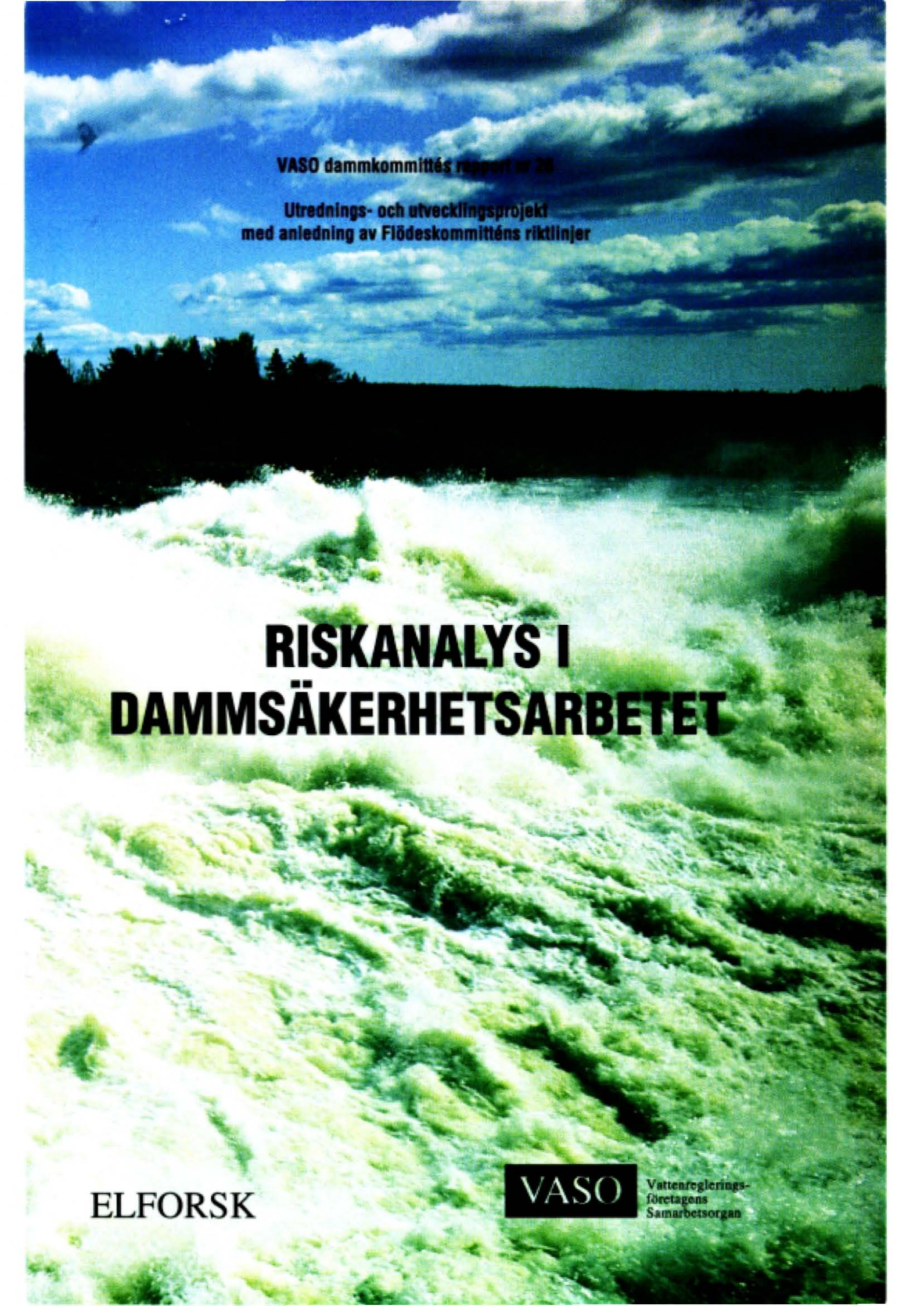




VASO dammkommittés rapport nr 28

**Utrednings- och utvecklingsprojekt
med anledning av Flödeskommitténs riktlinjer**

RISKANALYS I DAMMSÄKERHETSARBETET

ELFORSK

VASO

Vattenreglerings-
företagens
Samarbetsorgan

VASO dammkommittés rapport nr 26

**Utrednings- och utvecklingsprojekt
med anledning av Flödeskommitténs riktlinjer**

RISKANALYS I DAMMSÄKERHETSARBETET

Maria Bartsch, Kungliga Tekniska Högskolan

Omslagsfoto: Bengt Johansson, Vattenfall
Grafisk form: Fras&Form
Tryck: Spånga Tryckeri AB 1997
ISSN 1400-7827

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

FÖRORD	i
SAMMANFATTNING	ii
SUMMARY	iii
1. INLEDNING	1
1.1. Dammsäkerhet	1
1.2. Risker vid dammar	3
1.3. Riskanalys	5
2. RISKANALYS FÖR DAMMANLÄGGNINGAR	7
2.1. Syfte och systemdefinition	7
2.2. Riskidentifikation	7
2.3. Riskskattning	9
2.4. Riskreduktion	10
2.5. Riskvärdering	10
2.6. Känslighetsanalys	11
2.7. Datainsamling och dokumentation	11
3. ANALYSVERKTYG	13
3.1. Felträdsanalys	13
3.2. Händelseträdsanalys	15
3.3. Metoderna HAZOP och FMEA	16
4. TILLÄMPNINGSEXEMPEL	19
4.1. Konsekvensdiagram för överströmning	19
4.2. Händelseträd för flöden och jordbävningar	20
4.3. Detaljerat händelseträd för flödessituationer	21
4.4. Inre erosion – problematik och händelseträd	22
5. SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER	25
6. REFERENSER	27

FÖRORD

Vattenkraftutbyggnaden och därmed byggande av stora dammar startade i stor skala i Sverige efter andra världskriget och var mest omfattande under 50- och 60-talen.

Principerna för utformning och konstruktion av dammanläggningarna under denna intensiva utbyggnadsperiod äger i huvudsak sin giltighet fortfarande.

Vad avser krav på utskovens avbördningsförmåga har dessa föreslagits av dammägarna och (efter eventuella justeringar) fastställts av vattendomstol med SMHI som sakkunnig. Kriterierna i detta avseende kan därför sägas ha etablerats gemensamt av dammägarna och SMHI.

Under 1980-talet ifrågasattes i Sverige, såsom tidigare skett i många andra länder, de etablerade principerna för utskovsdimensionering. Flödeskommittén, som tillsattes av kraftindustrin och SMHI för att utreda flödesriskerna, föreslog i sin slutrapport ett nytt sätt att beräkna dimensionerande tillrinning. Kriterierna innebär att dammar med allvarliga brottkonsekvenser skall kunna klara ett påtagligt högre tillflöde än vad man tidigare räknat med.

För att på ett säkert och kostnadseffektivt sätt kunna anpassa dammbeståndet till de nya kraven har ett stort antal utredningar och utvecklingsprojekt genomförts. Dessa projekt har genomförts på uppdrag av VASO dammkommitté, som är kraftindustrins gemensamma organ i dammsäkerhetsfrågor och bland annat har till uppgift att samordna dammarnas anpassning till de nya riktlinjerna. Den styrgrupp som lett arbetet har bestått av Harald Eriksson – Sydkraft, som varit ordförande, Sten Lasu – Svenska Kraftverksföreningen, Lennart Markland – Vattenregleringsföretagen samt Malte Cederström och Urban Norstedt – Vattenfall.

För varje projekt finns en rapport och därtill finns en sammanfattande rapport över hela arbetet, huvudrapporten (nr 1), vilken även innehåller en sammanställning över de rapporter som ingår i serien.

Föreliggande projekt har genomförts av Maria Bartsch och bygger på licentiatavhandlingar av Maria Bartsch och Phil Graham vid avdelningen för Vattenbyggnad vid KTH.

Risikanalys bedöms vara ett värdefullt verktyg i dammsäkerhetsarbetet, främst för att ge insikt om var de svagaste länkarna döljer sig och hur resurser för dammsäkerhetsförbättring bäst kan fördelas. Metodiken, som hittills endast i begränsad omfattning prövats i vårt land, är på stark frammarsch och förväntas framöver användas alltmer. Detta är ett av de områden kraftindustrin prioriterar för fortsatta utvecklingsinsatser. Inom branschen pågår arbete med att införa ett gemensamt system för incidentrapportering, som bedöms komma att ge förbättrat underlag för framtida riskanalyser.

VASO dammkommitté

SAMMANFATTNING

Avsikten med rapporten är att sprida kunskap om hur riskanalys skulle kunna användas i det svenska dammsäkerhetsarbetet. Utgående från internationella erfarenheter av riskanalys för dammanläggningar beskrivs analysmetodikens syfte, möjligheter och principiella tillvägagångssätt.

I Sverige finns omkring 900 kraftverksdammar, 143 av dessa klassificeras som höga dammar (dvs de är minst 15 m höga). Dammbeståndet blir allt äldre, vilket ökar behovet av att säkerställa att tillfredställande säkerhet upprätthålls vid anläggningarna. Dammhaverier är sällsynta, men konsekvenserna av ett enskilda haveri kan vara katastrofala, och skall undvikas med alla tillgängliga medel. Det är nödvändigt att systematiskt arbeta mot att förbättra totalsäkerheten och minimera inverkan från eventuella haverier. Här kan riskanalys vara ett ändamålsenligt analysverktyg.

Riskanalys är väletablerat för utvärdering av säkerheten för många olika tekniska system, men har bara använts i begränsad omfattning för dammsäkerhetsutvärdering i Sverige. Sedan 1970-talet har man i flera länder arbetat mot att göra riskanalys till ett effektivt hjälpmedel i dammsäkerhetsarbetet. Arbetet har intensifierats under senare år, och idag används riskanalys aktivt för identifiering och utvärdering av risker vid dammanläggningar.

Riskanalys är ett samlingsnamn för olika metoder att systematiskt identifiera och värdera risker förbundna med ett system. Förenklat innebär riskanalys av dammanläggningar att alla händelser och orsakssamband som kan leda till dammbrott identifieras, att sannolikheten för dessa händelser och konsekvenskedjor orsakade av dem skattas, och att effekten av alternativa åtgärder för riskminskning utvärderas. Syftet med att utföra en riskanalys för en dammanläggning är vanligen att fastställa vilka de största bidragande riskfaktorerna i systemet är, och hur de kan minimeras på ett effektivt sätt. Att reducera risken till en för samhället acceptabel nivå är det yttersta målet.

Analysens syfte är inte att uppnå ett absolut värde på anläggningens säkerhet. Den verkliga nyttan ligger i att utvärdera dammsäkerheten på relativ basis. Dvs efter att ha fastställt ett mått på säkerheten vid en viss damm, kan man undersöka effekter av alternativa åtgärder för att förbättra säkerheten.

Riskanalys påbörjas lämpligen i seminarieform där en projektgrupp, bestående av experter på alla relevanta områden, identifierar händelsekedjor som kan ge allvarliga konsekvenser och skattar sannolikheter för ingående felhändelser. Riskanalysen bör innefatta både händelseträdsanalys och felträdsanalys. Händelseträd är lämpliga för övergripande analys av hela brottssekvenser, medan felträd är mer lämpade för analys av delsystem.

Användande av expertbedömningar för skattning av sannolikheter är idag nödvändigt pga att dokumentationen över dammsystemet och drifterfarenheter ofta är bristfällig. Kvaliteten på tillgängligt underlag är av yttersta betydelse i riskanalyser. Använt underlag, gjorda antaganden och resonemang skall dokumenteras noggrant. Detta möjliggör uppdatering av analysen om ytterligare underlag blir tillgängligt, eller om analysens detaljeringsnivå skall höjas. Framtida riskanalyser skulle främjas mycket av tillgång till en databas över inträffade incidenter och drifterfarenheter.

SUMMARY

The objective of this report is to spread knowledge about how risk analysis could be applied on assessment and management of dam safety in Sweden. It is based on international experience of risk analysis of dam installations, and describes the purpose, possibilities and principal steps of the methodology.

Of about 900 hydropower dams currently existing in Sweden, 143 are classified as high dams (i.e. dam height over 15 m). This dam population is ageing, placing more and more emphasis on the need for maintaining proper safety at these installations. Although dam failures are infrequent, the consequences of a single failure may be severe and should by all practical means be avoided. It is imperative that the risks placed on society by these structures are systematically evaluated and assessed in terms of improving overall safety and minimizing the impacts of possible failure. In this, risk analysis can be an efficient tool.

The use of risk analysis is well-established in performing safety assessment analyses of many different technical systems, but has only to a limited extent been used for the assessment of dam safety in Sweden. Since the 1970'ies researchers in several countries have strived to make risk analysis an effective means for dam safety evaluation. In recent years the work has been intensified, and today risk analysis is actively being used in this field.

Risk analysis is defined as any number of means or methods to identify and evaluate risks. Simply put, risk analysis for the assessment of dam safety involves identification of all series of events that may cause dam failure, estimation of the probability of these events, the consequences caused by them, and evaluation of the effect of remedial measures. The objective of a risk analysis safety assessment of a dam installation is to identify the major contributing risk factors of the system and evaluate how they may be minimized in an effective way. Ultimately, the aim is to reduce the residual risk to an acceptable level.

The purpose is not to determine an absolute measure of the safety of a dam installation. The real utility of the approach lies in assessing dam safety on a relative basis. That is, when one has determined the risk at a certain dam, one should evaluate the effects of alternative risk reducing measures.

A proper start-up of a risk analysis is a workshop where a project group, consisting of experts in all relevant areas, screens failure modes and derives failure probabilities. An appropriate application of risk analysis for Swedish conditions would best be accomplished by the use of both event trees and fault trees. Event trees can be used to analyse complete sequences of dam failure, whereas the analysis of sub-systems is better suited to fault tree analysis.

Today, the use of expert judgement for estimation of failure probabilities is essential. This is, among other things, due to the fact that the available documentation of dam installations and the database on historical incidents is commonly insufficient. The establishment of an adequate system for the reporting of incident data would be of considerable benefit for future risk analyses.

Risk analysis safety assessments are heavily dependent on the quality of the available data. Throughout the analysis all assumptions and reasoning, and the documentation they are based upon, should be carefully documented. This enables future up-dating of the analysis, for example if further documentation and data becomes available or if the level of detail should be increased.

1. INLEDNING

Erfarenheten visar att dammhaverier är sällsynta, men att konsekvenserna av ett enskilda haveri kan vara katastrofala. Det är således nödvändigt att systematiskt arbeta mot att förbättra totalsäkerheten och minimera inverkan från eventuella haverier. Vi söker medel som hjälper oss att identifiera potentiella problem och utvärdera effekten av säkerhetshöjande åtgärder.

Med detta som bakgrund har vi undersökt hur riskanalys skulle kunna användas vid säkerhetsutvärdering av befintliga svenska dammar. Rapporten sammanfattar aktuella internationella erfarenheter från utveckling och tillämpning av riskanalysteknik för övergripande säkerhetsutvärdering av dammanläggningar. Syftet är att sprida kunskap om, och väcka intresse för, riskanalys – ett hjälpmedel för systematisk identifikation och utvärdering av risker.

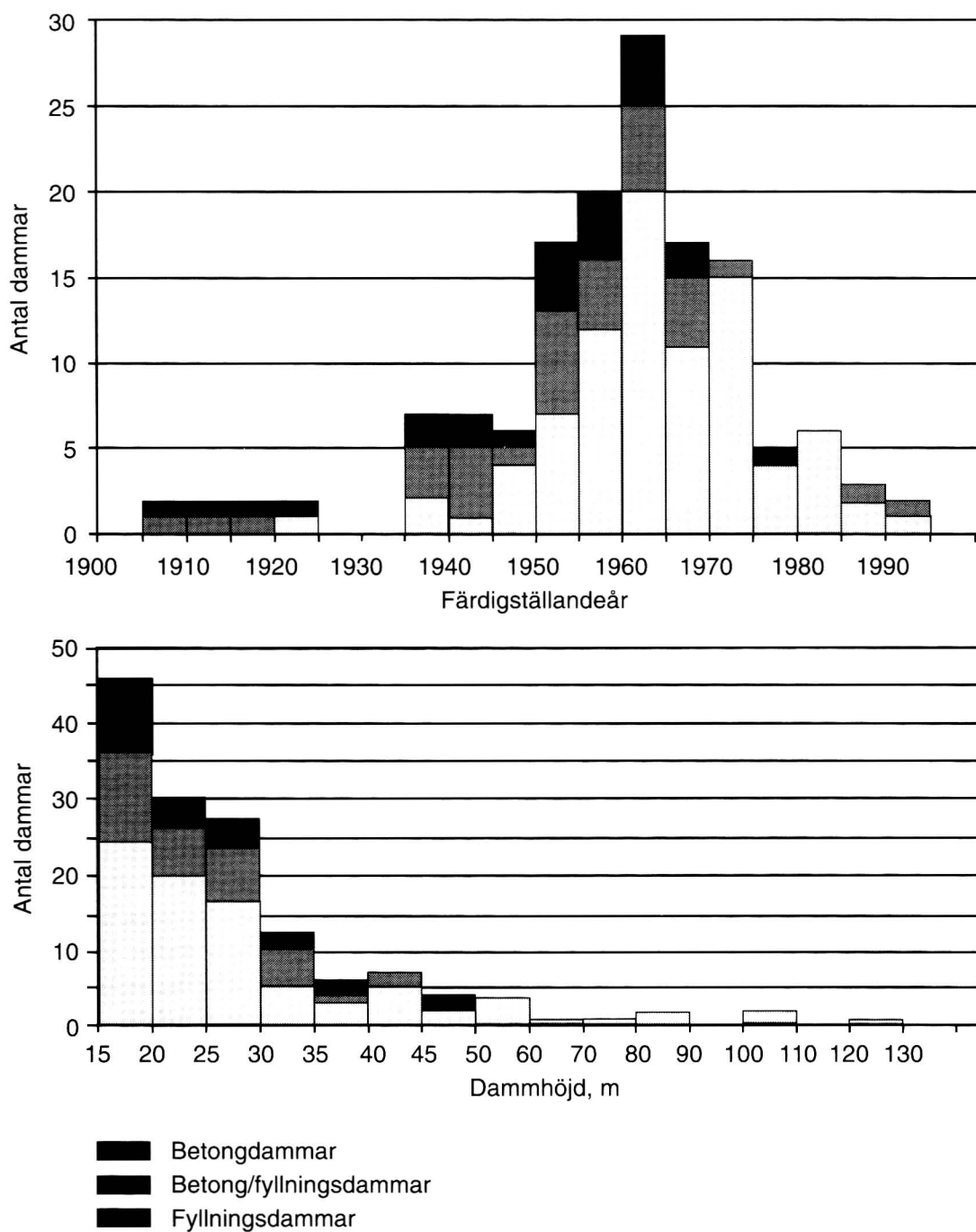
Under 1970-talet blev tillämpningen av riskanalys allmänt spridd inom kärnkraftindustrin. Det tjänade som en katalysator för vidare utveckling och användande av metodiken även inom andra teknikområden. Idag är analystekniken väletablerad inom branscher som oljeproduktion, processindustri, rymdforskning, medicin och väg-, järnvägs- och flygtransporter.

Tillämpning inom dammsäkerhetsområdet och för hantering av vattenresurser i allmänhet är inte lika väletablerad. På 1970-talets senare del började man titta på om riskanalys skulle kunna vara till nytta i dammsäkerhetsarbetet. Trots att många uppmärksammade dess förtjänster, visade litteraturen under 1980-talet på en kvardröjande tveksamhet mot användandet av riskanalys som ett seriöst verktyg för dammsäkerhetsutvärdering. Under senare år har angreppssättet vunnit mer acceptans runt om i världen, och frågan är inte längre *om* man skall använda riskanalys, utan snarare *hur* riskanalys bör användas inom dammsäkerhetsarbetet. Det finns inget samstämmigt svar på denna fråga, men redan idag används riskanalys aktivt i t ex Kanada, USA, Sydafrika och Australien. Flera företag och organ har utvecklat egna riktlinjer, och forskning och utveckling pågår inom området.

1.1. Dammsäkerhet

Med dammsäkerhet avses säkerhet mot uppkomst av okontrollerbara flöden från ett dammagasin. Sådant okontrollerat frisläppande av uppdämda vattenmassor kan orsaka mycket stora skador, både gällande människoliv, miljö och ekonomiska värden, och har därför tagits med i Räddningstjänstlagstiftningen. Enligt Räddningstjänstlagen § 43 skall riskanalys genomföras (av anläggningsinnehavaren) för anläggningar som innebär en "icke obetydlig sannolikhet för att en olyckshändelse skall orsaka skador på människor eller i miljö".

I Sverige finns ca 900 kraftverksdamm, varav 143 st är 15 m eller högre, se figur 1.1. En intensiv utbyggnad av vattenkraften pågick under 50-, 60- och 70-talet. Under utbyggnadsperioden var dammsäkerheten främst inriktad på projektering och byggande. I takt med att dammbeståndet växte och nyproduktionen minskade försköts tyngdpunkten i säkerhetsarbetet istället till driftfasen. Övervakning, drift och underhåll, men också uppgradering och förnyelse av befintliga dammar är huvuduppgifter för dagens dammsäkerhetsarbete.



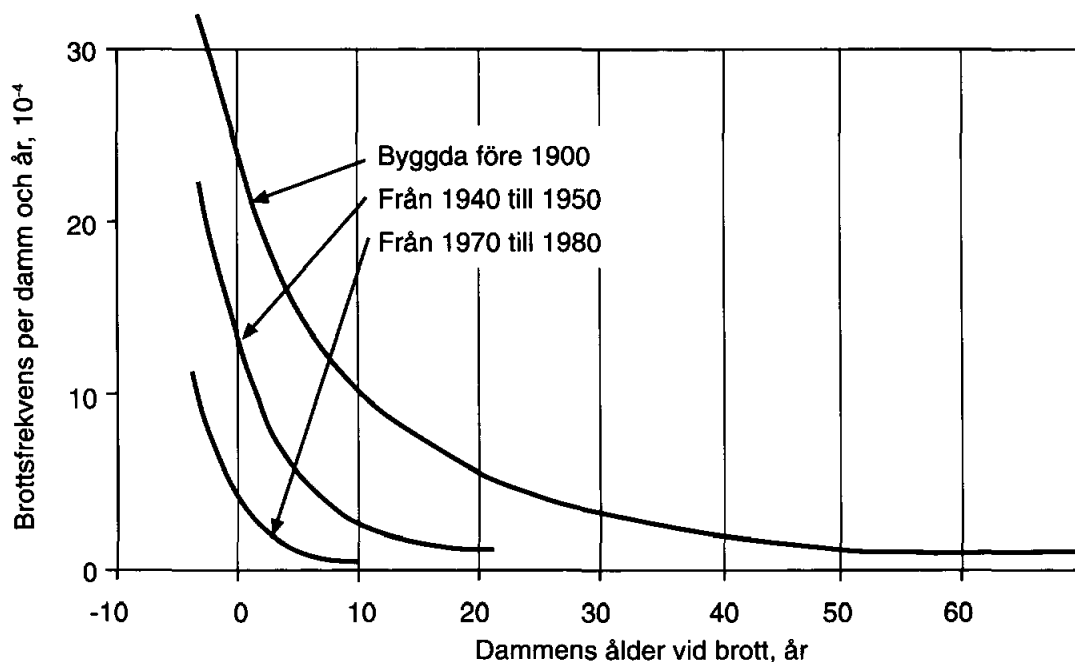
Figur 1.1. Höga svenska dammar klassificerade efter färdigställandeår och höjd.

Liksom i många andra länder är majoriteten av våra dammar utformade och byggda efter tidigare normer och metoder. Samtidigt som dammbeståndet blir äldre ställs nya – kanske höjda – krav på dem. Det gör att det finns ett förstärkt behov av djupgående totalutvärdering av befintliga anläggningarnas funktion och säkerhet.

1.2. Risker vid dammar

Internationell statistik visar att brottsannolikheten för dammar är i storleksordningen 10^{-4} /år och damm, se figur 1.2. Figuren visar att frekvensen av skador och dammbrott avtar för dammar byggda under de senaste decennierna, samt att de flesta dammrar har inträffat under byggnadstiden eller de första åren därefter.

Dammbrottsstatistik kan ge en uppfattning om den genomsnittliga sannolikheten för dammbrott för olika dammtyper, men säkerheten vid en specifik damm kan inte baseras på sådana generella erfarenhetstal. Även om dammbrott i sig är ett globalt problem så medför stora skillnader i bland annat geologiska och hydrologiska förhållanden, att svenska dammar främst kan jämföras med dammar i den del av världen som har liknande naturförhållanden som vi.



Figur 1.2. Dammbrottsfrekvens som funktion av byggnadsår och ålder.

Att antalet dammar är begränsat och dammbrott är sällsynta innebär att erfarenhetsunderlaget från inträffade dammbrott är begränsat. Om materialet delas in i klasser efter dammtyp, lokala förhållanden och brottsorsak så blir antalet dammar i respektive klass snabbt litet. Ett sätt att utöka det tillgängliga erfarenhetsunderlaget är att systematiskt dokumentera säkerhetsstörningar och incidenter.

En undersökning av inträffade säkerhetsstörningar vid svenska dammanläggningar visar att det är viktigt att bygga in redundans i systemen samt att hålla en hög beredskap inför kritiska situationer (exempelvis vid höga flöden och oväder). Viktiga områden för säkerhetsarbetet gäller tillförlitligheten hos avbördningsanordningar och system för kommunikation och fjärrövervakning, tillgängligheten till anläggningarna, övervakning och tillståndskontroll av själva dammen, funktionskontroll av utrustning, säkerhetsutbildning, beredskaps- och handhavandeträning för personal samt systematisk dokumentation av anläggningarna och drifterfarenheter.

Brottsorsaker kan indelas i yttre erosion (vanligen överströmning), inre erosion och skred, se tabell 1.1.

Typ av brott	Kännetecken och orsaker till brott	Förebyggande eller reparativa åtgärder	Statistisk fördelning	
			Höga dammar	Låga dammar
Yttre erosion	Överströmning pga otillräckligt fribord, bristfälligt eller blockerat utskov.	Öka fribord, öka avbördningskapacitet och förhindra igensättning.	20%	50%
	Vågerosion pga otillräckligt släntskydd.	Öka tjocklek och kvalitet på släntskydd.		
Inre erosion	Piping genom grunden eller dammkroppen, materialtransport pga koncentrerat läckage.	Minska kärnans sprickbenägenhet, skydda alla möjliga läckkällor med filter och samla läckvatten i dräneringssystem, visa särskild aktsamhet vid anslutningar.	50%	30%
Skred	Glidytor genom dammkroppen och grunden uppströms- eller nedströmsåt pga otillräcklig släntstabilitet ev. i kombination med höga porvattentryck.	Flackare släntlutningar, stabiliserande bankar, dränerande arrangemang för att minska porvattentryck.	30%	20%

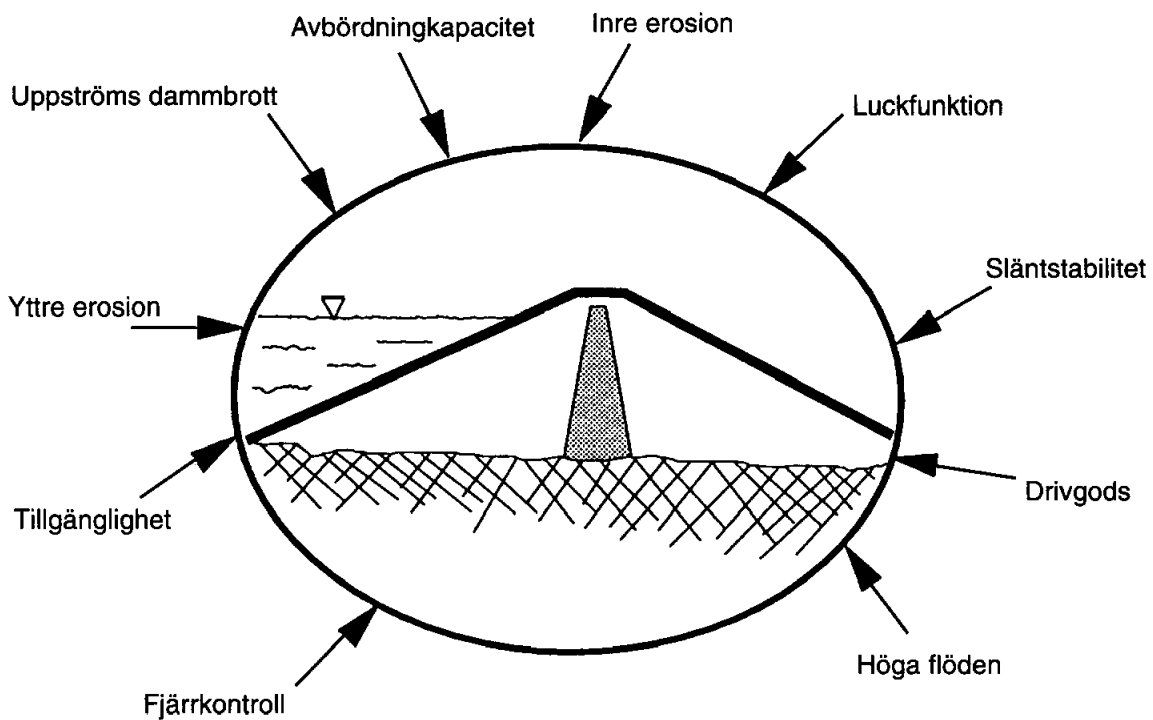
Tabell 1.1. Statistisk undersökning av orsaker till dammbrott, baserad på ett stort antal haverier av höga och låga dammar.

Mekanismerna som leder till dammbrott är vanligen komplexa, och litet är känt om händelsekedjor som lett till haverier. Figur 1.3 ger exempel på riskfaktorer, som skulle kunna leda till dammbrott vid svenska dammar.

Man kan kategorisera initierande händelser efter hur de uppkommer, t ex av:

- *Naturliga orsaker:* extrema flöden, jordbävningar, skred, laviner.
- *Orsaker kopplade till åldersförändringar:* förändringar i byggmaterial (sprickor, erosion, vittring etc) eller grunden, instabilitet i dammkroppen och/eller grunden, utrustningsfel.
- *Mänskliga orsaker:* felaktigheter i design eller arbetsutförande, brister i drift och underhåll, sabotage.

Ett annat sätt att klassa olika typer av dammbrott bygger på om de initieras av ”statiska” (vattenbyggnadstekniska), *hydrologiska* eller *seismiska* laster. Internationellt används riskanalys främst för de två sistnämnda. Dammbrott induceras då av en stokastisk last, i



Figur 1.3. Riskfaktorer vid svenska dammar.

form av ett högt flöde eller en jordbävning, vilken ger upphov till en viss dammrespons. Men, att analysera systemets totalsäkerhet kräver att även brottsscenarioer som utlöses under normala lastförhållanden (som exempelvis inre erosion eller åldersförändringar) beaktas. Detta är dock mycket komplext och då det idag inte finns någon vedertagen metodik inom detta område tycks mindre vikt ha lagts vid risker med koppling till dammkroppen och grunden.

1.3. Riskanalys

Risk betecknar den fara som oönskade händelser kan ge upphov till för människor, miljö och materiella värden. Risk uttrycks vanligen som kombinationen av sannolikhet och negativa konsekvenser av oönskade händelser. Först efter det att man identifierat och belyst möjliga riskmoment, kan man arbeta med att avlägsna och reducera riskerna. Det är viktigt att komma ihåg att risker kan aldrig elimineras helt; målsättningen är att minska dem till en acceptabel risknivå.

Riskanalys är ett samlingsnamn för olika metoder att systematiskt identifiera och värdera faror förbundna med ett system. Syftet med att utföra en riskanalys är vanligen att:

- fastställa vilka de största bidragande riskfaktorerna i systemet är, och
- utvärdera effekten av alternativa riskminskande åtgärder.

Målsättningen är att skapa beslutsunderlag för effektivt utnyttjande av tillgängliga resurser, med avsikt att minimera riskerna.

Förenklat innebär riskanalys att man försöker kvantifiera risker genom att systematiskt identifiera potentiella faror, bakomliggande orsaker till att farorna uppkommer, och konsekvenser de kan ge upphov till. Detta görs genom analys av tre grundläggande frågor:

- Vad kan hända ("gå fel" i systemet)?
- Vad är sannolikheten (för att det inträffar)?
- Vilka blir konsekvenserna (om det inträffar)?

Utgående från brotts sannolikheten och brottskonsekvenserna kan en resulterande risknivå beräknas, vilken är ett mått på hur säkert systemet är. Den verkliga nyttan av en riskanalys ligger ofta i att en följdfråga ställs:

- Hur kan risknivån minskas?

Här utvärderas effekten av alternativa riskminskande åtgärder, dvs man jämför hur olika förändringar i det befintliga systemet påverkar den resulterande risknivån.

Vem svarar då på frågorna? Vid riskanalys av en dammanläggning bör helst erfarna dammbyggare, som även har viss erfarenhet av riskanalys, utföra analysen. Då det är svårt att hitta personer med hög kompetens som spänner över alla typer av dammsäkerhetsaspekter, är det lämpligt att bilda en projektgrupp. Gruppmedlemmarna skall tillsammans ha kompetens inom alla berörda områden, både gällande dammsäkerhet, själva anläggningen och analysmetodiken. Operatörer m fl med praktisk erfarenhet från anläggningen i fråga är värdefulla. Att involvera personal från anläggningen har två syften, dels kan de förmedla uppgifter om anläggningsspecifika förhållanden och drifterfarenheter dels ökar deras förtroende för analysen.

2. RISKANALYS FÖR DAMMANLÄGGNINGAR

Dammhaverier kan orsaka stora skador, varför det är viktigt att systematiskt arbeta mot att minimera riskmomenten. Förenklat innebär riskanalys av dammanläggningar att alla händelser och orsakssamband som kan leda till dammbrott identifieras, att sannolikheten för dessa händelser och konsekvenskedjor orsakade av dem skattas, och att effekten av alternativa åtgärder för riskminskning utvärderas. Syftet kan vara att skapa beslutsunderlag för effektivt resursutnyttjande, med målsättning att höja en anläggnings säkerhet eller att identifiera de anläggningar inom ett bestånd där säkerhetshöjande åtgärder bör prioriteras.

Risikanlays för dammanläggningar medför speciella problem som kretsar kring att de i vissa avseenden är unika system, till skillnad från rent tekniska system uppbyggda av standardkomponenter. Ett dammsystem består i princip av 1) dammkropp och grund, 2) tekniska system och infrastruktur, 3) operatörer och ansvarig organisation samt 4) yttre laster som t ex flöden. De tekniska systemen samspelar med dammen, lokala förhållanden och operatörer. Efter byggande kan många av de ingående delarna svårigen övervakas eller bytas ut.

Som hjälpmedel för säkerhetsutvärdering av dammar är riskanalys i sin vagga, och strikta riktlinjer för dess genomförande finns ännu inte. Det råder dock i stort sett enighet om det grundläggande tillvägagångssättet. Nedan beskrivs översiktligt de moment som normalt ingår i riskanalysprocessen.

2.1. Syfte och systemdefinition

Inledningsvis formuleras analysens syfte och de problem som skall lösas. Systemet och systemavgränsningar definieras och de driftförhållanden som skall studeras klargörs. Analysen kan avse ett delsystem, en hel anläggning eller en serie av anläggningar i ett älvsystem. Lokala förhållanden, in och utgående flöden, transporter, signaler och påverkan från yttre faktorer som är relevanta för problemet identifieras. Begränsningar i studiens omfattning och grundläggande antaganden redovisas. Informationskällor, behov och tillgång på dokumentation och dataunderlag identifieras. Val av metodik görs med utgångspunkt från analysens syfte, systemtyp och tillgängliga resurser.

2.2. Riskidentifikation

Här identifieras faror som kan generera risker inom systemet, hur dessa faror uppstår och konsekvenserna de kan resultera i. Man kartlägger alla tänkbara ”kritiska händelsekedjor” för den studerade dammen. En kritisk händelsekedja består av en initierande händelse, händelsekedjor som leder fram till systemfel och därpå följande konsekvenskedjor (som kan ge upphov till allvarliga konsekvenser). Ett översiktligt exempel på en kritisk händelsekedja är: högt flöde (initierande händelse), magasinsvattenstånd ökar, utskovluckorna öppnas inte, överströmning, dammbrott, flodvåg etc (konsekvenskedja).

Detaljerade händelsekedjor är anläggningsspecifika och beror av utformning, ingående material och arbetsutförande, geologi, hydrologi, driftförhållanden, lokalisering, övervaknings- och kontrollsystem mm. Att identifiera alla möjliga kritiska händelsekedjor

kräver ett visst mått av fantasi. Lämpligen börjar projektgruppen med idémöten (engelska brainstorming) där man försöker kartlägga och strukturera alla kritiska händelsekedjor som bedöms vara möjliga för anläggningen. Dammbrottskonsekvenser utvärderas vanligen genom flodvågs- och översvämningssstudier.

Idag är erfarenheter från inträffade dammbrott, incidenter och tidigare riskanalyser de huvudsakliga hjälpmedlen vid identifikation av händelser och händelsekedjor som kan leda till dammbrott. En allvarlig brist är att det inte finns något systematiskt nationellt eller internationellt incidentrapporteringssystem för dammar.

Det finns tre huvudsakliga typer av metoder för riskidentifikation:

- Jämförande metoder, dessa baseras på checklistor över typiska oönskade händelser och/eller genomgång av historiska olycks- och incidentdata för liknande system.
- Metoder speciellt utformade för att stimulera en grupp av människor att förutse faromoment genom att ställa frågor på temat "Vad händer om ...?". Exempel på sådana metoder är HAZOP (Hazard and Operability Study) och FMEA (Fault Mode and Effect Analysis), se kapitel 4.3. Metoderna är lämpliga främst för system uppbyggda av ett stort antal samspelande komponenter.
- Användning av analysverktygen händelseträd och felträd, se kapitel 4.1 och 4.2. Händelseträd visar möjliga händelsekedjor som följer efter en initierande kritisk händelse. Felträd illustrerar samband mellan en oönskad händelse i ett system och orsaker till denna händelse. Felträd och händelseträd lämpar sig väl för analys av tekniska delsystem, som t ex utskovsluckor, men är inte lika anpassade för analys av dynamiska system, dammkroppens funktion eller mänsklig tillförlitlighet.

Med hjälp av händelse- och felträd byggs en systemmodell upp, där händelse- och konsekvenskedjor beskrivs. Om ett stort antal potentiella kritiska händelseförlopp identifierats, är det inte alltid möjligt eller intressant att genomföra en detaljerad analys för vart och ett av dem. Det kan vara lämpligt att kvalitativt rangordna dem inbördes efter den risk de representerar. Detta kan exempelvis göras i en riskmatris, se figur 2.1. De risker som bedöms vara små eller obetydliga kan sedan uteslutas från analysen.

		Riskmatris				
Sannolikhetsnivå	Hög 5	B	C	D	D	D
	4	B	B	C	D	D
	3	A	B	B	C	D
	2	A	A	B	B	C
	Låg 1	A	A	A	B	B
		1	2	3	4	5
		Låg				Hög
		Konsekvensnivå				

A = Acceptabel risk

B = Acceptabel risk, men åtgärder bör genomföras

C = Oacceptabel risk om inte riskreducerande åtgärder genomförs

D = Oacceptabel risk

Figur 2.1. Riskmatris som beskriver acceptanskriterier på basis av sannolikhets- och konsekvensnivåer.

En ofta uppmärksammas brist i riskanalyser är att det inte går att kontrollera om alla relevanta faror täcks av analysen. En viss verifiering kan fås genom kontroll av att åtminstone alla tidigare inträffade säkerhetsstörningar, olyckor etc beaktats i analysen.

Det bör betonas att alla relevanta feltyper skall täckas av analysen – inte bara de som är välkända och låter sig analyseras i detalj. Det tycks finnas en tendens till överskattning av betydelsen för risker som kan utvärderas med välutvecklade analysmetoder. Tid och resurser läggs ofta ned på främst tekniska systems tillförlitlighet, trots att mänskliga felhandlingar och brister kan svara för det största bidraget till risken. För tekniska system tros den mänskliga faktorn ha orsakat så mycket som 70-80% av alla olyckor.

2.3. Riskskattning

Riskskattning syftar till att ge ett mått på systemets risknivå. Om man inte kan, eller vill, skatta sannolikheten för alla ingående händelser kan en kvalitativ analys göras. Händelse- och felträden (systemmodellen) ger bra insikt i hur systemkomponenterna samspelar med varandra, säkerhetssystem och yttre laster. I felträd kan svaga länkar i systemet identifieras som kombinationer av ett fåtal händelser som om de inträffar samtidigt leder till brott.

Genom att skatta sannolikheter för varje ingående händelse i händelse- och felträd, och kvantifiera dammbrottskonsekvenserna, kan dammbrottsrisken beräknas kvantitativt. Kvantifieringen av sannolikheter är svår. Men även analyser som bygger på grova skattningar av felsannolikheter har ett stort värde då de systematiskt identifierar de sätt systemet kan gå till brott och de reservmöjligheter som finns. Skepsis mot kvantifieringen av sannolikheter skall inte användas som argument mot värdet av själva analysen.

Skattning av sannolikheterna kan göras på tre principiellt olika sätt:

- frekvensanalys av empiriska dataserier, sk historiska sannolikheter,
- logisk modellanalys, sk analytiska sannolikheter, och
- expertbedömningar grundade på erfarenhet, sk subjektiva eller bedömda sannolikheter.

Användning av logiska modeller är ett elegant alternativ till empiriska metoder, och kan användas t ex för analys av släntstabilitet. Dock är dess användning fortfarande begränsad. Dels för att dataunderlaget för skattning av fördelningsfunktioner för ingående parametrar (t ex hållfasthetsparametrar) är otillräckligt, dels för att realistiska (last-respons-)modeller för skattning av brotts sannolikheten saknas för de flesta processer relaterade till dammsäkerhet.

Det empiriska angreppssättet är beroende av ett existerande dataunderlag över inträffade fel. Ju mer omfattande dataunderlag, desto bättre kan sannolikhetsskattningarna förväntas bli. För sällsynta händelser saknas naturligtvis data nästan helt medan i andra fall antalet inträffade händelser är tillräckligt stort för att medge empirisk analys av materialet. För vissa komponenter kan man relatera till felsannolikheter för liknande system inom andra teknikområden. Det gäller t ex mekaniska och elektriska komponenter i utskovsluckor. Empiriska data ger dock bara information om felfrekvenser för en genomsnittlig anläggning.

Då någon systematisk registrering av felfunktioner och avvikelser inte har gjorts inom dammområdet, så är vanligen det statistiska underlaget för att fastställa felsannolikheter dåligt. Felsannolikheten, och möjligheten till avhjälpande av fel, kan dessutom vara beroende av de rådande yttre omständigheterna (väderlek, årstid, driftförhållanden etc) och av den tid som är tillgänglig för en operation. Följaktligen är man ofta hänvisad till expertbedömningar, kompletterat med erfarenheter från tillgänglig dokumentation, beräkningar och empiriska data. Experterna får hjälp att överföra sina bedömningar till sannolikhetssmått. Så kallade Bayesianska metoder kan användas för att kombinera expertbedömningar och empiriska data.

Oavsett hur sannolikheterna skattas är det absolut nödvändigt att dokumentera på vilka grunder och antaganden skattningarna gjorts. På så vis kan andra sätta sig in i och uppdatera sannolikhetsskattningarna, om tex ytterligare information skulle bli tillgänglig längre fram.

2.4. Riskreduktion

Analys av effekten av alternativa riskreducerande åtgärder är ofta ett huvudsakligt syfte för att utföra en riskanalys. Målsättningen är att uppnå en så hög säkerhetsnivå som möjligt, genom kostnadseffektivt utnyttjande av tillgängliga resurser. Om den beräknade dammbrottsrisken bedöms vara oacceptabelt hög, bör riskminskande åtgärder sättas in. Den uppbyggda modellen av det befintliga systemet används för att identifiera komponenter i systemet där förbättringar kan väntas ge störst nytta. Olika åtgärdsalternativ läggs in som förändringar i modellen av det befintliga systemet, varefter analysen görs om på nytt för det resulterande systemet. På detta sätt kan effekten av ett antal olika åtgärdsalternativ jämföras, och alternativen kan rangordnas.

Riskreducerande åtgärder kan vara olycksförebyggande (minskar sannolikheten för dammbrott) eller skadebegränsande (minskar konsekvenserna av en ogynnsam händelse eller dammbrott). Sannolikhetsreducerande åtgärder prioriteras framför konsekvensminskande åtgärder där så är möjligt. Åtgärderna kan även indelas i strukturella eller icke-strukturella. Strukturella åtgärder syftar vanligen på att minska sannolikheten för brott. De omfattar exempelvis modifiering av dammen eller avbördningsanordningarna, reparationer och underhåll. Icke-strukturella åtgärder syftar antingen till att minska sannolikheten för haveri eller att minska konsekvenserna om dammen skulle haverera. De omfattar exempelvis förändringar i magasinsreglering, intensifierad övervakning, beredskaps- och räddningsplaner.

2.5. Riskvärdering

Riskvärderingen är kopplad till riskreduktion och syftar till att bedöma om den aktuella risknivån, som anläggningen ger, är acceptabel. Riskanalytiker, ingenjörer m fl som deltar i säkerhetsutvärderingen tillhandahåller underlag och rekommendationer för detta beslut, men det är beslutsfattare som står för avgörandet.

Kraftindustrin i Sverige betonar att dammar skall konstrueras, byggas, drivas och underhållas så att risken för dammbrott med allvarliga konsekvenser såvitt möjligt *elimineras* samt att risken för dammskador och driftstörningar hålls på lägsta rimliga nivå. För den händelse

skada eller dammbrott trots allt skulle inträffa, skall man genom förberedda handlingsprogram ha sådan beredskap att konsekvenserna kan minimeras i händelse av skada eller dammbrott.

I många länder har man försökt definiera gränsvärden för acceptabel residualrisk för t ex olika typer av energisystem (uttryckt som t ex sannolikhet för dödsfall per år och damm). I Sverige finns dock ingen fast gräns för vad som betecknas som acceptabel respektive oacceptabel risknivå. Det innebär att varje enskilt fall måste värderas för sig och med hänsyn till från vilken synpunkt risken skall bedömas. Jämförelser kan göras mellan risknivåer vid likartade system.

2.6. Känslighetsanalys

Förståelse av inflytandet av osäkerheter i indata, analysmetoder och modeller för utvärdering av riskerna är viktig vid tolkningen av analysresultatet. Med sk känslighetsanalys kan effekten av osäkerheter i indata på analysresultatet bestämmas. Osäkerheter uppkommer då sannolikhetsskattningarna i indata inte är exakta, varför man bör undersöka hur känsligt analysresultatet är för variationer i dessa skattningar. Om nyckelfaktorer visar sig vara speciellt känsliga för osäkerheter i sannolikhetsskattningarna, kan det vara relevant att lägga ner arbete på att försöka skatta dem med större noggrannhet.

2.7. Datainsamling och dokumentation

Till grund för en riskanalys krävs omfattande dokumentation och dataunderlag, som täcker alla aspekter av funktion, drift och säkerhet för dammanläggningen. Underlaget skall återspegla anläggningens *aktuella* tillstånd och *rådande* förhållanden. Äldre information baserad på ritningar och riktlinjer från projekteringen har begränsat värde i förhållande till uppdaterad dokumentation, som visar anläggningens verkliga utformning, och upptäcker från de mest aktuella besiktningarna och inspektionerna. Användande av ofullständiga data och data av låg kvalitet kräver att man tar hänsyn till begränsningar i dess precision och tillämpbarhet.

Insamlingen av dataunderlag kan vara en svår uppgift då viktig information kan ha "försvunnit" eller kanske aldrig har funnits skriftligt dokumenterad. En bra startpunkt för en analys är en sk fördjupad dammsäkerhetsutvärdering (engelska Safety Evaluation of Existing Dams), som omfattar systematisk insamling av detaljerade data över anläggningen, totalbesiktning och övergripande utvärdering av dammsäkerheten.

Incidentrapportering är ett sätt att åstadkomma mer omfattande erfarenhetsunderlag inom områden där haverier är sällsynta. För att utöka den tillgängliga datamängden över inträffade säkerhetsstörningar bör även "nära-haverier" och allvarliga tillbud omfattas av ett incidentrapportssystem. Genom att samordna sådan rapportering mellan företag i branschen fås ett mer innehållsrikt dataunderlag, som täcker hela landet. Ju fler system av samma typ, verkande under likartade förhållanden, som omfattas desto värdefullare blir dataunderlaget. Datamängden kan ökas ytterligare genom samordning av den nationella rapporteringen med andra länders rapportering. Resultatet blir då uppbyggnad av en internationell erfarenhetsdatabas över säkerhetsstörningar.

Detaljerad dokumentation av hela analysen och alla antaganden som gjorts inom ramen för en statistisk riskanalys är av högsta betydelse. Denna information måste vara tillgänglig för en potentiell framtida analysgrupp med uppgift att göra en analys med större detaljeringsgrad, eller att uppdatera riskanalysen med ytterligare information. Exempelvis skall identifieringsprocessen för kritiska händelskedjor beskrivas, motiveringar till att vissa sekvenser utesluts och resonemangen som legat till grund för bedömning av sannolikheter dokumenteras.

3. ANALYSVERKTYG

Det finns ett flertal specialutvecklade analysmetoder som kommer till användning vid genomförande av de olika stegen i en riskanalys. De viktigaste hjälpmedlen för riskanalys av svenska dammanläggningar torde vara händelse- och felträdsanalys. Händelseträd är lämpliga för övergripande analys av hela händelsekedjor, som startar i initierande händelser och mynnar ut i dammbrott. Felträd är mer lämpade för analys av delsystem, och visar sambanden mellan ingående komponenter (bashändelser) och systemfunktionen (topphändelsen). För identifikation av potentiella risker i systemet kan sk HAZOP och FMEA användas.

3.1. Felträdsanalys

Felträdsanalys (engelska Fault Tree Analysis) utvecklades på 1960-talet och är idag den avgjort vanligaste analysmetoden i risk- och tillförlitlighetsanalyser. Ett felträd är ett logiskt diagram som illustrerar sambandet mellan en "oönskad händelse" (felfunktion) i ett system och orsaker till denna händelse. Orsakerna kan omfatta komponentfel, mänskliga felhandlingar, miljöfaktorer mm. Felträdsanalys är baserat på att komponenter antingen fungerar eller inte. Mellantingen "fungerar delvis" eller "gradvis nedsatt funktion" är svårare att representera, liksom dynamiska förlopp och sk "common-cause-failure".

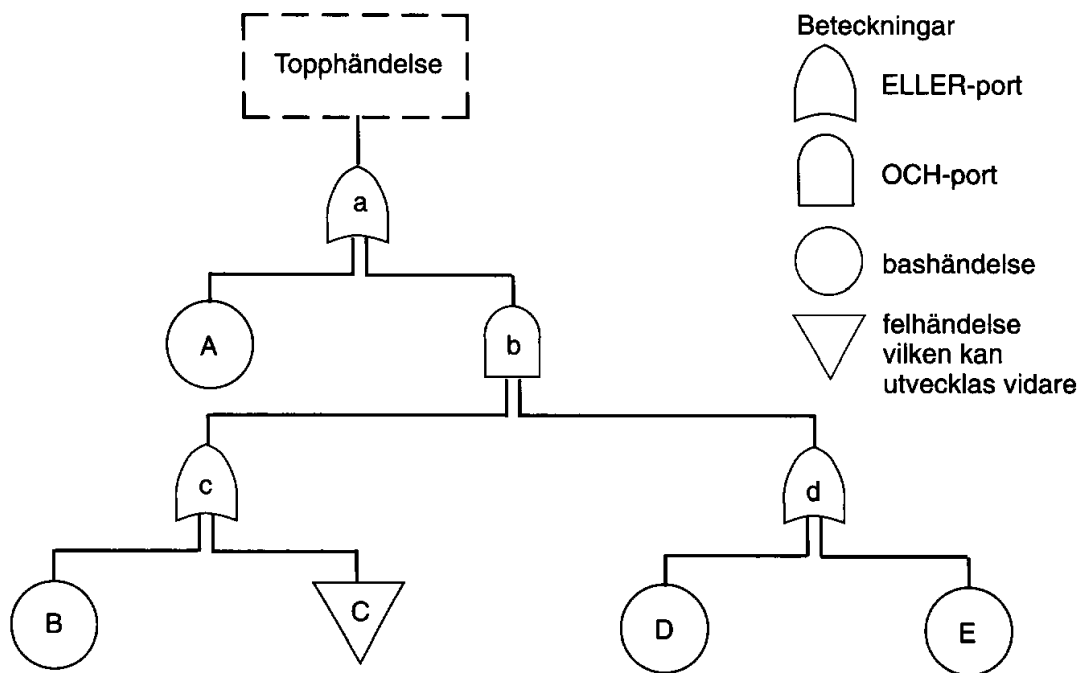
Felträdsanalys kan vara kvalitativ eller kvantitativ. För att ett felträd ska kunna upprättas krävs fullständig förståelse av systemet, varför redan själva konstruerandet av ett felträd är lärorikt. Vanliga resultat från en felträdsanalys är en lista över kombinationer av händelser som medför att den oönskade händelsen inträffar och sannolikheten för att den oönskade händelsen inträffar.

Felträdsanalys genomförs vanligen i följande steg:

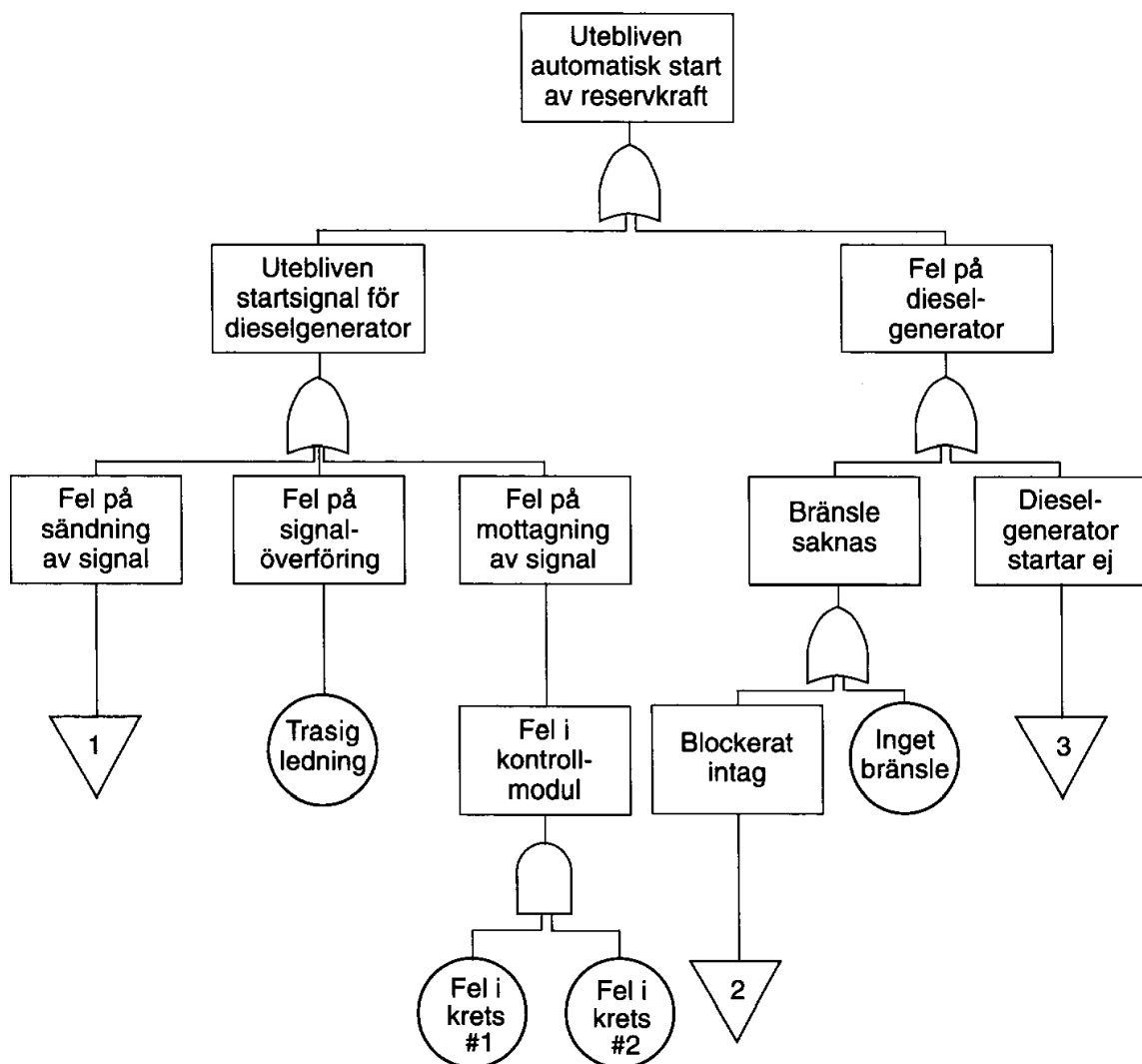
- definition av systemet, den oönskade händelsen och randbetingelser
- konstruktion av felträdet
- bestämning av minimala snitt
- kvalitativ analys av felträdet
- kvantitativ analys av felträdet

Man börjar med att identifiera och definiera den felhändelse, vanligen kallad *topphändelse*, som skall studeras och avsedda systemavgränsningar, driftförhållanden, externa belastningar och önskad detaljeringsgrad. När felträdet konstrueras utgår man från topphändelsen och söker de händelser som kan orsaka topphändelsen genom att fråga "Vad är orsakerna?". Dessa händelser knyts samman med topphändelsen via en logisk port. Genom att identifiera orsakerna till var och en av dessa händelser arbetar man sig successivt ner till ingångshändelserna, de sk *bashändelserna*. Utvecklingen av orsakskedjorna avslutas när man har nått önskad detaljeringsnivå.

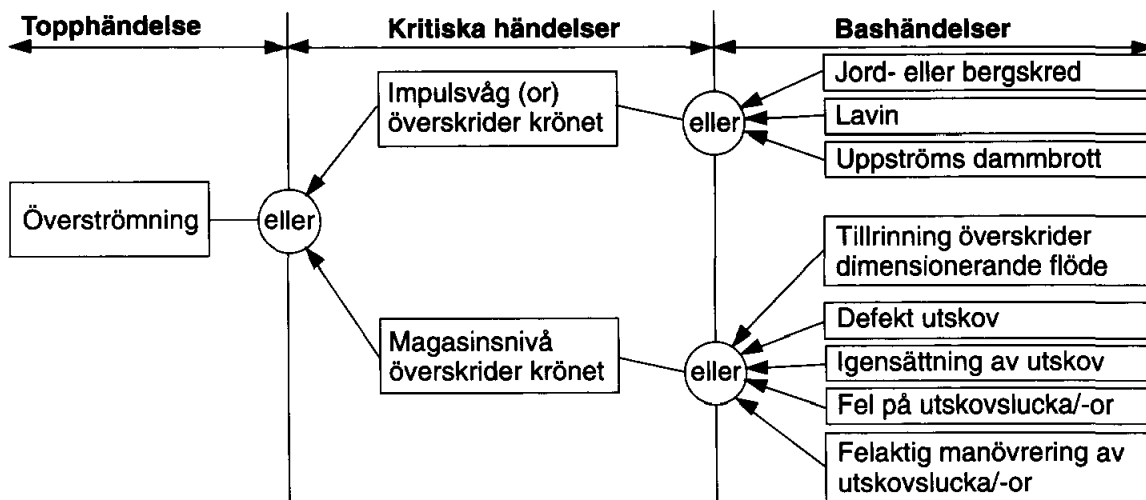
Logiska portar är grafiska symboler som visar sambanden mellan komponenterna (bashändelserna) och systemtillståndet (topphändelsen) i felträdet. "OCH"-portar representerar snittet av händelser (inträffar om *alla* ingångshändelser inträffar) medan "ELLER"-portar representerar unionen av händelser (inträffar om *minst en* av ingångshändelserna inträffar).



Figur 3.1.a. Principexempel på felträd.



Figur 3.1.b. Principexempel på felträd för felfunktion i reservkraft.



Figur 3.1.c. Felträd för överströmning av en damm.

Figur 3.1.a, b och c visar exempel på felträd. Felträdsanalys mynnar ut i bestämning av "minimala snitt" (engelska "minimal cut sets"). Ett snitt är en uppsättning händelser som tillsammans ger topphändelsen. Ett minimalt snitt är en kombination av minsta möjliga antal händelser som om de inträffar samtidigt tillsammans ger topphändelsen. Beräkning av sannolikheten för att ett minimal snitt skall inträffa utgår från sannolikheten för att respektive bashändelse inträffar. Om alla bashändelser är oberoende multipliceras "OCH"-portar medan "ELLER"-portar adderas.

3.2. Händelseträdsanalys

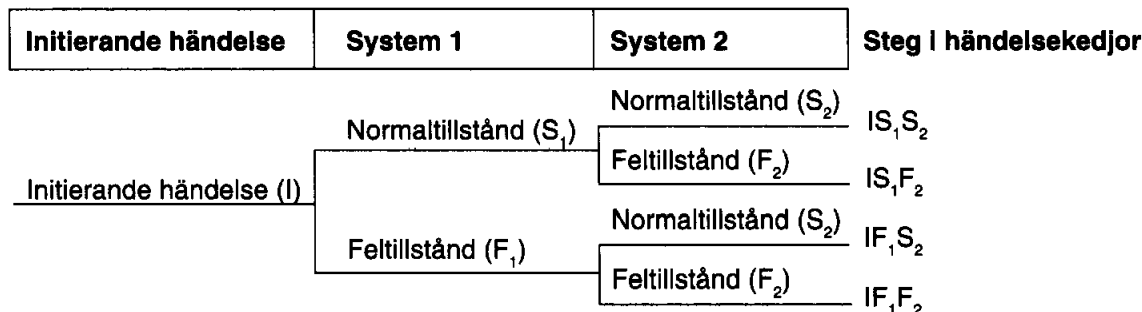
Händelseträdsanalys (engelska Event Tree Analysis) ingår i de flesta riskanalyser. Ett händelseträd är ett logiskt diagram som visar möjliga händelsekedjor som följer efter en initierande händelse, som kan resultera i olyckor. De används vanligen för att spåra hur kritiska händelseförlopp utvecklas. Den initierande händelsen kan t ex vara felfunktion i en teknisk komponent, en mänsklig felhandling eller en yttre last. Vid utvecklingen av händelsekedjorna tas hänsyn till olika förhållanden och säkerhetsfunktioner som påverkar konsekvenserna av den initierande händelsen.

Händelseträdsanalys genomförs vanligen i följande steg:

- identifikation av initierande kritisk händelse
- identifikation av de förhållanden/säkerhetsfunktioner som påverkar konsekvenserna av den initierande händelsen
- konstruktion av händelseträdet
- kvantitativ analys av händelseträdet

Till att börja med definierar man en *initierande händelse*. Den initierande händelsen bör kunna ge upphov till flera möjliga händelsekedjor. Om den bara kan resultera i en specifik olycka är det bättre att utföra en felträdsanalys för att bestämma möjliga orsaker till olyckan. Därefter identifieras alla steg i händelsekedjor som kan utlösas av den initierande händelsen.

Händelseträdet konstrueras genom att man ställer frågan "Vad händer om X fungerar respektive inte fungerar?". För varje steg i händelsekedjan ställs samma fråga, varvid händelseträdet successivt klyvs och grenar ut sig. Det visar i kronologisk ordning utvecklingen av alla möjliga händelseförlopp, som följer av den valda initierande händelsen. Trädet förgrenas med utgångar för "normal funktion" respektive "felfunktion" för varje steg i händelsekedjan. Figur 3.2 visar exempel på händelseträd.



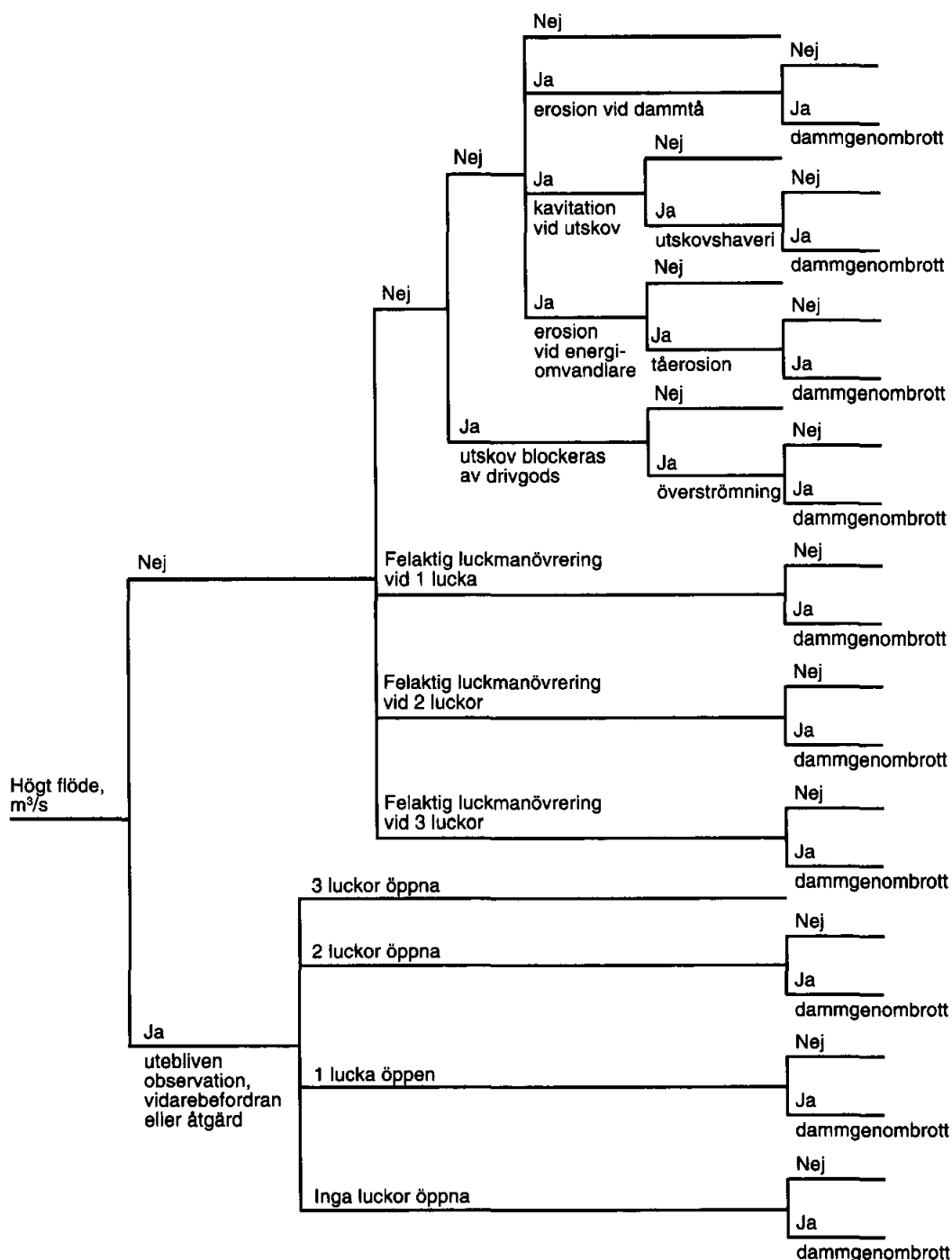
Figur 3.2.a. Principexempel på händelseträd.

Genom skattning av de ingående händelsernas sannolikheter kan man göra en kvantitativ analys av händelseträdet. Sannolikheten för att varje funktion/komponent skall fungera respektive inte fungera avsätts på respektive förgrening i trädet. Vanligen anges sannolikheten för felhändelse, P_f , varefter sannolikheten för lyckad händelse beräknas som $P_s = 1 - P_f$. Sannolikheten för händelsekedjorna beräknas vid slutet av respektive gren i händelseträdet. Då sannolikheten för varje händelse avser sannolikheten att den inträffar givet att den föregående händelsen (till vänster i trädstrukturen) har inträffat, beräknas sannolikheten för händelsekedjan som produkten av respektive ingående sannolikhet.

Händelseträd kan ibland kompletteras med felträd. Sannolikheten för händelser som ingår i händelseträdet ingående felhändelserna analyseras då med hjälp av felträd. Figur 3.3 demonstrerar hur de två analysverktygen kan kombineras på detta sätt. Fel- och händelseträd förutsätter inte kvantitativ beräkning av sannolikheten för felhändelser och oönskade konsekvenskedjor. Om tillräcklig information för skattning av felsannolikheter inte är tillgänglig kan kvalitativ analys med uppbyggnad av trädstrukturerna vara nyttig i sig. Det ger bra förståelse för hur systemkomponenter samspelar med varandra och säkerhetssystem.

3.3. Metoderna HAZOP och FMEA

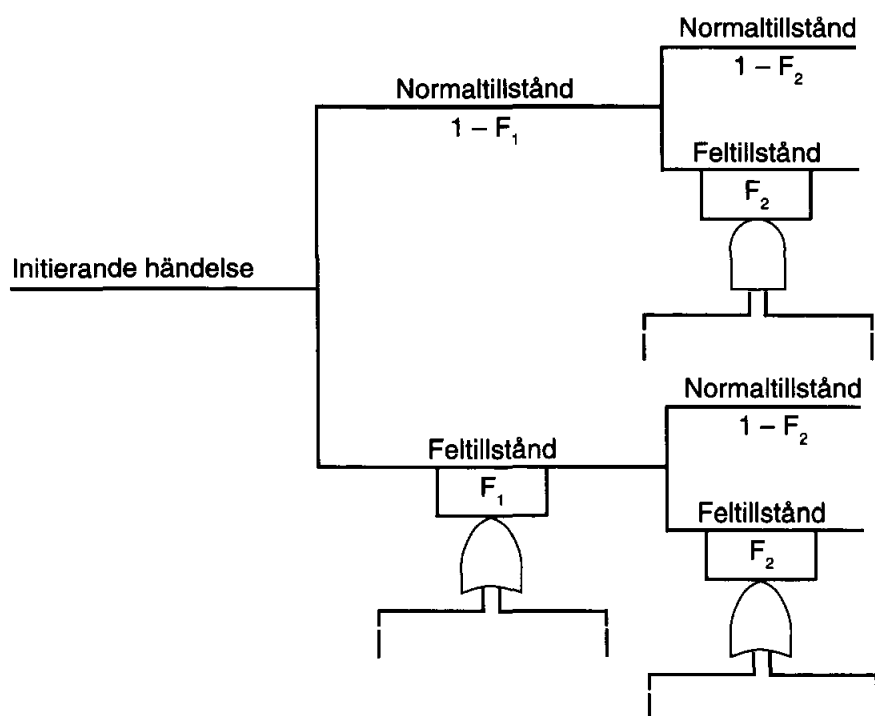
HAZOP (Hazard and Operability Study) och feleffektanalys, sk FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), är metoder som hjälper en projektgrupp att systematiskt och utförligt analysera vad som kan hända (gå fel) i systemet. FMEA utvecklades på 1950-talet och var en av de första systematiska metoderna för att analysera effekten av komponentfel i tekniska system. Analysen är främst kvalitativ med syfte att identifiera delar eller egenskaper i ett system som kan leda till säkerhetsproblem. FMEA är en induktiv metod som bygger på frågor på temat "Vad händer om ...?". Frågor ställs för varje komponent/del i systemet, varvid möjliga felfunktioner och dessa felfunktioners effekt på systemet kartläggs.



Figur 3.2.b. Händelseträd för högt flöde vid damm med tre luckförsedda utskov.

Typiska frågor som besvaras i en FMEA är:

1. Hur kan respektive del tänkas fungera felaktigt?
2. Vilka mekanismer skulle kunna åstadkomma dessa felsekvenser?
3. Vilka blir effekterna om felet inträffar?
4. Hur detekteras felet?
5. Vilka åtgärder/installationer kompenserar för felet?



Figur 3.3. Kombination av händelseträd och felträd.

FMEA är förhållandevis enkel att utföra, men kräver detaljerad kunskap om anläggningens uppbyggnad, funktionssätt, driftförhållanden mm.

HAZOP är en form av FMEA, som ursprungligen utvecklades för tillämpning inom kemisk industri. Det är en systematisk analysteknik för identifikation av möjliga säkerhetsmässiga och operationella problem, som kan uppstå under drift och underhåll av en anläggning. Analysen genomförs av en grupp, där gruppledaren försöker stimulera gruppmedlemmarna till att identifiera möjliga avvikelser från normaltillstånd i systemkomponenterna, orsakerna till och konsekvenserna av dessa. För detta används sk "guideord", vilka kopplas till olika parametrar, för att stimulera kreativt tänkande kring systemet. Exempel på guideord och anknyttande parametrar följer i tabell 3.1.

Guideord	Parameter
Ingen/fel	Rörelse
Mindre/mer +	Tid
Lägre/högre	Position
Motsatt/omvänd	Beslut

Tabell 3.1. Exempel på guideord och anknyttande parametrar vilka används i HAZOP.

Analysen resulterar i en total beskrivning av anläggningen (eller proceduren), systematisk granskning av hur avvikelser från avsedd funktion kan uppstå och bestämning av om dessa avvikelser kan leda till säkerhets- eller driftproblem. På så vis identifieras oönskade förhållanden mot vilka avhjälpanande åtgärder bör sättas in.

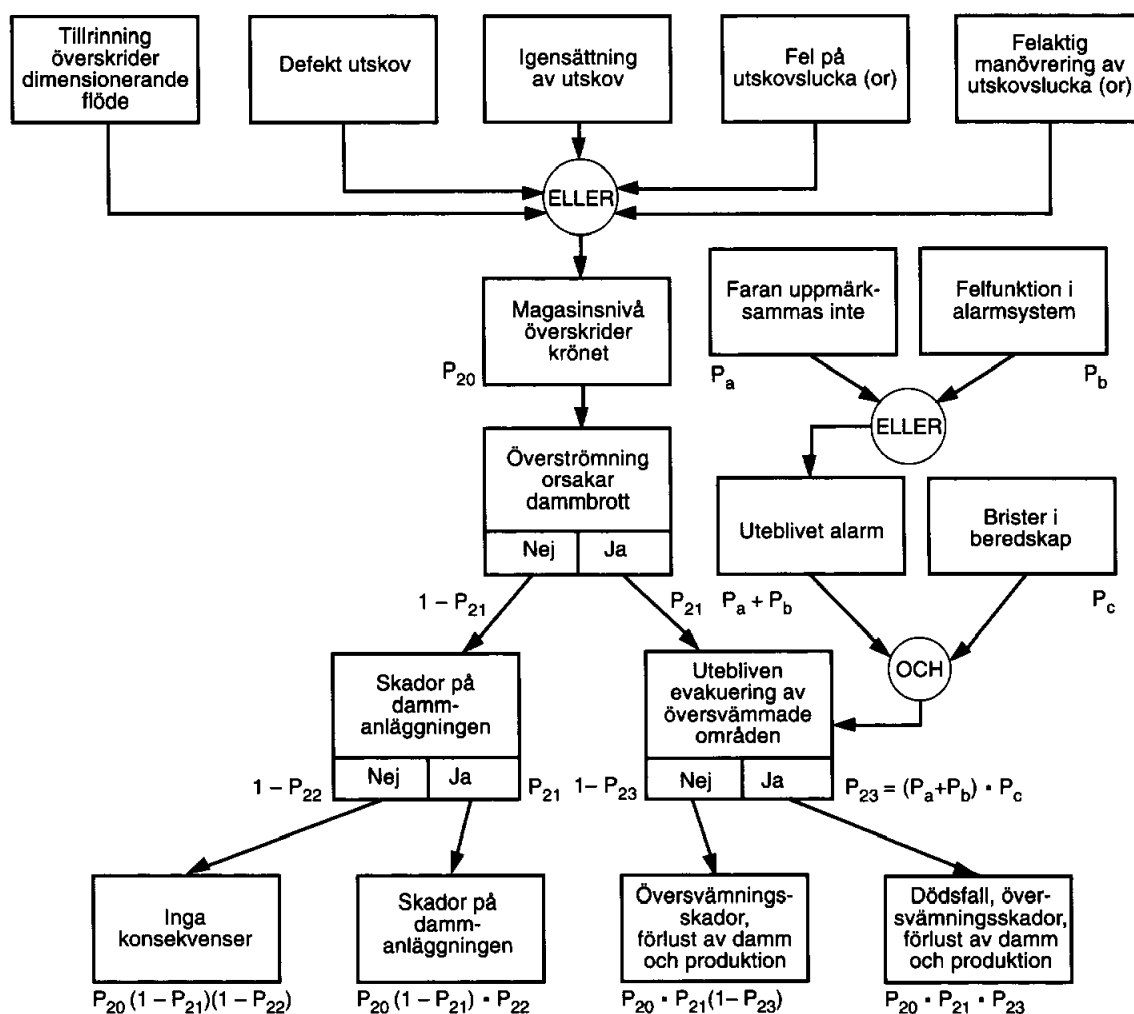
4. TILLÄMPNINGSEXEMPEL

Det finns många exempel på hur riskanalys kan tillämpas inom dammsäkerhetsområdet. Fyra exempel presenteras översiktligt nedan, som en illustration på möjliga användningsområden. Exempelen bygger på utländska studier och bör ses som hypotetiska räkneexempel. De innehåller en hel del förenklingar som inte tas upp här. Det kan påpekas att de inte går in på möjliga åtgärder, vilka skulle kunna vidtas för att förhindra haveri.

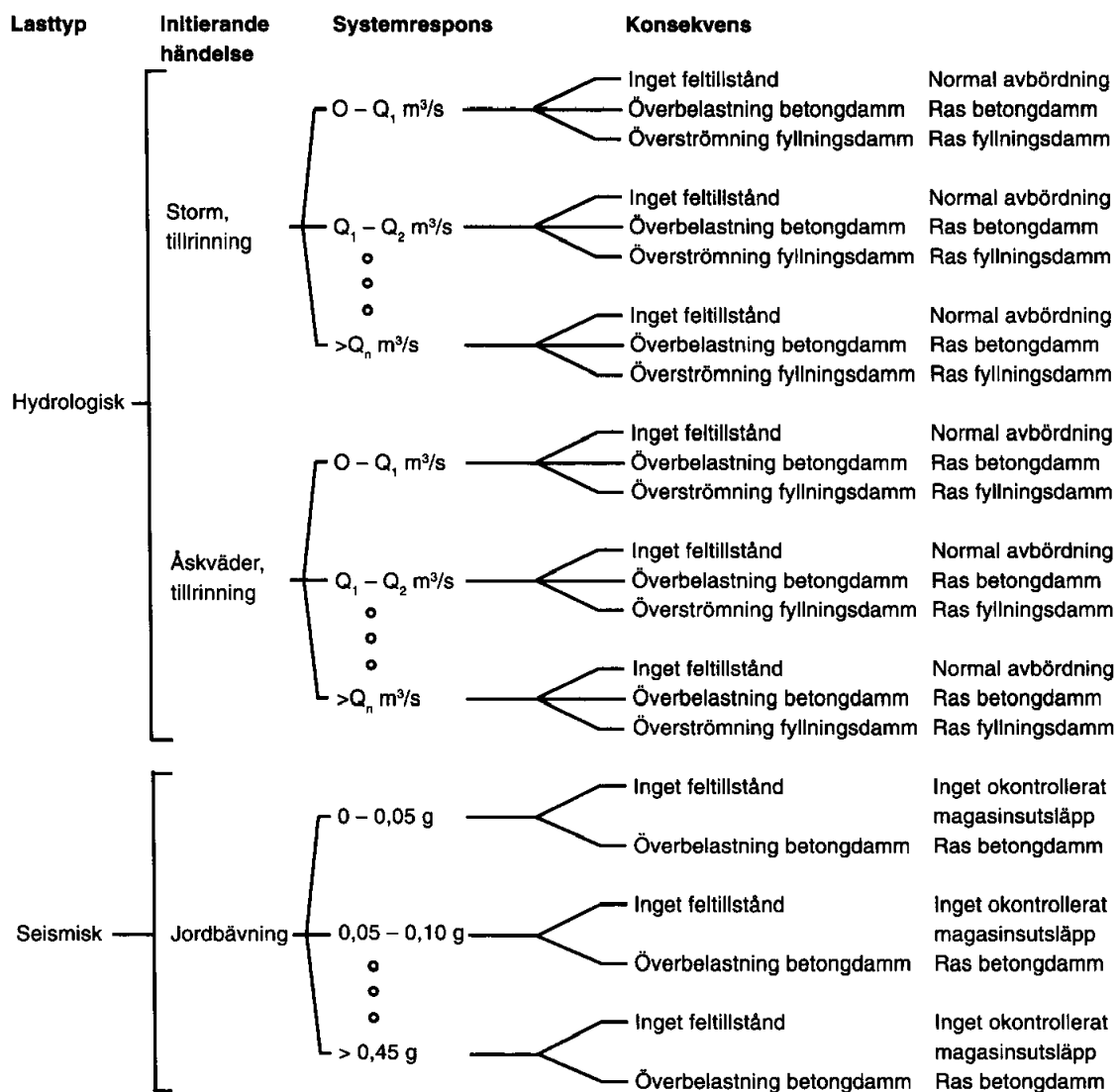
4.1. Konsekvensdiagram för överströmning

Konsekvensdiagram, en sorts mer sofistikerade versioner av händelseträd, har använts för analys av kontinuerlig överströmning, se figur 4.1. Konsekvensdiagrammet bygger bl a på felträdsanalysen i figur 3.1.c. Dessutom ingår ytterligare ett felträd som utvärderar om evakuering av det översvämmade området genomförs eller inte. Slutsatser som framkom var bland annat att metoden:

- framhäver de händelser och förhållanden som bidrar mest till möjliga incidenter, och
- möjliggör bestämning av vilka incidenter och konsekvenser som beror av osäkerheter, mänskliga felhandlingar under projektering, byggande och drift etc.



Figur 4.1. Konsekvensdiagram för kontinuerlig överströmning.



Figur 4.2. Felträd för seismiska och hydrologiska laster.

4.2. Händelseträd för flöden och jordbävningar

Översiktliga felträd användes för analys av flödessituationer, jordbävningar, inre initierande händelser och uppströms dammbrott vid en kombinerad betong- och fyllningsdamm. Effekten av många riskminskande åtgärder jämfördes. Figur 4.2 visar exempel på de översiktliga felträd som användes i analysen. Ett resultat som framkom i det aktuella fallet var att dammen inte medförde någon ökning av antalet dödsfall, vid jämförelse mellan konsekvenserna av dammbrott pga höga flöden och konsekvenserna av samma flöden under naturliga förhållanden.

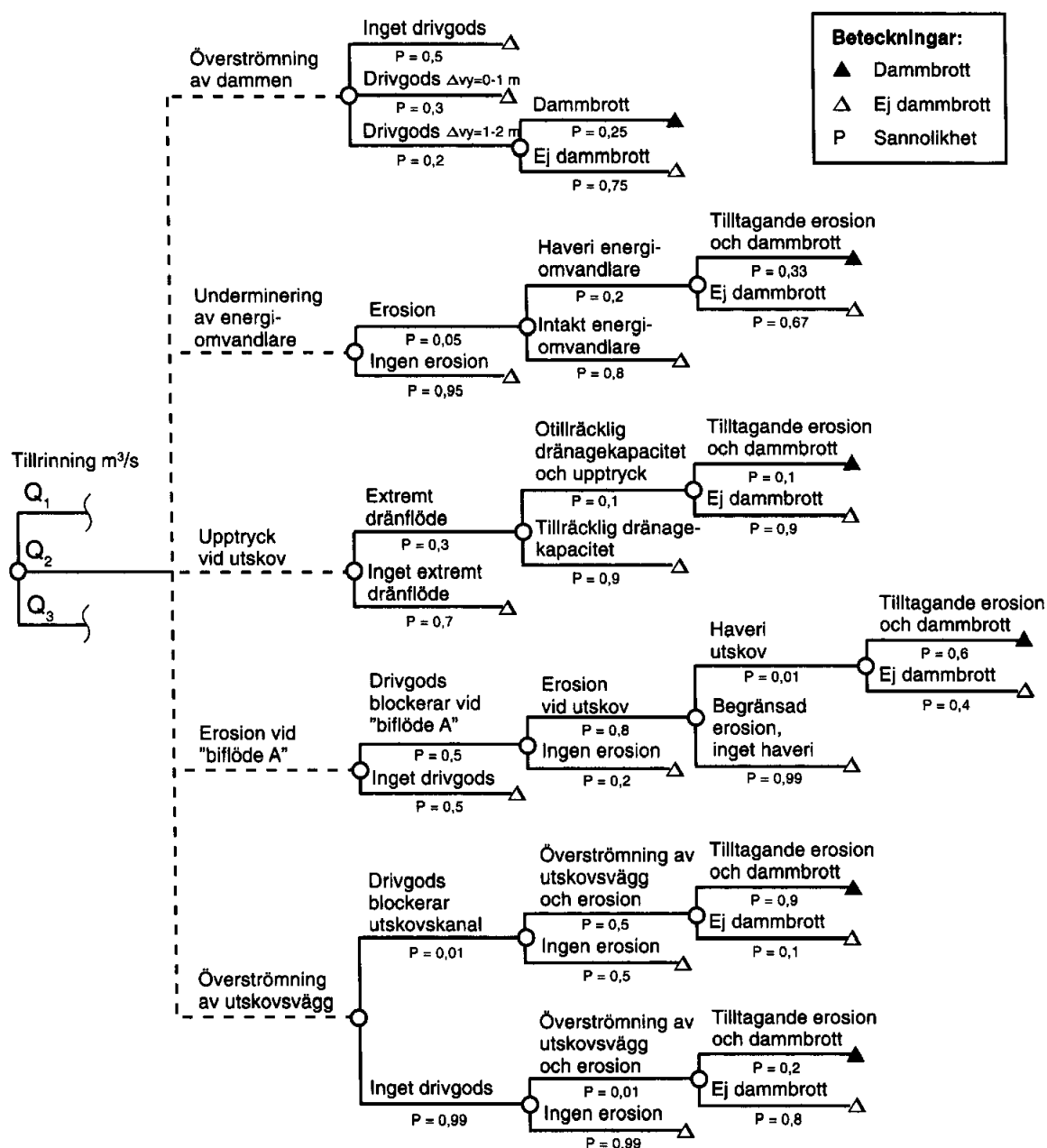
Dammägarens kommentarer till analysen var bland annat att den:

- utvecklade en djupare förståelse av risken för dammbrott, vilket internt rättfärdigade behovet av säkerhetshöjande åtgärder,
- identifierade alternativ som annars troligen hade utelämnats eller missats, och
- troligen besparade dem närmare 50% av förväntade åtgärds kostnader.

4.3. Detaljerat händelseträd för flödessituationer

Förhållandevis detaljerade händelseträd användes för riskanalys av seismiska och hydrologiska laster för en jordfyllningsdamm. För det aktuella fallet är drivgodsproblem karaktäristiska för magasinet, speciellt vid "biflöde A" vars mynning ligger i direkt anslutning till en av dammens anslutningar. Igensättning med drivgods skulle här kunna leda till allvarlig erosion på dammen.

Figur 4.3 visar ett händelseträd för en av tre studerade flödesnivåer. Liksom framgår av figuren analyserades fem alternativa brottstyper; 1) överströmning av dammen, 2) underminering av energiomvandlaren, 3) upptryck vid utskov, 4) erosion vid "biflöde A", och 5) överströmning av utskovsvägg.



Figur 4.3. Hydrologiskt händelseträd för högt flöde.

Händelseträdsanalysen gav i det aktuella fallet brottssannolikheten för de alternativa kritiska händelsekedjorna och den sammanlagda brottssannolikheten för respektive flödesnivå. Jämförelse av brottssannolikheten för de tre flödesnivåerna indikerar att det största bidraget till den brottsrisken kommer från den lägsta, men oftast förekommande, flödesnivån. Detta berodde till stor del på möjligheten för igensättning med drivgods i utskovet eller "biflöde A".

4.4. Inre erosion – problematik och händelseträd

Inre erosion innebär att finmaterial i dammkroppen eller grunden lösgörs och transporteras med läckvattnet i strömningsriktningen. Erfarenhetsmässigt är detta bland de vanligaste orsakerna till skador och haveri för fyllningsdammars. I princip omfattar inre erosion tre samverkande fysikaliska processer: bildandet av en läckväg, transport av partiklar och filtrering. Den pådrivande kraften är vattentryck och tryckskillnader.

Den tätande och filtrerande förmågan måste vara kontinuerlig över hela dammen, då dammen inte är starkare än sin svagaste del. Då det är svårt att förbättra en befintlig damms tätande och filtrerande förmåga riktas säkerhetshöjande åtgärder främst mot att förbättra övervakningen av dammens kondition, samt att förbättra dammens förmåga att tåla kraftigt läckage.

Även om erosionsprocessen principiellt är någorlunda känd, så är detaljförloppet komplext och analytiska samband för studie av de styrande mekanismerna i det enskilda fallet finns inte. Idag finns inga praktiskt tillämpbara metoder för att bedöma risken för inre erosion i en befintlig damm, varför analysen måste baseras på överslagsberäkningar och erfarenhetsbedömningar. Sannolikheten för läckagebrott kan hänföras till dammkroppens och grundens förmåga att kontrollerat släppa igenom läckvatten. I en första ansats till strukturerad analys av risken för inre erosion i dammkroppen skulle problemet kunna indelas i följande steg:

- *Sannolikhet för uppkomst av koncentrerat läckage:* bedömning av förmåga att etablera en jämn genomströmning baserat på grundförhållanden, konstruktionens utformning, kvalitetssäkring under byggande och idrifttagande, och funktion under drift.
- *Förmåga att förhindra materialtransport vid koncentrerat läckage:* värdering av filtrens utformning, egenskaper och kvalitet, speciellt avseende filtrerande förmåga vid tät-kärnan och dess anslutning till grunden och genomgående konstruktioner, klarläggande av samband mellan eventuella tecken på onormal dammfunktion och koncentrerat läckage.
- *Förmåga att stabilt stå emot läckagebrott eller lokal överströmning vid omfattande inre erosion:* bedömning av stödfyllningens och dammtåns förmåga att tåla kraftigt läckage, utredning av eventuella insjunkningars och läckflödens samband med inre erosion.

- *Förmåga till tidig varningssignal:* bedömning av möjligheten att identifiera störningar och lokalisera skadade zoner på ett tidigt stadium
- *Möjlighet att i kritisk situation genomföra stabiliserande och tätande åtgärder:* bedömning av dammens behov vid inre erosion, tillgänglig tid för åtgärder, möjlighet och färdighet att påverka skadeförloppet

```

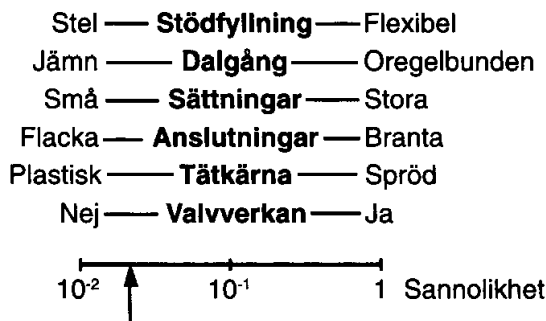
graph LR
    A[Koncentrerat läckage?] -- J --> B[Filter tillfredsställande?]
    A -- N --> C[Filter tillfredsställande?]
    B -- N --> D[Pågående erosion upptäcks]
    B -- J --> E[Dränage tillfredsställande?]
    C -- N --> D
    C -- J --> E
    D -- N --> F[Högt porvatten-tryck upptäcks]
    D -- J --> G[Stabila slänter?]
    E -- N --> F
    E -- J --> G
    F -- N --> H[H]
    F -- J --> I[N]
    G -- N --> I
    G -- J --> H
  
```

Beteckningar
 J = Ja
 N = Nej
 H = Haveri

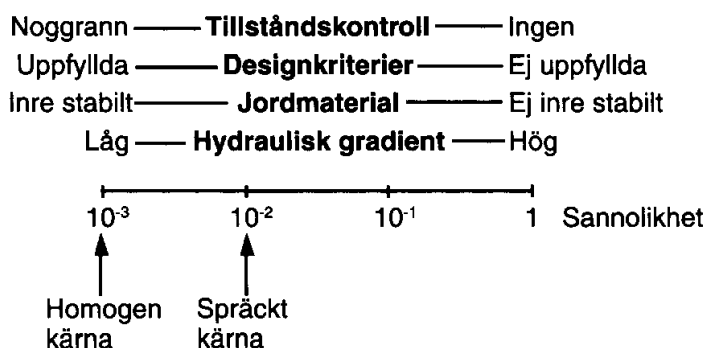
Händelseträd bör kunna användas som stöd för bedömning av geotekniska aspekter på dammsäkerheten. Figur 4.4 visar ett exempel på ett enkelt händelseträd, där varje förgrening representerar ett förhållande med stor betydelse för säkerheten mot läckagebrott. Beteckningarna på grenarna skall tolkas i vid bemärkelse, så att t ex "filter" avser alla anordningar med syfte att förhindra inre erosion. Med "pågående erosion upptäcks" respektive "högt porvattentryck upptäcks" avses hela kedjan av fysiska mätsystem, tolkning av mätvärden och vidtagande av åtgärder för att förhindra haveri. "Nej" på grenen "högt porvattentryck upptäcks" betyder att porvattentryck tillräckligt högt för att förorsaka haveri inte observeras eller åtgärdas i tid för att förhindra haveri. "Ja" betyder att åtgärder görs i tid för att reducera porvattentrycket och förhindra haveri. Händelseträdet framhäver de olika försvarsbarriärerna som skyddar mot brott, och kan vara till nytta vid en subjektiv – men strukturerad – värdering av sannolikheten för brott pga koncentrerat läckage.

23

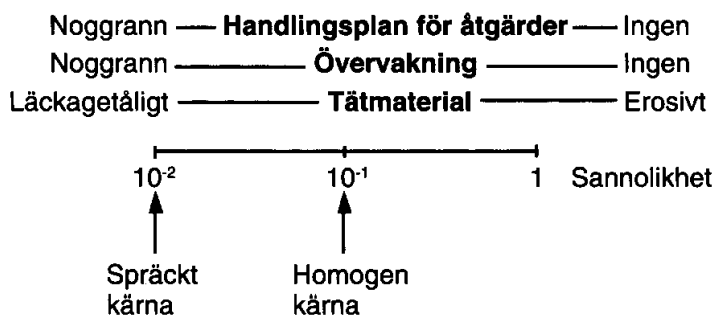
bedömningar. Figur 4.5 ger exempel på hur bedömningarna kan göras. Man identifierar parametrar som påverkar sannolikheten för de olika händelserna, i detta fall a) koncentrerat läckage, b) filterfunktion och c) upptäckt av pågående erosion, och uppskattar inom vilka storleksordningar det kan vara rimligt att sannolikheten för händelserna varierar. Om ett flertal parametrar är ofördelaktiga och utförandet medelmåttigt kan sannolikheten för uppkomst av koncentrerat läckage (a) närma sig 1, medan en kombination av fördelaktiga förhållanden ger en skattning i närheten av skalans lägsta värde. Pilarna i figuren anger exempel på sannolikhetsskattningar för en damm utförd med "hög designstandard" under gynnsamma naturliga förhållanden.



Figur 4.5.a. Parametrar som har betydelse för sannolikheten för uppkomst av koncentrerat läckage.



Figur 4.5.b. Parametrar som har betydelse för sannolikheten för tillfredsställande filterfunktion.



Figur 4.5.c. Parametrar som har betydelse för sannolikheten för att pågående erosion upptäcks och åtgärdas.

5. SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

Studien visar att riskanalys har potential för att utvecklas till ett effektivt hjälpmedel vid säkerhetsutvärdering av svenska dammar. Projektet är ett steg i en pågående process att utveckla bättre metoder för att utvärdera och hantera dammsäkerhet i Sverige. Viktiga punkter i fortsatt arbete mot att förbättra användbarheten och nyttan av riskanalyser i dammsäkerhetsarbetet är:

- Genomförande av fallstudier där analysmetodiken tillämpas på befintliga svenska dammar.
- Införande av nationellt system för incidentrapportering. Därutöver kan man utnyttja möjligheten att komplettera systemet med erfarenheter från tidigare inträffade säkerhetsstörningar.
- Samarbete med utländska organ om riskanalys, incidentrapportering, incidentdatabaser och sannolikhetsskattningar.
- Ökad öppenhet och samarbete kring säkerhetsfrågor inom branschen.

6. REFERENSER

Bartsch, Maria (1995). *Filtration Processes and Internal Erosion in Dams of Broadly Graded Material*. Technical report, Division of Hydraulic Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, TRITA-AMI REPORT 3013.

Bartsch, Maria (1995). *Inre erosion i Svenska Fyllningsdammar. Statistisk Analys av Riskfaktorer*. Avdelningen för vattenbyggnad, Institutionen för anläggning och miljö, Kungliga Tekniska Högskolan, TRITA-AMI REPORT 3014.

Bartsch, Maria (1995). *Safety Analysis of Swedish Dams. Dam Performance and Incident Data Analysis*. Licentiate Thesis, Division of Hydraulic Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, TRITA-AMI LIC 2005, ISBN 91-7170-716-6.

Bartsch, Maria (1995). *Säkerhetsstörningar vid Svenska Dammanläggningar*. Avdelningen för vattenbyggnad, Institutionen för anläggning och miljö, Kungliga Tekniska Högskolan, TRITA-AMI REPORT 3012.

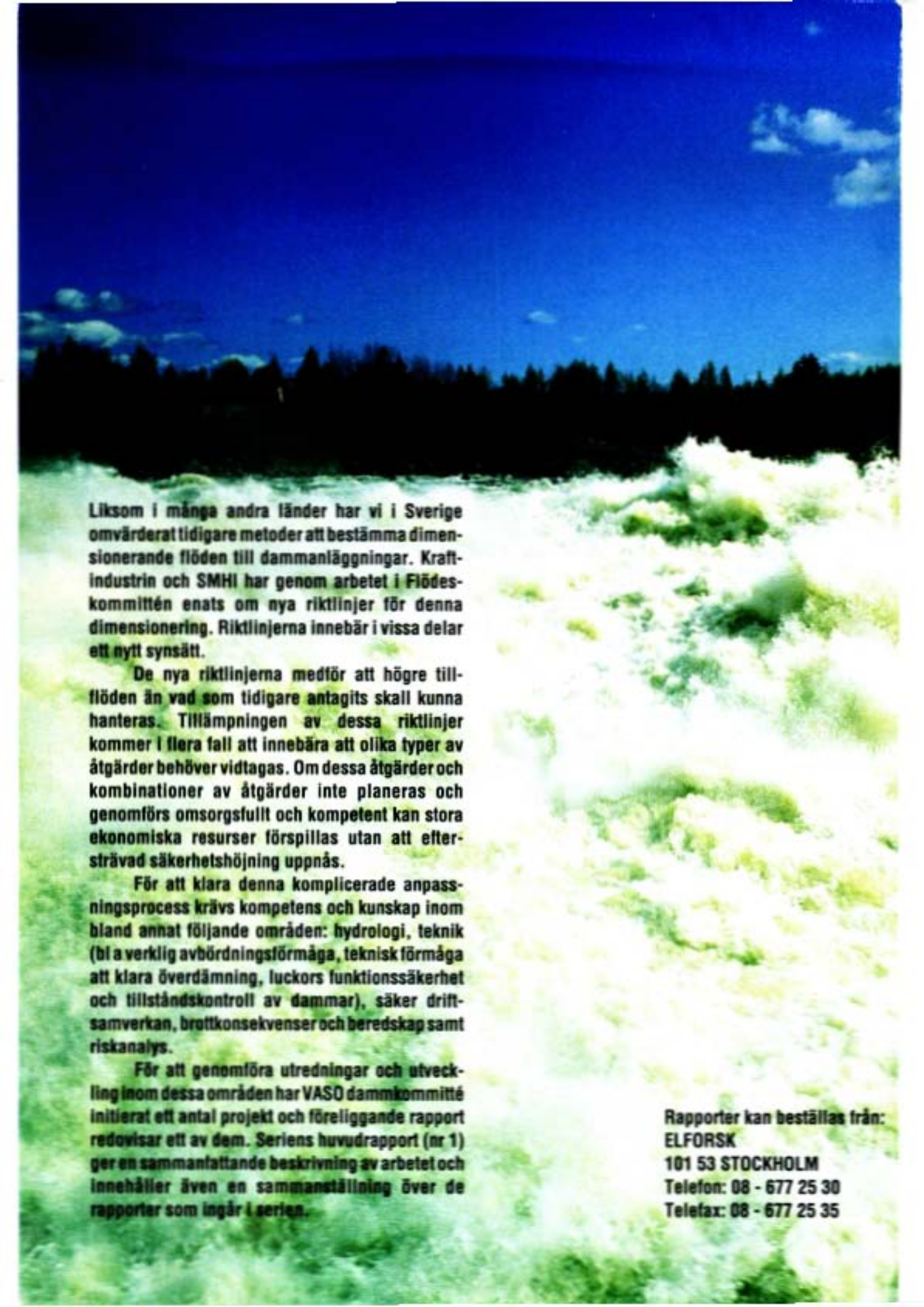
Graham, L. Phil and Bartsch, Maria (1995). *Risk Analysis Safety Assessment for Use at Swedish Dams*. Proceedings from the Symposium on Research and Development in the Field of Dams, Crans-Montana, Switzerland, 7-9 September 1995, pp. 627-638.

Graham, L. Phil (1995). *Safety Analysis of Swedish Dams: Risk Analysis for the Assessment and Management of Dam Safety*. Licentiate Thesis, Division of Hydraulic Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, TRITA-AMI LIC 2006, ISBN 91-7170-715-8.

ANTECKNINGAR

ANTECKNINGAR

ANTECKNINGAR



Liksom i många andra länder har vi i Sverige omvärderat tidigare metoder att bestämma dimensionerande flöden till dammanläggningar. Kraftindustrin och SMHI har genom arbetet i Flödeskommittén enats om nya riktlinjer för denna dimensionering. Riktlinjerna innebär i vissa delar ett nytt synsätt.

De nya riktlinjerna medför att högre tillflöden än vad som tidigare antagits skall kunna hanteras. Tillämpningen av dessa riktlinjer kommer i flera fall att innebära att olika typer av åtgärder behöver vidtagas. Om dessa åtgärder och kombinationer av åtgärder inte planeras och genomförs omsorgsfullt och kompetent kan stora ekonomiska resurser förspillas utan att eftersträvad säkerhetshöjning uppnås.

För att klara denna komplicerade anpassningsprocess krävs kompetens och kunskap inom bland annat följande områden: hydrologi, teknik (bl a verklig avbördningsförmåga, teknisk förmåga att klara överdämning, luckors funktionssäkerhet och tillståndskontroll av dammar), säker driftsamverkan, brottkonsekvenser och beredskap samt riskanalys.

För att genomföra utredningar och utveckling inom dessa områden har VASO dammkommitté initierat ett antal projekt och föreliggande rapport redovisar ett av dem. Seriens huvudrapport (nr 1) ger en sammanfattande beskrivning av arbetet och innehåller även en sammanställning över de rapporter som ingår i serien.

Rapporter kan beställas från:
ELFORSK
101 53 STOCKHOLM
Telefon: 08 - 677 25 30
Telefax: 08 - 677 25 35