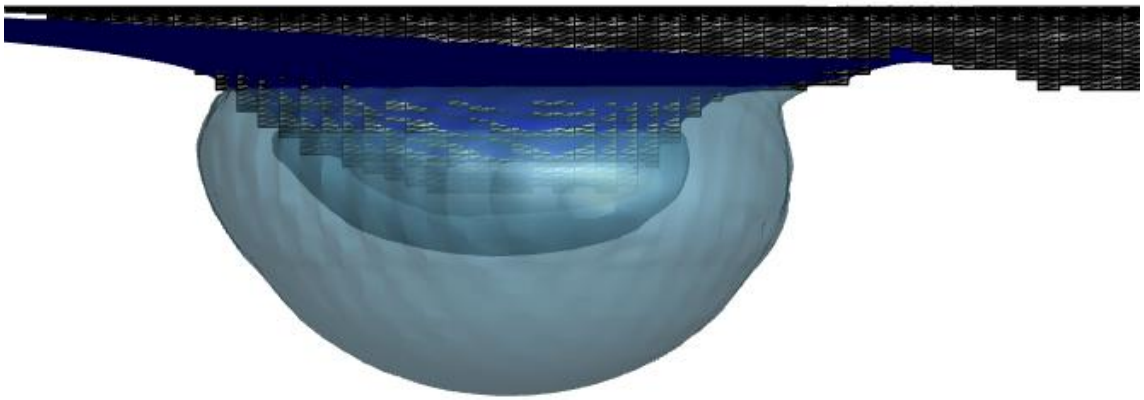
Geosyntec Consultants AB
Magnus Ladulåsgatan 63B, 7tr.
SE-118 27 Stockholm

PM Hydrogeologi

Bearbetningskoncession Tapuli K nr 4



2025-12-19

Framställd för:
Kaunis Iron AB
Bengt-Ove Johanssons väg 8
984 91 Pajala

Projektnummer: SE2500775

Innehållsförteckning

1. INLEDNING 1
1.1 Syfte 1
1.2 Bakgrund 1
2. METODIK 2
2.1 Underlagsmaterial 2
2.2 Beräkningsmodell 4
2.2.1 Beräkningsscenarier 5
3. HYDROGEOLOGISK SYSTEMBESKRIVNING 6
3.1 Topografi och markanvändning 6
3.2 Meteorologi och hydrologi 7
3.3 Vattenförekomster och vattendrag 8
3.4 Geologi 8
3.5 Hydrogeologi 9
3.5.1 Grundvattenbildning 9
3.5.2 Hydrolitologiska enheter 9
3.6 Tillståndsgiven och ansökt gruvverksamhet 12
4. BESKRIVNING AV FLÖDESMODELL 18
4.1 Modelluppbyggnad 18
4.1.1 Geologisk representation 19
4.2 Kalibrering 21
5. BERÄKNINGSRESULTAT 24
5.1 Prognostisering av påverkan 24
5.1.1 Påverkansområde i jord och berg 24
5.1.2 Påverkan på ytvattensystemet 25
5.1.3 Grundvattenberoende objekt 26
5.2 Inflöde till dagbrott 26
5.3 Efterbehandling 27
5.4 Nollalternativ 28
6. SLUTSATSER 30
7. REFERENSER 31

Tabellförteckning

No table of figures entries found.

Figurförteckning

Figur 1. Undersökningspunkter i jord och berg inom verksamhetsområdet för Tapuligruvan samt omgivande fyndigheter. 3
Figur 2. Lägen för borrhål där hydrogeologiska undersökningar utförts av Pöyry (TPL07-, 08- och 09-serierna), Itasca (TPL19-serien) and SRK (SRK_GT-serien). Observera att dagbrottsformen för Tapuli central i figuren är den ursprungligt planerade och inte dess nuvarande form. 4
Figur 3. Det hydrologiska systemet med namngivna vattendrag omkring Tapuligruvan tillsammans med topografiska kännetecken..... 6
Figur 4. Månadsvärden för medelnederbörd (vintermånader – blå, sommarmånader – röd) för normalperioden 1991-2020, beräknad avrinning för perioden 2010-2023 samt månadsmedelvärden för uppmätt länshållningsflöde från Tapuligruvan under perioden 2020-2023. 7
Figur 5. Överst visas poldiagram över karterade (vänster) och modellerade (höger) sprickor där varje punkt representerar en sprickas strykning (trend) och stupning (plunge). Nederst visas medelstrykning för alla öppna sprickor och lägen för de borrhål som ingått i spricknätsverksanalysen..... 11
Figur 6. Uppmätt länshållningsflöde vid Tapuligruvan och modellerad avrinning och nederbörd från SMHI:s SHYPE-modell. 13
Figur 7. Uppmätta grundvattentrycknivåer i jord under perioden 2011-2025. Lufttemperaturen (streckad linje) samplottas på högeraxeln för att illustrera säsongsvariationen i systemet. 14
Figur 8. Tolkad grundvattenyta norr och väster om dagbrotten baserat på uppmätt medelgrundvattennivå i jord under 2024. 14
Figur 9. Uppmätta grundvattentrycknivåer i berg under perioden 2011-2025..... 15
Figur 10 Tolkade grundvattentrycknivåer norr och väster om dagbrotten baserat på uppmätt medelgrundvattentrycknivå i berg under 2024. 16
Figur 11. Jämförelse mellan tolkad grundvattensänkning för tredje kvartalet 2024 enligt bolagets årsredovisning och prognosticerat påverkansområde inom ramen för mål nr 2090-19. 17
Figur 12. Modellområdet med beräkningsnät och inkluderade ytvattendrag markerade i mörkblått. 18
Figur 13. Kalibrerad hydraulisk konduktivitet för modellens översta 250 m i bergmassan som omger dagbrotten. I figuren representerar P1 förstapercentilen, P50 medianen och P99 99-percentilen av fördelningen av hydraulisk konduktivitet hos celler på det givna djupet. 20
Figur 14. Simulerade grundvattennivåer och residual i jord för kalibreringsscenariot. 21
Figur 15. Simulerade grundvattentrycknivåer i berg och residual per mätpunkt för kalibreringsscenariot. 22

Figur 16. Jämförelse mellan nytt beräknat påverkansområde för referensscenariot och tidigare framtaget påverkansområde i mål nr M 2090-19. 23
Figur 17. Beräknat påverkansområde för Tapuli K nr 4, beräknat som 0,3 m avsänkning av grundvattenytan jämfört med referensscenariot (vilket motsvarar nollalternativet vid fullt utbrutna dagbrott). 24
Figur 18. Punkter i omgivande ytvattendrag som använts för att kvantifiera flödespåverkan och deras avrinningsområden. 25
Figur 19. Grundvatteninflöde i dagbrotten, Tapuli centrala (A), norra (B) och K nr 4 (C), i procent per djupintervall för tre olika studerade scenarier, nuläge, referenssituationen respektive framtida fullt utbrutna dagbrott. Notera att nettonederbörden över dagbrotten inte inkluderats i de ovan angivna grundvatteninflödena. 27
Figur 20. Gräns för område med minst 0,3 m höjning av grundvattenytan i jämförelse med referensscenariot (blå linje). Dagbrotten är numrerade från norr till söder med 1 till 5. 28
Figur 21. Gräns för område med minst 0,3 m höjning av grundvattenytan för nollalternativet i jämförelse med referensscenariot (blå linje). 29

Bilageförteckning

BILAGA 1 FORMELL BESKRIVNING GEOAN

BILAGA 2 BESKRIVNING AV DFN-MODELL

1. Inledning

Kaunis Iron AB (KIAB eller Bolaget) är ett helägt dotterbolag till Kaunis Holding AB som har bedrivit gruvverksamhet vid Tapuligruvan i Kaunisvaara sedan 2018. KIAB avser att ansöka om bearbetningskoncession enligt minerallagen (1991:45) hos Bergsstaten för brytning av järnmalm vid Tapuligruvan inom koncessionsområdet Tapuli K nr 4. Koncessionsområdet är drygt 30 ha stort och är beläget i direkt anslutning till den gruvverksamhet som Bolaget i dagsläget bedriver vid Tapuligruvan i form av dagbrottsbrytning av järnmalm. Koncessionsområdet är beläget inom gällande markanvisning samt i allt väsentligt inom Bolagets verksamhetsområde för gruvverksamheten vid Tapuligruvan.

1.1 Syfte

Föreliggande PM beskriver hydrogeologiska förutsättningar för och bedömd påverkan på grundvattenförhållandena från planerad gruvbrytning inom Tapuli K nr 4. PM:an är framtagen med syfte att utgöra underlag för miljökonsekvensbedömning inom ramen för ansökan om bearbetningskoncession. Centrala frågeställningar för denna bedömning är hur stort blir inflödet till det planerade dagbrottet och hur stor blir påverkan på grundvattennivåer i jord och berg i gruvans omgivning till följd av det tillkommande dagbrottet.

1.2 Bakgrund

KIAB:s verksamhet bedrivs med stöd av Mark- och miljödomstolen vid Umeå tingsrätt i deldom meddelat tillstånd med verkställighetsförordnande, av den 1 december 2022 (mål nr M 2090-19). Dagbrotten är i dagsläget ca 214 m (centrala) och 90 m (norra) djupa och länshålls genom pumpning av inströmmande vatten från dagbrottsbotten. Den grundvatteninströmning som sker till dagbrotten ger upphov till en sänkning av grundvattentrycknivån i omgivande jord- och berg. Avsänkningen följs upp inom ramen för verksamhetens kontrollprogram som är kopplat till miljötillståndet och har visats väl hålla sig inom de prognoser av uppkommen påverkan som utfördes för tillståndsansökan. Inom ramen för tillståndsprövningen och under tidigare driftsperioder vid gruvan har omfattande hydrogeologiskt fält- och utredningsarbete utförts. Dessa utredningar tillsammans med uppföljningen av pågående verksamhet inom kontrollprogrammet har nyttjats som underlag för denna studie.

2. Metodik

Utredningsmetodiken för föreliggande studie följer fyra principiella steg; ett inläsningssteg med upprättande av en hydrogeologisk systembeskrivning (konceptuell modell), ett modelleringssteg där den konceptuella modellen förs över till en matematisk beräkningsmodell, ett prognossteg där framtidsscenarier definieras och studeras i den upprättade beräkningsmodellen samt slutligen ett bedömningssteg där beräkningsresultatet analyseras, redovisas och underlag för bedömning av påverkan på grundvattenberoende objekt tas fram.

2.1 Underlagsmaterial

Följande arkivmaterial och källor för öppna data har använts:

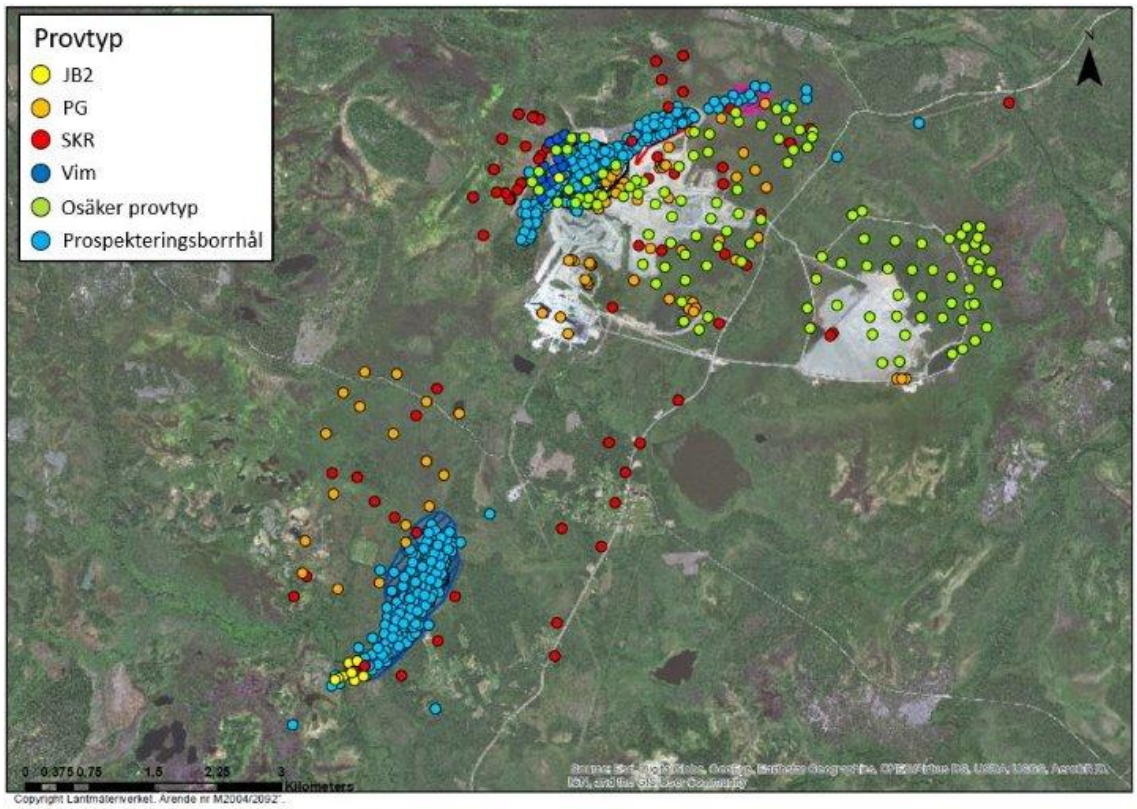
- SMHI öppna meteorologiska data (nederbörd och lufttemperatur),
- SMHI Vattenwebb och S-HYPE modell för avrinningsberäkning,
- SGU:s öppna kartvisare för jordarter 1:25 000-1:100 000, jorddjup, berggrund 1:50 000-1:250 000, brunnar, grundvattenmagasin,
- Vatteninformationssystem Sverige (VISS) databas över grundvatten- och vattenförekomster,
- Lantmäteriets högupplösta topografiska modell, grid 1x1 m över studieområdet.

En stor mängd platsspecifika data har inkluderats i studien, däribland:

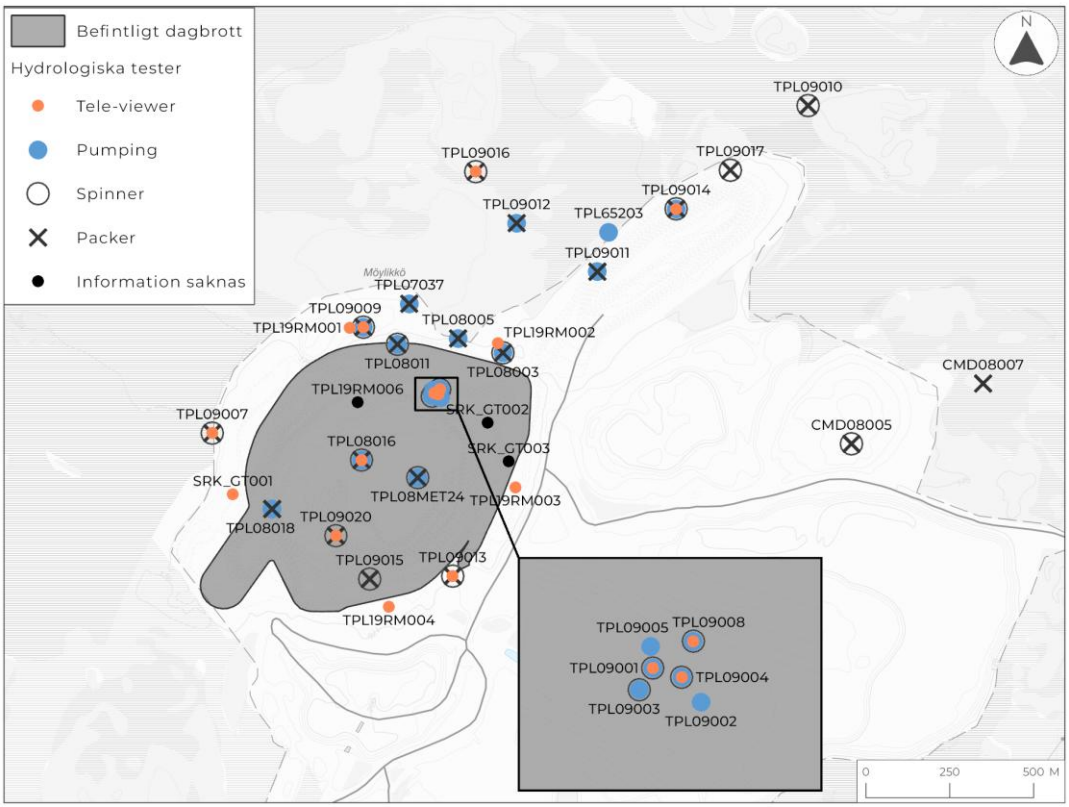
- Uppmätta grundvattentrycknivåer i jord och berg inom ramen för kontrollprogram för befintlig verksamhet, period 2011-2025,
- Uppmätt länshållningsflöde från de två aktiva dagbrotten, period 2019-2025,
- Karterade öppna och vattenförande sprickor i dagbrottsväggen (centrala brottet) observerade vid platsbesök 2024-05-16,
- PM Hydrogeologi för ansökan om miljötillstånd mål nr M 2090-19, med underrapporter,
- Undersökningar utförda av Pöyry 2007–2009 före påbörjad gruvverksamhet:
  - Kärnborrning och kärnkartering i exploateringsborrhål,
  - Poldiagram från ATV-loggning av borrhål,
  - Hydrauliska tester inklusive packertest, spinner-loggning, provpumpning, interferenstest,
- Undersökningar utförda av Itasca 2019:
  - Kärnborrning och kärnkartering i fem borrhål,
  - OTV-loggning av sprickor i fem borrhål,
- Undersökningar utförda av SRK 2021/2022:
  - Kärnborrning och kärnkartering i ett borrhål
  - OTV-loggning av sprickor i två borrhål
- Undersökningar utförda av Geosyntec 2023:
  - Provpumpning i bergbrunnar vid Sahavaara
- Leapfrog 3D-modell tillgänglig via KIAB:

- Geologisk modell med karterade litologiska enheter,
- Strukturmodell med förkastnings- och svaghetszoner,
- Dagbrottsmodell för nuläge (2024),
- 3D modeller av framtida fullt utbrutna dagbrott.

I Figur 1 redovisas en sammanställning av utförda undersökningsborrningar i jord och berg för Tapuligruvan och i Figur 2 redovisas lägen för borrhål i berg där olika typer av hydrogeologiska undersökningar utförts.



Figur 1. Undersökningspunkter i jord och berg inom verksamhetsområdet för Tapuligruvan samt omgivande fyndigheter.



Figur 2. Lägen för borrhål där hydrogeologiska undersökningar utförts av Pöyry (TPL07-, 08- och 09-serierna), Itasca (TPL19-serien) and SRK (SRK_GT-serien). Observera att dagbrottsformen för Tapuli central i figuren är den ursprungligt planerade och inte dess nuvarande form.

2.2 Beräkningsmodell

För att representera det hydrogeologiska systemet och kunna utföra prediktioner har en tredimensionell beräkningsmodell byggts upp baserat på den konceptuella förståelsen för området. Modellen har upprättats i programkoden GEOAN (Holmén, 2024), som presenteras i mer detalj i Bilaga 1. Simuleringarna inkluderar både mättat grundvattenflöde (Darcys lag), omättat flöde och ytvattenflöde. Modellen har ställts upp för stationära förhållanden vilket innebär att den representerar medelsituationen under ett år.

Vid brytning i dagbrott uppstår ett inflöde av grundvatten från omgivande jordlager och berggrund. Storleken på inflödet beror av flera faktorer, till exempel den ursprungliga grundvattennivån, jordlagrens och berggrundens genomsläpplighet, nettonederbörd, ytvattenavrinning och dagbrottets djup och utbredning.

Dagbrottet kommer att länshållas genom pumpning. Länshållning medför generellt en påverkan på omgivande grund- och ytvattensystem genom att en avsänkning av grundvattentrycknivåerna sker i jord och berg i anslutning till gruvan. Detta kan i sin tur även påverkan vattenföring och vattenstånd i vattendrag.

2.2.1 Beräkningsscenarier

I beräkningsmodellen har fem scenarier studerats:

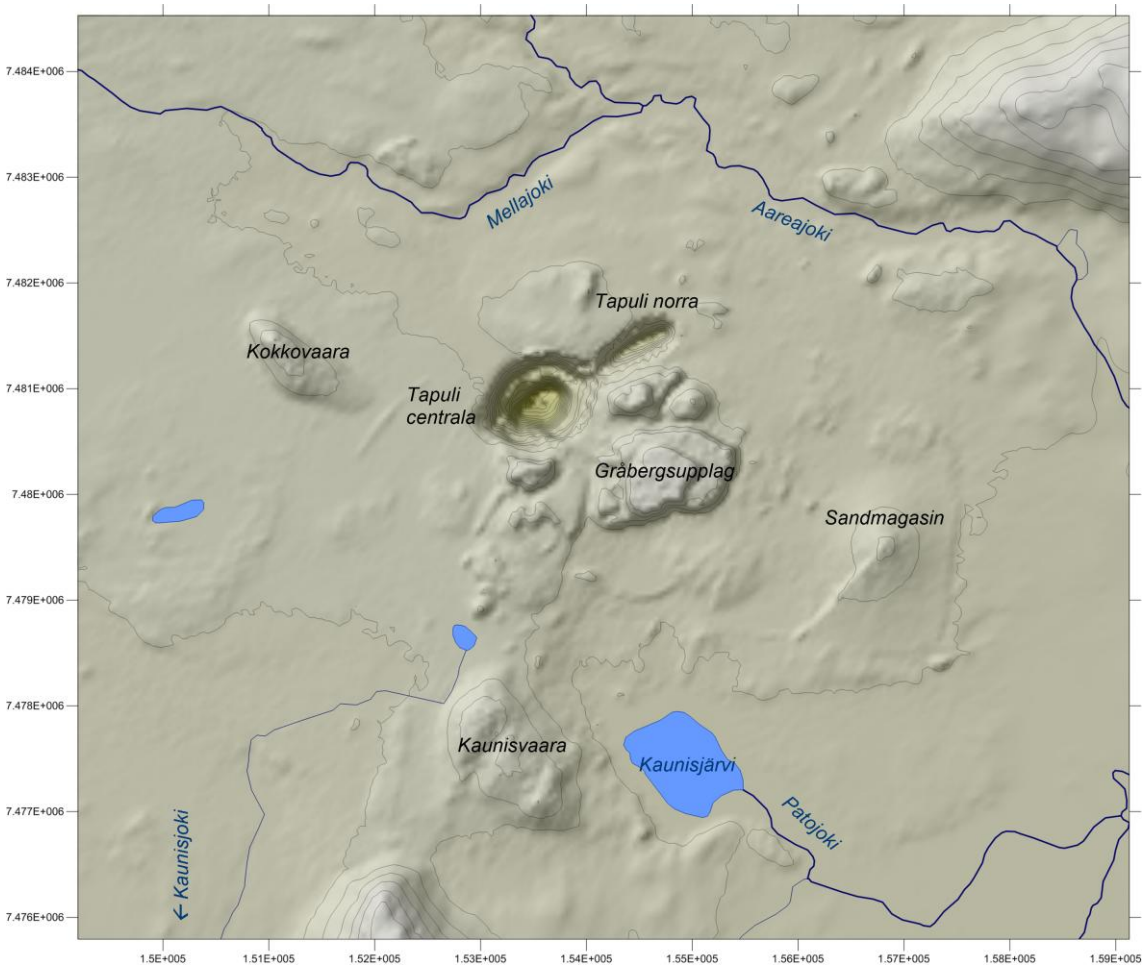
1. Kalibreringsscenario. Som kalibreringsscenario har förhållanden rådande 2024 använts, det innebär att modellen kalibrerats för dagbrottens storlek år 2024, uppmätt länshållningsflöde år 2024 samt uppmätta grundvattennivåer för år 2024.
2. Referensscenario, vilket är det scenario mot vilket påverkan bedöms. Referensscenariot definieras som nuläge plus tillståndsgiven verksamhet i form av fullt utbrutna befintliga dagbrott (centrala och norra) och de planerade Palotieva och Sahavaara i enlighet med nu ansökt miljötillstånd (mål M 2090-19).
3. Ett framtida scenario med fullt utbrutet dagbrott inom Tapuli K nr 4 och inklusive fullt utbrutna nu tillståndsgivna dagbrott (centrala och norra).
4. Ett framtida scenario med fullt utbrutna 5 dagbrott där efterbehandling utförts och dagbrotten återfyllts med vatten.
5. Ett framtida scenario för nollalternativet, det vill säga om Tapuli K nr 4 ej utförs och tillståndsgivna 4 dagbrott är fullt utbrutna och återfyllda med vatten.

3. Hydrogeologisk systembeskrivning

I detta kapitel beskrivs upprättad platsspecifik hydrogeologisk konceptuell modell med fokus på meteorologiska, geologiska, hydrologiska och hydrogeologiska förhållanden.

3.1 Topografi och markanvändning

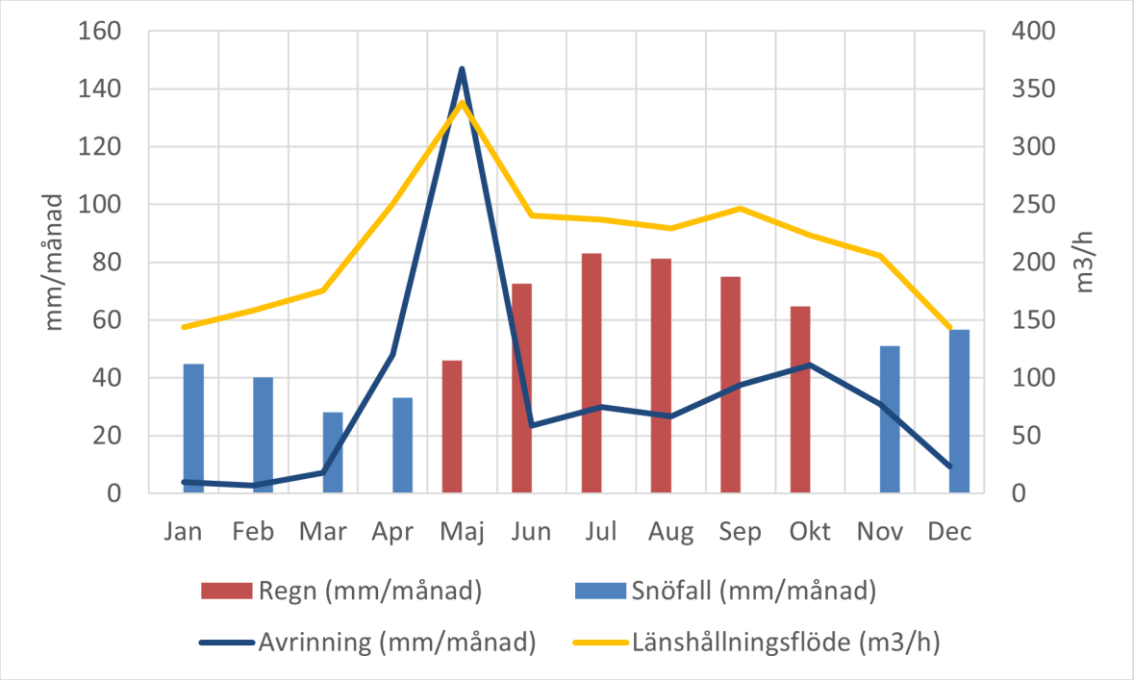
Området runt Tapuligruvan karaktäriseras av ett vidsträckt och flackt myrlandskap med enstaka skogbeklädda höjder insprängda, som t.ex. Sahavaara och Kaunisvaara. Markytan sluttar flack åt öster och sydost följandes bäckarna Kaunisjoki och Mellajoki-Aareajoki. Nuvarande gruvområde är ca 7,5 km² stort och utgörs av industriområde med anrikningsverket, gråbergsupplag, processvattendamm och sandmagasin. De två existerande dagbrotten utgör tydliga topografiska lågpunkter. Tre till fem kilometer söder om gruvområdet ligger byarna Kaunisvaara och Sahavaara som omfattar gles bebyggelse och jordbruksmark. Omgivande skogar utgörs till stor del av produktionsskog, delvis på utdikad våtmark.



Figur 3. Det hydrologiska systemet med namngivna vattendrag omkring Tapuligruvan tillsammans med topografiska kännetecken.

3.2 Meteorologi och hydrologi

Klimatet i regionen är subarktisk med en årsmedeltemperatur under 10°C och vinterförhållanden rådande från november till april. Årsmedelnederbörden har beräknats till 648 mm (SMHI 2024) för senaste normalperioden 1991-2020. Nederbördens variation över året redovisas i Figur 4.



Figur 4. Månadsvärden för medelnederbörd (vintermånader – blå, sommarmånader – röd) för normalperioden 1991-2020, beräknad avrinning för perioden 2010-2023 samt månadsmedelvärden för uppmätt länshållningsflöde från Tapuligruvan under perioden 2020-2023.

Det hydrologiska året kännetecknas av medelhöga till höga flöden under hösten. När vintern kommer och marken (och vattendragen) fryser minskar grundvattenbildning och avrinning. Årets lägsta flöde inträffar vanligtvis under slutet av vintermånaderna, mars–april, precis innan snösmältningen. Årets högsta flöde sker under snösmältningen i slutet av april eller maj. Därefter minskar avrinningen och grundvattennivåerna under sommarmånaderna till en säsongsmässig lågpunkt omkring augusti. Under hösten sker vanligtvis en ökning av avrinningen på grund av lägre temperaturer och minskad evapotranspiration.

Den mängd vatten som är tillgänglig för att bilda grundvatten och ytvatten är lika med nederbörd minus evapotranspiration och kallas även nettonederbörd. De meteorologiska förutsättningarna medför att evapotranspirationen i området är låg och nettonederbörden stor. I större skala, till exempel sett över ett större avrinningsområde, motsvaras nettonederbörden av avrinningen. Den bästa tillgängliga uppskattningen av nettonederbörden i området är SMHI:s vattenbalansmodell, SHYPE. Nettonederbörden för den senaste normalperioden (1991–2020) har beräknats till 372 mm/år (SMHI 2024) för Mellajoki avrinningsområde. Eftersom nederbörden lagras som snö under vintermånaderna måste även denna lagring

beaktas. Den genomsnittliga årliga variationen i nettonederbörd med hänsyn till snölagring visas i Figur 4, tillsammans med nederbörd och länshållningsflöde från Tapuligruvan.

3.3 Vattenförekomster och vattendrag

Myrområdena som omger Tapuligruvan avvattnas via två bäcksystem, Kaunisjoki och Mellajoki-Aareajoki. Kaunisjoki passerar gruvområdet i en båge sydväst, söder och öster om dagbrotten på ca 5 km avstånd och avvattnar ett relativt stort avrinningsområde uppströms västerut. Mellajoki avvattnar myrområdena nordväst om dagbrotten och ansluter till Aareajoki som rinner i en bana ca 2 km norr om gruvområdet. Aareajoki mynnar i Kaunisjoki öster om sandmagasinet och fortsätter sedan vidare och rinner ut i Muonio älv 14 km österut.

En dryg kilometer söder om gruvområdet ligger sjön Kaunisjärvi som avvattnas via bäcken Patojoki till Kaunisjoki sydost om gruvområdet.

3.4 Geologi

Jord

Jordtäcket utgörs av kvartära avlagringar som bildats under den senaste (eller tidigare) istiden, främst morän som täcker bergöverytan. I lågt belägna områden, till exempel i våtmarkerna, täcks moränen av torv. Längs bäckdalar förekommer glacifluviala och fluviala avlagringar som är sorterade och grova, vilket innebär att de har högre hydraulisk konduktivitet än moränen. Det genomsnittliga jorddjupet är 9 meter, men upp till 20 meter har observerats. Moränen har karaktäriserats som en siltig sandig morän med linser av sand eller silt. Torvens mäktighet är 1–4 meter och den har låg kompakthetsgrad nära ytan men ökande med djupet. Detta ger torven en vertikal anisotropi i hydrauliska egenskaper, med hög horisontell genomsläpplighet och låg vertikal genomsläpplighet (Golder 2019).

Berg

Berggrunden i Kaunisvaara-området består av metasedimentära bergarter och tillhör en geologisk enhet kallad Lapplands grönstensbälte. Tapulimalmen är belägen i den regionala deformationszonen Pajala/Kolari skjuvzon. Pajala-Kolarizonen sträcker sig minst 150 km i nordost-sydvästlig riktning och är upp till 50 km bred. Zonen är känd för att innehålla flera järnmalmsförekomster. Bergartssekvensen i Tapuliförekomsten har en nordostlig orientering, i linje med Pajala-Kolarizonens strykning, och stupar ungefär 50–60° mot nordväst. Den består av tre huvudsakliga litologiska enheter: fyllit och marmor i liggväggen (sydost); skarn (järnmalm); samt fyllit och kvartsit i hängväggen (nordväst). Kontakten mellan skarnen och fyllit/kvartsiten har observerats vara en svaghetszon och är kraftigt uppsprucken samt innehåller leromvandlingar (KIAB 2024). Flera lokala förkastningszoner har karterats som skär sekvensen mer eller mindre vinkelrätt mot huvudriktningen (SRK 2022).

3.5 Hydrogeologi

3.5.1 Grundvattenbildning

Den mängd vatten som är tillgänglig för grundvattenbildning, den potentiella grundvattenbildningen, kan för ett större område ofta sättas lika med nettonederbörden. Den verkliga grundvattenbildningen styrs av de meteorologiska förutsättningarna, det hydrologiska systemet och infiltrationskapaciteten hos markytan. Ett kännetecken för subarktiska system är att hela snösmältningsflödet inte är tillgängligt för grundvattenbildning. Periodvis överskrider smältvattenflödet markens infiltrationskapacitet och så länge marken är frusen kommer det mesta av smältvattnet att rinna ovanpå marken till närmaste vattendrag och aldrig nå grundvattensystemet. Men även med detta i åtanke sker en ökad grundvattenbildning i systemet under snösmältningen, särskilt lokalt nära eller i dagbrotten. Av detta följer att ett värde på nettonederbörden som bättre representerar den genomsnittliga grundvattensituationen är lägre än den höga avrinningen som inkluderar snösmältningen (372 mm enligt SMHI). För att ta hänsyn till detta har vi i denna studie använt ett representativt värde för nettonederbörden på 300 mm/år.

3.5.2 Hydrolitologiska enheter

I området förekommer grundvatten i jord i jordens öppna porer och i berg i bergets spricksystem. Även om bergartssekvensen och den strukturella geologin är komplex i området, har det hydrogeologiska systemet i denna studie delats in i två hydrogeologiska enheter: jordtäcket respektive spricksystemet i den kristallina berggrunden. Dessa enheter har avgränsats utifrån deras hydrauliska egenskaper, vilka har fastställts utifrån datagenomgång och tolkning av tidigare utförda undersökningar som anges i avsnitt 2.1.

Jord

I jord förekommer grundvatten i porerna mellan jordkornen med en fri grundvattenyta som står i öppen kontakt med atmosfärstrycket, så kallade öppna magasinsförhållanden. Moränen är definitionsmässigt ett heterogent material där de hydrauliska egenskaperna varierar både horisontellt och vertikalt. Den genomsnittliga hydrauliska konduktiviteten för moränen har satts till 5e-5 m/s, i linje med Golder-studien (2019), även om hydrauliska tester i moränen visar mycket stor variation, 7e-8 till 3e-4 m/s (Golder 2019, Geosyntec 2024). Torven i närområdet har ett k-värde i intervallet 8e-7 till 3e-6 m/s (Geosyntec 2024). De glacifluviala sedimenten beaktas inte eftersom de ligger för långt från dagbrotten för att vara relevanta.

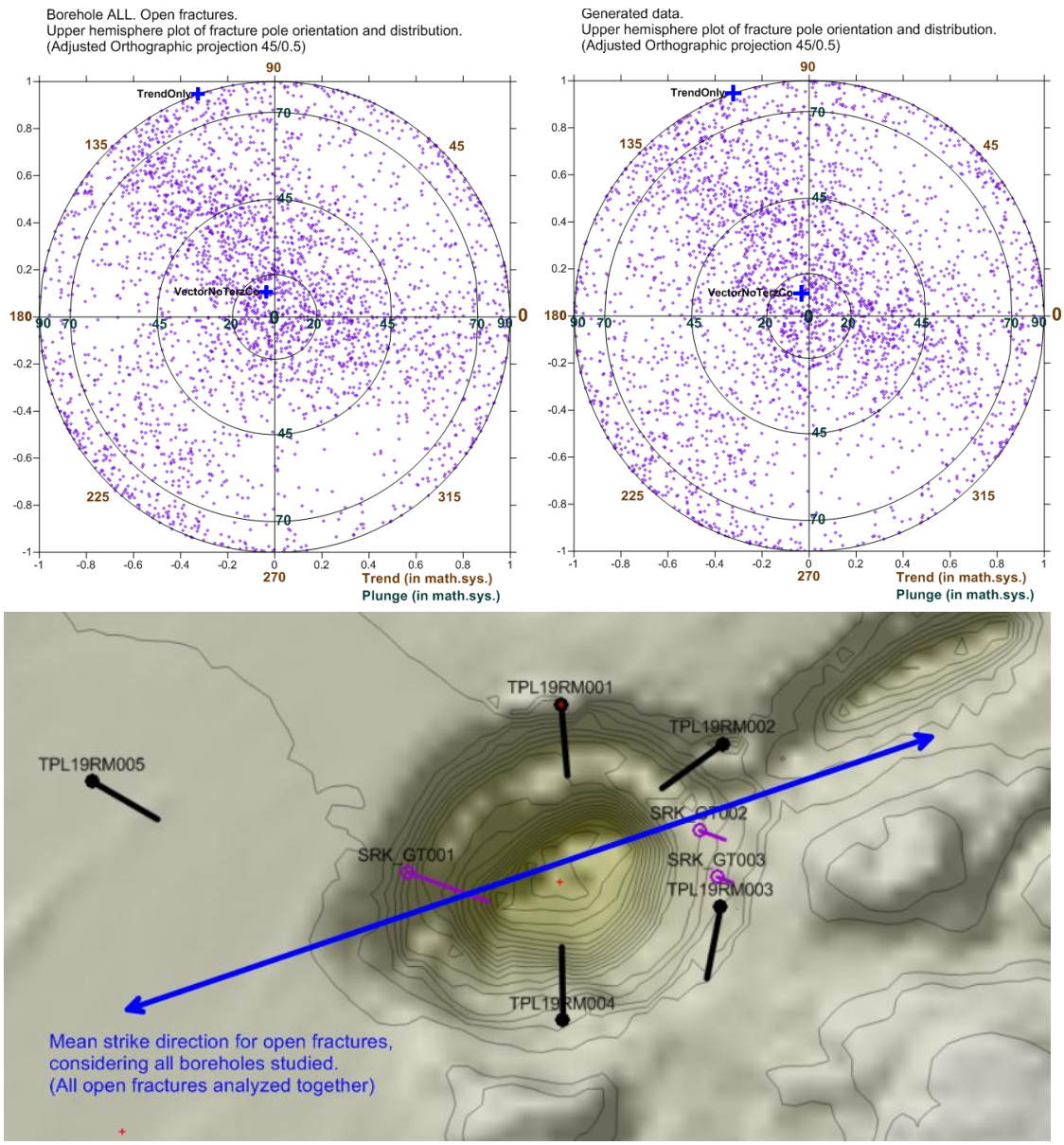
Grundvattennivåerna i jordtäcket följer i allmänhet topografin. I våtmarker ligger grundvattenytan nära markytan och i höjdlägen cirka 1–2 meter under markytan, ibland kan grundvattennivån på branta ställen hittas djupare ner. Det förekommer en säsongsvariation på 1–2 meter beroende på variationen i grundvattenbildning under året. Den naturliga gradienten före verksamhetsstart gick från nordväst mot sydost följandes topografi och ytvattensystemet. För närvarande, och inom en radie av 200–300 meter från dagbrottet, finns det en sänkning av grundvattennivåerna i jordtäcket mot dagbrotten. Grundvattenpåverkan omkring nuvarande dagbrott beskrivs mer i avsnitt 3.6.

Berg

Berggrunden hanteras i denna studie som en hydrolitologisk enhet, även om den utgörs av minst tre geologiska enheter. Bergakvifären karaktäriseras av grundvattenflöde i det öppna och konnekterade spricksystemet i berget och den omgivande impermeabla och sprickfria bergmassan. Sprickorientering och frekvens har analyserats baserat på karterade öppna sprickor i borrhål omgivande dagbrotten. Utifrån den statistiska analysen har en diskret spricknätverksmodell (så kallad DFN-modell, Discrete Fracture Network) tagits fram för att beskriva spricknätverket i en stor bergvolym omgivande gruvan. Arbetet med att ta fram DFN-modellen beskrivs i bilaga 2.

Karterade öppna sprickor har en stor variation i orientering och inga dominerande sprickriktningar har kunnat identifierats. Medelstrykningen är ca 70 ° (kompassriktning) vilket linjerar med strykningen hos Pajala skjuvzon och med kontaktzonen mellan skarn och kvartsit/fyllit. Medelstupningen hos öppna sprickor är 51° mot nordväst vilket även det linjerar med stupningen hos bergartssekvensen i området som stupar 50°-60°. Karterade öppna sprickor från borrhål sammanfaller alltså, i medeltal, med den storskaliga orienteringen av deformationszoner och berggrundsenheter vid Tapulifyndigheten. Detta är att förvänta och skänker trovärdighet till data och analys. I Figur 5 visas orientering för karterade öppna sprickor och modellerade öppna sprickor i poldiagram.

Sprickorienteringen i området bedöms skapa en anisotropi i hydrauliska egenskaper i berggrunden med högre hydraulisk konduktivitet i medelstrykningens riktning (ONO-VSV) och reducerad hydraulisk konduktivitet vinkelrätt medelstrykningen. Ingen distinkt skillnad i sprickkaraktäristik har hittats mellan de olika geologiska enheterna, vilket motiverar valet att behandla berggrunden som en sammanslagen hydrolitologisk enhet. Detta är också rimligt sett till att alla tre enheter delar en stor del av sin strukturella utveckling sedan de skapats. Karaktäriseringen av marmor/fylliten är dock osäker då endast ett borrhål med sprickdata i denna bergart har analyserats.



Figur 5. Överst visas poldiagram över karterade (vänster) och modellerade (höger) sprickor där varje punkt representerar en sprickas strykning (trend) och stupning (plunge). Nederst visas medelstrykning för alla öppna sprickor och lägen för de borrhål som ingått i spricknätsverksanalysen.

De stora strukturer som finns och har karterats i omgivningen av dagbrotten, som förkastningszoner och svaghetszonen mellan skarn och kvartsit/fyllit, bedöms inte vara diskreta strukturer med förhöjd transmissivitet som är viktiga för grundvattenflöde i berg. Anledningen är att de har karterats ha lerfyllda sprickor vilket snarare bör reducera grundvattenflödet. De har därför inte inkluderats som explicita objekt i upprättad modell. Det är dock sannolikt att sådana strukturer är inkluderade i sprickdatan från borrhålen och på så sätt är implicit inkluderade som en del av det modellerade spricksystemet.

Hydraulisk konduktivitet i berggrunden har utvärderats av Pöyry (2009a) i totalt 27 borrhål ned till maximalt 300 m djup. Undersökningsmetoderna inkluderar vattenförlustmätning, spinner flow loggning, enhålstester och flerhåls interferenstester i form av provpumpningar. Resultaten visar en variation i hydraulisk konduktivitet i intervallet 3E-8 till 1E-5 m/s, det vill säga mer än två tiopotenser. Detta illustrerar den generella heterogeniteten i berggrundens egenskaper. Dock kunde inga signifikanta skillnader ses mellan olika geologiska enheter i liggvägg (sydöst) och hängvägg (nordost). Som jämförelse med mer nutida undersökningar i närområdet, utfördes en provpumpning vid Sahavaara söder om Tapuli under 2024 vilken visade på en hydraulisk konduktivitet på 2E-6 m/s för bergets översta 150 m (Geosyntec 2024).

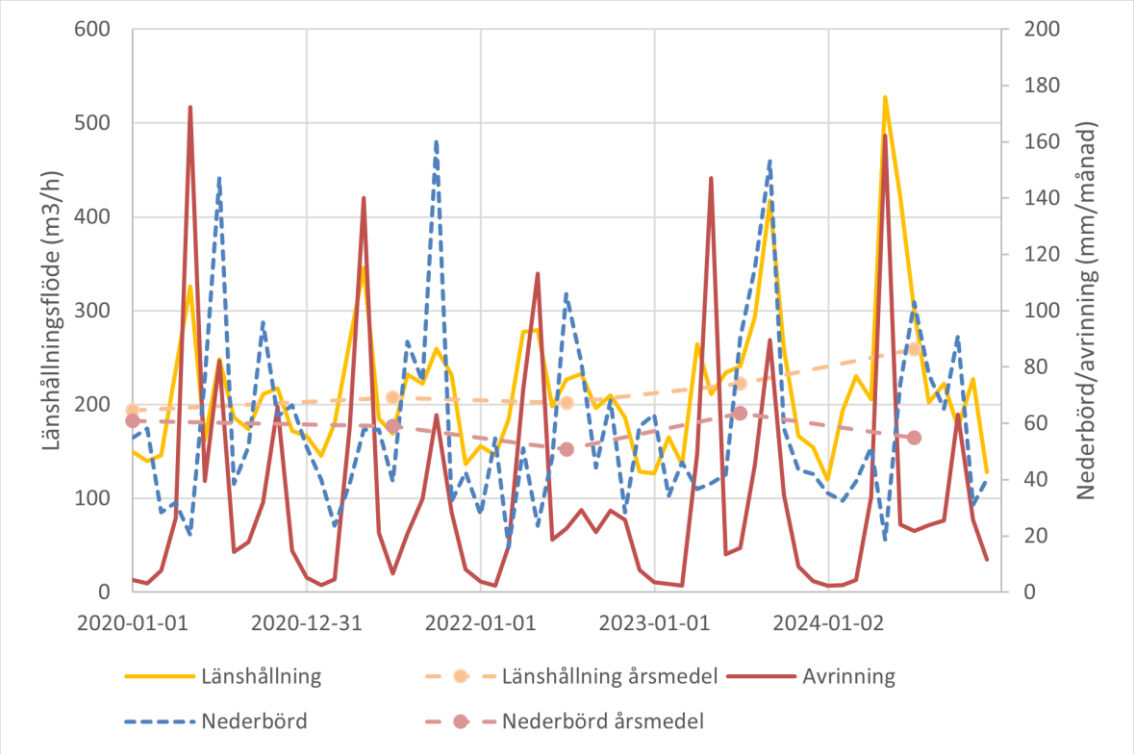
Resultaten från Pöyry (2009b) och senare Golder (2019) visar tydligt att bergets hydrauliska konduktivitet minskar med ökat djup, i linje med den omfattande forskning som utförts av SKB vid Laxemar, Oskarshamn (Rhen et al, 2008, SKB R-08-78).

3.6 Tillståndsgiven och ansökt gruvverksamhet

Gruvbrytning påbörjades vid Tapuligruvan år 2011 av Northland Resources genom avbaning av jordmassor och med brytning av den första malmen ca ett år senare. Verksamheten reglerades av ett tillstånd givet av Gränsälvskommissionen (GÄK) och omfattade centrala och norra dagbrottet. I slutet av 2013 avbröts verksamheten vid en bottennivå på +120 m och dagbrotten började fyllas med vatten. År 2016 hade vattennivån stigit till +140 m. Själva gruvbrytning återupptogs under 2018. Sedan dess har det norra dagbrottet brutits ner till +90 varefter brytning här pausats. Det centrala dagbrottet var i början av 2024 på nivån +0 m (167 m djupt) och brytning har sedan dess utförts ner till dagens nivå på -32 m. Det planerade slutliga brytnivån -138 m, motsvarar djupet 320 m under markytan.

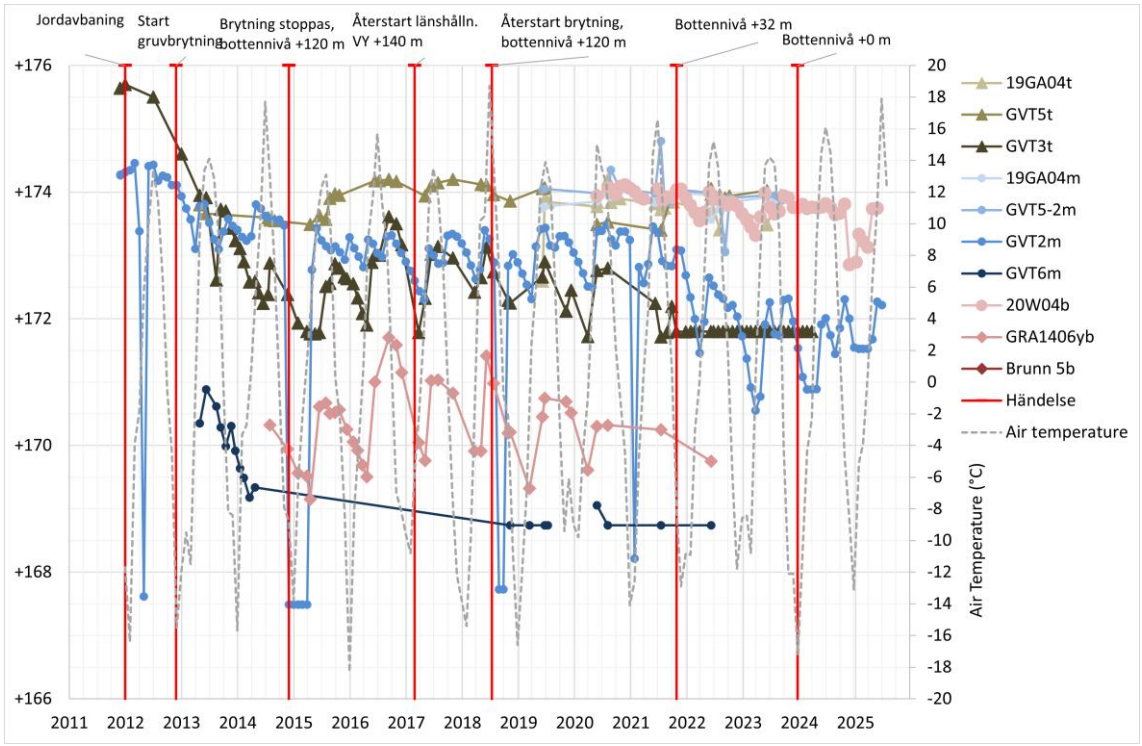
I nu ansökt miljötillstånd finns även två nya dagbrott som ännu inte påbörjats, Palotieva öster om befintliga dagbrott och Sahavaara i sydväst. Någon tidplan för när dessa dagbrott kommer att brytas är inte fastställd. För att vara på den konservativa sidan antas Palotieva och Sahavaara vara fullt utbrutna och länshållna när Tapuli K nr 4 bryts.

Dagbrotten länshålls genom pumpning från pumpgropar i dagbrottens botten. Länshållningsvatten är en blandning av inströmmande grundvatten och direktnederbörd i form av regn och snö. Grundvatteninflödet och direktnederbörden kan inte särskiljas genom mätning eftersom de blandas direkt på dagbrottsslänterna. Det sammanlagda länshållningsflödet från båda dagbrott mäts i en mätbrunn uppe vid markytan. Flödet varierar med årstiden och är högst vid snösmältningen och lägst i slutet av vintern när grundvattenbildning och avrinning är som lägst. Länshållningsflödets variation under perioden 2020-2024 redovisas i Figur 6 tillsammans med nederbörd och avrinning. Under året varierar avrinningen med mer än en tiopotens, medan det uppmätta länshållningsflödet från dagbrotten varierar med en faktor två. Slutsatsen är att grundvatteninflödet till dagbrottet inte direkt korrelerar med nettonederbörden utan jämnas ut under flödet mot dagbrotten. En skattning av grundvatteninflödet till dagbrotten går att göra under senvintern då direktnederbörden i princip är noll eftersom den lagras som snö. Detta ger ett värde på cirka 150 m³/h (1,3 miljoner m³ per år) under vintermånaderna.

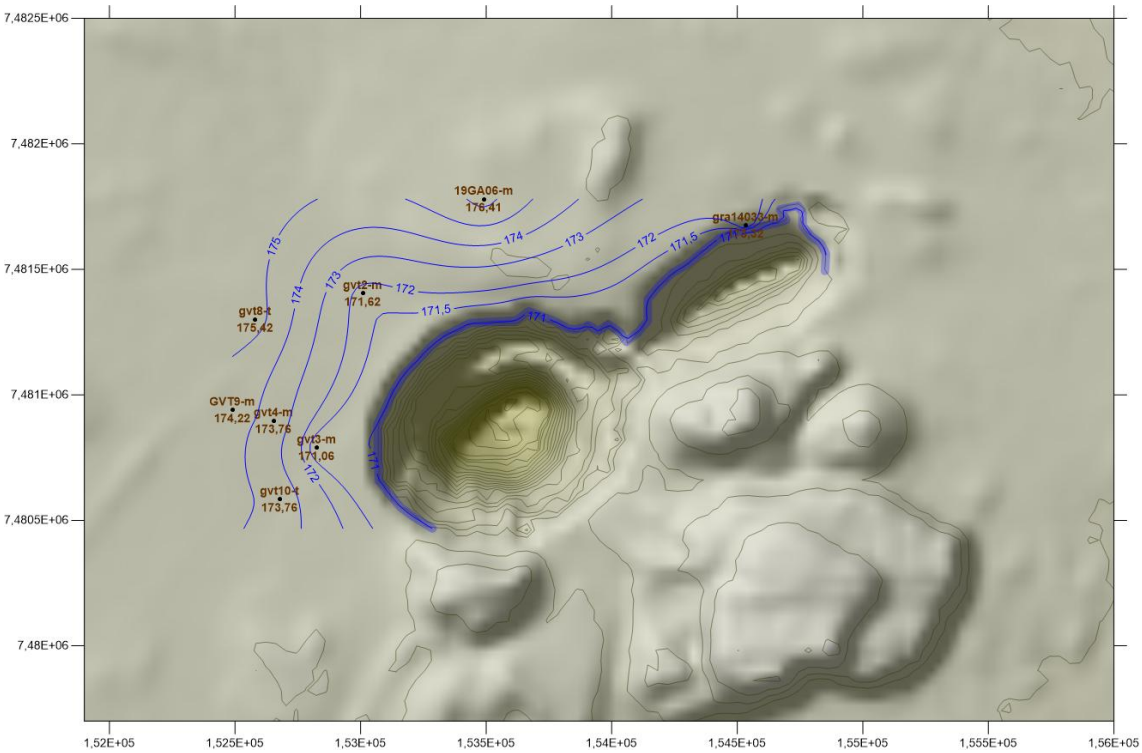


Figur 6. Uppmätt länshållningsflöde vid Tapuligruvan och modellerad avrinning och nederbörd från SMHI:s SHYPE-modell.

Länshållningen av dagbrotten har orsakat en avsänkning av grundvattenytan i omgivningen. Det största påverkan skedde under jordavbaningen och vid brytning av de första pallarna berg, se till exempel GVT3t och GVT6m i Figur 7. I dagsläget finns en avsänkning av grundvattenytan i jord inom ett avstånd på 200-300 m från dagbrottskanten och nära dagbrottskanten är jorden helt dränerad på grundvatten. Det finns dock fortsatt en tydlig säsongsvariation i grundvattennivåerna nära dagbrottet som speglar variationen i nettonederbörd över året. En tolkad grundvattenyta på dagbrottens norra och västra sida, ut mot omgivande våtmarker, redovisas i Figur 8. Grundvattenytan representerar medelnivåer från 2024.

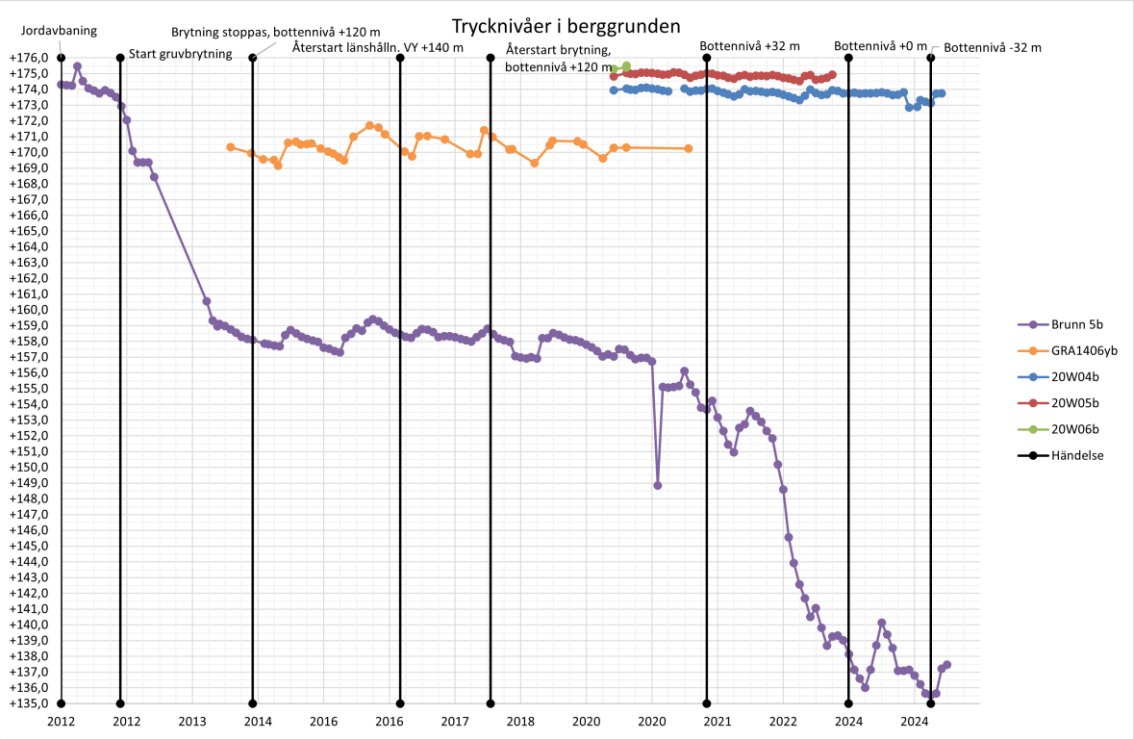


Figur 7. Uppmätta grundvattentrycknivåer i jord under perioden 2011-2025. Lufttemperaturen (streckad linje) samplottas på högeraxeln för att illustrera säsongsvariationen i systemet.

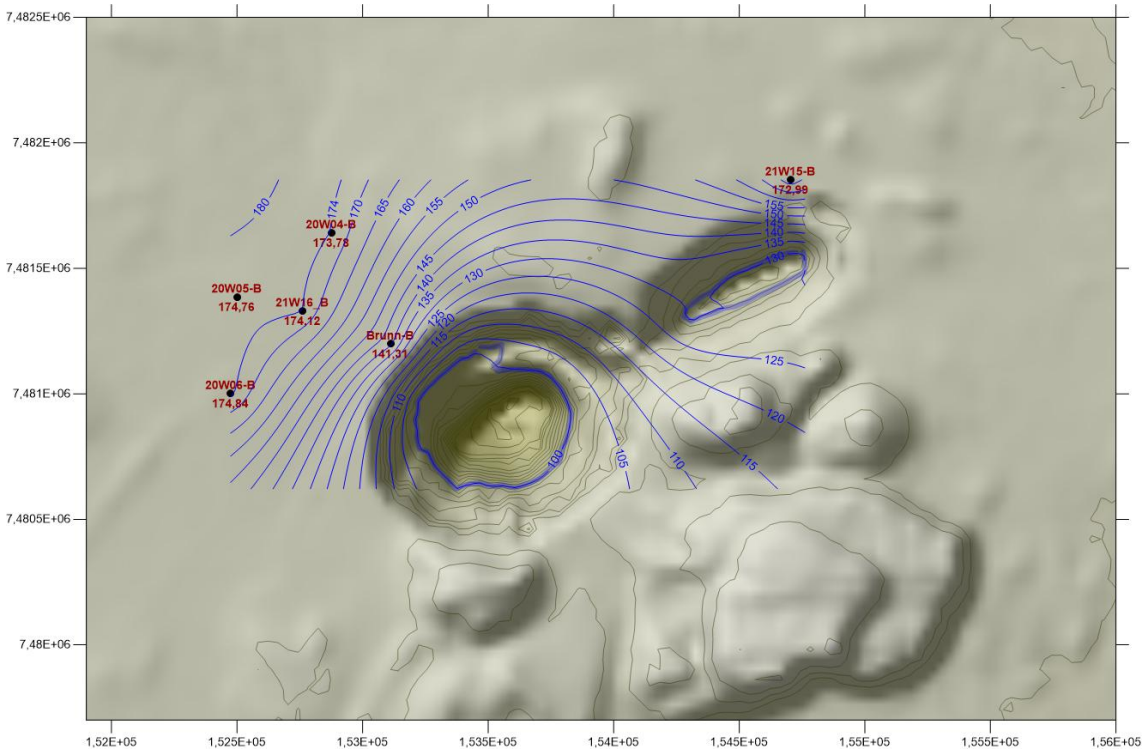


Figur 8. Tolkad grundvattenyta norr och väster om dagbrotten baserat på uppmätt medelgrundvattennivå i jord under 2024.

Även grundvattentrycknivåer i berg har påverkats av gruvverksamheten, se Figur 9. Brunn 5 som är belägen 200 m från centrala dagbrottet och är 100 m djup har sänkts av totalt ca 40 m. Avsänkningen har utvecklats i två steg, där den första avsänkningen på ca 20 m uppstod tidigt under verksamheten när brytning skedde ner till +120 m och den andra avsänkningsperioden var 2022-2023 när brytning skedde från +32 till +0. Brunnens trycknivå har dock fortsatt ett säsongsberoende mönster vilket reflekterar variationen i grundvattenbildning över tid. Grundvattenbildningen till berg bedöms vara relativt stabil över året vilket har att göra med att omgivande våtmarker fungerar som reservoar och källa till grundvattenbildning till berggrunden och inflöde till dagbrotten. Bergborrhål installerade i ytligt berg har ännu inte påverkats märkbart. En tolkning av rådande grundvattentrycknivåer i berg baserad på medelvärde av 2024 års mätningar redovisas i Figur 10.

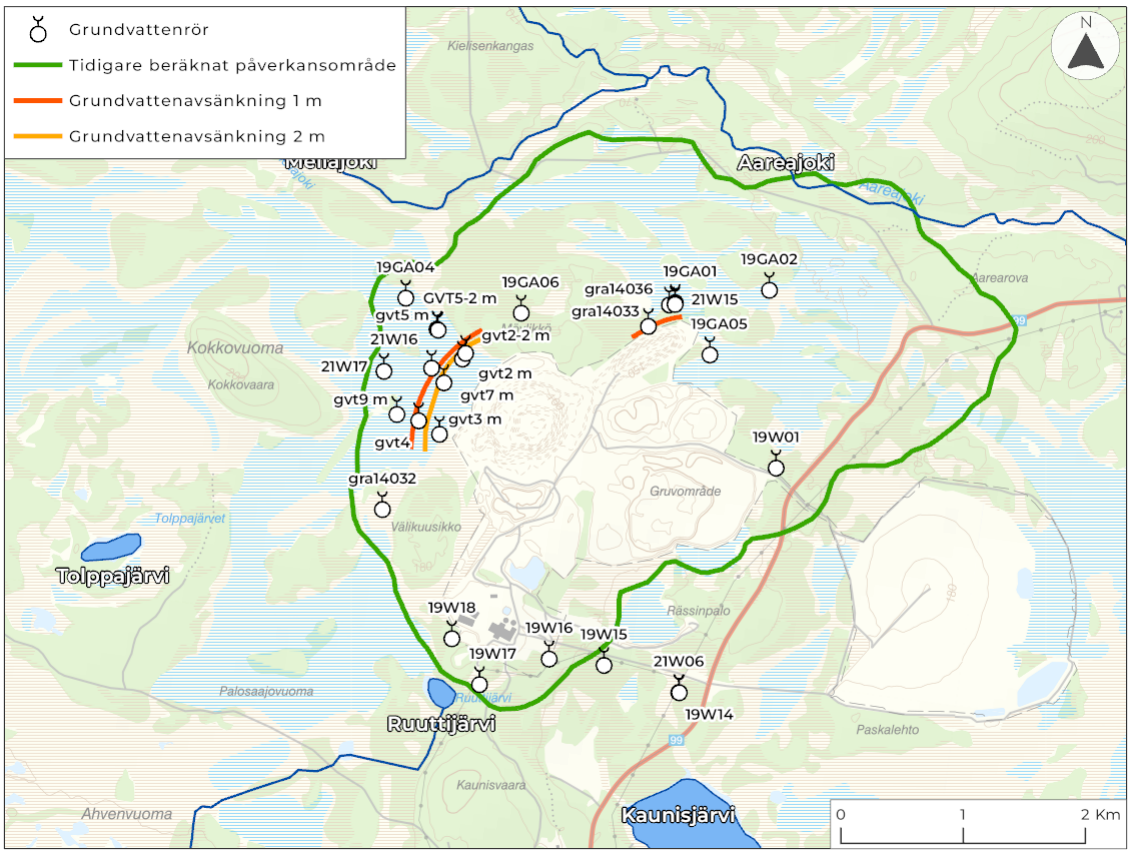


Figur 9. Uppmätta grundvattentrycknivåer i berg under perioden 2011-2025.



Figur 10 Tolkade grundvattentrycknivåer norr och väster om dagbrotten baserat på uppmätt medelgrundvattentrycknivå i berg under 2024.

Inom ramen för ansökan om utökad brytning vid Tapuligruvan, mål nr M 2090-19, gjordes en prognos av grundvattenpåverkan och ett påverkansområde togs fram (Golder 2019). Vid uppföljning med data från bolaget egenkontrollprogram kan ses att uppmätt påverkan håller sig väl inom den bedömda påverkan från ansökningshandlingarna, se Figur 11.

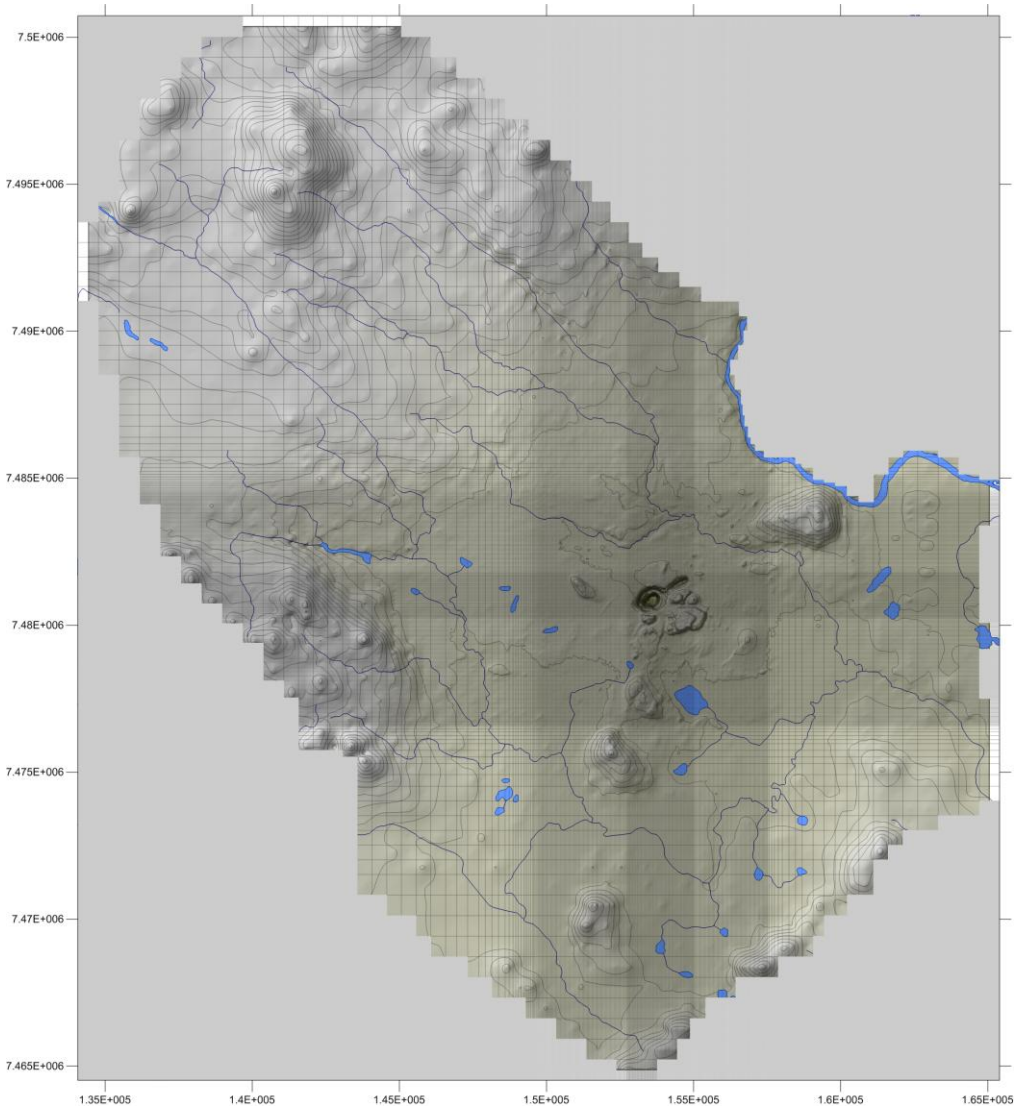


Figur 11. Jämförelse mellan tolkad grundvattensänkning för tredje kvartalet 2024 enligt bolagets årsredovisning och prognosticerat påverkansområde inom ramen för mål nr 2090-19.

4. Beskrivning av flödesmodell

4.1 Modelluppbyggnad

Den grundvattenflödesmodell som upprättats för uppdraget inkluderar ytvattenflöde och grundvattenflöde i den omättade och mättade zonen. Yt- och grundvatten är fullt kopplade och vatten kan röra sig fritt mellan dessa domäner. För att korrekt beskriva även ytvattenflöden och undvika påverkan från modellränder i områden som möjligen kan komma att påverkas av dagbrotten är modellområdet stort och täcker in hela Kaunisjokis och Aareajokis avrinningsområden, se Figur 12. Modellen har en upplösning (cellstorlek) på 10 m x 10 m i horisontalled nära dagbrotten med ökande cellstorlek mot ränderna. I vertikalled finns 69 lager och ett totalt djup på ca 2 000 m. Upplösningen i vertikalled vid dagbrotten är i huvudsak 5 m.



Figur 12. Modellområdet med beräkningsnät och inkluderade ytvattendrag markerade i mörkblått.

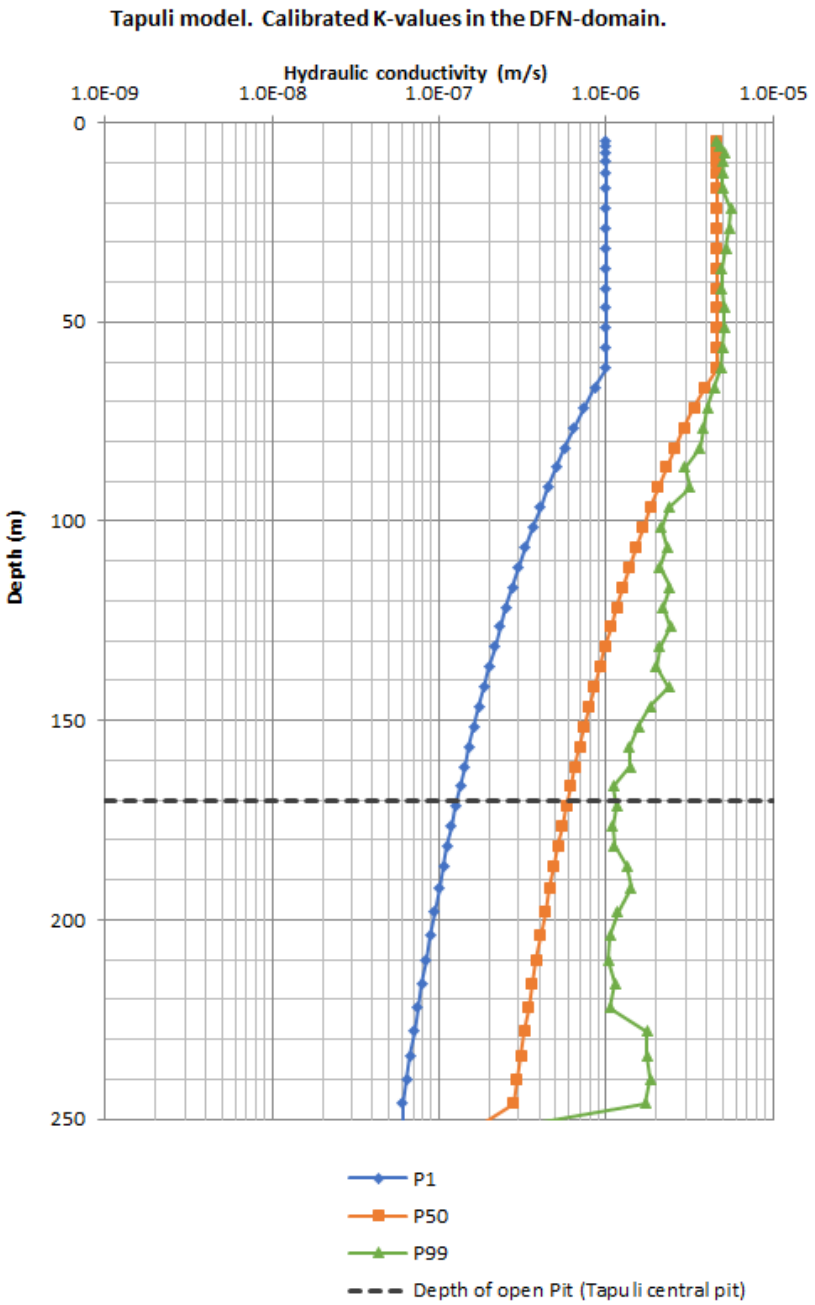
Ytvattenflöde sker i topografins lutning och kan förekomma överallt på markytan. Förekommande vattendrag har representerats i detalj genom att topografin justeras så att flödet följer karterade fåror.

4.1.1 Geologisk representation

Jordlagren i modellen har definierats med ett medelvärde för uppmätt hydraulisk konduktivitet i området på 5E-5 m/s, i linje med tidigare beskrivning av Golder (2019). Förekommande isälvsavlagringar har inte beaktats då de ligger långt från gruvområdet och inte bedöms ha någon märkbar påverkan på beräkningsresultatet.

Berget i modellen har definierats med djupavtagande hydraulisk konduktivitet i kombination med den hydrauliska konduktiviteten i den framtagna DFN-modellen. Som ett första steg har ett lågt bakgrundsvärde för hydraulisk konduktivitet ansatts för hela bergmassan. Detta värde representerar flödet i små sprickor med låg genomsläpplighet. Bakgrundskonduktiviteten har definierats med ett djupberoende i linje med den interpolerade djupberoendet som observerats vid SKB:s platsundersökningar i Oskarshamn (Rhen et al, 2008). Bakgrundskonduktiviteten har också anisotropa egenskaper orienterade på samma sätt som anisotropa egenskaper i DFN-modellen, med en maximal anisotropifaktor på 5. Därefter har hydraulisk konduktivitet enligt den uppskalade DFN-modellen lagts till i modellen för att representera de stora och genomsläppliga typ A-sprickorna. Den totala hydrauliska konduktiviteten för berget blir då bakgrundskonduktiviteten plus DFN-modellens konduktivitet. Detta ger en så kallad ekvivalent porös media representation av det sprickiga berget som är heterogent och anisotropiskt och följer det som observerats i undersökningar och på dagbrottsväggar.

Den totala hydrauliska konduktiviteten som produceras av kombinationen av bakgrundskonduktiviteten och den uppskalade DFN-modellen har kalibrerats så att simulerat inflöde till dagbrotten matchar uppmätt inflöde, se vidare under avsnitt 4.2. Den kalibrerade hydrauliska konduktiviteten hos modellens celler för de översta 250 m redovisas i Figur 13.

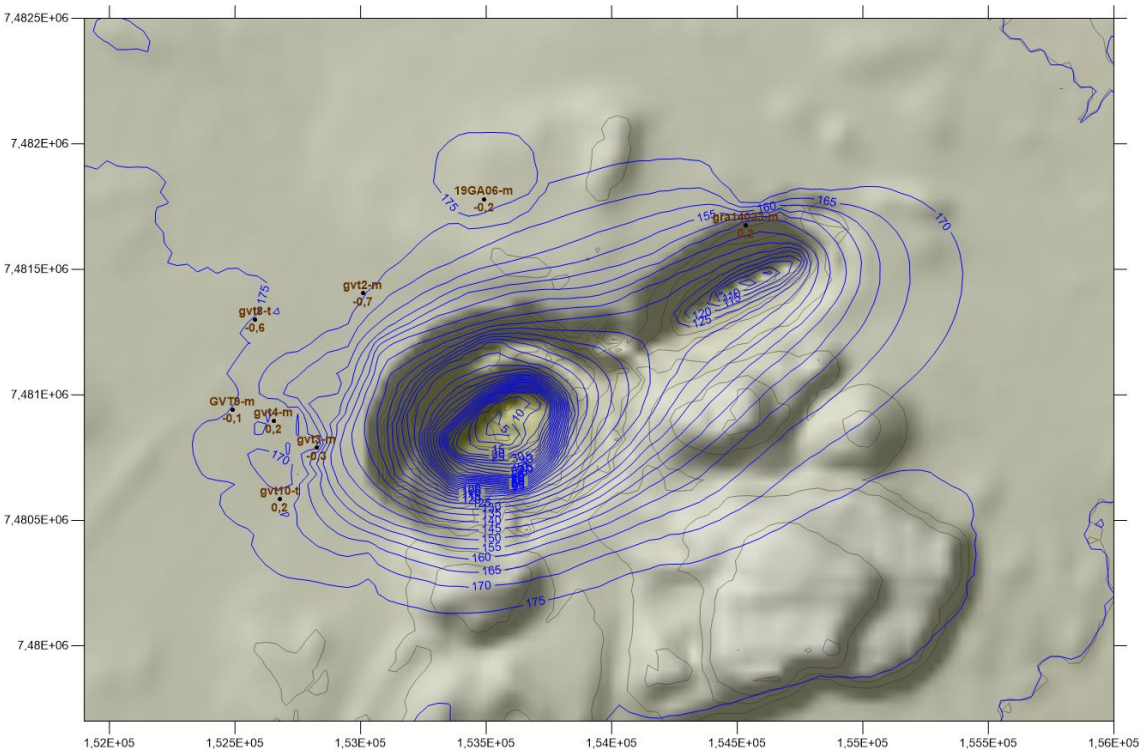


Figur 13. Kalibrerad hydraulisk konduktivitet för modellens översta 250 m i bergmassan som omger dagbrotten. I figuren representerar P1 förstapercentilen, P50 medianen och P99 99-percentilen av fördelningen av hydraulisk konduktivitet hos celler på det givna djupet.

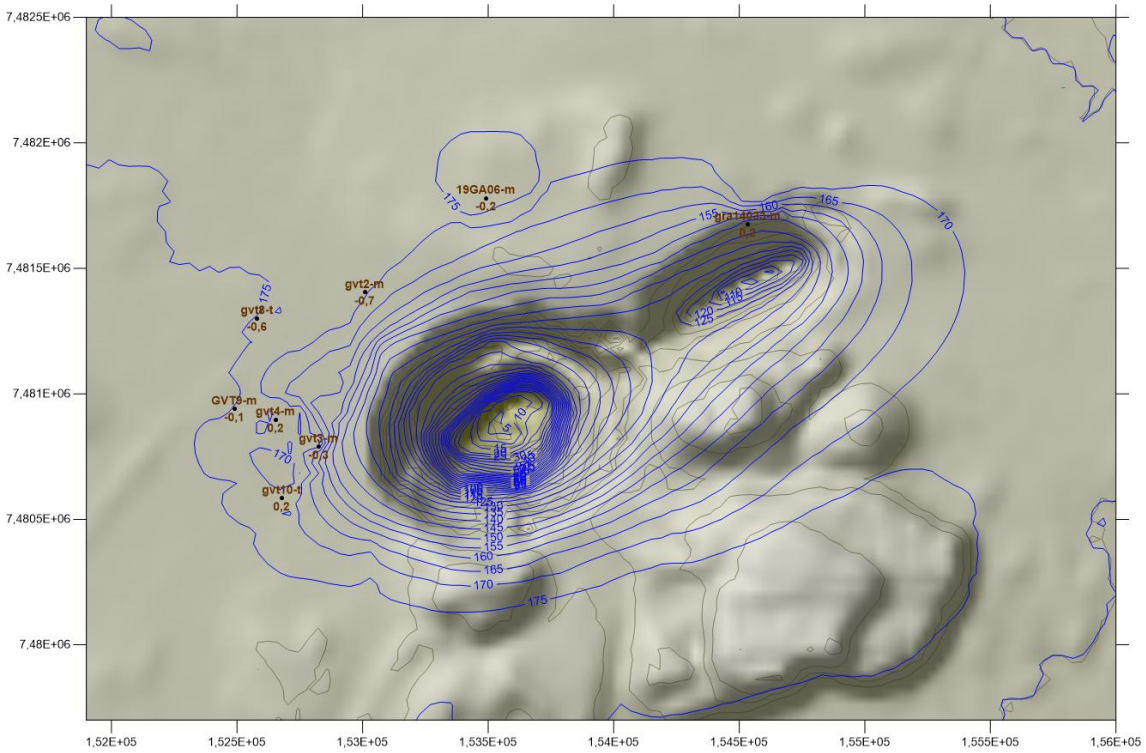
4.2 Kalibrering

För att kalibrera modellen har medelsituationen under 2024 använts. Det vill säga att topografin följer så som dagbrotten såg ut tidigt 2024 och medel för länshållningsflöden och grundvattentrycknivåer som uppmätts under 2024 har använts för att kalibrera modellens parametervärden. Senare data visar att grundvattentrycknivåerna har varit likartade under 2025.

Kalibreringsresultatet visar på en modell som mycket väl stämmer överens med mätvärden. Medelresidualen, det vill säga medelskillnaden mellan simulerade och uppmätta grundvattennivåer i jord och berg, är -0,25 m. I Figur 14 och Figur 15 redovisas simulerade grundvattennivåer i jord och grundvattentrycknivåer i berg och residualen för varje mätpunkt. Det innebär att modellen, i medeltal, simulerar något lägre nivåer än de uppmätta och alltså en något större påverkan än uppmätt. Det simulerade länshållningsflödet (grundvatteninflöde plus direktnederbörd) är 2,45 miljoner m³/år medan det uppmätta för 2024 är 2,27 miljoner m³/år (259 m³/h), det vill säga ca 8 % högre än uppmätt flöde. Sammantaget genererar modellen inflöden och grundvattennivåer som har god överensstämmelse med uppmätta värden, men något på den konservativa sidan (i meningen överskattning av påverkan).

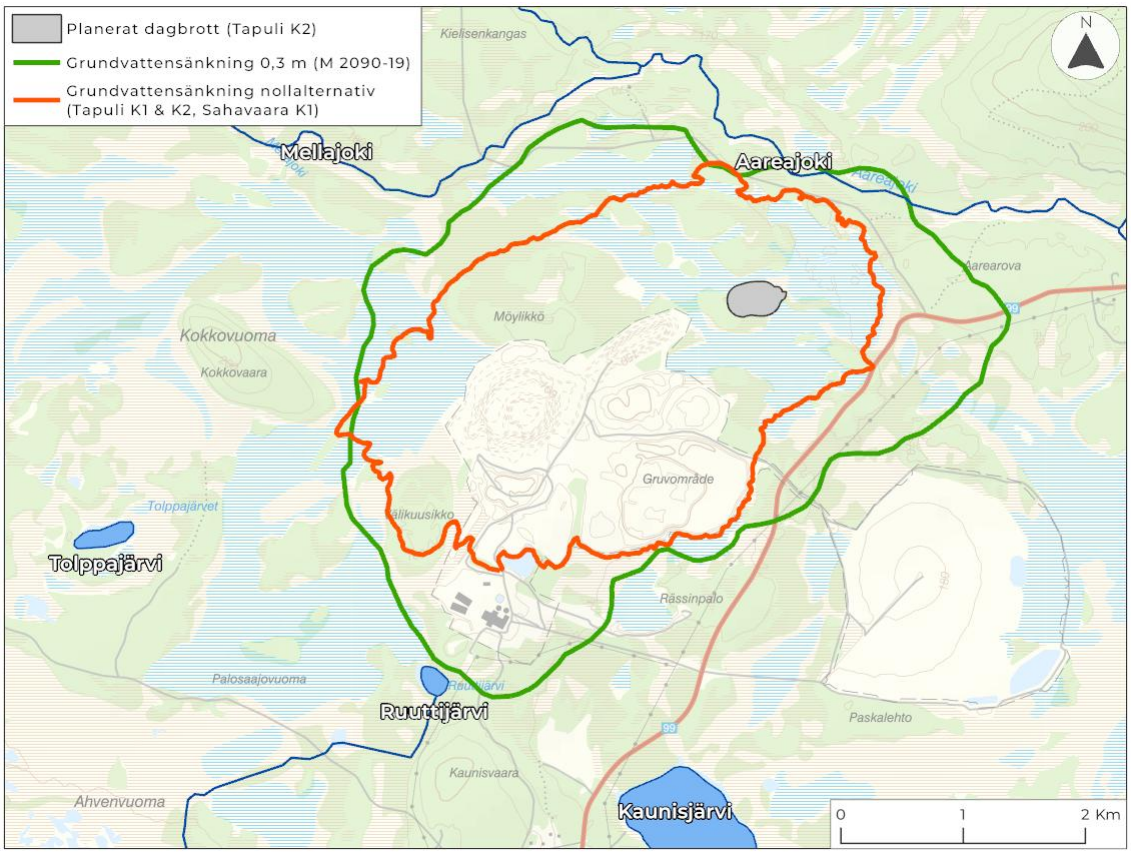


Figur 14. Simulerade grundvattennivåer och residual i jord för kalibreringsscenariot.



Figur 15. Simulerade grundvattentrycknivåer i berg och residual per mätpunkt för kalibreringsscenariot.

Nu upprättad modell har jämförts med bedömt påverkansområdet från mål nr M 2090-19, se Figur 16. För referensscenariot (Tapuli centrala och norra fullt utbrutna) ger nuvarande modell ett betydligt mindre påverkansområde än det tidigare framtagna påverkansområdet. Den äldre modellen speglade kunskapsläget då och var mer konservativ i sin bedömning än vad nuvarande modell kan vara som baseras på ny data och utökad kunskap med långa mätserier över grundvattentrycknivåer och länshållningsflöden. Noteras bör att det planerade dagbrottet Palotieva inte är med i den nya modellen varför jämförelser av påverkansområdet nordost om dagbrotten inte kan göras på ett rättvisande sätt.



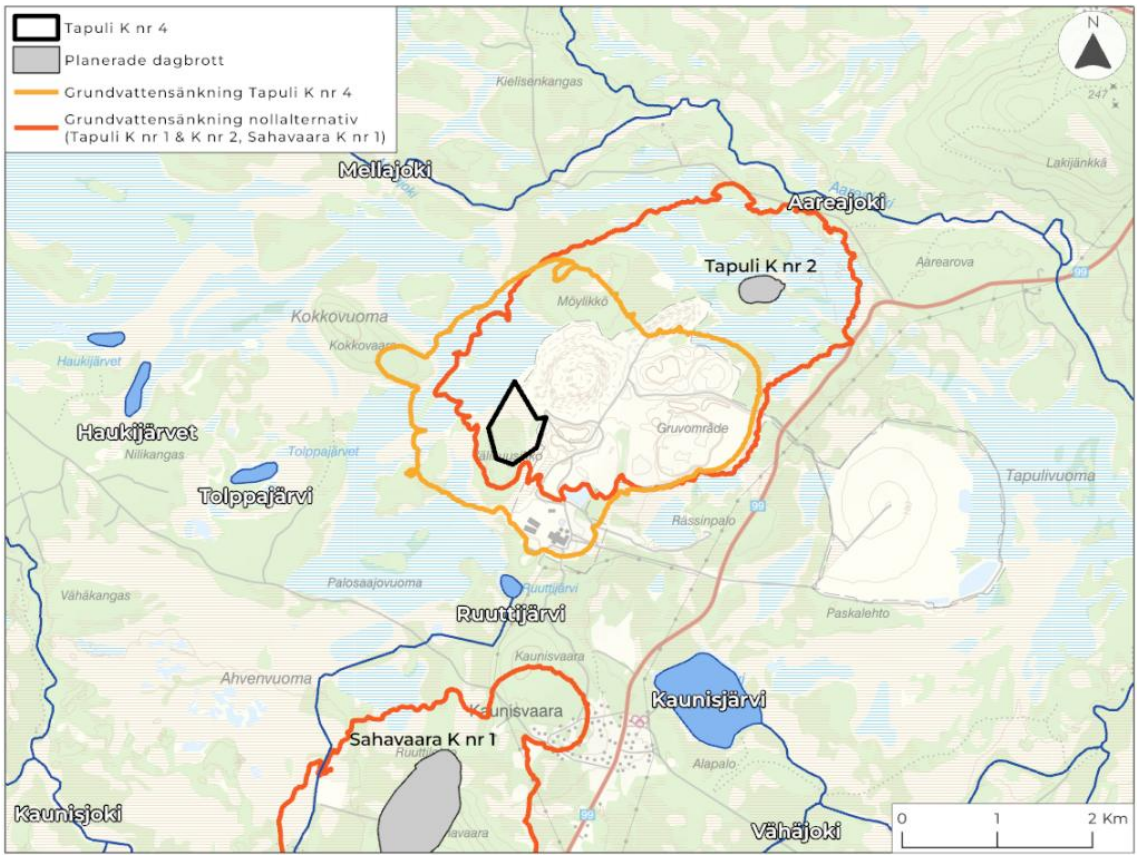
Figur 16. Jämförelse mellan nytt beräknat påverkansområde för referensscenariot och tidigare framtaget påverkansområde i mål nr M 2090-19.

5. Beräkningsresultat

5.1 Prognostisering av påverkan

5.1.1 Påverkansområde i jord och berg

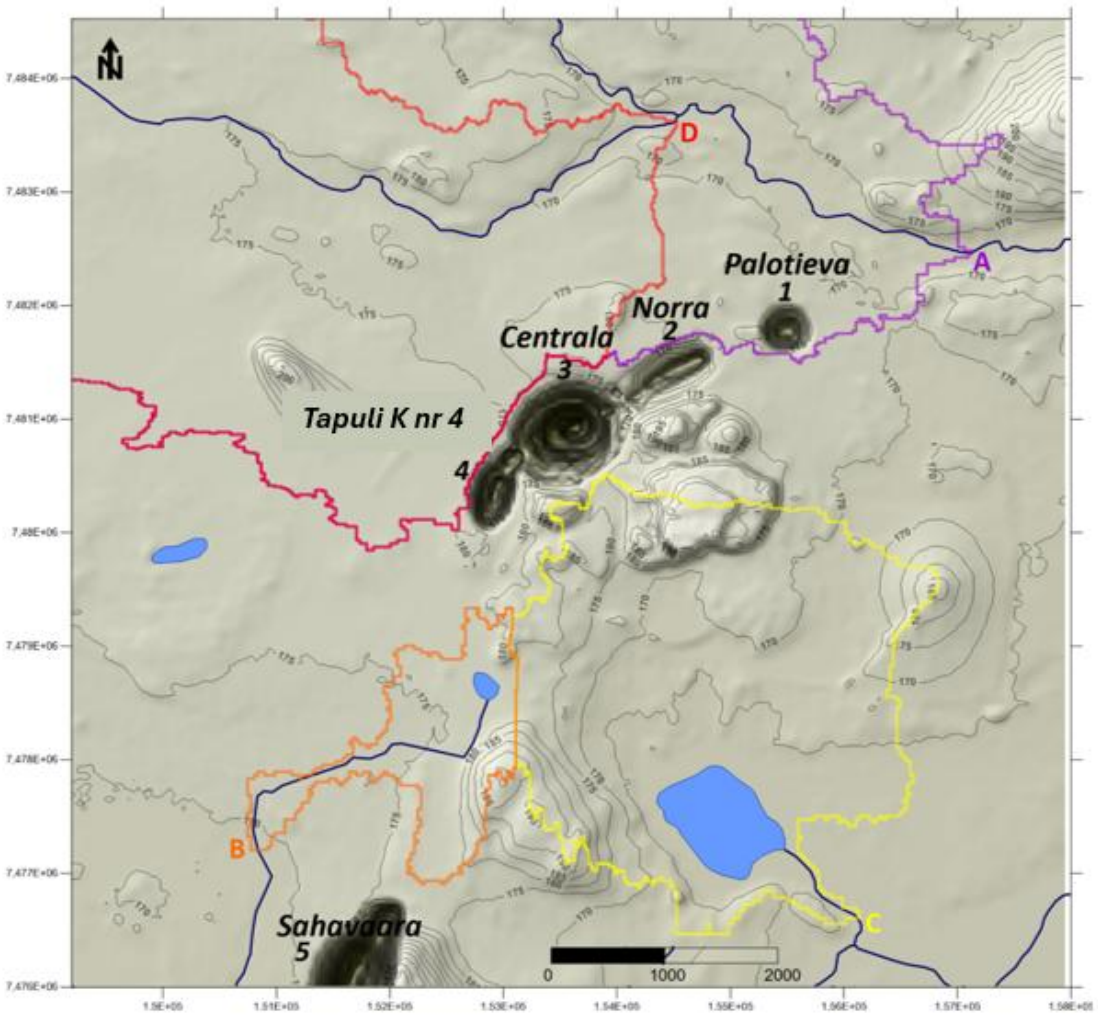
Ett påverkansområde har beräknats för tillkommande påverkan från Tapuli K nr 4 jämfört med referensscenariot, se Figur 17. Påverkansområdesgränsen har definierats som 0,3 m sänkning av grundvattenytan jämfört med referensscenariot, i enlighet med praxis för tillståndsärenden. Att 0,3 m väljs har att göra med att det dels är en påverkan som går att mäta och särskilja från naturliga trender och dels är en nedre gräns för noggrannheten hos en grundvattenmodell givet modellens upplösning (cellstorlek) och osäkerheter i ingående parametrar som geologiska enheters egenskaper, nettonederbörd och geometri. Påverkansområdet för Tapuli K nr 4 sammanfaller inte i någon punkt med avsänkningen runt Sahavaara dagbrott.



Figur 17. Beräknat påverkansområde för Tapuli K nr 4, beräknat som 0,3 m avsänkning av grundvattenytan jämfört med referensscenariot (vilket motsvarar nollalternativet vid fullt utbrutna dagbrott).

5.1.2 Påverkan på ytvattensystemet

Brytningen av Tapuli K nr 4 medför en liten minskning av ytvattenflöden i omgivande vattendrag jämfört med referensalternativet. I Aareajoki (punkt A i Figur 18) prognosticeras en minskning av flödet med 0,1 % i medeltal, i Patojoki och uppströms liggande Kaunisjärvi (punkt C) 3,0 % och i Mellajoki (punkt D) en minskning med 0,6 %. Dessa tre är de vattenförekomster som berörs. Utloppet ur Ruuttijärvi (punkt B) som mynnar i Kaunisjoki, är ingen vattenförekomst, här beräknas en minskning av flödet med 2,0 %. Den relativt sett större påverkan på Patojoki beror på att en större del av Patojokis avrinningsområde ligger nära dagbrottet och inom påverkansområdet medan Mellajoki och Aareajoki har stora uppströms avrinningsområden som bäckarna får majoriteten av sitt flöde ifrån.



Figur 18. Punkter i omgivande ytvattendrag som använts för att kvantifiera flödespåverkan och deras avrinningsområden.

5.1.3 Grundvattenberoende objekt

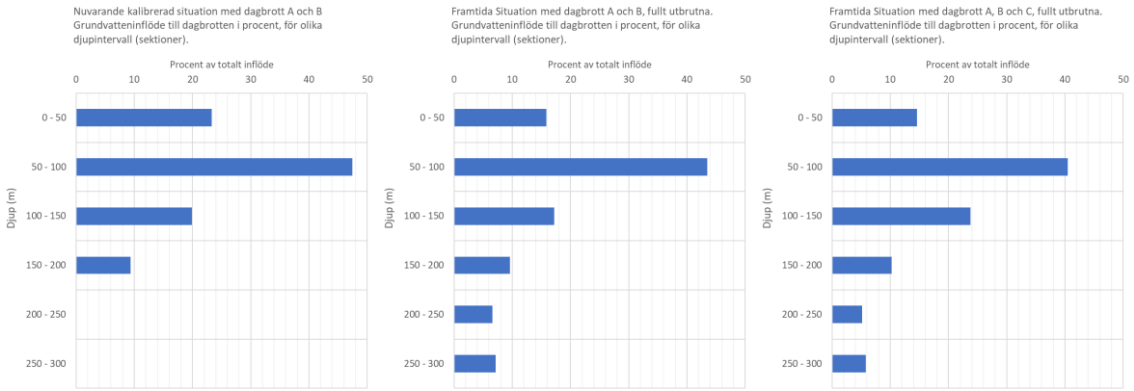
Beräknat påverkansområde omfattar i huvudsak myrmarker med insprängda höjdområden sydväst, väst och norr om dagbrotten samt gruvområdet med gråbergsupplag och industriområde öster och söder om dagbrotten. Jämfört med referensalternativet påverkas ytterligare 185 ha av grundvattensänkning varav ca 94 ha utgörs av våtmarker. Jämfört med bedömningen i tidigare tillståndsansökan berörs nya områden på area om ca 72 ha sydöst om Tapuli K nr 4 beroende på att fotavtrycket för dagbrott ökar i denna riktning. Ca 40 ha av dessa utgörs av våtmark. Samtidigt är det nya beräknade påverkansområdet avsevärt mindre än det som prognosticerades i tidigare tillståndsansökan öster och norr om dagbrotten.

I Tapuligruvans omgivningar finns tre definierade grundvattenförekomster; Kaunisvaara, Haumajakangas och Alaniemenkangas. Ingen av dessa berörs av påverkansområdet för Tapuli K nr 4 och ingen påverkan bedöms uppkomma på kvantitativ eller kvalitativ status för grundvattenförekomsterna. Några privata eller allmänna brunnar finns inte inom påverkansområdet, utöver bolagets egna inom industriområdet, varken i SGU:s brunnsarkiv eller i den brunnsinventering som bolaget utfört (WSP 2020).

5.2 Inflöde till dagbrott

Det totala länshållningsflödet till de fem dagbrotten när alla är fullt utbrutna och dränerade har beräknats till 7,3 miljoner m^3/år, en ökning från nulägets 2,45 miljoner m^3/år (eller 2024 års uppmätta 2,27 miljoner m^3/år). Det ökade länshållningsflödet beror till största delen på att fotavtrycket ökas i och med de tre nya dagbrotten vilket innebär ökat inflöde av ytnära grundvatten och ökad direktnederbörd. Bidraget från Tapuli K nr 4 beräknas utgöras av ca 0,6 Mm^3/år. Att det ytterligare länshållningsflödet från K nr 4 är relativt litet beror på att dagbrottet är mindre och dess närhet till Tapuli centrala där området redan är delvis avsänkt.

Av beräknat länshållningsflöde utgör ca 80 % grundvatteninflöde och 20 % direktnederbörd. Modellberäkningarna ger att grundvatteninflödet ökar med c:a 20 % då Tapuli centrala och norra görs fullt utbrutna jämfört med nuläget. Grundvatteninflödet ökar med c:a 50% då Tapuli K nr 4 adderas och samtliga tre görs fullt utbrutna jämfört med nuläget. Figur 19 nedan visar att grundvatteninflödet på stort djup (under djup 200 m) är litet i jämförelse med inflödet på djupet 50 – 100 m (där det största inflödet sker). Detta följer delvis av bergets hydrauliska konduktivitet, som avtar med djupet. Att göra dagbrotten djupare har alltså mindre påverkan på grundvatteninflödet (och det omgivande grundvattensystemet) än att göra dagbrotten större horisontalt.

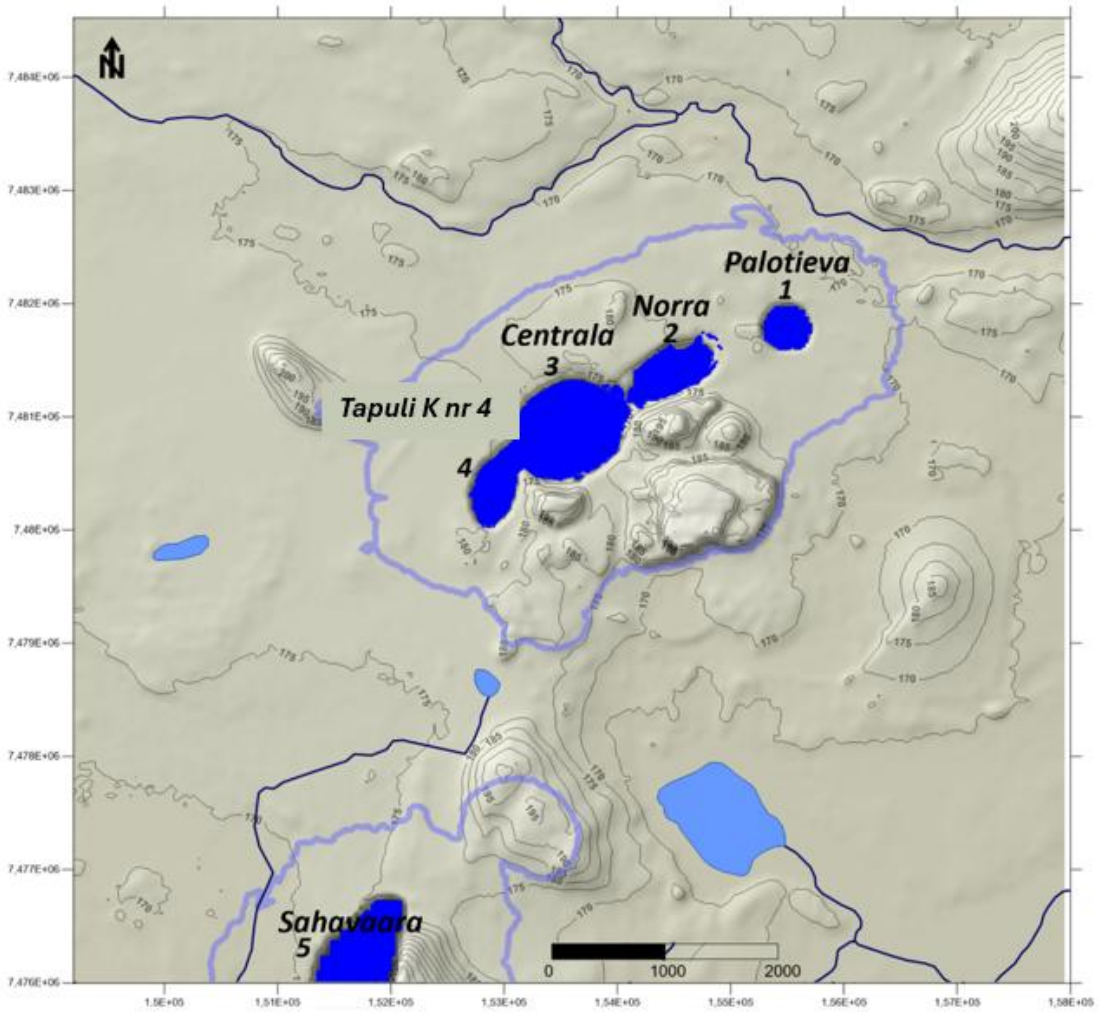


Figur 19. Grundvatteninflöde i dagbrotten, Tapuli centrala (A), norra (B) och K nr 4 (C), i procent per djupintervall för tre olika studerade scenarier, nuläge, referenssituationen respektive framtida fullt utbrutna dagbrott. Notera att nettonederbörden över dagbrotten inte inkluderats i de ovan angivna grundvatteninflödena.

5.3 Efterbehandling

När Tapuli K nr 4 är utbrutet kommer även Tapuli centrala och norra vara utbrutna. Tapuli centrala och norra sannolikt några år före K nr 4. Exakt när i tid Palotieva och Sahavaara är färdigbrutna är inte planerat. När dagbrotten är färdigbrutna kommer pumparna att stängas av och dagbrotten vattenfyllas av inströmmande grundvatten och direktnederbörd. Antaget att samtliga fem dagbrott är fullt utbrutna och dränerade samtidigt beräknas uppfyllnadstiden vara ca 25 år.

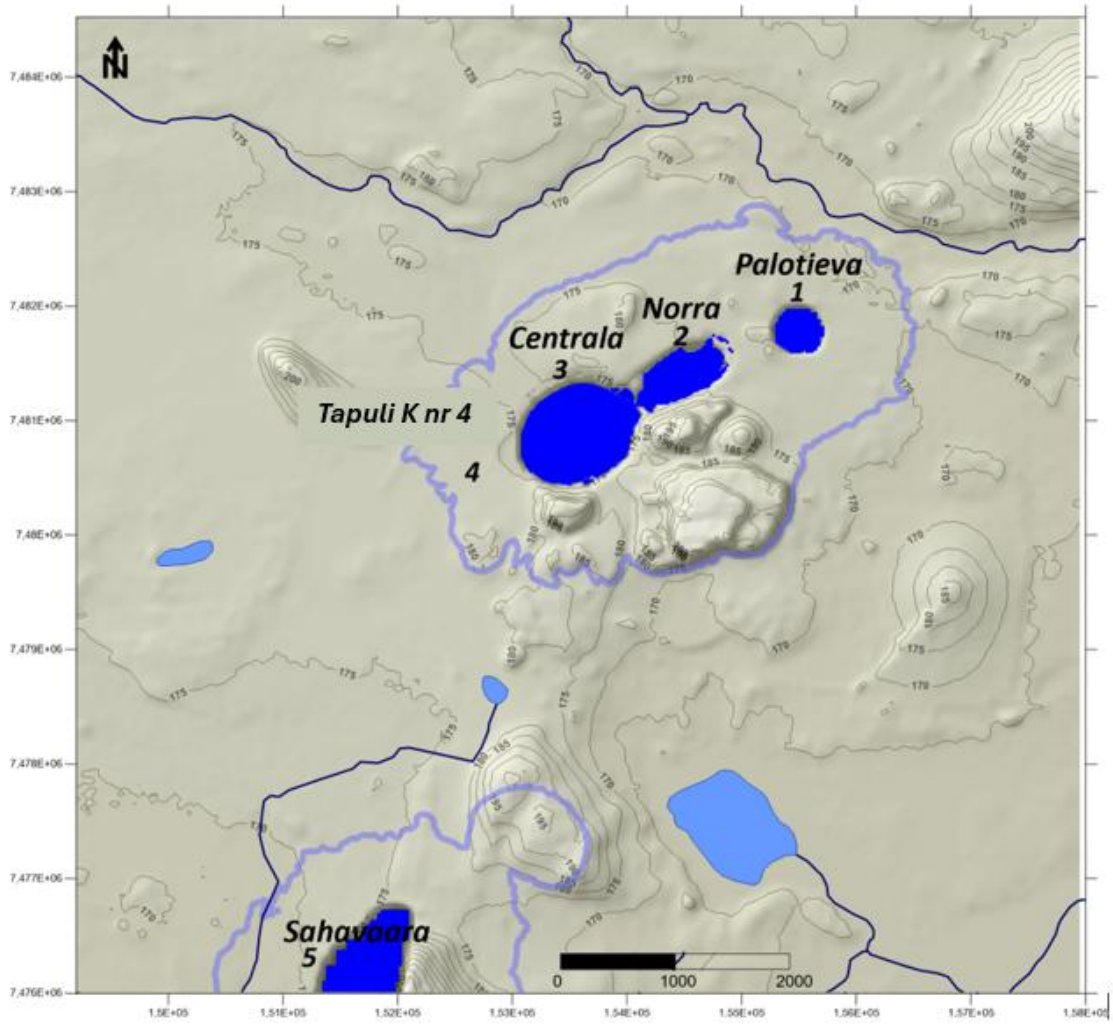
När väl dagbrotten är helt vattenfyllda kommer tre dagbrottssjöar att ha bildats, där Tapuli K nr 4 bildar en sammanhängande sjö tillsammans med centrala och norra dagbrotten. Dagbrottssjön förväntas ha ett utflöde i nordöstra änden av det norra dagbrottet och följa topografins lutning via Palotieva och därefter norrut mot Aareajoki. Återfyllnaden kommer även innebära att grundvattenytan omgivande dagbrotten höjs och tidigare grundvattenutströmningsområden till stor del återställs. Området med mer än 0,3 m höjning av grundvattenytan jämfört med referensscenariot och dagbrottssjöarnas utbredning redovisas i Figur 20.



Figur 20. Gräns för område med minst 0,3 m höjning av grundvattenytan i jämförelse med referensscenariot (blå linje). Dagbrotten är numrerade från norr till söder med 1 till 5.

5.4 Nollalternativ

Nollalternativet innebär att Tapuli K nr 4 inte bryts ut, att tillståndsgivna och planerade dagbrott inom Palotieva och Sahavaara bryts färdigt och sedan får återfyllas. Återfyllnadstider är även i detta fall ca 25 år.
Området där omgivande grundvattenyta höjs med mer än 0,3 m jämfört med referensalternativet och dagbrottssjöarnas utbredning redovisas i Figur 21. Även för nollalternativet förväntas ett utflöde i nordöstra änden av det norra dagbrottet.



Figur 21. Gräns för område med minst 0,3 m höjning av grundvattenytan för nollalternativet i jämförelse med referensscenariot (blå linje).

6. Slutsatser

Tack vare att en stor mängd data har samlats in under en lång period, före gruvverksamheten påbörjades och under driften av Tapuligruvan, är det hydrogeologiska systemet som omger gruvan välstuderat. Baserat på detta har en konceptuell förståelse för systemet och en beräkningsmodell byggts upp som mycket väl representerar systemet. Framtagen modell är välkalibrerad mot nuvarande förhållanden och bedöms ge prediktioner för framtida utveckling med hög tillförlighet.

Den planerade verksamheten med dagbrott inom koncessionsområdet Tapuli K nr 4 medför ett ökat länshållningsflöde från Tapuligruvan med ca 0,6 Mm^3/år. Samtidigt ökar påverkansområdet i sydvästlig riktning. Jämfört med referensalternativet påverkas nya områden på ca 185 ha sydväst om dagbrotten. Inom detta område finns ca 94 ha våtmarker där en avsänkt grundvattenyta predikteras. Ökningen beror främst på att fotavtrycket för dagbrotten ökar. Ingen ökad påverkan bedöms uppkomma öster och norr om nuvarande dagbrott. Jämfört med tidigare framtaget påverkansområde vid tillståndsprövning för mål M 2090-19 påverkas ytterligare 72 ha sydväst om dagbrotten, medan påverkansområdet norr och öster om dagbrotten blir betydligt mindre.

Planerad verksamhet inom Tapuli K nr 4 bedöms ge en liten påverkan (mindre än 5 %) på omgivande ytvattensystem. I Mellajoki och Aareajoki beräknas en flödesminskning på 0,6 % respektive 0,1 % som årsmedel. I Patojoki beräknas flödesminskningen bli 3,0 % som årsmedel och i utloppet till Ruuttijärvi 2,0 %. Huruvida denna prognosticerade flödesminskning föranleder behov av skyddsåtgärder kommer att utredas inom ramen för tillståndsprövning. Inga andra grundvattenberoende objekt bedöms kunna påverkas av verksamheten inom Tapuli K nr 4.

Efter att gruvområdet har efterbehandlats kommer dagbrotten av återfyllas av naturligt tillrinnande grundvatten och nederbörd vilket bedöms ta ca 25 år. En sammanhängande dagbrottsjö med utlopp i nordost mot Aareajoki bedöms uppstå för Tapuli K nr 4, centrala och norra dagbrottet. Runt dagbrotten kommer en återhämtning av grundvattenytan att ske och inom stora delar kommer en ytnära grundvattenyta att återställas.

7. Referenser

Geosyntec 2024. Fältrapport Hydrogeologi Sahavaara dagbrott, 2024-01-12

Golder 2019. PM Hydrogeologi Kaunisvaara gruvverksamhet – hållbarhetsprövning. Bilaga H2 till ansökan. Daterad 2019-06-10.

KIAB 2024. Sampa Ngunde, personal communication during site visit 2024-05-16

Pöyry (2009b) Tapuli hydrological investigations, Groundwater flow analysis and modelling, phase 4, 2009-12-22

Rhén, Ingvar; Forsmark, Torbjörn; Hartley, Lee; Jackson, Peter; Roberts, David; Swan, Dave; Gylling, Björn. 2008. SKB R-08-78 Hydrogeological conceptualisation and parameterisation. Site descriptive modelling SDM-Site Laxemar

SRK 2022. Tapuli – Phase 3 Design and Phase 2 Reconciliation, June 2022

WSP 2020. PM Brunnsinventering och inventering av grundvattenrör Kaunisvaara och Sahavaara. Upprättad för Kaunis Iron AB. Daterad 2020-11-17

Stockholm 2025-12-19
För Geosyntec Consultants AB



Fredrik Alderman, ansvarig hydrogeolog

Geosyntec consultants

Bilaga 1

Formell beskrivning Geoan

Grundvattenflödet är beräknat med en matematisk modell. Den upprättade formella modellen är en matematisk beskrivning av det studerade flödessystemet. Beskrivningen bygger på en kontinuumbetraktelse. Beskrivningen är tredimensionell.

Den formella modellen är baserad på ett numeriskt angreppssätt och upprättad i datorprogrammet Geoan (diskuteras i större detalj nedan). Geoan använder den finita differensmetoden för att numeriskt lösa den matematiska beskrivningen. Det studerade modellområdet indelas i beräkningsceller, som kan vara av olika storlekar. Egenskaper hos det studerade systemet som är skalärer (tex tryck, porositet och salinitet) definieras i cellernas centrum, men riktningsberoende egenskaper (tex hydraulisk konduktivitet och flöde) definieras eller beräknas för cellernas väggar.

Den grundläggande ekvationen för mättat grundvattenflöde, som löses i Geoan, baseras på Darcys lag och har följande form när densitetseffekter inkluderas:

Ekvation 1

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\rho_d}{\rho_0} K_{x0} \frac{\partial p}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\rho_d}{\rho_0} K_{y0} \frac{\partial p}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\rho_d}{\rho_0} K_{z0} \frac{\partial\left(p+z \rho_F\right)}{\partial z}\right)-V_F=Ss \frac{\partial p}{\partial t}$$

p = Pressure, defined in meters of fresh water at a reference temperature [m]
k = Permeability [m^2]
K_{x0} , K_{y0} , K_{z0} = Hydraulic conductivity considering fresh water at a given reference temp. [m/s]
ρ_d = Density of water with dissolved components at a given temperature [Kg/m^3]
ρ_0 = Density of fresh water at a given reference temperature [Kg/m^3]
ρ_F = Density factor (dimensionless, 1=density of fresh water) [-]
z = Elevation [m]
V_F = Volumetric flow (flow per unit volume), specified inflow and outflow of water [s^{-1}]
Ss = Specific storage of flow medium [m^{-1}]
t = Time [s]

Härledningen av ekvationen ovan från Darcys lag är välkänd, se t.ex. Bear and Verruit (1987), eller Geoan Users Guide (Holmén, 2022). Ekvationen, tillsammans med randvillkor, initialvillkor och parametervärden, bildar en matematisk representation av det studerade systemet. Analytiska lösningar för den ovan beskrivna matematiska representationen förekommer endast för mycket enkla system, därför används numeriska modeller (som t.ex. Geoan).

Ekvationen ovan löses med hjälp av finita differenser. Den finita differensmetoden och programkoden Geoan är översiktligt presenterade i Holmén (1992) och Holmén (1997). För en detaljerad presentation av Geoan-koden hänvisas till Geoan Users Guide (Holmén, 2017).

Geoan är en numerisk modell för beräkningar av grundvattenpotential, flöde, hastighet och transport i tre dimensioner liksom ytvattenflöden och hastighet på ytvattenflödet. Geoan kan dessutom hantera transport av lösta ämnen och densitetsberoende flöde (tex saltvatteninträngning). Vidare kan även temperaturer och permafrost inkluderas en Geoan-modell.

En Geoan-modell inkluderar således både grundvattenflöde och ytvattenflöde. Nivån på grundvattenytan och storleken på in- och utströmningsområden, samt storleken på den lokala grundvattenbildningen, beräknas i modellen på basis av topografi, genomsläpplighet, avrinning och det studerade systemets tillstånd (stationärt eller transient).

Med hjälp av en beräkningsmodul som analyserar flödesvägar kan programmet beräkna flödesvägar som är kontinuerliga i både grundvatten- och ytvattensystemen. I modellen kan flödesvägarna alternera mellan båda systemen (ytvatten och grundvatten) beroende på systemet som studeras.

Geosyntec consultants

Bilaga 2

Beskrivning av DFN-modell

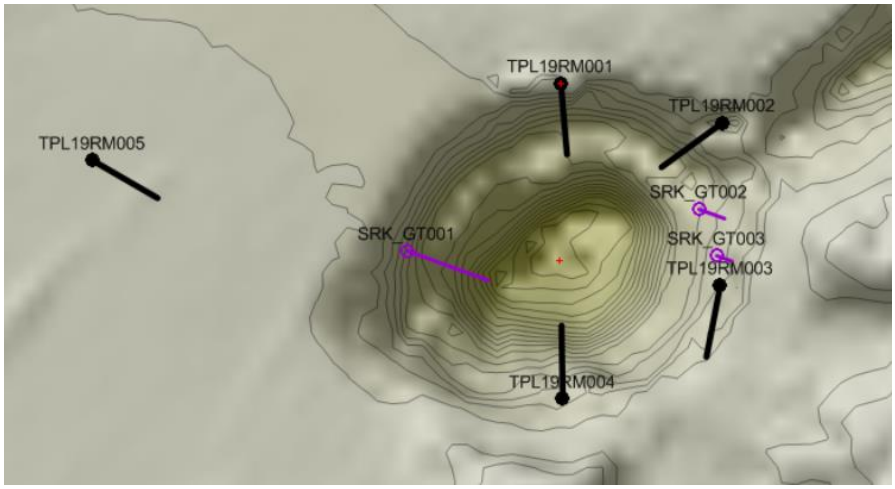
1. Beskrivning av etablerad DFN-modell

1.1 Introduktion

Diskreta spricknätverk (DFN) används inom geologi och teknik som en metod för att beskriva sprickegenskaperna hos ett sprucket medium, t.ex. en bergmassa. Genom att använda sannolikhetsfördelningar skapar metoden en tredimensionell representation av diskreta sprickor, med orientering, storlek, geometri och eventuellt de hydrauliska egenskaperna hos nätverket av sprickor. DFN-metoder används inom hydrogeologi, geologi, tunnelarbete, gruvdrift, civilingenjörskonst och reservoarteknik med mera, och är en viktig del av design och prestandabedömning av underjordiska anläggningar för lagring av farligt avfall och kärnavfall. DFN-modellen har etablerats med hjälp av modellkoden GEOAN-DFN (Holmén, 2024).

1.2 Sprickorienteringar – Observerade och uppmätta

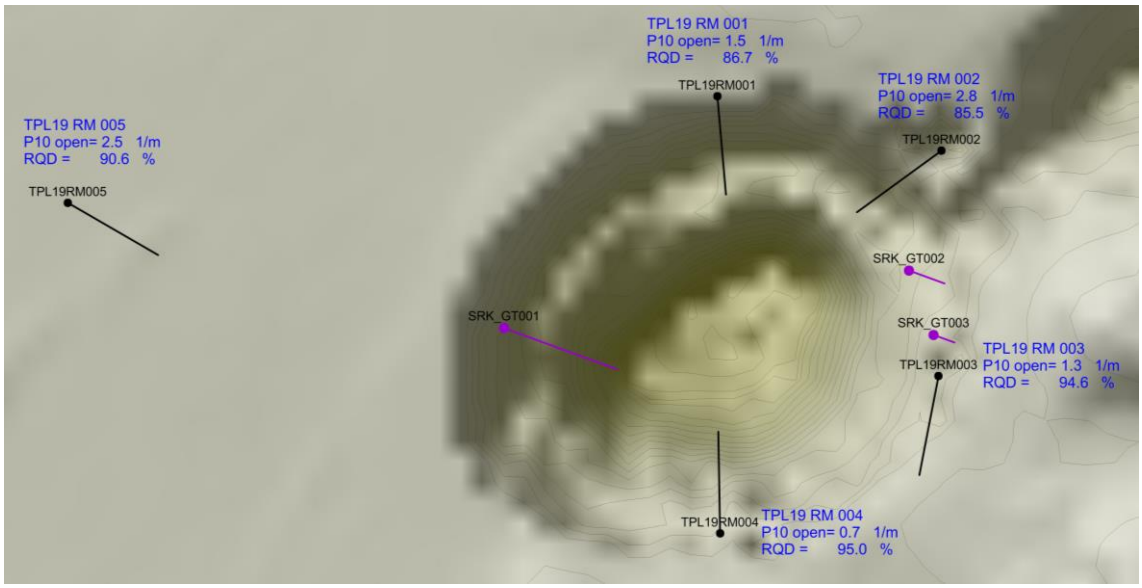
Sprickorienteringar har mätts i fem borrhål, se Figur 1. Borrhålen är:
SKR GT001, TPL19RM001, TPL19RM002, TPL19RM003, TPL19RM004, TPL19RM005.
Sprickor har också karterats på väggarna i dagbrotten.



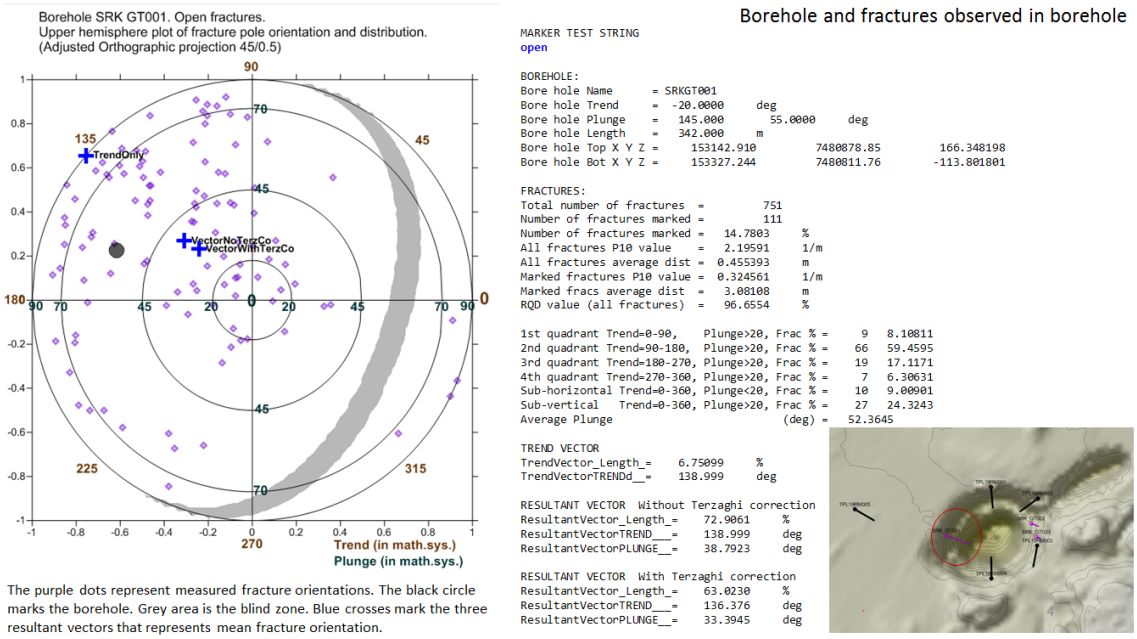
Figur 1 Sprickorienteringar har mätts i fem borrhål, som visas i figuren ovan: SKR GT001, TPL19RM001, TPL19RM002, TPL19RM003, TPL19RM004, TPL19RM005.

De uppmätta sprickorienteringarna i de studerade borrhålen har analyserats och plottats i poldiagram. En sammanfattning av beräknade P10-värden (antal öppna sprickor per meter) och RQD-värden (bergkvalitet beaktande alla sprickor) ges i Figur 2. Sprickfrekvens, resulterande vektorer, RQD-värden, blindzoner och många andra egenskaper har beräknats för varje borrhål, se Figur 3 till Figur 10. Från figurerna kan vi dra slutsatsen att om både P10-värdena (observerade öppna sprickor) och RQD-värdena (alla observerade sprickor) studeras

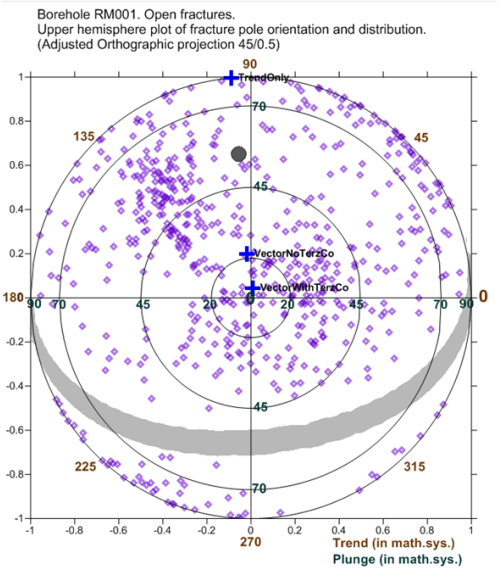
tillsammans, tenderar bergmassan med flest öppna sprickor (P10) och de lägsta bergartsvärdena (RQD) att förekomma i den norra och nordöstra delen av den öppna gropen.



Figur 2 Sammanställning av beräknade P10-värden (öppna sprickor) och RQD.värden (alla observerade sprickor) för studerade borrhål.



Figur 3 Sprickdata SRK GT001



The purple dots represent measured fracture orientations. The black circle marks the borehole. Grey area is the blind zone. Blue crosses mark the three resultant vectors that represents mean fracture orientation.

Figur 4 Sprickdata RM001.

Borehole and fractures observed in borehole

```
MARKER TEST STRING
open

BOREHOLE:
Bore hole Name      = TPL19RM001
Bore hole Trend     =  -85.0000     deg
Bore hole Plunge    =   145.000      55.0000     deg
Bore hole Length    =   390.000     m
Bore hole Top X Y Z =     153553.517          7481323.92          162.000000
Bore hole Bot X Y Z =     153573.013          7481101.08          -157.469297

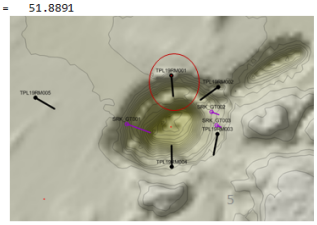
FRACTURES:
Total number of fractures  =        2166
Number of fractures marked =         604
Number of fractures marked =    27.8855     %
All fractures P10 value    =    5.55385     1/m
All fractures average dist =   0.180055     m
Marked fractures P10 value =    1.54872     1/m
Marked fracs average dist  =   0.645695     m
RQD value (all fractures)  =    86.6999     %

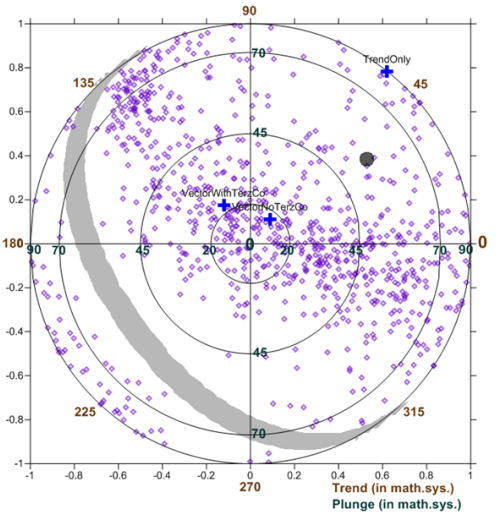
1st quadrant Trend=0-90,    Plunge>20, Frac % =    180   29.8013
2nd quadrant Trend=90-180,  Plunge>20, Frac % =    220   36.4238
3rd quadrant Trend=180-270, Plunge>20, Frac % =     89   14.7351
4th quadrant Trend=270-360, Plunge>20, Frac % =     74   12.2517
Sub-horizontal Trend=0-360, Plunge<20, Frac % =     41   6.78808
Sub-vertical   Trend=0-360, Plunge>20, Frac % =    154   25.4967
Average Plunge                         (deg) =   51.8891

TREND VECTOR
TrendVector_Length_=    6.41506     %
TrendVectorTREND___=    95.1458     deg

RESULTANT VECTOR  Without Terzaghi correction
ResultantVector_Length_=    61.8017     %
ResultantVectorTREND___=    95.1458     deg
ResultantVectorPLUNGE__=    21.8537     deg

 RESULTANT VECTOR  With Terzaghi correction
ResultantVector_Length_=    50.5569     %
ResultantVectorTREND___=    77.8226     deg
ResultantVectorPLUNGE__=    5.44114     deg
```





The purple dots represent measured fracture orientations. The black circle marks the borehole. Grey area is the blind zone. Blue crosses mark the three resultant vectors that represents mean fracture orientation.

Figur 5 Sprickdata RM002.

Borehole and fractures observed in borehole

```
MARKER TEST STRING
open

BOREHOLE:
Bore hole Name      = TPL19RM002
Bore hole Trend     =  -144.000     deg
Bore hole Plunge    =   145.000      55.0000     deg
Bore hole Length    =   305.000     m
Bore hole Top X Y Z =     153985.048          7481219.67          172.000000
Bore hole Bot X Y Z =     153843.518          7481116.85          -77.8413735

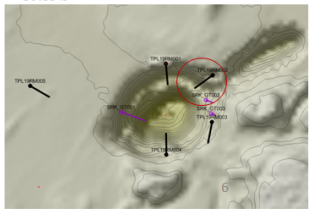
FRACTURES:
Total number of fractures  =        1767
Number of fractures marked =         842
Number of fractures marked =    47.6514     %
All fractures P10 value    =    5.79344     1/m
All fractures average dist =   0.172609     m
Marked fractures P10 value =    2.76066     1/m
Marked fracs average dist  =   0.362233     m
RQD value (all fractures)  =    85.5357     %

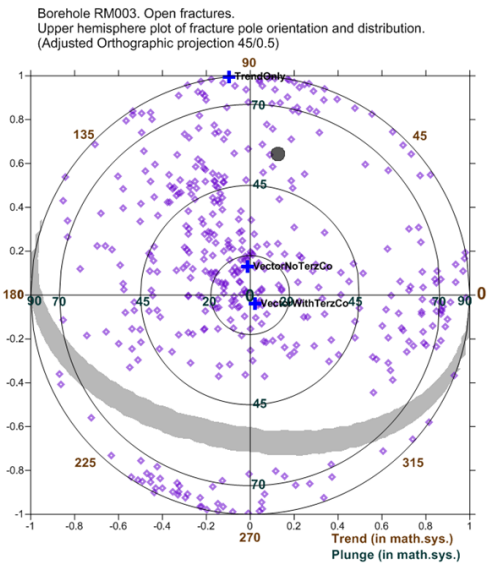
1st quadrant Trend=0-90,    Plunge>20, Frac % =    174   20.6651
2nd quadrant Trend=90-180,  Plunge>20, Frac % =    262   31.1164
3rd quadrant Trend=180-270, Plunge>20, Frac % =     77   9.14489
4th quadrant Trend=270-360, Plunge>20, Frac % =    247   29.3349
Sub-horizontal Trend=0-360, Plunge<20, Frac % =     82   9.73872
Sub-vertical   Trend=0-360, Plunge>20, Frac % =    184   21.8527
Average Plunge                         (deg) =   50.3349

TREND VECTOR
TrendVector_Length_=    8.28046     %
TrendVectorTREND___=    51.6280     deg

RESULTANT VECTOR  Without Terzaghi correction
ResultantVector_Length_=    61.8897     %
ResultantVectorTREND___=    51.6280     deg
ResultantVectorPLUNGE__=    16.3065     deg

RESULTANT VECTOR  With Terzaghi correction
ResultantVector_Length_=    53.3445     %
ResultantVectorTREND___=    124.778     deg
ResultantVectorPLUNGE__=    23.1462     deg
```





The purple dots represent measured fracture orientations. The black circle marks the borehole. Grey area is the blind zone. Blue crosses mark the three resultant vectors that represents mean fracture orientation.

Figur 6 Sprickdata RM003.

Borehole and fractures observed in borehole

```
MARKER TEST STRING
open

BOREHOLE:
Bore hole Name      = TPL19RM003
Bore hole Trend     =  -101.000     deg
Bore hole Plunge    =   145.000       55.0000     deg
Bore hole Length    =   338.000     m
Bore hole Top X Y Z =     153979.258          7480786.96          170.000000
Bore hole Bot X Y Z =     153942.266          7480596.66         -106.873391

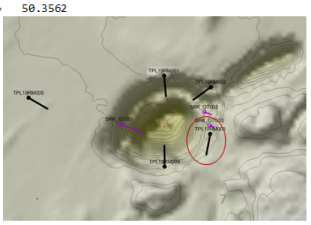
FRACTURES:
Total number of fractures  =        1421
Number of fractures marked =         434
Number of fractures marked =   30.5419     %
All fractures P10 value    =   4.20414     1/m
All fractures average dist =  0.237861     m
Marked fractures P10 value =   1.28402     1/m
Marked fracs average dist  =  0.778802     m
RQD value (all fractures)  =   94.6226     %

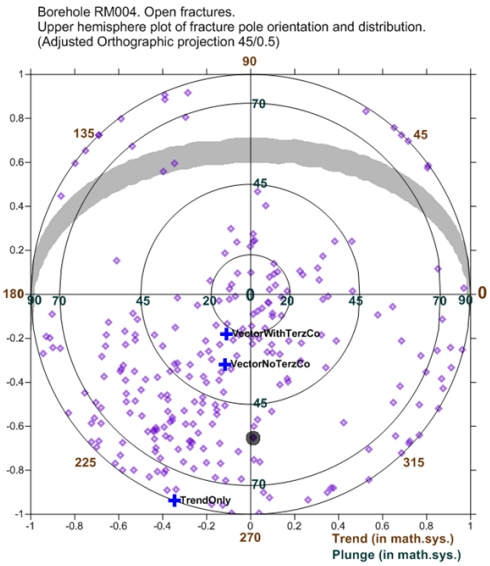
1st quadrant Trend=0-90,    Plunge>20, Frac % =    90   20.7373
2nd quadrant Trend=90-180,  Plunge>20, Frac % =   146   33.6406
3rd quadrant Trend=180-270, Plunge>20, Frac % =    71   16.3594
4th quadrant Trend=270-360, Plunge>20, Frac % =    74   17.0507
Sub-horizontal Trend=0-360, Plunge<20, Frac % =    53   12.2120
Sub-vertical   Trend=0-360, Plunge>20, Frac % =   115   26.4977
Average Plunge                          (deg) =   50.3562

TREND VECTOR
TrendVector_Length_=    4.79316     %
TrendVectorTREND___=    95.4995     deg

RESULTANT VECTOR  Without Terzaghi correction
ResultantVector_Length_=    60.5654     %
ResultantVectorTREND___=    95.4995     deg
ResultantVectorPLUNGE__=    15.0179     deg

RESULTANT VECTOR  With Terzaghi correction
ResultantVector_Length_=    50.0751     %
ResultantVectorTREND___=    298.607     deg
ResultantVectorPLUNGE__=    5.47999     deg
```





The purple dots represent measured fracture orientations. The black circle marks the borehole. Grey area is the blind zone. Blue crosses mark the three resultant vectors that represents mean fracture orientation.

Figur 7 Sprickdata RM004.

Borehole and fractures observed in borehole

```
MARKER TEST STRING
open

BOREHOLE:
Bore hole Name      = TPL19RM004
Bore hole Trend     =  -269.000     deg
Bore hole Plunge    =   145.000       55.0000     deg
Bore hole Length    =   340.000     m
Bore hole Top X Y Z =     153558.695          7480484.72          170.000000
Bore hole Bot X Y Z =     153555.292          7480679.70         -108.511695

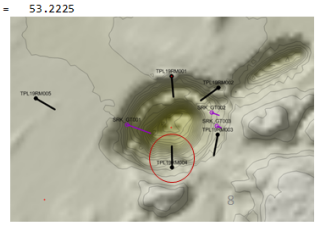
FRACTURES:
Total number of fractures  =         569
Number of fractures marked =         250
Number of fractures marked =   43.9367     %
All fractures P10 value    =   1.67353     1/m
All fractures average dist =  0.597540     m
Marked fractures P10 value =  0.735294     1/m
Marked fracs average dist  =   1.36000     m
RQD value (all fractures)  =   95.0173     %

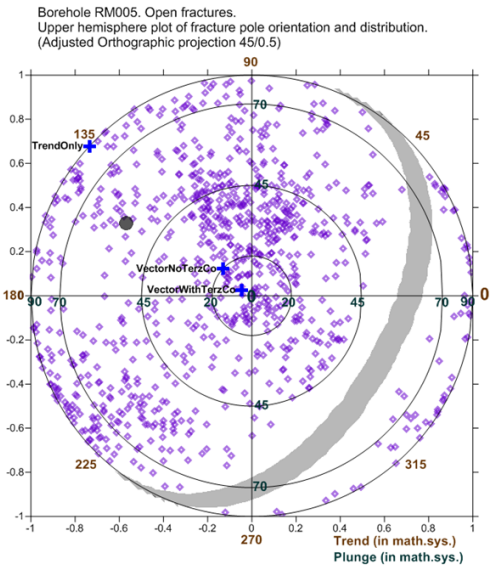
1st quadrant Trend=0-90,    Plunge>20, Frac % =    21   8.40000
2nd quadrant Trend=90-180,  Plunge>20, Frac % =    19   7.60000
3rd quadrant Trend=180-270, Plunge>20, Frac % =   127   50.8000
4th quadrant Trend=270-360, Plunge>20, Frac % =    56   22.4000
Sub-horizontal Trend=0-360, Plunge<20, Frac % =    27   10.8000
Sub-vertical   Trend=0-360, Plunge>20, Frac % =    68   27.2000
Average Plunge                          (deg) =   53.2225

TREND VECTOR
TrendVector_Length_=    16.1619     %
TrendVectorTREND___=    249.750     deg

RESULTANT VECTOR  Without Terzaghi correction
ResultantVector_Length_=    66.3404     %
ResultantVectorTREND___=    249.750     deg
ResultantVectorPLUNGE__=    33.6750     deg

 RESULTANT VECTOR  With Terzaghi correction
ResultantVector_Length_=    50.7349     %
ResultantVectorTREND___=    238.419     deg
ResultantVectorPLUNGE__=    22.9635     deg
```





The purple dots represent measured fracture orientations. The black circle marks the borehole. Grey area is the blind zone. Blue crosses mark the three resultant vectors that represents mean fracture orientation.

Figur 8 Sprickdata RM005.

Borehole and fractures observed in borehole

```
MARKER TEST STRING
open

BOREHOLE:
Bore hole Name      = TPL19RM005
Bore hole Trend     =  -30.0000     deg
Bore hole Plunge    =   145.000      55.0000     deg
Bore hole Length    =   350.000     m
Bore hole Top X Y Z =     152303.264          7481119.52          178.000000
Bore hole Bot X Y Z =     152477.120          7481019.14          -108.703216

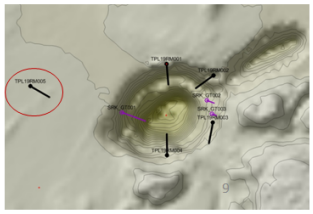
FRACTURES:
Total number of fractures  =        2142
Number of fractures marked =         881
Number of fractures marked =   41.1298     %
All fractures P10 value    =   6.12000     1/m
All fractures average dist =  0.163399     m
Marked fractures P10 value =   2.51714     1/m
Marked fracs average dist  =  0.397276     m
RQD value (all fractures)  =   90.5852     %

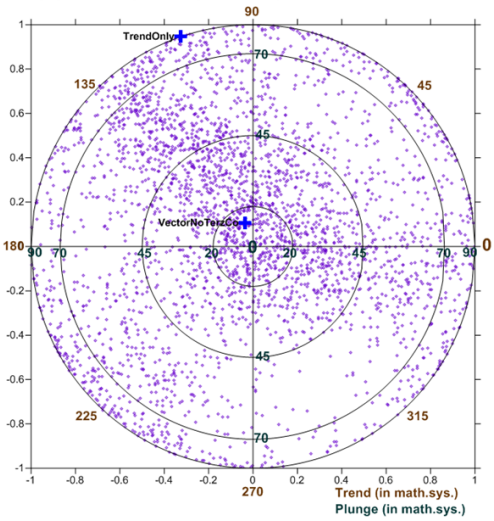
1st quadrant Trend=0-90,    Plunge>20, Frac % =   199   22.5880
2nd quadrant Trend=90-180,  Plunge>20, Frac % =   287   32.5766
3rd quadrant Trend=180-270, Plunge>20, Frac % =   220   24.9716
4th quadrant Trend=270-360, Plunge>20, Frac % =    98   11.1237
Sub-horizontal Trend=0-360, Plunge<20, Frac % =    77   8.74007
Sub-vertical   Trend=0-360, Plunge>20, Frac % =   205   23.2690
Average Plunge                         (deg) =   51.0666

TREND VECTOR
TrendVector_Length_=    8.71973     %
TrendVectorTREND___=    137.362     deg

RESULTANT VECTOR  Without Terzaghi correction
ResultantVector_Length_=    62.1512     %
ResultantVectorTREND___=    137.362     deg
ResultantVectorPLUNGE__=    19.9447     deg

RESULTANT VECTOR  With Terzaghi correction
ResultantVector_Length_=    51.5518     %
ResultantVectorTREND___=    149.850     deg
ResultantVectorPLUNGE__=    6.10698     deg
```





The purple dots represent measured fracture orientations. Blue crosses mark the three resultant vectors that represents mean fracture orientation.

Figur 9 Sprickdata alla borrhål.

Borehole and fractures observed in borehole

```
MARKER TEST STRING
open

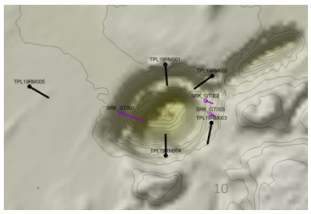
BOREHOLE:
Bore hole Name      = ALL

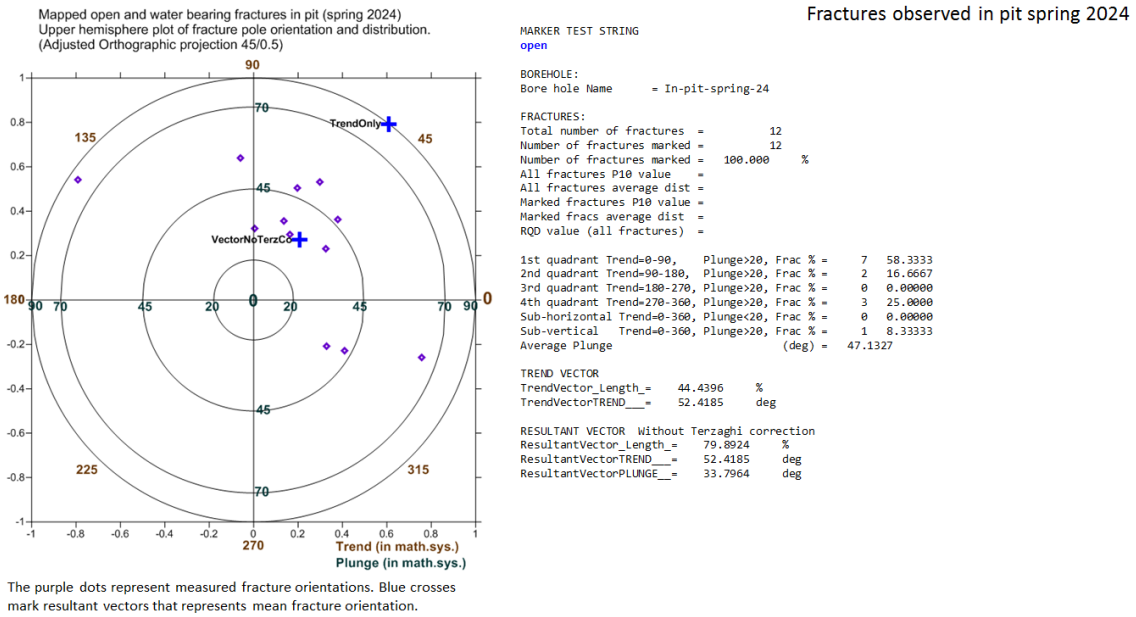
FRACTURES:
Total number of fractures  =        8816
Number of fractures marked =        3122
Number of fractures marked =   35.4129     %

1st quadrant Trend=0-90,    Plunge>20, Frac % =   673   21.5567
2nd quadrant Trend=90-180,  Plunge>20, Frac % =  1000   32.0308
3rd quadrant Trend=180-270, Plunge>20, Frac % =   603   19.3145
4th quadrant Trend=270-360, Plunge>20, Frac % =   556   17.8091
Sub-horizontal Trend=0-360, Plunge<20, Frac % =   290   9.28892
Sub-vertical   Trend=0-360, Plunge>20, Frac % =   753   24.1192
Average Plunge                         (deg) =   51.1484

TREND VECTOR
TrendVector_Length_=    4.73092     %
TrendVectorTREND___=    108.981     deg

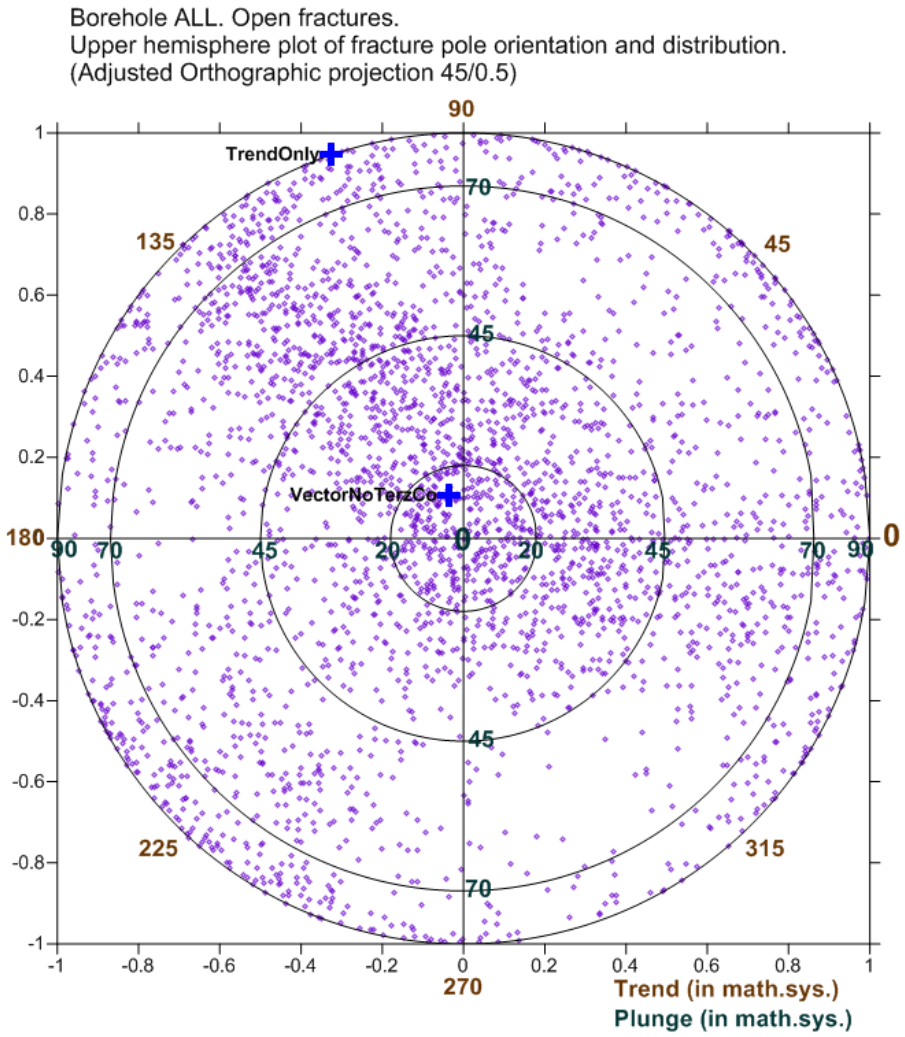
RESULTANT VECTOR  Without Terzaghi correction
ResultantVector_Length_=    59.6912     %
ResultantVectorTREND___=    108.981     deg
ResultantVectorPLUNGE__=    12.9327     deg
```





Figur 10 Sprickdata observerade öppna sprickor på dagbrottsvägg Tapuli centrala.

En betraktelse av orienteringen av alla öppna sprickor i alla borrhål ges i Figur 11 där sprickornas polära orientering och fördelning redovisas i ett poldiagram av övre halvklotet. Figuren visar att sprickornas orienteringar är mycket spridda, men med en svag tendens till en gördel-typ fördelning. Den resulterande vektorn som endast beaktar strykningsriktning för polära vektorer indikerar en medelstrykning på 109 grader. Den resulterande vektorn som beaktar både strykning och stupning för polära vektorer indikerar en medelstrykning på 109 grader och en medelstupning på 12 grader. Av matematiska skäl, och på grund av hur de resulterande vektorerna beräknas, kommer medelfallet (enligt vektoranalyser) att vara nära subhorisontellt om sprickorienteringarna är mycket spridda. Om vi istället beräknar en genomsnittlig stupning är den 51 grader, vilket indikerar att de flesta sprickor varken är subvertikala eller subhorisontella utan har en stupning mitt emellan. Stupningen av de öppna sprickorna tenderar att vara horisontell nedåt mot nordväst.



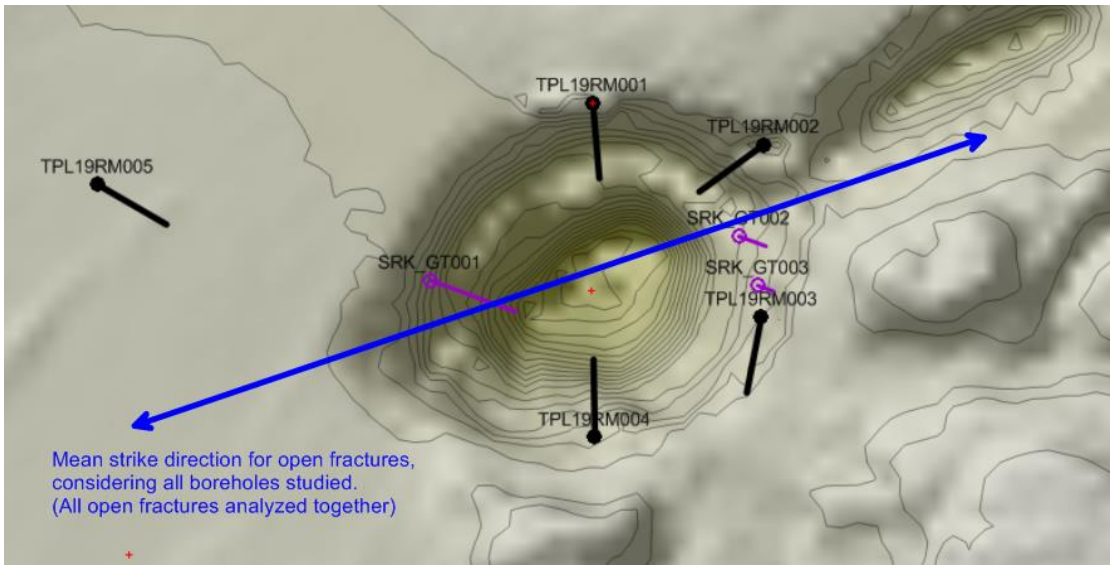
Figur 11 Poldiagram (övre halvklotet) över sprickornas orientering och fördelning, med beaktande av alla öppna sprickor i alla studerade borrhål. De lila prickarna representerar uppmätta sprickorienteringar. Blå kors markerar de resulterande vektorer för medelsprickorientering.

Den genomsnittliga strykningen (90 grader från medelstrykningsriktningen) för de öppna sprickorna ges av de resulterande vektorerna som beaktar orienteringen av alla öppna sprickor i alla borrhål, analyserade tillsammans. Kompassriktningen för medelvinkeln är cirka 70 grader, se Figur 12. Medelorienteringen av öppna sprickor sammanfaller med kontaktytan mellan skarn och kvarts-fyllit, med huvudriktningen för bergartssekvensen i stort och även med orienteringen hos Pajala skjuvzon. Bergartsekvensen i Tapuli-fyndigheten lutar ungefär 50–60° mot nordväst. Som nämnts ovan är den beräknade genomsnittliga stupningen för de öppna sprickorna lika med 51 grader mot nordväst. Därför sammanfaller både strykning och stupning hos de öppna sprickorna med den allmänna strykningen och stupningen i berggrunden.

En jämförelse av medelstrykningen för öppna sprickor och medelstrykningen för slutna sprickor, som ses i de olika borrhålen, visar att de slutna sprickorna har ett medelvärde som skiljer sig från medelstrykningen för de öppna sprickorna, även om skillnaden inte är så stor.

Detta är av visst intresse, eftersom det indikerar en anisotrop fördelning av permeabilitet. Det är troligt att spricknätet har sin största permeabilitet i samma riktning som medelstrykningen för de öppna sprickorna.

De stora strukturer som finns, förkastningszoner i det centrala dagbrottet och kontaktzonen mellan skarn och kvartsit/fyllit, anses inte vara strukturer med ökad transmissivitet viktiga för grundvattenflödet. Anledningen är att de har kartlagts vara fyllda av lermineral som bör minska genomsläppligheten. Följaktligen ingår de inte uttryckligen i modellen. Det är dock mycket sannolikt att sådana strukturer ingår i sprickstatistiken från borrhålen och därmed inkluderas i DFN-beskrivningen ändå.



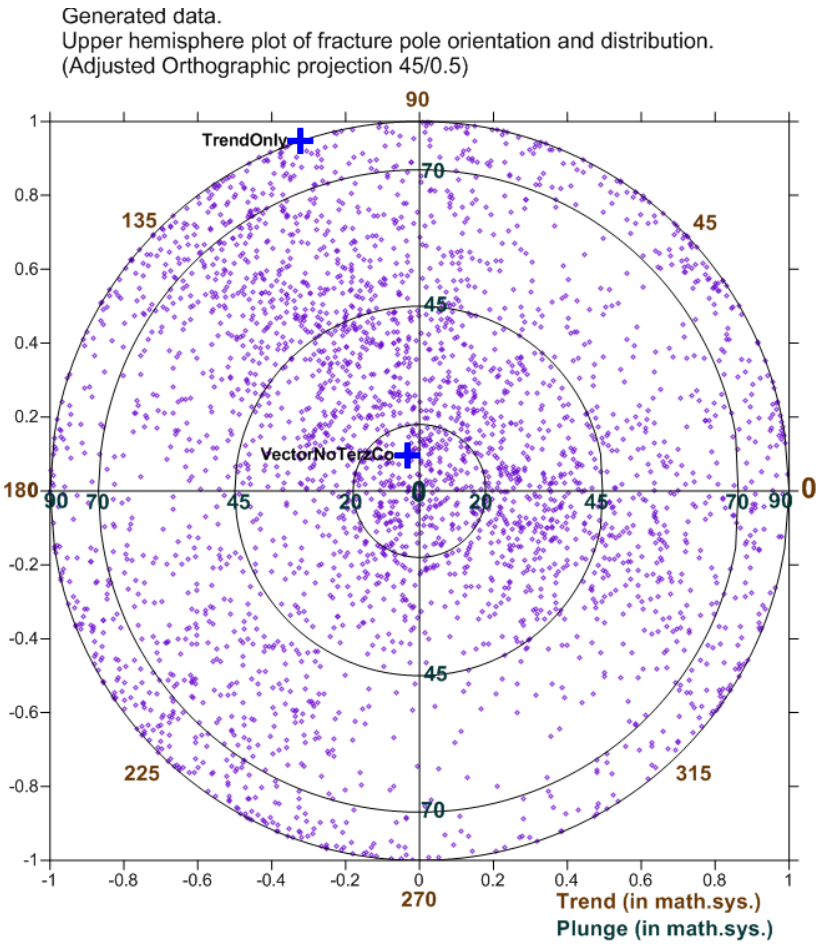
Figur 12 Beräknad medelstrykning hos öppna sprickor i alla studerade borrhål. Kompassriktningen för medelstrykningen är ungefär 70 grader.

1.3 Sprickorientering - Modellerad

För att kunna modellera sprickornas orienteringar behöver vi använda en matematisk beskrivning av sprickorienteringen. Det är ofta så att de observerade sprickorienteringarna ger en eller flera cirkulära kluster med begränsad spridning när de plottas i ett poldiagram. Sådana kluster är väl representerade av den Fisher-stokastiska fördelningen. De uppmätta sprickorienteringarna presenterade i Figur 11 bildar inte cirkulära kluster, istället är sprickornas orienteringar mycket spridda, men med en svag tendens till en gördel-typ fördelning. Därför kan vi inte använda Fischerfördelningen för att representera sprickorienteringen. Det finns gördelfördelningar som kan användas för att representera sprickorienteringar, men gördeltypfördelningen i Figur 11 visar också en förändring i genomsnittlig riktning när den korsar området med subhorisontella riktningar, vilket kan skapa vissa svårigheter. En bootstrapping-metod är sannolikt den bästa metoden för att modellera de observerade sprickorienteringarna. Bootstrapping är en väl fungerande metod om sprickor observeras i flera olika borrhål med olika borrhålsorienteringar, och om antalet observerade sprickorienteringar är stort.

För denna studie har bootstrappingmetodiken använts. Metoden använder observerade och uppmätta sprickorienteringar för direkt generering av nya slumpmässiga sprickorienteringar. Alla observerade orienteringar samlas i en lista av orienteringar. Bootstrapping-metoden väljer (läser) orienteringar slumpmässigt från den listan. När en orientering har lästs från listan kommer det orienteringsvärdet att användas som centrum för en Fisher-sannolikhetsfördelning. En ny enkel sprickorientering kommer att skapas med hjälp av Fisher-sannolikhetsfördelningen som är centrerad kring läsvärdet av sprickorienteringen. Proceduren att läsa av orienteringarna från listan och generera nya orienteringar upprepas tills önskat antal sprickorienteringar har uppnåtts. Sprickorienteringar som genereras med hjälp av bootstrapping-metodiken presenteras i Figur 13.

En jämförelse mellan Figur 11 och Figur 13 visar att bootstrapping-metoden genererar en fördelning av sprickorienteringar som är mycket lik den observerade fördelningen, men inte identisk. Alla genererade orienteringar skiljer sig från de observerade orienteringarna. Den genererade fördelningen kommer också att visa en något större spridning i orienteringar. De resulterande vektorerna är mycket lika när man jämför de observerade och genererade fördelningarna.



Figur 13 Poldiagram (övre halvklotet) av genererade sprickors pol-orientering (lila prickar) och distribution. Blå kors markerar resulterande vektorer för medelsprickorientering.

1.4 Sprickstorlek

När sprickor genereras representeras sprickornas radie av en sannolikhetsfördelning. Flera olika fördelningar kan teoretiskt användas. Till exempel: Uniform fördelning mellan ett minimi- och ett maximalt värde, normalfördelning, log-normalfördelning och Paretofördelningar (potenslag). I denna studie har vi använt en Paretofördelning.

Det är ett kännetecken för Paretofördelningen att den – relativt sett – ger ett mycket stort antal små värden (t.ex. små sprickor), och ett litet antal mycket stora värden (t.ex. mycket stora sprickor), samt en kontinuerlig fördelning däremellan. De minsta sprickorna kan antas representera sprickor som inte är öppna och inte vattenbärande. Det är rimligt att endast skapa sprickor inom en viss övre del av fördelningen av sprickradier.

Paretofördelningen definieras av en skalparameter (S), vilket är ett minimivärde, och en formparameter kallad (A). Dessutom används Minimum- och Maximumvärden som definierar intervallet inom sannolikhetsfördelningen som används vid generering av sprickradierna; Det är därför endast sannolikhetsområdet mellan min- och maxvärdena som används vid generering av sprickor.

Exempel på Pareto- (eller potenslags-) fördelningar för sprickstorlek ges i Tabell 1 nedan. Beskrivningarna av parametrarna i tabellerna är resultat av platsundersökningar i Forsmark- och Laxemar-områdena i Sverige, utförda av SKB. Från tabellerna drar vi slutsatsen att A-parametern (Kr i tabellen) varierar ungefär mellan 2,5 och 2,9.

Tabell 1. Beskrivning av DFN-parametrar, resultat från SKB:s platsudersökningarn.

Table 4-4. Description of DFN parameters for OPO fractures in hydraulic domains HRD_C and HRD_W at Laxemar with four depth zones (Rhén et al. 2008, Tables 10-2, 10-3).

		HRD_C		HRD_W	
Depth interval (masl)	**Set**	**Size model, power-law (r_0, k_r)**	**Intensity, (P_{32}), valid size interval: (r_0, 560 m)**	**Size model, power-law (r_0, k_r)**	**Intensity, (P_{32}), valid size interval: (r_0, 560 m)**
–150 to 50	ENE	(2.7, 0.038)	0.52	(2.7, 0.038)	0.44
	WNW	(2.5, 0.038)	0.95	(2.5, 0.038)	0.61
	N-S	(2.7, 0.038)	0.54	(2.65, 0.038)	0.54
	SubH	(2.7, 0.038)	1.20	(2.55, 0.038)	1.03
–400 to –150	ENE	(2.8, 0.038)	0.47	(2.7, 0.038)	0.28
	WNW	(2.4, 0.038)	0.55	(2.5, 0.038)	0.38
	N-S	(2.85, 0.038)	0.63	(2.9, 0.038)	0.4
	SubH	(2.8, 0.038)	0.71	(2.7, 0.038)	0.5
–650 to –400	ENE	(2.75, 0.038)	0.38	(2.6, 0.038)	0.17
	WNW	(2.5, 0.038)	0.74	(2.6, 0.038)	0.33
	N-S	(2.85, 0.038)	0.47	(2.6, 0.038)	0.30
	SubH	(2.85, 0.038)	0.58	(2.65, 0.038)	0.38
–1,000 to –650	ENE	(2.85, 0.038)	0.46	(2.8, 0.038)	0.12
	WNW	(2.75, 0.038)	0.73	(2.8, 0.038)	0.09
	N-S	(2.95, 0.038)	0.25	(2.8, 0.038)	0.14
	SubH	(2.9, 0.038)	0.35	(2.8, 0.038)	0.65

Den etablerade modellen fokuserar på öppna, stora och vattenförande sprickor. Små och slutna sprickor ingår inte i modellen. För den etablerade modellen är A-parametern lika med 2,8 och S-parametern är lika med 1 m. Värden på sprickradier mindre än 4 m inkluderades inte i modellen (genererades inte). Det antas att sprickor med så liten radie inte är öppna, eller inte vattenbärande, eller inte väl sammankopplade, eller inte genomsläppliga. Sprickor med radie större än 200 m inkluderades inte heller. Fördelningen av sprickradier i DFN-modellen presenteras I Figur 15.

The established model is focused on open, large and water-bearing fractures. Small and sealed fractures are not included in the model. For the established model the A parameter is equal to 2.8 and the S parameter is equal to 1 m. Values of fracture radii smaller than 4 m were not included in the model (not generated). It is assumed that fractures with such a small radius are not open, or not water-bearing, or not well connected, or not permeable. Fractures with a radius larger than 200 m were not included either. The distribution of fracture radius in the DFN-model is presented in Figur 15.

1.5 Antal sprickor och sprickarea

Antalet sprickor i en bergmassa kallas sprickintensitet, eller spricktäthet. Sprickintensiteten definieras för olika rumsliga dimensioner: intensitet längs en linje (P10), intensitet på ett område (P21) och intensitet inuti en volym (P32).

Sprickintensiteten P10 [1/m] är antalet sprickor längs en provtagningslinje, dividerat med längden på provtagningslinjen, t.ex. antal sprickor i ett borrhål dividerat med borrhålets längd.

Sprickintensiteten P32 [m2/m3] är den totala ytan av sprickorna dividerat med volymen av området där sprickorna finns (P32-volym).

Antalet sprickor definieras normalt inte direkt i en DFN-modell, inte heller sprickarea, utan sprickarea per volymenhet (P32). P32-värdet kommer sedan indirekt att ge antalet sprickor i modellen via antalet sprickor, sprickornas storlek och storleken på den studerade bergvolymen: Summan av sprickarean, dividerat med den studerade volymen = P32.

P10-värdena i borrhål på den undersökta platsen har beräknats (Figur 2). För ett antaget värde på P32 kommer modellen att producera P10-värden i teoretiska borrhål inuti modellen. Det antagna P32-värdet justeras tills de simulerade P10-värdena är i enlighet med något målvärde som är korrelerat med de observerade P10-värdena. Genom att betrakta medelvärden kan förhållandet mellan de verkliga (sanna) P10-värdena och P10-värdena i modellen beräknas. Detta förhållande kan sedan användas för att beräkna en exakt uppskattning av P32 enligt följande ekvation:

$$\frac{P10_{TRUE}}{P10_{MODEL}} = \frac{P21_{TRUE}}{P21_{MODEL}} = \frac{P32_{TRUE}}{P32_{MODEL}}$$

De tillämpade Paretofördelningarna (potenslagen) kommer att ge ett stort antal små sprickor, med små transmissivitetsvärden. Modellen fokuserar på stora och öppna sprickor, små sprickor ingår inte i modellen. Det följer att P10-värdena i modellen kommer att vara mindre än de observerade P10-värdena, eftersom de observerade P10-värdena även inkluderar de små sprickorna (som inte ingår i modellen).

P32-värdena i den etablerade modellen är nära 0,2 m^2/m^3. Storleken på detta P32-värde är realistisk och ligger i linje med förväntningarna. P10-värdet för ett vertikalt borrhål är nära 0,12 sprickor per meter (öppna stora sprickor).

1.6 Stokastisk beskrivning av spricktransmissivitet

Sprickorna tilldelas en transmissivitet som en del av genereringen av sprickorna. Det värdet kan erhållas på flera olika sätt, normalt produceras transmissivitetsvärdena genom sannolikhetsfördelningar; en Uniform fördelning mellan ett minimi- och ett maximumvärde, en Normalfördelning, en Lognormalfördelning eller en Paretofördelning (potenslag) etc. Transmissivitetsvärdena kan också definieras som korrelerade med någon annan egenskap hos det studerade systemet. Till exempel kan transmissiviteten korreleras med sprickornas radie, ju större sprickan, desto större transmissivitet.

Metoden i denna studie utgår från att sprickornas transmissivitetsvärden korrelerar med sprickradie. I denna studie genereras transmissivitetsvärden först och definieras av en Paretofördelning (potenslag); Dessa transmissivitetsvärden överförs sedan till sprickorna med avseende på sprickornas radie, med viss slumpmässig variation (brus). Detta resulterar i en fördelning av spricktransmissivitet som inte är direkt proportionell mot fördelningen av sprickradien, utan en fördelning som korrelerar med sprickradien. Överföringen av transmissivitetsvärden till sprickorna utförs baserat på klasser, som definieras av percentiler.

Ett exempel: Sprickor med en radie mindre än den tionde percentilen av radiefördelningen tilldelas transmissivitetsvärden som är mindre än 10:e percentilen av fördelningen av transmissiviteter. Sprickor med en radie mellan percentil 10 och percentil 20 (för radie) tilldelas transmissivitetsvärden mellan percentil 10 och percentil 20 (för transmissiviteter); och så vidare. Om både sprickradien och transmissiviteten definieras av (olika) Paretofördelningar fungerar metoden väl och fördelningen av spricktransmissiviteten (efter överföringen till sprickorna) blir också en fördelning som ligger mycket nära en Paretofördelning (potenslag).

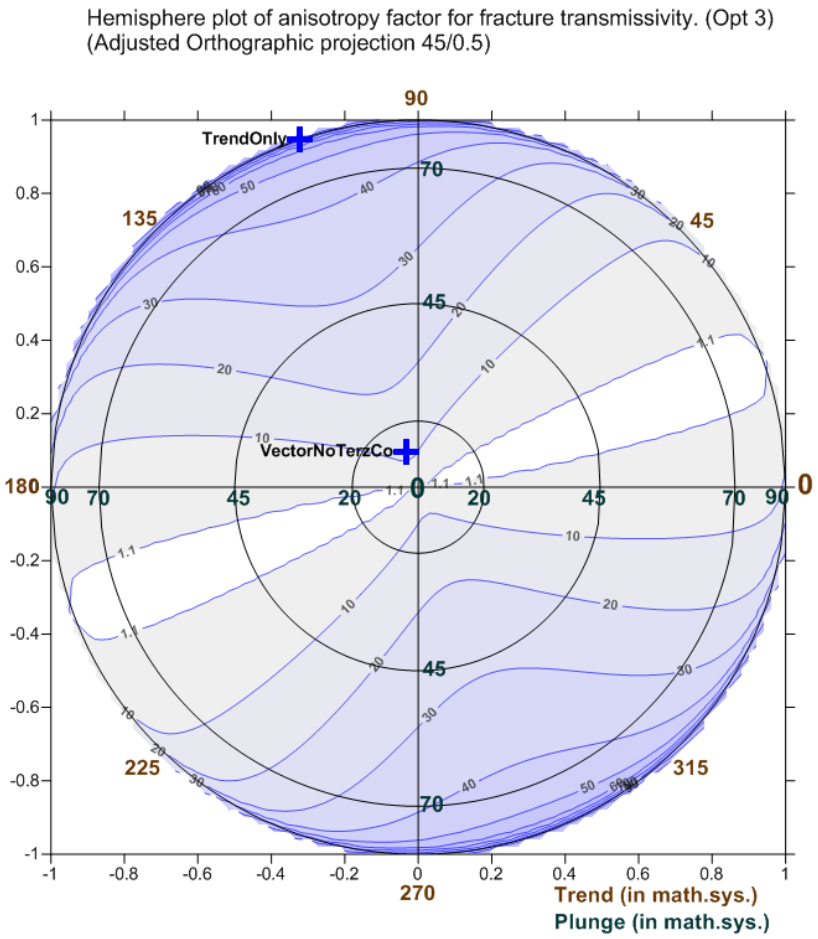
Metoden har mycket god bestämningskraft vid kalibrering av transmissivitet hos ett spricknätverk. Metoden fungerar bra eftersom: (i) transmissiviteten hos de flesta sprickorna (de små sprickorna) kommer att vara liten, medan transmissiviteten hos de stora sprickorna kommer att vara stor och slumpmässig inom givna gränser. (ii) Sprickornas transmissivitet kan styras via egenskaperna hos Paretofördelningen, som kan väljas oberoende av fördelningen som definierar sprickornas radie. Radien och transmissiviteten kommer ändå att korrelera.

Det är troligt att de öppna sprickorna, som är orienterade i linje med medelstrykningen för alla öppna sprickor, kommer att ha de största värdena av transmissivitet. Detta antagande bekräftas av analyser av de slutna sprickorna. I de flesta av de studerade borrhålen skiljer sig medelstrykningen för de slutna sprickorna från medelstrykningen för de öppna sprickorna. Detta indikerar en orienteringsberoende transmissivitet, som kallas anisotropi.

Transmissivitetsvärden för varje spricka genereras först initialt och tilldelas till de genererade sprickorna, oavsett sprickornas strykning. I ett andra steg ändras dessa transmissivitetsvärden med hjälp av en anisotropifaktor. Anisotropi används normalt för att beskriva en ökning av permeabilitet (eller hydraulisk konduktivitet, eller transmissivitet) för en given horisontell riktning. Metoden som diskuteras nedan fokuserar på ett sådant koncept där anisotropifaktorn varierar med strykningen (och stupningen) och är störst för vertikala sprickor.

I den etablerade DFN-modellen är den maximala anisotropifaktorn lika med 100. Riktningen med maximal anisotropifaktor kallas alfavinkeln. Alfavinkeln anges som ett strykningsvärde, vilket definierar strykningen för de sprickor som har störst anisotropifaktor. I den etablerade modellen är alfavinkeln (strykningen) lika med 110 grader. Denna riktning ligger i linje med medelstrykningen för de öppna sprickorna, som är lika med 110 grader (kompassriktning = 70 grader). Minsta anisotropifaktor är lika med ett (1,0), minsta faktor används för strykningar som ligger 90 grader från det givna strykningsvärdet för maximal anisotropifaktor. Variationen i anisotropifaktorn följer den klassiska formuleringen av en tvådimensionell anisotropi, definierad som en andra ordningens tensor med hjälp av trigonometriska funktioner.

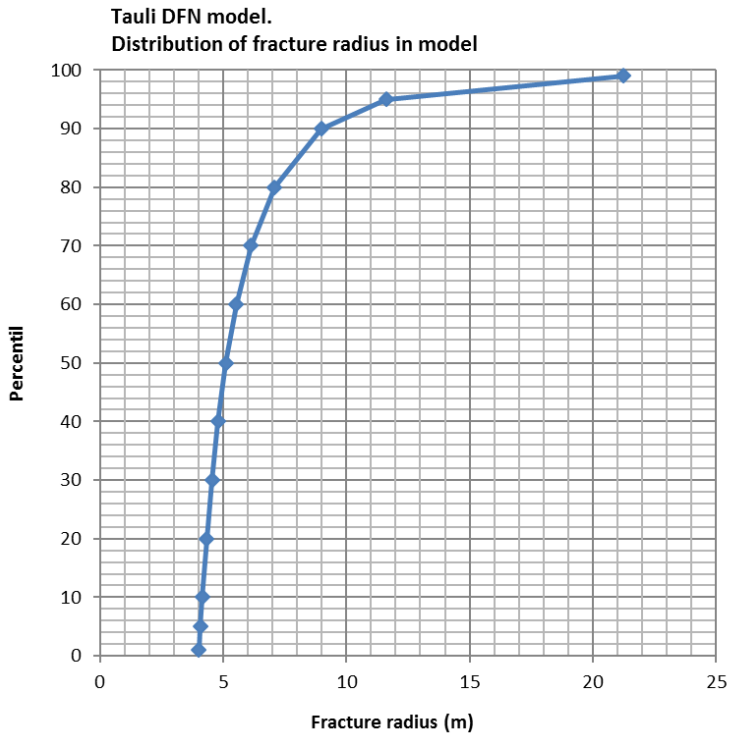
Anisotropifaktorn (och transmissiviteten) är också kopplad till sprickornas stupning. Den största anisotropifaktorn uppstår vid vertikala sprickor (stupning = 90 grader) och minskar med minskande stupningsvärden mot horisontella sprickor. För en horisontell spricka finns inga anisotropa effekter som följer av sprickans strykning, eftersom en horisontell spricka inte har någon strykning. Anisotropifaktorn för horisontella sprickor kommer att vara lika med ett, se Figur 14.



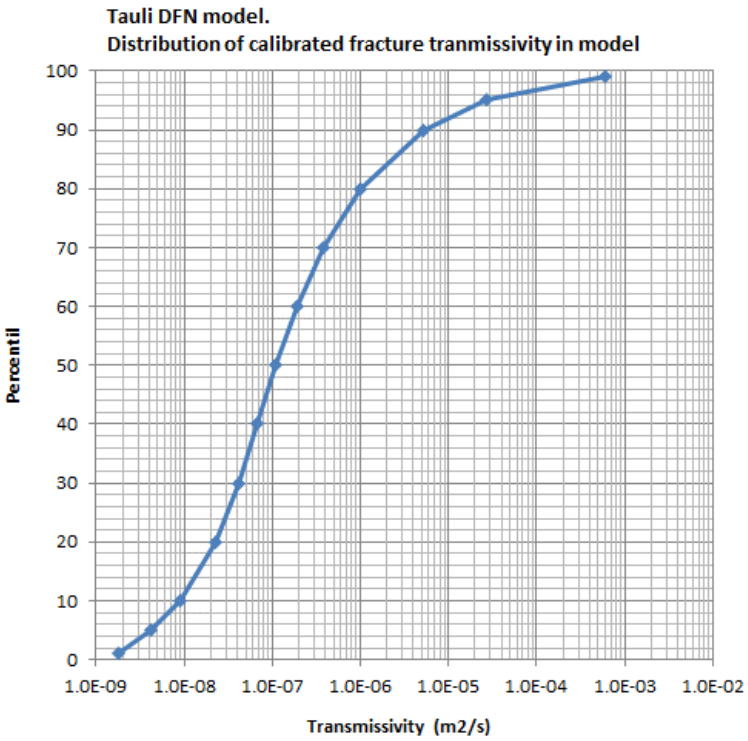
Figur 14 Poldiagram (övre halvklotet) av anisotropifaktorn, plottad mot strykning och stupning. Blå kors markerar resultantvektorn för medelsprickorientering för öppna sprickor.

För subvertikala sprickor kan strykningen skilja sig 180 grader beroende på stupningen. Modellen kommer därför att använda två speglande strykningsriktningar för maximala anisotropa effekter, t.ex. [110 och 290], och två speglande strykningsriktningar för minimala anisotropa effekter, t.ex. [20 och 200]. Detta följer automatiskt från den analytiska beskrivningen av en andra ordningens tensor, se Figur 14.

Den resulterande fördelningen av sprickradier och transmissivitet i DFN-modellen presenteras i Figur 15 och Figur 16.



Figur 15 Kumulativ fördelning av sprickradie i DFN-modellen. Observera att sprickor med en radie större än 25 m finns i modellen men med en sannolikhet som är lägre än 1 %.



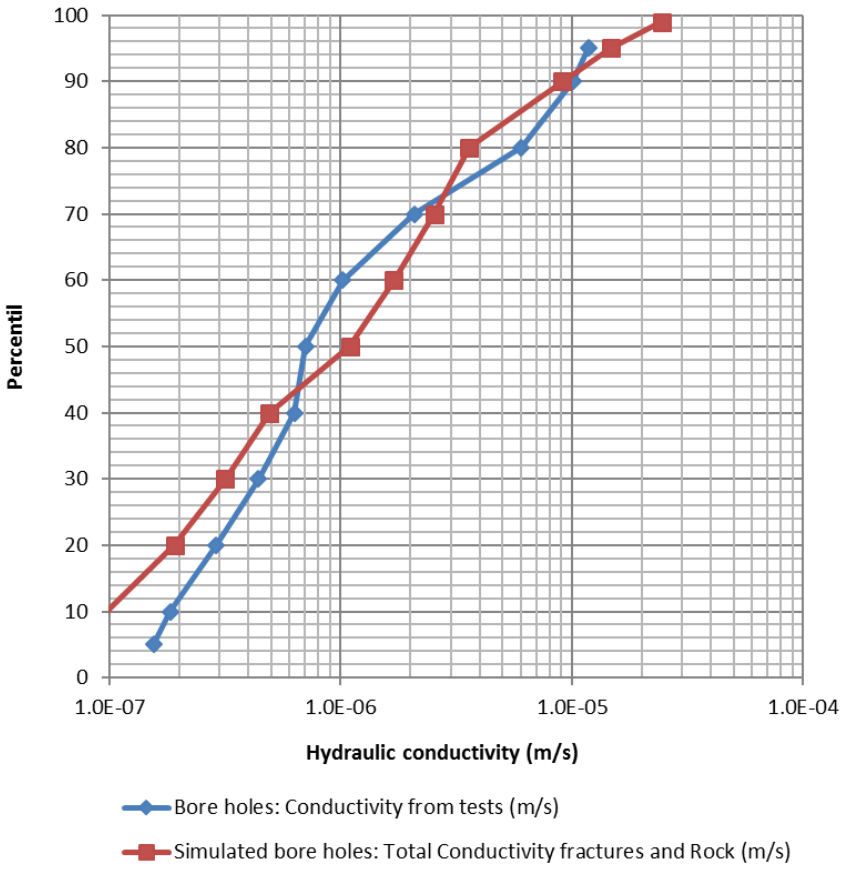
Figur 16 Kumulativ fördelning av spricktransmissivitet i DFN-modellen. Observera att sprickor med en transmissivitet större än 5E-4 m2/s finns i modellen men med en sannolik som är mindre än 1 %.

1.7 Hydraulisk konduktivitet i borrhål, uppmätt och simulerad

De hydrauliska konduktiviteterna från de 7 provpumpningar som utförts av Pöyry har använts för att kalibrera DFN-modellen. Utöver de 7 pumpbrunnarna användes värden för en observationsbrunn med strategisk placering nära dagbrottet och nära borrhål med sprickorienteringsdata. Detta ger totalt åtta borrhål.

Ett antal teoretiska borrhål (t.ex. 100) introduceras i DFN-modellen. De teoretiska borrhålen har en orientering i linje med orienteringen av de borrhål som används för hydrauliska tester. De teoretiska borrhålen analyseras inte bara med avseende på P10-värdena för borrhålen, utan också med avseende på transmissiviteten hos sprickorna som korsar borrhålet. Sprickornas transmissivitet som skär borrhålet ger ett värde på transmissivitet och hydraulisk konduktivitet för hela borrhålet. Transmissivitets- och konduktivitetsvärdena för de teoretiska borrhålen är en produkt av sprickorna som skär borrhålen och en specificerad bakgrundskonduktivitet (och borrhålslängd). Beräkningen är en enkel summa av sprickornas egenskaper och den givna bakgrundsledningsförmågan, inga flödessimuleringar utfördes.

De erhållna borrhålskonduktivitetsvärdena kan kalibreras mot de uppmätta borrhålskonduktivitetsvärdena genom att korrigera transmissivitetsfördelningarna för sprickorna och anisotropifaktorn, tills en god matchning uppnås mellan uppmätta och simulerade fördelningar av borrhålsledningsförmåga. Denna metod har använts för att kalibrera spricktransmissivitetsfördelningen. Resultatet visas i Figur 17.



Figur 17 Kumulativ fördelning av uppmätt och simulerad hydraulisk konduktivitet i borrhål.

1.8 Studerad DFN-domän och antal sprickor

Sprickor kan genereras för en domän av vilken storlek som helst, men det är rekommenderat att begränsa storleken på den studerade domänen, eftersom antalet sprickor blir extremt stort även för en domän av ganska måttlig storlek. DFN:s område som studeras fokuserar på Tapuli Central-brottet och dess närliggande omgivningar. DFN-domänen markeras i Figur 18 med ett grått mönster i omgivningen kring Tapuli Central. Ett spricknätverk genererades för denna domän. Domänen sträcker sig vertikalt ner till en höjd av -250 över havet. Inom DFN-domänen är det totala antalet genererade sprickor nära 1,5 miljoner sprickor.



Figur 18 DFN-domänen markeras i figuren med ett grått mönster omgivande Tapuli centrala dagbrott. Domänen sträcker sig vertikalt ner till nivån -250 m.

1.9 Sammanfattning av DFN-egenskaper

Egenskaperna hos den etablerade DFN-modellen kan sammanfattas enligt följande:

Orienteringen av sprickor baseras på uppmätta orienteringar i borrhål och en bootstrappingmetodik som mycket nära återger de observerade orienteringarna.

Sprickradien i modellen följer en Paretofördelning (Potenslag) som stämmer överens med resultaten av de mycket omfattande undersökningar som utförts av SKB som betraktar sprickmönster i en kristallin bergmassa.

Sprickornas transmissivitet definieras av en Paretofördelning (potenslag). Transmissivitetsvärdena korreleras också med sprickradien, ju större spricka, desto större transmissivitet, med inkludering av visst slumpmässigt brus. Dessutom definieras sprickornas transmissivitet som anisotrop och beror därför på sprickornas orientering. De sprickor som är orienterade i linje med medelstrykningen för de (observerade) öppna sprickorna kommer att ha de största transmissivitetsvärdena. Slutligen kalibreras fördelningen av transmissivitetsvärden

tills en god matchning uppnås mellan uppmätta och simulerade fördelningar av borrhålskonduktivitet.

De tillämpade Paretofördelningarna kommer att ge ett stort antal små sprickor, med små transmissivitetsvärden. Modellen fokuserar på stora och öppna sprickor, små sprickor ingår inte i modellen. Det följer att P10-värdena i modellen kommer att vara mindre än de observerade P10-värdena, eftersom de observerade P10-värdena även inkluderar de små sprickorna (som inte ingår i modellen).

P32-värdena i den etablerade modellen ligger nära 0,2 m^2/m^3. Storleken på detta P32-värde är realistisk och ligger i linje med förväntningarna. P10-värdet för ett vertikalt borrhål är nära 0,12 sprickor per meter (öppna stora sprickor).

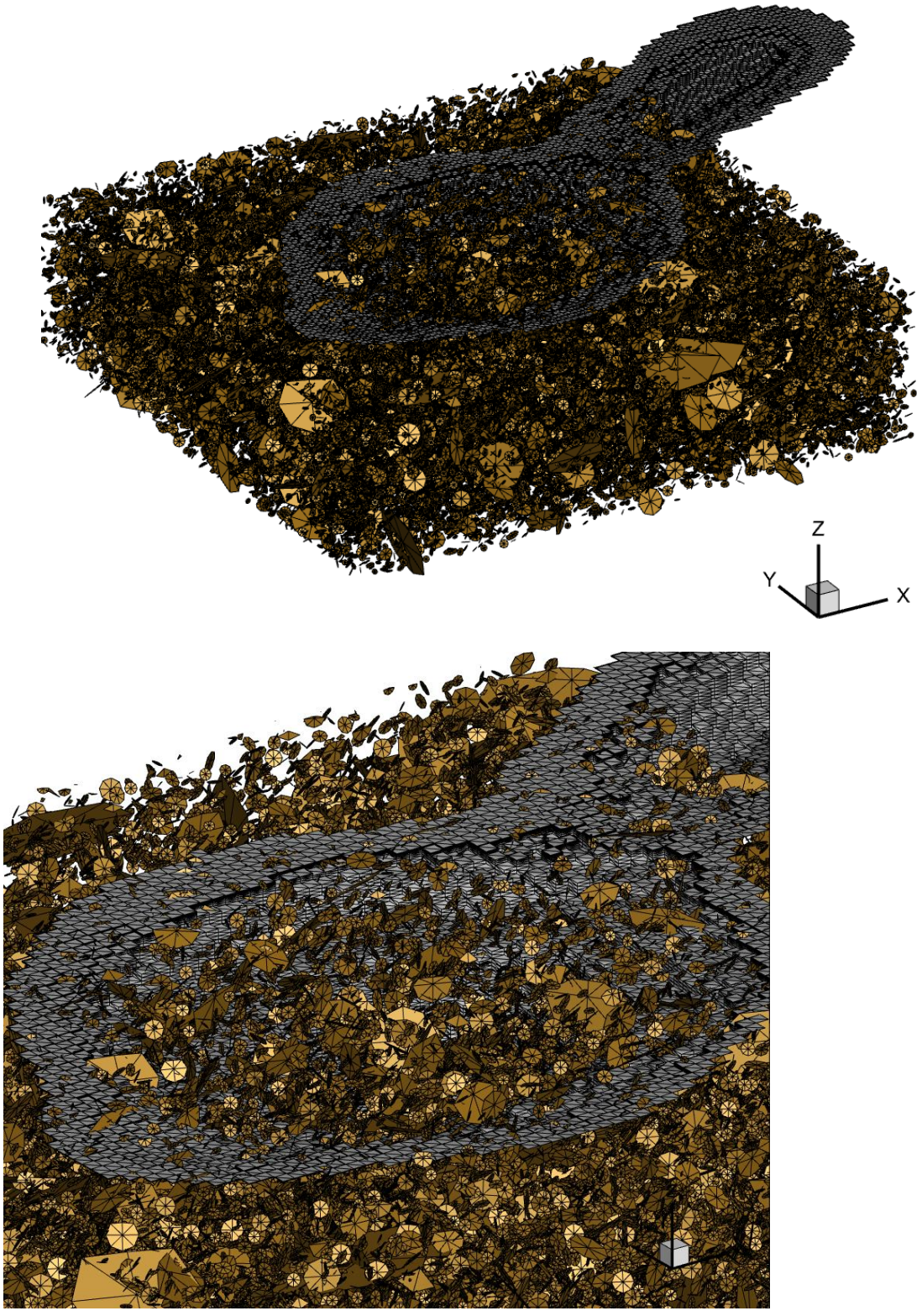
Alla modellens olika egenskaper påverkar de simulerade fördelningarna av borrhålskonduktivitet.

1.10 Analys av typ A-sprickor, dvs. stora och mycket transmissiva sprickor

Stora och mycket transmissiva sprickor är de viktigaste sprickorna vad gäller grundvattennivå, grundvattentryck och grundvattenflöde. Vi kan kalla dessa sprickor för typ A- sprickor. För att kunna studera och analysera sådana sprickor i den etablerade DFN-modellen blir det nödvändigt att definiera begränsande kriterier för egenskaperna hos dessa sprickor.

Vi har använt följande kriterier:
Sprickradien måste vara större än 7,1 m (ungefär 20 % av alla sprickor), se Figur 15.
Transmissiviteten i sprickan måste vara större än 1E-6 m2/s (ungefär 20 % av alla sprickor), se Figur 16. En typ A-spricka måste uppfylla båda kriterierna

Nära 60 000 sprickor uppfyller båda villkoren vid analys av de cirka 1,5 miljoner sprickor som genereras inom DFN-domänen. Dessa typ A- sprickor visas i Figur 19. Sprickor uppstår både inne i och utanför dagbrottet för att undvika randeffekter. Sprickor genereras också ovanför topografin, men skärs sedan längs topografin.



Figur 19 Exempel på genererade typ A-sprickor. Sprickorna är genererade både inom och utanför dagbrotten för att undvika randeffekter. Sprickor genereras även ovan topografin, men i figuren kapas dessa längs topografin. Figuren inkluderar 60 000 sprickor.

1.11 Uppskalning av spricknätverk

Överföringen av sprickegenskaper från ett genererat spricknätverk, en DFN-modell, till ett beräkningsnät för en flödes- och transportmodell kallas ofta uppskalning av sprickegenskaper. Det är dock inte alltid en uppskalning, eftersom sprickorna kan vara stora och cellerna i beräkningsnätet i flödes- och transportmodellen kan vara små. Storleken på beräkningscellerna i flödesmodellen, inom det område som täcks av DFN-modellen, är horisontellt 20 m x 20 m och vertikalt 5 m.

Ur ett matematiskt perspektiv finns det olika sätt att överföra sprickegenskaper från DFN-modellen till flödesmodellen. I denna studie följer uppskalningen, eller överföringen av sprickegenskaper, en metod där transmissivitetsvärdena för sprickorna adderas till de olika ytorna på de beräkningsceller som skärs av sprickorna. Den slutliga totala transmissiviteten för cellytorna omvandlas till ett värde av hydraulisk konduktivitet.

Ur ett mer praktiskt perspektiv finns det två metoder för att överföra spricknätverket (DFN) till en flödes- och transportmodell: I den första metoden sker uppskalningen i flödes- och transportmodellen, och för en sådan metod överförs varje spricka till flödes- och transportmodellen som separata objekt. I den andra metoden läses ett beräkningsnät in i DFN-modellen, och uppskalningen sker direkt i DFN-modellen. För en stor och komplex DFN rekommenderas att uppskalningen görs direkt i DFN-modellen vilket gjorts i denna studie.

Typ A-sprickorna, som visas i Figur 19, användes för uppskalning till det beräkningsmässiga rutnätet för flödes- och transportmodellen. Observera att det endast är typ A- sprickorna (stora och mycket transmissiva sprickor) som skalas upp till det beräkningsmässiga nätet för flödes- och transportmodellen. De mindre sprickorna med låg permeabilitet kommer att representeras av bakgrundsledningsegenskaper i det beräkningsmässiga rutnätet för flödes- och transportmodellen. Resultatet av uppskalningen är att flödesmodellen ges en representation av bergmassans heterogenitet som baseras på uppmätta egenskaper hos spricksystemet i berget.