05

Den maximala friktionsvinkeln vid brott δ_g kan beräknas baserat på undersökningar/observationer med hjälp av följande samband av Barton (1973):

$$\delta_g = \phi_p = JRC \cdot \log \log \left(\frac{JCS}{\sigma'_n} \right) + \phi_b$$

där σ'_n är effektiv normalspänning i sprickytan, ϕ_b är friktionsvinkelns basvärde, JRC är sprickytornas råhetskoefficient (Joint Roughness Coefficient) och JCS är sprickytornas tryckhållfasthet (Joint Compressive Strength).

Vid bestämning av skjuvhållfastheten i befintliga sprickplan finns det två spricktyper som måste särskiljas, ofyllda och fyllda sprickor. Då inga kända grundundersökningar finns för berggrunden under dammen uppskattas μ_{till} baserat på tidigare erfarenheter och tabellvärden för en bra men sprucken berggrund av ovittrad granit med råa sprickor. Detta då det anses för konservativt att behöva anta fyllda sprickor när sprickans lutning och utbredning redan är konservativt antaget.

För fallstudien uppskattas friktionsvinkelns basvärde ϕ_b till 31°, en sammanställning av friktionsvinkelns basvärde för granit under torra och våta förhållanden presenteras i tabell 7-4 medan råhetskoefficienten JRC0 antas till 10. JCS0 uppskattas till 100 MPa.

Tabell 7-4. Säkerhetsfaktor s_g för beräkning av μ_{till} enligt RIDAS.

Bergart	Förhållande	Friktionsvinkelns basvärde, ϕ_b
Granit finkornig	Torrt	31°-35°
Granit finkornig	Vått	29°-31°
Granit grovkornig	Torrt	31°-35°
Granit grovkornig	Vått	31°-33°

För att utföra en korrigering till in-situ skala av de skalberoende parametrarna JRC och JCS används följande av Barton och Bandis (1992) empiriskt härledda ekvationer:

$$JRC_n = JRC_0 \cdot \left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{-0,02JRC_0}$$

och

$$JCS_n = JCS_0 \cdot \left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{-0,03JRC_0}$$

Där JRC_n är råhetskoefficienten i in-situ skala, JRC_0 är råhetskoefficienten i laboratorieskala, JCS_n är sprickytans tryckhållfasthet i in-situ skala, JCS_0 är sprickytans tryckhållfasthet i laboratorieskala, L_n är sprickans längd i in-situ skala och L_0 är sprickans längd i laboratorieskala. Då den genomsnittliga blockstorleken under dammen inte är känd antas den här vara 2 m. Detta resulterar i glidfaktorer för spricka i berg enligt 7-5. I korrigering har en normalspänning på 0,40 MPa använts, vilken enligt beräkningarna är den maximala normalspänningen i det antagna sprickplanet under dammen.

Tabell 7-5. Beräknade värden på tillåten glidfaktor för spricka i berg

	Vanligt lastfall $s_g = 1,5$	Exceptionellt lastfall $s_g = 1,1$	Brottvärde
Glidfaktor μ_{till}	0,63	0,77	1,0
Motsvarande friktionsvinkel φ (°)	30,8	36,2	40

Resultaten från den deterministiska analysen redovisas i Tabell 5-1 samt Tabell 5-2 för anliggningsytan mellan betong och berg respektive ett brottplan i berggrunden. Det kan där ses att med givna förutsättningar uppfyller monoliten ställda kriterier för alla lastfall i anliggningsytan mellan betong och berg medan stabilitet är otillräcklig vid förekomst av sprickplan i berggrunden.

Tabell 7-6. Resultat stabilitetsanalys i anliggningsyta mellan betong och berg

Lastfall	μ	s
1	0,71	2,01
2	0,69	2,33

Tabell 7-7. Resultat stabilitetsanalys för antaget brottplan i berggrunden*

Lastfall	μ	s
1	1,35	1,05
2	1,35	1,10
Justerade värden där hänsyn tagits till drag i framkant		

Bilaga B: Resultat av beräkningar för olika åtgärder

Nedan redovisas resultat av beräkningar för olika åtgärder och olika erforderlig spännlast för respektive fall för olika resultat av provning och olika antal prov.

Tabell 7-8. Resultat för posteriorfördelning $\tan \phi$ då $m_{prov} = 46$ grader och $n = 1$ st

Åtgärd	Lastscenario	β_i	Pf	β_{komp}	β_{sys}	Spännlast för att uppnå $\beta_{sys} \geq 4,8$
Ingen åtgärd	1	3,408	0,99	3,411	3,411	2700
	5	2,922	0,01	4,140		
Dränage	1	3,856	0,99	3,858	3,858	1900
	5	5,256	0,01	6,047		
Isfrihållning	1	4,257	0,99	4,259	4,140	1600
	5	2,922	0,01	4,140		
Dränage + isfrihållning	1	6,114	0,99	6,116	6,032	-
	5	5,256	0,01	6,047		

Tabell 7-9. Resultat för posteriorfördelning $\tan \phi$ då $m_{prov} = 46$ grader och $n = 2$ st

Åtgärd	Lastscenario	β_i	Pf	β_{komp}	β_{sys}	Spännlast för att uppnå $\beta_{sys} \geq 4,8$
Ingen åtgärd	1	3,848	0,99	3,850	3,849	1800
	5	3,370	0,01	4,479		
Dränage	1	4,328	0,99	4,330	4,330	900
	5	5,898	0,01	6,616		
Isfrihållning	1	4,787	0,99	4,789	4,477	700
	5	3,370	0,01	4,479		
Dränage + isfrihållning	1	6,803	0,99	6,804	6,616	-
	5	5,898	0,01	6,616		

Tabell 7-10. Resultat för posteriorfördelning $\tan \phi$ då $m_{prov} = 46$ grader och $n = 3$ st

Åtgärd	Lastscenario	β_i	Pf	β_{komp}	β_{sys}	Spännlast för att uppnå $\beta_{sys} \geq 4,8$
Ingen åtgärd	1	4,114	0,99	4,116	4,114	1200
	5	3,643	0,01	4,693		
Dränage	1	4,619	0,99	4,621	4,621	300
	5	6,326	0,01	7,002		
Isfrihållning	1	5,123	0,99	5,125	4,693	300
	5	3,643	0,01	4,693		
Dränage + isfrihållning	1	7,270	0,99	7,271	7,002	-
	5	6,326	0,01	7,002		

Tabell 7-11. Resultat för posteriorfördelning $\tan \phi$ då $m_{prov} = 46$ grader och $n = 4$ st

Åtgärd	Lastscenario	β_i	Pf	β_{komp}	β_{sys}	Spännlast för att uppnå $\beta_{sys} \geq 4,8$
Ingen åtgärd	1	4,263	0,99	4,265	4,263	1000
	5	3,798	0,01	4,817		
Dränage	1	4,779	0,99	4,781	4,781	-
	5	6,549	0,01	7,205		
Isfrihållning	1	5,304	0,99	5,306	4,817	-
	5	3,798	0,01	4,817		
Dränage + isfrihållning	1	7,508	0,99	7,509	7,205	-
	5	6,549	0,01	7,205		

Tabell 7-12. Resultat för posteriorfördelning $\tan \phi$ då $m_{prov} = 46$ grader och $n = 8$ st

Åtgärd	Lastscenario	β_i	Pf	β_{komp}	β_{sys}	Spännlast för att uppnå $\beta_{sys} \geq 4,8$
Ingen åtgärd	1	4,577	0,99	4,579	4,564	400
	5	4,125	0,01	5,083		
Dränage	1	5,126	0,99	5,128	5,128	-
	5	7,072	0,01	7,685		
Isfrihållning	1	5,705	0,99	5,707	5,078	-
	5	4,125	0,01	5,083		
Dränage + isfrihållning	1	8,076	0,99	8,077	7,685	-
	5	7,072	0,01	7,685		

Tabell 7-13. Resultat för posteriorfördelning $\tan \phi$ då $m_{prov} = 40$ grader och $n = 1$ st

Åtgärd	Lastscenario	β_i	Pf	β_{komp}	β_{sys}	Spännlast för att uppnå $\beta_{sys} \geq 4,8$
Ingen åtgärd	1	2,621	0,99	2,624	2,624	4400
	5	2,113	0,01	3,578		
Dränage	1	3,050	0,99	3,053	3,053	3600
	5	4,342	0,01	5,264		
Isfrihållning	1	3,409	0,99	3,412	3,399	3200
	5	2,113	0,01	3,578		
Dränage + isfrihållning	1	5,192	0,99	5,194	5,132	-
	5	4,342	0,01	5,264		

Tabell 7-14. Resultat för posteriorfördelning $\tan \phi$ då $m_{prov} = 40$ grader och $n = 2$ st

Åtgärd	Lastscenario	β_i	Pf	β_{komp}	β_{sys}	Spännlast för att uppnå $\beta_{sys} \geq 4,8$
Ingen åtgärd	1	2,710	0,99	2,713	2,713	4000
	5	2,189	0,01	3,628		
Dränage	1	3,159	0,99	3,162	3,162	3200
	5	4,541	0,01	5,431		
Isfrihållning	1	3,543	0,99	3,546	3,506	2900
	5	2,189	0,01	3,628		
Dränage + isfrihållning	1	5,434	0,99	5,436	5,389	-
	5	4,541	0,01	5,431		

Tabell 7-15. Resultat för posteriorfördelning $\tan \phi$ då $m_{prov} = 40$ grader och $n = 3$ st

Åtgärd	Lastscenario	β_i	Pf	β_{komp}	β_{sys}	Spännlast för att uppnå $\beta_{sys} \geq 4,8$
Ingen åtgärd	1	2,779	0,99	2,782	2,782	3800
	5	2,248	0,01	3,667		
Dränage	1	3,244	0,99	3,247	3,247	3000
	5	4,702	0,01	5,568		
Isfrihållning	1	3,649	0,99	3,652	3,578	2700
	5	2,248	0,01	3,667		
Dränage + isfrihållning	1	5,630	0,99	5,632	5,558	-
	5	4,702	0,01	5,568		

Tabell 7-16. Resultat för posteriorfördelning $\tan \phi$ då $m_{prov} = 40$ grader och $n = 4$ st

Åtgärd	Lastscenario	β_i	Pf	β_{komp}	β_{sys}	Spännlast för att uppnå $\beta_{sys} \geq 4,8$
Ingen åtgärd	1	2,803	0,99	2,806	2,806	3700
	5	2,268	0,01	3,680		
Dränage	1	3,273	0,99	3,276	3,276	2900
	5	4,758	0,01	5,616		
Isfrihållning	1	3,685	0,99	3,688	3,610	2600
	5	2,268	0,01	3,680		
Dränage + isfrihållning	1	5,699	0,99	5,701	5,589	-
	5	4,758	0,01	5,616		

Tabell 7-17. Resultat för posteriorfördelning $\tan \phi$ då $m_{prov} = 40$ grader och $n = 8$ st

Åtgärd	Lastscenario	β_i	Pf	β_{komp}	β_{sys}	Spännlast för att uppnå $\beta_{sys} \geq 4,8$
Ingen åtgärd	1	2,875	0,99	2,878	2,878	3500
	5	2,331	0,01	3,722		
Dränage	1	3,361	0,99	3,364	3,364	2700
	5	4,934	0,01	5,767		
Isfrihållning	1	3,798	0,99	3,800	3,684	2400
	5	2,331	0,01	3,722		
Dränage + isfrihållning	1	5,914	0,99	5,916	5,764	
	5	4,934	0,01	5,767		

Tabell 7-18. Resultat för posteriorfördelning $\tan \phi$ då $m_{prov} = 36$ grader och $n = 1$ st

Åtgärd	Lastscenario	β_i	Pf	β_{komp}	β_{sys}	Spännlast för att uppnå $\beta_{sys} \geq 4,8$
Ingen åtgärd	1	2,115	0,99	2,119	2,119	5500
	5	1,599	0,01	3,264		
Dränage	1	2,533	0,99	2,537	2,537	4800
	5	3,765	0,01	4,790		
Isfrihållning	1	2,872	0,99	2,875	2,875	4300
	5	1,599	0,01	3,264		
Dränage + isfrihållning	1	4,611	0,99	4,613	4,613	450
	5	3,765	0,01	4,790		

Tabell 7-19. Resultat för posteriorfördelning $\tan \phi$ då $m_{prov} = 36$ grader och $n = 2$ st

Åtgärd	Lastscenario	β_i	Pf	β_{komp}	β_{sys}	Spännlast för att uppnå $\beta_{sys} \geq 4,8$
Ingen åtgärd	1	1,944	0,99	1,948	1,948	5600
	5	1,457	0,01	3,184		
Dränage	1	2,426	0,99	2,430	2,430	4800
	5	3,714	0,01	4,749		
Isfrihållning	1	2,777	0,99	2,780	2,780	4400
	5	1,457	0,01	3,184		
Dränage + isfrihållning	1	4,600	0,99	4,602	4,602	450
	5	3,714	0,01	4,749		

Tabell 7-20. Resultat för posteriorfördelning $\tan \phi$ då $m_{prov} = 36$ grader och $n = 3$ st

Åtgärd	Lastscenario	β_i	Pf	β_{komp}	β_{sys}	Spännlast för att uppnå $\beta_{sys} \geq 4,8$
Ingen åtgärd	1	1,941	0,99	1,945	1,945	5500
	5	1,390	0,01	3,148		
Dränage	1	2,386	0,99	2,390	2,390	4800
	5	3,723	0,01	4,757		
Isfrihållning	1	2,749	0,99	2,752	2,751	4600
	5	1,390	0,01	3,148		
Dränage + isfrihållning	1	4,643	0,99	4,645	4,586	350
	5	3,723	0,01	4,757		

Tabell 7-21. Resultat för posteriorfördelning $\tan \phi$ då $m_{prov} = 36$ grader och $n = 4$ st

Åtgärd	Lastscenario	β_i	Pf	β_{komp}	β_{sys}	Spännlast för att uppnå $\beta_{sys} \geq 4,8$
Ingen åtgärd	1	1,894	0,99	1,898	1,898	5600
	5	1,337	0,01	3,119		
Dränage	1	2,342	0,99	2,346	2,346	4800
	5	3,693	0,01	4,733		
Isfrihållning	1	2,708	0,99	2,711	2,711	4500
	5	1,337	0,01	3,119		
Dränage + isfrihållning	1	4,624	0,99	4,626	4,613	400
	5	3,693	0,01	4,733		

SANNOLIKHETSBASERAT RAMVERK FÖR BESLUTSSTÖD

Vid säkerhetshöjande insatser av en dammanläggning finns det normalt olika möjliga åtgärder som alla innehåller osäkerheter vad gäller utfall och kostnader. I vissa fall kan det räcka med kompletterande undersökningar, i andra fall är det nödvändigt att förstärka konstruktionen.

Här presenteras och exemplifieras ett sannolikhetsbaserat ramverk för beslutsfattande. Det bygger på att man först gör en preliminär analys baserat på konservativa antaganden och därefter genomför en kostnads-nyttoanalys där samtliga åtgärder och sannolikhet för möjliga utfall inkluderas. Utifrån kostnads-nyttoanalysen, här illustrerad som ett beslutsträd, kan beslut fattas om vilken åtgärd som är mest fördelaktig.

Ramverket exemplifieras med en fallstudie av en fiktiv damm som inledningsvis inte uppfyller de nödvändiga stabilitetskriterierna för glidning längs en bergspricka. Detta ramverk kan också användas för andra typer av beslutsproblem.

Ett nytt steg i energiforskningen

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



Energiforsk