© 2026 Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors.

RAMVERK FÖR RISKBASERAD DIMENSIONERING AV PELARE I UNDERJORDSGRUVOR

FRAMEWORK FOR RISK BASED DESIGN OF PILLARS IN UNDERGROUND MINES

Spång, J., ITASCA
Svartsjaern, M., ITASCA
Johansson, F., KTH
Edelbro, C., ITASCA/KTH

SAMMANFATTNING

Dimensionering med utgångspunkt i brottsannolikhet har historiskt sett varit ovanlig vid dimensionering av underjordskonstruktioner, särskilt inom gruvindustrin. Den begränsade erfarenheten inom området har medfört att det saknas etablerad metodik och vedertagen praxis gällande hur sannolikhetsbaserade beräkningsmetoder bör tillämpas. Inom forskningsprogrammet Swedish Mining Innovation har ett ramverk för riskbaserad dimensionering utvecklats i samarbete mellan ITASCA, KTH, LKAB och Boliden. Syftet med ramverket är att underlätta och främja tillämpningen av sannolikhetsbaserade metoder för design av anläggningar efter risknivå. Ramverket är utformat för tillämpning på pelare i underjordsgruvor och utgår från idealiserade pelarkoncept som har validerats relativt faktiska utfall från LKAB och Boliden. Ramverkets struktur omfattar rekommendationer för undersökning och provtagning, definition av gränstillstånd och acceptanskriterium, föreslagna sannolikhetsbaserade beräkningsmetoder samt vägledning för tolkning gällande metodernas utfall.

Nyckelord: Riskbaserad dimensionering, Gruvpelare, Geoteknisk karakterisering, Sannolikhetsbaserade beräkningsmetoder, Riskhantering.

ABSTRACT

Reliability-based design has historically seldomly been applied when designing underground infrastructure, particularly within the mining industry. The limited experience within the area has resulted in a lack of established methodology and accepted practice for reliability-based calculation methods. Therefore, within the Swedish Mining Innovation research program, a framework for risk-based design has been developed through a collaboration between ITASCA, KTH, LKAB, and Boliden. The purpose of the framework is to facilitate the application of reliability-based design, enabling a mine design based on risk-level. The framework is intended for application on pillars in underground. The framework has been validated against cases by LKAB and Boliden. The structure of the framework includes recommendations for investigation and sampling, definition of limit states and acceptance criteria, proposed probabilistic calculation methods, and guidance for risk-based design.

Keywords: Risk-based design, Mining pillars, Geotechnical characterization, Probabilistic calculation methods, Risk management.

1 INLEDNING

1.1 Introduktion

Inom forskningsprogrammet Swedish Mining Innovation har ett ramverk för riskbaserad dimensionering utvecklats i samarbete mellan ITASCA, KTH, LKAB och Boliden. Riskhantering är en direkt utmaning vid all byggnation eller brytning under jord. Många risker är direkt kopplade till den begränsade kunskap som ofta råder kring lokala förutsättningar som bergmassans egenskaper och spänningstillstånd.

En av de viktigaste konstruktionerna inom gruvbrytning är bergpelare, vilka används i ett lastupptagande syfte där laster förs vidare från brytningsområdet och minskar konvergens och skador. Idag dimensioneras gruvpelare vanligtvis genom deterministiska metoder, som resulterar i ett binärt utfall ”stabil” eller ”icke stabil” och kan även associeras med en säkerhetsfaktor (*FoS*). Ett alternativ till den deterministiska dimensioneringsfilosofin är sannolikhets- och riskbaserade metoder. Konceptet bygger på att ett antal designparametrar relateras till olika sannolikhetsbaserade utfall, vilket kan relateras till en specifik risknivå för konstruktionen. Sannolikhetsbaserade metoder möjliggör en direkt uppskattning av osäkerheter inom ett ramverk för riskanalys. Användandet av sannolikhetsbaserade metoder för gruvdesign har tidigare utretts i en förstudie till detta arbete, *Probabilistic design for underground- and open pit mines* av Hellberg *m.fl*. (2022) där det konstaterades att metoderna förekommer i viss utsträckning i dagbrott, men sällan tillämpas under jord. Författarna rekommenderade en vidareutveckling av befintliga metoder för underjordssammanhang, varför ramverket utgör ett viktigt steg i denna riktning.

Det framtagna ramverket för riskbaserad design kan tillämpas för optimering av till exempel:

- Dimensioner och geometrier hos pelare,
- Brytningssekvens eller uttagsordning, och
- Övervakning och instrumentering.

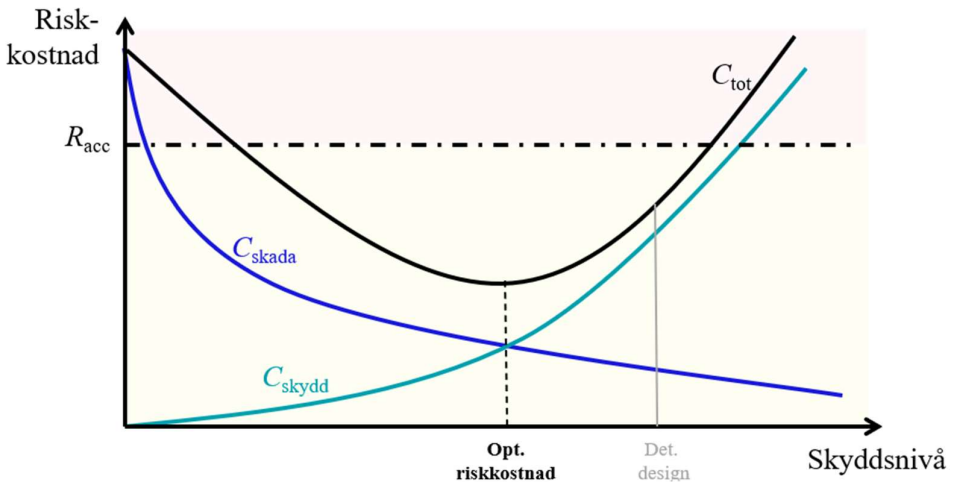
Riskbaserade metoder har potential att användas som komplement där deterministisk analys i dag tillämpas. Genom att beakta variationer i materialegenskaper och kvantifiera osäkerheter kan ramverket bidra till ökad förståelse för riskbaserad optimering och design i komplexa bergmekaniska sammanhang. Ramverket har utvecklats med fokus på design av gruvpelare i underjordsgruvor, men är i stor utsträckning även tillämpbart inom bergbyggande i infrastruktursammanhang. Ramverket beskriver hur sannolikheten för specifika utfall kan härledas med hänsyn till bergmekaniska egenskaper, indata, definition av gränstillstånd och variabilitet. Mer specifikt beskrivs hur sannolikheten att uppnå ett definierat tillstånd avseende spänningar och deformationer i bergmassan kan approximeras.

1.2 Bakgrund

Allt eftersom underjordsgruvor blir allt djupare ökar behovet av nya metoder och att den bergmekaniska projekteringen utvecklas. Bergbyggande uppvisar i alla sammanhang stora osäkerheter gällande bergmaterials egenskaper och verkande laster (ex. initialspänningar). I gruvsammanhang förekommer ofta stora utmaningar kopplat till ett, med tiden varierande spänningsfält, komplexa geometrier och storskalig brytning eller bergschakt. Att redan i designskedet kunna inkludera och kvantifiera rådande osäkerheter genom ett riskbaserat tillvägagångssätt för verifiering och optimering (utifrån både ekonomi och arbetsmiljö) kan bidra till både ökad ekonomisk och social hållbarhet.

Det finns, som beskrivet i förstudien (Hellberg *et al*., 2022), få exempel på sannolikhetsbaserad analys i underjordsgruvsammanhang. Sannolikhetsbaserade metoder påträffas vanligare vid design relaterad till dagbrott (Fillion & Hadjigeorgiou, 2016). Idag används nästan uteslutande deterministiska metoder. Vid design utgår man ofta från en säkerhetsnivå som ges av en säkerhetsfaktor, *FoS,* där osäkerheter i indatan inkluderas i faktorn som behöver bestämmas med hänsyn till detta (ofta *FoS* = 1.5). Det deterministiska förfarandet ger ingen kontroll eller kvantifiering av osäkerheter under verifiering och resultatet kan därför, utifrån den riskbaserade filosofin, vara onödigt konservativ eller omedvetet optimistiskt. Se inritat exempel på deterministisk lösning i *Figur 1-1*.

Inom den sannolikhetsbaserade designfilosofin nyttjas information om förekommande osäkerheter i indataparametrarna. Därför kan ett systems sannolikhet att exempelvis nå ett brotts (ULS)- eller bruksgränstillstånd (SLS) nyttjas för att optimera designen genom brottsannolikheten, (*PoF*). Detta leder till ett diversifierat resultat där en skillnad mellan kända och dåligt kända egenskaper tillvaratas. Eftersom den design som erbjuder lägst sannolikhet för brott sällan utgör den mest lämpliga ur ekonomisk och hållbarhetsmässig synvinkel, kan systemets sannolikheter nyttjas tillsammans med information om eventuella konsekvenser till följd av överskridande av gränstillståndet. Detta ger en riskbaserad optimering genom det så kallade riskkostnads-konceptet, se *Figur 1-1*.



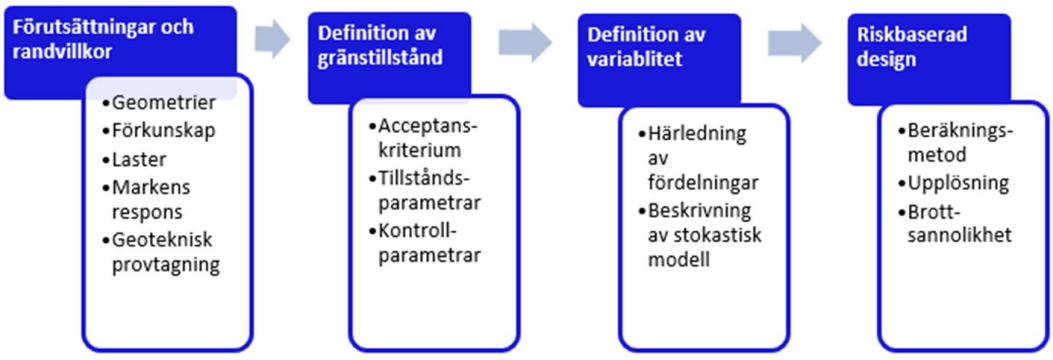
Figur 1-1. Beskrivning av riskkostnadskonceptet, där skyddskostnader (förstärkning, pelaravsättning m.fl.) tillsammans med skadekostnader (rehabilitering, produktionsbortfall, omförstärkning m.fl.) ger en totalkostnad som har en lägsta punkt i relation till den principiella placeringen av en deterministisk lösning.

2 ETT RAMVERK FÖR RISKBASERAD DESIGN

2.1 Beskrivning av ramverket

Det ramverk som tagits fram inom projektet består av fyra aktivitetsblock: förutsättningar och randvillkor, definition av gränstillstånd, definition av variabilitet respektive riskbaserad design, se *Figur 2-1*. Aktiviteterna är ordnade (och angivna) i en naturlig ordning utifrån arbetsgång. Varje block är sedermera uppbrutet i ett antal delaktiviteter, vilka på olika sätt behöver beaktas under arbetets gång.

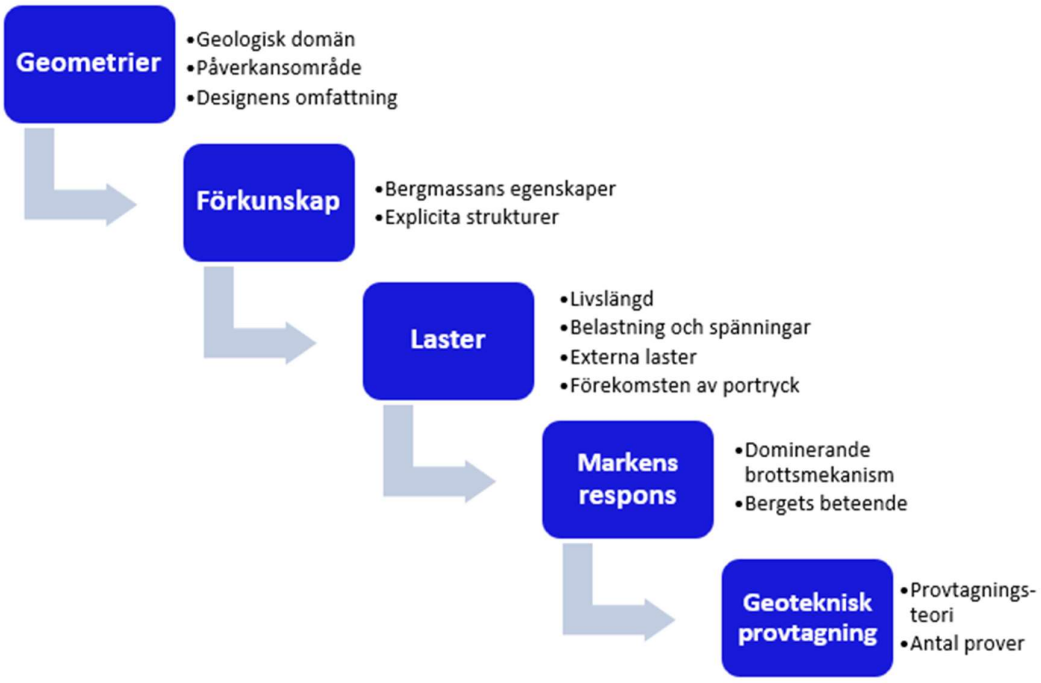
Arbetsgången behöver inte följas strikt, till exempel kan det vara funktionellt att arbeta med gränstillståndsblocket innan eller parallellt med den geotekniska datainsamlingen.



Figur 2-1. Övergripande upplägg för det framtagna ramverket, uppdelat i fyra aktivitetsblock med flera underaktiviteter som utförs på vägen mot beräkningen av PoF och en riskbaserad designlösning.

Förutsättningar

Det första aktivitetsblocket, förutsättningar, består av ett antal delaktiviteter presenterade i *Figur 2-2*. Oberoende av typ av design behöver objektets geometriska egenskaper inkluderas. I gruvpelarsammanhang innebär detta att typ av pelare tillsammans med en uppskattning av dimensionerna och information om närliggande berguttag eller brytning behöver finnas tillgängliga. Förutsättningarna, tillsammans med eventuell förkunskap om bergkvalitén och eventuella strukturer, bör utgöra grunden för att utvärdera möjliga brottsmekanismer och förväntat beteende.



Figur 2-2. Beskrivning av delaktiviteter ingående i det första aktivitetsblocket som behandlar problemets förutsättningar.

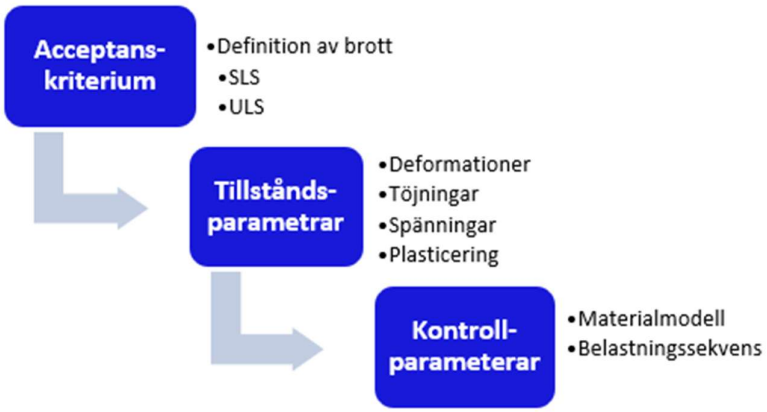
För att definiera variabiliteten hos egenskaper för en given geomekanisk enhet är det viktigt att provtagningen är representativ för hela populationen. Om ett tillräckligt stort antal prover (>30 per enhet) finns tillgängliga, är det normalt inte något problem att uppnå tillräcklig representativitet med vanligt förekommande urvalsmetoder. I geomekaniska sammanhang, och speciellt vid nyttjande av data som kräver laboratorietester, behöver ofta stickprovsteori för små populationer (<30 prover) tillämpas för urvalet.

Vid applicering av ramverket rekommenderas en användning av stickprovsteori för små populationer. Enligt denna kan representativiteten hos tillgängliga prover, i förhållande till populationen, bestämmas utifrån ett stickprovsmedelvärde och en varians. Detta resulterar genom beräkning i ett så kallat precisionsindex och därigenom ett konfidensintervall. Den accepterbara nivån av osäkerhet kan därmed styras genom att justera konfidensintervallet och tillåten avvikelse från det representativa värdet genom precisionsindexet.

Ramverket föreslår som utgångspunkt att ett 95 % konfidensintervall används. Ett precisionsindex på 1.20–1.35 medför då att med 95 % säkerhet avviker stickprovens medelvärde inte från populationens medelvärde med mer än 10–15 %.

Definition av Gränstillstånd

Det andra delblocket av ramverket avhandlar definitionen av det gränstillstånd som skall tillämpas, se *Figur 2-3*. All dimensionering som utförs inom bergmekaniken är i princip riskbaserad i det att en högre accepterad brottssannolikhet kan tillåtas för brott med små konsekvenser, och omvänt.



Figur 2-3. *Ramverkets andra delblock, beskrivandes definitionen av gränstillstånd. Både acceptanskriterium, tillståndsparameter och övriga kontrollparametrar avhandlas inom detta block.*

I första steget fastställs ett acceptanskriterium baserat på typen av dimensionerande gränstillstånd (bruksgränstillstånd, SLS, eller brottgränstillstånd, ULS) indikerande brott. Notera hur förekomsten av ett *brott* i detta sammanhang endast avser att det definierade gränstillståndet uppnås. Detta innebär nödvändigtvis inte ett direkt ras hos den analyserade konstruktionen.

I infrastruktursammanhang bestäms acceptabel brottsannolikhet, eller den tolererade sannolikheten av samhälle och politik utifrån samhällsekonomiska krav och förväntningar som slutligen konsolideras till konstruktionsregelverk, exempelvis Eurokoderna. I gruvsammanhang behöver en tolererbar och acceptabel brottssannolikhet fastställas av gruvbolagets ägare, ofta utifrån ekonomisk risk men även sett till arbetsmiljörisker kopplade till aktiviteter i den stabiliserande konstruktionens inverkansområde. Den för en gruva accepterbara nivån skiljer sig därmed ofta från ”civilsamhällets”, även om samhället ofta sätter de yttersta ramarna för vad som är accepterbart.

Ett gränstillstånd bör definieras utifrån vilken typ av problem som analyseras. Det kan exempelvis baseras på den generella formen $G = R - S$, där G beskriver gränstillståndets funktion, R beskriver bärförmågan respektive S som beskriver verkande last. Vid bergmekaniska tillämpningar kan det vara svårt att följa upp gränstillstånd likt detta. Till exempel, för spänningsmätningar, kan det snarare vara mer lämpligt att använda ett

deformations- eller töjningsbaserat gränstillstånd av typen *G = tillåten deformation − faktisk deformation*. Något som, till följd av en ökad enkelhet, ofta är att föredra vid dimensionering av gruvpelare.

Den parameter som jämförs med acceptanskriteriet för att utvärdera gränstillståndet benämns tillståndsparameter. Om till exempel gränstillståndet definieras som en tillåten deformation blir tillståndsparametern en förskjutning. Det vill säga, parametern utgör den mätbara storhet som indikerar gränstillståndets definition. Tillståndsparametern är direkt kopplad till problemets indata. Det är därför viktigt att modellens ingående parametrar väljs på ett sådant sätt att det finns en fysisk koppling mellan indatan och tillståndsparametern i utdatan. Exempelvis bestäms en deformation (tillståndsparameter) i bergmekaniska sammanhang av pålastningens förlopp och materialens styvhet (styvhet före och vid plasticering).

Beroende på gränstillståndets formulering så kan denna bestå av en explicit eller implicit funktion. Vid utförandet av exempelvis analytiska beräkningar är gränstillståndet ofta känt genom analytiska uttryck eller ekvationer. Ingående stokastiska variabler kan då användas som direkt indata vid beräkningen av tillståndsparametern. Vid ett implicit gränstillstånd är inte den beskrivande funktionen känd. Ett exempel på detta är i samband med gränstillstånd som ges genom numerisk modellering. En viss uppsättning stokastiska parametrar ansätts som indata och en beräknad deformation (tillståndsparameter) kan erhållas utan att det direkta sambandet mellan in- och utdata kan beskrivas som en enskild funktion. Detta medför ofta en ökad komplexitet i lösningen av problemet exempelvis genom sannolikhetsbaserade lösningsmetoder av gränstillstånd likt Monte Carlo metoder.

Definition av Variabilitet

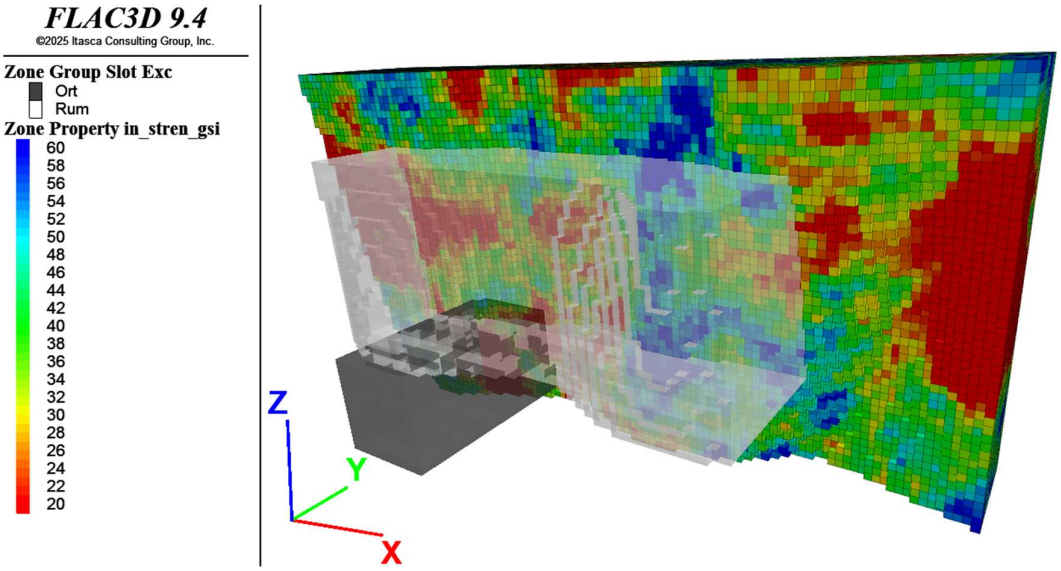
En uppdelning av aktiviteterna i aktivitetsblock tre, definition av variabilitet, visas i *Figur 2-4*.

Figur 2-4. *Nedbrytning av aktivitetsblocket för definition av variabilitet i de två delaktiviteterna härledning av fördelningar samt beskrivningen av den sannolikhetsbaserade modellen.*

Vid bestämning och antagande av indatafördelningar är det viktigt att identifiera korrelationsstrukturen mellan parametrarna. Exempel på beroende parametrar är *RQD* och J_n (Q-systemet) eller den intakta tryckhållfasthet, σ_{ci}, och den intakta styvheten, E_i. En volym av en bergmassa med ett högt *RQD* uppvisar samtidigt sällan ett högt J_n.

Detta eftersom båda parametrarna är relaterade till den relativa sprickfrekvensen. Om parametrarna då förutsätts tillhöra två oberoende (låg-korrelerade) fördelningar kan det leda till orimliga resultat där det vid vidare sannolikhetsbaserad analys kan resultera i analysfall där lågt *RQD* och lågt J_n samtidigt i samma punkt.

Vidare bör en provtagning för egenskaper bör anpassas efter problemets skala. Det är inte bara antalet prover som är viktigt att beakta, även den rumsliga spridningen är av vikt. Att välja 100 prover från en 20 m lång borrkärna kommer osannolikt representera en population som täcker ett område om till exempel 100 x 50 m på ett tillfredsställande sätt. Även för mindre designområden bör korrelationslängden hos provet beaktas. Detta innebär att resultat från ytterligare prover inom ett avstånd motsvarande korrelationslängden, statistiskt, bör följa resultatet hos det närliggande provet. Detta beror på att egenskaper inom en geologisk domän sällan förändras abrupt, utan snarare uppvisar en lokal ”klustring” av relativt höga och låga värden i den geotekniska modellen, se exempel i *Figur 2-5*.



Figur 2-5. *Ett slumpfält som beskriver den rumsliga variationen i egenskaper genererat i en numerisk beräkningsmodell i FLAC3D. I det här fallet för indataparametern GSI.*

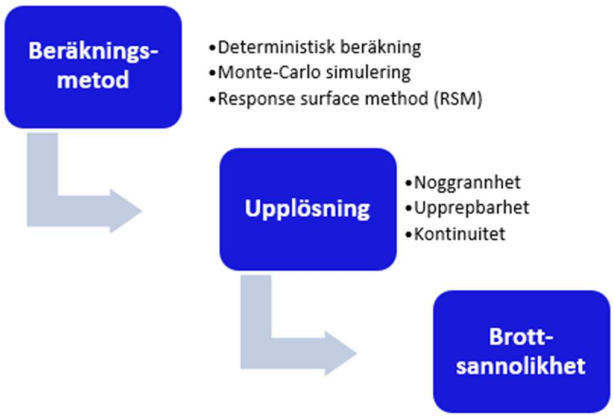
Riskbaserad design

Ett av målen med det fjärde och sista aktivitetsblocket, det riskbaserade designkonceptet, är att kvantifiera sannolikheten för ett specifikt utfall, ofta uttryckt som brottssannolikhet (*PoF*), se *Figur 2-6*.

Värdet av *PoF* kan beräknas genom ett flertal metoder, exempelvis genom analytiska beräkningar, bred simulering genom Monte Carlo-metoder (MCM) eller med mer riktade algoritmer för adaptiv sampling som *Response Surface Methodology* (RSM) eller *Adaptive Directional Importance Sampling* (ADIS). Den mest grundläggande typen av sannolikhetsbaserad beräkningsmodeller är MCMs, där prover slumpmässigt dras från fördelningar som representerar de olika indataparametrarna. Eftersom

samplingen utförs helt slumpmässigt krävs vanligtvis ett stort antal beräkningar för att uppnå en representativ utfallsfördelning. RSM är i stället en iterativ samplingsmetod där initiala resultat nyttjas till att iterativt formulera och precisera en lokal surrogatmodell av utfallen. Denna är lokalt anpassad till området nära det definierade brottgränstillståndet i utfallsrummet och nyttjas för approximering av *PoF*.

Valet av beräkningsmetod behöver baseras på problemets komplexitet, inte minst på formen av gränstillståndets funktion, huruvida den är explicit eller implicit. Implicita tillståndsfunktioner, som i bergmekaniska sammanhang ofta beskrivs genom en numerisk modell, behöver till följd av den tidskostnad lösningen medför tillämpa en mer effektiv lösningsmetodik än vad explicita tillståndsfunktioner fordrar, varför de mer komplicerade riktade algoritmerna då är att föredra. Ramverkets arbetsgång och representativitet är oberoende av metodval för lösning av *PoF*. Oavsett tillämpad beräkningsmetod för *PoF*, är det övergripande målet intakt, att ta fram en representativ beskrivning av möjliga utfall baserat på förekommande variabilitet i indatan.



Figur 2-6. Beskrivning av de delaktiviteter som ingår i aktivitetsblocket för Riskbaserad design där slutprodukten, beräkningen av PoF, erhålls.

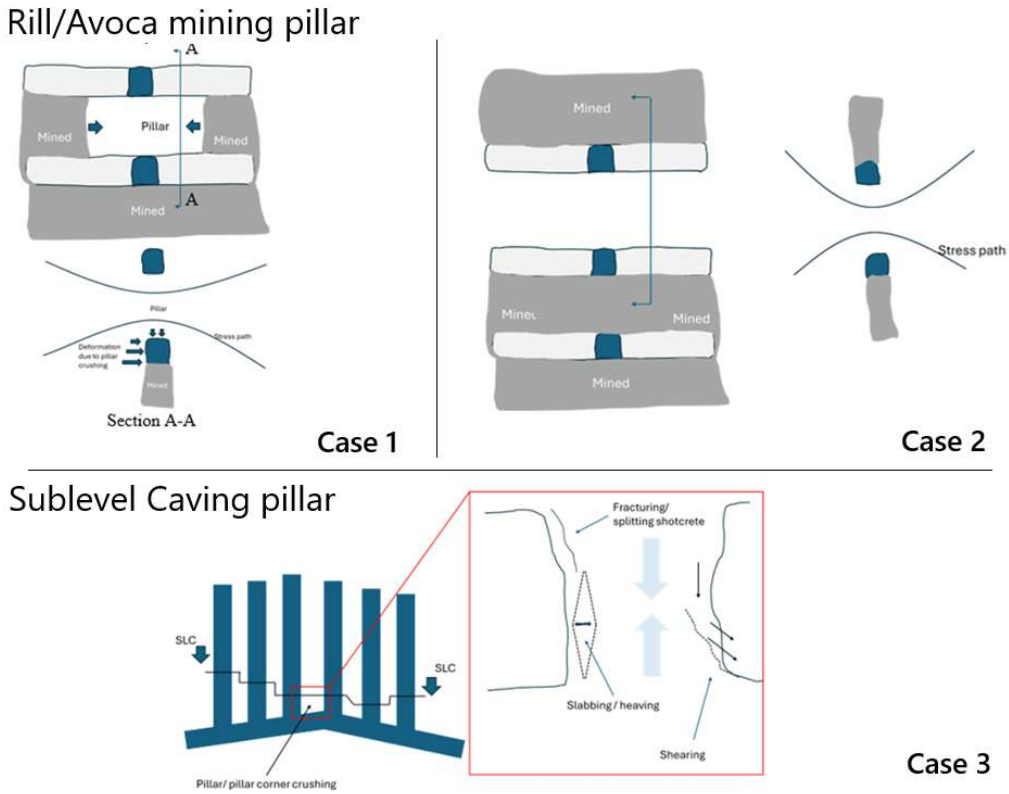
För att säkerställa representativitet måste beräkningsmetodens upplösning ge tillräcklig noggrannhet, upprepbarhet och kontinuitet i resultaten. Aspekterna bör utvärderas innan resultaten accepteras. Krav på noggrannhet och upprepbarhet gäller både sannolikhetsbaserade och deterministiska beräkningar, medan kontinuitet i sampling och resultat endast kan appliceras vid sannolikhetsbaserade beräkningar. Kontinuitet i resultaten innebär att indata som representerar en mer hållfast bergmassa rimligen bör resultera i en större marginal till brott, och omvänt.

3 VALIDERING AV RAMVERKET

3.1 Idealiserade fall

Ramverket utvecklades utifrån flera typiska fall där gruvpelare blir skadade eller går till brott (SLS). Dessa fall idealiserades och användes som en del av valideringen av det framtagna ramverket. För studie av de idealiserade fallen nyttjades numerisk modellering i FLAC3D. De idealiserade fallen har till fördel från tillämpade fall, se avsnitt 3.2, helt kända förutsättningar där randvillkor, laster och materialegenskaper kan kontrolleras fullt ut.

Totalt togs tre idealiserade fall (1-3) fram i samarbete med deltagande industriparter. Fall 1 och 2 baseras på rillpelarbrytning, baserat på hur brytningen utförs i Zinkgruvan respektive Garpenberg. Fall 3 baseras på skivrasbrytning och följer en idealiserad brytningssekvens baserat på brytning i Malmberget. I *Figur 3-1* presenteras en illustration av fallen.



Figur 3-1. Idealiserade fall för validering av ramverket. Fall 1: Rillpelarbrytning där en pelare formas i malmkroppen mot slutet av brytningen på varje nivå med spänningskoncetrationer genom denna som följd. Fall 2: Rillpelarbrytning (uppåtgående) där en mellanskiva mellan två etage utsätts för spänningskoncentrationer vid avslutande brytning på ett etage. Fall 3: Skivrasbrytning där pelarnosar i fältort utsätts för stora och variabla spänningar när rasfronten närmar sig, i slutet av brytningssekvensen för varje nivå.

Valideringen av de idealiserade fallen syftade till att dels, under förutsättning av ideala indatafördelningar, utvärdera olika gränstillstånd (deformations- eller spänningsbaserat), dels validera lösningsmetodiken av *PoF* då RSM tillämpas. För fall 1 och 3 tillämpades deformationsbaserade gränstillstånd, så att sannolikheten att överskrida en viss deformationsnivå, u_{lim}, given av SLS/ULS uppskattades. Fall 2 tillämpade ett spänningsbaserat gränstillstånd, baserat på spänningskvoten $r = \sigma_{1.\text{avg}}/\sigma_{\text{cm}}$ mellan pelarens medelspänning $\sigma_{1.\text{avg}}$ och bergmassans globala tryckhållfasthet σ_{cm}.

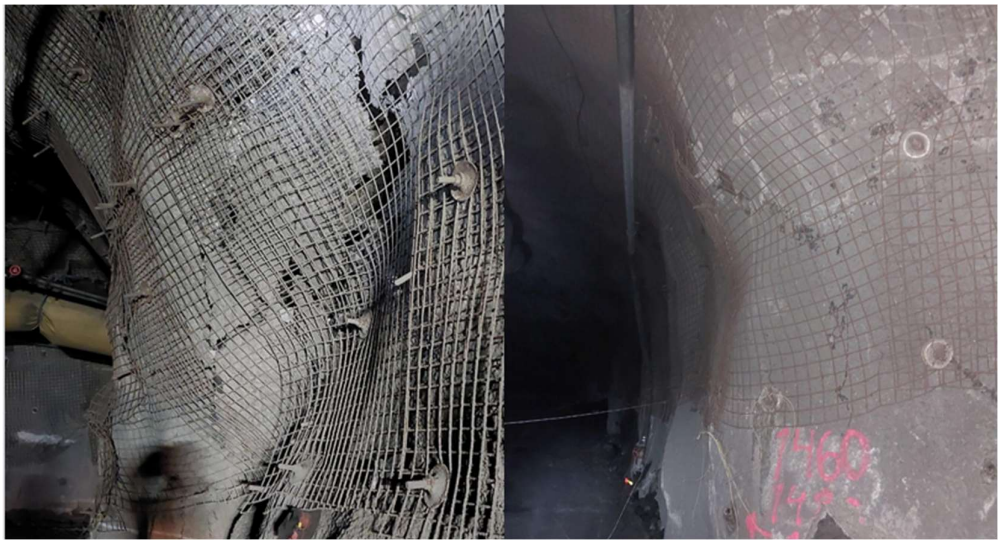
Ramverket kunde genom alla tre idealiserade fall framgångsrikt verifieras. Det kan noteras hur gränstillståndet baserat på en spänningskvot resulterade i en låg konvergenshastighet vid approximation av *PoF* genom RSM.

3.2 Exempel på tillämpning av ramverket

Ramverket applicerades under valideringen på två tillämpade fall, delgivna av deltagande industriparter. Valideringen syftar till att studera huruvida ramverket vid tidpunkten för gruvdesignen hade kunnat förutsäga de ogynnsamma förhållanden som senare dokumenterats. Det ena fallet, pelarskador i fältort vid skivrasbrytning i Malmbergsgruvan, presenteras mer ingående i följande avsnitt.

Beskrivning av fall

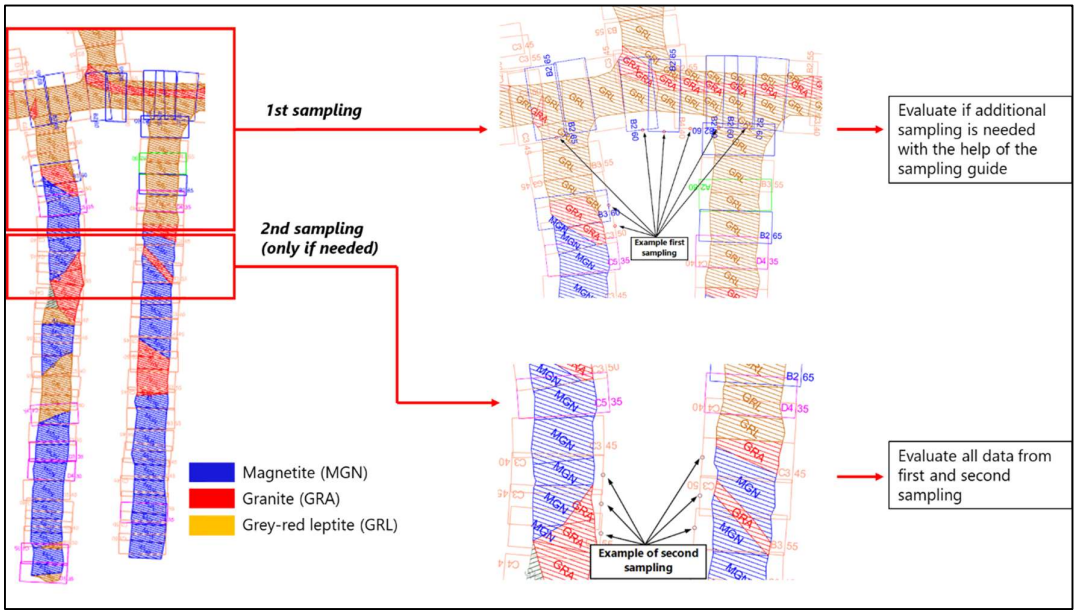
På nivå 980 vid ett av gruvans brytningsområden har skador dokumenterats på pelarspetsar mot fältort. Gruvan bryter genom skivrasbrytning, och när rasfronten närmat sig fältort sker en överbelastning av pelaren till följd av ökad spänningsbelastning med deformation och förstärkningsskador som följd, se *Figur 3-2*.



Figur 3-2. Exempel på skador som dokumenterats i fältort av LKAB. Sprickbildning och släppor har bildats i sprutbetongen till följd av stora deformationer. Sprutbetongen har inte längre har någon förstärkande effekt, de ovanpå installerade bergnäten står för all ytförstärkning.

Statistisk karakterisering av geotekniska egenskaper

För det tillämpade fallet erhölls geologiska data från LKAB bestående av GSI-värden från kartering i tvär- och fältort i området. GSI-data från området utvärderades enligt teorin för små stickprov presenterad i ramverket. GSI utvärderades separat för varje litologi i området: magnetit, granit och leptit, och representativa GSI-värden erhölls som 49, 48 och 47 vid en lägsta konfidensnivå 96.7% (> 95%) och ett precisionsindex p = 1.35 efter den första samplingen. En andra sampling krävdes därför inte då konfidensnivån var tillfredsställande. *Figur 3-3* presenterar hur områdena uppdelats i plan utifrån erhållna karteringsdata.

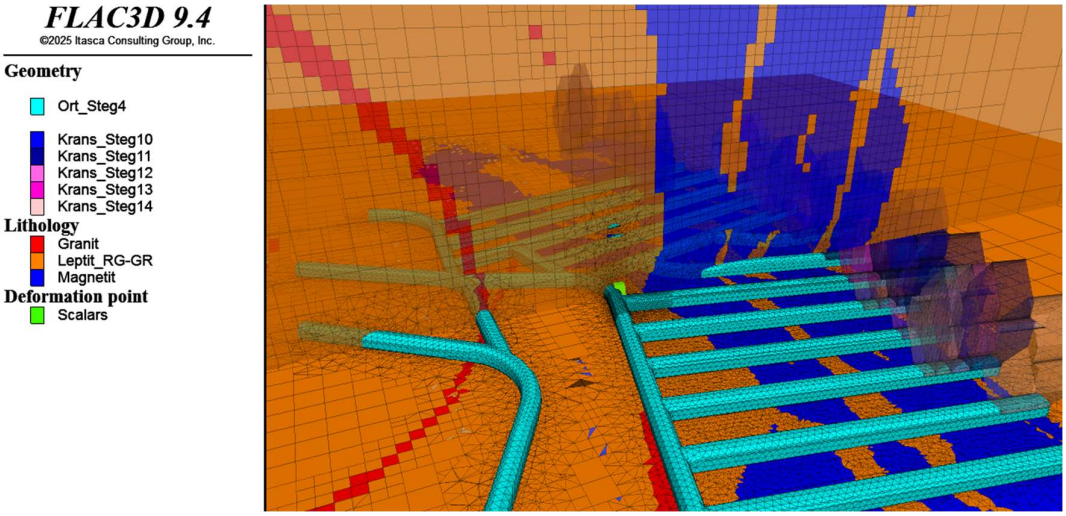


Figur 3-3. Översikt över samplingssprocessen som användes för att bestämma GSI-värden för de litologier (i detta fall granit) som omger pelaren.

Gränstillstånd & Beräkningsmodell

Ett deformationsbaserat gränstillstånd applicerades för fallet där gränstillståndsfunktionen hade formen $G(X_1,X_2,X_3) = g_{lim} - g(X_1,X_2,X_3)$ där X representerar de tre litologiernas GSI-värden som indataparametrar, g, utfallsfunktionen som beskriver deformationen till följd av en viss uppsättning indata och g_{lim} utgör gränsvärdet (i detta fall för SLS).

En numerisk beräkningsmodell ställdes upp i FLAC3D, se *Figur 3-4*, som beskriver utfallet, g, som deformationen i pelarspetsen, till följd av indatauppsättningen X_1, X_2, X_3. Gränstillståndsfunktionen antar således en implicit form och en direkt analytisk lösning av problemet är således inte möjlig. De stokastiska variablerna (X) antogs tillhöra standardnormalfördelningen, vara oberoende och okorrelerade.

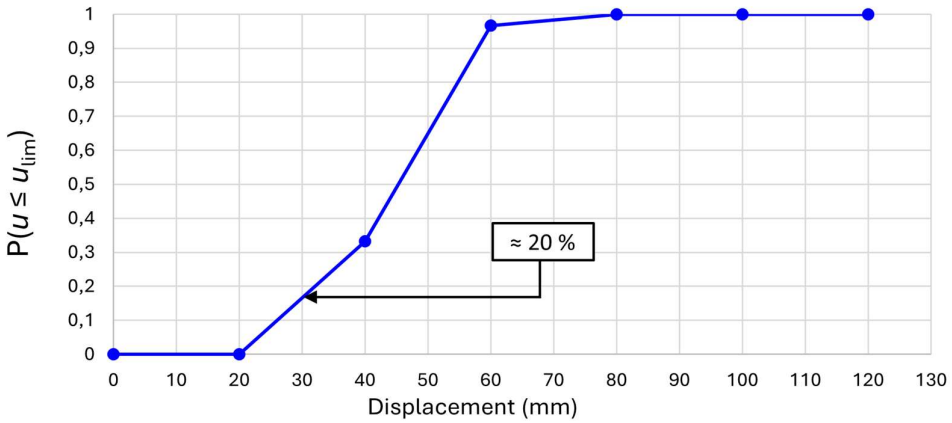


Figur 3-4. *Numerisk beräkningsmodell med förekommande orter och geologiska enheter visualiserade. Punkten där förskjutningen avlästes i bergpelaren har markerats med en grön kub i höjd med den vertikala sektionen.*

Sannolikhetsbaserad beräkning

För lösning av *PoF* nyttjas RSM. Sannolikheten för överskridande av gränstillståndet utvärderades för flera olika värden på g_{lim} som 20-, 40-, 60-, 80-, 100- och 120-mm förskjutning i pelaren (u_y) så att en grov kumulativ fördelningsfunktion (CDF) kunde konstrueras, se *Figur 3-5*.

Då den faktiska deformationen som förekommit vid skadorna, presenterade i *Figur 3-2*, var okänd gjordes en manuell bedömning att förskjutningen var i storleksordningen 30 mm. Den resulterande sannolikheten, *PoF*, att nå en deformation lägre än den uppskattade u_{lim} = 30 mm [P($u \leq 30$ mm)] beräknades genom linjär interpolation till ca. 20 %. Det innebär således att sannolikheten att uppnå en skadlig deformation (SLS) om 30 mm enligt ramverket kan uppskattas till [1 - P($u \leq 30$ mm)] = 1.0 - 0.2 = 80 % under gruvans designskede.



Figur 3-5. *Resulterande CDF härledd utifrån ramverket för det tillämpade fallet i Malmbergsgruvan (utifrån rådande förutsättningar i ett designskede).*

4 SLUSATSER

Det framtagna ramverket har visat sig vara tillämpbart och ge användbara resultat i både de idealiserade och tillämpade fallen.

Vid all validering har responsytemetoden använts för att beräkna sannolikheten för överskridande av de tillämpade gränstillstånden (*PoF*). Metoden är effektiv men komplex. Beroende på omständigheter som antaget gränstillstånd, på förhand uppskattad brottsannolikhet, antalet stokastiska variabler samt indatafördelningar kan andra tillgängliga metoder för beräkning av *PoF* användas, beroende på förutsättningar kan andra metoder bli mer fördelaktiga. Utförandet av Monte Carlo-simuleringar utgör ett mindre teoretiskt angreppssätt samtidigt som en högre flexibilitet erbjuds, men kräver i de flesta fall en utvärdering av ett större antal provpunkter. Detta medför att lösningen av implicita gränstillstånd (som förekommer vid lösning av numeriska modeller) i de flesta fall inte är praktiskt genomförbar. Författarna ser hur det inom branschen föreligger ett behov av utökad kunskap inom sannolikhetsbaserad modellering och dimensionering.

Det föreslagna ramverket ämnar att slutligt producera en beräknad sannolikhet för att uppnå undersökt gränstillstånd (*PoF*). Utanför ramverket bör beräknad *PoF* ligga till grund för dimensioneringsbeslut. Det bör dock påpekas att, med referens till *Figur 1-1*, ett utfall med en sannolikhet för brott som är lägre än toleranströskeln inte alltid kan anses utgöra det mest hållbara alternativet ur en ekonomisk-social synvinkel. Vid riskkostnadsbaserad design kan en optimal lösning med en relativt hög risk vara det mest fördelaktiga alternativet. Anläggningsägarens riskprofil tillhandahåller ett tröskelvärde bortom vilket högriskdesigner förkastas. En optimering efter riskkostnad medför en bättre avvägning mot de faktiska kostnader (förstärkning, pelaravsättning m.fl.) som i många fall är kopplade till en minimering av brottsannolikheten, likväl som kostnader som uppstår i samband med brott (rehabilitering, produktionsbortfall, omförstärkning m.fl.).

Författarna ser sammanfattningsvis hur följande möjligheter till vidareutveckling av ramverket och det sannolikhetsbaserade designflödet finns inom bergbyggande:

- Konceptet riskkostnadsoptimering och dess tillämpningar inom bergbyggande.
- Gruvbolagens riskprofil (vad utgör en största acceptabel risk), hur härleds och definieras denna och hur påverkar det lokala samhällets risknivå riskprofilen.

5 REFERENSER

Fillion, M. H., & Hadjigeorgiou, J. (2013). *Reliability of strength estimates based on limited laboratory data*, in PM Dight (ed.), Slope Stability 2013: Proceedings of the 2013 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 163-176.

Hellberg, J., Edelbro, C. & Spross, J. (2022). *Probablistic design for underground and open pit mines – a pilot study.* Swedish Mining Innovation.