

## Bilaga F5. Hydrogeologiska beräkningar

Stockholm Vatten VA AB

### Stockholms Framtida Avloppsrening

Stockholm 2015-06-15

## Bilaga F5. Hydrogeologiska beräkningar

Datum 2015-06-15

Diarienummer 13SV150

Utgåva/Status Tillståndshandling

Jan Salomonson  
Uppdragsledare

Marcus Heinke, Carl Skult  
Handläggare

Christina Jenkins  
Granskare

Uppdragsnummer 1320000111

Ramböll Sverige AB  
Box 17009, Krukmakargatan 21  
104 62 Stockholm

Telefon 010-615 60 00  
Fax 010-615 20 00  
[www.ramboll.se](http://www.ramboll.se)

Organisationsnummer 556133-0506

## Innehållsförteckning

|       |                                                 |    |
|-------|-------------------------------------------------|----|
| 1.    | Bergets hydrauliska konduktivitet.....          | 5  |
| 1.1   | Allmänt.....                                    | 5  |
| 1.2   | Data .....                                      | 5  |
| 1.2.1 | Inläckage till befintliga berganläggningar..... | 5  |
| 1.2.2 | Vattenförlustmätning i kärnborrhål .....        | 6  |
| 1.2.3 | Resultat från utförda provpumpningar.....       | 6  |
| 1.2.4 | Data från borrade energibrunnar.....            | 6  |
| 1.3   | Skalberoende .....                              | 8  |
| 2.    | Vattenbalans .....                              | 9  |
| 2.1   | Vattenbalans i modellarbetet .....              | 9  |
| 3.    | Grundvattenmodellering .....                    | 10 |
| 3.1   | VA-tunnel Bromma-Henriksdal.....                | 10 |
| 3.1.1 | Upprättade 2D-modeller .....                    | 10 |
| 3.1.2 | Modelluppbyggnad.....                           | 11 |
| 3.1.3 | Randvillkor.....                                | 11 |
| 3.1.4 | Jordlagerföljd.....                             | 12 |
| 3.1.5 | Känslighetsanalys och modellscenarion .....     | 12 |
| 3.1.6 | Modellresultat .....                            | 13 |
| 3.2   | Bromma .....                                    | 16 |
| 3.2.1 | Modelluppbyggnad.....                           | 16 |
| 3.2.2 | Randvillkor .....                               | 17 |
| 3.2.3 | Jordlagerföljd.....                             | 17 |
| 3.2.4 | Kalibrering .....                               | 18 |
| 3.2.5 | Resultat .....                                  | 18 |
| 3.3   | Smedslätten .....                               | 19 |
| 3.3.1 | Modelluppbyggnad.....                           | 19 |
| 3.3.2 | Randvillkor .....                               | 20 |
| 3.3.3 | Jordlagerföljd.....                             | 20 |
| 3.3.4 | Kalibrering .....                               | 20 |
| 3.3.5 | Resultat .....                                  | 21 |
| 3.4   | Örnsberg .....                                  | 22 |
| 3.4.1 | Modelluppbyggnad.....                           | 22 |
| 3.4.2 | Jordlagerföljd.....                             | 23 |
| 3.4.3 | Kalibrering .....                               | 23 |

|       |                                                        |    |
|-------|--------------------------------------------------------|----|
| 3.4.4 | Resultat .....                                         | 23 |
| 3.5   | Liljeholmen .....                                      | 24 |
| 3.5.1 | Modelluppbyggnad.....                                  | 24 |
| 3.5.2 | Jordlagerföljd.....                                    | 25 |
| 3.5.3 | Kalibrering .....                                      | 25 |
| 3.5.4 | Resultat .....                                         | 25 |
| 3.6   | Bergrumsanläggning Sickla .....                        | 26 |
| 3.6.1 | Modelluppbyggnad.....                                  | 26 |
| 3.6.2 | Jordlagerföljd.....                                    | 27 |
| 3.6.3 | Kalibrering .....                                      | 27 |
| 3.6.4 | Resultat .....                                         | 28 |
| 4.    | Analytisk beräkning av inläckage .....                 | 30 |
| 4.1   | Beräkning av vattenbalans mot beräknat inläckage ..... | 32 |

## 1. Bergets hydrauliska konduktivitet

### 1.1 Allmänt

Vattenflödet i berg sker i bergets sprickstrukturer och styrande för inläckaget till planerad tunnel är framförallt bergets hydrauliska konduktivitet (K) vilken är beroende av bland annat sprickfrekvensen, sprickornas egenskaper och utbredning. Utbredningen av sprickor och dess egenskaper kan variera inom en relativt begränsad yta men om den betraktade bergvolymen är tillräckligt stor kan dock bergets genomsnittliga egenskaper beskrivas som ett poröst och isotropt medium. Konduktiviteten för bergmassan genom vilken tunneln löper ses som en enhet där hänsyn tas till svaghetszoner som passeras men ej olika bergarter. Bergarterna har olika mekaniska och kemiska egenskaper vilket kan påverka den hydrauliska ledningsförmågan. Bland annat så är den kemiska vittringen för basiska bergarter större än för sura bergarter, vilket innebär att sprickorna vidgas men också att de ofta fylls med vittringsprodukter och sätts igen. De mekaniska och kemiska egenskaperna sammantaget innebär att genomsläppligheten oftast är högre i en sur bergart, dock är variationerna inom en bergart större än variationen mellan olika bergarter. Någon hänsyn till vilken bergart tunneln passerar igenom har därför inte tagits och insamlade data har inte kopplats till en specifik bergart. Bergarten påverkar därför inte indata vid beräkningarna. Istället har en känslighetsanalys gjorts vid samtliga beräkningar där värdet på den genomsnittliga hydrauliska konduktiviteten varierats för att se hur detta påverkar inläckage och påverkansområde. En högre konduktivitet har också använts i känsliga områden där tunneln passerar en eventuell svaghetszon baserat på den byggnadsgeologiska kartan.

### 1.2 Data

Vid beräkningarna av påverkansområde och inläckage för tunneln har en hydraulisk konduktivitet för berget uppskattats genom följande data:

- Uppmätt inläckage till befintlig tunnel längst sträckningen
- Vattenförlustmätningar i kärnborrhål
- Utförda provpumpningar i berg
- Data från borrade energibrunnar (SGU)

#### 1.2.1 Inläckage till befintliga berganläggningar

En enkel 3D-modell har ställts upp vilken har kalibrerats mot uppmätt inläckage till en oinjekterad teletunnel under Årstafältet. Modellen har efter kalibrering gett ett genomsnittligt K-värde på berget, se Tabell 1.

Tabell 1. Uppmätt inläckage (Q), ansatt K-värde samt resulterande simulerat inflöde.

| Berganläggning      | Q                 | K [m/s]           | Simulerat Q     |
|---------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| Kraftledningstunnel | 3.8 [l/min/100 m] | $2 \cdot 10^{-8}$ | 4 [l/min/100 m] |

- 1.2.2 Vattenförlustmätning i kärnborrhål  
Vattenförlustmätning har utförts med dubbelmanschett i 3 m sektioner i borrade kärnborrhål. I KBH02 har även helhålmätning utförts med enkelmanschett men vattenförlusten var för stor för att nå upp till 4 bars övertryck och därmed få ett tillräckligt noggrant resultat. Mätning har utförts med utrustning med ett lägsta mätbart flöde på ca 0,1 l/s vilket kan översättas till en lägsta mätbar konduktivitet på ca  $2 \cdot 10^{-8}$  m/s. Detta medför att för de flesta sektioner i testade kärnborrhål är flödet för lågt för att kunna utvärderas och konduktiviteten i dessa sektioner kan endast sägas vara mindre än  $2 \cdot 10^{-8}$  m/s.

Beräkning av konduktivitet från vattenförlustmätningarna har utförts med Moyes formel.

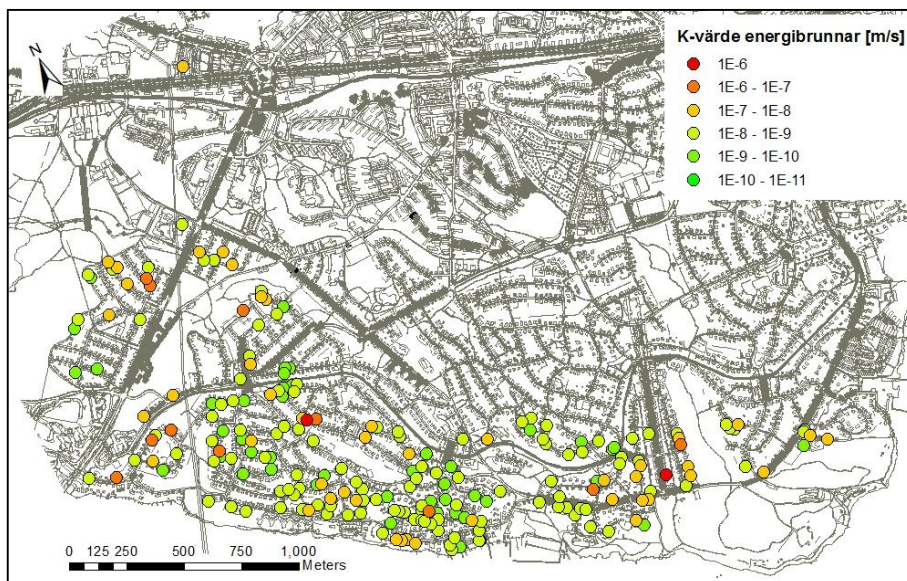
- 1.2.3 Resultat från utförda provpumpningar

Se bilaga 6 till TB kap 11.

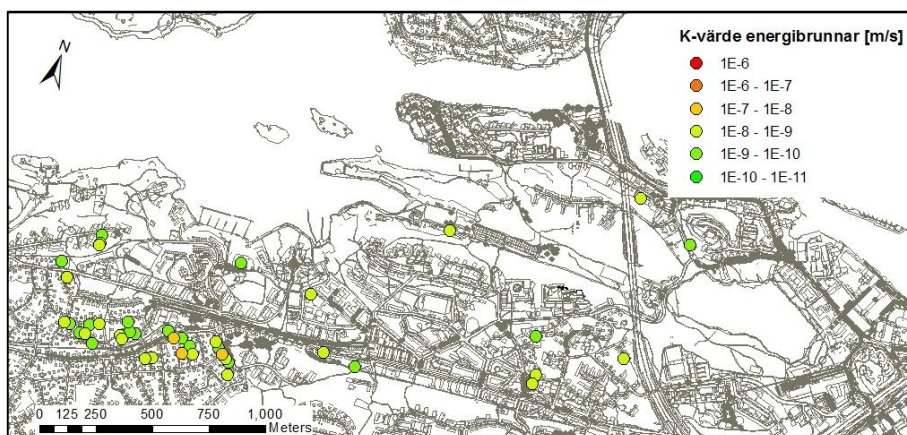
- 1.2.4 Data från borrade energibrunnar  
En transmissivitet ( $m^2/s$ ) för respektive energibrunn inom ett avstånd av 500 m från planerad tunnel har beräknats med hjälp av Thiems ekvation. Från detta har sedan en konduktivitet (m/s) beräknats med hjälp av brunnsdjupet utifrån förhållandet mellan transmissivitet och konduktivitet.

$$T = \frac{Q}{2\pi \cdot \Delta s} \cdot \ln \frac{R_0}{r_w}$$

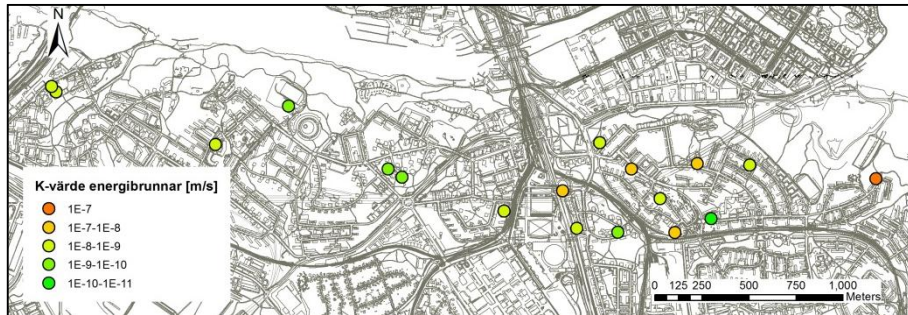
Vid beräkningarna har en influensradie ( $R_0$ ) på 1000 m antagits. Resultatet är relativt okänsligt för influensradiens storlek. För de brunnar där brunnsdiametern inte står angiven i databasen har en diameter på 135 mm antagits. Resultaten presenteras i Figur 1-Figur 3 samt i Tabell 2.



Figur 1. Konduktivitet i berg i Bromma inom 500 m från planerad tunnel. Konduktiviteten är beräknad utifrån data från befintliga energibrunnar.



Figur 2. Konduktivitet i berg mellan Eolshäll och Liljeholmen inom 500 m från planerad tunnel. Konduktiviteten är beräknad utifrån data från befintliga energibrunnar (ofta finns flera brunnar på en fastighet, dessa visas i figuren tillsammans i en punkt).



Figur 3. Konduktivitet i berg från Årstadal till Sickla inkl. Enskede och inom 500 m från planerad tunnel. Konduktiviteten är beräknad utifrån data från befintliga energibrunnar (ofta finns flera brunnar på en fastighet, dessa visas i figuren tillsammans i en punkt).

Tabell 2. Fördelning av beräknad hydraulisk konduktivitet för områdena Bromma, Årstadal till Sickla inkl. Enskede samt för hela sträckningen

|                        | Hela sträckan               | Bromma                      | Årstadal-Sickla och Enskede |
|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Antal brunnar          | 438                         | 204                         | 73                          |
| Max                    | $1,18 \cdot 10^{-6}$ [m/s]  | $1,60 \cdot 10^{-6}$ [m/s]  | $4,65 \cdot 10^{-7}$ [m/s]  |
| Min                    | $5,28 \cdot 10^{-11}$ [m/s] | $7,00 \cdot 10^{-11}$ [m/s] | $6,97 \cdot 10^{-11}$ [m/s] |
| Median                 | $1,85 \cdot 10^{-9}$ [m/s]  | $3,10 \cdot 10^{-9}$ [m/s]  | $2,18 \cdot 10^{-9}$ [m/s]  |
| Aritmetiskt medelvärde | $1,88 \cdot 10^{-8}$ [m/s]  | $4,70 \cdot 10^{-8}$ [m/s]  | $1,94 \cdot 10^{-8}$ [m/s]  |
| Geometriskt medelvärde | $2,33 \cdot 10^{-9}$ [m/s]  | $4,58 \cdot 10^{-9}$ [m/s]  | $2,10 \cdot 10^{-9}$ [m/s]  |

### 1.3

#### Skalberoende

Vid bearbetning av konduktivitetsmätningar som underlag för modellering bör man beakta skalberoendet. Det innebär att den hydrauliska konduktiviteten i stor skala som ska gälla för en berganläggning ofta är mindre än det aritmetiska medelvärdet av de hydrauliska konduktiviteterna mätta i liten skala.<sup>1</sup> Detta eftersom de vattenförande sprickorna har ändlig utbredning. Beräkningar utförda med data från konduktiviteter mätta i liten skala ger därför ett konservativt beräknat inläckage och påverkansområde.

<sup>1</sup> Hydrogeologi för bergbyggare, Gunnar Gustafson, 2009.

## 2. Vattenbalans

### 2.1 Vattenbalans i modellarbetet

Nederbörd, evaporation, transpiration (ibland evapotranspiration) och grundvattenavrinning/-bildning är betydelsefulla indata vid grundvattenmodellering. Vattenbalansen för ett område kan skrivas:

$$P = ET + R_S + R_G - \Delta S$$

där

P = Nederbörd (Precipitation)

ET = Evapotranspiration (avdunstning från markyta och vegetation)

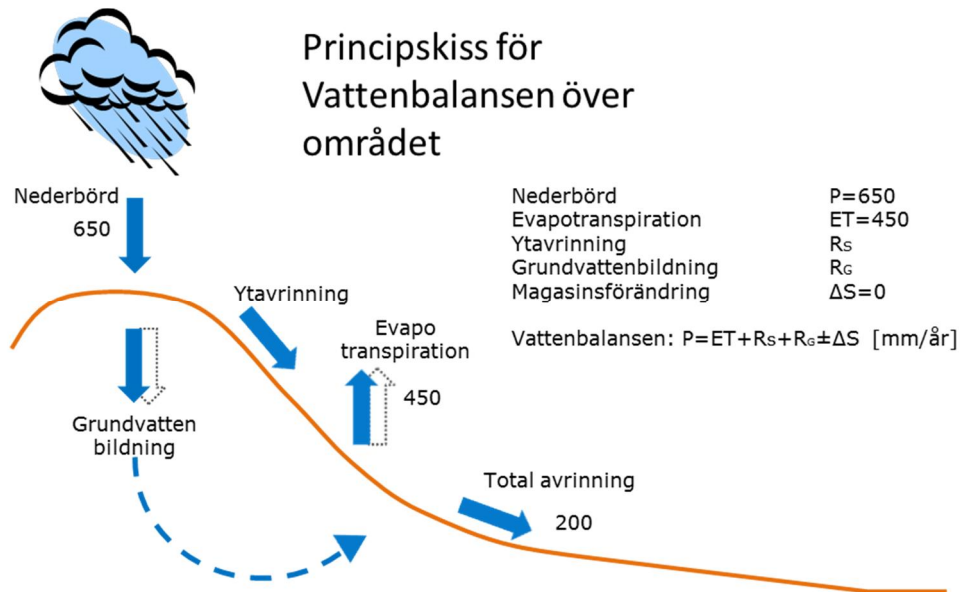
RS = Ytavrinning

RG = Grundvattenavrinning/bildning

$\Delta S$  = Magasinsförändring

Den korrigerade nederbörden (R) uppgår till ca 650 mm/år över Stockholmsområdet. Evapotranspirationen (ET) i området är ca 450 mm/år<sup>2</sup> och avrinningen (RS + RG) är uppskattad till ca 200 mm/år. Under de kallare månaderna (dec-mar) samt under sommaren (jun-aug) bildas inget eller litet grundvatten. Den huvudsakliga grundvattenbildningen sker således under snösmältningen och hösten.

Vattenbalansen för området vid opåverkade förhållanden finns redovisade i Figur 4.



Figur 4. Vattenbalansen över området utan grundvattenuttag. Enhet mm/år.

Grundvattenbildningen, "recharge" i samtliga grundvattenmodeller har satts till 200 mm/år.<sup>3</sup>

### 3. Grundvattenmodellering

Grundvattenmodellerna har satts upp med hjälp av programvaran Visual MODFLOW Pro (version 2011.1), som 3-dimensionella flerlagermodeller. Modellerna är så kallade "Finit Differens Modell", FDM. Modellerna har ställts upp för en jämviktslösning ("steady-state") vilket innebär att modellen gäller för en tidpunkt då hela modellen är i jämvikt. Detta antagande är en förenkling av verkligheten då både nivåer, flöden och grundvattenbildning varierar över året.

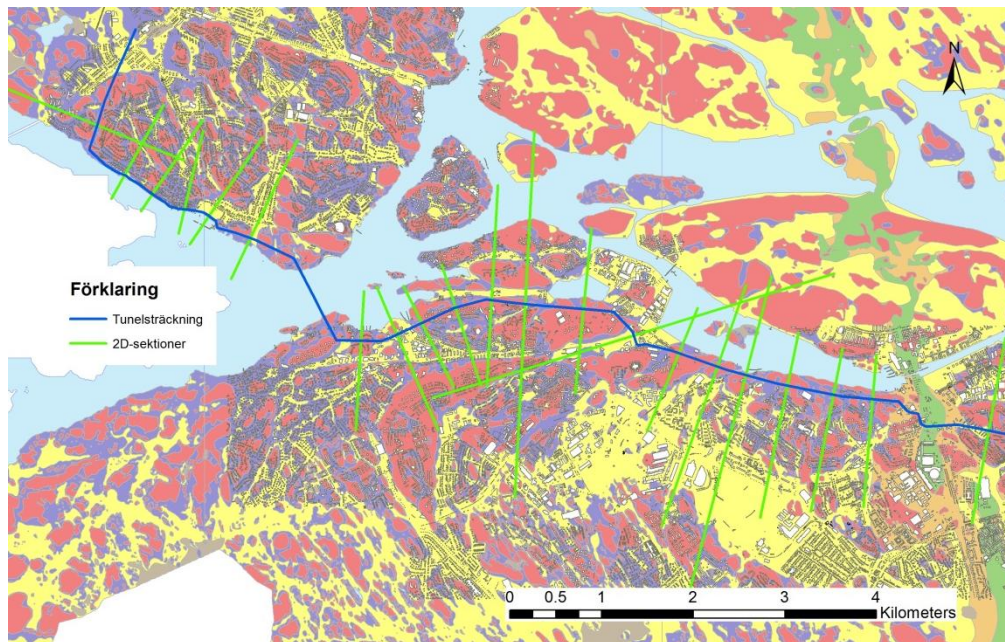
#### 3.1 VA-tunnel Bromma-Henriksdal

För tunnelsträckan Bromma-Henriksdal har påverkansområdet beräknats med hjälp av 2D-sektioner.

##### 3.1.1 Upprättade 2D-modeller

För sträckan Bromma-Henriksdal har 21 stycken 2D-sektioner ställts upp. Dessa har placerats strategiskt för att ge en bild av hur grundvattensituationen till följd av tunneln påverkas av topografi, jordlagerföljd, varierande K-värden samt hur tunneln påverkar grundvattnet vid identifierade riskområden.

<sup>3</sup> Grundvattenbildning i svenska typjordar – översiktlig beräkning med en vattenbalansmodell, A. Rodhe et al. 2006



Figur 5. Läget för upprättade 2D-modeller.

### 3.1.2

#### Modelluppbyggnad

De 2-dimensionella tvärsnittmodellerna har skapats genom att ett 100 meter avsnitt av tunneln "skärs ut" ur en större 3D-modell. På så sätt beräknas endast flödet som sker vertikalt mot tunnelsträckningen. Samtliga modeller har gjorts 300 m djupa och i plan är modellområdet väl tilltaget ut från tunnelsträckningen för att randvillkoren inte ska påverka simuleringsresultaten. Markytans geometri har beskrivits med hjälp av en terrängmodell som importerats till modellen vilken är baserad på grundkartan för området.

### 3.1.3

#### Randvillkor

I modelleringsarbetet har dräner eller konstant tryck använts för simulering av en dränerande tunnel samt ytavrinning.

En drän har lagts i modellernas översta lager. Randvillkoret tar bort överskottsvatten ur modellen då nivån når högre än 2 meter under marknivån. Det vatten som tas bort kan sägas representera ytavrinning. Hur mycket vatten som tas bort beror främst på vilken hydraulisk konduktivitet marken (berg eller lösa jordlager) ges i modellen samt vilket grundvattenuttag som sker i jord eller berg i modellen.

Drän/konstant tryck har även använts för att simulera kända redan befintliga tunnlar eller andra bergrumsanläggningar.

För att simulera Mälaren i modellerna har cellerna i läget för Mälaren tilldelats en konstant trycknivå vilket gör att cellerna håller trycket konstant oavsett om det flödar vatten till eller från cellerna.

Grundvattenbildning har i modellerna ansatts till 200 mm/år men har i känslighetsanalysen i kap 3.1.5 nedan varierats till 150 mm/år.

#### 3.1.4 Jordlagerföljd

Jordlagerföljden i modellerna baseras på byggnadsgeologiska kartan där det översta lagret i modellen har en konduktivitet motsvarande jordarten som visas i den byggnadsgeologiska kartan. Då lera läggs in i modellen har lagret under detta givits en konduktivitet motsvarande morän. Konduktiviteten för lera har i arbetet med 2D-modellerna satts till  $1 \cdot 10^{-9}$  m/s och morän till  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s. Dessa värden baseras på erfarenheter från liknande arbeten. I berg har, baserat på utförda undersökningar, som medelfall använts en konduktivitet på  $2 \cdot 10^{-8}$  m/s, och injektering kring tunnelutförande har fått en konduktivitet på  $5 \cdot 10^{-9}$  m/s. Dessa parametrar har varierats, se kap 3.1.5. Injektering har satts runt projekterad tunnel men inte kring befintliga tunnlar, förutom i de fall där injektering är känd (Södra Länken och Skanstull-Solberga). Injekteringszonens mäktighet varierar något och är beroende av cellstorlek.

#### 3.1.5 Känslighetsanalys och modellscenarion

En modell är alltid behäftad med osäkerheter, både vad gäller uppbyggnad och indata. För att uppskatta variationer i påverkan har vissa parametrar varierats inom rimliga intervall, och olika påverkansområden och inläckage har beräknats.

Den hydrauliska konduktiviteten i berg har bedömts ha stor inverkan på modellresultatet, medan den hydrauliska konduktiviteten på lera och morän i detta fall inte bedöms påverka i lika stor grad. Grundvattenbildning är en annan parameter som är behäftad med stor osäkerhet, framför allt på grund av olika andel hårdgjorda ytor. Därför har dessa parametrar valts ut för känslighetsanalys. Tre variationer på hydraulisk konduktivitet för 2 olika grundvattenbildningar har modellerats vilket resulterar i totalt 6 olika scenarion, se Tabell 3.

Den hydrauliska konduktiviteten (K) i berg motsvarar i scenario 1 det aritmetiska medelvärde i kap 1.2.4. samt i modell beräknat K-värde (kap 1.2.1). I scenario 2 motsvaras K av det geometriska medelvärde. I scenario 3 motsvaras K för berg av en känslighetsanalys där K justerats upp med en halv tiopotens från scenario 1.  $K_{injektering}$  baseras på erfarenhetsvärden av cementinjektering, där man räknar med att det är rimligt att kunna täta med minst en tiopotens från omgivande berg men där tätning under  $1 \cdot 10^{-9}$  m/s är svårt att åstadkomma.

Tabell 3. Modellscenarion och varierade modellparametrar.

|              | K_lera            | K_morän           | K_berg            | K_inj             | Grundvattenbildning |
|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
|              | m/s               | m/s               | m/s               | m/s               | mm/år               |
| Scenario 1_1 | $1 \cdot 10^{-9}$ | $1 \cdot 10^{-6}$ | $2 \cdot 10^{-8}$ | $5 \cdot 10^{-9}$ | 200                 |
| Scenario 1_2 |                   |                   |                   |                   | 150                 |
| Scenario 2_1 |                   |                   | $2 \cdot 10^{-9}$ | $2 \cdot 10^{-9}$ | 200                 |
| Scenario 2_2 |                   |                   |                   |                   | 150                 |
| Scenario 3_1 |                   |                   | $7 \cdot 10^{-8}$ | $7 \cdot 10^{-9}$ | 200                 |
| Scenario 3_2 |                   |                   |                   |                   | 150                 |

För sektion 12\_640 har även en vittrad sektion vid tunnelutförandet modellerats för varje scenario. Den vittrade sektionen är i modellen ca 60 m bred, omsluter SFAL på alla sidor och går hela vägen ned till modellbotten. Konduktivitet är ansatt till  $1 \cdot 10^{-7}$  m/s för vittrad bergart.

### 3.1.6

#### Modellresultat

Samtliga modeller har först körts opåverkade från tunnelutförande för att ta fram nuvarande grundvattennivåer. Därefter har tunnelutförande modellerats och påverkan har beräknats från de tidigare modellerade grundvattennivåerna.

Påverkansområdet i berg har beräknats för 1 meters trycknivåsänkning 10 m under bergöverytan, i enlighet med definitionen av påverkansområde i berg, vilket redovisas i Tabell 4 nedan.

*Tabell 4. Påverkansområde i berg för 1 m trycknivåsänkning 10 m under bergöverytan (scenario 1-1).*

|         | 1 m trycknivåsänkning, påverkansområde 10 m under bergöverytan |          |
|---------|----------------------------------------------------------------|----------|
|         | väst/syd                                                       | öst/norr |
| Sektion | m                                                              | m        |
| 1+080   | 128                                                            | 53       |
| 1+850   | 23                                                             | 50       |
| 2+200   | 16                                                             | 72       |
| 2+600   | 13                                                             | 29       |
| 2+900   | 32                                                             | 130      |
| 3+400   | 88                                                             | 184      |
| 5+250   | 78                                                             | 86       |
| 5+650   | 199                                                            | 56       |
| 5+940   | 66                                                             | 46       |
| 6+350   | 42                                                             | 35       |
| 6+750   | 47                                                             | 116      |
| 7+150   | 37                                                             | 42       |
| 7+750   | 93                                                             | 93       |
| 8+450   | 204                                                            | 254      |
| 9+050   | 29                                                             | 66       |
| 9+450   | 215                                                            | 71       |

|                      | 1 m trycknivåsänkning, påverkansområde 10 m<br>under bergöverytan |          |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------|----------|
|                      | väst/syd                                                          | öst/norr |
| Sektion              | m                                                                 | m        |
| 9+600                | 77                                                                | 48       |
| 10+250               | 79                                                                | 115      |
| 10+750               | 125                                                               | 109      |
| 11+200               | 80                                                                | 71       |
| 12+640_vittrad       | 95                                                                | 112      |
| 12+640_ej<br>vittrad | 64                                                                | 74       |

Inläckage i både SFAL och befintliga tunnlar har också modellerats och redovisas i Tabell 5.

Tabell 5. Modellerat inflöde i nya och befintliga tunnlar, scenario 1\_1

|         | Inflöde<br>SFAL | Inflöde<br>bef tunnlar,<br>utan SFAL | Inflöde<br>bef tunnlar,<br>med SFAL | Minskning av<br>inflöde<br>till bef tunnlar | Totalt uttag<br>med SFAL | Ökat<br>uttag<br>med<br>SFAL |
|---------|-----------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| Sektion | l/min*100 m     | l/min*100 m                          | l/min*100 m                         | %                                           | l/min*100 m              | %                            |
| 1+080   | 5,5             | 4,7                                  | 4,0                                 | -16%                                        | 10,2                     | 217                          |
| 1+850   | 4,0             | -                                    | -                                   | -                                           | 4                        |                              |
| 2+200   | 5,0             | 3,5                                  | 3,5                                 | 0%                                          | 8,5                      | 242                          |
| 2+600   | 3,8             | -                                    | -                                   | -                                           | 3,8                      |                              |
| 2+900   | 3,1             | -                                    | -                                   | -                                           | 3,1                      |                              |
| 3+400   | 2,5             | -                                    | -                                   | -                                           | 2,5                      |                              |
| 5+250   | 6,5             | 2,9                                  | 0,8                                 | -72%                                        | 7,3                      | 251                          |
| 5+650   | 5,2             | -                                    | -                                   | -                                           | 5,2                      |                              |

|                   |      |      |      |      |      |     |
|-------------------|------|------|------|------|------|-----|
| 5+940             | 4,7  | 2,3  | 1,6  | -30% | 6,3  | 274 |
| 6+350             | 5,5  | 4,7  | 3,4  | -28% | 8,9  | 189 |
| 6+750             | 4,2  | 7,1  | 5,8  | -18% | 10   | 141 |
| 7+150             | 4,0  | 2,5  | 1,9  | -23% | 5,9  | 236 |
| 7+750             | 6,1  | 4,6  | 2,3  | -49% | 8,4  | 183 |
| 8+450             | 2,8  | 3,4  | 3,1  | -11% | 5,9  | 174 |
| 9+050             | 4,1  | 8,3  | 6,9  | -17% | 11   | 134 |
| 9+450             | 5,2  | -    | -    | -    | 5,2  |     |
| 9+600             | 4,2  | 4,0  | 3,6  | -10% | 7,8  | 195 |
| 10+250            | 4,8  | 10,5 | 8,9  | -15% | 13,7 | 130 |
| 10+750            | 5,8  | 22,8 | 20,0 | -12% | 25,8 | 113 |
| 11+200            | 6,3  | 12,8 | 11,3 | -11% | 17,6 | 138 |
| 12+640_vittrad    | 10,0 | 15,1 | 10,8 | -29% | 20,8 | 138 |
| 12+640_ej vittrad | 7,1  | 13,9 | 11,8 | -15% | 18,9 | 136 |

Kort sammanfattat har inflödet till projekterad tunnel modellerats till 2,5-10 l/min\*100 m i scenario 1\_1. I många fall är det modellerade inflödet till SFAL större än vad som beräknas för befintliga tunnlar. Inläckage till befintliga tunnlar sjunker dock i scenario 1\_1 med 10–30 %, i ett fall med hela 70 %, då SFAL implementeras. Observera att vissa modellutföranden innehåller flera befintliga tunnlar vilket innebär väldigt höga inläckage. Högst inläckage framkommer oftast i scenario 3\_1, d.v.s. hög genomsläpplighet och hög grundvattenbildning.

### 3.2

#### Bromma

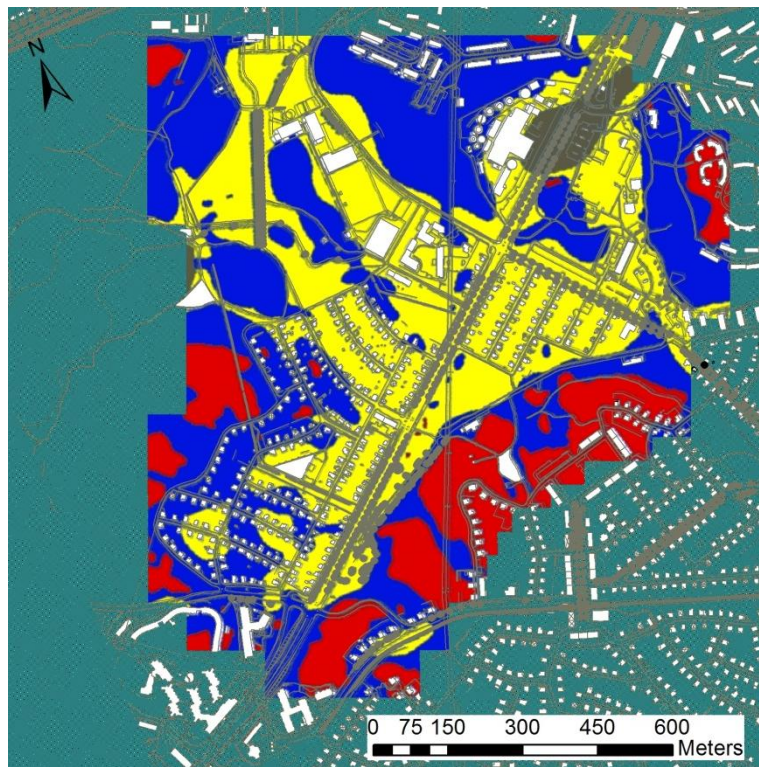
För lerområdet söder om Åkeshov har en 3D-modell byggts upp istället för en 2D-modell. Området bedöms som extra sårbart på grund av stora lerdjup med sättningsskänslig lera, ett stort antal skyddsobjekt samt flera redan befintliga dränerande tunnlar som påverkar grundvattensystemet.

#### 3.2.1

##### Modelluppbyggnad

Modellområdet är fokuserat till lerområdet sydväst om Åkeshovsvägen som breder ut sig på båda sidor om Drottningholmsvägen ned till Gubbkärrsvägen. I söder, sydost och mot väster avgränsas modellen av höjder med berg i dagen. Markytans geometri har beskrivits med hjälp av en terrängmodell och importerats till modellen. Berggrundens geometri har också beskrivits med hjälp av en

terrängmodell baserad på utförda sonderingar i centrala delarna av modellen, där geotekniskt underlag saknas har jordlagerföljd och bergöveryta antagits baserat på den byggnadsgeologiska kartan, se kap 3.2.3. Modellen består av 17 lager vars mäktighet ökar med djupet. Översta lagret har en mäktighet av ca 4 meter över lerområdet i mitten av modellen och sista lagret har här en mäktighet på ca 60 m. Botten i modellen ligger på -300 och flödet under denna nivå är litet och försumbart för resultatet.



Figur 6. Modellområdet, gröna celler är inaktiva och utanför modellområdet.

### 3.2.2

#### Randvillkor

I modellen används dräner i översta lagret för att ta bort vatten som stiger högre än 2 m under marknivån samt för att simulera dräneringen i både befintliga tunnlar och planerad tunnel.

### 3.2.3

#### Jordlagerföljd

Jordlagerföljden i modellen baseras på sonderingar och där sonderingar saknas på byggnadsgeologiska kartan där det översta lagret i modellen har en konduktivitet motsvarande jordarten som visas i den byggnadsgeologiska kartan. Lera förutsätts i modellen underlagras av morän där sonderingar saknas. Detta är en förenkling av verkligheten då geologin sällan är homogen utan områden med både högre och lägre konduktivitet förekommer, dock har konduktiviteten på friktionsmaterialet visat sig ha en begränsad effekt på modellresultatet.

### 3.2.4

#### Kalibrering

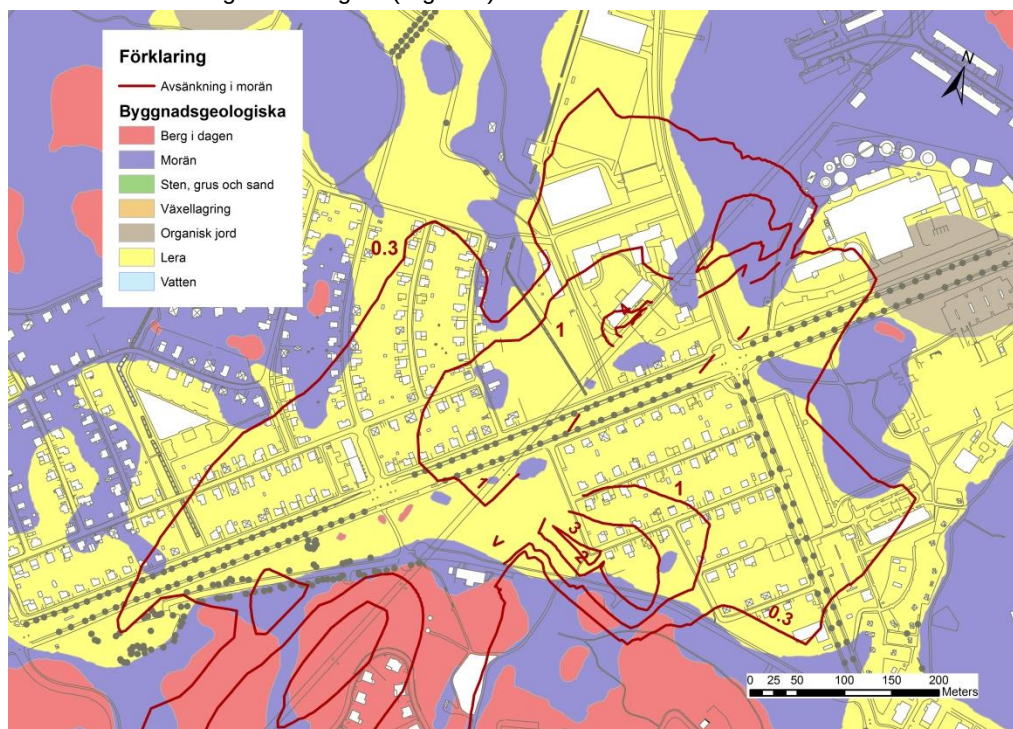
Modellen har kalibrerats utifrån grundvattennivåer i friktionsjorden. Utförd kärnborrning har inte träffat en svaghetszon och någon sådan, med högre konduktivitet på berg, har därför inte lagts in i modellen innan kalibrering. De låga nivåerna i lersvackan öster om Drottningholmsvägen kan i modellen inte enbart härledas till redan befintliga och dränerande tunnlar. Sannolikt medför ett uppsprucket ytligt berg eller sprickor en ökad kontakt mellan detta område och tunnarna. Därför har en högre konduktivitet lagts in på det ytliga berget vid kalibreringsarbetet för att på så sätt få ner beräknade grundvattennivåer öster om Drottningholmsvägen.

### 3.2.5

#### Resultat

I den kalibrerade modellen utan planerad tunnel uppgick det beräknade inläckaget till redan befintliga tunnlar under lerområdet till ca 4 liter/min och 100 m. Med planerad tunnel i modellen minskar flödet till befintliga tunnlar till ca 3 l/min och 100 m medan flödet till SFAL beräknas till 1,3 l/min och 100 m, detta med en täthet på injekteringen på  $K_{inj} = 2 \cdot 10^{-9}$  m/s.

Påverkansområdet i jordlagren (friktionsjord/morän), definierad som en avsänkning på mer än 0,3 m, sträcker sig i princip över hela lerområdet på båda sidor om Drottningholmsvägen (Figur 7).



Figur 7. Simulerad trycknivåsänkning i jord.

Som en känslighetsanalys har en sprick-/svaghetszon lagts in i modellen som följer zonen utritad på den byggnadsgeologiska kartan. Zonen har i modellen en bredd om ca 25-35 m och dess genomsnittliga hydrauliska konduktivitet har satts till  $1 \cdot 10^{-7}$  m/s. I känslighetsanalysen har injekteringens hydrauliska konduktivitet förändrats för att se hur detta inverkar på påverkansområdets utbredning samt inläckaget till befintliga- och planerad tunnel.

I känslighetsanalysen i Tabell 6 redovisas också den beräknade totala ökningen grundvattenbortledning under lerområdet runt Drottningholmsvägen i med anledning av SFAL. Här framgår att då inläckaget till planerad tunnel ökar då tätheten på injektering minskar kommer också inläckaget till befintliga tunnlar att minska. Den totala ökningen av bortledning av grundvatten kommer vara liten men resulterar ändå i ett påverkansområde då planerad tunnel ligger djupt och därmed påverkar ett större område.

*Tabell 6. Känslighetsanalys för 3Dmodell.  $K_{berg} = 1 \cdot 10^{-8}$  m/s,  $K_{lera} = 1 \cdot 10^{-9}$  m/s,  $K_{morän} = 1 \cdot 10^{-6}$  m/s. Vid beräkning av inläckage till sprickzon avser  $K_{injektering}$  endast injektering i zonen, injektering i övriga tunneln har här antagits ha en täthet på  $2 \cdot 10^{-9}$  m/s.*

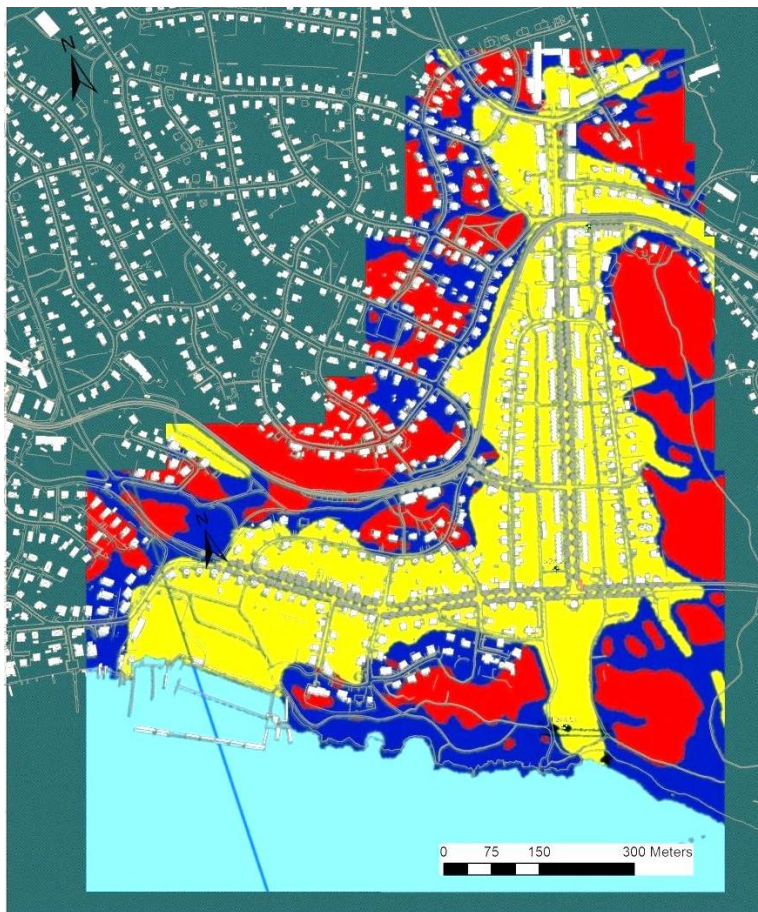
| $K_{injektering}$<br>[m/s] | $K_{zon}$<br>[m/s] | $Q_{in}$ SFAL<br>[l/min*100m] | $Q_{in}$ bef med SFAL<br>[l/min*100m] | $Q_{in}$ bef utan SFAL<br>[l/min*100m] | Ökning av $Q_{in}$ tot<br>[l/min*100 m] |
|----------------------------|--------------------|-------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|
| $2 \cdot 10^{-9}$          | -                  | 1,3                           | 3,4                                   | 4,2                                    | 0,5                                     |
| $5 \cdot 10^{-9}$          | -                  | 2,0                           | 2,7                                   | 4,2                                    | 0,5                                     |
| $7 \cdot 10^{-9}$          | -                  | 2,3                           | 2,4                                   | 4,2                                    | 0,5                                     |
| $1 \cdot 10^{-8}$          | -                  | 2,5                           | 2,2                                   | 4,2                                    | 0,5                                     |
|                            |                    |                               |                                       |                                        |                                         |
| $5 \cdot 10^{-9}$          | $1 \cdot 10^{-7}$  | 2,0                           | 4,1                                   | 5,2                                    | 0,9                                     |
| $1 \cdot 10^{-8}$          | $1 \cdot 10^{-7}$  | 2,7                           | 3,7                                   | 5,2                                    | 1,2                                     |
| $5 \cdot 10^{-8}$          | $1 \cdot 10^{-7}$  | 4,1                           | 2,8                                   | 5,2                                    | 1,7                                     |

### 3.3 Smedslätten

På grund av det långsmala lerområdet mellan Smedslätten och Ålsten har en 3D-modell används för beräkningarna istället för en 2D-modell. Då grundvatten till underliggande friktionsjord/morän i lerområdet fylls på från omkringliggande berg- och moränområden kan randeffekter vid 2D-modellering medföra att påverkansområdet överdrivs.

#### 3.3.1 Modelluppbyggnad

Modellområdet är fokuserat till lerområdet runt Ålstensgatan och Alviksvägen. Modellen sträcker sig upp till berg- och moränområdena runt lerområdet till norr, ost och väst samt ned till Mälaren i söder. Markytans geometri har beskrivits med hjälp av en terrängmodell som importerats till modellen. Modellen består av 15 lager vars mäktighet ökar med djupet. Översta lagret har en mäktighet på ca 4 m och sista lagret har en mäktighet på ca 30 m. Botten i modellen ligger på -300 och flödet under denna nivå är litet och försumbart för resultatet.



Figur 8. Modellområdet, mörkgröna celler är inaktiva och utanför modellområdet.

### 3.3.2

#### Randvillkor

I modellen används två randvillkor, dräner används i översta lagret för att ta bort vatten som stiger högre än 2 m under marknivån samt för att simulera dräneringen i tunneln. Konstant trycknivå används för Mälaren och håller en nivå på +0.

### 3.3.3

#### Jordlagerföljd

Jordlagerföljden i modellerna baseras på sonderingar och där sonderingar saknas på byggnadsgeologiska kartan där det översta lagret i modellen har en konduktivitet motsvarande jordarten som visas i den byggnadsgeologiska kartan. Då en konduktivitet motsvarande lera används i modellen och sonderingar saknas har lagret under detta lerlager en konduktivitet motsvarande morän. För delar av området med djupare lerområden har flera lager tilldelats en konduktivitet motsvarande lera.

### 3.3.4

#### Kalibrering

Modellen har kalibrerats utifrån tre observerade grundvattennivåer i friktionsjord under lerområdet. Utförd kärnborrning har inte visat på någon tydlig svaghetszon

vilket den byggnadsgeologiska kartan antyder. Därför har ingen zon med höge konduktivitet på berg lagts in i den kalibrerade modellen.

Ingående konduktivitetsvärden i modellen har justerats till dess att beräknade nivåer ligger nära observerade nivåer. I Tabell 7 presenteras de K-värden som används efter kalibrering av modellen och i Tabell 8 presenteras observerade nivåer mot i modellen beräknade nivåer.

*Tabell 7. K-värden i kalibrerad grundvattenmodell.*

| K <sub>berg</sub> [m/s] | K <sub>morän</sub> [m/s] | K <sub>lera</sub> [m/s] | K <sub>injektering</sub> [m/s] |
|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| $1 \cdot 10^{-8}$       | $1 \cdot 10^{-6}$        | $5 \cdot 10^{-9}$       | $5 \cdot 10^{-9}$              |

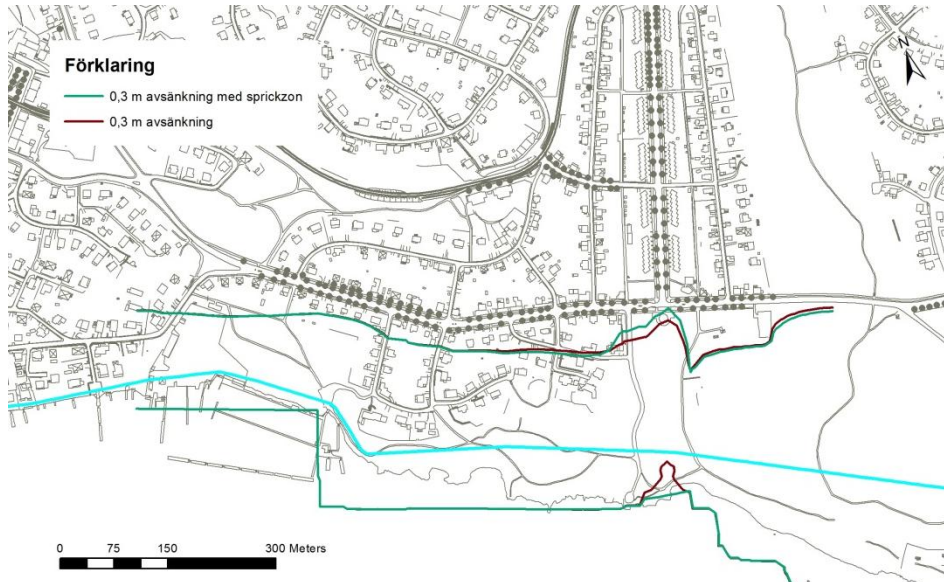
*Tabell 8. Beräknad grundvattennivå jämfört med observerad grundvattennivå i den kalibrerade modellen.*

| Observationsrör     | 13W151 | 62A42 | 52D7  |
|---------------------|--------|-------|-------|
| Observerad nivå [m] | -0,08  | 2,80  | 17,86 |
| Beräknad nivå [m]   | 1,02   | 4,51  | 18,96 |
| Differens [m]       | 0,94   | 1,71  | 1,1   |

### 3.3.5

#### Resultat

Beräkningarna visar på ett påverkansområde i lösa jordlager som sträcker sig omkring 200 m norr om planerad tunnelsträckning med ett beräknat inläckage på 3,3 l/min och 100 meter tunnel. Som en känslighetsanalys har en sprick-/svaghetszon lagts in i modellen vilken följer zonen på den byggnadsgeologiska kartan. Zonen har i modellen en bredd om 30 m och dess genomsnittliga hydrauliska konduktivitet har satts till  $1 \cdot 10^{-7}$  m/s. I känslighetsanalysen har injekteringens hydrauliska konduktivitet förändrats för att se hur detta inverkar på påverkansområdets utbredning samt inläckaget till planerad tunnel (Tabell 9). Angett påverkansområde sträcker sig norrut över lerområdet och avser avsänkning i friktionsjord/morän. Trots det ökade inflödet ökar inte det beräknade påverkansområdet på grund av att svaghetszonen också medför en förbättrad kontakt med Mälaren som matar på med vatten, se Figur 9.



Figur 9. Beräknad avsänkning i lösa jordlager med och utan svaghetszon.

Tabell 9. Känslighetsanalys för 3Dmodell.  $K_{berg}=1\cdot 10^{-8}$  m/s,  $K_{lera}=1\cdot 10^{-9}$  m/s,  $K_{morän}=1\cdot 10^{-6}$  m/s.

| $K_{injektering}$<br>[m/s] | $K_{zon}$<br>[m/s] | Påverkans-område<br>[m] | $Q_{in\ SFAL}$<br>[l/min*100m] |
|----------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------------|
| $5\cdot 10^{-9}$           | -                  | 180                     | 3,3                            |
| $7\cdot 10^{-9}$           | -                  | 186                     | 3,6                            |
| $1\cdot 10^{-8}$           | -                  | 190                     | 3,8                            |
| $5\cdot 10^{-8}$           | $1\cdot 10^{-7}$   | 200                     | 27,7                           |
| $1\cdot 10^{-8}$           | $1\cdot 10^{-7}$   | 200                     | 12,6                           |
| $5\cdot 10^{-9}$           | $1\cdot 10^{-7}$   | 200                     | 7,4                            |

I tabellen har inläckaget till tunneln som går igenom den 30 m breda zonen multiplicerats med 10/3 för att få ett inläckage angivet per 100 m tunnel. Detta överskattar därmed inläckaget då endast 30 m går igenom zonen.

### 3.4

#### Örnsberg

Påverkansområdet överdrivs på grund av randeffekter då avsänkningen simuleras vid Örnsberg med hjälp av en 2D-modell. På grund av detta har en enkel 3D-modell ställts upp där hänsyn tas till infiltrationsområden runt lerområdet.

#### 3.4.1

##### Modelluppbyggnad

Modellen sträcker sig från Mälaren i norr till Bäckvägen i Midsommarkransen i söder och sträcker sig ca 700 m öster och ca 1000 m väster om lerområdet.

Markytans geometri har beskrivits med hjälp av en terrängmodell som importerats till modellen. Modellområdet redovisas i Figur 10 nedan.



Figur 10. Modellområde.

### 3.4.2

#### Jordlagerföljd

Modellens lager följer markytans topografi och mäktigheten har justerats utefter befintliga sonderingar. Det översta lagret har givits en konduktivitet motsvarande konduktiviteten på jordarten som visas i den byggnadsgeologiska kartan.

### 3.4.3

#### Kalibrering

Styrande för grundvattennivån i modellen bortsett från befintliga dränerande berganläggningar är den hydrauliska konduktiviteten på berggrunden och leran och det är dessa värden som i huvudsak justerats vid kalibreringen. I Tabell 10 nedan redovisas aktuella K-värden i den kalibrerade modellen.

Tabell 10. K-värden i den kalibrerade modellen.

| K <sub>berg</sub> [m/s] | K <sub>lera</sub> [m/s] | K <sub>morän</sub> [m/s] | K <sub>injektering</sub> [m/s] |
|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| $1 \cdot 10^{-8}$       | $5 \cdot 10^{-9}$       | $1 \cdot 10^{-6}$        | $2 \cdot 10^{-9}$              |

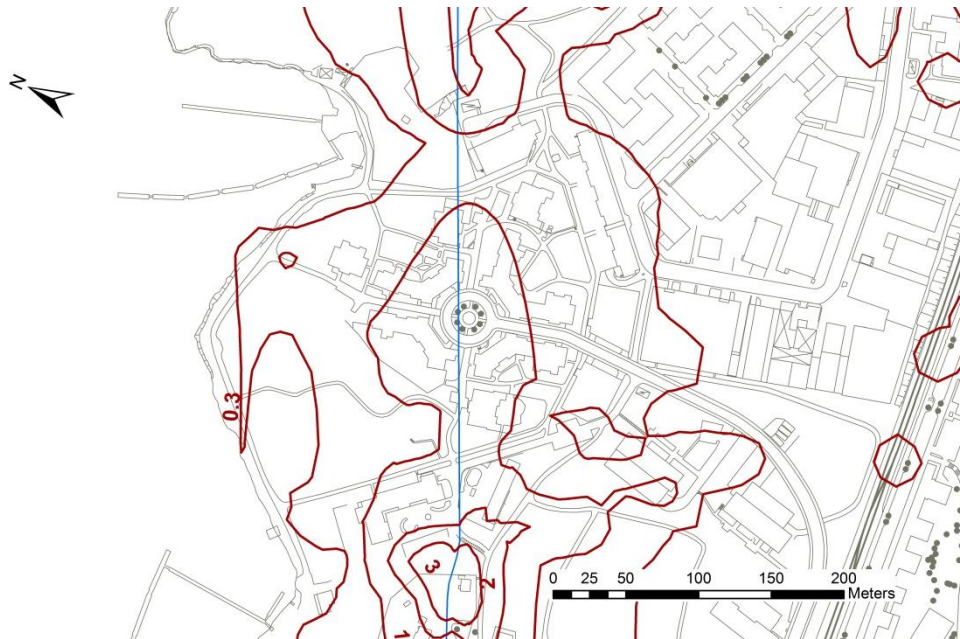
Modellen har kalibrerats mot endast ett grundvattenrör inom modellområdet. Kalibreringen blir således relativt grov. Modellen bedöms ändå uppfylla sitt syfte med att grovt beräkna en framtida avsänkning till följd av planerad tunnel.

### 3.4.4

#### Resultat

Modellen ger en avsänkning i lösa jordlager ca 3 m lokalt väster om Selmedalsringen. En beräknad avsänkning på 1 m ligger ca 50 m norr och söder om tunnelsträckningen och en avsänkning på 0,3 m ca 150 m söder om

tunnelsträckningen. I norr avgränsas avsänkningen av Mälaren. Beräknad avsänkning redovisas i Figur 11. Inläckaget till tunneln har vid  $K_{inj}=2 \cdot 10^{-9}$  m/s beräknats till 2,3 l/min och 100 m tunnel och vid  $K_{inj}=5 \cdot 10^{-9}$  m/s till 3,8 l/min och 100 m tunnel.



Figur 11. Beräknad avsänkning på 3, 2, 1 och 0,3 m i friktionsjord.

### 3.5

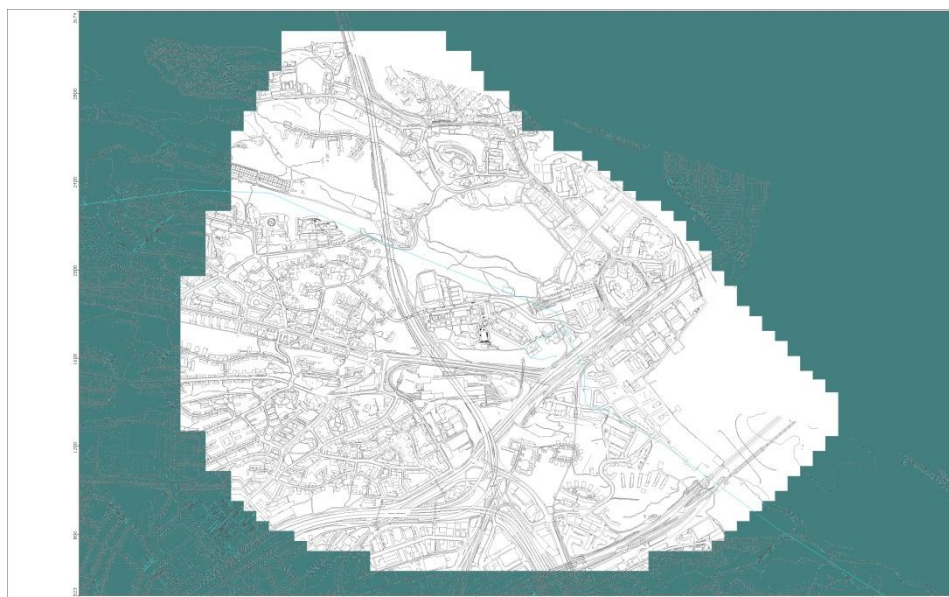
#### Liljeholmen

2D-modellering över Liljeholmen resulterar i ett överskattat påverkansområde på grund av randeffekter. Därför har en enkel 3D-modell ställts upp där hänsyn tas till inströmningsområden utanför lerområdet.

#### 3.5.1

##### Modelluppbyggnad

Modellen avgränsas av Mälaren i öster och mot norr. I söder är modellen avgränsad i höjd med Årstabergs järnvägsstation och i väster sträcker sig modellen till Nyårsvägen, ca 1700 m väst om planerad tunnelsträckning under Årstadal. Modellområdet redovisas i Figur 12. Markytans geometri har beskrivits med hjälp av en terrängmodell som importerats till modellen.



Figur 12. Modellområde.

### 3.5.2

#### Jordlagerföljd

Modellens lager följer markytans topografi och mäktigheten har justerats utefter befintliga sonderingar. Det översta lagret har givits en konduktivitet motsvarande konduktiviteten på jordarten som visas i den byggnadsgeologiska kartan.

### 3.5.3

#### Kalibrering

Styrande för grundvattennivån i modellen bortsett från befintliga dränerande berganläggningar är den hydrauliska konduktiviteten på berggrunden och leran och det är dessa värden som i huvudsak justerats vid kalibreringen. I Tabell 11 nedan redovisas aktuella K-värden i den kalibrerade modellen.

Tabell 11. K-värden i den kalibrerade modellen.

| $K_{\text{berg}}$ [m/s] | $K_{\text{lera}}$ [m/s] | $K_{\text{morän}}$ [m/s] | $K_{\text{injektering}}$ [m/s] |
|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| $1 \cdot 10^{-8}$       | $2 \cdot 10^{-9}$       | $1 \cdot 10^{-6}$        | $2 \cdot 10^{-9}$              |

Modellen har kalibrerats mot endast ett grundvattenrör inom modellområdet. Kalibreringen blir således relativt grov. Modellen bedöms ändå uppfylla sitt syfte med att grovt beräkna en framtida avsänkning till följd av planerad tunnel.

### 3.5.4

#### Resultat

Modellen ger en beräknad avsänkning i lösa jordlager på mer än 2 m på ett avstånd av ca 30-40 m vid sidan av tunneln. Den beräknade avsänkningen på 1 m sträcker sig som mest ca 70 m ut från tunnelsträckningen. Mot nordost beräknas en avsänkning på 0,3 m på ett avstånd av som mest 250 m, avsänkningen avgränsas till del här av Mälaren. Mot söder och sydväst ligger den beräknade avsänkningen 0,3 m på ett avstånd av ca 120 m. Beräknad avsänkning redovisas i

Figur 13. Inläckaget till tunneln har vid  $K_{inj}=2\cdot 10^{-9}$  m/s beräknats till 2,8 l/min och 100 m tunnel och vid  $K_{inj}=5\cdot 10^{-9}$  m/s till 4 l/min och 100 m tunnel.



Figur 13. Beräknad avsänkning på 2, 1 och 0,3 m i friktionsjord

### 3.6 Bergrumsanläggning Sickla

#### 3.6.1 Modelluppbyggnad

Modellen sträcker sig från Sickla kanal och Sicklasjön i norr till Kärrtorp i söder och från Nynäsvägen i väster till ca 1300 m öster om befintlig anläggning i Sickla. Markytans geometri har beskrivits med hjälp av en terrängmodell som importerats till modellen. Modellens fyra översta lager följer markytans topografi medan lager under dessa är anpassade efter befintlig anläggning. Modellen sträcker sig ner till nivå – 150, gränsen har dragits här då flödet under denna nivå är litet och bidraget av detta flöde i beräkningsresultaten är försumbart.

Konstant trycknivå används i modellen i läget för Sickla kanal och Sicklasjön. Dräner används för att simulera dränpumpar i anläggningen för att hålla trycknivåerna nere. Dränerna tar bort vatten som stiger högre än 0,1 m under markytan i modellen.

Befintlig anläggning har ritats upp efter en inmätning som gjort av bergrummet.

### 3.6.2

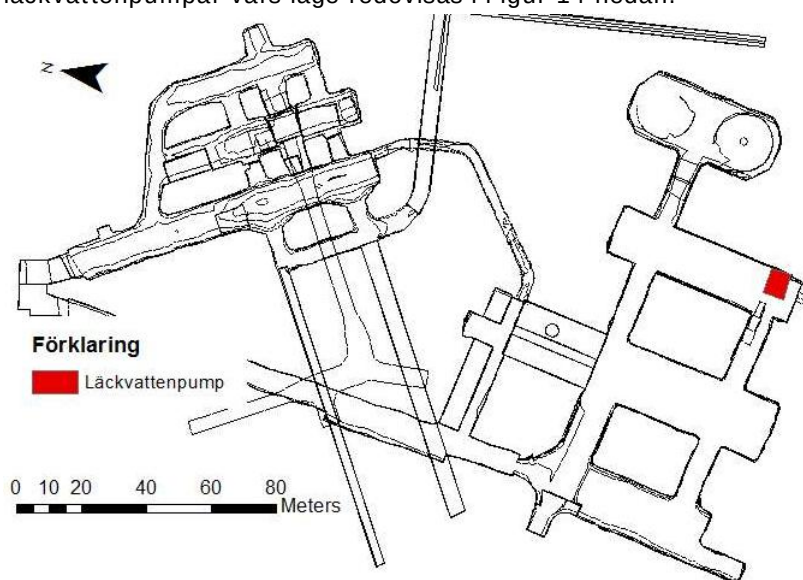
#### Jordlagerföljd

Jordlagerföljden i modellen har skapats genom att översta lagret i modellen tilldelats en konduktivitet motsvarande respektive jordart i varje specifik cell, baserat på byggnadsgeologiska kartan. Då det översta lagret består av lera har ett lager morän lagts under det översta lagret.

### 3.6.3

#### Kalibrering

Modellen har kalibrerats utifrån uppmätt inläckage till en av anläggningens läckvattenpumpar vars läge redovisas i Figur 14 nedan.



Figur 14. Läckvattenpumpens placering i anläggningen.

Styrande för inläckaget till anläggningen är berggrundens genomsnittliga hydrauliska konduktivitet och det är denna som justerats för att uppnå ett beräknat inläckage som överensstämmer med uppmätt inläckage.

För konduktiviteten på lösa jordlager har erfarenhetsvärden använts där ett högre K-värde på lera medför ett minskat påverkansområde. Uppmätt inläckage till läckvattenpumpen mellan perioden 2014-06-17 till 2014-10-14 uppgick till 0,7 m<sup>3</sup>/dygn, läget på pumpen redovisas i Figur 14. Modellen har körts med 1·10<sup>-8</sup> m/s som ett genomsnittligt K-värde på bergmassan runt om anläggningen. Med K=1·10<sup>-8</sup> m/s erhålls ett simulerat inläckage till läckvattenpumpen på 0,8 m<sup>3</sup>/dygn vilket är nära uppmätt inläckage.

I tabellen nedan redovisas vilka värden på indata som använts i modellen.

Tabell 12. Värden på konduktivitet [m/s] i grundvattenmodellen.

|         | Berg               | Morän              | Lera               | Torv               | Bergrum*           | Tunnel             | Injektering <sub>tunnel</sub> |
|---------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|
| K [m/s] | 1·10 <sup>-8</sup> | 1·10 <sup>-6</sup> | 1·10 <sup>-9</sup> | 1·10 <sup>-5</sup> | 1·10 <sup>-3</sup> | 5·10 <sup>-4</sup> | 5·10 <sup>-9</sup>            |

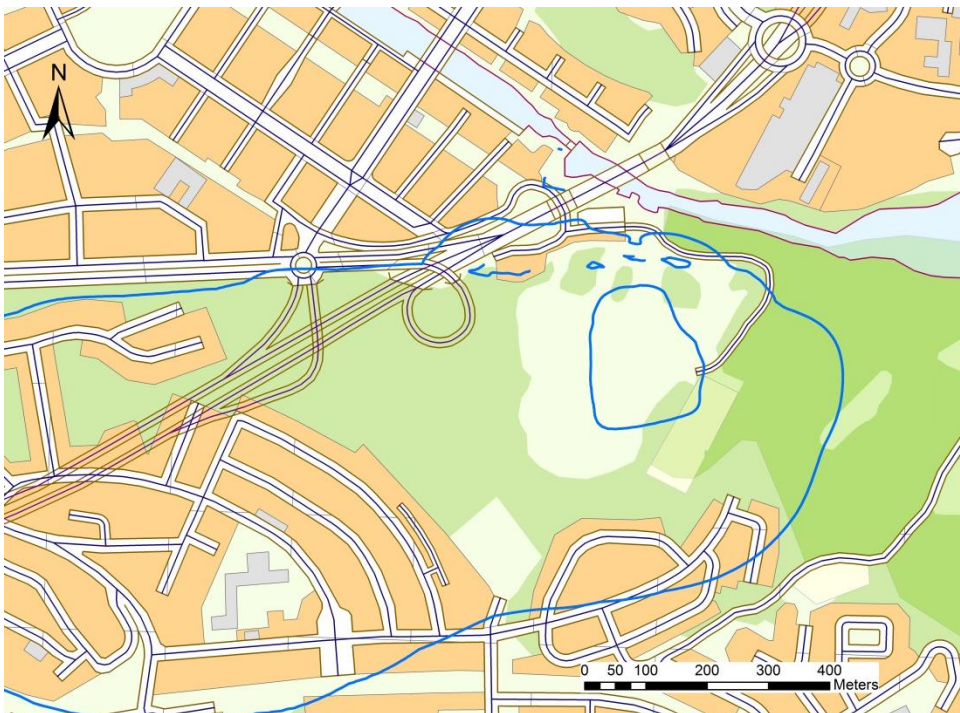
\*. Egentligen ska ett tomrum i modellen ges konduktiviteten 1, men för att underlätta för modellen att konvergera har K-värdet minskats men det bedöms ändå vara tillräckligt stort för att inte påverka resultatet.

Beräkningarna har genomförts utan injektering i befintlig och planerad berggrusnätläggning men med injektering för planerad tunnel.

#### 3.6.4

##### Resultat

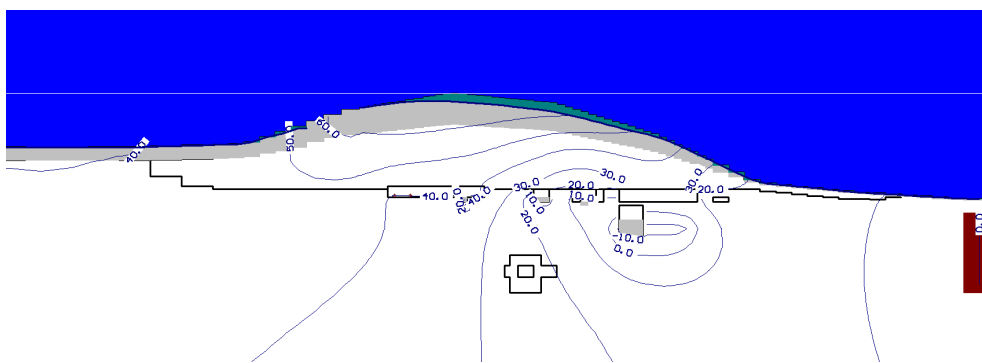
Modellen ger en beräknad avsänkning i lösa jordlager som överstiger 0,3 m på som mest ett avstånd av ca 375 m söder om redan befintlig anläggning, se Figur 15. Påverkansområdet sträcker sig ner till Mariestadsvägen och omfattar också lerområdet som fotbollsplanen väster om Mariestadsvägen är anlagd på. Längre västerut visar modellen att planerad tunnel ger ett påverkansområde på ca 250 m i lösa jordlager. Avsänkningen är beräknad som skillnaden mellan nivåerna vid jämvikt i den kalibrerade modellen jämfört med jämviktsnivåerna i den kalibrerade modellen i vilken planerade anläggningar lagts till.



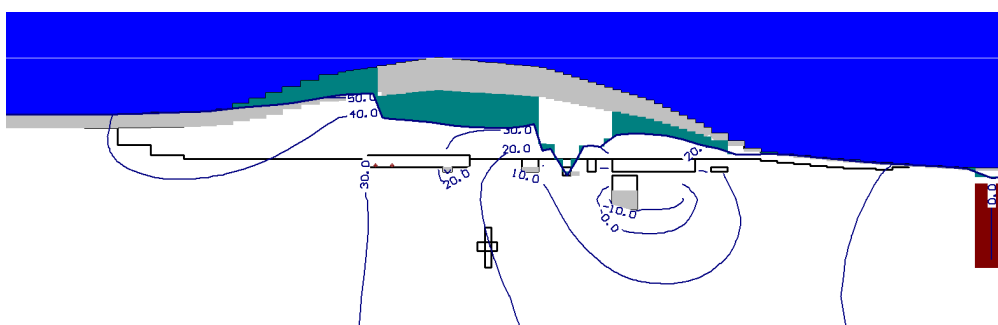
Figur 15. Beräknad avsänkning (0,3 m) i jord som följd av planerad anläggning och tunnel.

Som en känslighetsanalys har bergets hydrauliska konduktivitet varierats mellan  $1E-8$  och  $4E-8$  för att se hur detta påverkar inläckage och beräknade grundvattennivåer. Detta visar att justering av bergets hydrauliska konduktivitet har stor inverkan på grundvattennivåerna i bergplinten, vid vald konduktivitet ligger trycknivåerna ovan anläggningen på en nivå runt +65 (Figur 16). En ökning av  $K_{\text{berg}}$  i modellen till  $4 \cdot 10^{-8}$  m/s reducerar de beräknade trycknivåerna till ca +30

(Figur 16 och Figur 17). Flödet in till planerad bergrumsanläggning ökar lite drygt 2 ggr då bergets hydrauliska konduktivitet ökas med 4 ggr. Modellen visar också som väntat att inläckaget till redan befintlig anläggning reduceras. Inläckaget till planerad anläggning är beräknat till ca 28 l/min med en genomsnittlig bergkonduktivitet på  $1 \cdot 10^{-8}$  m/s.



Figur 16. Modellsektion genom befintlig anläggning med beräknade trycknivåer vid  $K_{\text{berg}} = 1 \cdot 10^{-8}$  m/s.



Figur 17. Modellsektion genom befintlig anläggning med beräknade trycknivåer vid  $K_{\text{berg}} = 4 \cdot 10^{-8}$  m/s.

#### 4. Analytisk beräkning av inläckage

Parallellt med modelleringsarbetet har inläckaget både utan och med injektering beräknats analytiskt. Beräkningarna har gjorts med ekvationer baserade på Darcy's lag. Nedan visas ekvationen för inläckage ( $Q_{in}$ ) utan injektering där  $K$  är bergets hydrauliska konduktivitet,  $h$  är djupet under grundvattenytan,  $L$  är tunnelns längd,  $r$  är tunnelradien, och  $\xi$  är skinfaktorn.<sup>4</sup>

$$Q_{in} = \frac{2\pi \times K \times h \times L}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right) + \xi}$$

För en injekterad tunnel beräknas inläckaget analytiskt med ekvationen:

$$Q_{in} = \frac{2\pi \times K_i \times h \times L}{\ln\left(\frac{r_t \times h}{r_t}\right) + \frac{K_i}{K} \ln\left(\frac{2h}{r_t + t}\right) + \frac{K_i}{K} \xi}$$

Där  $K_i$  är injekteringszonens konduktivitet och  $t$  är injekteringszonens utbredning.

Beräkningarna förutsätter att grundvattennivån ovan tunneln ligger kvar nära markytan. För ett stort inläckage kommer detta inte vara fallet utan grundvattennivån ovan tunneln kommer då sänkas märkbart och beräknat inläckage överskattas.

Tabell 13. Analytisk beräkning av inläckage till planerad tunnel med och utan injektering för  $K_i=5E-9$  m/s,  $K=2E-8$  m/s, Skinfaktor=3, Injekterade zonen=5 m och  $r_t=4$  m.

|                 | $Q_{in}$<br>[l/min] | $Q_{in}$ injekterad<br>[l/min] | Djup<br>under gv-<br>yta [m] | Marknivå<br>[m] | Tunnelnivå<br>[m] |
|-----------------|---------------------|--------------------------------|------------------------------|-----------------|-------------------|
| Bromma, Åkeshov | 3,9                 | 2,7                            | 29                           | 9               | -27,2             |
| Sektion 1 080   | 6,9                 | 5,0                            | 58*                          | 32              | -28,0             |
| Sektion 1 850   | 3,9                 | 2,7                            | 29*                          | 2               | -28,9             |
| Sektion 2 200   | 6,0                 | 4,3                            | 49*                          | 20              | -29,0             |
| Sektion 2 600   | 4,0                 | 2,8                            | 30*                          | 2               | -29,6             |
| Sektion 2 900   | 4,0                 | 2,8                            | 30                           | 1               | -30,0             |
| Sektion 3 400   | 4,5                 | 3,2                            | 35                           | 60              | -30,4             |
| Sektion 5 250   | 6,5                 | 4,7                            | 54*                          | 21              | -35,3             |
| Sektion 5 650   | 12,2                | 9,1                            | 114*                         | 80              | -35,7             |
| Sektion 5 940   | 5,8                 | 4,1                            | 47*                          | 13              | -36,0             |

<sup>4</sup> Cementinjektering i hårt berg, M Eriksson, H Stille, 2005.

|                |     |     |      |    |       |
|----------------|-----|-----|------|----|-------|
| Sektion 6 350  | 7,9 | 5,7 | 68 * | 34 | -36,4 |
| Sektion 6 750  | 6,2 | 4,4 | 51 * | 16 | -36,8 |
| Sektion 7 150  | 6,8 | 4,9 | 57 * | 22 | -37,2 |
| Sektion 7 750  | 7,6 | 5,5 | 65 * | 29 | -37,8 |
| Sektion 8 450  | 4,8 | 3,5 | 38 * | 4  | -38,5 |
| Sektion 9 050  | 7,1 | 5,1 | 60 * | 23 | -39,0 |
| Sektion 9 450  | 6,9 | 5,0 | 58 * | 20 | -39,5 |
| Sektion 9 600  | 6,6 | 4,7 | 55 * | 17 | -39,6 |
| Sektion 10 250 | 9,0 | 6,6 | 80 * | 42 | -40,1 |
| Sektion 10 750 | 8,0 | 5,9 | 70 * | 31 | -40,8 |
| Sektion 11 200 | 7,4 | 5,3 | 63 * | 24 | -41,2 |
| Sektion 12 640 | 9,2 | 6,8 | 82   | 44 | -42,7 |

\*) Grundvattennivån antagen till 2 m under marknivå.

Analytiskt beräknade inflöden för en injekterad tunnel stämmer relativt väl med simulerat inläckage för tunneln (en jämförelse redovisas i Tabell 14 nedan). I sektioner med en högre nivå på marköverytan överskattas dock inläckaget i de analytiska beräkningarna jämfört med modelleringen. Orsaken är att antagandet om en grundvattenyta 2 m under marknivån sannolikt passar sämre i dessa sektioner.

Tabell 14. Simulerat inläckage jämfört med analytiskt beräknat inläckage.

| Sektion | Q <sub>in</sub> simulerat | Q <sub>in</sub> beräknat analytiskt | Q <sub>in</sub> beräknat analytiskt med injektering |
|---------|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1 080   | 5,5                       | 6,9                                 | 5,0                                                 |
| 1 850   | 4,0                       | 3,9                                 | 2,7                                                 |
| 2 200   | 5,0                       | 6,0                                 | 4,3                                                 |
| 2 600   | 3,8                       | 4,0                                 | 2,8                                                 |
| 2 900   | 3,1                       | 4,0                                 | 2,8                                                 |
| 3 400   | 2,5                       | 4,5                                 | 3,2                                                 |
| 5 250   | 6,5                       | 6,5                                 | 4,7                                                 |
| 5 650   | 5,2                       | 12,3                                | 9,1                                                 |
| 5 940   | 4,7                       | 5,8                                 | 4,1                                                 |
| 6 350   | 5,5                       | 7,9                                 | 5,7                                                 |
| 6 750   | 4,2                       | 6,2                                 | 4,4                                                 |
| 7 150   | 4,0                       | 7,0                                 | 5,0                                                 |
| 7 750   | 6,1                       | 7,6                                 | 5,5                                                 |
| 8 450   | 2,8                       | 5,0                                 | 3,6                                                 |
| 9 050   | 4,1                       | 7,1                                 | 5,1                                                 |
| 9 450   | 5,2                       | 6,9                                 | 5,0                                                 |
| 9 600   | 4,2                       | 6,5                                 | 4,7                                                 |
| 10 250  | 4,8                       | 9,0                                 | 6,6                                                 |
| 10 750  | 5,8                       | 8,0                                 | 5,9                                                 |
| 11 200  | 6,3                       | 7,4                                 | 5,3                                                 |
| 12 640  | 7,1                       | 9,2                                 | 6,8                                                 |

#### 4.1

##### Beräkning av vattenbalans mot beräknat inläckage

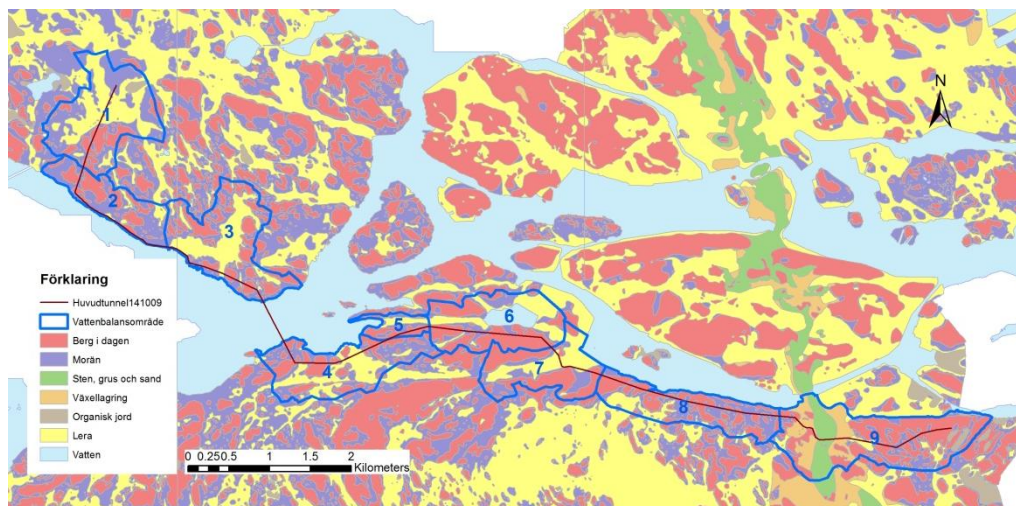
Tunnelsträckningen har delats in i 9 olika vattenbalansområden för vilka grundvattenbildningen till det undre grundvattenmagasinet har beräknats. Grundvattenbildningen har sedan jämförts med beräknat inläckage till tunneln.

Grundvattenbildningen varierar under året men också från år till år vilket påverkar inläckaget till tunneln. För att underlätta beräkningarna är de utförda för vattenomsättningen under ett genomsnittligt år.

Kvantifiering av grundvattenbildning till det undre magasinet har gjorts genom att beräkna ytan av respektive jordart inom de nio vattenbalansområdena. Genom att beräkna den bebyggda ytan på respektive jordart har också grundvattenbildningen reducerats med hänsyn till avrinning till dagvattensystem. Grundvattenbildningen beräknas för berg, morän, lera samt för vissa vattenbalansområden även för isälavlagringar och sand och summeras sedan inom varje område för att ge den potentiella totala grundvattenbildningen.

Grundvattenbildningen i berg- och moränområden sätts i beräkningarna till 50 % av den potentiella grundvattenbildningen, för lera 10 % och för isälvsediment och

sand 90 %. En genomsnittlig avrinningskoefficient har satts till 40 % för bebyggda delar av området, dvs för bebyggda delar reduceras vattenvolymen med 40% som antas avgå till dagvattenssystemet. För ett bebyggt moränområde uppgår alltså grundvattenbildningen till 200 mm/år x 0,5 x 0,6.



Figur 18. Uppritade vattenbalansområden längst tunneln.

Tabell 15. Jämförelse mellan beräknat inläckage och grundvattenbildning.

| Vattenbalansområde | Längd tunnel | Ber. Qin [l/min*100m] | Qin tot för vattenbalansområdet [l/min] | Gv-bildning [l/min] | Andel bortdränerat gv av gv-bildning [%] |
|--------------------|--------------|-----------------------|-----------------------------------------|---------------------|------------------------------------------|
| 1                  | 1200         | 2,00                  | 24,0                                    | 121,8               | 1,6                                      |
| 2                  | 1660         | 4,58                  | 75,9                                    | 80,4                | 5,7                                      |
| 3                  | 1400         | 2,97                  | 41,5                                    | 147,6               | 2,0                                      |
| 4                  | 1450         | 5,47                  | 79,3                                    | 109,8               | 5,0                                      |
| 5                  | 530          | 5,50                  | 29,2                                    | 28,8                | 19,1                                     |
| 6                  | 1530         | 4,77                  | 72,9                                    | 107,4               | 4,4                                      |
| 7                  | 780          | 3,45                  | 26,9                                    | 86,4                | 4,0                                      |
| 8                  | 2250         | 5,26                  | 118,4                                   | 125,4               | 4,2                                      |
| 9                  | 2100         | 35*                   | 149,1                                   | 256,2               | 13,7                                     |

\*Till beräknade inläckaget till tunneln på 7 l/min har också inläckaget till planerad berggrusanläggning i Sickla på 28 l/min adderats.

Resultatet från vattenbalansberäkningarna visar att beräknat inläckage till tunneln endast utgör en liten del av den totala grundvattenbildningen inom respektive vattenbalansområde. Andelen bortdränerat grundvatten jämfört med grundvattenbildningen är störst för vattenbalansområde 5 där beräknad dränering till tunneln utgör upp till 20 % av grundvattenbildningen. Detta beror sannolikt på att tunneln sneddar genom området och möjligen kan vatten från område 4 även komma område 5 tillgodo genom en ökad grundvattenbildning på grund av tunnelns sträckning.