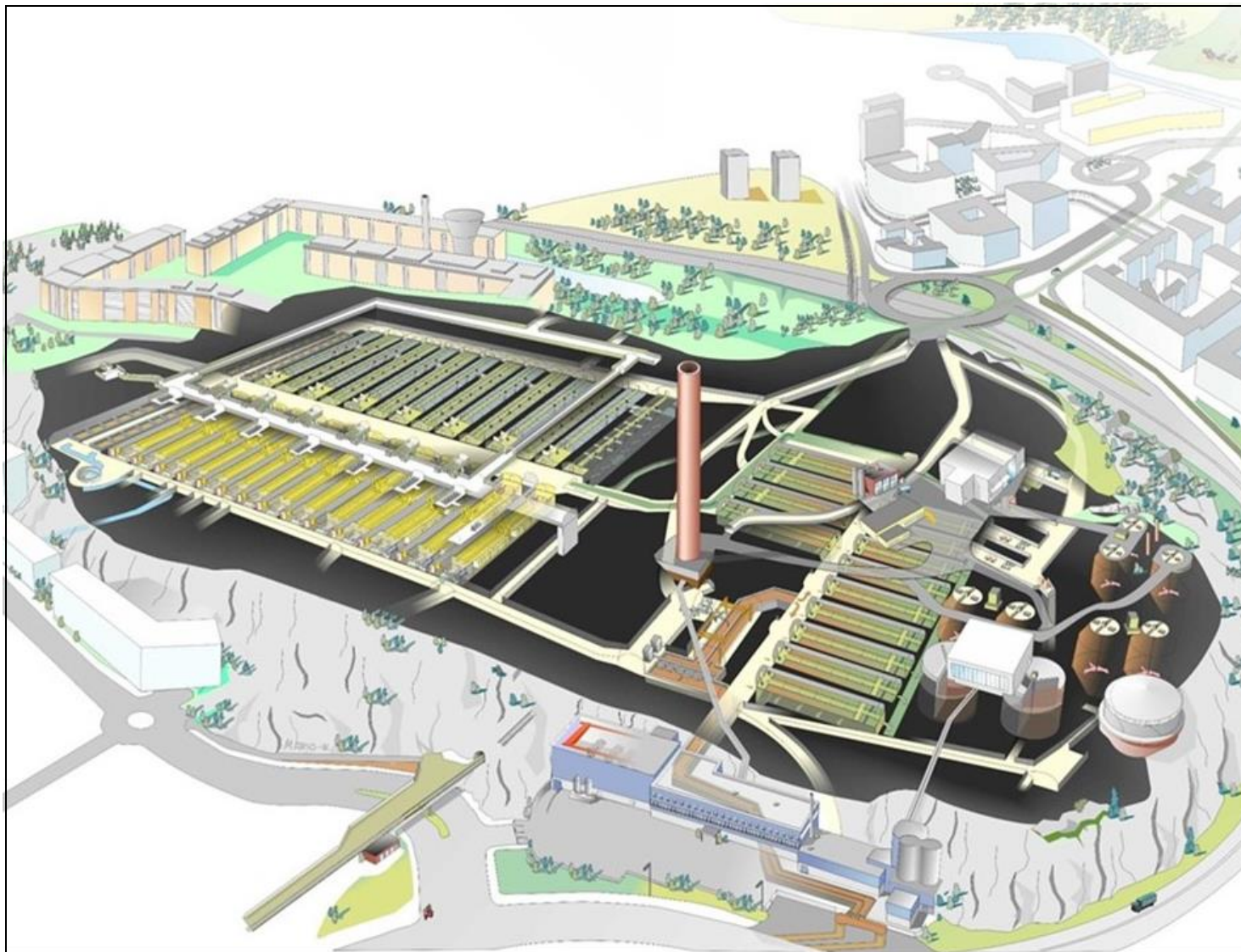




Bilaga 6:4 PM Beräkningar

Tillstånd för befintlig grundvattenbortledning och
rötkammare 8 och 9 vid Henriksdals reningsverk

Stockholm kommun och Nacka kommun

2024-11-06

Tillsammans för världens
mest hållbara stad



STOCKHOLM
VATTEN
OCH AVFALL

© Stockholm Vatten AB 2024
Författare: Sweco

Stockholm Vatten AB
Diarienummer: 24SVOA291
Projektnummer: 500964
Datum: 2024-11-06
Kontaktuppgifter: Stockholm Vatten AB, 106 36 Stockholm
Telefon: 08-522 120 00
Webb: www.svoa.se

Innehåll

1. Inledning	4
1.1 Bakgrund	4
1.2 Lokalisering	4
1.3 Syfte	4
1.4 Mål	4
1.5 Koordinatsystem	4
2. Metod	5
3. Konceptuell modell	6
3.1 Geografiska avgränsningar	6
3.2 Randvillkor och hydrauliska gränser	7
3.3 Befintliga anläggningar som påverkar grundvattensituationen	8
3.4 Anläggningsbeskrivning	8
3.5 Hydrauliska egenskaper	9
3.5.1 <i>Hydrauliska egenskaper hos lösa jordarter</i>	9
3.5.2 <i>Hydrauliska egenskaper i berg</i>	14
4. Numerisk modell	15
4.1 Kalibreringsstrategi	15
4.2 Randvillkor	16
4.2.1 <i>Ytterligare randvillkor</i>	17
4.3 Simuleringar	18
4.4 Kalibrering	19
4.4.1 <i>Simulerade trycknivåer efter kalibrering</i>	20
4.4.2 <i>Simulerade flöden efter kalibrering</i>	24
4.5 Osäkerhetsanalys	25
4.6 Avgränsningar och begränsningar	27
4.7 Resultat	28
5. Slutsats	34
6. Referenser	36

1. Inledning

1.1 Bakgrund

Stockholm Vatten AB:s (SVOA) avloppsreningsverk vid Henriksdal är Sveriges största. Reningsverket byggdes ursprungligen på 1930-talet och har sedan dess byggts ut i omgångar. De största och mest omfattande utbyggnaderna skedde under 70- och 90-talet. För närvarande pågår ett antal ytterligare utbyggnationer som ingår i planen för Stockholms Framtida Avloppsrening (SFA). Därtill planerar man att bygga två nya rötkammare (RK8 och RK9) med tillhörande evakueringsschakt, process- och arbetstunnlar.

Beaktat Henriksdalsanläggningens placering inuti Henriksdalsberget pågår ett kontinuerligt inläckage av grundvatten till anläggningen med efterföljande behov av bortledning för att inte bergrummen ska fyllas med vatten. Trots detta, och trots att flertalet miljötillstånd meddelats för Henriksdalsanläggningen genom åren, saknas dock tillstånd som med tydlighet reglerar denna grundvattenbortledning. SVOA bedömer att ett sådant tillstånd behövs för att framtidssäkra verksamheten. Vidare kommer SVOA att behöva leda bort inläckande grundvatten under anläggande och drift av de två nya rötkamrarna, något som också är tillståndspliktig vattenverksamhet.

En fråga som tillståndsansökan behandlar är Henriksdalsanläggningens påverkan på omgivningen, inkluderat frågan om pågående och framtida grundvattenpåverkan och dess effekter. För att bedöma påverkan behöver bland annat en beräkning av mängden inläckande grundvatten till bergrumsanläggningen tas fram. Av flera skäl saknas möjlighet att verifiera det faktiska inläckaget, varför SVOA har uppdragit åt Sweco att upprättat en numerisk grundvattenmodell som syftar till att utgöra grund för studier av effekterna på grundvattennivåerna till följd av den historiska utbyggnaden av verket och nu tillkommande anläggningsdelar. Grundvattenmodellen utgör del av underlaget till SVOA:s tillståndsansökan och beskrivs närmare i denna handling, Bilaga 6:4 till tillståndsansökan.

1.2 Lokalisering

Henriksdals reningsverk omfattar anläggningar på och i Henriksdalsberget som i norr avgränsas av Saltsjön och i söder av Hammarby sjöstad. Verket befinner sig helt innesluten av Värmdövägen och Kvarnholmsvägen.

De anläggningar som befinner sig på berget ligger helt inom Stockholms kommun, medan de delar av anläggningen som är under mark sträcker sig både inom Stockholms kommun och Nacka kommun.

1.3 Syfte

Syftet med denna PM är att redovisa utförd hydrogeologisk modellering, vilket utgjort underlag för att öka förståelsen för områdets hydrogeologiska egenskaper och system. Det ska även möjliggöra kvantifiering, osäkerhetsanalys och visualisering av de effekter verket har haft och kommer att ha på närmiljön kring Henriksdalsberget till följd av grundvattenbortledning från anläggningen.

1.4 Mål

- Beskriva det hydrogeologiska systemet i anslutning till befintliga och tillkommande bergrumsanläggningar.
- Studera effekten på grundvattennivåerna (omgivningspåverkan) som har uppstått till följd av den historiska utbyggnaden av Henriksdals reningsverk.
- Studera effekten på grundvattennivåerna som följer uppförandet av två nya rötkammare med tillhörande process- och arbetstunnlar, vid Henriksdals reningsverk.
- Redovisa utförda beräkningar av inläckage till befintliga och tillkommande bergrumsanläggningar.

1.5 Koordinatsystem

Höjdsystemet RH 2000 samt plankoordinatsystemet SWEREF 99 18 00 gäller i denna PM om inget annat anges.

2. Metod

Uppgiften har bestått i fem huvudsakliga moment;

1. **Upprättande av en konceptuell modell för området**
2. **Upprättande av en numerisk tredimensionell grundvattenmodell**
3. **Kalibrering av den numeriska modellen**
4. **Utföra olika hydrogeologiska prognosmodeller**
5. **Redovisning**

Den konceptuella modellen syftar till att upprätta en förenklad representation av det hydrogeologiska systemet som beskriver de viktigaste fysiska, meteorologiska och geologiska processer och egenskaper som interagerar inom området. Modellen syftar till att ge en grundläggande förståelse för hur grundvattnet rör sig och påverkas av olika faktorer, vilket är avgörande i samband med upprättandet av den numeriska modellen.

Den konceptuella modellen kommer bland annat att besvara följande huvudkomponenter.

- **Hydrogeologiska gränser** – beskriva den hydrogeologiska domänen, dess utbredning och eventuella utbyten med omgivningen.
- **Grundvattenflöden** – huvudsakliga flödesriktningar.
- **Hydrauliska egenskaper** – inom området förekommande geologiska enheter och dess egenskaper.
- **Infiltrationsmöjligheter och nederbörd** – var grundvattenbildning sker och fyller på grundvattenmagasinen.
- **Källor till mänsklig påverkan** – eventuella uttag för dricksvatten, bevattning, med mera eller pågående infiltration.
- **Lägen för interaktion med ytvatten** – kopplingar mellan grundvatten och sjöar, vattendrag, med mera
- **Allmänna randvillkor** – läge och karaktär för modellområdets yttre begränsningar. Exempelvis inget flöde, konstant flöde eller konstant tryck.

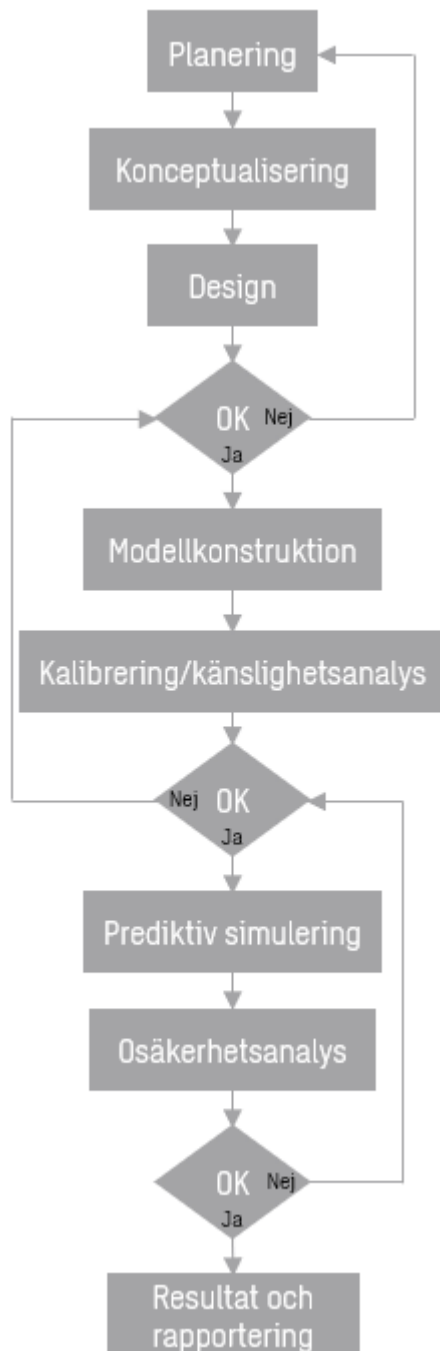
Den konceptuella modellen resulterar i en visuell representation av det undersökta systemet tillsammans med en teoretisk bas för att formulera den matematiska, numeriska modellen. En viktig del i upprättandet av en konceptuell modell är att bygga en hypotes för de viktigaste processerna och parametrarna som bör ingå i den numeriska modellen. Den konceptuella modellen har omformulerats under processen allt eftersom mer information och kunskap erhålls.

När den konceptuella modellen har etablerats översätts den till en numerisk grundvattenmodell som gör det möjligt att simulera de processer som beskrivits. Den numeriska modellen byggs upp av en tredimensionell cellmatris som parametreras med randvillkor som beskriver de flödesprocesser som definierats i den konceptuella modellen, hydrauliska egenskaper och observationsdata.

När modellen är uppbyggd genomgår den en kalibrering mot kända observationer som i det aktuella fallet består i en stor mängd nivåobservationer samt ett antal flödesobservationer.

När kalibreringsprocessen är slutförd och modellen anses tillräckligt representativ för ändamålet används den för att studera de på förhand definierade scenarier som svarar mot projektmålen.

Resultaten av studien redovisas under kapitel 4.7. Arbetsmetodiken redovisas som flödesschema i Figur 1.



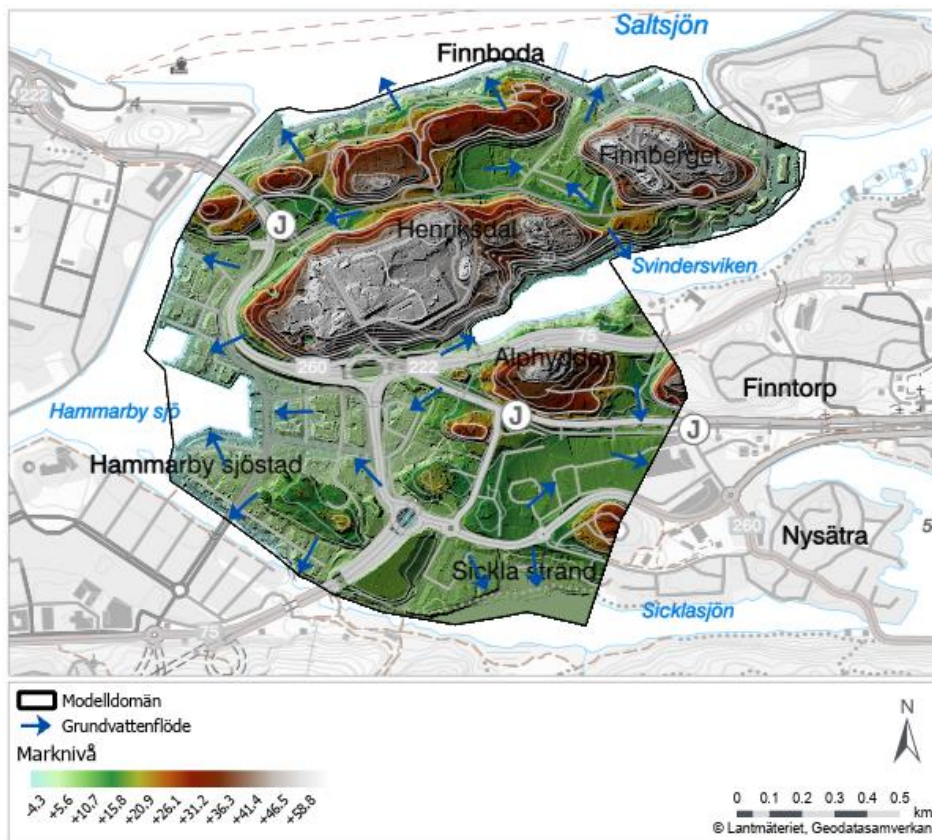
Figur 1. Flödesschema för uppdragets genomförande.

3. Konceptuell modell

3.1 Geografiska avgränsningar

Modelldomänen definierar det område inom vilket det hydrogeologiska systemet studeras. Dess geografiska avgränsning definieras i allmänhet på ett sätt som inrymmer all eventuell påverkan som kan förväntas av den studerade verksamheten, samtidigt som modellens yttre gränser ska beskriva lägen där inget grundvattenflöde sker eller där grundvattnets tryck är konstant.

Modelldomänens avgränsning redovisas i Figur 2. Modelldomänens utbredning har definierats på ett sätt så att avståndet till dess yttre gränser är tillräckligt för att inte påverka eller påverkas av de studerade förändringar som simuleras i modellen.



Figur 2. Modellens utbredning tillsammans med topografisk höjdinformation och bedömd flödesriktning för grundvatten.

3.2 Randvillkor och hydrauliska gränser

Öppna vattendrag (Hammarby sjö, Saltsjön och Svindersviken) antas begränsa modellen i plan som positiva hydrauliska ränder där påverkan på grundvattennivåerna är försumbar. Grundvattennivån vid dessa lägen anses vara konstant och antingen medföra ett in- eller utläckage av grundvatten beroende på angränsande grundvattennivåer. Huvudsakligen kan det förutsättas vara ett utläckage då de öppna vattendragen konceptuellt anses vara utströmningsområden. Den ansatta nivån har i dessa lägen något förenklat varit +0 då modellen avser ett stationärt tillstånd. Undantaget är Sicklasjön, vars vattenstånd upprätthålls av Sickla sluss, med en antagen nivå motsvarande +5,4, vilket motsvarar vattenståndet enligt Lantmäteriets höjdmodell.

Vid Tallbacken (i sydost) antas ett öppet flödesvillkor gälla med ett stationärt grundvattentryck i höjd med Sicklasjön.

I övrigt begränsas modellområdet av topografiska vattendelare, som antas motsvara förhållandevis täta ränder. Över dessa förväntas inget eller ett försumbart grundvattenflöde ske.

Över modellområdet antas nettonederbörden som årsmedel motsvara ca 230 mm/år. Detta motsvarar inte vad som antas bilda grundvatten, vilket påverkas av faktorer som andel hårdgjord yta, bortledning till dagvattensystem, yttlig avrinning, etcetera.

Den faktiska grundvattenbildningen för modellen justeras som en del i kalibreringsprocessen.

3.3 Befintliga anläggningar som påverkar grundvattensituationen

Utöver berggrummen vid Henriksdalsverket finns ett antal andra objekt inom modelldomänen som anses vara av betydelse för modelleringen. Dessa listas nedan. Av sekretesskäl redovisas inte läget för de olika vattentunnlarna.

- Äldre avloppstunnel från Södermalm till Henriksdal
- Äldre utlopp i Saltsjön
- Spillvattentunnlar från Södermalm till Henriksdal
- Nackatunneln
- Spill- och dagvattentunnlar från Sickla till Henriksdal
- Tillloppstunnel från Mårtensdal
- Utloppstunnlar från Henriksdal till Saltsjön
- Saltsjöqvarns tunnelgata (vägtunnel)
- Finnbergstunneln (vägtunnel)
- Södra länken (vägtunnel)
- Saltsjöbanan (spårtunnel)

3.4 Anläggningsbeskrivning

Henriksdalsanläggningen utgörs av ett större antal sammanbundna tunnlar och berggrum i berg och ett antal byggnader och installationer på ytan. Anläggningen som är stor och komplex omfattar totalt ca 18 km tunnlar som perforerar den bergplint som reser sig i området.

Anläggningen är byggd i flera plan vars nivåer har givits beteckningarna A – D. A-nivå avser markytan och de byggnader och installationer som förekommer där. B-nivå befinner sig ca 10 m under marknivå följt av C-nivå som är ytterligare 10 m under B-nivå. Därefter följer D-nivå som återigen är ca 10 m djupare och i huvudsak består av arbetstunnlar och andra vattenförande tunnlar.

Under åren har man i samband med utbyggnader undersökt och försökt karaktärisera berget. Bland annat konstateras i en rapport över de ingenjörsgelogiska förhållandena från 1991 att berggrunden huvudsakligen har en god kvalitet. Förekommande svaghetszoner och bergssprickor är i allmänhet brantstående med låg vittringsgrad (J&W, 1991). Några större svaghetszoner påträffades inte vid karteringen vilket stämmer överens med den konceptuella bilden av bergplinten som befinner sig mellan två dalgångar som förväntas utgöra lokala krosszoner. I allmänhet är berget för en uppstickande bergplint av bättre kvalitet och lämpar sig därmed för den här typen av anläggningar.

I senare undersökningar har bergets kvalitet beskrivits med hjälp av den modell som tagits fram av norska geotekniska institutet (NGI, 2022). Metoden kategoriserar berget i olika kvalitetsklasser (A-G) utifrån Q-värden. Berget kan därefter beskrivas som *Exceptionally good* (>400), *Extremely good* (>100), *Very good* (>40), *Good* (>10), *Fair* (>4), *Poor* (>1), *Very poor* (>0,1), *Extremely poor* (>0,01) eller *Exceptionally poor* (<0,01).

I en sammanfattande beskrivning av Henriksdalsanläggningen beskrivs bergkvaliteten i anläggningen som allmänt bra där ca 60 % av bergmassan bedöms som Q_{bas} 4–10 och resterande 40 % som Q_{bas} 1-4 (Chang, Sandstedt, & Indridason, 2020). Bedömningen inrymmer då inte delen av berget där RK8 och RK9 planeras som vid tiden inte hade undersökts. En ca 5 m bred svaghetszon genomkorsar slamutlastningsschaktet i anläggningens östra del med riktnings sydost-nordväst.

I en ytterligare ingenjörsgelogisk prognos som togs fram till systemhandlingen för Rötammare 8 konstateras vidare att berget vid läget för de planerade rötammarna håller en generellt god kvalitet med förhållandevis låg sprickbildning (Sweco, 2021). I prognosen konstateras att av utvärderade bergkärnor hade 80 % av berget vid de föreslagna rötammarna ett Q_{bas} -värde >10, 15 % hade $4 < Q_{bas} < 10$ och 5 % med $Q_{bas} < 4$. Vidare konstateras att det i den befintliga anläggningen ställvis uppträder mindre svaghetszoner (mäktighet <2 m) i bergmassan. Svaghetszonerna är generellt orienterade med en östvästlig strykning och brant till subvertikal stupning. Det förekom även ett antal zoner i sydost – nordvästlig strykning. I den västra delen av befintlig anläggning noterades svaghetszoner med mäktighet >2 m.

Berggruppen är i varierande omfattning inklädda i sprutbetong men har även en betydande mängd avsnitt där bergväggarna är kala och antas vara oinjekterade. Inläckage till anläggningen sker genom bergets spricksystem antingen i tak, golv eller väggar och kan ibland urskiljas i de blottade bergväggarna. Den betydande mängden sprutbetong har medfört svårigheter att i vissa lägen bedöma bergets kvalitet men också att okulärt observera inläckage. Det finns, bland annat på grund av detta, ingen möjlighet att utföra en fullständig okulär inspektion av bergets eventuella läckageytor. Det noterades i samband med en genomgripande bergbesiktning under tidigt 00-tal att sprutbetongen i utrymmena generellt håller hög kvalitet med god vidhäftning (J&W, 2002). Vid ett fåtal områden noterades viss sprickbildning i betongen.

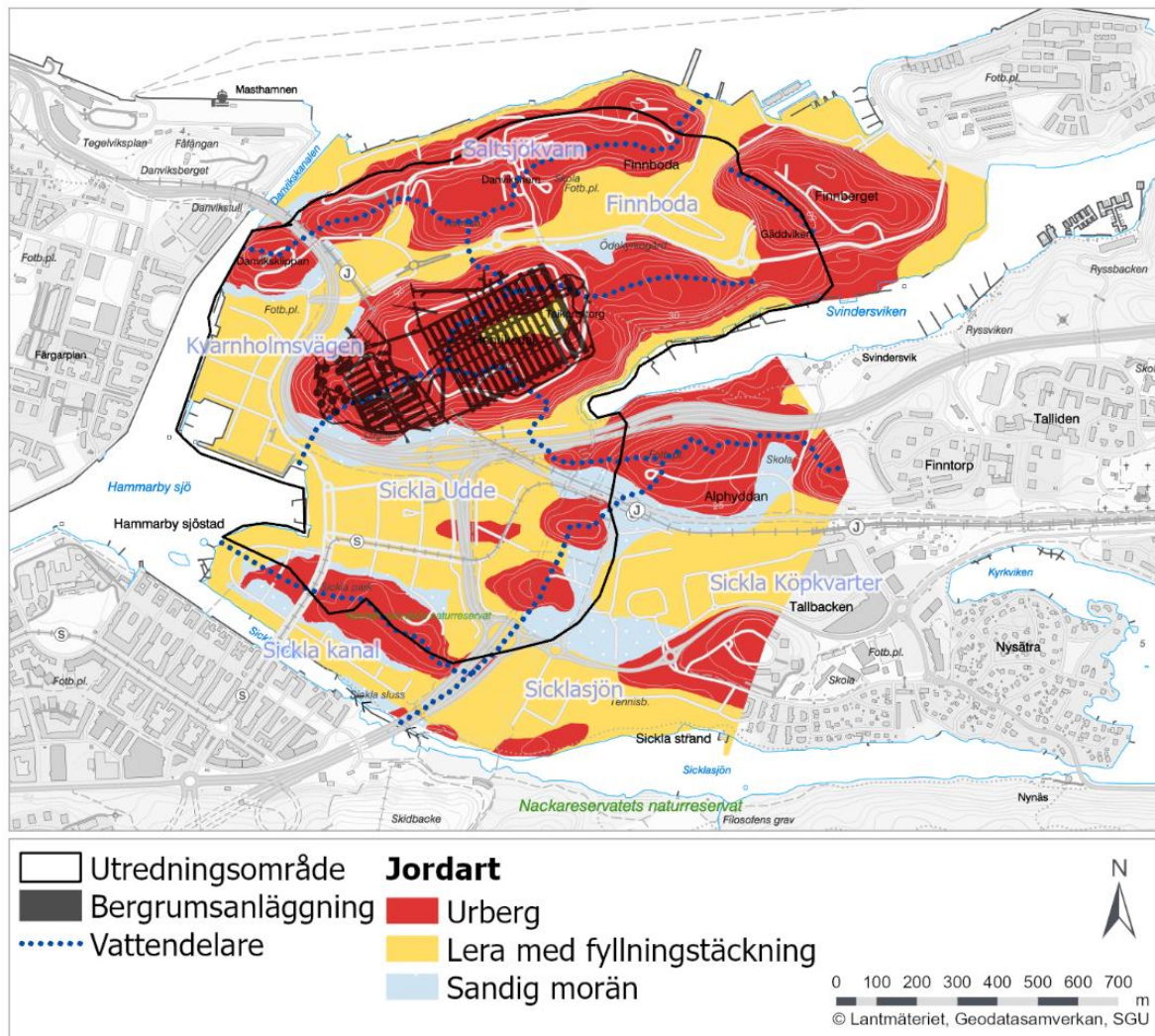
I samband med fältbesök observeras ställvis monterade droppkoppar för att fånga upp vatten som avleds till dräneringskanaler i golvet längs väggarna. Ursprunget på det uppsamlade vattnet är för en anläggning av Henriksdalsverkets storlek och komplexitet i praktiken närmast omöjlig att bestämma och kan härstamma från en rad olika källor. Bland dessa återfinns exempelvis inläckande grundvatten, kondens, läckage av processvatten mellan olika anläggningsdelar och nivåer, med mera.

3.5 Hydrauliska egenskaper

3.5.1 Hydrauliska egenskaper hos lösa jordarter

Inom modellområdet dominerar jordarterna av fyllning som vilar på morän eller lera. Under leran förekommer i allmänhet ett lager av morän som vilar på berggrunden. Olika jordmaterials utbredning har antagits med utgångspunkt i SGU:s jordartskarta i kombination med Stockholms stads byggnadsgeologiska karta. Därtill har justeringar av jordlagrens utbredning gjorts med hjälp av sonderingsinformation som funnits tillgänglig i öppna databaser och arkiv, bland annat Stockholm stads geoarkiv.

En planöversikt över modellområdets jordarter redovisas i Figur 3.



Figur 3. Jordarter som förekommer inom modellområdet.

Eftersom det inom området finns relativt begränsad information om de olika jordlagrens mäktighet baseras jordarternas respektive andel av den totala mäktigheten på ett antal antaganden.

I lägen där lera är den dominerade yttjordarten antas ett fyllningsjordlager förekomma som upptar 10 % av den totala jordmäktigheten (dock minst 2 m).

Därefter följer lera som fyller utrymmet mellan fyllningens underkant ner till moränens överkant (totalt 60 % av den totala jordmäktigheten). Resterande 30 % utgörs av bottenmorän. Dessa antaganden verifieras av ett flertal sonderingspunkter som studerats i området runt Henriksdalsberget.

En schematisk representation av jordlagerstratigrafin redovisas i Figur 4.

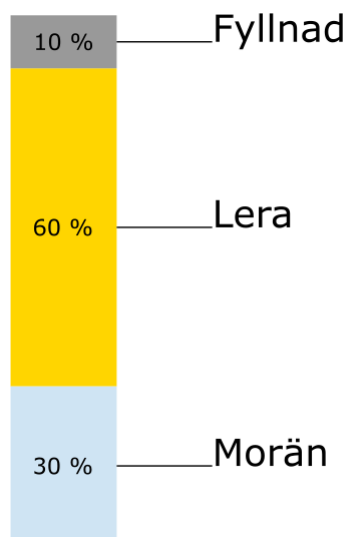
Den hydrauliska konduktiviteten i jord väntas i allmänhet befinna sig inom för respektive geologisk enhet typiska intervall. Ett förenklat antagande om anisotropa förhållanden har gjorts för de mer grovkorniga jordarterna inom modellområdet, vilket innebär att den hydrauliska konduktiviteten är densamma i vertikal och horisontell riktning för respektive jordart. För lera antas den vertikala hydrauliska konduktiviteten vara 10 gånger lägre än den horisontella, vilket kan härledas till konsolidering (kompaktion) av materialet i kombination med viss skiktning där det förekommer tunna lager av mer genomsläpplig jord vilket ökar den horisontella ledningsförmågan.

Hydraulisk konduktivitet som nyttjas som utgångspunkt för modellen (före kalibrering) redovisas i Tabell 1. Dessa värden baseras på empiriska materialegenskaper som har brett stöd i litteraturen. Gällande fyllnadsmaterial finns det inga relevanta källor, då massorna kan bestå av en stor variation

av jordarter och fraktioner. Detta hanteras i den kommande numeriska modellen genom att tillåta en större variation i materialets egenskaper.

Tabell 1. Hydraulisk konduktivitet per geologisk enhet. Tillämpade värden antas utifrån litteraturvärden¹. För Lera antas en vertikal anisotropi om 0,1 medan övriga material antas homogent och isotropt.

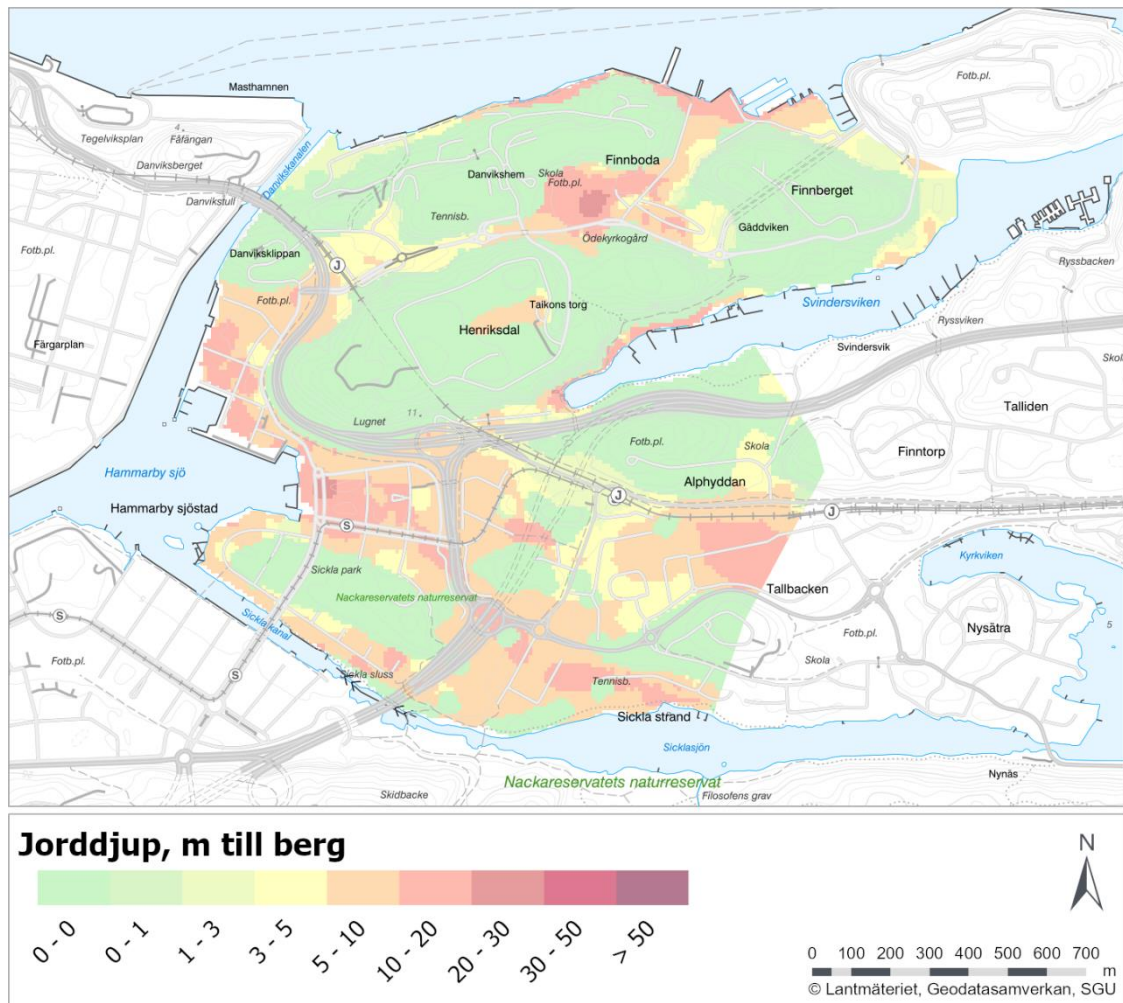
Jordart	Hydraulisk konduktivitet, k, [m/s]	
	K_h	K_v
Fyllnadsmaterial	1×10^{-6}	1×10^{-6}
Lera	1×10^{-8}	1×10^{-9}
Morän	1×10^{-6}	1×10^{-6}



Figur 4. Generell jordlagerföljd i lerområden.

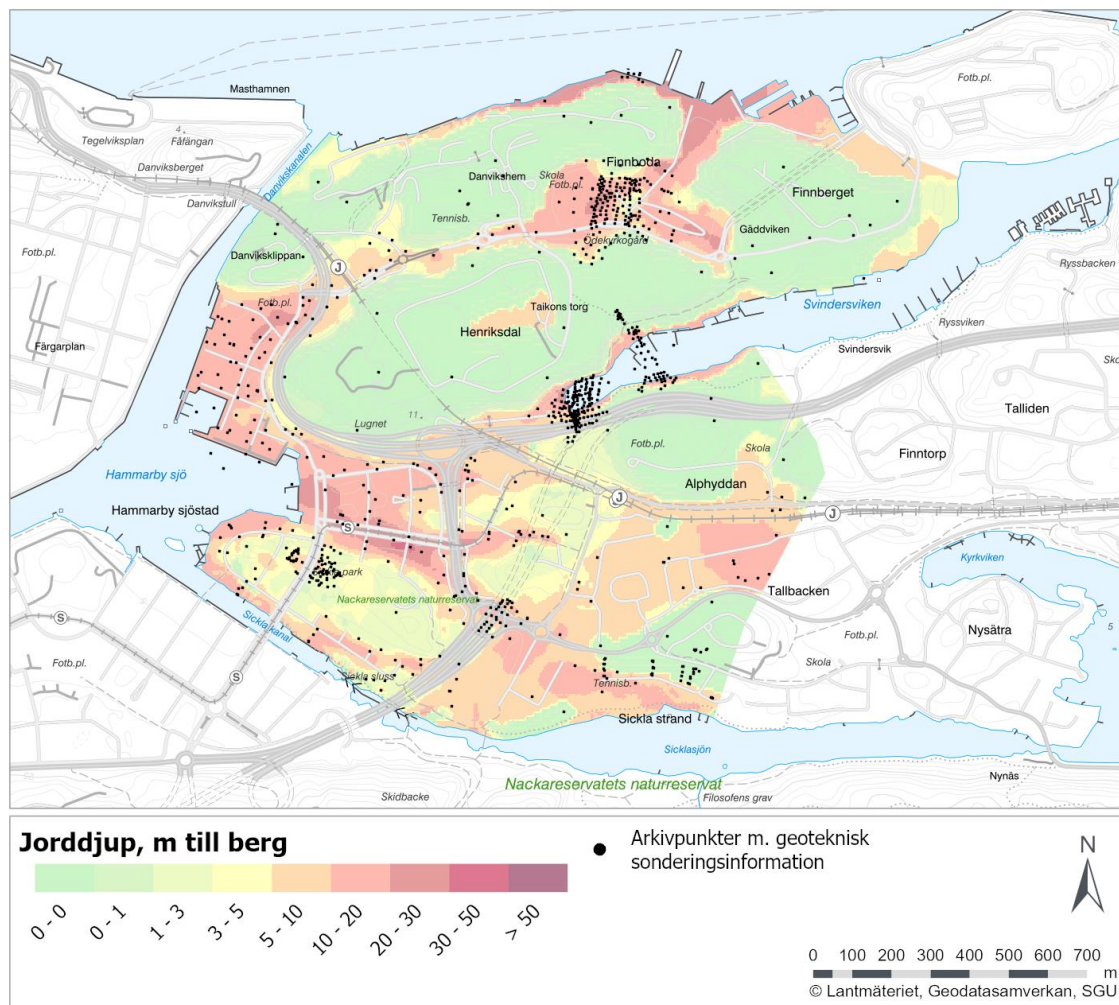
Nedan beskrivs SGU:s jorddjupsmodell inom modellområdet, vilken även har varit utgångspunkten för att upprätta en modell av bergets överyta i modellen (Figur 5).

¹ (Andersson, et al., 2015), (Domenico & Schwartz, 1997), (Fetter, 2001), (Larsson, 2008)



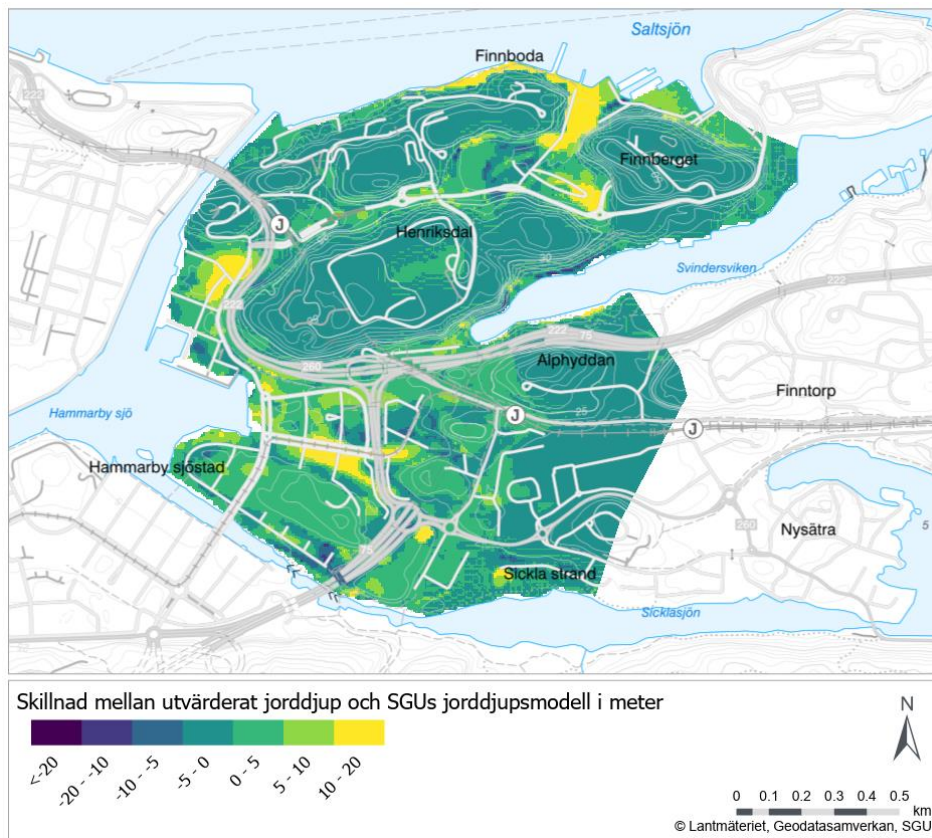
Figur 5. Jorrdjupsmodell enligt SGU:s ursprungliga tolkning och har hämtats direkt från SGU.

Jorrdjupsmodellen har uppdaterats och förfinats med hjälp av en stor mängd sonderingsinformation som inhämtats från Stockholm stads geoarkiv samt genomförda och pågående projekt inom området. Den uppdaterade jorrdjupsmodellen redovisas i Figur 6.



Figur 6. Reviderad jorddjupsmodell efter kompletterande utvärdering av sonderingsinformation i området. Modellen har utnyttjat sonderingar för att med hjälp av interpolering justera SGU:s jorddjupsmodell till att vara mer robust och korrekt inom modellområdet.

Skillnaden mellan de två modellerna redovisas i Figur 7. Tydligast skillnad mellan jorddjupsmodellerna förekommer i Södra Hammarbyhamnen, Hammarby sjöstad och Finnboda. Där avvikelser mellan 10 – 20 m har uppmärksammats. För övriga områden är avvikelserna i sammanhanget små.



Figur 7. Utvärderat jorddjup jämfört med SGU:s jorddjupsmodell. Positiva värden visar områden där SGU:s jorddjupsmodell visar mindre jorddjup än den uppdaterade modellen medan negativa värden är områden där SGU:s jorddjupsmodell visar större jorddjup än i den uppdaterade modellen.

3.5.2 Hydrauliska egenskaper i berg

Bergets hydrauliska konduktivitet baseras på en omfattande analys av data från brunnarsarkivet som genomförts inom ramen för tillståndsansökan gällande Nya Östbergatunneln i syfte att bättre beskriva bergets djupavtagande hydrauliska konduktivitet och fördelning (SVOA, 2020). I studien ingick en population bestående av ca 751 brunnar fördelade över olika djup i ett område inom ca 3 km från modelldomänen.

Analysen har efter bearbetning genomförts enligt beräkningsmodell som föreslås i Ryd, 2017. Metoden baseras på Svensk Kärnbränslehantering AB:s arbete med att utvärdera och jämföra olika konceptuella modeller för storregional grundvattenmodellering.

Metoden föreslår att bergets djupavtagande hydrauliska konduktivitet kan beskrivas enligt ekvationen nedan:

$$K = Cd^L$$

Ekvation 1

Där C och L är konstanter som bestäms av utvärdering ett stort antal brunnar och deras respektive transmissivitet enligt ovan och d är djup i berg.

C ansattes efter analys till $2,6 \cdot 10^{-5}$ m/s och L till -1,75. Bergets ytligaste 5 meter antogs ha en hydraulisk konduktivitet motsvarande $9 \cdot 10^{-7}$ m/s vilket var ca 20 % högre än det beräknade värdet. Detta eftersom det för kristallint berg i allmänhet förekommer ett vittrat och uppsprucket ytligt berg med något genomsläppligare egenskaper.

Det inom ramen för Nya Östbergatunneln bedömda berget nyttjas som utgångspunkt för bergets hydrauliska egenskaper innan modellen har kalibrerats.

4. Numerisk modell

Modellen är uppbyggd med den numeriska koden MODFLOW6 (Langevin, o.a., 2022) i programvaran ModelMuse 5.2.0 (Winston, 2022). Koden är en programvara för simulering av grundvattenflöden och används för att förutsäga grundvattenförhållanden och vattenrörelser i marken. Programmet är utvecklat av USGS (United States Geological Survey) som är den amerikanska motsvarigheten till SGU. Det är idag sannolikt den mest använda programvaran för grundvattenmodellering globalt.

MODFLOW6, likt sina föregångare, bygger huvudsakligen på den finita differensmetoden för att lösa flödesekvationen. Till skillnad från tidigare versioner av koden har den traditionella finita differensekvationen formulerats om med en kontrollvolym och möjliggör exempelvis s.k. quadtree- eller octree diskretisering vilket öppnar upp för en effektivare diskretisering av cellmatrisen, där beräkningsresurserna i högre grad kan koncentreras till områden av särskilt intresse.

Modellen består av en cellmatris med totalt 15 lager. Matrisens översta tre lager rymmer modellens kvartära avlagringar (jordlager), i de fall berget inte går i dagen. Syftet med att dela in jordlagren i tre delar har varit att möjliggöra införandet av överliggande fyllnadsmassor samt ett undre magasin bestående av friktionsjord. Efterföljande tolv lager i modellen utgör berget, vars lagertjocklek ökar med djupet. Detta för att på ett realistiskt sätt kunna ta hänsyn till bergets djupavtagande hydrauliska konduktivitet.

Beräkningsmatrisens celler har en cellstorlek som sträcker sig från 4 x 4 m till 16 x 16 m. Totalt täcker modellen en area motsvarande ca 2,4 km². I djupled fördelar sig jorddjupet mellan markytan och bergets överkant som definierats av den justerade jorddjupsmodellen. Därefter följer ytterligare 135 m som inrymmer berg.

4.1 Kalibreringsstrategi

Efter att modellen konstruerats utfördes en kalibrering av hydraulisk konduktivitet, grundvattenbildning och inläckage till olika befintliga anläggningar. Kalibreringen utfördes med hjälp av ett antal olika verktyg tillhörande PEST++.

PEST++ är en vidareutveckling av PEST (Parameter ESTimation) (Doherty, 2024). Ett verktyg som har funnits i olika versioner sedan 90-talet och används för kalibrering av bland annat numeriska grundvattenmodeller. Kalibrering innebär att olika ingående modellparametrar justeras så att modellens resultat överensstämmer med uppmätta eller observerade förhållanden.

Kalibreringen är ett viktigt steg för att säkerställa att modellen på ett trovärdigt sätt kan användas för att förutsäga framtida förhållanden.

Programmet utför parameteroptimering och osäkerhetsanalys genom att automatiskt justera och optimera parametrar inom definierade gränser. I den aktuella modellstudien utfördes kalibreringen med PEST++ IES, som är en relativt ny medlem i PEST-familjen. IES står för Iterative Ensemble Smoother, och tillämpar en algoritm som effektivare kan kalibrera modeller med många parametrar. Med hjälp av att arbeta i en parallelliserad beräkningsmiljö kan modellen köras ett stort antal gånger med en mängd olika parameteruppsättningar.

Processen går till enligt följande;

1. En initial ensemble av modellparametrar skapas, vilket reflekterar osäkerheten i parametervärdena.
2. Alla ensemblemedlemmar körs genom modellen och resultatet jämförs med observerade data.
3. PEST++ IES justerar sedan hela ensemblen av parametrar för att minska skillnaderna mellan modellerade och observerade data.

Processen är iterativ och fortsätter tills en tillfredsställande överensstämmelse mellan modell och observationer uppnås. På detta sätt kan modellen kalibreras på ett mycket effektivt sätt samtidigt som osäkerhetsanalysen genomförs parallellt med kalibreringen. Resultatet av kalibreringsarbetet är en uppdaterad parameterensemble som reflekterar olika möjliga verkligheter (uppsättningar av hydraulisk konduktivitet i jord och i berg samt nederbörds- och dräneringsförhållanden) där modellen har optimerats till att motsvara en representativ bild av området.

En förutsättning för att modellkalibreringen ska kunna genomföras på trovärdigt och tillförlitligt sätt är att det finns observationsdata tillgänglig inom modelldomänen. Det kan exempelvis röra sig om observationer av grundvattennivåer eller kända flöden.

4.2 Randvillkor

Modellens randvillkor tillämpades i enlighet med den konceptuella beskrivningen. Öppet vatten ansattes som ett *dirichlet* randvillkor, alltså konstant tryck. Som ett topprandvillkor ansattes grundvattenbildningen med ett *Neumann* villkor vilket innebär att ett konstant flöde tillämpas. Inledningsvis ansattes flödet 100 mm/år över hela modelldomänen. Som en del i kalibreringsprocessen tillåts därefter flödet variera mellan 60 – 230 mm/år.

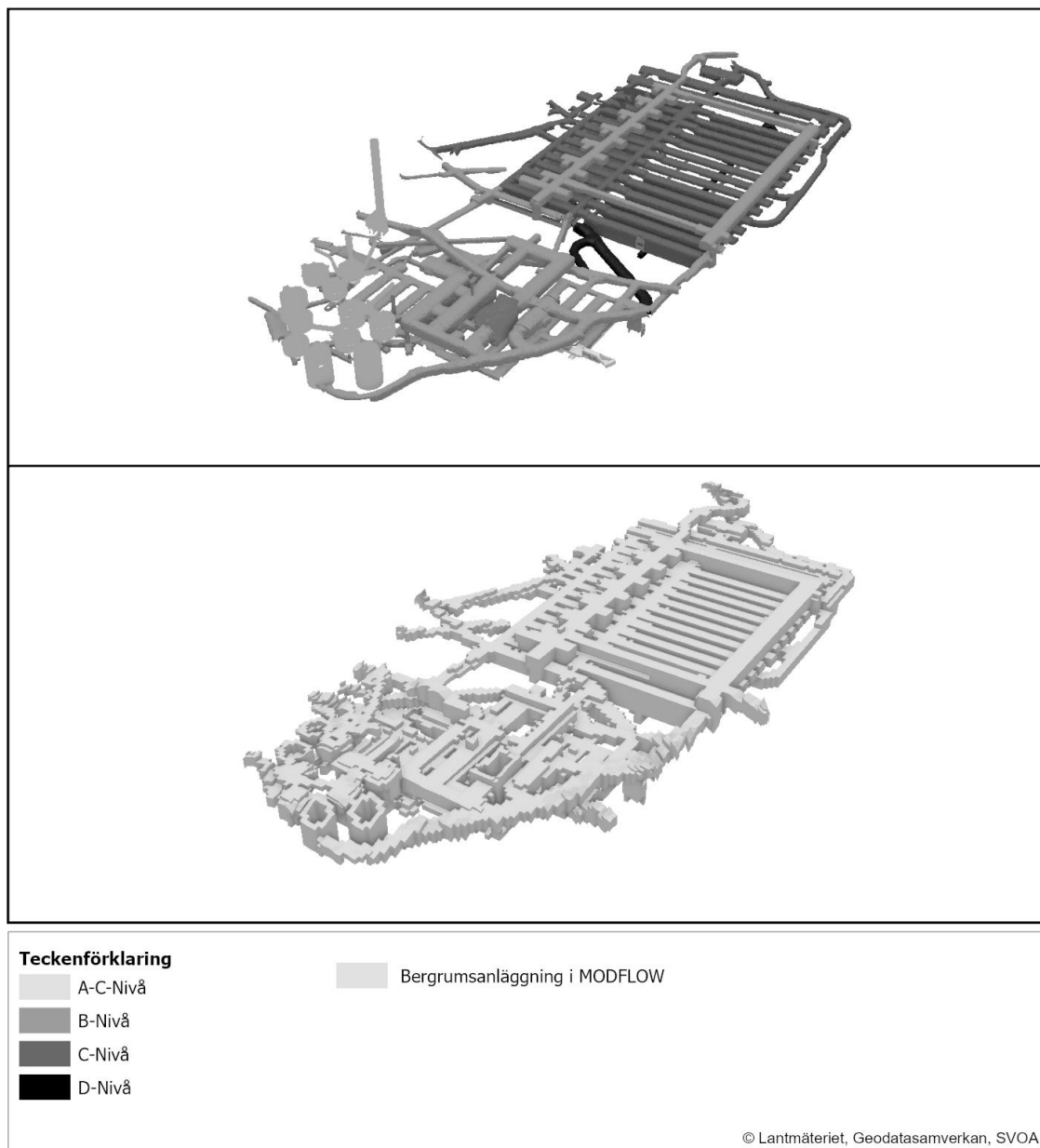
Ett tryckberoende randvillkor (*cauchy*) ansattes en halvmeter under markytan för att simulera ytlig avledning till diken, vattendrag och dagvattennät. Det innebär att på så sätt styr markens hydrauliska konduktivitet i viss mån möjligheten till perkolation, dvs markens förmåga att ta emot nederbörd för grundvattenbildning.

Utöver de randvillkor som beskriver det naturliga systemet har de olika kända dränerande anläggningarna tillämpats som *cauchy*-villkor. I Tabell 2 redovisas de antagna flöden som utgjort kalibreringsmål för de olika anläggningarna. Observera att kalibreringsmål enbart tillämpats för anläggningar där referensvärden funnits, eller där anläggningen anses i hög grad ostörd av andra anläggningar i närområdet, varför ett relevant antagande har varit möjligt. Övriga dränerande anläggningar som listats under kapitel 3.3 har inte kalibrerats utan har ansatts som dräneringar med vars inläckage har justerats utifrån de uppmätta nivåerna i området. Detta gäller även Saltsjöbanan som anses vara en så pass integrerad del i bergplinten tillsammans med Henriksdals berggrumsanläggning att den inte kunde särskiljas från det totala inläckaget. Den betraktas därför konservativt som en del i anläggningen.

Tabell 2. Kalibreringsmål avseende inläckande grundvatten till anläggningar.

Anläggning	Flöde	Kännedom
Södra länken	26 l/min (2,7 l/min/100 m)	Känt
Saltsjöqvarns tunnelgata	2 l/min (0,9 l/min/100 m)	Antaget
Finnbergatunneln	6,25 l/min (1 l/min/100 m)	Antaget

Henriksdalsanläggningen tillämpades med hjälp av en 3D-modell över anläggningens berggrum. Flödet till anläggningen kalibrerades med hjälp av uppgifter om grundvattennivåer i och runt Henriksdalsberget. En jämförelse mellan berggrumsanläggningens geometri och dess tillämpning i den numeriska beräkningsmodellen redovisas i Figur 8.

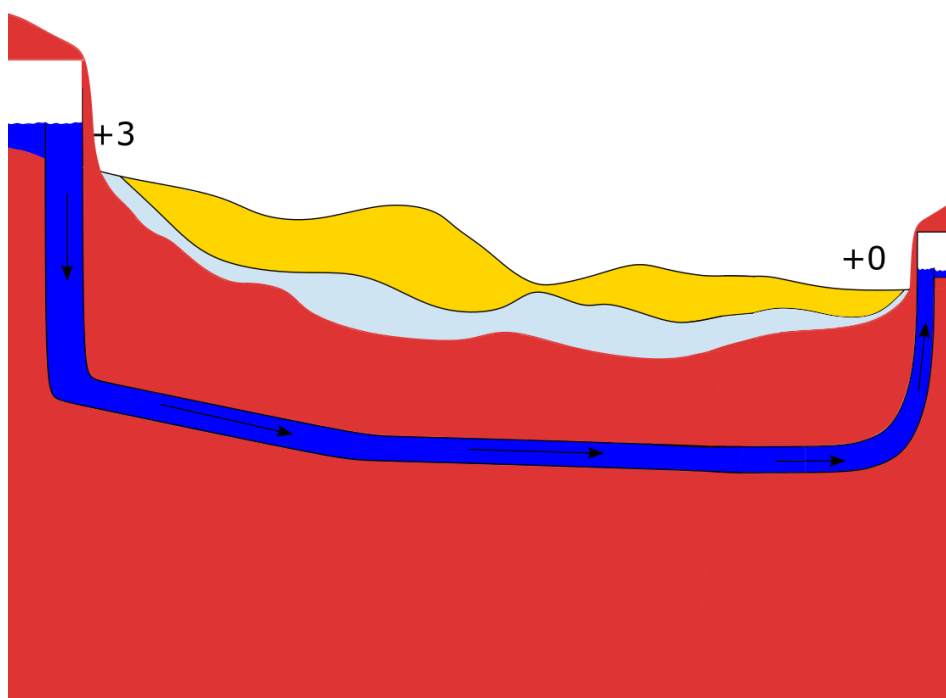


Figur 8. Jämförelse mellan anläggningens 3D-geometri och dess tillämpning i cellmatrisen i MODFLOW.

4.2.1 Ytterligare randvillkor

Utöver anläggningsdelarna som redovisas i Figur 8 förekommer ett flertal inkommande och utgående tunnlar till och från Henriksdalsverket. Dessa är i huvudsak vattenfyllda upp till en känd nivå. Tunnlarnas läge är belagda med sekretess men deras namn och representativ trycknivå listas i Tabell 3 nedan.

Tunnlarna fungerar principiellt som vattenlås med ett flöde som drivs av tryckskillnader utan någon mekanisk pumpning, se Figur 9. Den dränerande nivån anses konservativt motsvara den lägsta trycknivån i respektive tunnel, alltså den trycknivå som motsvaras av nedströmssidan.



Figur 9. Principskiss VA-tunnel. Flödet drivs av ett högre tryck på uppströmssidan och en lägre tröskel på nedströmssidan. Funktionen kan likställas vid ett vattenlås under ett konventionellt handfat.

Av princip så ansattes den representativa trycknivån till +0 för samtliga objekt. Detta eftersom det vid genomgång av ritningsunderlag konstaterades att en majoritet av tunnelnas tryck var vid eller i närheten av Saltsjöns nivåer.

Tabell 3. Kända dränerande objekt som omfattas av sekretess.

Tunnel	Representativ trycknivå
Äldre avloppstunnel Södermalm till Henriksdal	+0
Äldre utlopp i Saltsjön	+0
Spillvattentunnlar från Södermalm till Henriksdal	+0
Nackatunneln	+0
Spill- och dagvattentunnlar från Sickla till Henriksdal	+0
Tilloppstunnel från Mårtensdal	+0
Utloppstunnlar från Henriksdal till Saltsjön	+0

4.3 Simuleringar

Modellen har byggts upp i uppsättningar enligt nedan;

• Basmodell 1	Modell som beskriver nuläget och kalibreras mot kända nivå- och flödesobservationer.
• Basmodell 2	Simulering utan anläggningen tillhörande VA-tunnlar. Beskriver området utan Henriksdalsverkets närvaro.
• Prognosmodell 1	Simulering som återinför Henriksdalsanläggningen inkl. RK8 och RK9 med tillhörande schakt och tunnlar och jämför med Basmodell 2 som beskriver områdets naturliga förhållanden.
• Prognosmodell 2	Simulering som inför RK8 och RK9 med tillhörande schakt och tunnlar och jämför med Basmodell 1 och därmed isolerat beskriver den påverkan som tillkommer utöver dagens situation vid byggnation av de nya delarna.

4.4 Kalibrering

Modellen kalibrerades stationärt mot medelnivån i ett stort antal grundvattenobservationer i jord tillsammans med ett antal grundvattenobservationer i berg. Utöver detta kalibrerades modellen mot flödet i ett antal vägtunnlar som förekom inom området med kända eller antagna inläckage. Saltsjöbanan, som också förekommer inom modellområdet ansågs så pass integrerad i bergplinten tillsammans med Henriksdals bergrumsanläggningar att den inte kunde särskiljas från flödet till anläggningen. Den ingick därmed inte som kalibreringsmål och har inte heller särredovisats avseende det grundvatten som leds bort från bergplinten.

Under kalibreringsprocessen har den hydrauliska konduktiviteten tillåtit variera inom för respektive material acceptabla gränser. Vidare har grundvattenbildningen (recharge) justerats inom för urban miljö realistiska intervall med utgångspunkt i områdets bedömda grundvattenbildning. Därtill har motståndet (konduktans) för de aktiva dräneringarna inom modellområdet justerats (befintlig anläggning, dag- och spillvattentunnlar samt vägtunnlar) vilket påverkar storleken på det inläckage som sker till anläggningarna.

Parametrarna som ingick i kalibreringen listas i Tabell 4 och Tabell 5. Parametrarna tilläts under processen att variera inom ett intervall av på förhand definierade gränser som säkerställde att inga värden utanför vad som antogs realistiskt för respektive parameter tillämpades.

Konduktansen i randvillkoret är en läckagefaktor som kan beskrivas som inversen av motståndet mellan randvillkoret och cellmatrisen. Den enklaste förklaringen är dock att den beskriver flödesmotståndet mellan anläggningen och bergets omgivning och därmed kan liknas vid en kombination av utvecklad skin och injektering. I det aktuella fallet har läckaget till anläggningen varit av relativt begränsad storlek, vilket kan motiveras med anläggningens långa historia och att det därmed förväntas ha utvecklats en betydande skin runt anläggningens delar. Skin är effekten av naturligt tätande av bergssprickor. Detta sker till exempel när finare partiklar tas med vattnet från markytan, eller eroderade bergssprickor, och sätter igen sprickor nära det utsprängda bergrummet. Storleken på inläckaget till befintlig anläggning valideras med nivådata från de bergborrhål som funnits tillgängliga för rapporten.

Tabell 4. Hydraulisk konduktivitet tillsammans med tillåtna intervall under kalibrering. Samtliga värden anges med enheten m/s.

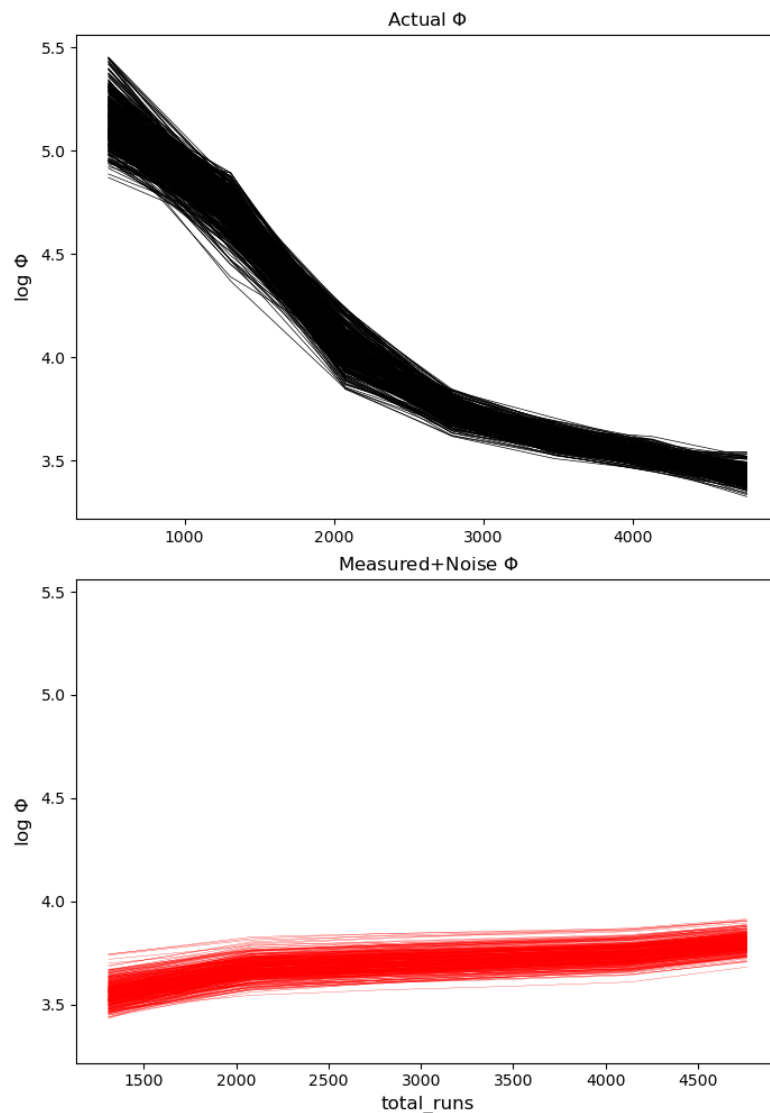
Geologisk enhet	Startvärde	Minimivärde	Maxvärde
Fyllnad	1×10^{-6}	1×10^{-8}	1×10^{-4}
Morän	1×10^{-6}	1×10^{-8}	2×10^{-4}
Lera	1×10^{-8}	5×10^{-10}	5×10^{-7}
Berg	Enligt ekvation 1	$0,05 \times \text{startvärde}$	$5 \times \text{startvärde}$

Tabell 5. Randvillkor tillsammans med tillåtna intervall under kalibrering.

Randvillkor	Startvärde	Minimivärde	Maxvärde
Recharge	100 mm/år	60 mm/år	230 mm/år
Drain*	-	-	-

*Konduktansen är här tillåtit variera relativt fritt och anpassas till kalibreringsmålen, varför ingen specifik gräns eller startvärde anges.

Under kalibreringen kördes modellen ca 5000 gånger. I Figur 10 redovisas hur skillnaden mellan uppmätta och simulerade värden reduceras i takt med att olika uppsättningar av parametrar testas i modellen. Av diagrammet framgår att skillnaderna mellan uppmätta och simulerade värden minskar allteftersom att ingående parametrar justeras till mer realistiska värden. Varje linje i diagrammet representerar en medlem i modellensembeln.



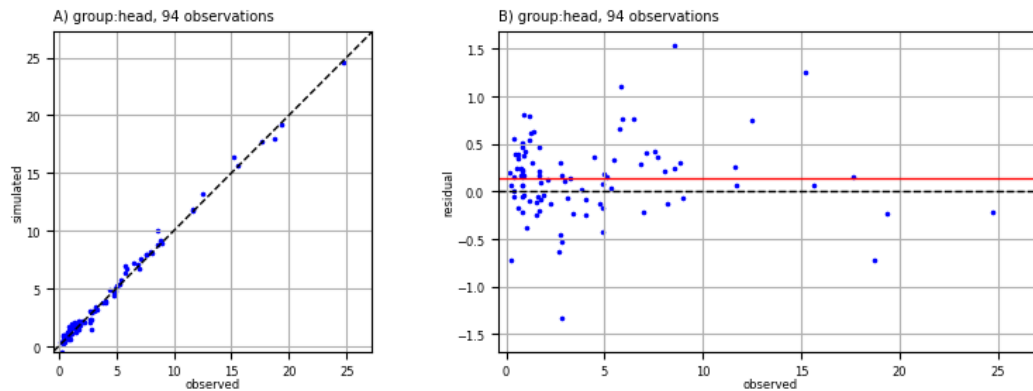
Figur 10. Kalibreringsförloppet som diagram. På y-axeln redovisas summan av de kvadrerade skillnaderna mellan uppmätta och simulerade värden (i logaritmisk skala). På x-axeln redovisas antal modellkörningar.

Resultatet av kalibreringsprocessen var en ensemble av total 352 modeller med ett parameterfält som har acceptabel passning mellan uppmätta och simulerade grundvattentryck och flöden.

4.4.1 Simulerade trycknivåer efter kalibrering

Varje ensemblemedlem uppvisar en egen, unik passning mellan simulerade och uppmätta nivåer. I diagrammen som följer i detta kapitel redovisas simulerade- jämfört med uppmätta trycknivåer. Ett exempel på detta redovisas i Figur 11, där kalibreringsresultaten avseende trycknivå i totalt 94 observationspunkter för en slumpvis medlem i modellensembeln redovisas.

Motsvarande figur som en planöversikt presenteras i Figur 12, där läget för varje punkt och avvikelserna mellan den simulerade och uppmätta nivån framgår.

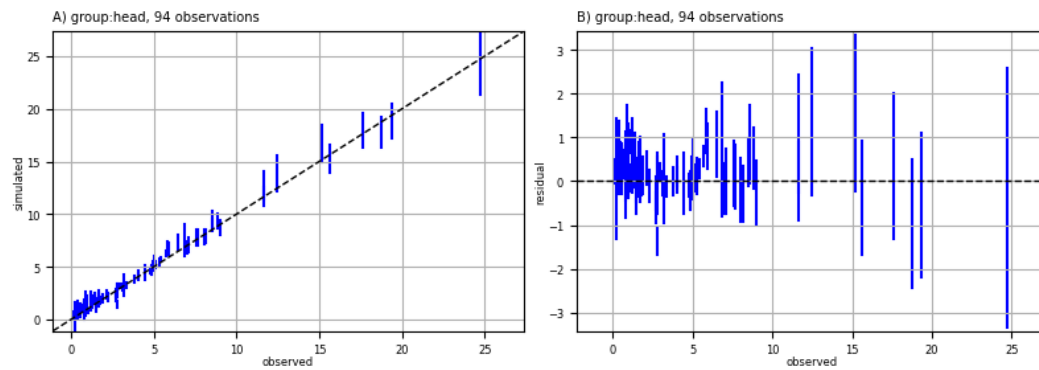


Figur 11. Exempel på kalibreringsresultatet av en slumpvis vald medlem i ensemblen av kalibrerade modeller. T.v. Observerade mot simulerade trycknivåer vid observationspunkterna och t.h. avvikelse mot observerad nivå.



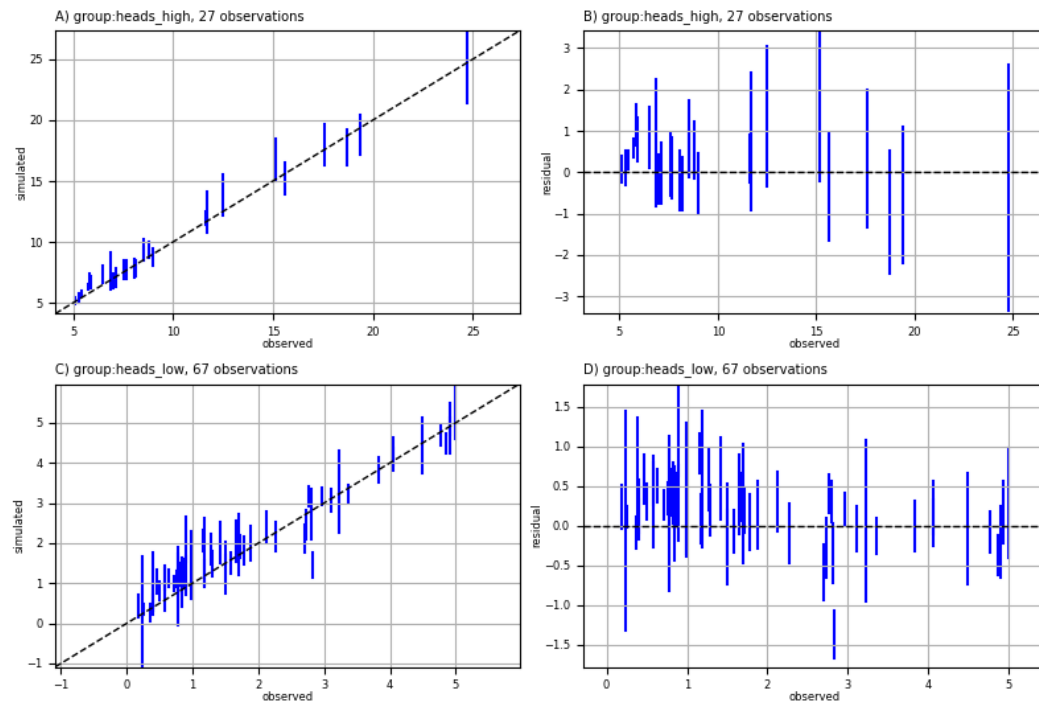
Figur 12. Jämförelse mellan den uppmätta och simulerade grundvattennivåer för en medlem i modellensembeln. En röd punkt indikerar en simulerad trycknivå som överstiger den uppmätta medelnivån, medan en blå punkt indikerar en simulerad nivå som ligger under den uppmätta trycknivån. Storleken på punkten återspeglar avvikelsernas omfattning, där en större punkt motsvarar en större avvikelse mellan den simulerade och uppmätta nivån.

I Figur 13 redovisas kalibreringsresultaten för samtliga 352 modeller där varje vertikal linje representerar det intervall av simulerade trycknivåer som representerats av modellerna för varje observationspunkt. Vad som framgår av diagrammet är att en majoritet av observationerna täcker in 1 till 1 linjen, vilket innebär att det observerade värdet för parametern finns representerat i modellensembeln.



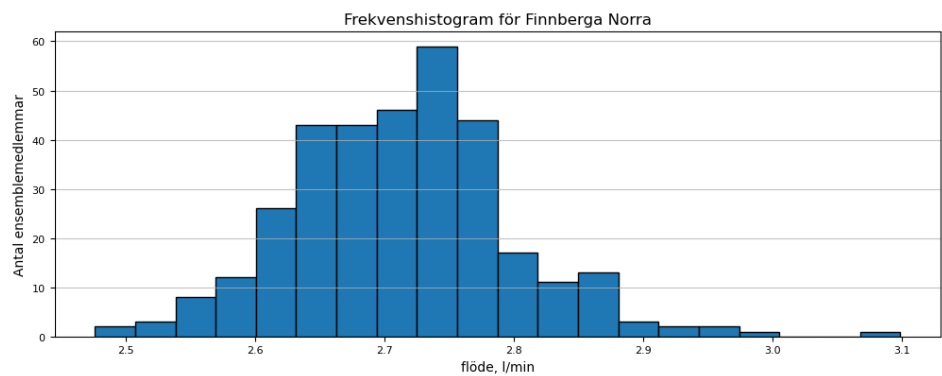
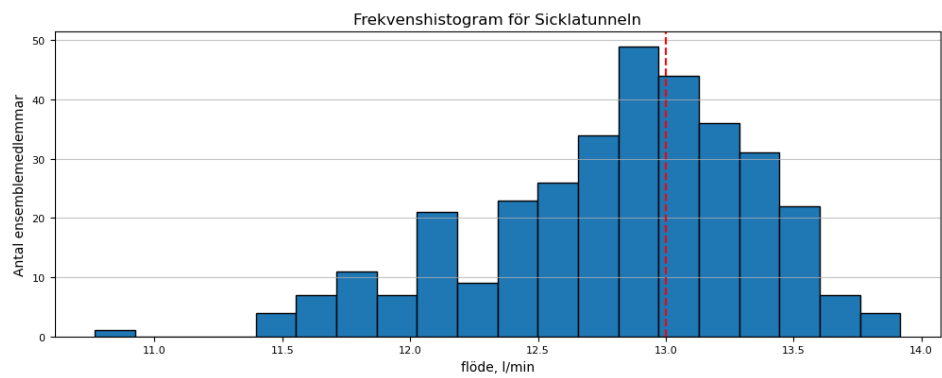
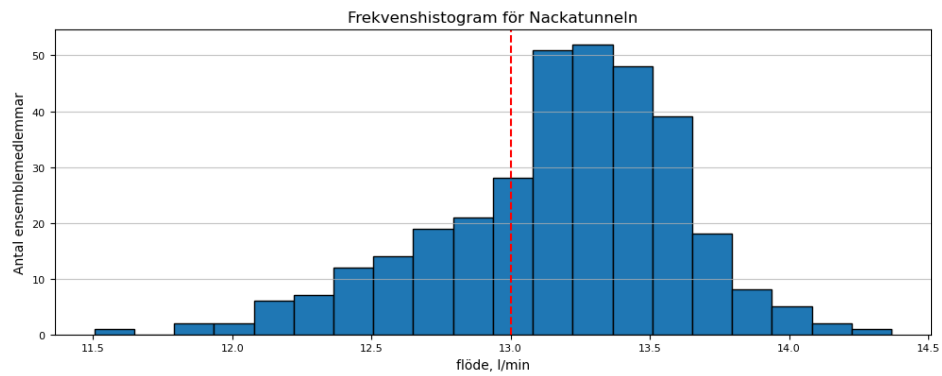
Figur 13. Det intervall av simulerade värden som hela den kalibrerade ensemblen täcker in.

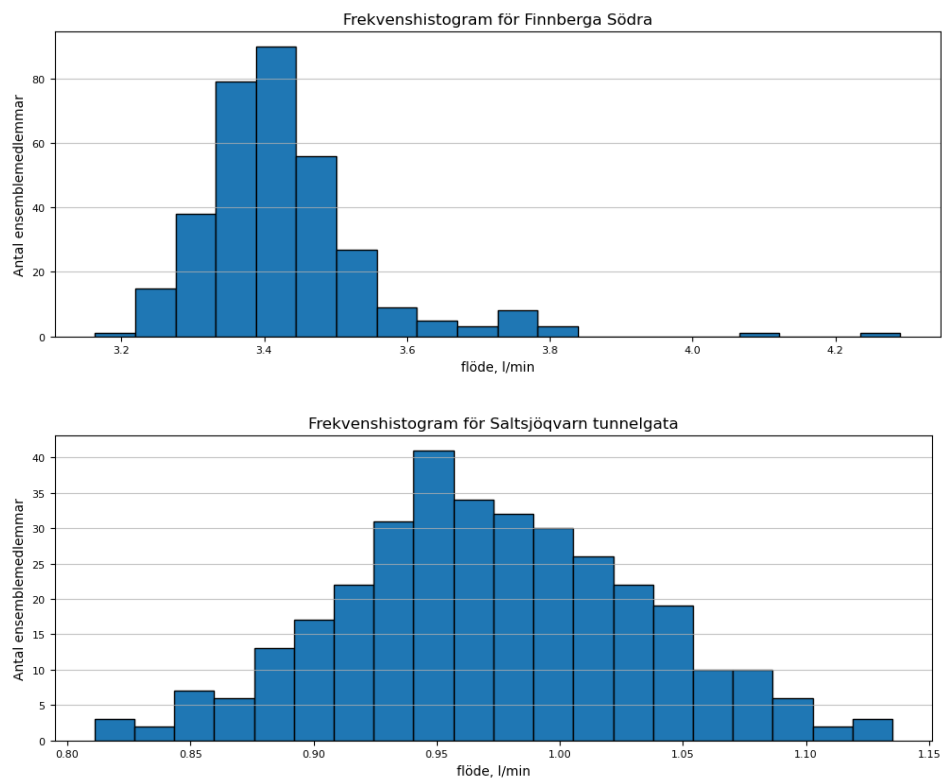
I Figur 14 redovisas de kalibrerade trycknivåerna indelat i ett urval med lägre trycknivåer (+0 - +5) och ett med högre trycknivåer (+5 - +25) för att tydliggöra enskilda observationsdata.



Figur 14. Det intervall av simulerade värden som hela den kalibrerade ensemblen täcker in redovisat för intervallet +0 - +5 respektive +5 - +25 för bättre synlighet.

Simulerade flöden för de objekt som använts som kalibreringsmål redovisas som histogram i Figur 15. För Nacka- och Sicklatunneln var medelinläckagen kända och redovisas som en röd linje i histogrammen. För övriga ansattes ett mer godtyckligt värde för att styra flödet mot ett realistiskt antagande.

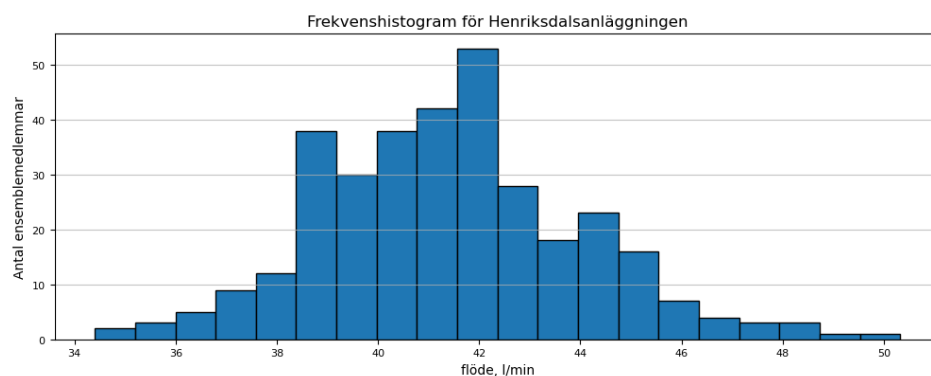




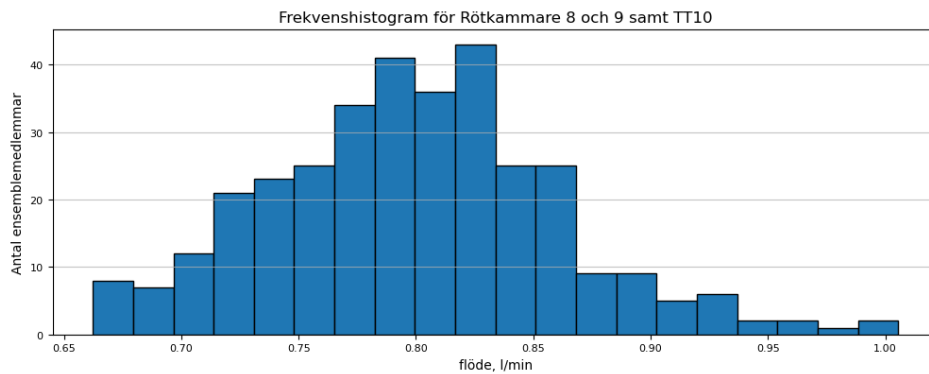
Figur 15. Simulerade flöden för de anläggningar som utgjorde dränerande randvillkor i modellen. Södra länken, som består av Nacka- och Sicklatunneln, har kända genomsnittliga inläckage, vilka redovisas som en röd streckad linje i histogrammen.

4.4.2 Simulerade flöden efter kalibrering

Flödet till de studerade anläggningsdelarna redovisas som histogram för hela modellensembeln. I Figur 16 redovisas det simulerade flödet för hela bergrumsanläggningen och i Figur 17 särredovisas den andel av det totala flödet som härstamma från RK8 och RK9 med tillhörande tunnel. Redovisade flöden beskrivs som antal modeller i ensemblen på x-axeln och beräknat flöde på y-axeln.



Figur 16. Simulerade flöden för Henriksdalsanläggningen.



Figur 17. Simulerade flöden för tillkommande anläggningsdelar (RK8 och RK9 med tillhörande schakt och tunnlar).

4.5 Osäkerhetsanalys

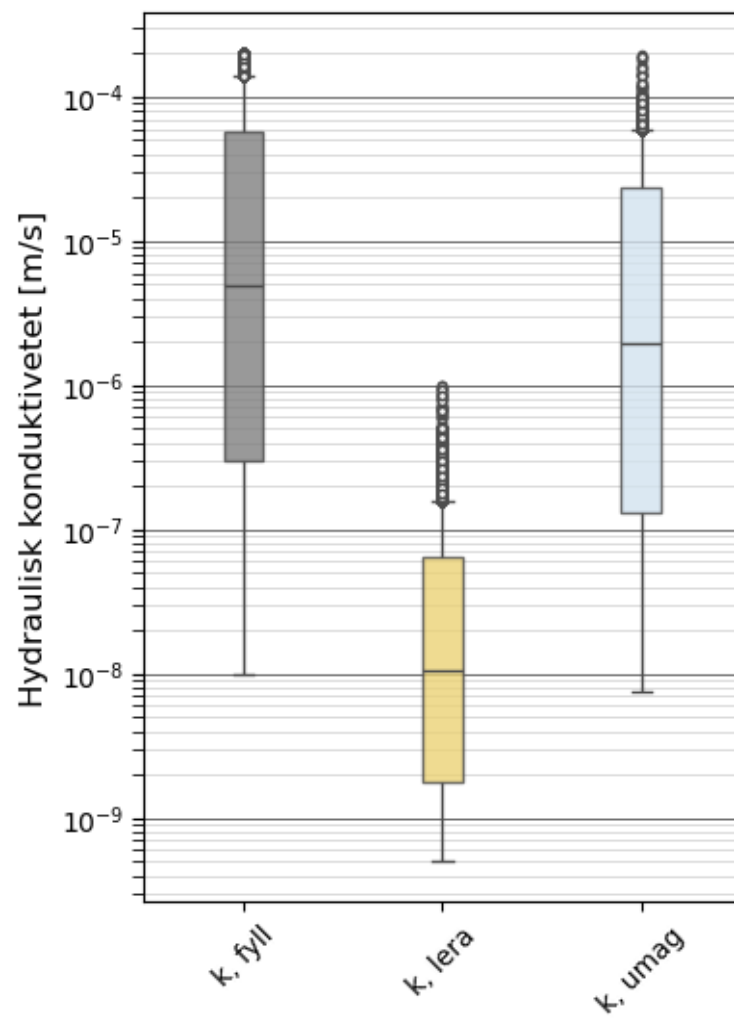
En av de viktigaste delarna av modelleringsarbetet har varit en robust hantering av osäkerheter som är ett förekommande inslag inom i stort sett all modellering. Att studera och beskriva osäkerheterna i modellens förutsägelser är en viktig del av studien för att förstå och kvantifiera de potentiella risker som modellens förutsägelser medför. I det aktuella fallet hanteras osäkerheterna som en aktiv del i modellkalibreringen som genomförs i en ensemblebaserad miljö där modellen utgår ifrån en basparametrisering med ansatta värden i en realistisk storleksordning för de olika ingående parametrarna i modellen. Modellen körs därefter ett mycket stort antal gånger samtidigt som den utsätter de ingående parametrarna för förändring och studerar vilken effekt det medför för kalibreringsmålen. Resultatet blir ett i sammanhanget stort urval av välanpassade modelluppsättningar, vars helhet inrymmer de eventuella variationer gällande hydrauliska egenskaper och randvillkor som kan förväntas inom modelldomänen. Genom att använda detta angreppssätt reduceras alltså risken för att modellresultaten skulle avvika på ett betydande sätt från verkliga förhållanden på platsen.

Genom att upprätta en ensemble av kalibrerade grundvattenmodeller som studerar olika uppsättningar av parametrar inom ett definierat spann av parametervärden sker osäkerhetsanalysen parallellt med kalibreringsprocessen.

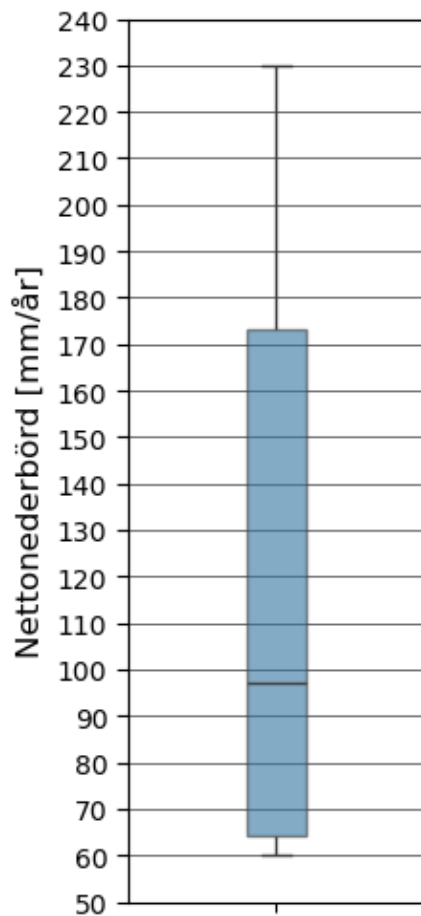
Det innebär att den kalibrerade modellensemblen kommer att innehålla ett större antal modeller med parametervärden som med högre precision matchar de observationer som utgör kalibreringsmål, samtidigt som ensemblen innehåller fall med något mindre precision jämfört med kalibreringsmålen med kombinationer av hydraulisk konduktivitet och nederbörd som är möjliga, men mindre troliga.

På så vis minskar osäkerheten i det modellerade påverkansområdet genom att resultatet inrymmer samtliga representationer av modellen.

I Figur 18 redovisas de hydrauliska parametrarna och i Figur 19 ansatt nettonederbörd för hela modellensemblen. Vad som framgår av låddiagrammen är medianvärdet (horisontell linje i centrum av respektive låda), övre och undre kvartil för parametervärdet (lådans övre och undre begränsning), min- respektive maxvärde (linjer från låddiagrammen) och enskilda avvikelser representeras av punkter utanför variationsspännet.



Figur 18. Variationsbredd för hydraulisk konduktivitet i modellensembeln.



Figur 19. Variationsbredd för ansatt nettonederbörd i modellensembeln.

4.6 Avgränsningar och begränsningar

Modellen är konstruerad för att studera grundvattenpåverkan i ett stationärt läge. Det tar alltså inte särskild hänsyn till tidsberoende förändringar i grundvattenförhållandena. Inte heller studeras områdets magasinsegenskaper.

En generell utmaning inom modellering är att en numerisk modell ger icke-unika lösningar. Med detta menas att det kan finnas ett stort antal parameteruppsättningar som samtliga kan ge resultat med likvärdig precision i förhållande till valideringsdata (grundvattennivåobservationer, flöden, etcetera). Det är därför viktigt att den konceptuella beskrivningen är realistisk och att modellen är konservativ, dvs gör pessimistiska antaganden i så stor utsträckning som möjligt för att, om något, överskatta påverkan. Modellen i denna PM har konstruerats enligt denna princip.

Andra utmaningar inom grundvattenmodellering är att det i allmänhet är svårt att med precision i lokal skala representera de olika sprickplan och svaghetszoner som förekommer i berggrunden. Modellen strävar dock inte efter att representera enskilda sprickor i bergmatrisen eftersom det inte är meningsfullt för effektbedömningen då en s.k. skaleffekt uppstår som utjämnar effekterna med ökat avstånd från anläggningen detta p.g.a. att flera sprickplan kommer i kontakt med varandra. Vidare kommer påverkan och effekt på grundvattentryck i omkringliggande jord också jämnas ut i det fall dess vattenförenade egenskaper (hydrauliska konduktivitet) är större än bergets. Effekten på grundvattentryck och grundvattennivåer är som störst närmast bergrummen och här får även bergets heterogenitet även störst konsekvens, detta då enskilda sprickor kan dräneras i stor utsträckning och således kan två bergborrade hål med samma djup och på samma avstånd från anläggningen påverkas mycket olika. Ju längre från anläggningen desto mer jämn effekt kommer dock erhållas, då sprickor och spricksystemen kommer korsas varandra och jämna ut påverkan. Syftet med modellen är

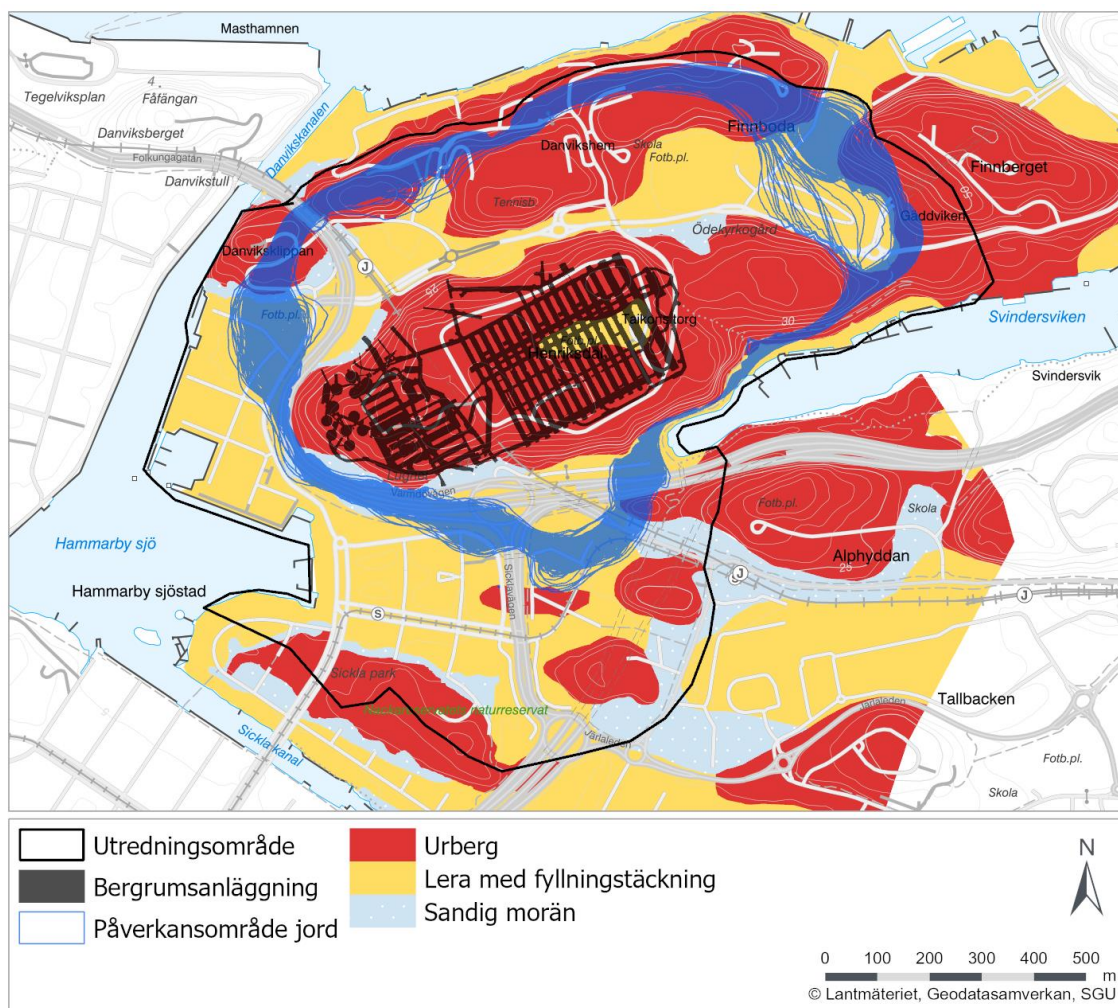
inte att ge en exakt och representativ bild av trycknivåerna i enskilda och vattenförande sprickor i direkt anslutning till olika delar av bergrummen utan att beskriva den sökta verksamhetens effekter och därmed möjliggöra en konsekvensbedömning till ansökan om vattenverksamhet.

I aktuell modelluppställning hanteras utmaningar kopplade till icke-unika lösningar genom att genomföra simuleringen ett stort antal gånger med varierande antaganden för ingående modellparametrar. Detta reducerar väsentligt osäkerheterna kopplade till denna fråga.

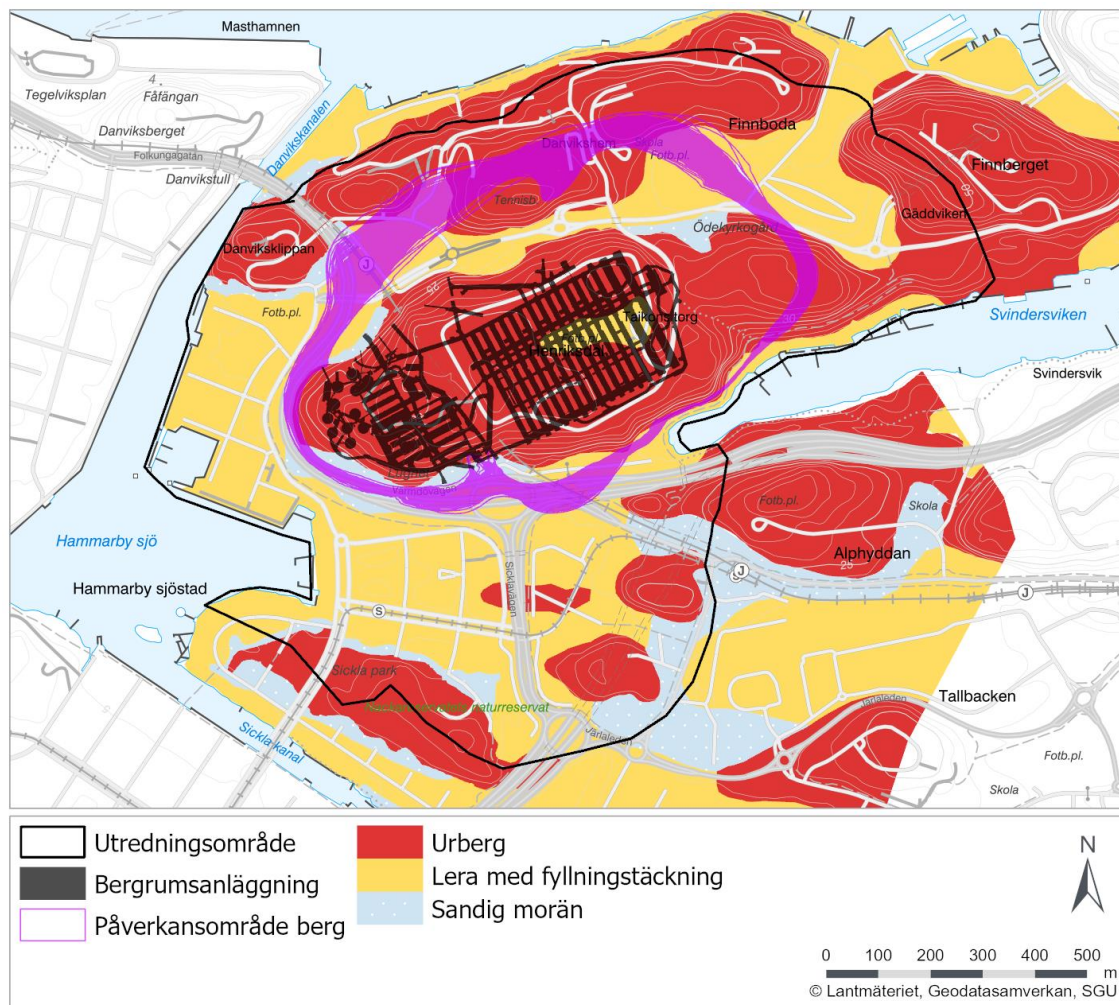
Sammanfattningsvis har grundvattenmodelleringen varit en omfattande process som krävt noggrann planering, upprättande av en konceptuell modell, konstruktion av en numerisk modell, kalibrering och slutligen prognosmoduleringar. Modelleringen är avgörande för att förstå och hantera de hydrogeologiska effekterna. Modellens viktigaste resultat är storleksordningen av nuvarande och tillkommande grundvatteninläckage, samt associerad påverkan (avsänkning) av grundvattnet och dess geografiska utbredning.

4.7 Resultat

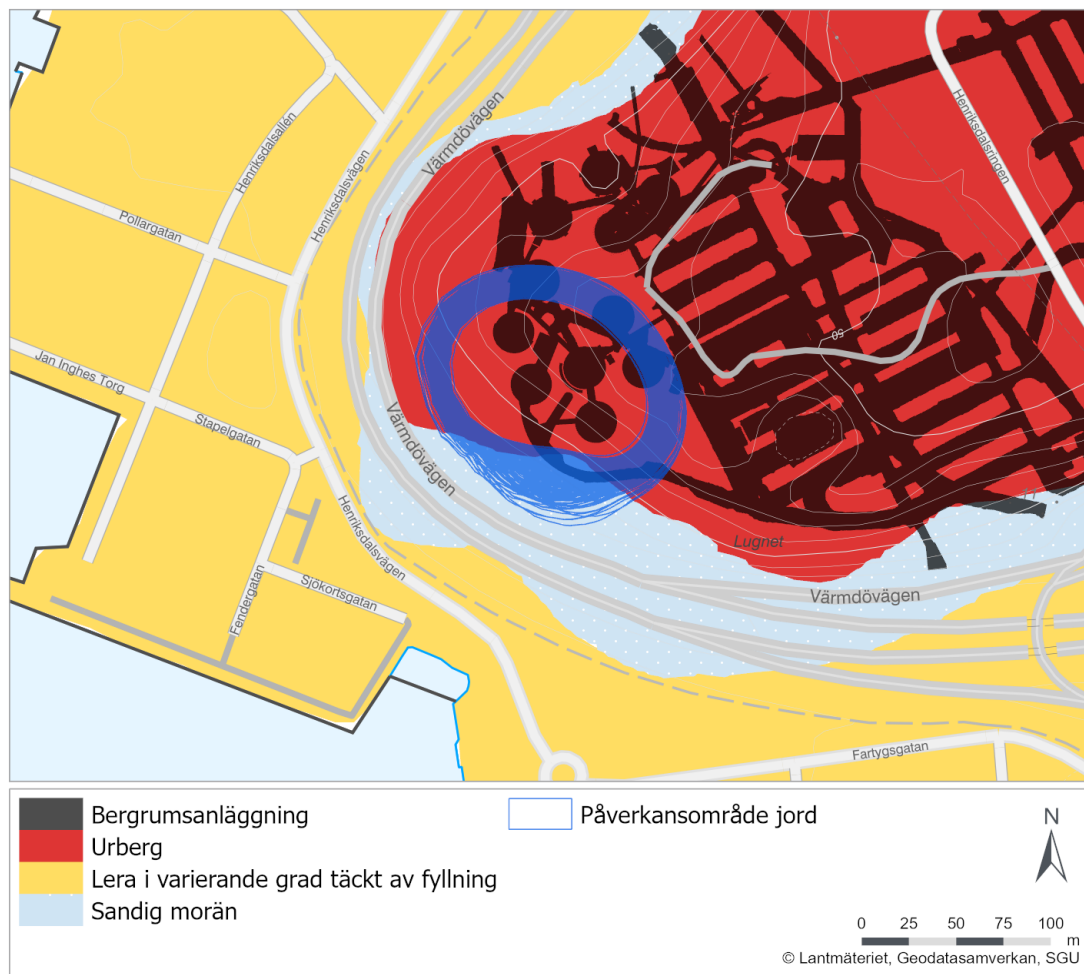
I resultaten av grundvattenmodelleringen redovisas en linje för varje medlem i modellensembeln i Figur 20 till 23. Linjen representerar gränsen för påverkansområdet som i jordlager definierats som 0,3 meters trycksänkning och för berg 1,0 meters trycksänkning.



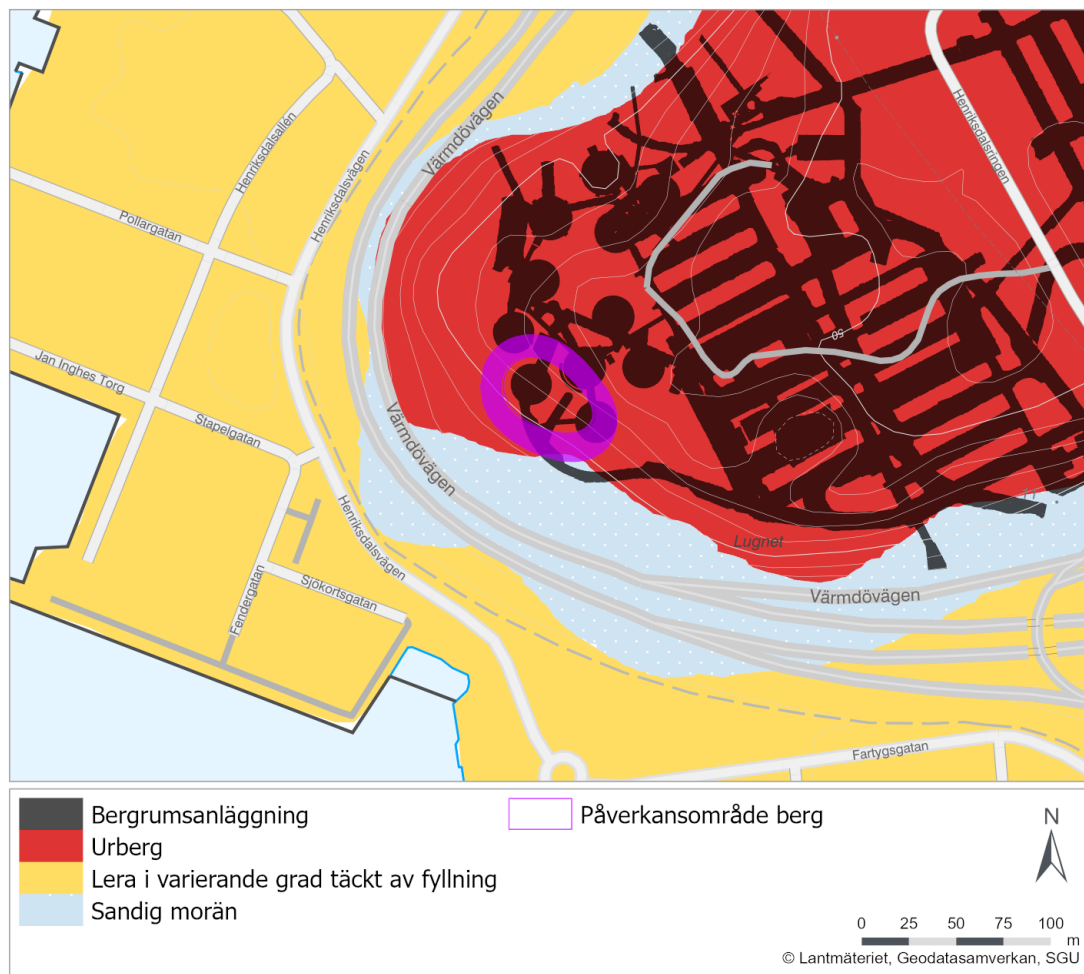
Figur 20. Resultatet av den första prognosmodellen som avser påverkan av hela bergrumsanläggningen inklusive RK8 och RK9 med tillhörande schakt och tunnlar. Blå linjer motsvarar gränsen för 0,3 m trycksänkning i jordlager (undre magasin).



Figur 21. Resultatet av den första prognosmodellen som avser påverkan av hela bergrumsanläggningen inklusive RK8 och RK9 med tillhörande schakt och tunnlar. Lila linjer markerar gränsen för 1,0 m trycksänkning i berg.

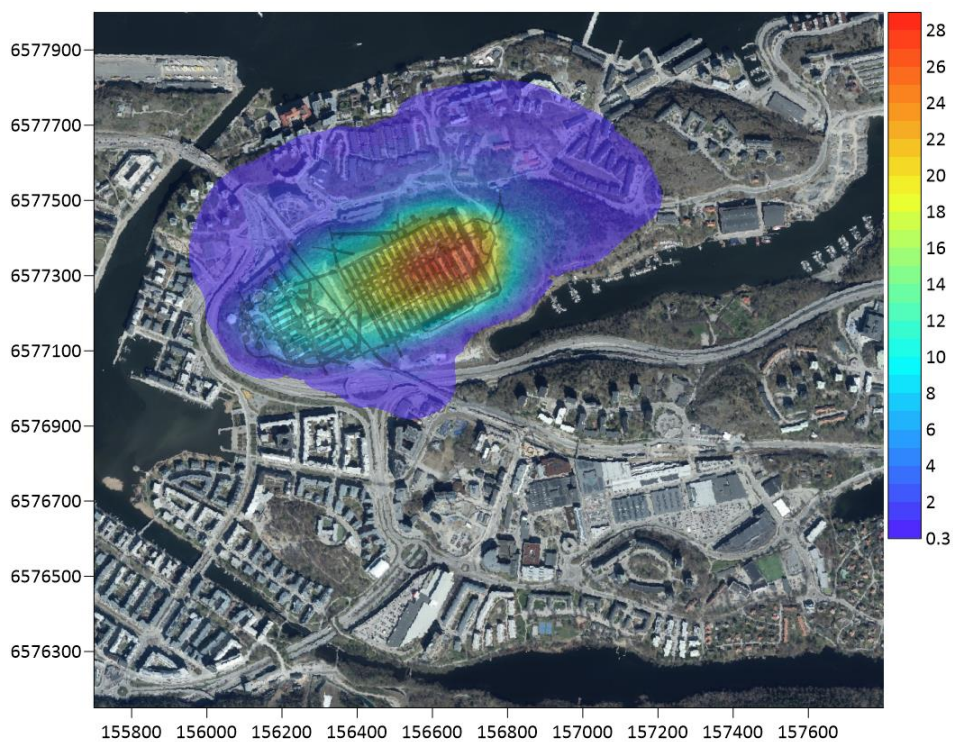


Figur 22. Resultatet av den andra prognosmodellen som avser påverkan av endast RK8 och RK9 med tillhörande schakt och tunnlar utöver bergumsanläggningens befintliga påverkan. Blå linjer motsvarar gränsen för 0,3 m trycksänkning i jordlager (undere magasin).

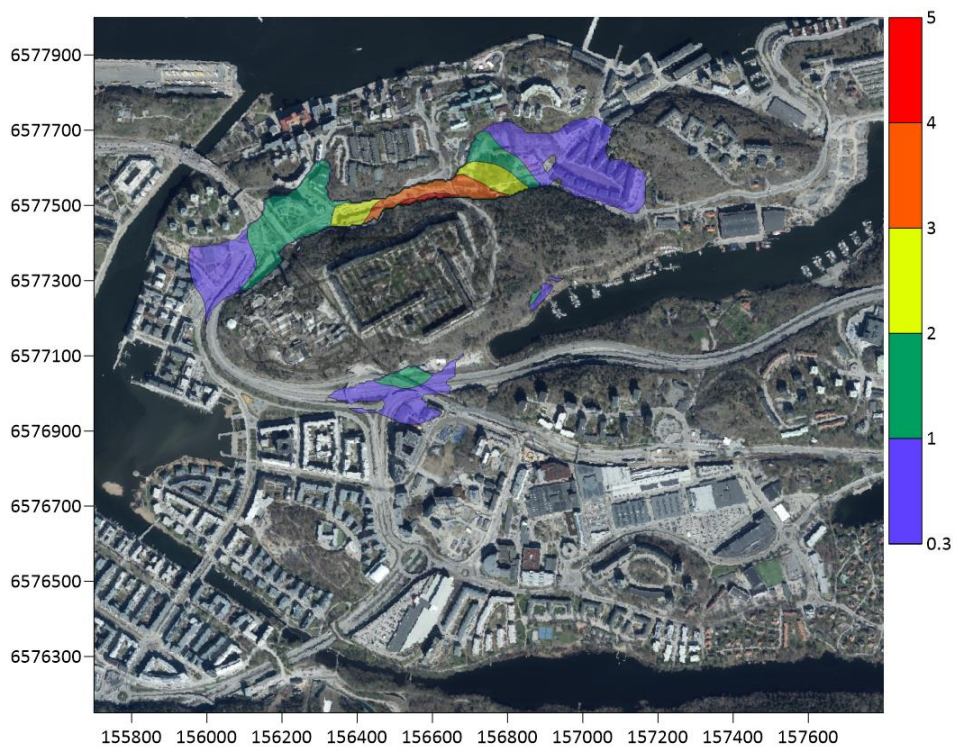


Figur 23. Resultatet av den andra prognosmodellen som avser påverkan av endast RK8 och RK9 med tillhörande schakt och tunnlar utöver berggrumsanläggningens befintliga påverkan. Lila linjer markerar gränsen för 1,0 m trycksänkning i berg.

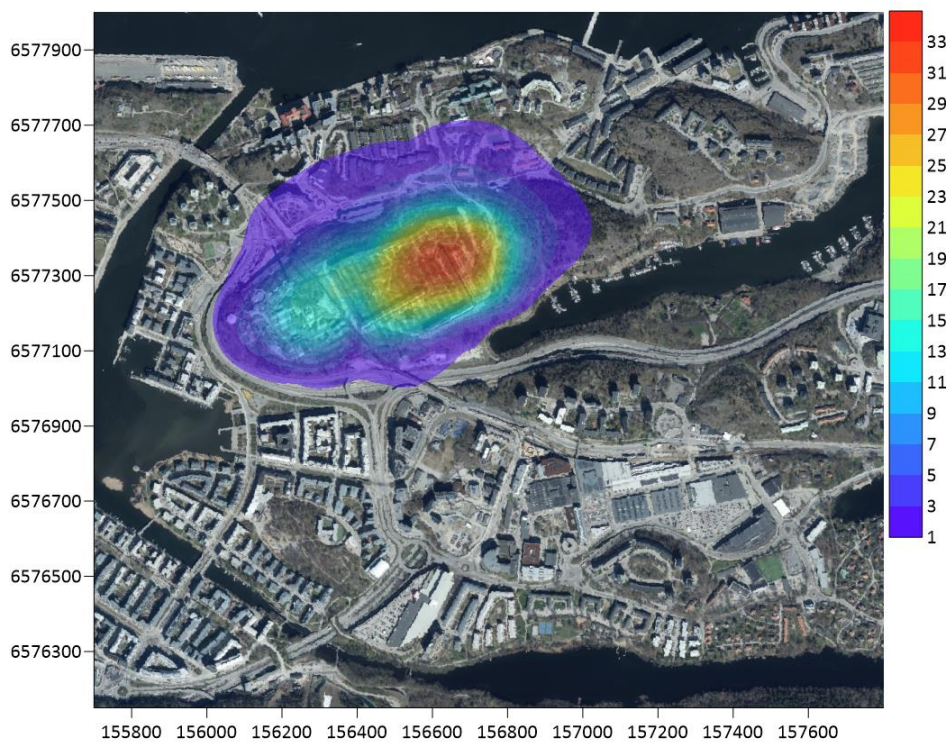
För att bättre förstå trycksänkningens variation har också trycksänkningen i jord och berg uttryckts som en yta med graderad skala en utvald medlem ur beräkningssensembeln (Figur 24 - 26). Därtill redovisas den modellerade mäktigheten för mättad zon i jordlager i Figur 27.



Figur 24. Exempel på trycksänkning runt anläggningen för en ensemblemedlem i modellens tredje beräkningslager.



Figur 25. Modellerad trycksänkning i undre magasin i jordlager för utvald ensemblemedlem.



Figur 26. Modellerad trycksänkning i berg för utvald ensemblemedlem.

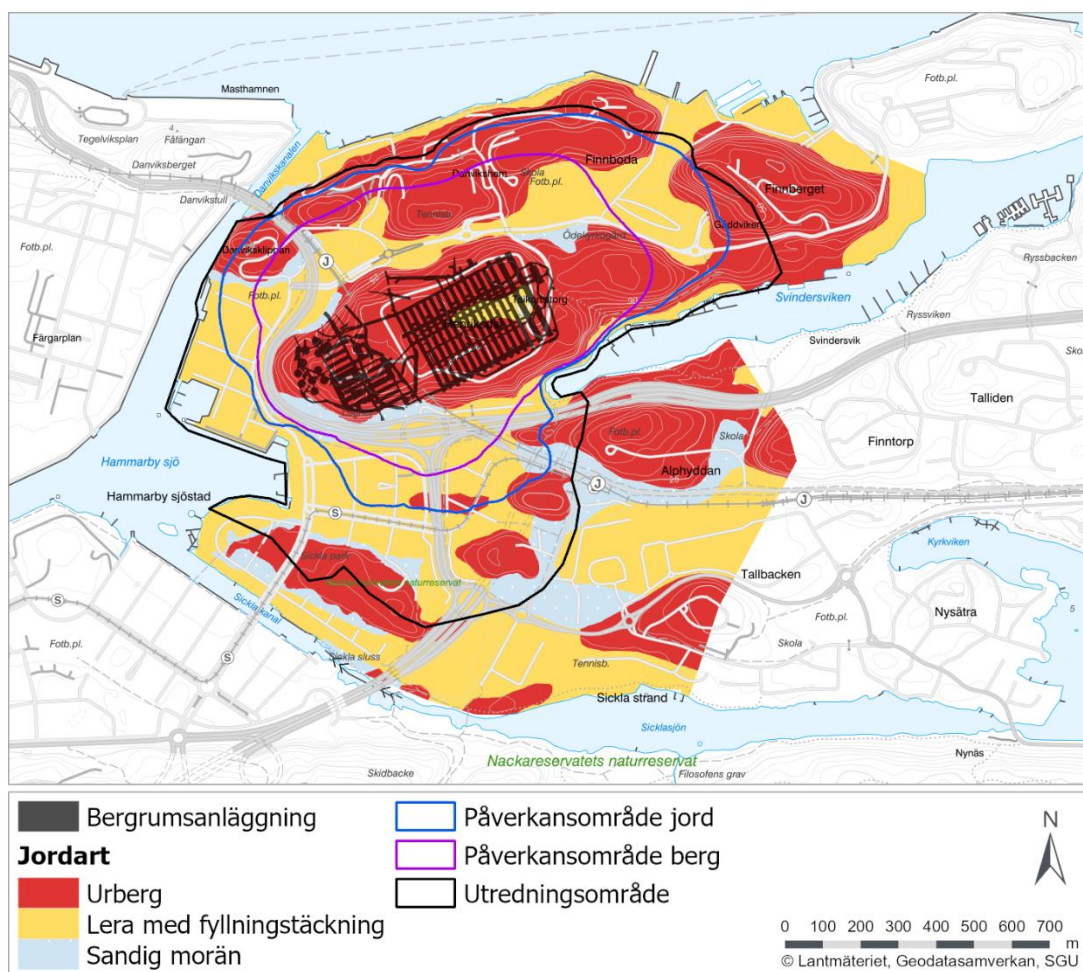


Figur 27. Antal meter mättad zon i jordlager för en ensemblemedlem i grundvattenmodellen. Blå pil markerar utströmning över icke tät rand och röda linjer markerar öppna vattendrag eller områden med en i modellen definierad fast trycknivå.

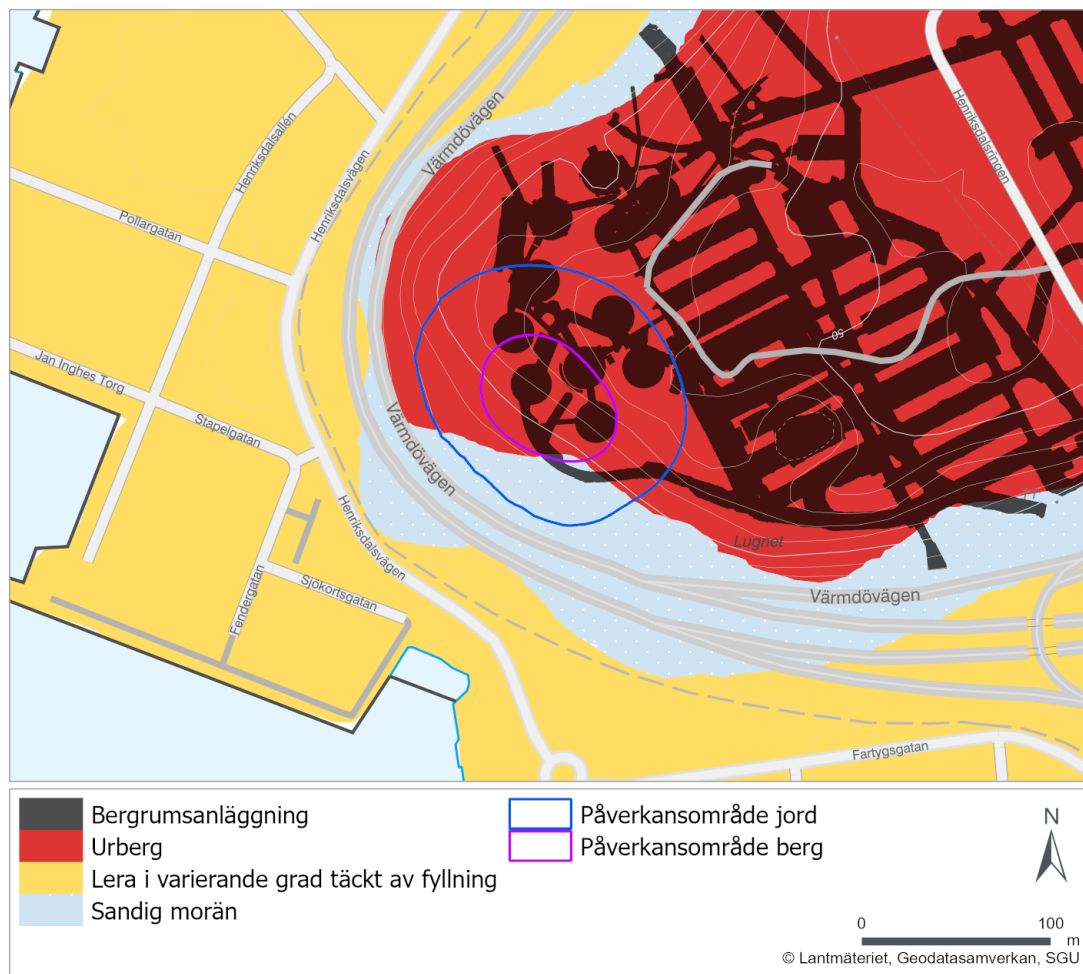
5. Slutsats

Den kalibrerade ensemblen av grundvattenmodeller ger en god representation av områdets grundvattenförhållanden. Modellen har haft tillgång till ett stort antal observationspunkter vilket borgar för en robust osäkerhetsanalys som hanterar en stor mängd av de osäkerheter som kan förväntas påverka analysens giltighet.

Det beräknade påverkansområdets utbredning har konservativt ansatts till den maximala utbredningen av samtliga ensemblemedlemmar för såväl påverkan i jord som berg. I Figur 28 redovisas det beräknade påverkansområdet för hela bergrumsanläggningen inklusive RK8 och RK9 med tillhörande schakt och tunnlar, Prognosfall 1. I Figur 29 redovisas motsvarande påverkansområde för endast RK8 och RK9 med tillhörande schakt och tunnlar (utöver befintlig påverkan från bergrumsanläggningen), Prognosfall 2.



Figur 28. Påverkansområde i jord (>0,3 m trycksänkning) och berg (>1,0 m trycksänkning) till följd av bortledning av grundvatten till befintlig bergrumsanläggning inkl. RK8 och RK9 med tillhörande schakt och tunnlar.



Figur 29. Påverkansområde i jord ($>0,3$ m trycksänkning) och berg ($>1,0$ m trycksänkning) till följd av bortledning av grundvatten till endast RK8 och RK9 med tillhörande schakt och tunnlar (utöver påverkan från befintlig bergrumsanläggning).

Påverkansområdet representerar den förutsebara effekt som anläggningen förväntas ha haft och har på grundvattennivåerna i omgivningen sedan dess konstruktion på 30-talet. Modellen har av förklarliga skäl inte utgått ifrån den bebyggelse som befann sig på platsen i samband med anläggningens upprättande då det är ett underlag som skapar än större osäkerhet och där relevant information saknas. Med detta åsyftas beaktande av för den tiden aktuella grundvattenuttag, förekomst eller avsaknad av tunnlar eller andra undermarkskonstruktioner som på den tiden hade en effekt på områdets grundvattennivåer. Situationen som återspeglas i modellen är alltså samtliga fall relativt den bebyggelse som idag är känd för projektet och förekommer i området.

Det beräknade inläckaget för RK8 och RK9 med tillhörande schakt och tunnlar beräknas uppgå till mindre än 5 l/min medan anläggningen i övrig bedöms ha ett inläckage av grundvatten i storleksordningen 34 – 51 l/min.

6. Referenser

- BeFo. (2012). *Effekter på Grund- och vattenförhållandena vid grundvattenbortledning från berganläggningar (BeFo Rapport 117)*. Stockholm: Stockholm.
- Chang, Y., Sandstedt, H., & Indridason, H. (2020). *RENINGSVERK I BERG, OMBYGGNAD I HENRIKSDAL OCH NY ANLÄGGNING I SICKLA. KOMPLICERADE BERGPROJEKT I STOCKHOLM*. Stockholm: BeFo.
- Doherty, J. (2024). *PEST: Model-Independent Parameter Estimation and Uncertainty Analysis*. Brisbane: Watermark Numerical Computing.
- Fleming, A. H. (1994). *The hydrogeology of Allen County, Indiana - a geologic and ground-water atlas: Indiana Geological Survey Special Report 57, 111 p., 10 pls*. Bloomington: Indiana Geological and Water Survey.
- J&W. (1991). *Rapport över de ingenjörsgelogiska förhållandena för planerad utbyggnad av Henriksdals avloppsreningsverk, Nacka*. Stockholm: J&W.
- J&W. (2002). *Rapport över bergbesiktning av anläggning under jord*. Stockholm: J&W.
- Langevin, C., Hughes, J., Provost, A., Russcher, M., Niswonger, R., Panday, S. M., . . . Banta, E. (2022). *MODFLOW 6 Modular Hydrologic Model version 6.4.1: U.S. Geological Survey Software Release, 9 December 2022*. Reston, VA: USGS.
- NGI. (2022). *Using the Q-system, Rock mass classification and support design (Handbook)*. Oslo: Norwegian Geotechnical Institute (NGI).
- Ryd, E. (2017). *Samband mellan kapacitet vid borrning och transmissivitet i kristallint och sedimentärt berg*. 2017: Uppsala Universitet.
- SGU. (2001). *Berggrundskartan 10I Stockholm, skala 1:100 000. Sveriges geologiska undersökning Ba 60*. Stockholm: SGU.
- Stockholms stad. (den 31 December 2006). *Ekdatabasen - Kärnområden*. Hämtat från Dataportalen: <https://dataportalen.stockholm.se/dataportalen/GetMetaDataById?id=74cfd75f-125c-4e44-b7fa-690311103fc4>
- SVOA. (2017). *Ingenjörsgelogisk Prognos B01, SFAH*. Stockholm: SVOA.
- SVOA. (2020). *Nya Östbergatunneln, Bilaga G6 - Hydrogeologiska beräkningar*. Stockholm: Stockholm Vatten AB.
- SVOA. (2023). *Miljörapport 2023 - Avloppsverksamheten Stockholm Vatten och Avfall*. Stockholm: SVOA.
- SVOA. (2023d). *Promemoria - Inventering läns pumpar*. Stockholm: SVOA.
- SVOA. (2024a). *Avloppsreningsverk*. Hämtat från <https://www.stockholmvattenochavfall.se/kunskap/sahar-renas-vatten-och-avlopp/avloppsrening/avloppsreningsverk/>
- SVOA. (2024b). *Om oss*. Hämtat från <https://www.stockholmvattenochavfall.se/om-oss/om-oss/om-bolaget/om-oss/>
- Sweco. (2021). *Stockholms framtida avloppsrening Reningsverk SFAR, Ingenjörsgelogisk prognos Rötammare 8*. Stockholm: SVOA.
- Trafikverket. (den 28 september 2022). *Trafikverket.se*. Hämtat från Östlig förbindelse - Precisering av riksintresse kommunikation Nacka och Stockholms kommuner, Stockholms län, Slutversion 2022-09-28 Ärendenummer: TRV 2018/125435: <https://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1700959/FULLTEXT01.pdf>

Winston, R. (2022). *ModelMuse version 5.1.1: U.S. Geological Survey Software Release*. Reston, VA: USGS.



Stockholm Vatten och Avfall är en samhällsbyggare i framkant som driver och utvecklar vatten- och avfallstjänster med miljöfokus. Varje dag, året runt förser vi 1,5 miljoner stockholmare med rent och gott kranvatten, renar avloppsvatten och ser till att avfallet tas om hand. Tillsammans med invånare, företag och andra intressenter arbetar vi för att Stockholm ska bli världens mest hållbara stad.

Stockholm Vatten och Avfall
Tel 08-522 120 00
kund@svoa.se
www.svoa.se

En del av Stockholms stad