



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W 21046

Examensarbete 30 hp
Augusti 2021

Modellering av grundvattennivån i samband med tunnelbyggnation

Frida Thelander

Sammanfattning

Modellering av grundvattennivån i samband med tunnelbyggnation

Frida Thelander

Det borras en tunnel under Stockholm av Svenska kraftnät som ska bli 13,4 km lång. När tunneln är klar ska den förstärka och ersätta vissa delar av Stockholms elnät. Grundvattennivån har inte sjunkit lika mycket som förväntat när inläckget till tunneln var högt. När grundvatten sjunker är det var och hur mycket grundvattennivån sjunker som är problemet inte själva inläckaget. Syftet med rapporten var att undersöka verktyg för att prognostisera avsänkning av grundvatten samt försöka förstå vilka parametrar som är viktiga för att skapa en bra modell. Det undersöktes även varför grundvattennivån i moränen ovanför bergtunneln sjunker över ett stort område. Det sattes upp en modell med flera lager i jorden och berget med olika konduktivitet. I berget lades det även in svagare zoner i form av krosszoner för att längs dem lokalt ge högre konduktivitet. Modellen gavs även flera områden med speciella egenskaper för att efterlikna verkligheten. Först modellerades en grundvattenyta i en referensmodell som kalibrerades med hjälp av grundvattenrör i området. Sedan lades tunneln in i modellen med hjälp av uppmätta inläckage för att beräkna en ny grundvattenyta. Grundvattenytan från referensmodellen jämfördes med den från modellen med tunneln för att få fram grundvattensänkningen. Modellen visade en större skillnad i grundvattennivå där det inte var krosszoner som korsade tunneln medan där den korsades var avsänkningen mer utspridd längs krosszonen.

Det finns flera sätt att angripa ett problem. För att kunna använda analytiska ekvationer behöver det göras stora förenklingar vilket kan vara bra i ett inledningsskede för att få en bättre bild av problemet förhållandevis enkelt. För att få en mer detaljerad bild av problemet behövs däremot andra modeller. I en modell behövs det många parametrar och vissa kan vara viktigare än andra. I just det här arbetet bedömdes vissa delar inom geologin vara viktigast som var det finns mäktiga jordlager, den hydrauliska konduktiviteten för berget och var svaghetszonerna är i berget. Anledningen att grundvattennivån runt Svenska kraftnäts tunnel sjunker över ett stort område kan vara svaghetszonerna i berget.

Nyckelord: grundvattenmodellering, grundvattennivå, bergtunnel, tunnelinläckage

Abstract

Modeling of the groundwater level around a tunnel under construction

Frida Thelander

Svenska kraftnät excavates a 13.4 km long tunnel in the rock below Stockholm. When completed, it will strengthen and replace parts of Stockholm's electricity grid. When the leakage to the tunnel was high, the groundwater level did not drop as much as expected. When the groundwater drops, it is where and how much that is the problem and not the actual leakage to the tunnel. The purpose of the report was to investigate tools for forecasting groundwater subsidence and to try to understand which the important parameters are for creating a reliable model. It was also investigated why the groundwater level in the moraine above the rock tunnel drops over a large area. A model was set up with several layers in the soil and rock with different conductivity. Weaker zones were also added to the bedrock to provide higher conductivity locally along them. The model was also given several areas with special features to mimic reality. A groundwater surface was first modeled in a reference model that was calibrated using groundwater wells in the area. The tunnel was then added to the model using measured leakage to calculate a new groundwater surface. The groundwater surface from the reference model was compared with that from the model with the tunnel to obtain the groundwater lowering. The model showed a large local reduction of the groundwater level where there was more stable rock, while where weaker zones crossed the tunnel the reduction was more spread out along the weaker zone.

There are several ways to adress problems with. To be able to use analytical equations, large simplifications are required, which can be good in an initial stage to get a better picture of the problem relatively easily. However, to get a more detailed view of the problem, other models are required. In a model, many parameters are required and some may be more important than others. In this report, certain parts of the geology were judged to be most important, such as where there are thick soil layers, the conductivity of the rock and where the weaker zones are in the bedrock. The reason why the groundwater level around Svenska kraftnät's tunnel falls over a large area may be the zones of weakness in the rock.

Keywords: groundwater modeling, groundwater level, rock tunnel, tunnel leakage

Förord

Detta examensarbete omfattar 30 hp och är den avslutande kursen efter fem års studier på civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet och Sveriges lantbruksuniversitet. Examensarbetet har utförts på WSP med Anders Retzner som handledare. Ämnesgranskare var Auli Niemi och examinator var Rickard Pettersson, båda från institutionen för geovetenskaper vid Uppsala universitet.

Jag vill tacka Anders och Auli för handledningen under examensarbetet. Jag vill även tacka WSP för att jag fick göra examensarbetet i samarbete med er. Det största tacket vill jag rikta till min familj och mina vänner för att de har stöttat mig under hela utbildningen.

Copyright ©Frida Thelander och Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet.

UPTEC W 21046, ISSN 1401-5765

Digitalt publicerad i DiVA, 2021, genom Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet. (<http://www.diva-portal.org/>).

Populärvetenskaplig sammanfattning

I många städer blir bebyggelsen tätare och det blir allt svårare att hitta utrymmen för ny infrastruktur. I Stockholm har det till viss del resulterat i att det byggs infrastruktur i tunnlar. I Stockholm är det mycket berg och för att en tunnel i berg ska kunna drivas fram kan sprängning eller borrhning användas. När tunnlar sprängs eller borrar läcker det in grundvatten. Inläckaget av grundvatten kommer med vissa risker. När grundvattennivån sjunker kan brunnar sina eller viktiga naturvärden gå förlorade. Det kan också leda till att föroreningar sprider sig när grundvattnet tar nya vägar. En annan risk är att byggnader kan ta skada om de står på lera eftersom lera består av en stor del vatten och om grundvattennivån sjunker sjunker även leran.

För att förhindra skador som dessa behöver tunnlar tätas vilket är enklast och billigast att göra i förväg. Därför sprängs eller borrar bergstunnlarna i cykler där det först tätas omkring den del som ska borrar eller sprängas. Det är därför viktigt att i förväg veta ungefär hur mycket som får läcka in för att på så sätt veta hur mycket det bör tätas. Det som avgör hur mycket det får läcka in i tunneln är hur mycket grundvattennivån sjunker. Om grundvattennivån sjunker över ett större område kommer det mindre risker med ett större inläckage.

Svenska kraftnät borrar nu en 13,4 km lång tunnel under Stockholm för att förstärka och ersätta vissa delar av elnätet. Inläckaget till tunneln har varit större än förväntat. I den här rapporten undersöktes inläckaget och grundvattensänkningen för de första 1430 metrarna av tunnel.

Det sattes upp en konceptuell modell med jorden och berget indelat i flera lager. Modellen hade olika områden med specifika egenskaper. Modellen byggdes först upp för att efterlika de förhållanden som rådde innan tunneln började borrar. För att kunna utföra beräkningar i modellen översattes den till en numerisk modell. Grundvattennivån innan tunneln började borrar beräknades och den följde markkytan ganska väl. Sedan lades tunneln in i modellen med verkliga uppmätta inläckage. För att ta reda på var och hur mycket grundvattennivån sjönk jämfördes grundvattennivån från modellen utan tunnel med den som hade tunneln. Grundvattennivån sjönk ojämnt på de sträckor av tunneln som det fanns svagare zoner i berget kunde grundvattennivån sjunka långt från tunneln. Men vid de delar av tunneln som inte hade dessa svagare zoner kunde grundvattennivån sjunka lägre men mindre utspritt.

För att göra en bra bedömning av inläckaget till en tunnel behövs en detaljerad modell och därför duger det oftast inte med analytiska ekvationer. För att kunna använda analytiska ekvationer måste det göras stora förenklingar och det kan vara bra för en första förståelse för ett problem. Att bedöma avsänkningen med en analytisk ekvation är jättesvårt eftersom det är viktigt hur marken ser ut och det kan vara svårt att förenkla på ett bra sätt.

Det behövs många parametrar för att bygga upp en modell och vissa kan vara viktigare än andra att ta med eller ge ett rimligt värde. I detta arbete bedömdes övergripande geologiska parametrar som de viktiga för att förutspå var grundvattensänkningen sker och hur stor den blir. Med det menas att det dels är viktigt att veta var det finns mäktiga jordlager för det är där grundvattnet riskerar att sänkas. Det ansågs även viktigt att veta bergets hydrauliska konduktivitet för att veta hur lätt grundvattnet rör sig i marken. Ännu viktigare än det är kanske var berget har svagare zoner så som sprickor eller krosszoner.

Dessa delar av berget gör att grundvattnet som läcker in i tunneln kan påverka vatten långt bort från tunneln. Runt City Link-tunneln är det antagligen svaghetszonerna i berget som både gör att inläckget blir förhållandevis högt samt att grundvattennivån sjunker över ett större område.

Beteckningar

Cell, en byggsten i en modell.

Hydraulisk konduktivitet, ett mått på genomsläpplighet som beror på mediets och vätskans egenskaper. I denna rapport är det alltid jord eller berg som är mediet och vatten som är vätskan. Den anges i längd per tid .

Grundvattenmagasin, geologisk formation där vatten samlas och lagras i marken.

Grundvattennivå, även hydraulisk potential. Den nivå där den mättade zonen möter den omättade vid atmosfärstryck.

Grundvattenrör, ett rör i marken där grundvattennivån mäts i ett visst grundvattenmagasin.

Grundvattensänkning, även avsänkning. Skillnaden i grundvattennivå.

Mäktighet, tjockleken på ett lager.

Numeriskt grid, ett rutnät av celler som bygger upp en modell.

Referensmodell, modellen då tunneln inte är med.

Spetsnivå, nivån där ett grundvattenrör mäter grundvattennivån.

Transmissivitet, ett mått som är den hydrauliska konduktiviteten gånger mäktigheten och anges i längd gånger mäktighet per tid.

Innehåll

Sammanfattning	I
Abstract	II
Förord	III
Populärvetenskaplig sammanfattning	IV
1 Inledning	1
2 Teori	1
2.1 Geologi	1
2.1.1 Berg	1
2.1.2 Jordlagerföljd	2
2.2 Hydraulisk potential	3
2.3 Hydraulisk konduktivitet	3
2.3.1 Hydraulisk konduktivitet i jord	3
2.3.2 Hydraulisk konduktivitet i berg	4
2.4 Tunneldrivning i berg	4
2.4.1 Tätning	5
2.4.2 Dränering av tunnel	6
2.4.3 Skyddsinfiltration	6
2.5 Risker med grundvattensänkning	6
2.5.1 Naturvärden	6
2.5.2 Marksättningar	7
2.5.3 Förorenad mark	7
2.5.4 Brunnar	7
2.6 Grundvatten i urbana miljöer	7
2.7 Modeller	8
2.7.1 Konceptuell modell och matematisk modell	8
2.7.2 Analytiska ekvationer	8
3 Metod	9
3.1 Områdesbeskrivning	9
3.1.1 Tunneln	10
3.1.2 Jordlager	10
3.1.3 Norra Danderyd	10
3.2 Modellområdets gränser	11
3.3 Grundvattenbildning	12
3.4 Enheter i modellen	14
3.4.1 Jordmodell	14
3.4.2 Bergmodell	15
3.4.3 Krosszoner	16
3.5 Randvillkor	17
3.6 Från konceptuell till matematisk modell	18
3.7 Kalibreringspunkter	20
3.8 Tunnel	22

3.9 Validering av avsänkningen	23
4 Resultat	23
4.1 Kalibrering av referensmodell	23
4.2 Grundvattennivån i referensmodellen	26
4.3 Tunnelkalibrering	27
4.4 Vattenbalans	28
4.5 Grundvattensänkning	28
4.6 Validering av avsänkningen	32
5 Diskussion	34
5.1 Modellens utformning och egenskaper	34
5.1.1 Modellområdet	34
5.1.2 Jord	35
5.1.3 Berg	35
5.2 Val av kalibreringspunkter	35
5.3 Grundvattennivån i referensmodellen	36
5.4 Tunnelkalibrering	36
5.5 Vattenbalansen	36
5.5.1 Grundvattenbildning	36
5.5.2 Dränering	37
5.6 Grundvattensänkning	37
5.7 Jämförelse av metoder	39
5.8 Viktiga parametrar	39
6 Slutsats	39
Referenser	41

1 Inledning

I Stockholm börjar det precis som i många andra städer bli ont om plats på markytan. Därför har tunnlar kommit att bli en allt vanligare lösning på problemet när ny infrastruktur ska byggas.

Som en del av projektet Stockholm ström borrar Svenska kraftnät en tunnel under Stockholm, från Danderyd i norr till Hammarby sjöstad i söder. Det kommer resultera i en tunnel med en diameter på 5 m och en längd på totalt 13,4 km. Tunneln kommer Svenska kraftnät använda till 400 kV kablar som kommer att förstärka och ersätta vissa delar av Stockholms elnät.

I dagsläget har det läckt in mer vatten än förväntat i tunneln. Det är okänt om det är ett problem för marken med det höga vattenflödet in i tunneln. För närvarande varkar det inte som att grundvattennivån kommer sjunka till så låga nivåer att det får för stor påverkan, men det är något som skulle vara bra att undersöka.

När det läcker in vatten i en tunnel är det oftast inte själva storleken på inläckaget som har störst betydelse. Det är oftast viktigast hur mycket grundvattennivån sänks och vad som står där grundvattennivån sänks. Det kan ställa till stora problem om grundvattennivån sjunker mycket lokalt medan om grundvattennivån sjunker lite över ett större område så blir det inte lika stor skada eller förhoppningsvis ingen skada alls. Det är därför viktigt att modellera var och hur stor sänkningen av grundvattennivån blir när en tunnel byggs.

Området omkring City Link tunneln har modellerats tidigare men då fanns det inte lika mycket data som idag och det läcker in mer än vad som förväntades. Tunneln har redan borrats 1430 m och om inläckagemätningarna jämförs med förväntad grundvattensänkningen stämmer det inte överens. Det finns många olika parametrar som skulle kunna vara betydelsefulla för hur mycket grundvattennivån ändras.

Syftet med projektet är att studera förhållandet mellan grundvattennivåsänkning med uppmätt inläckage till tunneln. Kopplingen sker genom att undersöka olika typer av modeller och studera flera olika parametrar som kan påverka. Det studeras även vilka verktyg som finns för att prognostisera avsänkning av grundvatten. Fältdata jämförs med modellresultat. Det undersöks även vilka parametrar som är viktiga för att göra en prognos över hur avsänkning sker när grundvattnet leds bort. Även frågan om varför grundvattennivån i jorden över bergtunneln sjunker mindre än väntat studeras. Syftet är att med projektets resultat kunna uttala sig om vad som är viktigt för att prognostisera grundvattennivåsänkningar på ett korrekt sätt.

2 Teori

2.1 Geologi

2.1.1 Berg

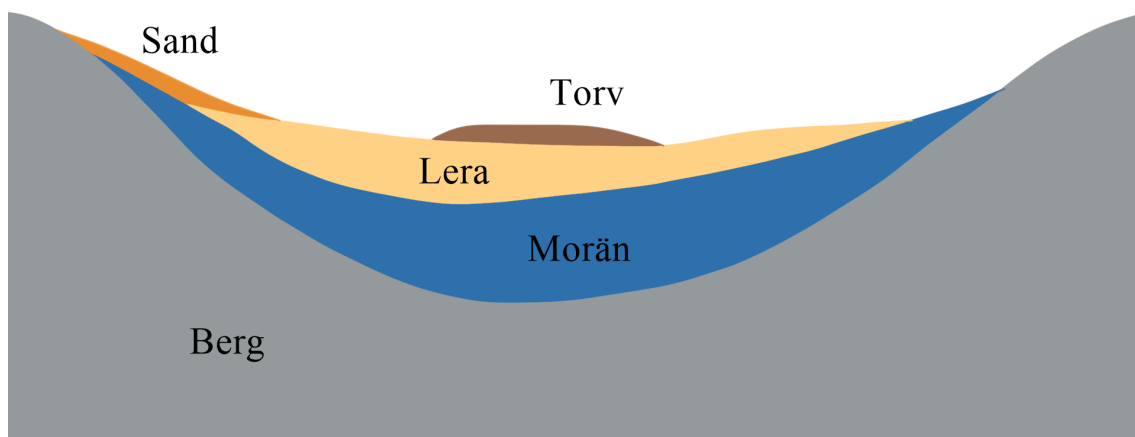
Sveriges urberg är mycket gammalt, från lite under en miljard till över 2,5 miljarder år. Generellt är urberget yngre i söder och äldre i norr. Under alla år berget funnits har det hänt mycket för att det till slut har fått de egenskaper det har idag. Redan när berget stelnade övergick det från att vara plastiskt till att bli sprött. Samtidigt minskade volymen av berget vilket gav upphov till sprickor. Fram till idag har ett lager med en tjocklek på

mellan 10 - 20 km av det ursprungliga berget eroderats bort. Det ledde till att trycket på det underliggande berget minskade och då ökade dess volym samt sprickor bildades (Gustafson 2009). Det som bidragit mycket till erosionen av berget är inlandsisarna. Det är dessutom på grund av inlandsisarna som vi har en mycket varierande topografi. Inlandsisen har tagit med sig delar av berget från där det var sprickigt, vittratt, krossat eller försvagat på något sätt. Därför är det svaghetszoner i bergsdalarna medan där berget går upp i dagen är det som starkast. Det är i de svagare zonerna som grundvattnet leds och i vissa fall går det att se dalarna i berget som naturens egen täckdikning (Knutsson och Morfeldt 1993).

2.1.2 Jordlagerföljd

Sänkorna i berget fylldes med jordartsmaterial när den senaste inlandsisen smälte av vilket visas i Figur 1. Direkt mot berget ligger det oftast morän, det är en osorterad jordart som innehåller som störst block men även ända ner till lerpartiklar (Larsson 2008). Mäktigheten av moränlagret kan variera kraftigt, från någon meter upp till tiotals meter. Moränen är stabil och mycket svår att gräva i eftersom inlandsisen har packat den hårt. Det gör att morän är bra och stabilt att bygga på (Knutsson och Morfeldt 1993). På grund av att den packats och innehåller varierande kornstorlekar har moränen en förhållandevis liten porvolym. Det är också därför konduktiviteten i moränen är förhållandevis låg (ibid.), (Larsson 2008).

På moränen ligger det ofta ett lager med lera. Det finns många olika sorters lera men alla leror har vissa saker gemensamt. Lera innehåller mycket vatten och volymen påverkas mycket om den dräneras. På grund av dessa egenskaper har lera en stor sättningsrisk. På vissa platser övergår leran i de övre skikten till att vara gyttja och innehålla mycket organiskt material. På gyttjan eller leran kan det även vara torv på vissa platser. Det kan också förekomma svallat material som sand eller grus som ligger i gränsen mellan berg och jord (se figur 1), det är en rest från när havsnivån var högre (Knutsson och Morfeldt 1993).



Figur 1: En vanlig jordlagerföljd i Sverige.

2.2 Hydraulisk potential

Grundvatten flödar alltid från hög till låg hydraulisk potential, det är en kombination av lägespotentialen och tryckpotentialen, ekvation [1](#) (Grip och Rodhe [2000](#)).

$$h = z + \psi \quad (1)$$

där h den hydrauliska potentialen [m], z är lägespotentialen [m] och ψ är tryckpotential [m].

Om en tunnel eller annan dränerande struktur grävs eller borrar ut i marken kommer tryckpotentialen drastiskt minska där, vilket leder till en inströmning av vatten. Eftersom en tunnel oftast inte ska vara vattenfylld pumpas vatten ut ur den vilket leder till att det konstant kommer vara mycket låg tryckpotential i tunneln.

2.3 Hydraulisk konduktivitet

Den hydrauliska konduktiviteten är ett mått på jordens genomsläpplighet och kan beräknas med Darcys lag (ekvation [2](#)) så länge flödet är laminärt (Larsson [2008](#)).

Henry Darcy ställde 1856 upp det som sedan kom att kallas Darcys lag, ekvation [2](#). Darcys lag beskriver grundvattenflödet i marken mellan två närliggande punkter, flödet är proportionellt mot skillnaden i grundvattennivå samt hydraulisk konduktivitet. Som tidigare nämnt flödar grundvattnet från hög till låg grundvattennivå därför blir potentialgradienten alltid negativ och för att flödet ska vara positivt behövs minustecknet i ekvation [2](#) (Grip och Rodhe [2000](#)).

$$q = -\frac{Q}{A} = -K \frac{\partial h}{\partial L} \quad (2)$$

där q är hastigheten [m/s], Q är flödet [m³/s], A är arean [m²], K är den hydrauliska konduktiviteten [m/s], h är den hydraulisk potentialen [m], L är sträckan [m] och $\frac{\partial h}{\partial L}$ är potentialgradienten.

2.3.1 Hydraulisk konduktivitet i jord

I tabell [1](#) presenteras överslagsvärden och tetvärden för den hydrauliska konduktiviteten i olika jordar (Larsson [2008](#)).

Tabell 1: En tabell med värden för hydraulisk konduktivitet i jord (Larsson 2008).

Jord	Hydraulisk konduktivitet [m/s]
Morän	
Grusig morän	$10^{-5} - 10^{-7}$
Sandig morän	$10^{-6} - 10^{-8}$
Siltig morän	$10^{-7} - 10^{-9}$
Lerig morän	$10^{-8} - 10^{-10}$
Moränlera	$10^{-9} - 10^{-11}$
Jordfraktion	
Fingrus	$1 - 10^{-2}$
Grovsand	$10^{-1} - 10^{-3}$
Mellansand	$10^{-2} - 10^{-4}$
Finsand	$10^{-3} - 10^{-5}$
Grovsilt	$10^{-4} - 10^{-6}$
Mellansilt-finsilt	$10^{-6} - 10^{-8}$
Ler	$< 10^{-8}$

För grovkorniga jordar är det främst kornstorleken som påverkar jordens hydrauliska konduktivitet. Den hydrauliska konduktiviteten är inte alltid densamma i alla riktningar i jorden. Det är främst i leror som har tydlig lagerstruktur som har högre hydraulisk konduktiviteten horisontellt än vertikalt. Den hydrauliska konduktiviteten kan bestämmas baserat på kornstorleksfördelning, i laboratorie eller i fält med pumptester (Larsson 2008).

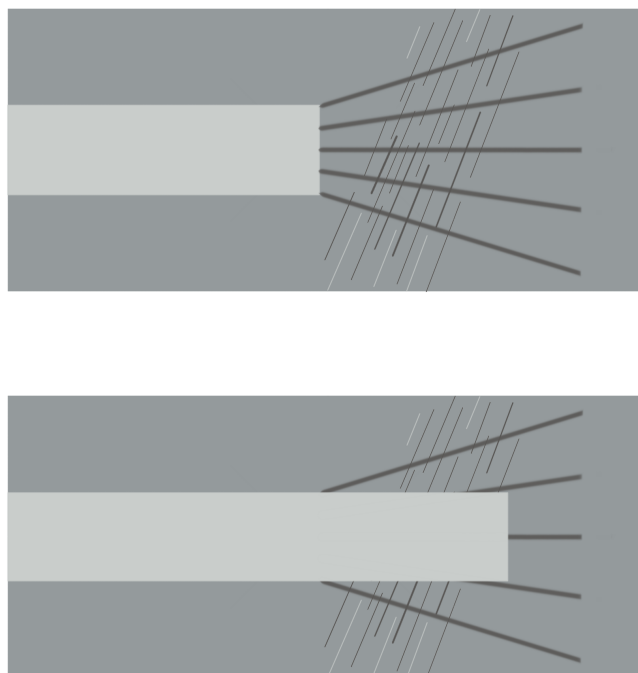
2.3.2 Hydraulisk konduktivitet i berg

I berget är det sprickorna som leder vattnet. Sprickornas vidd varierar och då även deras transmissivitet. Även om detta är känt antas ofta berget vara homogent med avseende på den hydrauliska konduktiviteten. Generellt minskar den hydrauliska konduktiviteten mot djupet av berget. Det beror främst på att bergspänningen blir starkare med djupet vilket stänger sprickorna, men också av att nybildat grundvatten är mer aggressivt mot mineraler i sprickorna som då vidgas mer ytligt i berget. Istiderna kan också ha haft betydelse då permafrost kan ha trängt djupt ner och frostsprängt berget där det var vatten i sprickorna (Gustafson 2009).

2.4 Tunneldrivning i berg

Det finns i huvudsak två sätt att driva tunnel genom berg, antingen genom att spränga eller genom att borra. När tunnlar byggs görs det i sektioner oavsett om den borrar eller sprängs. För att tunneln ska drivas framåt arbetas det i cykler och när alla moment i en cykel är avslutade flyttas tunneln en sektion framåt och så fortsätter det tills tunneln är klar. När en tunnel drivs framåt genom sprängning eller borrar börjar det med att det borrar mindre hål som det under högt tryck injekteras cement i. Detta görs i fronten av tunneln som figur 2 visar för att minska inläckaget av grundvatten (Leander 2015; Trafikverket 2019). Om tunneln sedan ska sprängas borrar det efter att cementen härdat

nya hål där sprängmedlet sedan pumpas in. Därefter sprängs berget och bergmassan transporteras ut. Sedan utförs en skrotning av den nya bergytan, vilket innebär att löst berg knackas bort. Tillsist förstärks berget med bultar och sedan kan ytan sprutas med betong och kläs med innerväggar samt tak om det ska bli en torr miljö (Trafikverket [2019](#)). Om en tunnel istället borrar används oftast en tunnelbormaskin (TBM), en jättelik bormaskin med samma diameter som tunneln där en borkrona roterar för att mala sönder berget som sedan transporteras ut. Detta sätt ger en förhållandevis liten skada på berget runt omkring och lämnar en slät yta eftersig. I steget efter cementinjekteringen i en tunnel som drivs med TBM så borrar TBM:en sig framåt och vid behov kan bergväggen förstärkas med bultar och sprutbetong (Leander [2015](#)). I vissa fall när en tunnel har borrats sätts en lining i tunneln för att göra den nästintill tät mot grundvatten. Liningen kan utgöras av till exempel platsgjuten betong (Font-Capó m. fl. [2011](#); Leander [2015](#)).



Figur 2: Konceptuell förinjektering av cement i samband med tunnelbyggnation.

2.4.1 Tätning

Att försöka stoppa inflödet av grundvatten i gruvor har gjorts så länge vi har haft gruvor det läcker in vatten i. Från början användes bland annat trasor och träkilar när inte pumparna räckte till. Det var först på 40-talet som inpumpning av cement började användas som en tätningmetod i berg. Sedan dröjde det ända till slutet på 50-talet innan det blev aktuellt med tätning av mindre inläckage för att endast förhindra grundvattensänkning (Knutsson och Morfeldt [1993](#)).

Injektering är det billigaste och mest praktiska sättet att täta berg i Svenska förhållanden. Metoden används ofta och det finns även stor erfarenhet om att injektera i svenskt urberg. Förinjektering är när det tätas i förväg och för tunnlar betyder det framför fronten som det är beskrivet ovan och i figur [2](#). Det finns stora fördelar med att täta i förväg, tryckgra-

dienten kommer vara förhållandevis låg och därför kommer även flödet i sprickorna vara lågt. Det gör att injektionsmedlet inte kommer rinna iväg i samma utsträckning och gör det lättare att använda cement som är betydligt billigare och miljövänligare än kemiska injektionsmedel. Efterinjektering är när det tätas i specifika sprickor och läckande bergpartier. Här borras även hål in i berget där injektionsmedel injekteras. Efterinjektering är ofta mer komplicerat och dyrt eftersom det är svårt att få injektionsmedlet att inte rinna med vattnet in i tunneln. Vid efterinjektering är det mer vanligt att helt eller delvis använda kemiska injektionsmedel eftersom de har större inträngningsförmåga och det finns större möjligheter att styra härdningen (Andersson och Sellner [2000](#)).

Ett annat sätt att täta en tunnel kan vara att göra en betonginklädnad, men det är ovanligt i Sverige. Men ett exempel på när det användes var i Hallandsåsen och det är betydligt vanligare i andra delar av Europa där förhållanden i berget är sämre. Injektering behövs fortfarande när betonginklädnad används men inte i samma utsträckning ([ibid.](#)).

2.4.2 Dränering av tunnel

Det är viktigt att i förväg kartlägga grundvattenförekomster när en tunnel ska byggas. Detta eftersom det då går att planera för den kommande dräneringen. I tunnlar som drivs uppåt kan tunneln till stor del själv sköta dräneringen genom självfall. När en tunnel istället måste drivas nedåt behövs betydligt mer komplexa lösningar som involverar rörsystem och pumpar (Freeze och Cherry [1979](#)).

2.4.3 Skyddsinfiltration

För att hålla grundvattnet på en säker nivå när en tunnel eller annan dränerade struktur byggs i marken kan skyddsinfiltration användas. Det går både att infiltrera i jordlagret och direkt i berget. En nackdel är att det krävs mycket vatten och energi till pumparna för infiltration. Om en infiltrationsplats används under en längre tid kan det uppstå problem. Vattnet som infiltreras för med sig partiklar vilket gör att markens genomsläpplighet minskar med tiden. Idag används det oftast temporärt under projekt men inte som en permanent lösning. Det var dock vanligare med permanent skyddsinfiltrering på 60- och 70-talet när många tunnlar byggdes. Om permanent skyddsinfiltration används idag är det oftast på grund av väldigt känsliga anläggningar eller geologin (Andersson och Sellner [2000](#)).

2.5 Risker med grundvattensänkning

2.5.1 Naturvärden

Naturvärden kan förloras om grundvattennivån sjunker för mycket. Våtmarker är beroende av en hög grundvattennivå och kan därför påverkas i större utsträckning av en sänkning av grundvattennivån. Om bergrunden under våtmarken har sprickor kan en grundvattensänkning ske långt från en dränerande struktur i berget (Kværner och Snilsberg [2011](#)). Om grundvattennivån sänks finns det risk för att vegetationen inte längre når till vattnet. Det beror mycket på vilken typ av jord det är hur bra växterna klarar grundvattensänkningen (Gokdemir m. fl. [2019](#)).

2.5.2 Marksättningar

Friktionsjordarter som grus och sand har korn som stödjer mot varandra vilket motverkar sättningar. Om vattnet ur en friktionsjord försvinner kommer den fortfarande ta upp ungefär samma volym. Så är inte fallet med kohesionsjordarter som lera. Där kan jorden bestå av upp till 60% vatten och själva vattnet är en del av jorden. Om en kohesionsjord dräneras eller torkar ut så krymper den väsentligt speciellt om den också belastas (Knutsson och Morfeldt [1993](#)).

Om det uppstår marksättningar i urbana områden kan det innebära problem. Det inte nödvändigtvis ett problem om huset står på ett jämt lerlager så att hela huset sätter sig på samma sätt. Men det kan hända att ena halvan av huset står på ett fastare material än den andra och då riskerar huset att få stora sprickor. Ett sätt att lösa sättningsproblematiken kan vara att påla byggnaderna, men om marken sjunker mycket kommer det resultera i att ledningar in och ut från huset riskerar att knäckas när de sjunker ifrån huset. Vidare, om marken sjunker men inte huset leder det till att kyla och mögel kan komma in under huset. Ett annat problem med pålning är att om pålarna är gjorda av trä riskerar de att ruttna om grundvattennivån ändras ([ibid.](#)).

2.5.3 Förorenad mark

Grundvattnet är generellt ganska bra skyddat mot föroreningar från markytan eftersom filtrering, fastläggning och nedbrytning sker i jorden. När ingrepp sker i marken kan det göra att vattnet tar nya vägar och det i sin tur möjliggör spridning av föroreningar mellan grundvattenmagasin. Ett ingrepp kan även leda till att grundvattenytan höjs eller sänks vilket i sig kan påverka vattenkemin. Vid förhöjda grundvattennivåer kan det bland annat läcka ut ämnen som järn och mangan i grundvattnet medan det vid sänkta nivåer är möjligt för sulfider att oxidera och försura grundvattnet ([ibid.](#)).

2.5.4 Brunnar

I Sverige har ungefär 10% av hushållen egna brunnar och de flesta är borrade i urberget. På landsbygden där det är vanligt med dricksvattenbrunnar är grundvattnet viktigt (Gustafson [2009](#)). Grundvattnet är också viktigt för att kunna utvinna energi. En energibrunn brukar vara mellan 100 och 300 m djup. För villor och till viss del större fastigheter är det vanligt med energibrunnar för bergvärme och bergkyla. För större fastigheter är det vanligare med borrhålslager där många borrhål sitter ganska tätt för att få större effekt då kyla och värme lagras mellan årstiderna (Erlström m. fl. [2016](#)). Om grundvattnet sjunker så sjunker även vattnet i brunnarna och i vissa fall kan brunnar sina helt om de inte är tillräckligt djupa. En sänkt nivå i en dricksvattenbrunn kan leda till att det inte längre går att ta ut samma mängd vatten. I en energibrunn minskar istället möjligheten för effektutbyte när grundvattennivån i berget sänks (Sundkvist [2015](#)).

2.6 Grundvatten i urbana miljöer

Bebyggelse och hårdgjorda ytor påverkar vattenblansen. Vattnet kan inte infiltrera på samma sätt i hårdgjorda ytor och inte alls genom hus, det blir istället ytavrinning som ofta leder till ett dagvattensystem som sedan forslar bort vattnet. Men när ett område går från naturligt till urbant finns det även effekter som verkar höjande på vattennivån. Exempel på det kan vara att om vegetation tas bort evapotranspireras det inte lika mycket vatten.

Läckande ledningar och bevattning av parker, trädgårdar och odlingar kan också bidra till grundvattenbildningen. Generellt för urbana områden är dock att grundvattennivån sjunker (Knutsson och Morfeldt 1993).

2.7 Modellering

Det finns i huvudsak tre olika syften med att använda en modell. Ett syfte kan vara att bestämma egenskaper hos systemkomponenter. Ett annat syfte kan vara att förstå helheten av ett system för att på så sätt kunna ersätta laboratorie- eller fältförsök. Det viktigaste här är inte att modellen är kvantitativt rätt utan det viktiga är att den visar hur de olika delarna samspelar med varandra. Det sista syftet en modell kan ha är att förutspå vad som kommer hända under vissa förutsättningar eller tolka vad som har hänt (Gustafson 2009).

2.7.1 Konceptuell modell och matematisk modell

En konceptuell modell är en förenklad beskrivning av systemet och ska kvalitativt beskriva modellens delar samt fungera som en bas för en kvantitativ analys. Den konceptuella modellen ska vara noggrant utformad. Konzepten som den konceptuella modellen ska bygga på kan delas in i fem grupper: processer, styrande ekvationer, geometrisk struktur, randvillkor och begynnelsevillkor. Det går att förenkla den konceptuella modellen inom alla fem grupperna och därför går det att modellera samma problem på många olika sätt (ibid.).

Grundläggande samband är alltid grunden till numeriska modeller. Det går att bygga enkla modeller i kalkylprogram men det går även att göra mer avancerade modeller i speciella modelleringsprogram (ibid.).

Ekvation 3 är den grundläggande ekvationen för grundvattenströmning som används i numeriska modeller inklusive MODFLOW (Panday m. fl. 2013) som används i detta arbete. Den beskriver grundvattnets flöde genom marken i flera dimensioner då grundvattnet har konstant densitet (Harbaugh 2005).

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3)$$

där K_{xx} , K_{yy} och K_{zz} är den hydrauliska konduktiviteten i respektive riktning, h är den hydrauliska potentialen, W är flödet i volym per volymenhet och representerar inflöde eller utflöde, S_s är den specifik magasinskoefficient och t är tiden (ibid.).

Ekvation 3 kan användas både för att beräkna tidsberoende transient flöde och för steady state simuleringar där systemet är i jämvikt. För steady state sätts den specifika magasinskoefficienten i ekvation 3 till noll (ibid.).

2.7.2 Analytiska ekvationer

För vissa enklare system och randvillkor kan den matematiska modellen lösas analytiskt. Med ekvation 4 och 5 går det att med vissa förenklingar att räkna ut ett ungefärligt inläckaget till en tunnel. Skillnaden mellan ekvation 4 och 5 är att ekvation 4 inte har någon tätskärm medan 5 har en tätskärm. För att ekvationerna ska ge ett bra resultat krävs det vissa förutsättningar omkring tunneln. Dels behöver tunneln vara förhållandevis lång och

rak. Den behöver också ligga på ungefär samma djup och marken bör vara förhållandevis homogen för att samma ekvation ska kunna användas till hela tunnelsträckan. Sedan behöver även grundvattennivån hålla sig förhållandevis nära bergytan för att ekvationerna ska vara tillförlitliga (Gustafson [2009](#)).

$$q = \frac{2\pi\bar{K}H}{\ln(2H/r_t) + \xi} \quad (4)$$

där q är inläckaget per längdenhet, \bar{K} är den hydrauliska medelkonduktiviteten i närheten av tunneln, H är avståndet från tunnelbotten till grundvattenytan, r_t är radien på tunneln och ξ är en skinfaktor.

$$q = \frac{2\pi\bar{K}H}{\ln(2H/r_t) + (\bar{K}/\bar{K}_{inj} - 1) \cdot \ln(1 + t/r_t) + \xi} \quad (5)$$

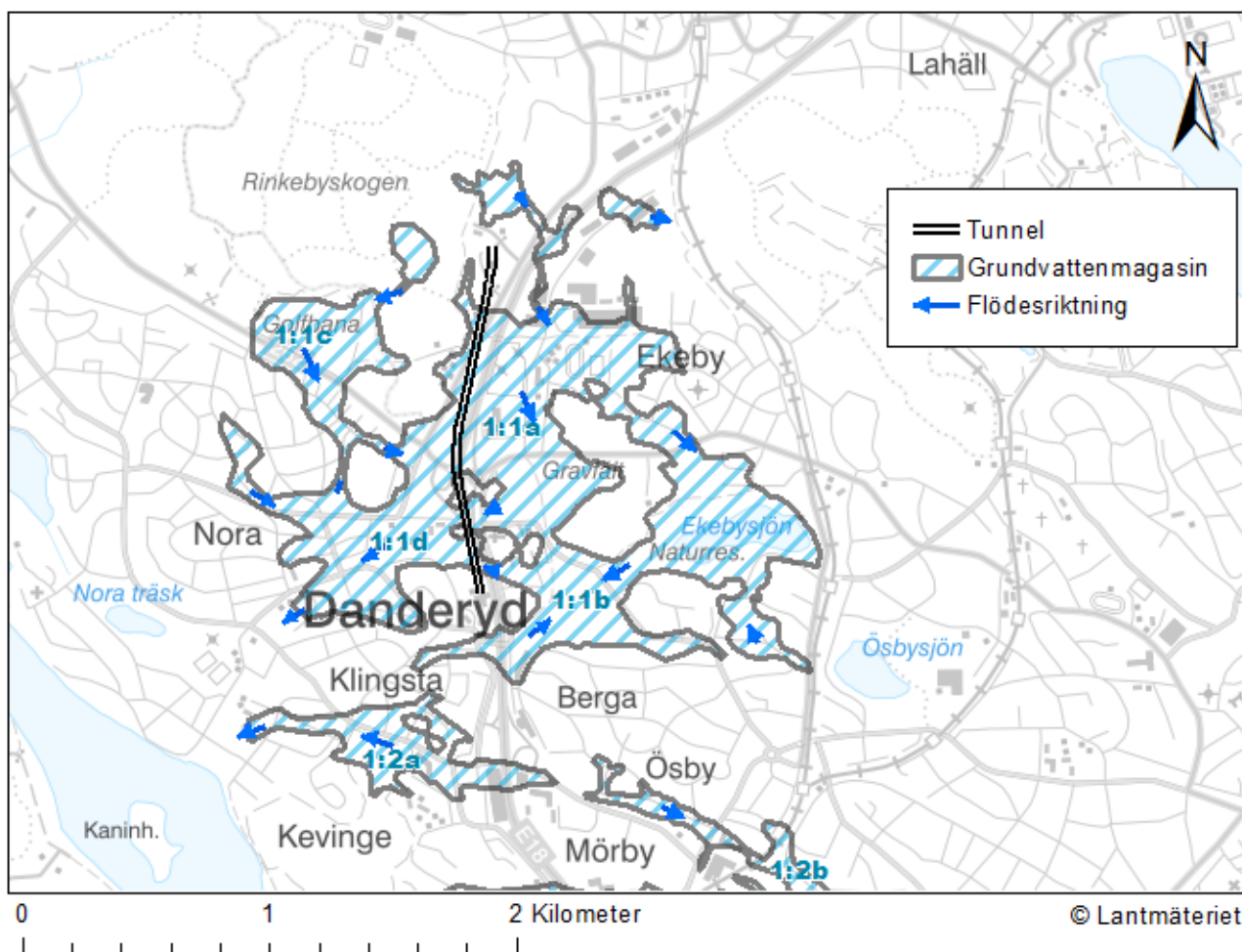
där \bar{K}_{inj} är den hydrauliska medelkonduktiviteten i den injekterade zonen och t är tjocklek på samma zon.

Inflödesmotståndet till tunneln ökar med tiden och det beskrivs med skinfaktorn. Det finns flera anledningen till att inflödesmotståndet ökar med tiden. En anledning är att när trycket sänks i tunneln fylls sprickorna delvis med gas vilket hindrar flödet av vatten i de minsta sprickorna. Det beror även på att det kan ske kemiska utfällningar nära bergytan på grund av trycksänkningen. Efter en längre tid anpassar sig även berget till det nya spänningsförhållandet vilket gör att sprickorna långsamt sluts ([ibid.](#)).

3 Metod

3.1 Områdesbeskrivning

Den del av tunneln som undersöktes i detta arbete var de första 1430 metrarna, vilket var den del som redan var borrhärad. Den ligger i delområdet Norra Danderyd som sträcker sig 2000 meter av tunnelns totala längd, se figur [3](#). Det området ingår i huvudområdet Danderyd - Bergshamra som består av tre stycken delområden 1.1 norra Danderyd, 1.2 Södra Danderyd och 1.3 Stocksund/Bergshamra (Sundkvist [2015](#)).



Figur 3: Tunnelsträckningen fram till 1430 m samt grundvattenmagasin och flödesriktningar som tagits fram tidigare inom projektet.

3.1.1 Tunneln

I City Link tunneln används tunnelbormaskinen Elektra som är 240 m lång och väger 1000 ton (Svenska kraftnät 2020). Tunneln går endast i berget och är på ett djup mellan 50 och 100 meter den största delen av sträckan (Sundkvist 2015).

3.1.2 Jordlager

Jordlagren i området liknar det som beskrivs i figur 1 men på många ställen ligger det även fyllnadsmaterial. Moränen som ligger som ett lager mellan berget och leran är oftast siltig, men det förekommer även grövre typer av morän. Leran ligger oftast på moränen i dalgångarna och i vissa djupa dalsänkor är lerlagren väldigt mäktiga. I Danderyd är där främst den öst-västliga dalgången vid Nora torg som har ett tjockt lerlager. I vissa dalsänkor ligger leran direkt på berget då moränen saknas lokalt eftersom den blivit bortspolad (ibid.).

3.1.3 Norra Danderyd

Området Norra Danderyd sträcker sig från Anneberg i norr till Berga i söder och mellan Nora torg i väst och Ekebysjön i öst, se figur 3. Hela Norra Danderyd är ett avrinnings-

område med fyra stora grundvattenmagasin. Grundvattenmagasinen är namngivna som följer Ekeby 1.1a, Berga och Ekebysjön 1.1b, Rinkeby golfbana 1.1c och Nora 1.1d. I stort sett allt grundvatten i Norra Danderyd måste passera genom grundvattenmagasinet Nora. Grundvattnet från Ekebysjön och Berga passerar dessutom genom grundvattenmagasinet Ekeby innan det hamnar i Nora. Medan Grundvattnet från Ekeby och Rinkeby golfbana rinner direkt till Nora (Sundkvist 2015).

Det finns inte lika mycket tunnlar i Norra Danderyd som det gör i mer centrala delar av Stockholm. Käppalattunneln är en stor avloppstunnel som passerar i den västra delen av området Norra Danderyd. Utöver den tunneln finns det andra mindre ledningstunnlar, dagvattenstråk och utdikningar som ligger betydligt närmre City Link tunneln. Hela Norra Danderyd och framför allt Ekebysjön är påverkad av dränering. Det går ett delvis kulverterat dike från Ekebysjön mot Nora träsk (Wladis och Erlandsson 2015).

Det finns flera risker att ta hänsyn till i samband med tunnelbyggnationen. Längs tunneln finns flera områden med skyddsvärd natur som riskerar att skadas av en sänkt grundvattennivå. I Norra Danderyd ligger bland annat Ekebysjöns naturrestervat (Sundkvist 2015). Inom området Norra Danderyd finns det även vissa hus med känslig grundläggning. Det innebär att de antingen har sin grundläggning direkt på leran eller att grundläggningen är pålad med träpålar (ibid.). Det har skett skyddsinfiltration i närheten av tunneln för att hålla upp grundvattennivån under byggfasen av projektet.

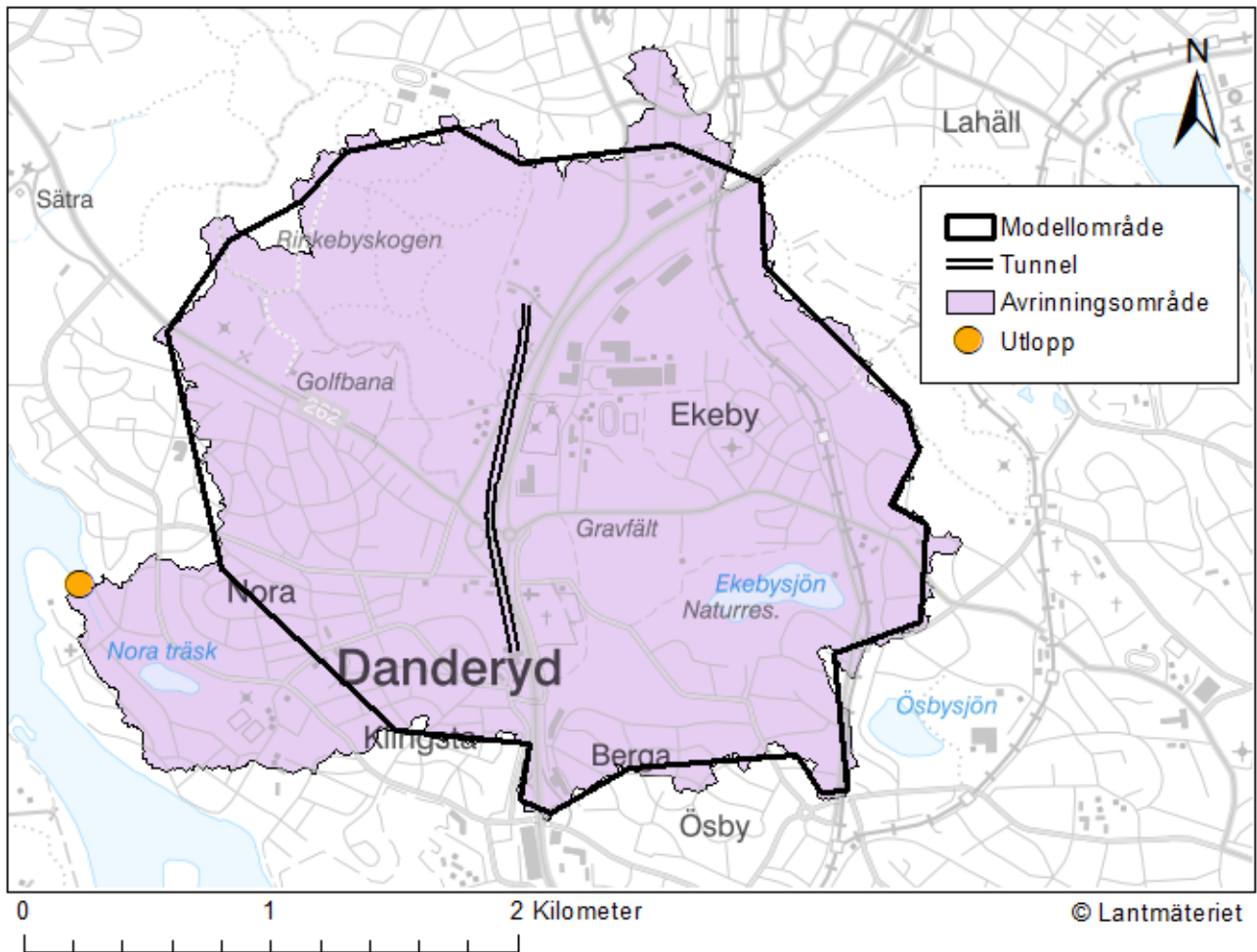
Det finns flera verksamheter med förhöjd risk för spridning av föroreningar om grundvattennivån sjunker inom Norra Danderyd. Verksamheterna är två kemtvättar, tre drivmedelsanläggningar och bilvårdsanläggning, en transformatorstation med deponi samt en brandövningsplats (ibid.).

Inom påverkansområdet för tunneln ligger det många energianläggningar och de flesta ligger i huvudområdet Danderyd - Bergshamra. Där ligger 586 energianläggningar innanför påverkansområdet varav drygt 200 anläggningar ligger i delområdet Norra Danderyd. I Norra Danderyd ligger de flesta energianläggningarna i områdena Klingsta och Berga och är till för enskilt bruk. Dessa brunnar riskerar att skadas. För de 3 energianläggningar som ligger närmre än 50 meter från tunneln har det beräknats kunna ske stora skador. Medan de 5 anläggningar som ligger mellan 50-100 meter från tunneln har beräknats kunna få en sänkt grundvattennivå på över 10 meter. Sedan är det ytterligare ca 40 anläggningar som riskerar en grundvattensänkning men då mellan 1 till 10 meter (ibid.).

3.2 Modellområdets gränser

Koordinatsystemet som användes för arbetet var SWEREF 99 18 00 och det är ett koordinatsystem som gäller i Stockholmsområdet. Höjdsystemet som användes för arbetet var RH 2000 och det gäller över hela Sverige.

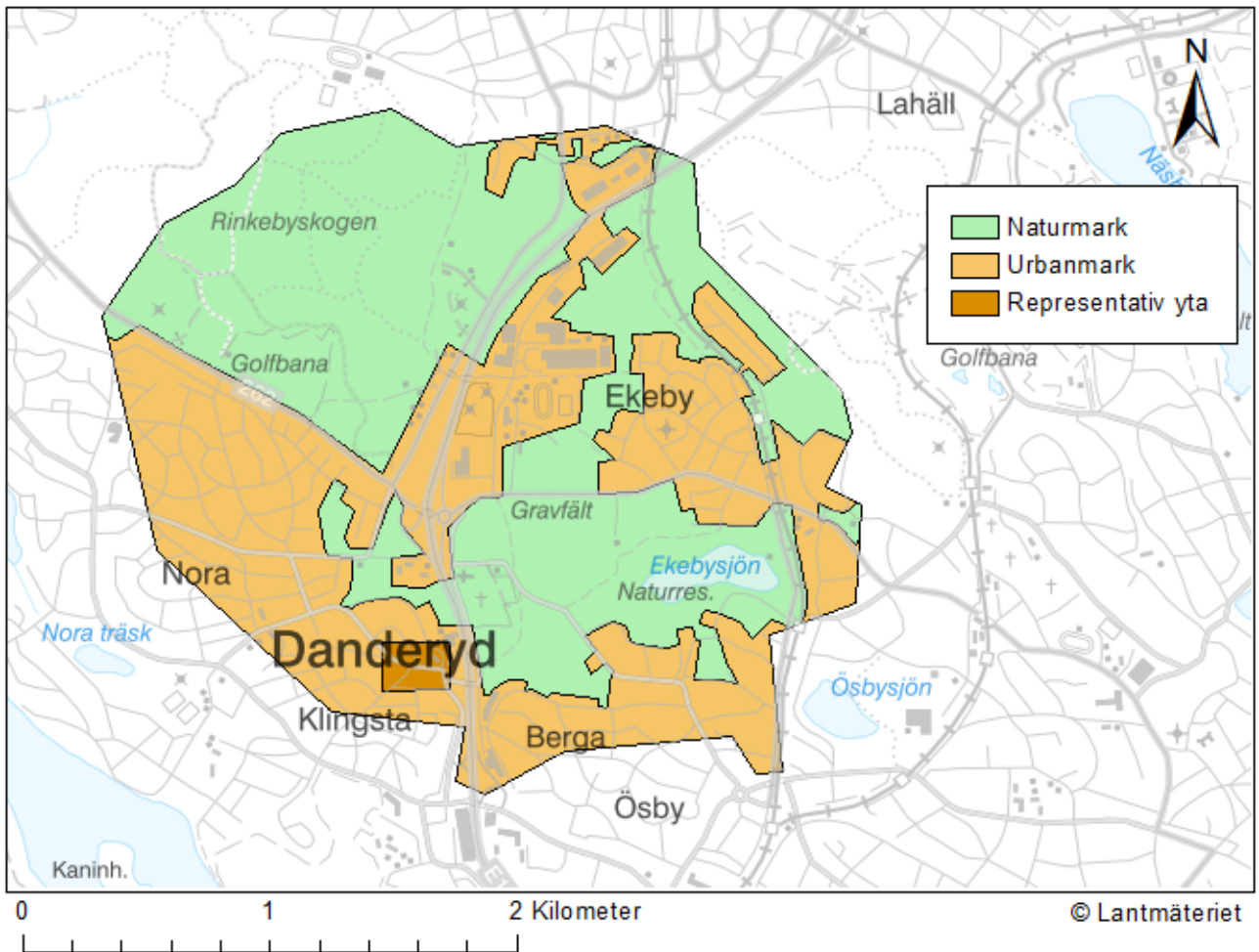
Avrinningsområdet för grundvattenmagasinet i Norra Danderyd, där City Link tunneln ligger, bestämdes i ArcGIS med höjddata från Lantmäteriet (2013). Med det uträknade avrinningsområdet som grund valdes sedan ett modellområde, se figur 4. Modellområdet har en area på 6,05 km². Modellområdet valdes tillräckligt stort så att grundvattennivån i kanterna inte påverkades av tunneln.



Figur 4: Avrinningsområde med utloppet i Edsviken markerat samt modellområde och nuvarande tunnelsträckning.

3.3 Grundvattenbildning

Allt inkommande vatten lades in på ytan av modellen som nederbörd. Modellområdet delades upp i naturmark och urbanmark som hade olika mängd inkommande vatten, se figur 5. I båda fallen användes nederbörd och evapotranspiration från SMHI och Havs- och vattenmyndigheten (2021) där hela Sverige är indelat i olika avrinningsområden med specifik data för varje område.



Figur 5: Indelning av markytan för beräkning av grundvattenbildning.

För naturmarken användes ekvation 6 för att beräkna hur mycket grundvatten som bildades.

$$P_{natur} = P - E \quad (6)$$

där P_{natur} är nettonederbörden och grundvattenbildningen i natur området, P är den faktiska nederbörden och E är evapotranspirationen.

Ekvation 7 användes för den urbana marken, där andelen infiltration i olika ytor samt läckaget från vattenledningarna räknades in.

$$P_{urban} = (P - E)Inf + L \quad (7)$$

där P_{urban} är grundvattenbildningen i det urbana området, L är läckaget från vattenledningarna och Inf är den delen av nederbörden som infiltreras i marken.

Infiltrationen som användes för olika typer av mark presenteras i tabell 2 och är schablonvärden som använts i tidigare projekt på WSP. I tabellen visas också värden för hur stor andel respektive underlagstyp utgör inom modellområdet. Andelen av ytan togs fram genom att beräkna arean för respektive underlagstyp på en begränsad men representativ del av den urbana marken som visas i figur 5

Tabell 2: Infiltration av nederbörd

Typ	Andel som infiltreras	Andel av yta
Naturmark	100%	65%
Byggnader	0%	10%
Asfalt	23%	17%
Hårdgjorda ytor	40%	8%

I Sverige läcker ungefär 15% av vattnet i ledningarna ut i marken. Det bidrar till grundvattenbildningen i urbana områden. Varje svensk använder i genomsnitt 140 l. Vilket gör att det måste vara ungefär 165 l per person i ledningsnätet då 15% kommer läcka ut (Svenskt Vatten 2019). I Danderyds kommun bor det 32 712 personer (SCB 2021a) fördelat på en yta av $26,37\text{km}^2$ (SCB 2021b). Med denna data beräknades det genomsnittliga läckaget från vattenledningarna i Danderyd med ekvation 8.

$$L = \frac{140 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/\text{pers dag}}{1 - 0,15} \cdot 0,15 \cdot 365 \text{dag}/\text{år} \cdot \frac{32712 \text{pers}}{26,37 \cdot 10^6 \text{m}^2} = 11 \text{mm}/\text{år} \quad (8)$$

När nederbörden räknades samman med ekvation 6 och 7 blev nederbörden för naturmark respektive urbanmark 250mm/år och 190mm/år när den avrundades till hela tiotal.

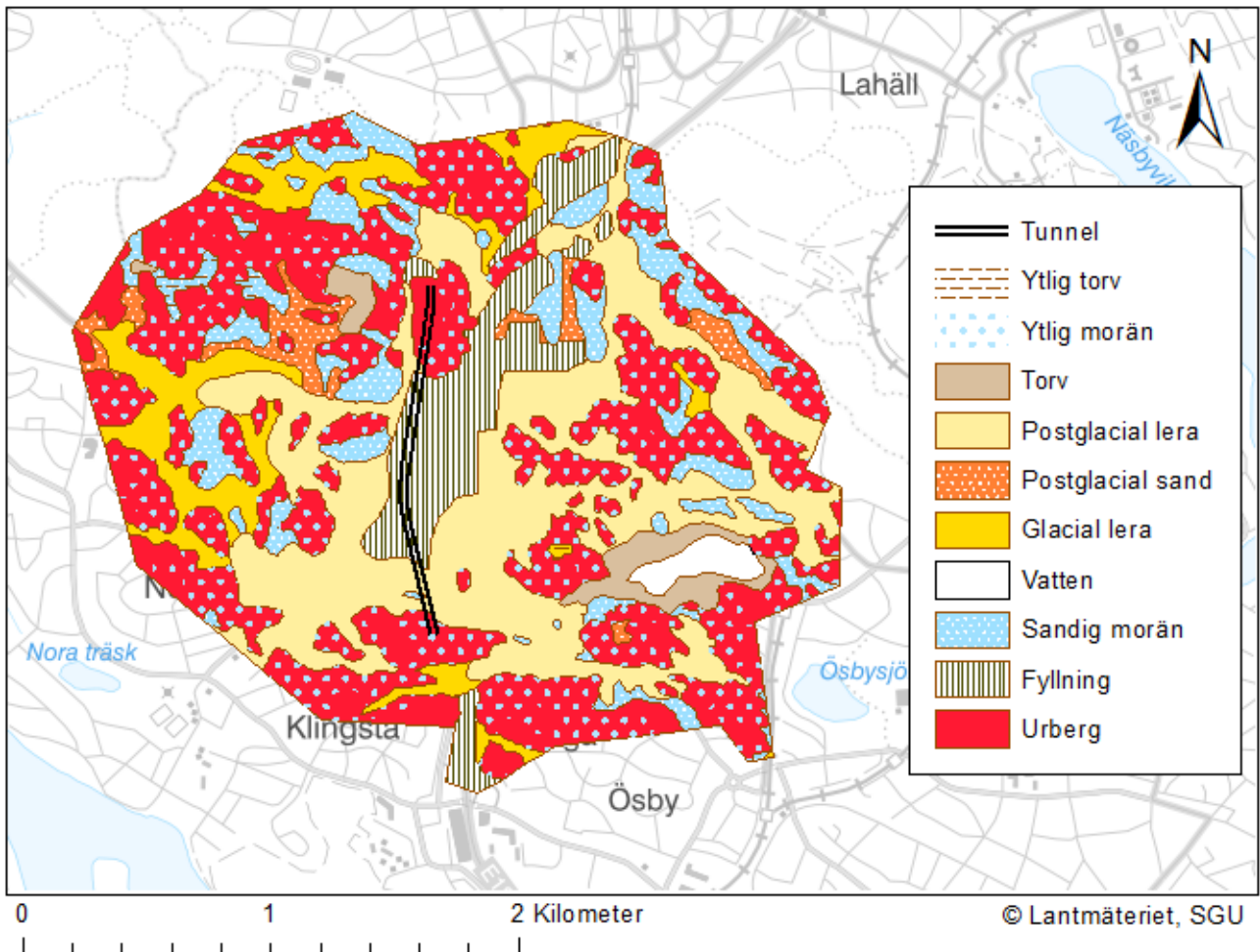
3.4 Enheter i modellen

Nedan beskrivs lagren av jord och berg i modellområdet.

3.4.1 Jordmodell

Jorden på berget delades in i två lager, ett som motsvarade morän där den hydrauliska konduktiviteten är förhållandevis hög och ett som motsvarar lera med förhållandevis låg hydraulisk konduktivitet. Indelningen gjordes till största delen med hjälp av Sundell och Rosén (2016) lerlagermodell som ger två ytor, överkant och en underkant av lerlagret. Modellen som Sundell och Rosén (ibid.) gjorde bygger på mer än 20 000 borrhål i området kring City Link tunneln. I modellen fylldes lagret mellan lera och berg i som morän. På de ställen där det redan uträknade lerlagret från Sundell och Rosén (ibid.) inte fanns antogs leran utgöra de översta 70% av jordlagret och resterande del antogs utgöras av morän.

Den hydrauliska konduktiviteten i leran sattes till ett lågt värde enligt tabell 1 medan den hydrauliska konduktiviteten i moränen användes för att kalibrera modellen. Enligt SGU:s jordartskarta är det förhållandevis stora områden med sand i modellområdet och moränen i området är mestadels sandig, se figur 6. Jordartskartan visar även stora delar med fyllnadsmaterial i ytlagret runt tunneln, men enligt lerlagermodellen från Sundell och Rosén (ibid.) är det lera under det mesta av fyllnadsmaterialet. Den hydrauliska konduktiviteterna bestämdes utifrån tabell 1 tillsammans med SGU:s jordartskarta. I leran sattes den hydrauliska konduktiviteten till 10^{-8} horisontellt och 10^{-9} vertikalt.



Figur 6: SGU:s jordartskarta för modellområdet med tunneln.

3.4.2 Bergmodell

Inom City Link-projektet fanns det redan en bergnivåmodell för delar av det område som modelleras i denna rapport. Den bergnivåmodellen har företaget COWI gjort med hjälp av sonderingar tillsammans med den hydrogeologiska kartan för området. Enligt COWI ska modell endast kunna innehålla betydande fel vid vatten. Den befintliga bergmodellen användes för de delar den gav information och för övriga delar användes en mer förenklad modell. Den förenklade modellen som användes bestod av Lantmäteriets höjddata med 2×2 m upplösning tillsammans med SGU:s Jorddjupsmodell som har upplösning på 10×10 m. Osäkerheten i Lantmäteriets höjddata är endast några få decimeter (Lantmäteriet 2013) medan SGU (2017) uppger att osäkerheten i jorddjupskartan ökar med avståndet från punkter med uppmätt jorddjup. Jorddjupet drogs bort från marknivån för att få en förenklad bergnivåmodell för området.

Berget delades in i flera lager med olika hydraulisk konduktivitet. För att få fram olika lager antogs berget i området ha ett konduktivitetsavtagande som endast berodde på djupet. På grund av detta har alla berglagren samma topografi.

Den hydrauliska konduktivitetens avtagande med bergets djup i Danderyd beräknades av WSP. För att beräkna den hydrauliska konduktiviteten i respektive brunn användes en metod som tagits fram av Ryd (2017). En lognormal-fördelning anpassades till de hydrau-

liska konduktiviteterna på olika djup. För beräkningarna av berget i Danderyd användes djupen <130, <170 och <200 meter. Bergets djupavtagande beskrevs med ekvation 9 (SKB 2006).

$$K_{berg} = Cd^L \quad (9)$$

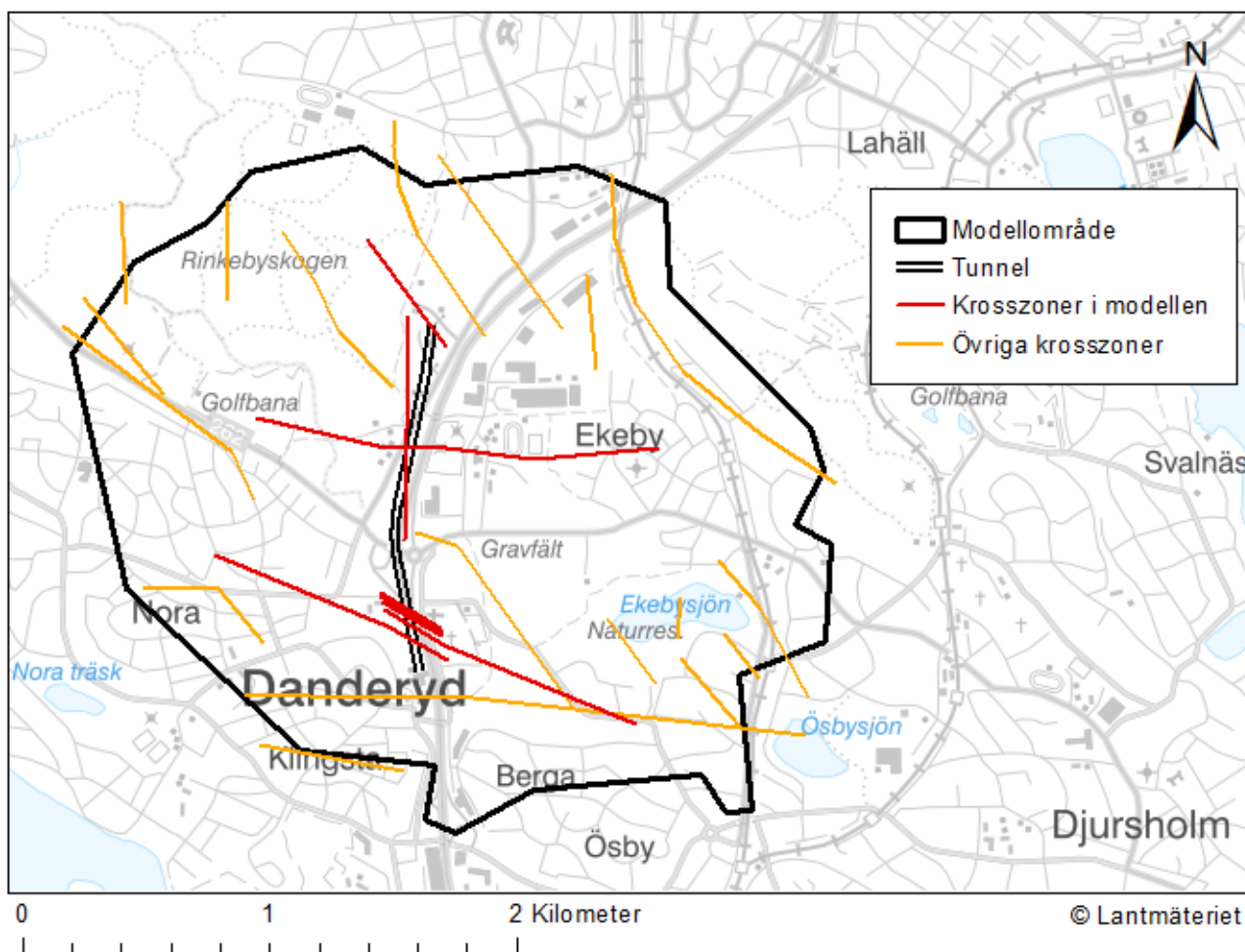
där K_{berg} är den hydrauliska konduktiviteten i berget på en viss nivå, d är djupet från markytan, C är en konstant som sätts med avseende på det ytliga bergets hydrauliska konduktivitet och L är en konstant som sätts med avseende på djupavtagandet. För att få fram C och d användes de hydrauliska konduktiviteterna för respektive djup som passningsparametrar. Enligt WSP:s modell för Danderyd passade konstanterna $C = 7,1 \cdot 10^{-6}$ och $L = -1,40$ bäst till datan. Ekvation 9 bör fungera för hela berget förutom de översta 5 metrarna. I tabell 3 presenteras den beräknade hydrauliska konduktiviteten för respektive berglager i modellen. Den hydrauliska konduktiviteten är beräknad för mitten av respektive lager. Det översta berglagrets hydrauliska konduktivitet i tabell 3 användes bara för den första modellen då det lagret användes för att kalibrera modellen.

Tabell 3: Den beräknade hydrauliska konduktivitet för berglagren i modellen.

Djup [m]	Hydraulisk konduktivitet [m/s]
Berg 0 - 5	$2,0 \cdot 10^{-6}$
Berg 5 - 10	$4,2 \cdot 10^{-7}$
Berg 10 - 20	$1,7 \cdot 10^{-7}$
Berg 20 - 40	$6,1 \cdot 10^{-8}$
Berg 40 - 70	$2,6 \cdot 10^{-8}$
Berg 70 - 100	$1,5 \cdot 10^{-8}$
Berg 100 - 150	$8,2 \cdot 10^{-9}$

3.4.3 Krosszoner

I berget finns det svaghetszoner som leder vatten betydligt bättre än resten av berget. Det finns kartor över svaghetszoner så som krosszoner och sprickzoner från SGU, men det finns även mer detaljerad information i närheten av tunneln där svaghetszoner tagits fram inom City Link-projektet. Enligt undersökningar inom City Link-projektet är den hydrauliska konduktiviteten i krosszonerna ungefär 10 gånger högre än i omgivande berg. För sprickzonerna är skillnaden i hydraulisk konduktivitet mellan sprickor och omgivande berg försumbar (Wladis och Erlandsson 2015). Från kartorna över svaghetszonerna ritades linjer för krosszonerna som korsade tunneln, övriga krosszoner försumrades, se figur 7. I närheten av tunneln överlappade de båda kartorna och då lades vikten vid City Link-projektets krosszoner.

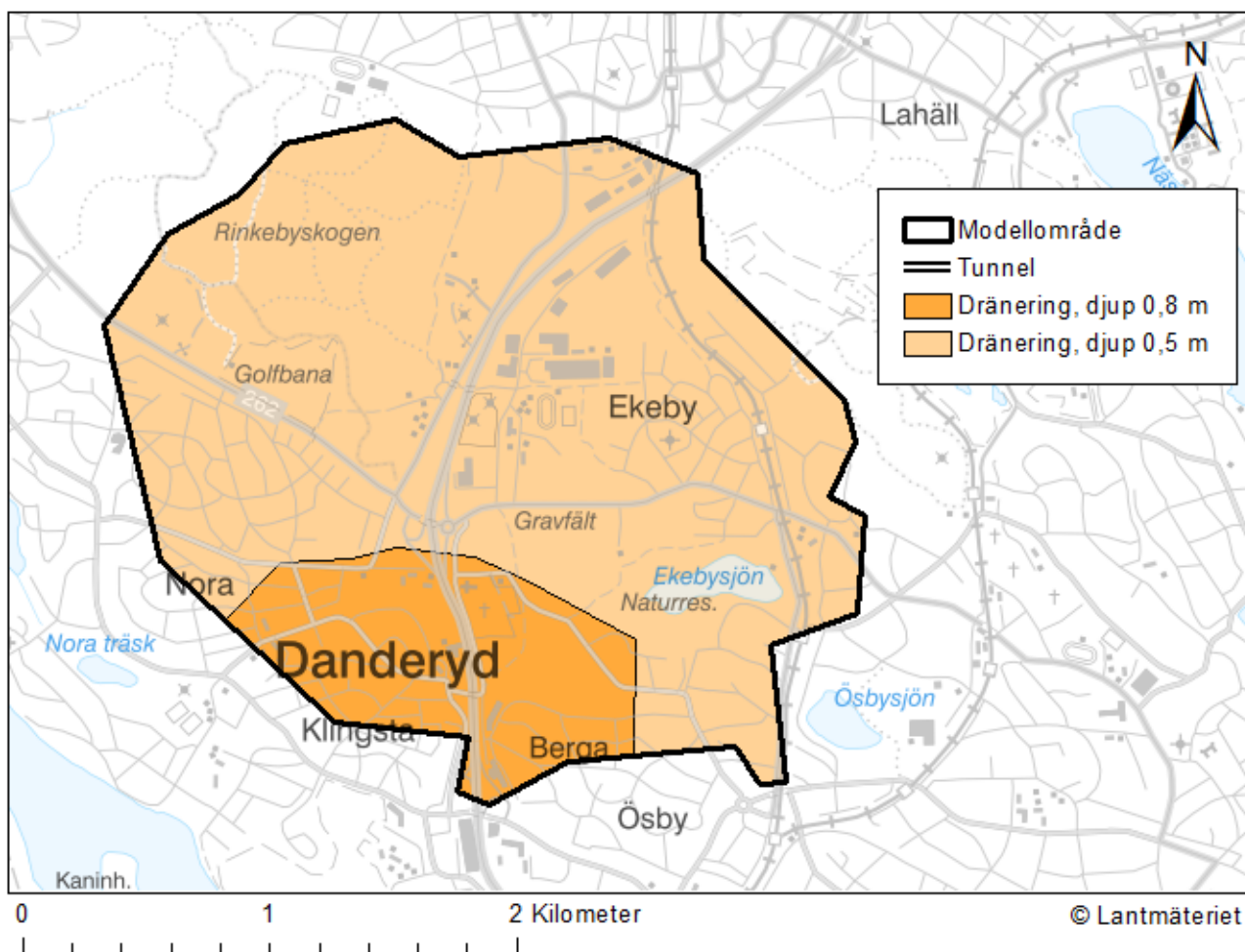


Figur 7: Karta över de krosszoner som tagits fram tidigare inom projektet kombinerat med de krosszoner som enligt SGU finns i området (Wladis och Erlandsson [2015](#)).

3.5 Randvillkor

Det sattes två randvillkor om grundvattennivå som gäller på lokala delar i modellen. Ett av dem är Ekebysjön som ritades in med en polygon och sattes i modellen till konstant grundvattennivå på 6 m, samma nivå som vattenytan i sjön. Det andra randvillkoret är ett symmetrivillkor om att inget flöde sker över modellområdets yttergränser, vilket gör att grundvattennivån då antogs vara den samma på båda sidor om gränsen.

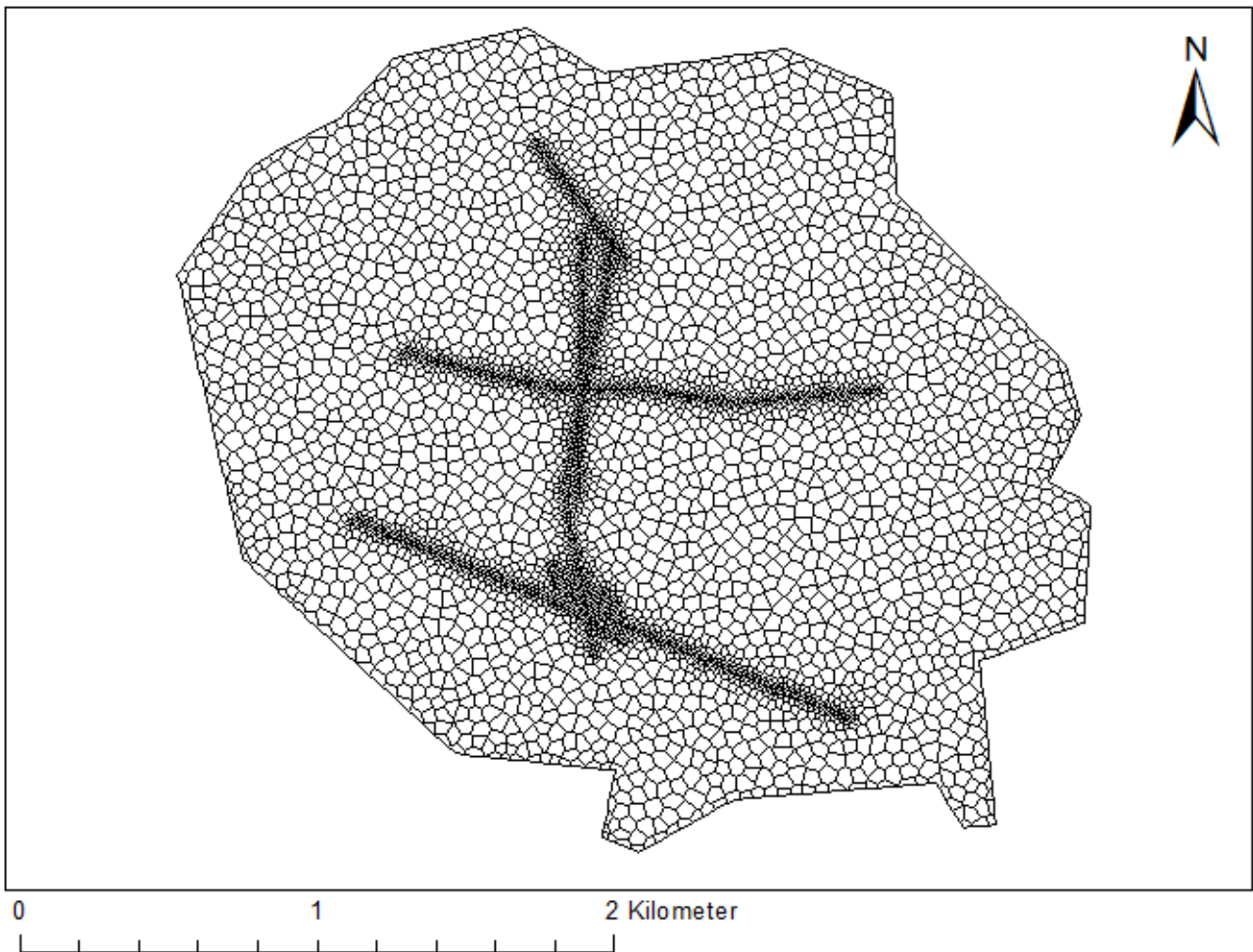
Eftersom modellområdet till stora delar är bebyggt samt att Wladis och Erlandsson ([2015](#)) skriver att hela Norra Danderyd är påverkat av dränering gjordes ett antagande om en dränering 0,5 m under marknivån i hela avrinningsområdet. Det gjordes även ett antagande om en djupare dränering på 0,8 m under marken i den lägsta delen av modellen, se figur [8](#). Båda dessa dräneringar användes för att kalibrera modellen genom att ändra på deras läckagekoefficient. Det är en samlingskoefficient och den beskriver skillnaden i hydrauliska potential mellan dräneringen och grundvattnet (Waterloo Hydrogeologic [n.d.](#)).



Figur 8: En karta över den ytliga dräneringen i modellen.

3.6 Från konceptuell till matematisk modell

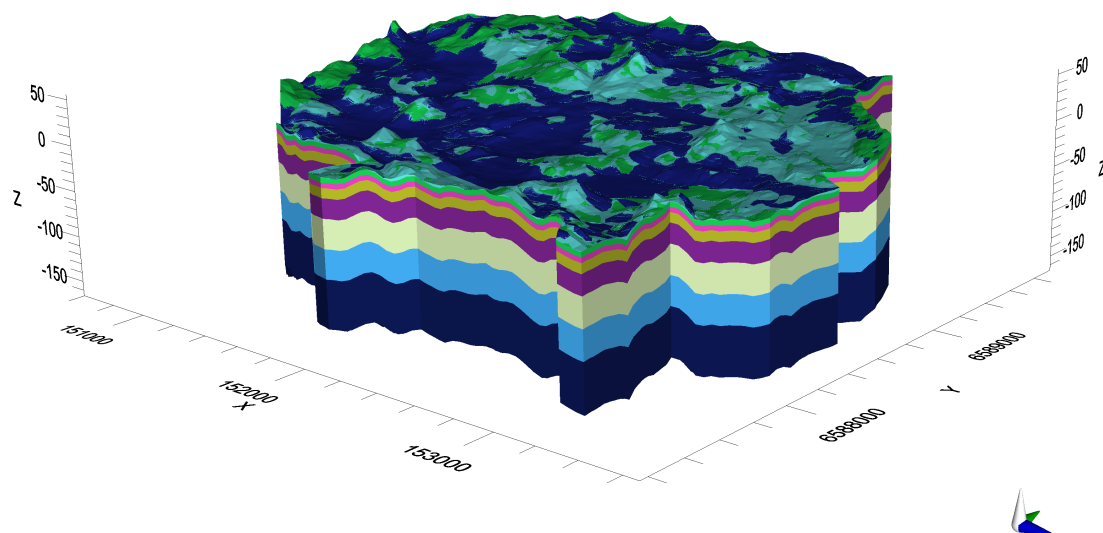
Den konceptuella modellens förhållandevis kontinuerliga ytor översattes till en matematisk modell genom att data delades in i ett numeriskt grid med olika stora celler, se figur 9. I programmet visual MODFLOW flex som användes skapades först ett raster av trianglar enligt J.R. Shewchuks metod. Triangelnätet användes sedan för att skapa voronoi celler. Med denna typ av ostrukturerat numeriskt grid går det att lokalt göra ett finare nät av celler (Waterloo Hydrogeologic n.d.). Modellens raster gjordes finare runt tunneln samt runt krosszonerna, se figur 9.



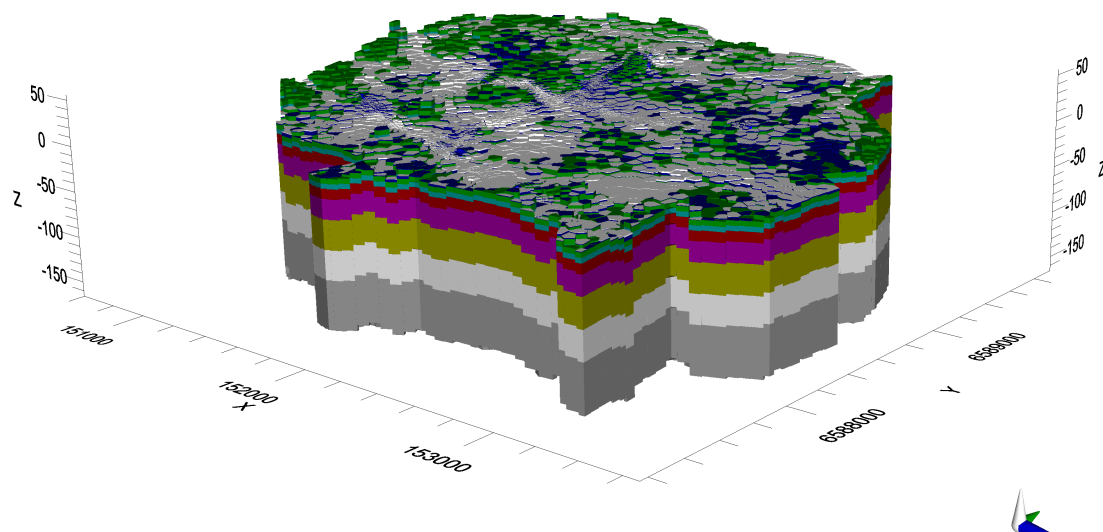
Figur 9: Det numeriska grid som användes i den numeriska modellen.

Versionen av MODFLOW som användes var MODFLOW-USG som tillåter ostrukturerat numeriskt grid. Den grundläggande ekvationen för grundvattenflödet som användes var ekvation [3](#). Eftersom grundvattennivån modellerades som steady state sattes magasinsefficienten till noll.

I figur [10](#) visas den konceptuella och den numeriska modellen. Den konceptuella modellen ser kontinuerlig ut medan den numeriska modellen är diskret uppdelad i tydliga celler.



(a)



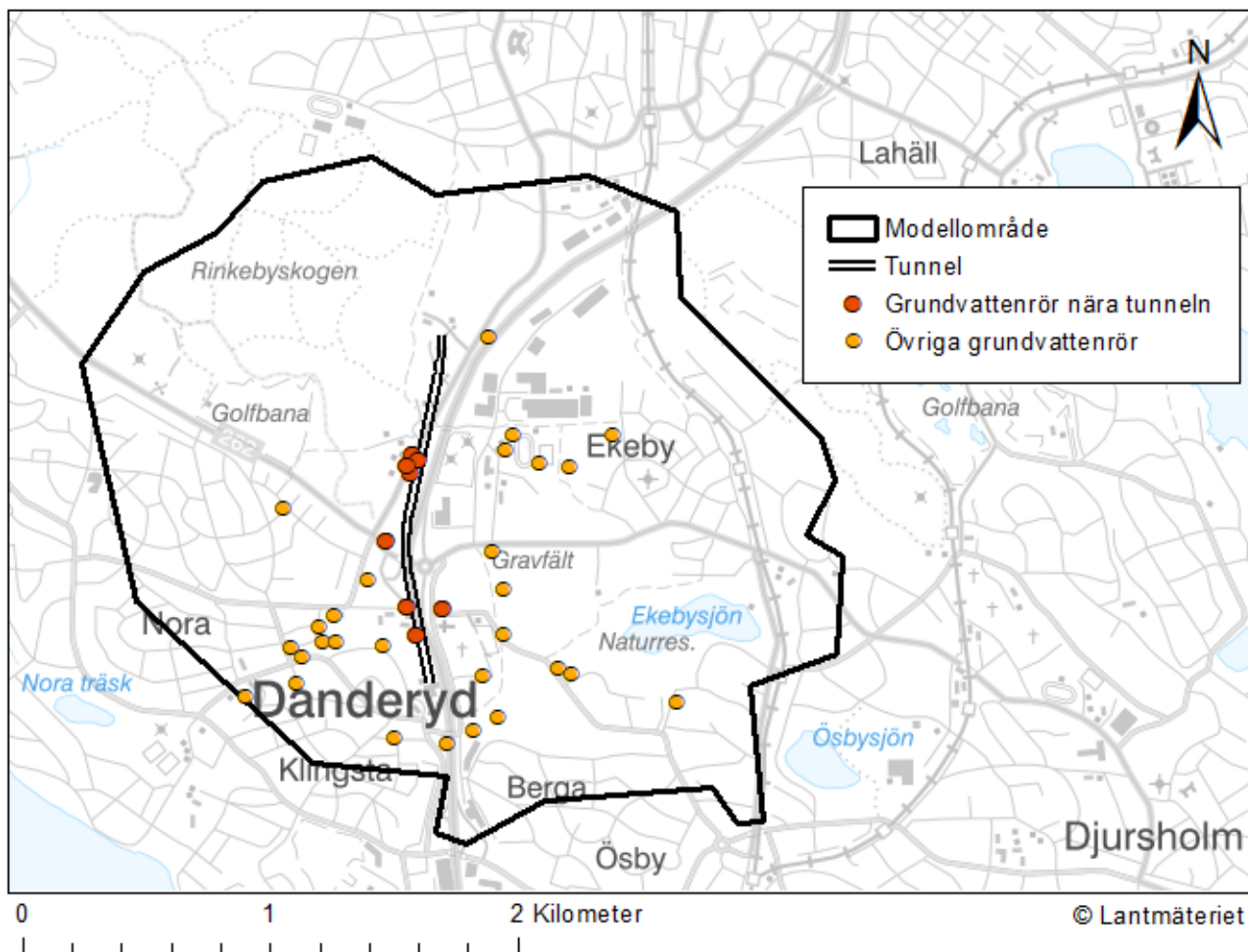
(b)

Figur 10: Modellens uppbyggnad i lager och celler där varje färg symboliserar ett lager i modellen. Den övre figuren (a) visar den konceptuella modellen och den undre figuren (b) visar den numeriska modellen.

3.7 Kalibreringspunkter

Ett antal grundvattenrör valdes ut som kalibreringspunkter till referensmodellen, se figur [11](#). För var och en av de utvalda grundvattenrören togs det fram ett medianvärde på grundvattennivån för att sedan kunna använda det som en kalibreringspunkt. För att få en bild av grundvattennivån innan tunneln började borrar användes inga mätningar efter byggstarten 1:a februari 2020. Grundvattenrör som inte hade ett helt års mätning eller på annat sätt saknade mycket data sorterades bort. Undantag från detta gjordes endast på några grundvattenrör från 2019 där WSP hade gjort extrapolering med hjälp av värdet från andra grundvattenrör i området. För alla grundvattenrör presenterades grundvattennivån mot tiden för att se om det fanns avvikande värden som behövde undersökas

närmre och kanske sorteras bort. För att se om värdet var rimligt jämfördes medelvärde och medianvärde för vattennivån.



Figur 11: De utvalda grundvattenrörens placering i modellen.

Modellen har flera lager och för att den uppmätta grundvattennivån skulle jämföras med den beräknade grundvattennivån i motsvarande lager användes grundvattenrörens spetsnivå. För vissa grundvattenrör fanns det angivet vilken spetsnivå var för andra var det endast angivet vilket magasin grundvattenröret mätte i. I de fallen som grundvattenrörens spetsnivå inte hamnade i det angivna magasinet justerades det manuellt genom att kontrollera lagrens nivåer i kartan och sedan lägga spetsnivån i angivet lager.

Uppmätta grundvattennivåer plottades mot beräknade grundvattennivåer för att visuellt se skillnaden. För att beräkna den minimala och maximala residualen, medelresidualen och absoluta medelresidualen användes ekvationerna [10](#), [11](#) och [12](#). Dessa residualer beräknades för att se hur långt referensmodellen var från verkligheten och kunna kalibrera den därefter. När referensmodellen kalibrerades lades störst vikt vid de grundvattenrör som var nära tunneln, se figur [11](#).

$$R = x_{cal} - x_{obs} \quad (10)$$

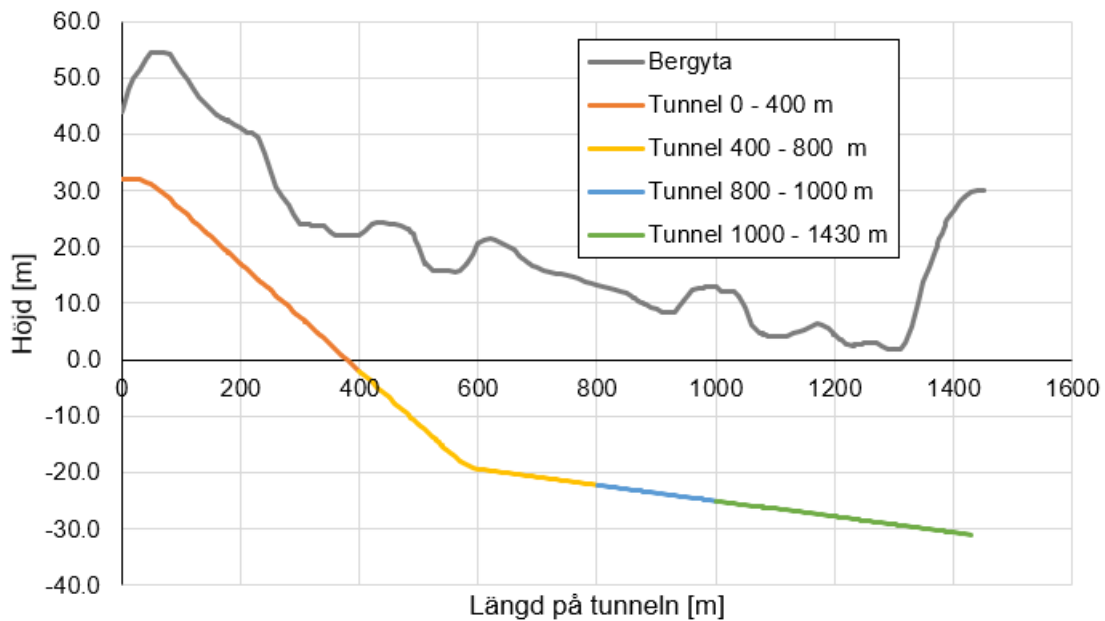
$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^{i=1} x_{i,cal} - x_{i,obs} \quad (11)$$

$$|\bar{R}| = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^{i=1} |x_{i,cal} - x_{i,obs}| \quad (12)$$

där R är residualen, x_{cal} är den modellerade grundvattennivån, x_{obs} är den observerade grundvattennivån, i är vilken specifikt grundvattenrör det är och n är antalet grundvattenrör.

3.8 Tunnel

Tunneln lades in i modellen som en dränering på sin bottennivå, som visas i figur 12. Den delades in i fyra sektioner 0 - 400 m, 400 - 800 m, 800 - 1000 m och 1000 - 1430 m. Tunneln har två distinkta ändringar i vinkeln mot x-axeln, de två punkterna samt start- och slutpunkt för respektive sektion användes för att lägga in tunneln i modellen med interpolation. Tunneln lades in som en medelnivå i varje cell. Den största delen av tunneln gick i berglagret som hade djupet från 20 - 40 m.



Figur 12: Tunnelns bottens nivå indelad i de sektioner som användes i modellen och bergytan ovanför.

För att se hur mycket vatten som tunneln dränerade delades modellområdet upp i fem zoner. Tunneln var fyra zoner, en för varje sektion av tunneln. Den omgivande marken var den femte zonen. Genom denna indelning var det möjligt att se hur stort inläckaget till tunneln var i respektive sektion av tunneln för olika värden på läckagekoefficienten.

WSP gjorde kontinuerligt inläckagemätningar i tunneln. Av dessa mätningar valdes det ut två tillfällen som simulerades i modellen, se tabell 4. Det ena tillfället är från januari 2021

när inläckaget var som störst (inläckage B) och det andra tillfället är från maj 2021 när inläckaget minskat kraftigt till följd av tätning (inläckage A). Inläckage B:s sista sektion går egentligen bara till 1415 m inte 1430 m, men för att kunna använda samma modell sattes båda till 1430 m.

Tabell 4: Det uppmätta inläckaget till tunneln.

Tunnelsektion [m]	Inläckage A [l/min]	Inläckage B [l/min]
0 - 400	26	37
400 - 800	25	59
800 - 1000	14	33
1000 - 1430	53	69
0 - 1430	118	198

3.9 Validering av avsänkning

För att se om den modellerade avsänkning stämde överens med den uppmätta avsänkning användes två olika metoder. Dels jämfördes den modellerade avsänkning med observerade grundvattensänkning under våren år 2021. Samma grundvattenrör (se figur 11) och grundvattennivåer som användes för kalibrering jämfördes mot grundvattennivån under våren år 2021. Data för grundvattennivåer samlades in för perioden januari 2021 till början på juni 2021. Det är en kort tid och inga grundvattenrör sorterades bort för att de hade få mätningar. Det kontrollerades om det fanns avvikande värden och om så var fallet plockades dessa bort. Sedan beräknades median och medelvärde för varje grundvattenrör. Medianen och medelvärdet jämfördes för att kontrollera om värdet var rimligt. Sedan subtraherades medianen för grundvattennivån våren 2021 från medianen för grundvattennivån innan tunneln byggdes för att få den verkliga avsänkning. Det andra sättet var genom att använda samvariationsanalys som WSP har gjort för vissa grundvattenrör. Då användes grundvattenrör med påverkad grundvattennivå tillsammans med opåverkade rör för att på så sätt beräkna med interpolation vad grundvattennivån borde varit vid en viss tidpunkt. Sedan jämfördes den interpolerade grundvattennivån med den uppmätta grundvattennivån för att få avsänkning. Alla interpolerade mätningar som jämfördes med uppmätta mätningar togs från slutet av maj. Båda dessa metoder jämfördes med den modellerade avsänkning vid det lägre inläckaget, inläckage A.

4 Resultat

4.1 Kalibrering av referensmodell

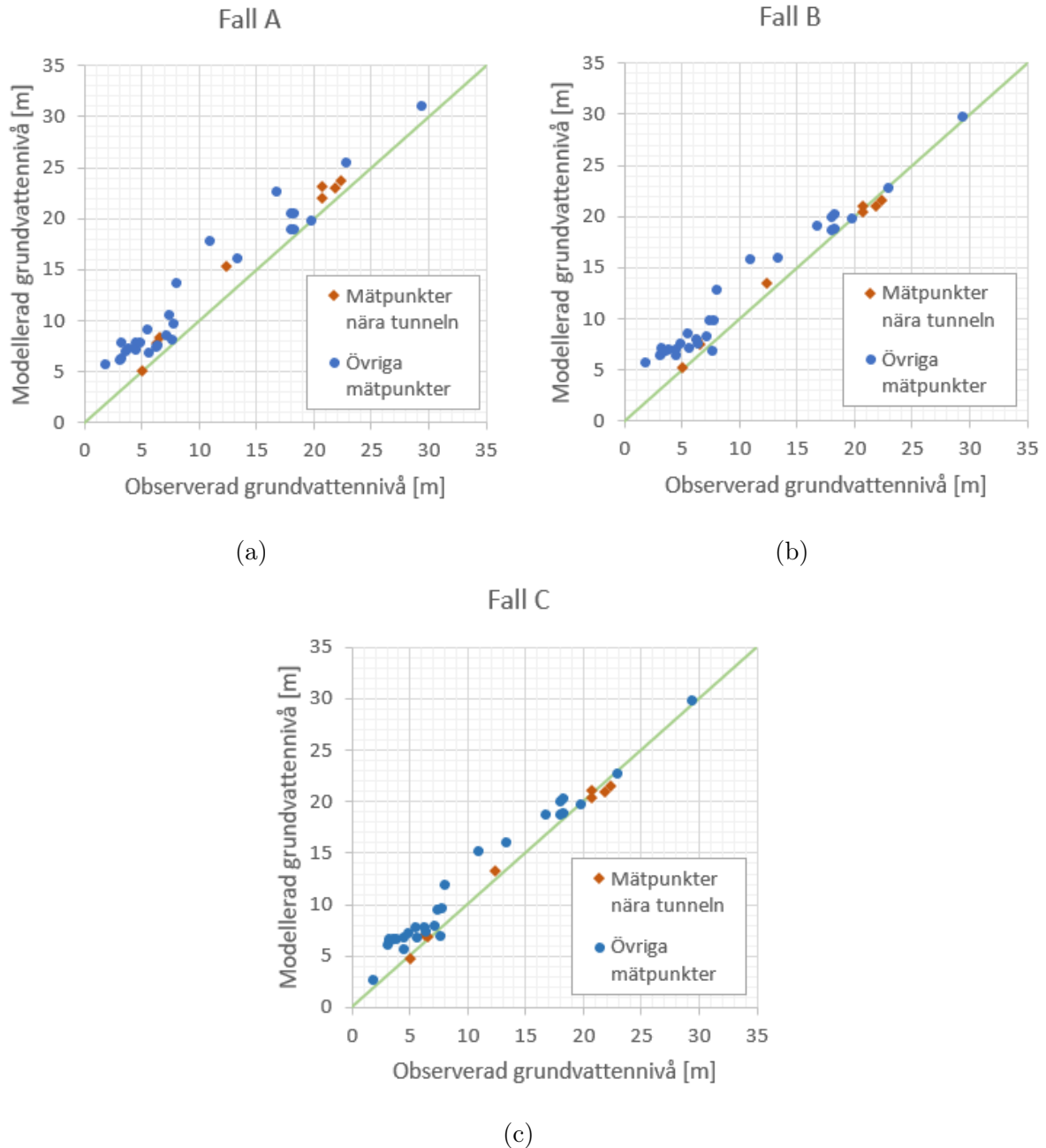
Med hjälp av grundvattenrören i figur 11 kalibrerades modellen manuellt där många olika fall testades och justeringar av konduktivitet och dränering gjordes. Medianvärdet och medelvärdet av grundvattennivån var oftast mycket lika varandra vilket tyder på att grundvattennivåns värde var trovärdigt. Det var två av grundvattenrören spetsnivåer som hamnade i det översta berglagret istället för i leran. På grund av deras låga vattennivå och medelnivån av moränlagret i cellen var det inte möjligt att manuellt flytta dessa spetsnivåer till moränen.

I tabell 5 visas några exempel av kalibreringssimuleringar. Den första modellen är fall A, fall B är ett fall utan extra dränering och fall C är det slutgiltiga fallet som används i

referensmodellen. Grundvattennivån när den första modellen användes var för hög i alla grundvattenrör det kan ses både i tabell 5 och figur 13a. Det testades många fall med olika värden på den hydrauliska konduktiviteten i moränen och det översta berglagret. Det testades även om det gjorde någon större skillnad om den hydrauliska konduktiviteten var lägre vertikalt än horisontellt i moränen. Det gjorde skillnad men som resultatet visar var det inte när den hydrauliska konduktiviteten var olika som modellen fick bäst passning. Som kan ses i figur 13 var det ett genomgående mönster att de höga grundvattennivåerna modellerades för lågt och de låga grundvattennivåerna modellerades för högt. Det som generellt gjorde att punkterna närmade sig en linjär form var att sänka den hydrauliska konduktiviteten i det översta berglagret. Den hydrauliska konduktiviteten i moränen flyttade hela grundvattenytan ungefär lika mycket. Under kalibreringen beaktades ofta rimligheten i de konduktiviteter som gav låga residualer.

Tabell 5: Utvalda fall från kalibreringen av referensmodellen.

Fall	Modellvärden				Residualer [m]			
	Konduktivitet [m/s]	Läckage		Alla	De viktigaste			
	Morän	Berg 0 - 5 m	Dränering 0,5 m	Dränering 0,8 m	\bar{R}	$ \bar{R} $	\bar{R}	$ \bar{R} $
A	$1 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-6}$	0.5	0	2.62	2.62	1.60	1.60
B	$1 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-6}$	0.1	0	1.90	2.04	0.31	0.79
C	$1 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-6}$	0.1	0.2	1.54	1.69	0.02	0.58



Figur 13: Visualisering av residualerna i tabell 5. Avståndet mellan punkt och den gröna linjen är residualen för respektive grundvattenrör.

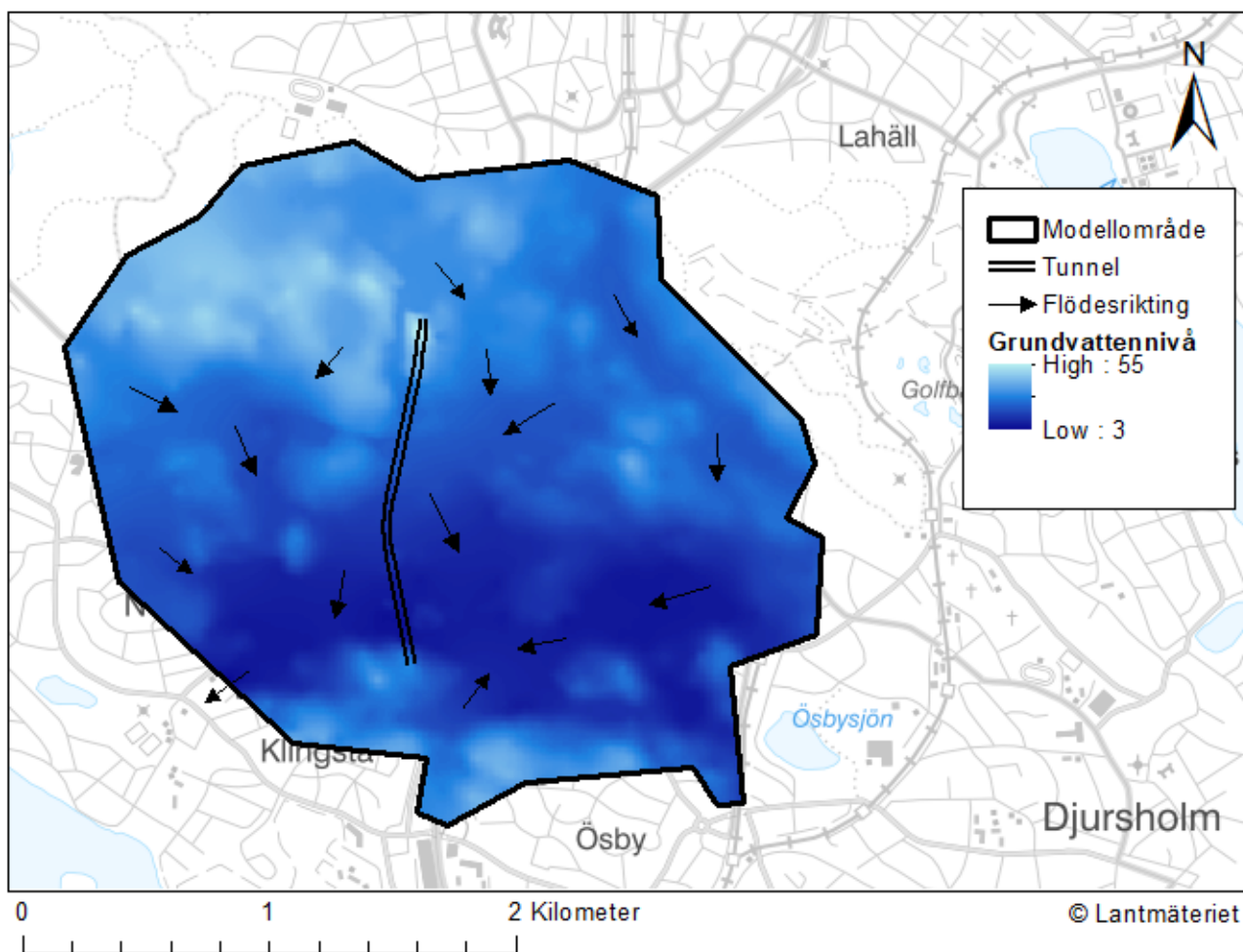
Flera olika fall testades där extradräneringen inte var inkluderad. Till sist valdes fall B, som presenteras i tabell 5, till den bästa passningen utan extradränering. Sedan lades den extra dräneringen in för att få det lägre och lerigare området i modellen att få lägre grundvattennivå och bättre passning. Det gav en tydlig minskning av residualerna. Det syns även om figur 13b och 13c jämförs att de lägre grundvattenrören närmade sig linjen när den extra dräneringen lagts in.

Att läckagekoefficienten för dräneringen under hela modellområdet sattes till 0,1 berodde mest på att det inte gjorde någon större skillnad om värdet var högre. Grundvattennivån i modellen ligger därför under eller omkring 0,5 m djup. För extradräneringen i det låga

området gällde samma sak, att det inte gav någon ytterligare effekt även om dräneringens läckagekoefficienten var högre.

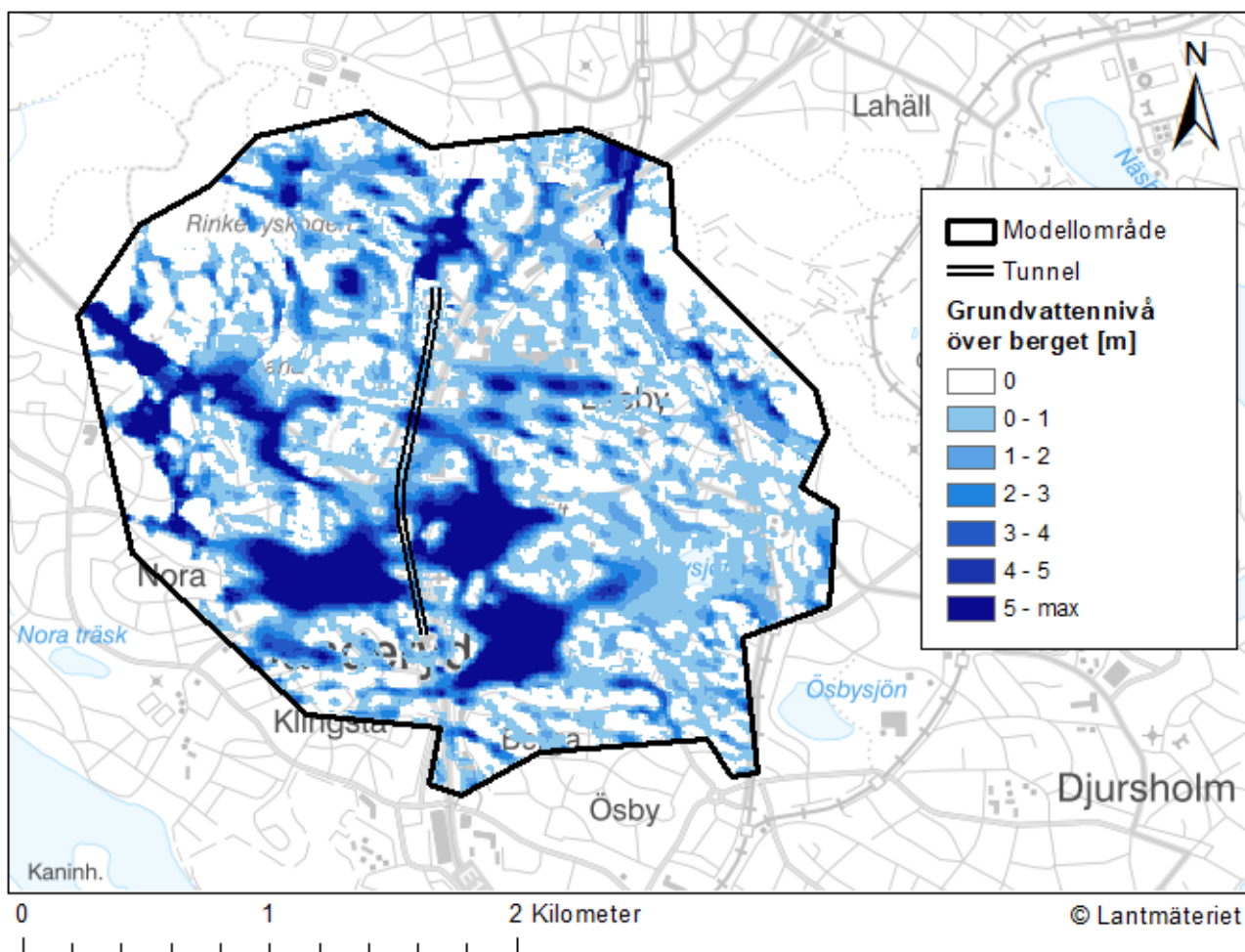
4.2 Grundvattennivån i referensmodellen

Den simulerade grundvattenytan i moränen i referensmodellen följer generellt topografin, se figur 14. Allt grundvattnet rinner ner mot den förhållandevis djupa och leriga östvästliga dalgången vid Nora torg. Som modellen är uppbyggd sker det inget flöde över modellgränsen. Trots det tas pilen över modellgränsen med eftersom det är där modellområdet är som lägst och det är där vattnet rinner i verkligheten. Flödesriktningarna i referensmodellen ser ut att vara ungefär samma som tidigare tagits fram inom projektet, jämför figur 3 och 14.



Figur 14: Modellerad grundvattenytan och flödesriktningar i moränen i referensmodellen.

Figur 15 visar hur hög grundvattennivån är över berget i referensmodellen. Det kan ses som hur stora grundvattenmagasinen är i moränen. Referensmodellens grundvattenmagasin i moränen stämmer inte överens överallt med grundvattenmagasinen som var framtagna inom projektet, jämför figur 3 och 15. Skillnaden är som tydligast vid Ekebysjön. Grundvattennivå över berget är som störst i den östvästliga dalgången vid Nora torg.



Figur 15: Referensmodellens grundvattenmagasin i moränen.

4.3 Tunnelkalibrering

Inläckaget till tunnelns olika sektioner som visas i figur 12 kalibrerades med läckagekoefficienten. Den första modellen och de resulterande fallen visas i tabell 6. Modellen anpassades både till det lägre inläckage A och det högre inläckage B, men som tabell 6 visar gick det inte att anpassa modellen fullt ut till inläckage B. Det fattas 9 l/min mellan det modellerade och det uppmätta värdet för inläckage B.

Tabell 6: Den första modellen för kalibreringen och den slutgiltiga modellens inläckage till tunneln.

		Tunnelsektion			
		0 - 400 m	400 - 800 m	800 - 1000 m	1000 - 1430 m
Den första modellen	Uppmätt inläckage [l/min]	-	-	-	-
	Läckage	0,01	0,01	0,01	0,01
	Modellerat inläckage [l/min]	19,3	52,6	22,9	62,5
Inläckage A	Uppmätt inläckage [l/min]	26	25	14	53
	Läckage	0,017	0,0032	0,004	0,0075
	Modellerat inläckage [l/min]	25,8	25,2	14,4	52,6
Inläckage B	Uppmätt inläckage [l/min]	37	59	33	69
	Läckage	0,3	0,1	0,3	0,012
	Modellerat inläckage [l/min]	32,0	59,0	29,6	68,4

Det uppmätta inläckaget är det faktiskt uppmätta inläckaget för respektive sektion i tunneln. Läckage är den koefficient som styr hur stort inläckaget blir i modellen. Det modellerade inläckaget är det inläckaget som modellen resulterade i. Det modellerade inläckaget försökte anpassas till det uppmätta inläckaget.

4.4 Vattenbalans

I tabell 7 presenteras inflöde och utflöde från modellen med och utan tunnel. Grundvattenbildningen och den konstanta grundvattennivån bidrog med samma mängd vatten till modellen oavsett om det var en tunnel i modellen eller ej. Tunneln i modellen gjorde att vattnet dränerades mindre genom dräneringen vid marknivån och att vattnet istället delvis dränerades genom tunneln.

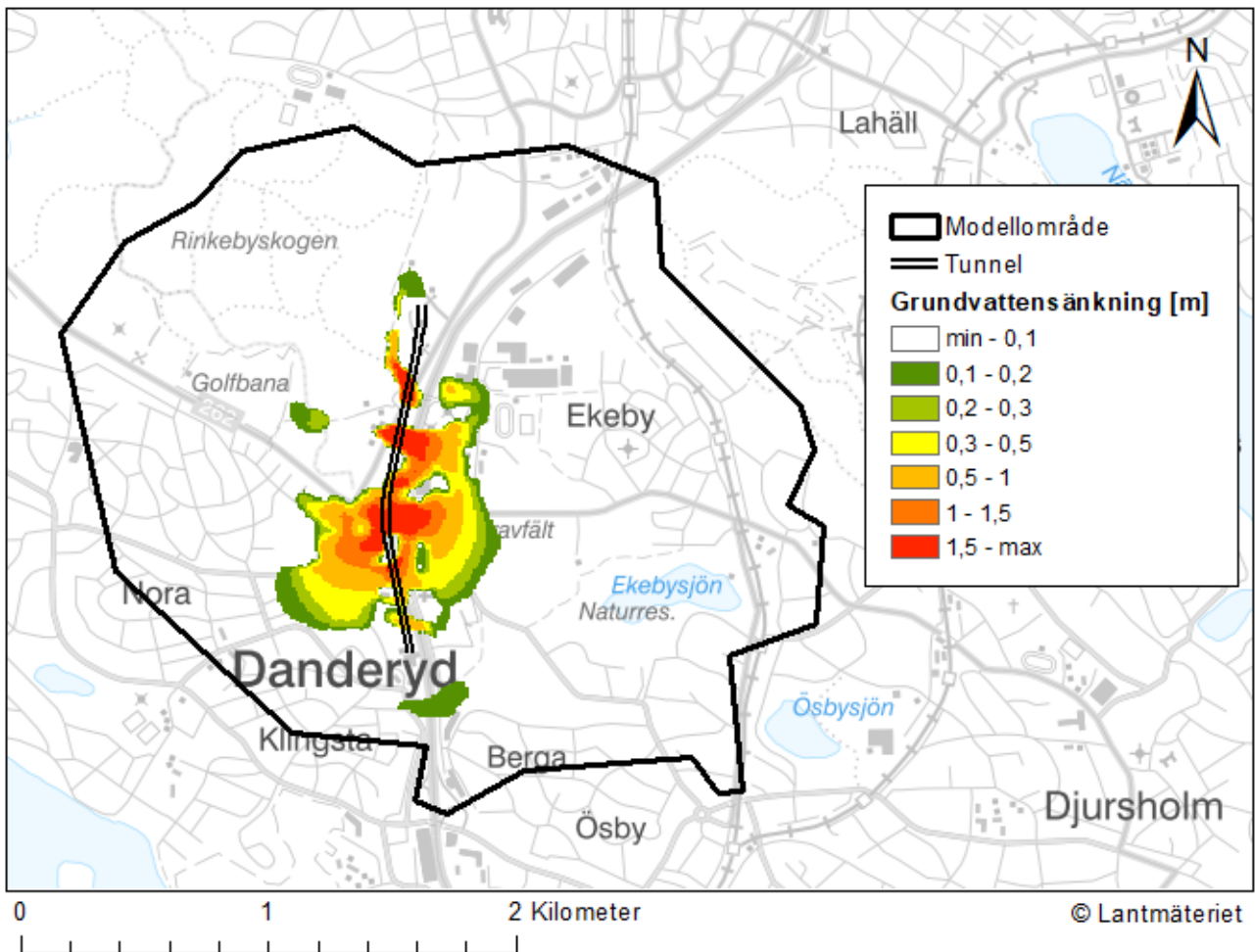
Tabell 7: Vattenbalansen i modellen med och utan tunnel.

		in [l/min]	ut [l/min]
Gäller för alla	Grundvattenbildning	1747	0
	Konstant grundvattennivå	194	9
Utan tunnel	Dränering	0	1932
Tunnel med inläckage A	Dränering	0	1814
	Tunnel	0	118
Tunnel med inläckage B	Dränering	0	1742
	Tunnel	0	189

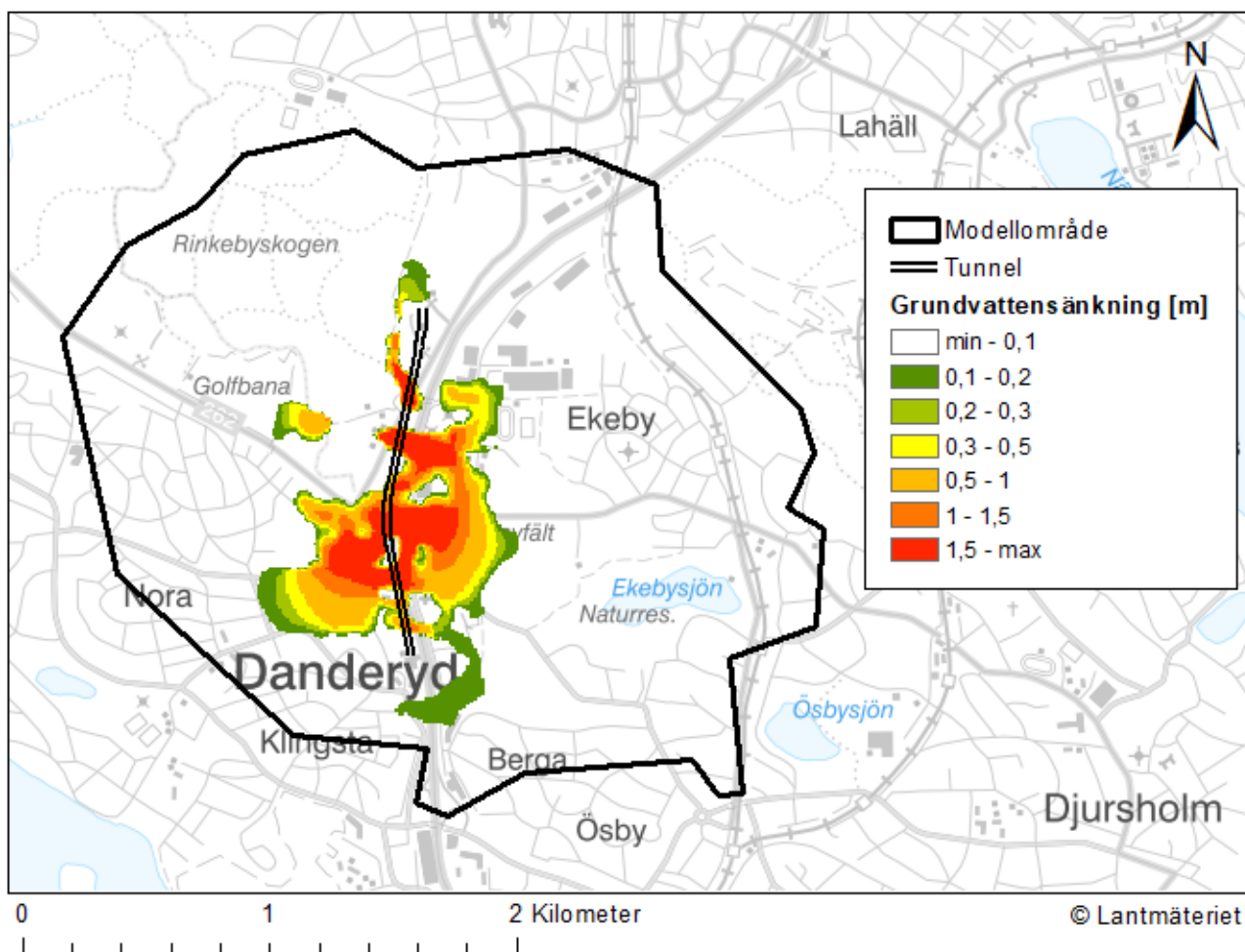
4.5 Grundvattensänkning

När tunnelns inläckage lades in i modellen sjönk grundvattennivån i moränen, se figur 16 och 17. I de områden där det var högst grundvattennivå över berget (se figur 15) sjönk

grundvattnivån som mest. Grundvattnet i moränen sjönk som mest ovanför de delar av tunneln som inte hade krosszoner i sig, medan i de delar där det fanns krosszoner sjönk grundvattnet istället över ett större område.

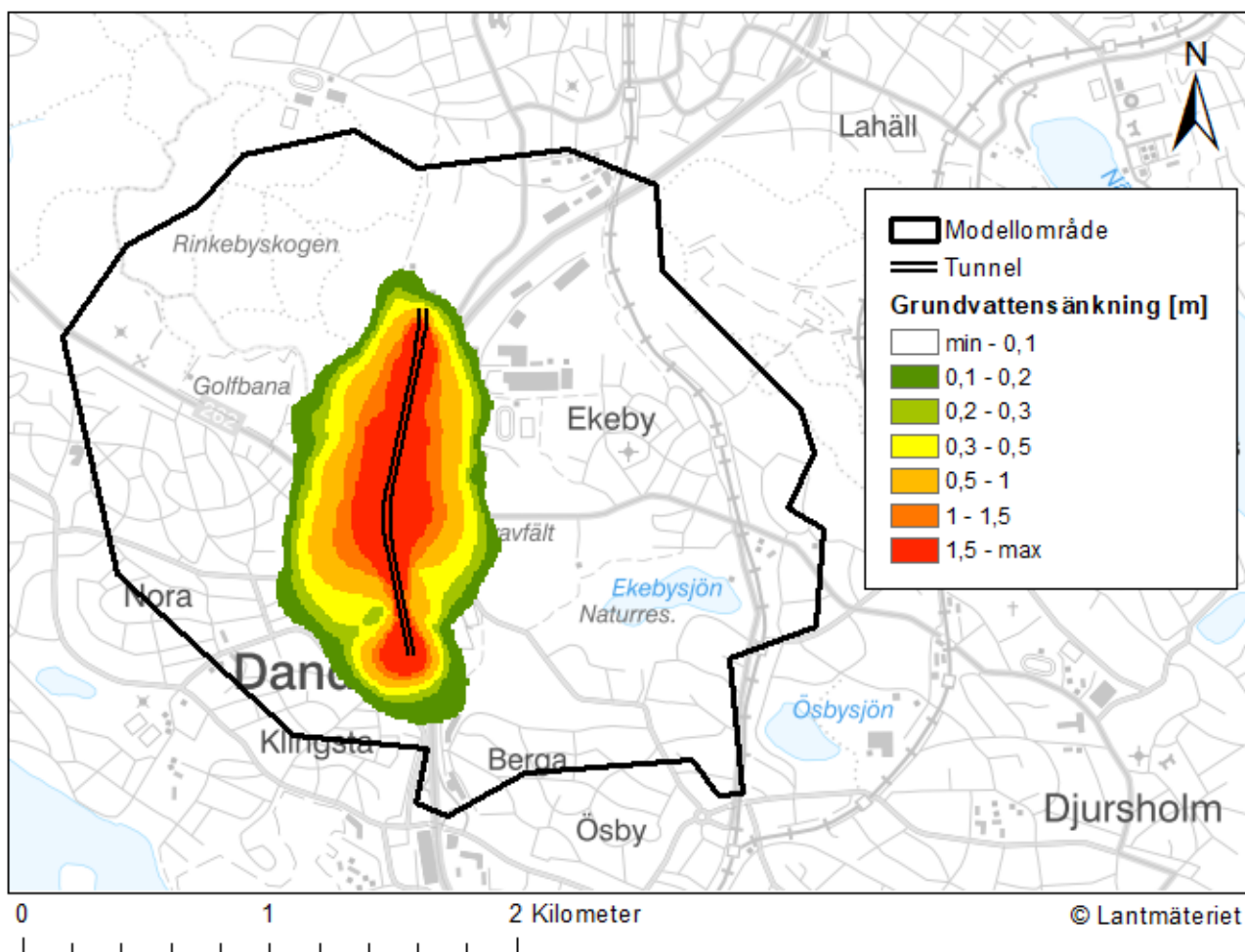


Figur 16: Grundvattensänkning i moränen vid inläckage A.

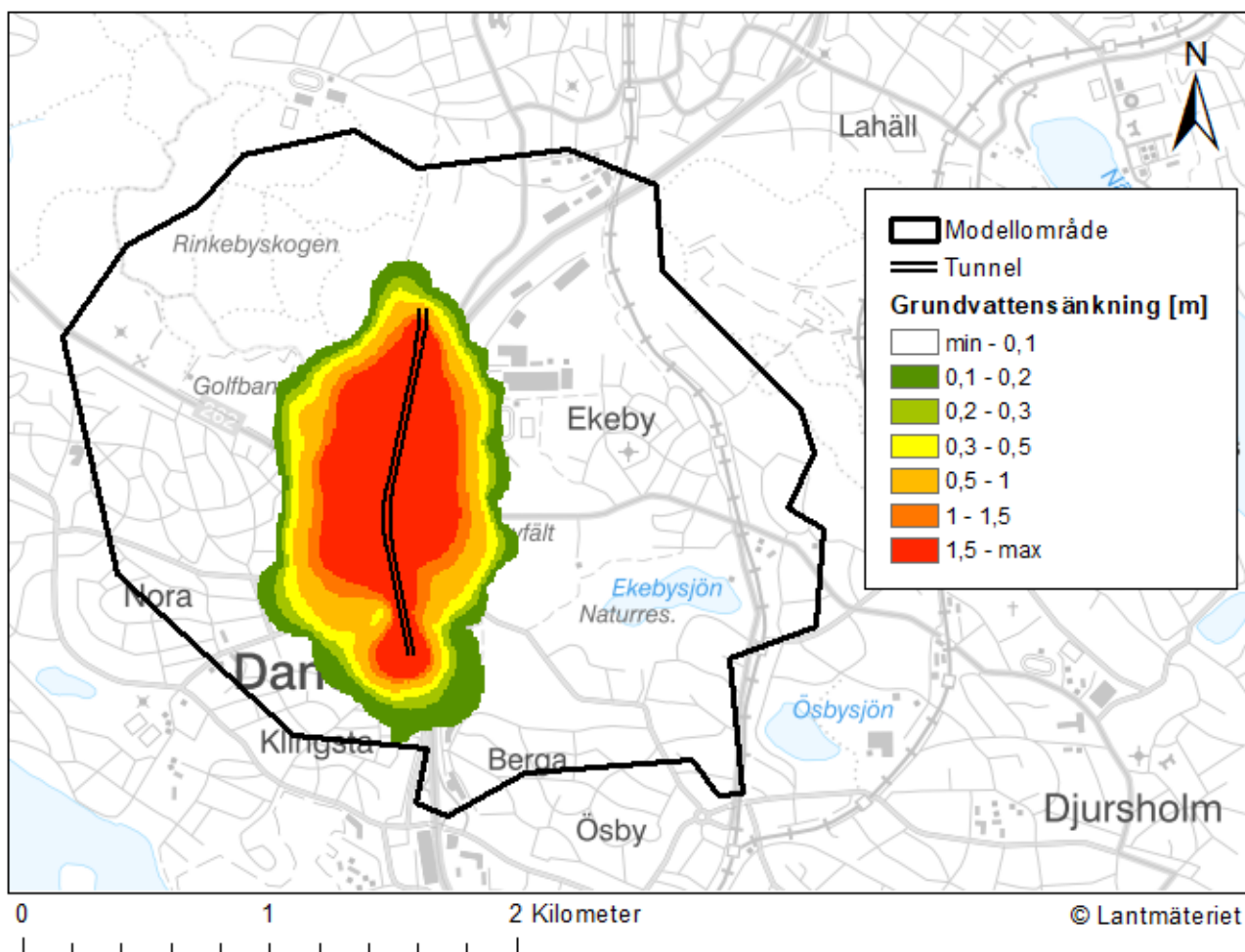


Figur 17: Grundvattensänkning i moränen vid inläckage B.

I berget på det djup som tunneln går har grundvattensänkning skett längs tunneln i större utsträckning, se figur 18 och 19. I den sista sektionen av tunneln har grundvattennivån sjunkit förhållandevis lite och på samma ställe ligger det flera krosszoner väldigt tätt i modellen, se figur 7. I övriga delar av tunneln ser grundvattensänkning i berget mer jämn ut.



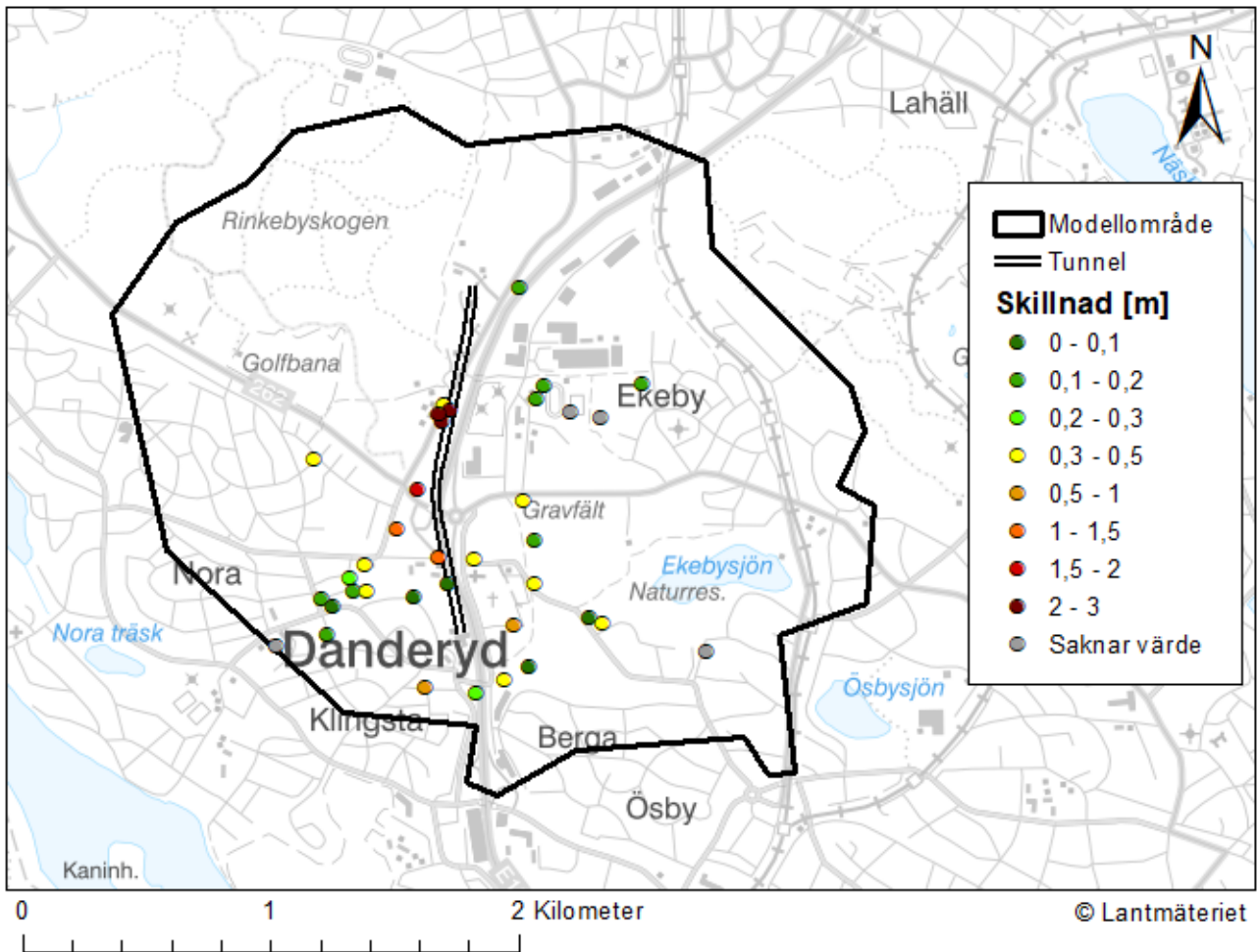
Figur 18: Grundvattensänkningen i berget på djupet 20 - 40 m med inläckage A.



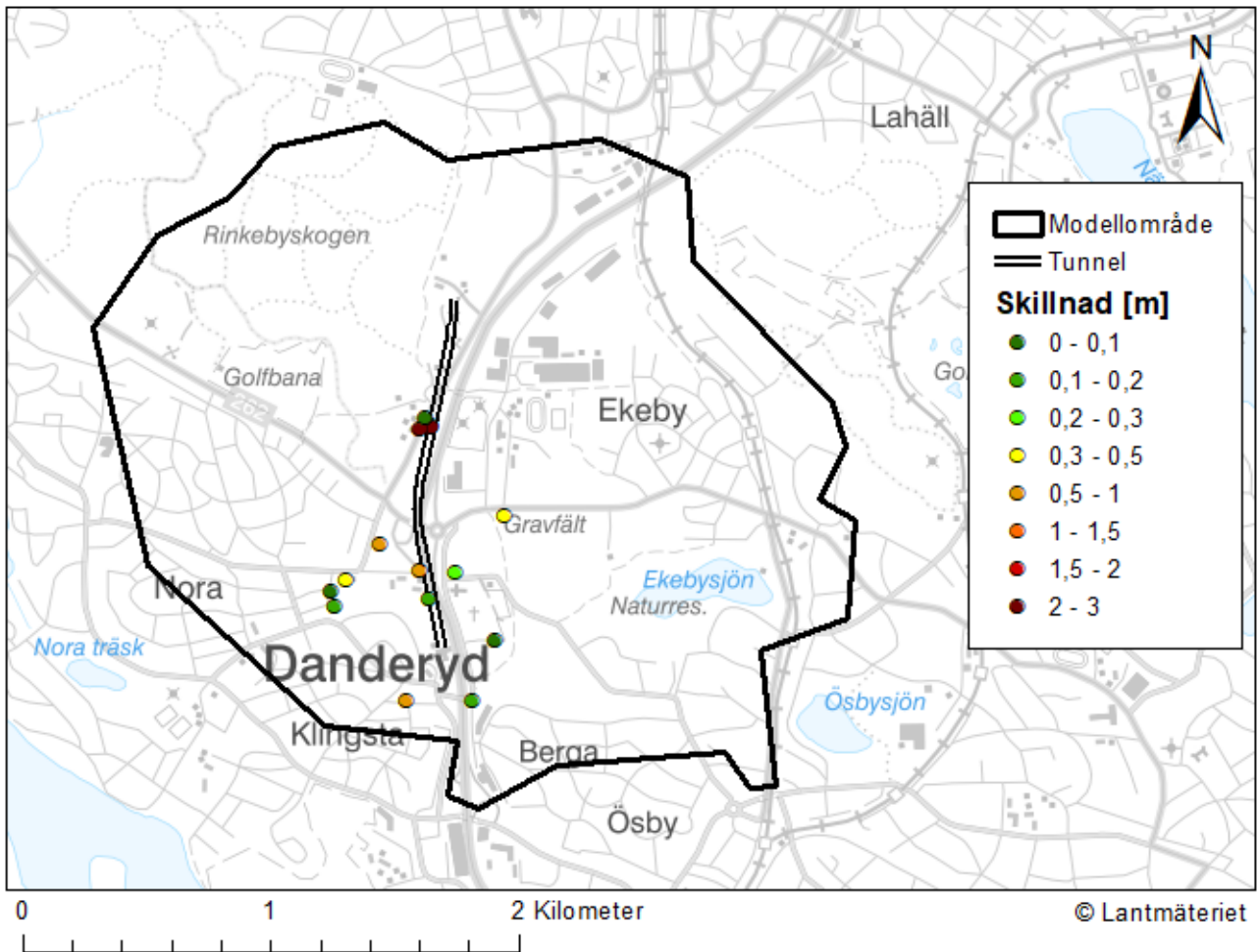
Figur 19: Grundvattensänkning i berget på djupet 20 - 40 m med inläckage B.

4.6 Validering av avsänkning

Skillnaden mellan de beräknade grundvattensänkningarna och modellerad grundvattensänkning med inläckage A presenteras i figur 20 och 21. Skillnaden mellan beräknade grundvattensänkning och modellerad grundvattensänkning är relativ mot storleken på avsänkning. Om skillnaden jämförs med avsänkning är det ett tydligt mönster att skillnaden är större där avsänkning är större, jämför figur 20 och 21 med 16 till 19. Intill de grundvattenrör som har det största felet, 2-3 m, har det dock skett skyddsinfiltation som hjälpt till att hålla grundvattennivån uppe. Endast tre av grundvattenrören modellerades med för liten avsänkning enligt jämförelsen med medianen av värden under våren. Och enligt avsänkning beräknad med samvariationsanalys var det inget rör som var modellerat med för lite avsänkning.



Figur 20: Skillnaden mellan modellerad avsänkning och avsänkningen när medianvärdet från våren år 2021 användes.



Figur 21: Skillnaden mellan modellerad avsänkning och avsänkningen beräknad med samvariationsanalys.

5 Diskussion

Nedan diskuteras resultatet och olika val som gjorts under arbetet.

5.1 Modellens utformning och egenskaper

5.1.1 Modellområdet

Modellområdet var inte exakt samma som avrinningsområdet. Vissa delar rationaliserades bort för att grundvattennivån ändå inte förväntades sjunka där och för att få en enklare modell. Den stora delen nedströms tunneln prioriterades bort för att den var just nedströms och långt från tunneln. Kanterna behövde vara förhållandevis raka för att cellstorleken vid modellområdets kant inte skulle bli för liten, vilket skulle lett till en mer beräkningstung modell. Det hade antagligen inte gjort någon större skillnad för resultatet om modellområdet hade varit exakt samma som avrinningsområdet.

5.1.2 Jord

För den noggranna jordmodellen som användes i närheten av tunneln borde osäkerheterna vara förhållandevis låga då det finns många borrhål som den bygger på. För den förenklade modellen som användes i kanten av modellen borde osäkerheten dels bero på SGU:s jorrdjupsmodell och hur många borrhål som finns i det aktuella området. Det borde även bero på hur väl antagandet om att jorden består av 70% lera och resten morän stämmer. De delar med den förenklade modellen borde dock inte haft en avgörande roll för resultatet då det inte finns några grundvattenrör i det området och inte heller någon modellerad grundvattensänkning. Den hydrauliska konduktiviteten i leran och moränen modellerades något högre än vad det genomsnittliga litteraturvärdet var. Det kan ha gjort att modellen inte stämmer överens med verkligheten. Lerans hydrauliska konduktivitet användes inte till kalibrering eftersom det var viktigt att den betedde sig som lera, men också eftersom grundvattennivån inte borde ligga i leran utan i moränen under leran. Därför borde en ändrad hydraulisk konduktivitet i leran inte påverkat modellen speciellt mycket. Den hydrauliska konduktiviteten i moränen var däremot viktig för kalibreringen och det var också där merparten av grundvattenrören mätte nivån. Den bästa passningen till grundvattenrören fick modellen då moränen hade en hydraulisk konduktivitet som motsvarade en grusig morän, det vill säga en ganska hög hydraulisk konduktivitet. Detta trots att moränen i området är mestadels sandig. Att den hydrauliska konduktiviteten modellerades förhållandevis högt kan bero på att moränlagret innehåller mer än bara sandig morän. Det kan även bero på att dräneringen i modellen inte förde bort tillräckligt mycket vatten tillräckligt snabbt.

5.1.3 Berg

Den förenklade bergmodellens osäkerheter berodde på felen i Lantmäteriets höjddata och SGU:s jorrdjupsmodell. Eftersom osäkerheten på lantmäteriets höjddata endast är några decimeter beror i stort sett hela osäkerheten på SGU:s jorrdjupsmodell. Men eftersom den förenklade bergmodellen bara användes i kanterna har den inte lika stor betydelse för modellen som den mer detaljerade bergmodellen hade. Då det knappt finns något vatten inom modellområdet där den detaljerade bergmodellen kunde haft betydande felaktigheter borde den detaljerade modellen stämma bra överens på de områden där den användes i modellen.

Att bergets olika lager fick samma topografi föll sig naturligt eftersom det antogs att den hydrauliska konduktivitetens avtagande endast berodde på djupet. I verkligheten beror givetvis den hydrauliska konduktiviteten på mer än bara djupet, men det hade behövts mer mätningar och mer tid för att skapa en sådan modell.

5.2 Val av kalibreringspunkter

Vattennivån i grundvattenrören innehåller vissa osäkerheter. Det var många värden som rensades bort innan medianvärdet för varje grundvattenrör beräknades. För vissa grundvattenrör resulterade det i att många värden från en specifik period på året rensades bort. Det kunde vara ett resultat av att grundvattenröret antingen hade många torrvärden på sommaren eller var översvämmad eller frusen på vintern. Vissa grundvattenrör där många värden plockades bort användes inte alls på grund av osäkerheterna. Medelvärden och medianen jämfördes för varje grundvattenrör och var oftast mycket lika varandra. Det borde innebära att variationen i grundvattennivån var förhållandevis låg.

5.3 Grundvattennivån i referensmodellen

Det var väntat att grundvattennivån i moränen till stor del följde topografin och att grundvattennivån över berget var hög där jordlagret var mäktigt. Det var dock oväntat att de höga grundvattennivåerna över berget i modellen inte låg på samma ställe som grundvattenmagasinen som tagits fram inom City Link-projektet. På delar av Ekebysjön var det knappt någon grundvattennivå över berget i modellen. Så är det inte i verkligheten eftersom det är en sjö. Anledningen till att modellen blir missvisande mot verkligheten borde vara att både jordmodellen och bergmodellen hade osäkerheter vid vatten. Det var även dränering under sjön vilket det inte kan vara i verkligheten. Dessa saker kan därför vara orsak till att grundvattennivån över berget vid Ekebysjön var låg i modellen.

Att avgöra riktningen på flödet var svårt då det var dränering i hela modellområdet. Dräneringen gjorde att vattnet inte behövde rinna mot den lägsta punkten i modellen för att komma ut ur den. När vattnet i modellen nådde dräneringen försvann det ur modellen. På ett sätt är det så dränering fungerar i verkligheten men dräneringen måste samtidigt rinna ut någonstans och rinner därför oftast med självfall mot den lägsta punkten. Det gjorde att det i modellen var flera mindre sänkor där grundvattnet i moränen rann mot mitten. Men det skulle kunna fungera ungefär så i verkligheten också om det skulle vara dränerat överallt.

5.4 Tunnelkalibrering

Tunneln kalibrerades till två olika uppmätta inläckage från vintern och våren 2021. Det blev en bra passning till inläckage A, men inte till det högre inläckage B. Det var en tydlig gräns som det inte gick att dränera mer än och därför läcker det in 9 l/min mindre i modellen än i verkligheten för fallet inläckage B. Det berodde antagligen på att konduktiviteten i berget runt de sektioner som det läckte in för lite i var för låg eller att det saknades svaghetszoner. Sprickzonerna togs medvetet inte med i modellen eftersom det generellt inte var någon större skillnad mellan deras vattenförande förmåga och den genomsnittliga för berget. Modellen hade antagligen blivit bättre om alla svaghetszoner beaktades på något sätt. Den modellerade grundvattensänkningen i området runt dessa sektioner av tunneln var antagligen för djup och lokal jämfört med verkligheten på grund av den för låga konduktiviteten.

Cellstorleken avgjorde hur stora zonerna för mätning av inläckage var och i vilka delar av modellen tunneln dränerade. Dräneringen var på en viss höjd i varje cell, men den var som ett lager och inte som en linje. Detta gjorde att den täckte hela cellen och inte tog hänsyn till tunnelns exakta form. Det gjorde att det finns ett litet fel i var inläckaget skedde, men det gör också att skillnaden i att lägga in inläckage B:s sista sektion som 15 m för lång är försumbart i sammanhanget.

5.5 Vattenbalansen

5.5.1 Grundvattenbildning

SMHI hade gjort många mätningar under många år och det borde givit en bra bild av det inkommande vattnet. Hur mycket vatten som infiltrerades finns det troligen större osäkerheter i. Osäkerheten i andelen vatten som infiltrerades i respektive underlag finns det inte mycket kunskap om. Men eftersom andelen vatten som infiltrerades i respektive

underlag var schablonvärden som WSP ofta använder är det troligen rimliga värden. Indelningen i naturmark och urban mark gick ganska enkelt. Desto svårare var det att inom den urbana marken dela in i de olika typerna av mark. Eftersom det främst var ett flygfoto som användes var det svårt att avgöra vad som var asfalt och vad som bara var en hårdgjort yta. Det fanns även många träd som skymde delar av marken vilket gjorde det ännu svårare att se vilken typ av mark det var. Generellt sattes vägarna till asfalt medan sådant som inte var naturmark i trädgårdarna sattes till hårdgjorda ytor. Byggnader var den enklaste typen att se på flygfoto och gick även i större utsträckning att dubbelkolla mot Lantmäteriets översiktskarta. Det hade varit möjligt att få ett mer exakt värde på andelen av nettonederbörden som infiltrerades om hela eller en större del av den urbana markens olika typer av mark hade räknats ut manuellt. Det hade dock också tagit längre tid.

Grundvattenbildningen från ledningsnätet beräknades på ett översiktligt sätt, vilket gjorde att det antagligen inte fick ett helt rättvisande värde. Det var dock ändå betydligt rimligare än att inte räkna med det alls. För att få ett mer rättvisande värde hade läckaget från ledningsnäten samt vattenanvändningen kunnat tagits fram specifikt för Danderyd, istället för generellt för hela Sverige. Grundvattenbildningen från vattenledningarna i modellen beräknades som ett medelvärde över hela Danderyds kommun, medan modellområdet bara täcker en mindre del. Andelen personer per yta kanske inte är densamma för hela Danderyd som för modellområdet, men utifrån datan borde det vara den bästa gissningen.

5.5.2 Dränering

Det enda sättet för vatten att lämna modellen var genom dränering. Det fanns inga synliga vattendrag ut ur modellområdet eftersom det gick i rör och kulvertar i verkligheten. Därför behövdes dräneringen. Sedan var det också ett rimligt antagande att det var dränering överallt i modellen då modellområdet var förhållandevist urbant.

5.6 Grundvattensänkning

Det var i stora drag väntat att grundvattensänkningen skulle se ut som den gjorde. Detta eftersom grundvattennivån sänktes där grundvattennivån över berget var som högst, där det fanns ett mäktigt jordlager och inte i berget. Det var även rimligt att grundvattennivån sjönk över ett större område där det lagts in krosszoner i modellen eftersom det var betydligt högre konduktivitet där. Osäkerheter i modellen som kan påverka grundvattensänkningen är dels den hydrauliska konduktiviteten i alla lager. Om konduktiviteten är generellt för låg är avsänkningen djupare och mer lokal. Om svaghetszoner längs tunneln saknas i modellen kan det också bidra till att grundvattensänkningen blir för djup och lokal, men då mest i de områden med de saknade svaghetszonerna. Eftersom det inte gick att återskapa inläckage B i modellen så är det troligt att det saknas svaghetszoner i vissa sektioner av tunneln.

Eftersom krosszonernas data kommer från och lades in i modellen som linjer kan det gjort att krosszonerna blev för smala eller för breda. Konduktiviten varierar antagligen mellan krosszonerna i verkligheten. I modellen gavs alla krosszoner samma värde, den hydraulisk konduktiviten var 10 gånger högre än omgivande berg och avtagandet av konduktiviteten var det samma som omgivande berg. Men det borde ändå varit det rimligaste antagandet när inte varje krosszon mätts individuellt. Även om tidigare studier inom projektet visat

att det knappt var någon skillnad i konduktiviteten mellan sprickzoner och det genomsnittliga berget borde de kanske tagits med. Modellen kan inte avspegla verklighetens inläckage B fullt ut och det beror troligen på saknade sprickzoner. Det hade antagligen varit bra att inkludera sprickzonerna i modellen.

Det användes två olika beräkningar för att försöka validera modellens resultat. Den beräkning av avsänkning som utfördes med hjälp av samvariationsanalys är antagligen mycket mer tillförlitlig än den som beräknades med hjälp av medianvärdet på grundvattennivån under våren år 2021. Detta eftersom grundvattennivån varierar över tid, både över året och mellan åren. Det var därför svårt att dra några slutsatser när det bara fanns värden från en säsong om det inte samtidigt tas hänsyn till dessa naturliga variationer av grundvattennivån. När medianvärdet på grundvattennivån från våren år 2021 jämfördes med grundvattennivåns medianvärde innan tunneln byggdes togs det inte hänsyn till de naturliga variationerna i grundvattennivå. Men eftersom samvariationsanalysen räknar ut vilken grundvattennivå det borde vara i ett grundvattenrör och det sedan jämförs med vilken grundvattennivå det faktiskt är i grundvattenröret tar den metoden hänsyn till den naturliga variationen av grundvattennivån. Samvariationsanalysen är dock inte beräknad för lika många grundvattenrör som medianvärdets jämförelsen är, men de båda jämförelserna följer ungefär samma mönster. Det kan därför vara intressant att kolla på de grundvattenrör som inte finns med i samvariationsanalysen i den beräkningen som gjordes med medianvärden istället. En annan osäkerhet med de beräknade avsänkningarna är att det tar tid för grundvattennivån att sjunka till sin nya jämvikt vilket är det som grundvattennivån modellerats för. Grundvattennivån i modellområdet kanske fortfarande sjunker i verkligheten och det skulle kunna leda till att grundvattennivån i området inte är i jämvikt än.

När avsänkning i modellen jämfördes med den avsänkning som beräknats med samvariationsanalys och den som beräknats med medianvärdet för grundvattennivån under våren 2021 visade det att modellen inte var helt tillförlitlig. Där skillnaden var som störst mellan den modellerade och de två olika beräknade avsänkningarna berodde det antagligen på att det skett skyddsinfiltration intill grundvattenrören vilket inte var inkluderat i modellen. Därför borde det inte läggas stor vikt vid just de grundvattenrören. Ett generellt mönster var att skillnaden mellan den modellerade avsänkning och de två beräknade avsänkningarna var som störst där avsänkning var som störst. Det beror antagligen på att när avsänkning stor finns det en större möjlighet till en skillnad mellan modellerad och de två beräknade avsänkningarna. Skillnaden kan bero på att modellen har för låg konduktivitet eller för lite svaghetszoner som gör att grundvattnet inte sjunker mer jämnt. Samtidigt är avsänkning modellerad för högt i nästan alla grundvattenrör när skillnaden mellan den modellerade avsänkning och de beräknade avsänkningarna jämförs. Det talar dels för att den hydrauliska konduktiviteten i jord och berg är för låg eller att svaghetszoner saknas. För om avsänkning sprids ut mer blir den generellt mindre närmre tunneln och högre längre ifrån. Det kommer göra att grundvattenrör nära tunneln får en mindre skillnad mellan modellerad avsänkning och de beräknade avsänkningarna. Om det sker kommer dock de rör som är i utkanten av området där avsänkning skett få större avsänkning och det stämmer inte heller.

5.7 Jämförelse av metoder

I det här arbetet var det mest intressanta var grundvattensänkningen skedde och hur stor den var. När analytiska ekvationer används måste det göras stora förenklingar. Det gör att det inte är möjligt att få en lika detaljerad bild av grundvattensänkningen som när en numerisk modell likt den i detta arbete används. Det som är fördelarna med analytiska ekvationer är att de inte alltid kräver lika mycket data och är därför ett billigare och snabbare sätt att beräkna på. Däremot skulle det med en analytisk ekvation exempelvis vara mycket svårt att förutse i vilken lersvacka grundvattennivån kommer sjunka. Detta eftersom en analytisk ekvation förutsätter förhållandevis homogen konduktivitet och en jämn markyta.

5.8 Viktiga parametrar

I modellen sjönk grundvattennivån i moränen som mest där det var en hög grundvattennivå över berget, vilket är rimligt då det var där det fanns mycket vatten att dränera. Därför borde det vara viktigt att genom fältarbete ta reda var grundvattenmagasinen är. Grundvattenmagasinen ligger oftast i mäktiga jordlager och det bör därför vara viktigt att lokalisera dessa jordlager.

Den generella hydrauliska konduktiviteten är viktig för att bestämma hur stort område som grundvattnet kommer sjunka över. Det kan dock vara ännu viktigare att veta var specifika svaghetszoner i berget går. Eftersom det i modellen i stor grad var svaghetszoner i form av krosszonerna som avgjorde hur långt från tunneln delar av moränen dränerades. Med detta resonemang var det inte speciellt viktigt att modellen var rättvisande vid platser som Ekebysjön eftersom den ligger en bit från tunneln och har inte någon svaghetszon som direkt förbinder den och tunneln. Det var också tydligt att det var tunnelsektionerna utan modellerade krosszoner som inte kunde efterlikna verkligheten. Därför bör det vara viktigt att ta hänsyn till alla svaghetszoner inte bara krosszonerna.

Grundvattenbildningen borde inte varit en av de viktigare parametrarna i modellen då mycket vatten dränerades ganska ytligt. Den ytliga dräneringens dimensionering är något som antagligen inte heller var speciellt viktigt för modellen. Det viktiga var att den fanns där och dränerade till ungefär det djupet den var på för att ge vattnet en rimlig väg ut ur modellen. Storleken på inläckaget till tunneln gjorde däremot en stor skillnad för hur stor grundvattensänkningen var. Det borde även gjort skillnad var längs tunneln inläckaget skedde.

6 Slutsats

Fältundersökningar är alltid viktiga i någon mån och det behövs i större utsträckning desto mer avancerad en modell ska vara. Analytiska ekvationer kan vara bra för att få en första förståelse för ett problem medan mer avancerade modeller behöver användas när grundvattensänkningar i specifika områden ska förutsägas.

Alla parametrar har ett värde, men i det här arbetet var bedömningen att det nog i första hand är geologiska förutsättningar på en större skala som är viktigast. Detta i form av var mäktiga jordlager ligger samt den hydrauliska konduktiviteten och svaghetszonerna i berget.

Det som antagligen är mest avgörande för att grundvattennivån runt City Link-tunneln sjunker över ett stort område är svaghetszonerna i berget. Utbredningen av grundvattensänkningen kan även vara något större än vad modellen visar eftersom sprickzonerna inte är med.

Referenser

- Andersson, Per och A Sellner (2000). *Tätning av bergtunnlar – förutsättningar, bedömningsgrunder och strategi vid planering och utformning av tätningsinsatser*. Tekn. rapport, s. 96. URL: https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/10421/RelatedFiles/2000_101_tatning_av_bergtunnlar.pdf.
- Erlström, Mikael m. fl. (2016). *Geologisk information för geoenergianläggningar – en översikt [Geological information for shallow geothermal energy plants - an overview]*. Tekn. rapport september, s. 56. URL: <http://resource.sgu.se/produkter/sgurapp/s1616-rapport.pdf>.
- Font-Capó, Jordi m. fl. (2011). "Groundwater inflow prediction in urban tunneling with a tunnel boring machine (TBM)". I: *Engineering Geology* 121.1-2, s. 46–54. ISSN: 00137952. DOI: [10.1016/j.enggeo.2011.04.012](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.04.012). URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.04.012>.
- Freeze, R Allan och John A Cherry (1979). *Groundwater*. Englewood Cliffs: Prentice Hall. ISBN: 9780133653120;0133653129; URL: <https://tinyurl.com/y7msvb5c>.
- Gokdemir, Cagri m. fl. (nov. 2019). "Vulnerability analysis method of vegetation due to groundwater table drawdown induced by tunnel drainage". I: *Advances in Water Resources* 133, s. 103406. ISSN: 03091708. DOI: [10.1016/j.adwatres.2019.103406](https://doi.org/10.1016/j.adwatres.2019.103406).
- Grip, Harald och Allan Rodhe (2000). *Vattnets väg från regn till bäck*. 3., rev. u. Uppsala: Hallgren & Fallgren. ISBN: 9173827622;9789173827621; URL: <https://tinyurl.com/yb91sxa5>.
- Gustafson, Gunnar (2009). *Hydrogeologi för bergbyggare*. Swedish. Vol. 2009:2. Stockholm: Formas. ISBN: 915406029X;9789154060290; URL: <https://tinyurl.com/yclmn82s>.
- Harbaugh, Arlen W. (2005). *MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—the Ground-Water Flow Process*. Tekn. rapport. Reston, Virginia, USA: U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. DOI: [10.3133/tm6A16](https://doi.org/10.3133/tm6A16).
- Knutsson, Gert och Carl-Olof Morfeldt (1993). *Grundvatten: teori & tillämpning*. Stockholm: Svensk byggtjänst. ISBN: 9173326461;9789173326469; URL: <https://tinyurl.com/y6wrcut>.
- Kværner, Jens och Petter Snilsberg (juni 2011). "Groundwater hydrology of boreal peatlands above a bedrock tunnel - Drainage impacts and surface water groundwater interactions". I: *Journal of Hydrology* 403.3-4, s. 278–291. ISSN: 00221694. DOI: [10.1016/j.jhydro.2011.04.006](https://doi.org/10.1016/j.jhydro.2011.04.006).
- Lantmäteriet (2013). *Gsd-Höjddata, Grid 2+*. Tekn. rapport 16, s. 1–16. URL: https://www.lantmateriet.se/globalassets/kartor-och-geografisk-information/hojddata/hojd2_plus_2.8.pdf.
- Larsson, Rolf (2008). *Jords egenskaper*. Tekn. rapport 5, s. 62. URL: <https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i1.pdf>.
- Leander, Magnus (2015). *City Link etapp 2 Teknisk beskrivning*. Tekn. rapport.
- Panday, Sorab m. fl. (2013). *MODFLOW – USG Version 1: An Unstructured Grid Version of MODFLOW for Simulating Groundwater Flow and Tightly Coupled Processes Using a Control Volume Finite-Difference Formulation*. Tekn. rapport Techniques and Methods 6-A45, s. 66.
- Ryd, Ellinor (2017). *Samband mellan kapacitet vid borrning och transmissivitet i kristallint och sedimentärt berg*. Tekn. rapport September. Uppsala: Uppsala universitet. URL: http://www.w-program.nu/filer/exjobb/ellinor_ryd.pdf.

- SCB (2021a). *Folkmängd i riket, län och kommuner 31 december 2020 och befolkningsförändringar 2020*. URL: <https://www.scb.se/hitta-statistik/statistik-efter-amne/befolkning/befolkningens-sammansattning/befolkningsstatistik/pong/tabell-och-diagram/helarsstatistik--kommun-lan-och-rikt/folkmangd-i-rikt-lan-och-kommuner-31-december-2020-och-befolkningsforandrin>.
- (2021b). *Kvadratkilometer efter region, arealtyp och år. PxWeb*. URL: http://www.statistikdatabasen.scb.se/pxweb/sv/ssd/START_MI_MI0802/Areal2012N/table/tableViewLayout1/.
- SGU (2017). *Produktbeskrivning jorddjupsmodell*. Tekn. rapport. URL: <http://resource.sgu.se/produkter/sgurapp/s1414-rapport.pdf>.
- SKB (2006). *Storregional grundvattenmodellering – fördjupad analys av flödesförhållanden i östra Småland, Jämförelse av olika konceptuella beskrivningar, rapport R-06-64*. Tekn. rapport. Svensk kärnbränslehantering AB.
- SMHI och Havs- och vattenmyndigheten (2021). *Modelldata per område*. URL: <https://vattenwebb.smhi.se/modelarea/>.
- Sundell, Jonas och Lars Rosén (2016). *City-Link Stockholm ; an integrated hydrogeological and geotechnical risk assessment*. Tekn. rapport. URL: https://www.researchgate.net/publication/299603928_City-Link_Stockholm_an_integrated_hydrogeological_and_geotechnical_risk_assessment.
- Sundkvist, Ulf (2015). *City Link etapp 2 - PM Hydrogeologi - Underlag för tillståndsprovning enligt miljöbalken*. Tekn. rapport. URL: <https://www.svk.se/siteassets/2.utveckling-av-kraftsystemet/transmissionsnatet/utbyggnadsprojekt/stockholmsstrom/dokument/anneberg-skanstull/ansokan-till-mark--och-miljodomstolen/bilaga-5-pm-hydrogeologi.pdf>.
- Svenska kraftnät (2020). *Nu är Elektra redo för borrhstart*. URL: <https://www.svk.se/press-och-nyheter/nyheter/allmanna-nyheter/2020/nu-ar-elektra-redo-for-borrhstart/>.
- Svenskt Vatten (2019). *Fakta om utläckage av dricksvatten i ledningsnätet - Svenskt Vatten*. URL: <https://www.svensktvatten.se/vattentjanster/rornat-och-klimat/fakta-om-utlackage/>.
- Trafikverket (2019). *Så bygger vi tunnelarna*. URL: <https://www.trafikverket.se/naradig/Stockholm/vi-bygger-och-forbattrar/Forbifart-stockholm/Tunnlar/Sa-bygger-vi-tunnelarna>.
- Waterloo Hydrogeologic (n.d.). *Visual MODFLOW Flex 7.0*. URL: <https://www.waterloohydrogeologic.com/help/vmod-flex>.
- Wladis, David och Maria Erlandsson (2015). *City Link etapp 2 PM Hydrogeologiska förhållanden i berg Underlag för tillståndsprovning enligt miljöbalken*. Tekn. rapport.