

UPPBLOCKNING, MARKDEFORATIONER OCH INVERKAN AV STRUKTURER VID SKIVRASBRYTNING

CAVING, GROUND SURFACE DEFORMATION AND THE INFLUENCE OF STRUCTURES WHEN MINING BY SUBLEVEL CAVING

Mikael Svartsjaern, Itasca consultants AB

Sebastian Hortberg, Itasca Consultants AB

Jonny Sjöberg, Itasca Consultants AB

Britt-Mari Stöckel, LKAB

Karola Mäkitaavola, LKAB

SAMMANFATTNING

Utvecklingen av uppblockning och tillhörande markdeformationer vid Kirunagruvans hängvägg har stor inverkan både för anläggningsägaren LKAB och det omgivande samhället genom den pågående samhällsomvandling i Kiruna. Med hjälp av nya verktyg och nya kunskaper utvecklas kontinuerligt allt mer avancerade beräkningsmodeller för uppblockning och markdeformationer som en viktig del av planerings- och säkerhetsarbetet kring gruvbrytningen. Ett fokus för de senaste beräkningsmodellerna har varit att undersöka inverkan av indikerade storskaliga strukturer på utvecklingen av markdeformationer. Ett antal strukturer i Kirunagruvans hängvägg har studerats med avseende på hur markdeformationer utvecklas som resultat av samverkan mellan strukturerna och uppblockningen kring gruvan. Två tekniker har använts för att simulera uppblockningsprocessen – Itascas Caving-Algorithm i *FLAC3D* samt en kopplad modell i *FLAC3D-CAVESIM*. Båda modellerna visar att strukturerna har en potentiellt stor inverkan på hur töjningar på markytan utvecklar sig, även på stora (km) avstånd från gruvan. För närvarande är egenskaperna för de storskaliga strukturerna mindre väl kända jämfört med omgivande berg. Beräkningsmodellerna, och resultaten, bör därför betraktas som indikativa och kvalitativa, snarare än kvantitativa. Ett borrarprogram i LKABs räkning pågår för att samla in ytterligare information gällande strukturernas egenskaper. Beräkningsresultaten kan också användas som stöd för kommande prognosarbete för markdeformationer.

Nyckelord: *Gruva, skivras, markdeformationer, numerisk modellering, FLAC3D*

SUMMARY

The development of caving and associated ground surface deformations at the Kiirunavaara mine hangingwall has a large influence both for the mine owner LKAB and the local society through the ongoing urban transformation of the Kiruna city. By applying new tools and knowledge, more advanced calculation models for caving and ground deformations are continuously developed as part of the planning and safety

work associated with the mining. A focus for the latest set of calculation models have been to investigate the effects from indicated large-scale structures on the development of ground surface deformations. A number of structures in the Kiruna mine hangingwall have been studied with respect to ground surface deformation development as a result of interaction between the structures and the caving at the mine. Two techniques were used to simulate the caving processes – the Itasca Caving-Algorithm in *FLAC3D* as well as a coupled model in *FLAC3D-CAVESIM*. Both models show that the structures have a potentially large influence on the straining at the ground surface also at large distances (km) from the mine area. At present, knowledge of the geomechanical parameters of large-scale structure is less comprehensive than for the surrounding rock mass. The calculation models, and the results, should thus be viewed as indicative and qualitative rather than quantitative. A drilling program under the management of LKAB is ongoing which aims to gather more information on the structure properties. The calculation results from this study can be used in the future prognosis works for ground surface deformation.

1 INLEDNING OCH BAKGRUND

Skivrasbrytning leder oundvikligen till uppblockning och markdeformationer, men för närvarande finns inga praktiskt tillämpliga alternativa brytningsmoder för Kiirunavaaras malmkropp. Nuvarande prognos för markdeformationer i Kiruna bygger på en empirisk metod där s.k. gränsvinklar används för att förutsäga utbredningen av markdeformationer som funktion av framtida planerad brytning. Som all empirisk metodik är tillförlitligheten beroende på mängden tidigare observationer och data. Extrapolering utanför befintligt dataunderlag medför betydande osäkerheter. För skivrasbrytning på 1000 m djup eller mer finns inga tidigare erfarenheter från LKAB:s gruvor eller från praktikfall internationellt sett. En kunskapsuppbyggnad kring tänkbar ras- och deformationsutveckling krävs, i syfte att erhålla ett bra underlag för framtida prognoser av markdeformationer.

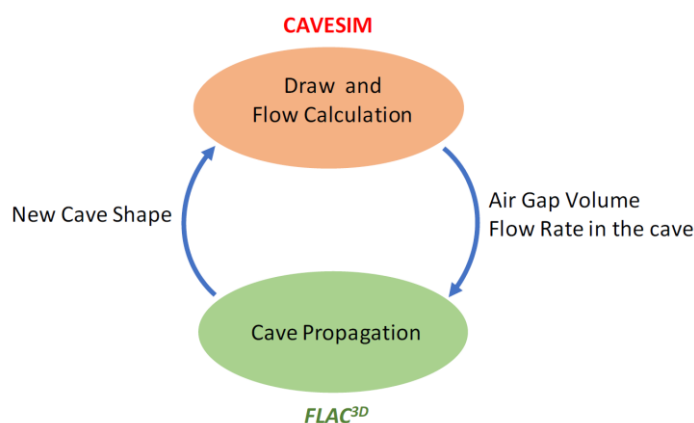
Denna forskningsstudie utnyttjar en ny typ av beräkningsmodell för att simulera uppblockning och rasflöde. Syfte och mål för studien var att belysa vilka storskaliga strukturer som har potentiell stor påverkan på markdeformationer i Kiruna samt att kvantifiera strukturernas principiella beteenden och inverkan på upplockning och markdeformationer. Studien bygger vidare på en tidigare studie baserad på Itascas *Caving-Algorithm* i *FLAC3D* (Itasca, 2016).

2 ANALYSTEKNIK

En ny beräkningsmetod har utvecklats av Itasca i Australien i vilken rasbrytning simuleras i en kopplad modell (Hebert & Sharrock, 2018) bestående av *CAVESIM* och *FLAC3D* (Itasca, 2019). Produktionen simuleras i *CAVESIM* (som är ett program av typen "cellular automata") där material extraheras från raslastningsområdet baserat på ett brytningsschema. Rasflöde från utvunnet tonnage simuleras krans-för-krans och den

resultterande raszonen används för att beräkna interna randvillkor för den omgivande bergmassan simulerad i *FLAC3D* vilket illustreras principiellt i Figur 1. Intakt berg i *FLAC3D* motsvaras av låsta celler i *CAVESIM* medan plasticerat berg (rasberg) i *FLAC3D* motsvaras i *CAVESIM* av fria celler. Metodiken har framgångsrikt tillämpats på ett flertal praktikfall, främst i Australien.

I *FLAC3D* används materialmodellen *IMASS* (Itasca Model for Advanced Strain Softening), vilken ersätter den av Itasca tidigare nyttjade materialmodellen *CaveHoek* (Sjöberg m.fl., 2017) vilken använts i den tidigare *Caving-Algorithm* studien. Båda dessa modeller medger simulering av deformationsmjuknande och sprödhet i material-egenskaper, dilatation, densitetsjusteringar, etc.



Figur 1 Konceptuell illustration av koppling mellan *CAVESIM* och *FLAC3D* för simulering av rasprocessen (från Hebert & Sharrock, 2018).

3 NUMERISK MODELL

3.1 Modellgeometri

FLAC3D-delen av den kopplade modellen består av ett strukturerat "oct-tree" nät uppbyggt av sexsidiga zoner ordnade som kuber. Modellen har dimensionerna 10.5 x 6.5 x 1.8 km där 1.8 km är djupet från nivå 0 m avv. Grundmodellen innehåller fem storskaliga strukturer, malmkropp och uppdelning hängvägg och liggvägg. Runt malmen definierades också en volym (kontaktvolym) med lägre hållfasthet som följer malmkroppen ner till nivå 700 m avv. Volymens bredd i öst-västlig riktning är ca 500 m. Modellens upplösning på hängväggens markyta är 30 m inom ett avstånd på 3 km från dagbrottet.

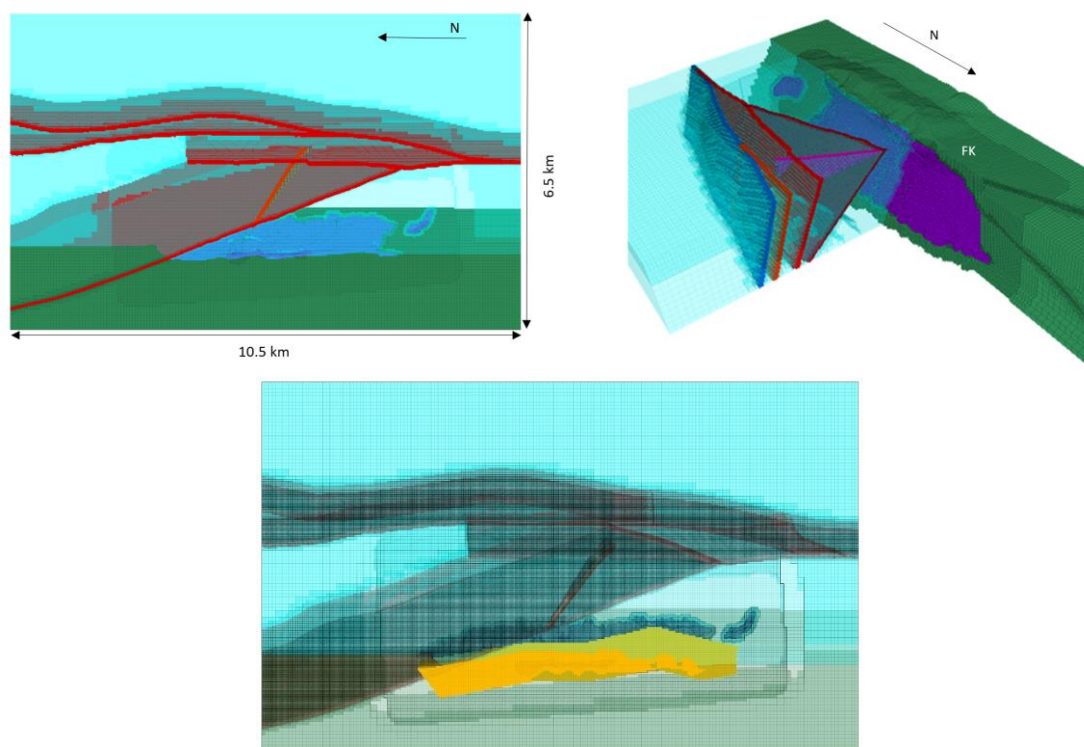
3.2 Malmgeometri

För både *FLAC3D* och *CAVESIM* delen av modellen användes faktisk malmbild enligt definition från LKAB. Ingen variation i halter inkluderades, och alla geometrier inom malmmodellen antogs motsvaras av samma elastiska och plastiska egenskaper samt ha enhetlig densitet (4600 kg/m³).

3.3 Produktion och brytningssekvenser

Malmbrytningen i den kopplade modellen utfördes enligt principen krans-för-krans. Hela underjordsgruvans livslängd beaktades ner till brytning på nivå 1365m avv. Faktiska produktionsdata med lastat tonnage för 1997 t.o.m. 2018 användes. För brytning innan 1997 men nedanför nivå 400 m avv. uppskattades kransar och tonnage från medelkranstonnage och malmgeometri med en krans täckande 10 m^2 per nivå i enlighet med tidigare brytningsmodeller. För nivå 250 t.o.m. 400 m avv. har motsvarande krans-täthet (1 krans på 10 m^2 per nivå) använts men tonnaget per nivå har viktats nedåt som en del av uppblockningskalibreringen. För produktion för år 2019 t.o.m. brytning av nivå 1365 m avv. har kranspositioner uppskattats (då faktiska data ej fanns tillgängliga vid simuleringen) genom att kopiera ovanliggande skiva och anpassa längden på tvärortarna mot ligg- och hängväggsavslutning av malmkroppen. För prognosberäkningar sattes tonnaget till 6000 t/krans (genomsnittligt totalt lastat per krans 2017–2018) för framtida kransar.

Produktionskransar grupperades i halvårsperioder. För nivåer brutna innan 1997 bröts nivåerna från norr mot söder, för åren 1997–2018 gjordes uttag enligt dokumenterad brytning och för 2019 framåt börs malmen blockvis (per 100 m) enligt LKAB:s långtidsplan. Varje krans bröts för sig i *CAVESIM* med datautbyte med *FLAC3D* en gång per halvår enligt gruppering.



Figur 2 Modellöversikt från ovan (topp vänster) och isometrisk vy med halva hängväggen utsläckt för tydlighet (topp höger) samt med kontaktvolym (botten vänster).

3.4 Initialspänningar och randvillkor

De initialspänningar som använts för den kopplade modellen baseras på Sandström (2003), tryckspänningar definieras som negativa och z anges i gruvans koordinatsystem med negativt tecken. Följande spänningsprofiler har använts

$$\sigma_H = 1.85 + 0.037 * z \quad (1)$$

$$\sigma_h = 1.40 + 0.028 * z \quad (2)$$

$$\sigma_v = 1.45 + 0.029 * z \quad (3)$$

där:

σ_H = största horisontalspänningen i MPa, orienterad öst-väst (längst y-axeln i modellens koordinatsystem, vinkelrätt mot malmen),

σ_h = minsta horisontalspänningen i MPa, orienterad nord-syd (längst y-axeln i modellens koordinatsystem, parallellt med malmen),

σ_v = vertikalspänning i MPa,

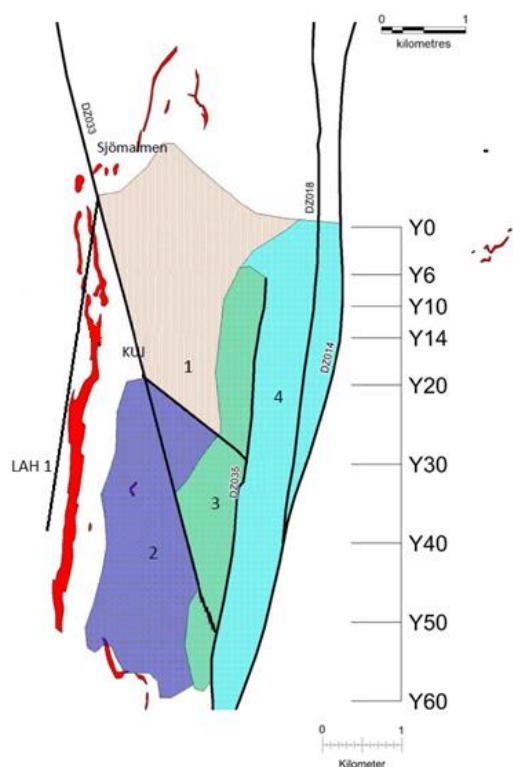
z = djup i gruvans koordinatsystem (ökar med djupet).

För toppen av Kiirunavaara (liggväggskrönet) och den övriga markyta som ligger ovanför nivå 215 m avv. har enbart gravitativa spänningar ansatts. Avvikelsen vid 1000 m djup (referensdjup i Sandström, 2003) är ca 10 % för σ_H respektive σ_h och ca 30 % för σ_v . Vid initial jämviktskörning kommer dock σ_v att anta en gravitativ spänning beroende av densiteten i ovanliggande material (malm eller gråberg). Utöver detta är gravitation inkluderat i modellen samt att modellen har rullstöd i sidorna samt botten. Markytan är simulerad som en fri yta.

3.5 Strukturer och geologiska enheter

Ett antal storskaliga strukturer (DZ-strukturer) bedömdes initialt ha potential att styra bergmassans beteende inom Kiirunavaaras påverkansområde. En katalog med deformationszoner har tidigare upprättats av Mattsson (2017). Från katalogen valdes fem strukturer ut, se Figur 3, vilka bedömdes ha sådana egenskaper att de borde tas med i beräkningsmodellen. Utöver dessa strukturer studerades även en spröd struktur (LAH 1) vilken inte ingår i Mattsson (2017) katalogen. Bergmassan i liggväggen modellerades som syenit-porfyr och hängväggen som kvartsporfyr. Malmen modellerades som homogen magnetit.

De storskaliga strukturerna i Figur 3, med undantag av LAH1, modellerades som duktila strukturer med en definierad mäktighet genom ansättning av materialparametrar avvikande från omgivande berg. LAH1 simulerades som två explicita plan motsvarande spröda strukturer med, i sammanhanget, obefintlig mäktighet.



Figur 3 Storskaliga strukturer anpassade från Mattsson, 2017 med tillägg av LAH samt förkortning av DZ012 med ny terminering mot DZ033 (Andersson, 2018).

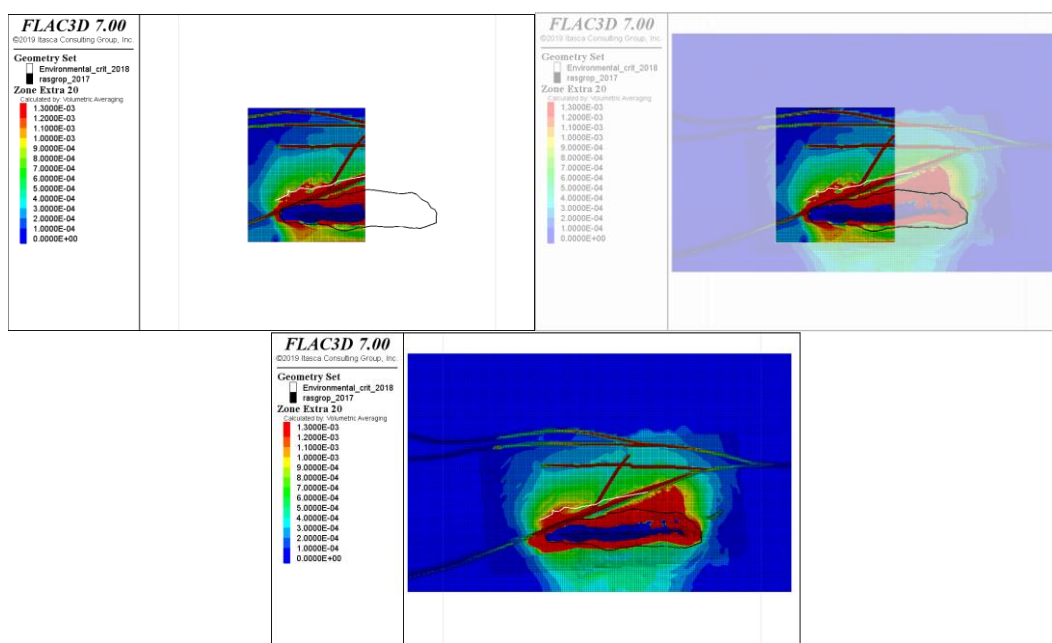
4 KALIBRERING OCH UTVÄRDERINGSKRITERIER

Följande kriterier har använts vid tolkning och kalibrering av modellresultaten:

- En zon som rört sig vertikalt 1 m eller mer är en del av den uppblockade volymen och tillhör "gropen" d.v.s. ligger innanför raskanten för det expanderade dagbrottet.
- En zon som rört sig 1 m horisontellt mot väster (på hängvägg) alternativt 1 m åt öster (på liggvägg) är en del av den uppblockade volymen och tillhör "gropen".
- En zon som rört sig 1 m horisontellt mot söder vid sjömalmens nordspets är en del av den uppblockade volymen och tillhör "gropen".

Modellkalibrering av den kopplade modellen mot historisk brytning utfördes från nivå 250 m avv. och t.o.m. brytning för år 2018. Modellkalibrering gjordes i ett utklipp ur fullskalemodellen innehållande enbart gruvan norr om Y30, se Figur 4. Modellen grovkalibrerades mot gropkantsbildning på hängväggen vid Sjömalmens, ingen hänsyn togs till beteenden vid modellens södra rand eller på liggväggen bortom gropkanten. Efter kalibrering av den urklippta modellen fördes materialegenskaperna över till full-

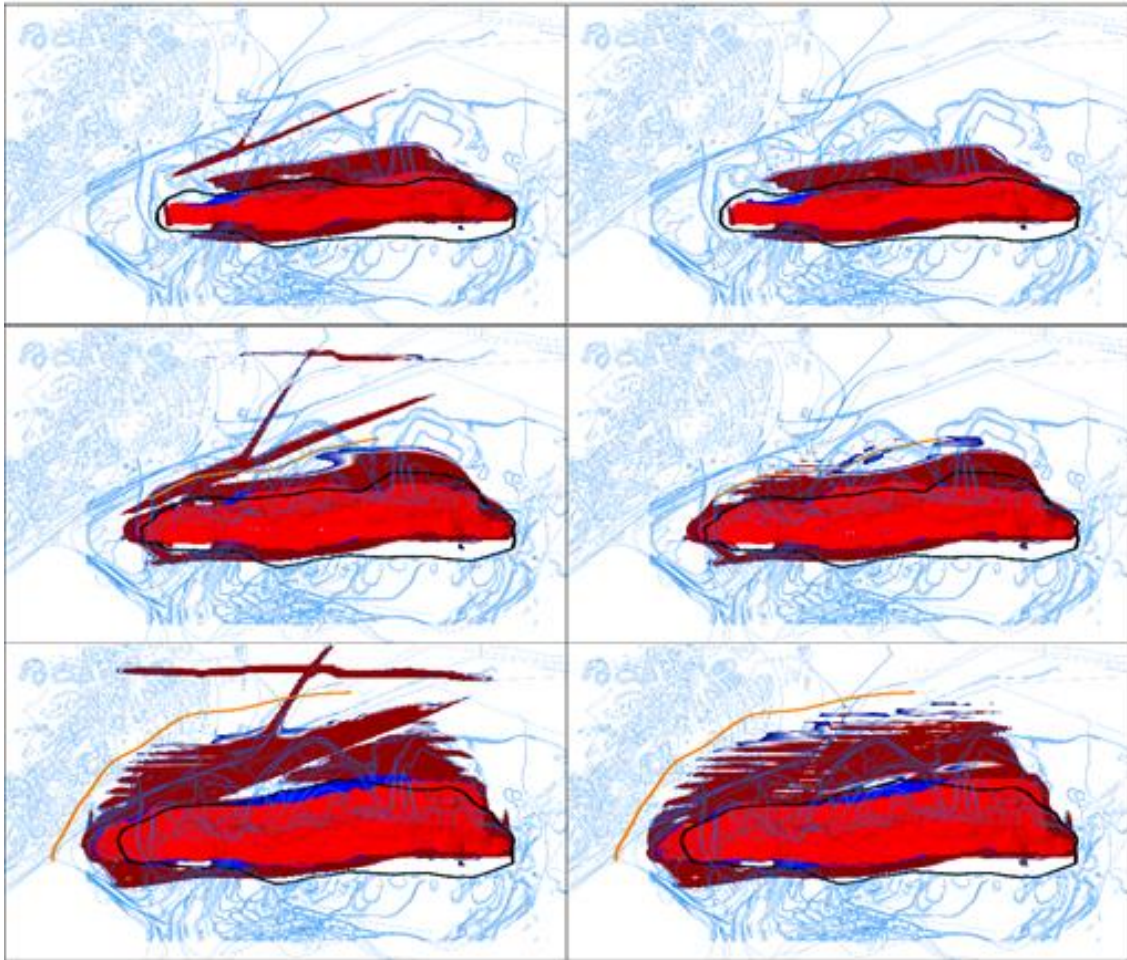
skalemodellen. Tillvägagångssättet ansågs vara lyckat eftersom fullskalemodellen uppvisade motsvarande beteenden kring Sjömalmen som den mindre modellen.



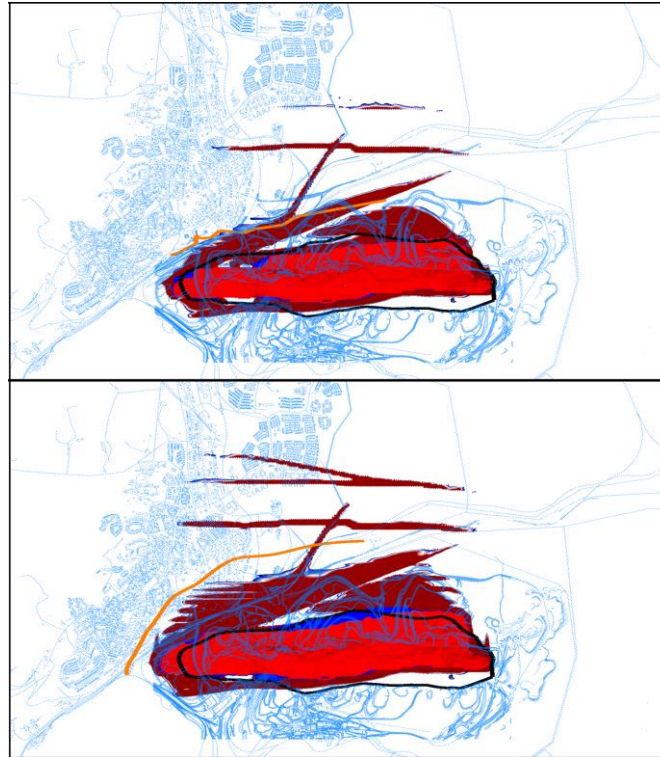
Figur 4 Princip för kalibrering i småskalig modell utskuren ur fullskalemodellen.

5 RESULTAT

Inverkan från duktila strukturer studerades genom att definiera DZ-strukturerna med en lägre styvhet än omgivande berg genom att ansätta ett lägre värde på *GSI*. I Figur 5 visas den simulerade utvecklingen av marktöjningar mellan år 1996 och år 2028 i från kopplade modellen. I den vänstra kolumnen har storskaliga strukturer inkluderats medan den högra kolumnen visar modell utan storskaliga strukturer. I modellen med strukturer sker signifikant påverkan på ett större avstånd från gruvbrytningen än i den homogena modellen. Detta blir allt tydligare med ökande brytningsdjup vilket illustreras i Figur 6 där gruvans miljögränsvillkor överskrider i de simulerade DZ-strukturerna på ett betydligt större avstånd från prognoslinjen år 2028 än för år 2020. Detta resultat indikeras också i de tidigare modellerna baserade på *Caving-Algorithm* i *FLAC3D* utan koppling till *CAVESIM*, jämför Figur 6 och Figur 7.



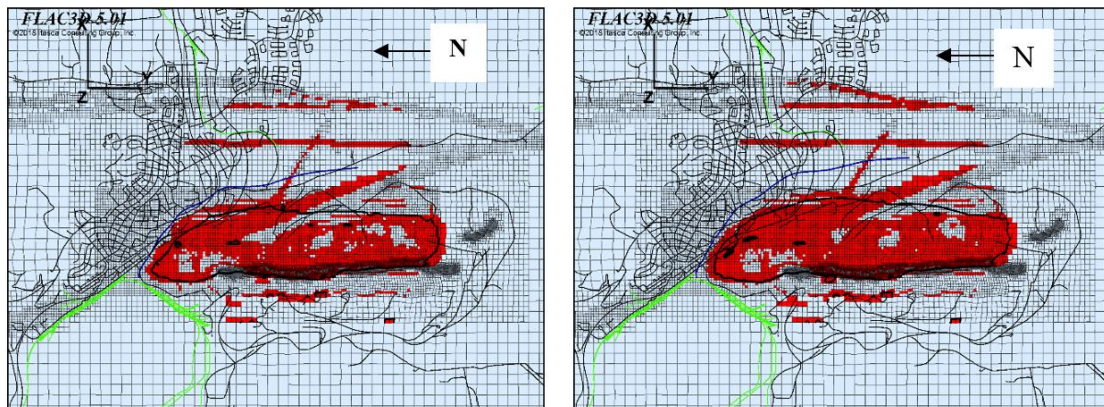
Figur 5 Utveckling av marktöjningar med duktila strukturer (t.v.) och utan uppspruckna strukturer (t.h.) för år 1996, 2008, samt 2028. Rött område visar rasgrop i modell, brunt område visar var miljögränsvillkoret överskridits, gul linje visar gränsen för miljövillkoret in situ (eller gällande prognos för sådan för 2028), svart linje visar rasgrop in situ.



Figur 6 Överskridning av miljögränsvillkoret i duktila strukturer på avstånd från den kontinuerliga deformationszonen vid brytning motsvarande år 2020 (övre) och 2028 (nedre) beräknad med kopplad *FLAC3D-CAVESIM* modell.

2023

2028



Figur 7 Överskridning av miljögränsvillkor i duktila strukturer på avstånd från den kontinuerliga deformationszonen vid brytning motsvarande år 2023 (vänster) och 2028 (höger) beräknad med *Caving-Algorithm* i *FLAC3D*.

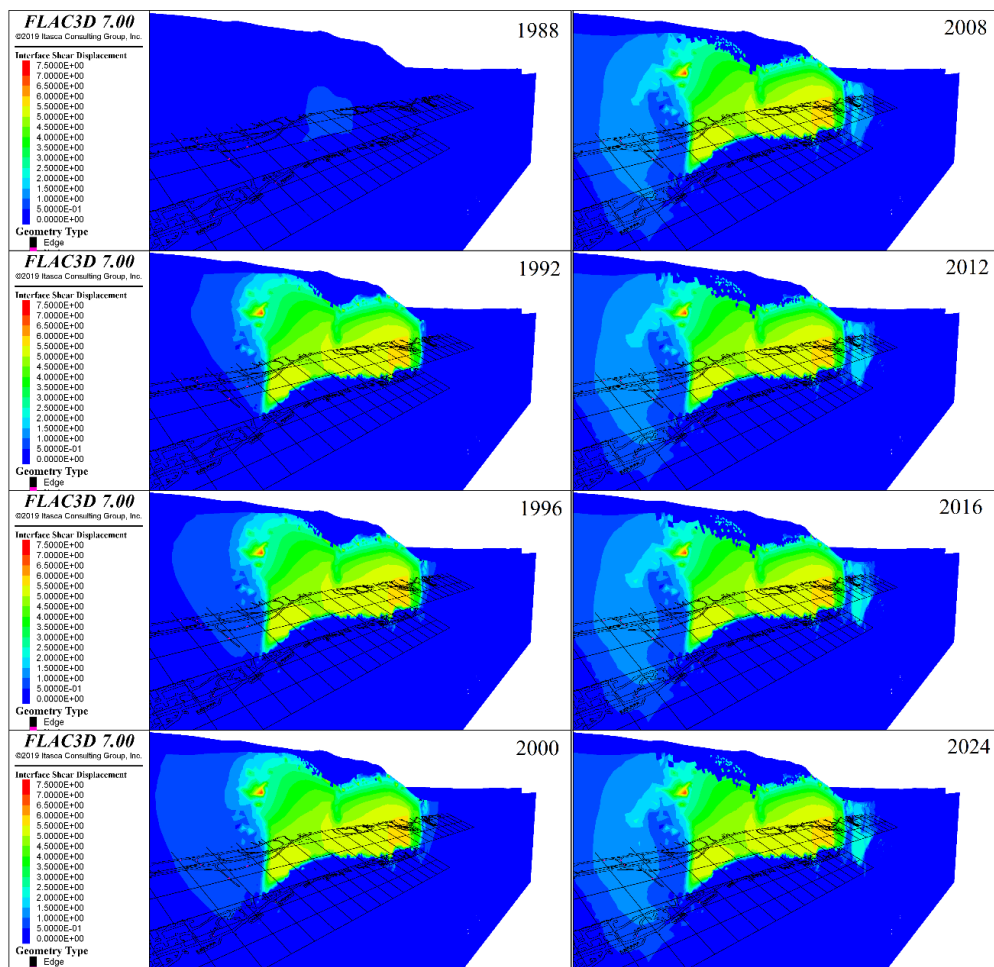
Att rörelser koncentreras i de storskaliga strukturerna påverkar enbart i låg grad det gruvnära där miljögränsvillkoret tidigare uppfyllts. Enbart för de framtida brytningsstegen efter 2023 börjar en tydlig skillnad framkomma mellan modellerna med och utan storskaliga strukturer. I modellen utan strukturer utvecklas uppfyllelsen av miljögränsvillkoret för huvudmalmen tidigare vilket innebär att området där miljögränsvillkoret överskrids blir större för denna modell med en allt mer markant skillnad med ökande brytningsdjup. I Sjömalmsområdet är modellbeteendet likartat för de två beräkningsfallen (med och utan strukturer).

Inverkan från spröda strukturer i den kopplade modellen har specifikt studerats för LAH 1 (se Figur 3). I bergmassan har LAH 1 tolkats som en zon med tätliggande strukturer med likartad riktning hellre än ett enskilt plan från markytan och ner mot djupet. I modellen har dock LAH 1 simulerats som två explicita plan med ett inbördes avstånd av 200 m. Det östliga av de två planen sammanfaller med koordinater för observation av LAH 1 på nivåerna 320 och 509 m avv.

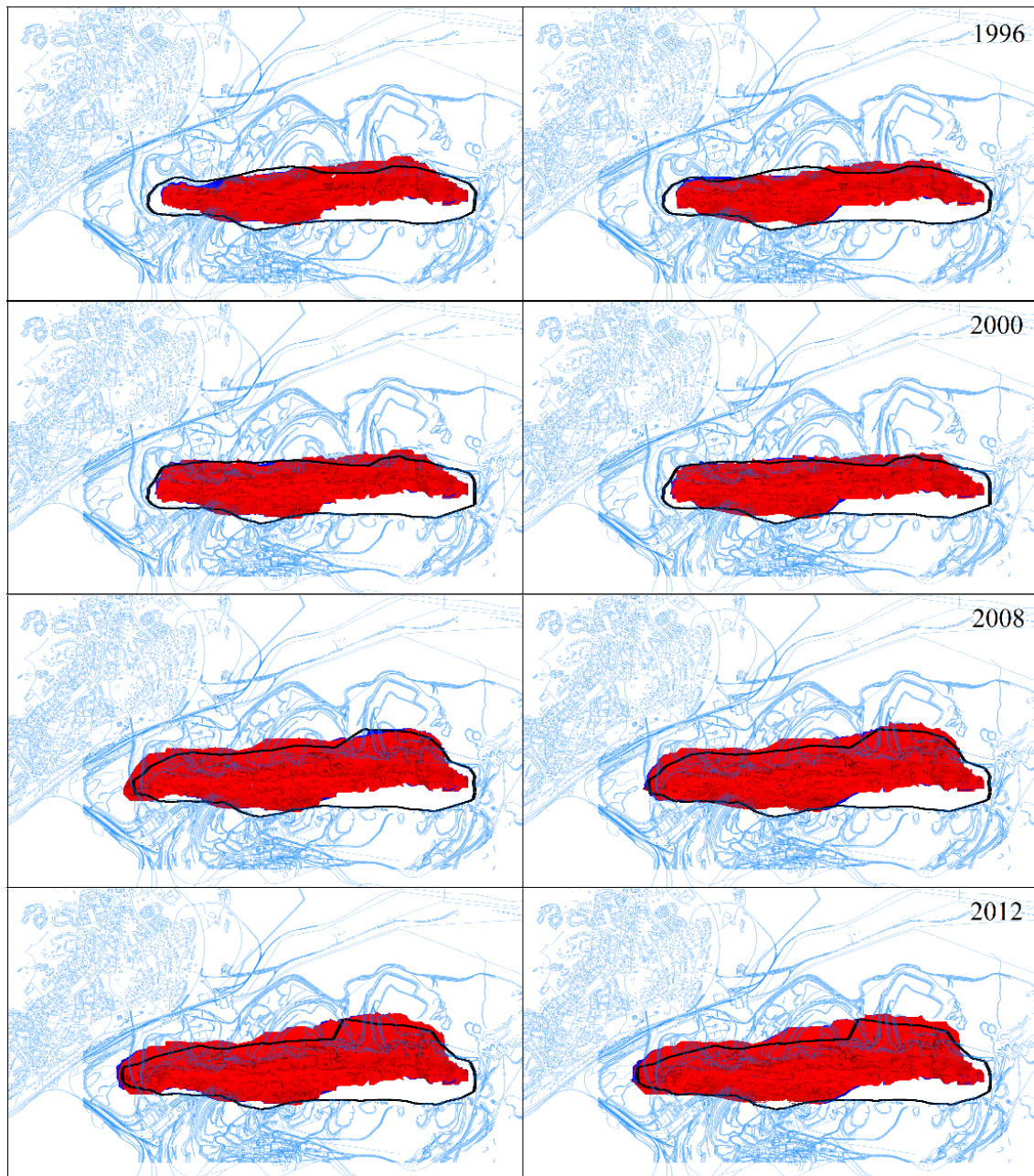
En avvikande modell från övriga beräkningsfall har använts för att undersöka potentiell inverkan från LAH 1. Modellgeometrin motsvarar den för övriga beräkningsfall men med avsteget att tetraeder-element använts vid modelluppbyggnad istället för Hexaeder-element som i övriga modeller för att underlätta diskretisering längs strukturplanen. Upplösningen på modellen var också lägre än för övriga beräkningsfall och inga duktila zoner inkluderades i modellen. Strukturplanets egenskaper motsvarar allmänna sprickplans egenskaper i Kiruna från Malmgren & Nordlund (2008).

Aktivering (glidning) längs strukturplanen sker främst i det östra planet med initiering vid 1988 års brytningsnivå. Glidningen ökar signifikant vid 1992 års nivå och därefter betydligt långsammare fram till 2008 års nivå då ett nytt glidområde börjar ta form längre norrut. Det nya glidningsområdet utökas långsamt mot djupet fram till simuleringens slut vid 2024 års brytning, se Figur 8.

Som framgår av Figur 9 är påverkan ovan jord från inkludering av LAH 1 i modellen försumbar utan principiell inverkan på hängväggen. Rasgropskanten utveckling på liggväggen påverkas lokalt men från ett storskaligt perspektiv är skillnaden mellan simulering med eller utan LAH 1 är begränsad. Den potentiella inverkan från LAH 1 är också begränsad till lokal påverkan underjord.



Figur 8 Aktivering (glidande områden) längs östra LAH 1 planet, referensnivåer 320 och 509 m avv. Vy från syd-öst (södra hängväggen).



Figur 9 Modellerad utveckling av rasgropen (rött) jämfört med faktisk utveckling (svart linje) för modell utan LAH 1 (vänster) samt med LAH 1 (höger).

6 DISKUSSION

Totalt fem storskaliga duktila strukturer inkluderades i denna forskningsstudie. Dessa storskaliga strukturer har visats ge mycket likartad påverkan på markdeformationer för två modeller med olika angreppssätt (kontinuum modell med *Caving-Algorithm* samt kopplad kontinuum-diskontinuum modell med *CAVESIM*). Detta tyder på att resultaten är känsligare för strukturernas egenskaper och geometri än beräkningsmetodiken.

Strukturerna har simulerats med antagna egenskaper i form av två extremfall: (i) svaga och mjuka strukturer i jämförelse med omgivande berg samt (ii) med motsvarande egenskaper som omgivande berg. De faktiska egenskaperna för strukturerna, eller dessas relativa styvhet och hållfasthet gentemot omgivande berg, är idag okända. Att bestämma, eller i vart fall bättre uppskatta, strukturegenskaperna blir därför en mycket viktig del för framtida prognosarbeten. LKAB bedriver för närvarande ett borrhållsprogram för att samla in ytterligare information gällande strukturernas egenskaper.

Analyserna indikerar att en gruvnära spröd struktur i liggväggen (LAH 1) har låg inverkan på groputbredningen inom gruvans industriområde även om relativt stora deformationer sker i strukturen. Aktivering av strukturen i den kopplade modellen under jord sammanfaller med områden och djup där strukturen indikerats som plan skärande gruvans infrastruktur.

7 SLUTSATSER

Ett antal strukturer i Kirunagruvans hängvägg har studerats med avseende på hur markdeformationer potentiellt kan utvecklas som resultat av samverkan mellan strukturerna och uppblockningen kring gruvan. Fem duktila strukturer och en spröd struktur har inkluderats i beräkningsmodellerna och dessas potentiella inverkan på deformationsutvecklingen har undersökts. Från denna forskningsstudie kan följande slutsatser dras:

- Storskaliga duktila strukturer lokaliserade i Kirunagruvans hängvägg kan potentiellt påverka markdeformationer signifikant även på stora avstånd från gruvområdet.
 - Hur signifikant påverkan blir är beroende av strukturernas egenskaper; strukturernas existens och lokalisering är baserade på lineament-analys och "borrhålsskärningar med högre sprickfrekvens" men de specifika egenskaperna har inte bestämts.
 - Strukturernas potentiella inverkan är okänslig med avseende på modelleringsteknik (kopplad modell alternativt *Caving-Algorithm*).
- Den potentiella inverkan på markdeformationerna från den storskaliga spröda strukturen tolkad från underjordsdata i Kirunagruvans liggvägg (LAH) bedöms vara liten.

ERKÄNNANDE OCH TACK

Vi vill rikta ett stort tack till LKAB som medgivit publicering och presentation av detta arbete.

REFERERADE ARBETEN

Andersson, U. 2018. Personlig kommunikation: epost 2018-12-04

Hebert, Y & Sharrock, G 2018. 'Three-dimensional simulation of cave initiation, propagation and surface subsidence using a coupled finite difference–cellular automata solution', In **Proceedings of the Fourth International Symposium on Block and Sublevel Caving, Y Potvin & J Jakubec (eds)**, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 151-166, https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1815_09_Hebert

Itasca. 2016. **FLAC3D version 5.0**, Minneapolis, USA

Itasca. 2019. **FLAC3D version 7.0**, Minneapolis, USA

Malmgren, L., Nordlund, E. 2008. **Interaction of shotcrete with rock and rock bolts – a numerical study**. *International journal of rock mechanics & mining sciences* 45, 538-553

Mattson, H. 2017 *Kommentarer utvalda deformationszoner*. Internt PM till LKAB från GeoVista 2017-06-05.

Sandström, D 2003, *Analysis of the Virgin State of Stress at the Kiirunavaara Mine*, Licentiatavhandling 2003:02, Luleå Tekniska Universitet, Sverige. ISSN:1402-1757

Sjöberg, J., Perman, F., Lope Álvarez, D., Stöckel, B-M., Mäkitaavola, K., Storvall, E., Lavoie, T. 2017. 'Deep sublevel cave mining and surface influence'. **I Deep Mining 2017: Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining – J Wesseloo (ed.)**. ss. 357-372. ACG, Perth, ISBN 978-0-9924810-6-3.