



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W 18010

Examensarbete 30 hp
September 2018

Tvådimensionell grundvatten- modellering av påverkansområdet inför tunnelkonstruktion i Glömstadalen

Emelie Johansson

REFERAT

Tvådimensionell grundvattenmodellering av påverkansområdet inför tunnelkonstruktion i Glömstadalen

Emelie Johansson

Vid konstruktion av tunnlar i berg uppstår i regel alltid ett inläckage av grundvatten. Beroende på hur de hydrauliska egenskaperna hos berget och omgivande jordar ser ut kan inläckaget leda till att grundvattenytan ovanför tunnellinjen avsänks, med potentiella konsekvenser för bland annat närliggande brunnsanläggningar och grundvattenberoende naturområden. Bortledning av inläckande grundvatten utgör enligt miljöbalken vattenverksamhet innebärandes att tillstånd måste sökas av mark och miljödomstolen. I tillståndsansökan presenterar verksamhetsutövaren ett påverkansområde för grundvatten, som avgränsar det område där grundvattennivåerna kan komma att förändras till följd av planerad verksamhet. Påverkansområdet har i detta arbete definierats som det område där grundvattennivån avsänks mer än fem centimeter.

Som en del av projektet Tvärförbindelse Södertörn i södra Stockholm planerar Trafikverket för anläggandet av en bergtunnel intill Glömstadalen i Huddinge kommun. Syftet med detta examensarbete var att undersöka utbredningen av tunnelns påverkansområde genom tillämpande av tvådimensionell grundvattenmodellering. Utifrån en tvärsektion som upprättades ortogonalt mot tunneln och studerande av de hydrogeologiska förhållandena i området skapades en platsspecifik tvådimensionell modell i programmet SEEP/W. Steady-state-modellering för både omättad och mättad grundvattenströmning genomfördes därefter dels utan och dels med tunnel. Genom detta kunde grundvattennivåns förändring till följd av anläggningen studeras. Eftersom uppbyggnaden av modellen inbegrep förenklingar och antaganden om de platsspecifika förhållandena utfördes också en enklare känslighetsanalys där ett antal modellparametrar förändrades i syfte att undersöka påverkansområdets förändring.

Resultaten från modelleringarna visade att påverkansområdet för en vältätad tunnel, som störst sträcker sig 680 meter åt norr och 840 meter åt söder längs den tvärsektion som studerats. Som minst observerades ett påverkansområde med utbredningen 400 meter norr och 560 meter söder om tunneln. Skillnader i påverkansområdets utbredning noterades beroende på hur utflödet av grundvatten från Glömstadalen representerades och vilken tätning som användes runt tunneln. Vidare visade modelleringen att den hydrauliska konduktiviteten i berget har stor betydelse för grundvattenytans läge varför det anses relevant att utföra hydrauliska tester i berget för att öka modellens tillförlitlighet.

Nyckelord: Grundvattenmodellering, tvådimensionell modellering, bergtunnlar, påverkansområde, SEEP/W

ABSTRACT

Two-dimensional groundwater modelling of the influence area ahead of tunnel construction in Glömstadalen

Emelie Johansson

When building tunnels in rock, an inflow of groundwater is likely induced. Depending on the hydraulic properties of the rock and the surrounding soils, the inflow may cause a decline in the groundwater level above the tunnel line with possible consequences for nearby well facilities or groundwater dependent environments. Discharge of the inflowing groundwater represents an operation of water (vattenverksamhet in Swedish) according to the Swedish environmental law, meaning that permission must be applied for at the Environmental Court. In the application, the operator presents an area of influence for groundwater, which defines the area where the groundwater levels could change due to the planned operation. In this work, the area of influence has been defined as the area where the groundwater level is lowered by more than five centimeters.

As part of the project Tvärförbindelse Södertörn in southern Stockholm, the Swedish Transport Administration is planning for the construction of a tunnel in rock adjacent to Glömstadalen in Huddinge municipality. The aim of this master thesis was to investigate the extension of the area of influence of the tunnel through two-dimensional groundwater modelling. A site-specific model was created in the program SEEP/W by establishing a cross-section orthogonal to the tunnel and through examination of the hydrogeological conditions in the area. Steady-state modelling of both unsaturated and saturated flow was then carried out including and excluding the tunnel. Through this, the change in groundwater levels due to the tunnel could be reviewed. Since the development of the model required simplifications and assumptions of the site-specific conditions, a simple sensitivity analysis was also performed where a few model parameters were altered to examine how the area of influence changed.

The modelling results showed that the tunnel, when sealed suitably, at most changed the groundwater levels 680 meters north and 840 meters south along the studied cross-section. The smallest effect on the groundwater levels was observed 400 meters north and 560 meters south of the tunnel. Differences in the extension of the area of influence were noticed depending on how the outflow of groundwater in Glömstadalen was represented, and which sealing properties around the tunnel were used. Furthermore, the modelling showed that the hydraulic conductivity of the rock is of major importance for the location of the groundwater table, and therefore it is considered relevant to perform hydraulic tests in the rock to increase the reliability of the model.

Keywords: Groundwater modelling, two-dimensional modelling, tunnels in rock, influence area, SEEP/W

Department of Earth Sciences, Uppsala University. Villavägen 16, SE-752 36 Uppsala, Sverige.

ISSN 1401-5765.

FÖRORD

Detta examensarbete omfattar 30 högskolepoäng och avslutar mina studier på Civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet och Sveriges lantbruksuniversitet. Arbetet har utförts i samarbete med Tyréns under handledning av Mattias Fredin. Ämnesgranskare har varit Auli Niemi och examinator har varit Fritjof Fagerlund, båda vid Institutionen för Geovetenskaper vid Uppsala Universitet.

Arbetet har utförts som en del i Trafikverkets projekt Tvärförbindelse Södertörn och ska tjäna som underlag för vidare modellering och bestämning av påverkansområdet kring Glömstatunneln. Jag vill först och främst rikta ett stort tack till Mattias Fredin och Björn Lehr på Tyréns som gjort mitt deltagande i projektet möjligt och som både bidragit med stor hjälp och försett mig med all nödvändig information. Dessutom vill jag tacka Carl Skult och Jeffrey Lewis, från Tyréns region Syd respektive Nord, som ställt upp på Skype- och telefonsamtal för att hjälpa mig med modelleringen. Tack också till min ämnesgranskare Auli Niemi som gett mig värdefulla tips och råd.

Jag vill även tacka avdelningen Mark och Vatten på Tyréns i Stockholm som fick mig att känna mig som hemma på kontoret och som gjorde att hösten flög förbi. Till sist vill jag rikta ett stort tack till familj och vänner som varit ett ovärderligt stöd under examensarbetet och hela min studietid.

Emelie Johansson

Uppsala, januari 2018

Copyright © Emelie Johansson och Institutionen för geovetenskaper,
Luft- vatten- och landskapslära, Uppsala universitet.

UPTEC W 18 010, ISSN 1401-5765

Publicerad digitalt vid Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet, Uppsala, 2018.

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Emelie Johansson

När tunnlar för exempelvis väg och järnväg byggs under marken i berg kan grundvatten ofta ses läcka in längs tunnelväggen. Grundvattnet kommer från det omkringliggande berget och transporteras i dess sprickor. Vanligtvis innebär fler och bredare sprickor att mer grundvatten läcker in och inflödet kan leda till att grundvattenytan ovanför och omkring tunneln sjunker. Lägre grundvattennivåer ses naturligt under sommarmånaderna, och förknippas då ofta med sinande brunnar, men nivåerna stiger igen under mer nederbördsrika delar på året. De lägre grundvattennivåerna till följd av tunneln är istället bestående även om årstidsvariationer normalt fortfarande ses. Lägre grundvattennivåer kan bland annat innebära att mängden vatten i brunnar minskar, att bergvärmeanläggningar inte fungerar som de ska eller att sättningar i lera uppstår. Lägre grundvattennivåer kan också påverka naturen genom att exempelvis våtmarker eller mindre bäckar torkas ut.

Enligt svensk miljölagstiftning måste tillstånd sökas om det inläckande grundvattnet ska pumpas bort från tunneln. När ett sådant tillstånd söks krävs att tunnelns påverkan på grundvattnet har undersökts. Vid undersökningen studeras egenskaperna hos marken ovanför och berget runtomkring tunneln. Även de naturliga grundvattennivåerna i området betraktas, vilket vidare ger information om vart grundvattnet rinner. Utifrån denna information analyseras vad som kan hända när tunneln byggs, vilket ofta görs genom modellering eftersom problemet är komplext. Det område där grundvattenytan bedöms kunna sjunka på grund av tunneln kallas påverkansområdet.

I södra Stockholm pågår just nu planeringen för en ny sträckning av väg 259 under namnet Tvärförbindelse Södertörn. När vägen passerar intill Glömstadalen i Huddinge kommun är tanken att den ska gå i en tunnel genom berget. Eftersom att grundvatten antagligen kommer att läcka in och ledas bort från tunneln har syftet med detta examensarbete varit att undersöka tunnelns påverkan på grundvattennivåer i området. Undersökningen gjordes genom att skapa en platsspecifik grundvattenmodell i två dimensioner för området. Modellen utformades i programmet SEEP/W. Att bara två dimensioner användes innebär att tunneln och marken studerades i genomskärning längs ett tvärsnitt som korsade tunneln. Praktiskt innebär detta att grundvatten i modellen endast kunde flöda i två riktningar, antingen upp och ned i marken eller längs med tvärsnittet.

För att modellen skulle ge en så riktig bild av verkligheten som möjligt studerades markens och bergets egenskaper samt grundvattennivåerna i området. Eftersom de verkliga förhållandena dock är mycket komplexa innebär uppbyggnaden av modellen att en del förenklingar och antaganden gjordes. Då inläckande grundvatten till tunnlar är ett känt problem tätas vanligtvis berget runt tunneln, vilket också togs hänsyn till i modellen.

För att kunna undersöka tunnelns påverkan på grundvattennivåerna gjordes två identiska modeller, men den ena utan tunnel och den andra med. I modellen utan tunnel erhöles det som skulle motsvara de naturliga grundvattennivåerna i området medan modellen med tunnel gav de sänkta grundvattennivåerna som förväntas på grund av inläckaget. Genom att jämföra grundvatten-nivåerna i de två modellerna kunde tunnelns påverkansområde bestämmas. Ett antal modelleringar gjordes också för att se hur förenklingarna och antagandena som gjorts

påverkar resultatet. Då testades istället andra antaganden och parametrar som också skulle kunna vara tänkbara.

Resultaten visade att grundvattennivåerna som mest antas påverkas 680 meter norr och 840 meter söder om tunneln. Detta gällde när tunneln tätats på ett lämpligt sätt. Det minsta område som påverkas enligt modelleringen var från 400 meter norr om till 560 meter söder om tunneln. Påverkansområdets storlek varierade beroende på vilket antagande som gjordes kring utflödet av grundvatten i modellen. Utbredningen varierade också när egenskaperna hos tätningen kring tunneln varierades, där en sämre tätning gav större påverkan på grundvattnet än en bättre tätning.

Modelleringen visade även att bergets vattenledningsförmåga, som beskriver hur lätt berget leder vatten, hade stor betydelse för grundvattenytans läge både i modellen med tunnel och i modellen utan. Därför anses det relevant att utföra tester i det verkliga berget så att detta värde kan anges med större noggrannhet i modellen. Detta skulle öka modellens tillförlitlighet.

Den platsspecifika modell som skapats kommer att kunna byggas vidare på inom projektet Tvärförbindelse Södertörn för att ta fram ett fullständigt påverkansområde för tunneln. De resultat som erhållits kommer att kunna tjäna som underlag för fortsatta undersökningar i området.

Innehållsförteckning

Referat	i
Abstract	ii
Förord	iii
Populärvetenskaplig sammanfattning	iv
1. Inledning	1
1.1 Syfte	2
1.2 Avgränsningar	2
2. Teori och processer	2
2.1 Grundläggande hydrologiska principer	2
2.1.1 Vattnets förekomst i jord och berg	2
2.1.2 Hydraulisk konduktivitet	4
2.1.3 Mättad strömning	5
2.1.4 Omättad strömning	6
2.1.5 Topografins betydelse	7
2.1.6 Avrinningsområden och vattendelare	8
2.1.7 Grundvattenbildning	8
2.2 Grundvatten och tunnlar	9
2.2.1 Grundvattenströmning kring en tunnel i berg	9
2.2.2 Tunneltätning	9
2.3 Grundläggande principer för grundvattenmodellering	10
2.3.1 Stationär och transient modellering	11
2.3.2 Den grundläggande ekvationen	11
2.3.3 Tvådimensionell modellering	11
2.3.4 Randvillkor	12
2.3.5 Kontinuum- eller diskontinuummodell	12
2.3.6 Diskretisering av modelldomänen	12
2.3.7 Modellering av tunnlar	13
2.3.8 Kalibrering och validering	13
2.3.9 Osäkerheter vid modellering	14
2.4 Numerisk modellering i SEEP/W	14
3. Områdesbeskrivning	15
3.1 Planerade dimensioner	15
3.2 Topografi	16
3.3 Geologiska förhållanden	16
3.3.1 Jord	17
3.3.2 Berg	18
3.4 Hydrogeologiska förhållanden	19
3.5 Hydrologiska förhållanden	21
3.6 Andra vattenintressen i området	22
4. Metodik för modellering av tunnelns påverkan	23
4.1 Konceptuell modell	23
4.2 Bearbetning av data och framtagande av tvärsektion	25
4.3 Allmän metodik vid modellering i SEEP/W	26

4.3.1	Domän och materialegenskaper	27
4.3.2	Randvillkor.....	28
4.3.3	Övriga moment.....	28
4.4	Testmodelleringar.....	29
4.4.1	Tunnelexempel	29
4.4.2	Konceptuell modell för Glömstadalen.....	30
4.5	Modellering av Glömstatunneln	31
4.5.1	Uppbyggnad av modelldomänen	31
4.5.2	Materialegenskaper.....	32
4.5.3	Randvillkor.....	33
4.5.4	Modellering av opåverkade förhållanden	34
4.5.5	Modellering av tunnelpåverkan	35
4.5.6	Modellering med förändrade modellantaganden	35
5.	Resultat	36
5.1	Testmodelleringar.....	36
5.1.1	Tunnelexempel	36
5.1.2	Konceptuell modell för Glömstadalen.....	38
5.2	Modellering av Glömstatunneln	39
5.2.1	Modellering av opåverkade förhållanden	39
5.2.2	Modellering av tunnelpåverkan	40
5.2.3	Modellering med förändrade modellantaganden	41
6.	Diskussion	45
6.1	Testmodelleringar.....	45
6.1.1	Tunnelexempel	45
6.1.2	Konceptuell modell för Glömstadalen.....	46
6.2	Modellering av glömstatunneln.....	47
6.2.1	Modellering av opåverkade förhållanden	48
6.2.2	Modellering av tunnelpåverkan	49
6.2.3	Modellering med förändrade modellantaganden	50
7.	Slutsats	52
8.	Referenser	54
Bilagor		56
Bilaga 1	Testmodellering.....	56
Bilaga 2	Modellering av opåverkade förhållanden	57
Bilaga 3	Modellering med förändrade modellantaganden	60

1. INLEDNING

Vid konstruktion av tunnlar i berg uppstår i regel alltid ett inläckage av grundvatten, vilket ofta resulterar i att grundvattenytan ovanför och kring tunneln avsänks (Gustafson, 2009). Mängden vatten som läcker in i tunneln och storleken på det område där grundvattennivån avsänks beror till stor del på bergets hydrauliska konduktivitet men också på om berget kring tunneln tätas (Eriksson och Stille, 2005). Sänkta grundvattennivåer kan bland annat leda till försämrade uttagskapacitet och förändrad vattenkvalitet hos allmänna dricksvattentäkter och enskilda dricksvattenbrunnar, reducerat energiuttag ur energibrunnar samt ge upphov till sättningar i kohesionsjordar (SGU, 2013). Därtill kan känsliga naturområden påverkas genom att våtmarker torkas ut, mängden växttillgängligt vatten minskar eller genom att flödet i mindre vattendrag minskar.

Det grundvatten som läcker in till tunnlar leds vanligtvis bort för att förenkla konstruktionsprocessen och upprätthålla tunnelns funktion i drift. Bortledningen av inläckande grundvatten utgör enligt 11 kap. miljöbalken så kallad vattenverksamhet (SFS 1998:808), för vilket tillstånd måste sökas hos mark och miljödomstolen. I tillståndsansökan ingår bland annat att bestämma ett påverkansområde för grundvatten från tunnelanläggningen. Påverkansområdet beskriver det område där grundvattenytans nivå kan komma att förändras till följd av anläggande och drift av den nya tunneln. För att uppskatta storleken på påverkansområdet är numerisk grundvattenmodellering många gånger nödvändig. Antalet dimensioner som används i modelleringen bestäms utifrån komplexiteten hos grundvattenströmningen i området samt utifrån projektets givna tidsramar och budget (Anderson m.fl., 2015). Ofta är det mest önskvärt att modellera i tre dimensioner eftersom en sådan modellering, om väl utförd, bäst kan beskriva den verkliga grundvattenströmningen. Tredimensionell modellering är dock i regel mycket tidskrävande och därmed även kostsam. När enklare förhållanden råder kan modellering i två dimensioner, genom indelning av tunnellinjen i ett antal tvärsektioner (Anderson m.fl., 2015), tillämpas som ett kostnadsmässigt fördelaktigt alternativ. Den tvådimensionella modelleringen förutsätter emellertid att strömningen kan generaliseras till en huvudriktning och att hydrauliska processer som påverkar strömningen i andra riktningar kan försummas.

Sedan hösten 2014 utreder och planerar Trafikverket för en ny sträckning av den befintliga väg 259 mellan Vårby och Haninge Centrum söder om Stockholm. Projektet går under namnet Tvärförbindelse Södertörn. Längs sträckan kommer ett antal bergtunnlar att konstrueras, däribland Glömstatunneln som ska anläggas intill Glömstadalen i Huddinge kommun. Kring Glömstadalen finns en stor mängd energibrunnar och dricksvattenbrunnar samt potentiellt sättningskänslig bebyggelse. Inledande undersökningar i området har visat att Glömstadalen i ytan består av postglacial lera med varierad mäktighet (Tyréns, 2016). Under lerlagret hittas ett slutet grundvattenmagasin som fylls på från kringliggande områden. Dalen omges framförallt av höglänta områden med stor andel berg i dagen och tunna osammanhängande jordlager. Baserat på inledande analyser antas den generella grundvattenströmningen i området vara riktad rakt mot dalgången. Av denna anledning skulle det kunna vara lämpligt att tillämpa tvådimensionell grundvattenmodellering för bestämning av påverkansområdet för Glömstatunneln.

1.1 SYFTE

Föreliggande examensarbete syftar till att undersöka påverkansområdet för grundvatten inför anläggandet av en vägtunnel i berg intill Glömstadalen i Huddinge kommun. Genom tillämpande av tvådimensionell grundvattenmodellering, där en tvärsektion ortogonal mot tunneln upprättas, och genom att studera de hydrogeologiska förhållanden som råder i området ska tunnelns inverkan på grundvattennivåer utredas. Därtill studeras hur olika modellantaganden förändrar påverkansområdets utbredning samt vilka utmaningar som kan uppstå vid modellering i två dimensioner och för både mättat och omättat flöde.

Baserat på syftet har följande frågeställningar formulerats:

- Vilken påverkan på grundvattennivåer ses längs tvärsektionen?
- Hur förändras påverkansområdets utbredning när modellantaganden förändras?
- Vilka utmaningar ses vid modellering i två dimensioner och för både mättat och omättat flöde?

1.2 AVGRÄNSNINGAR

Vid tvådimensionell modellering som syftar till att bestämma påverkansområdet för grundvatten kring en fullständig tunnel antas att multipla tvärsektioner längs tunnelns sträckning bör modelleras. I detta arbete har sådana tvärsektioner därför tagits fram men modellering och undersökning av påverkansområdets utbredning har endast gjorts för en av dessa.

Påverkansområdet har i detta arbete definierats som det område där grundvattennivån avsänks mer än fem centimeter och modelleringar har endast utförts för stationära förhållanden.

2. TEORI OCH PROCESSER

Detta avsnitt ämnar, genom insikt i hydrogeologiska processer, grundvattenflöden kring tunnlar och principer för grundvattenmodellering, utgöra ett underlag för den förestående platsspecifika modelleringen.

2.1 GRUNDLÄGGANDE HYDROLOGISKA PRINCIPER

Vid all grundvattenmodellering görs förenklingar av olika grad för att kunna representera markens komplexa egenskaper och de processer som påverkar grundvattenströmningen inom ett område. För att kunna göra lämpliga antaganden och avgränsningar behövs därför kunskap inom dessa områden, vilket detta avsnitt avser att bidra med.

2.1.1 Vattnets förekomst i jord och berg

Marken är uppbyggd av fast material i form av mineralkorn och organiskt material som tillsammans utgör vad Grip och Rodhe (1994) kallar markskelettet. Mellan de fasta partiklarna finns hålrum av olika storlekar som fylls av luft och vatten. Hålrummen, eller porerna, kan vara sammanhängande eller fragmentariska. För att beskriva det totala porutrymmet i marken jämfört det fasta materialet används begreppet porositet (Domenico och Schwartz, 1998). Porositeten beror till stor del på texturen men även strukturen i mediet. För välsorterade jordar ökar porositeten med minskad kornstorlek och kan vara uppemot sextio procent i vissa leror (Tabell 1).

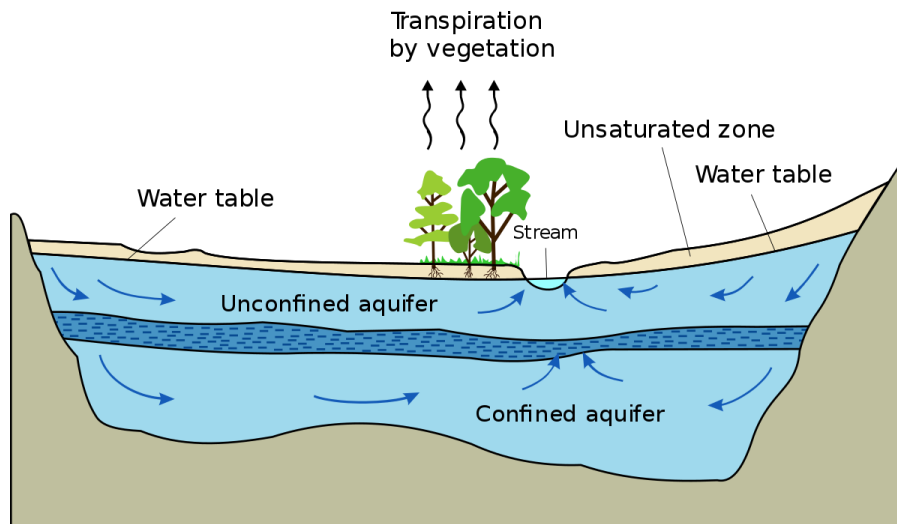
För berg är porositeten störst hos sedimentära bergarter och nära noll i kristallint berg där den vattenförande förmågan istället beror av sprickförekomsten (Domenico och Schwartz, 1998). Då inte alla porer är sammanhängande används även termen effektiv porositet som endast tar hänsyn till de porer och sprickor som tar del i vattentransporten.

Tabell 1. Total porositet hos olika jord- och bergarter.

	Porositet
Jordarter	
Grus	0,25 - 0,40 ^(a)
Grovsand	0,31 - 0,46 ^(b)
Finsand	0,26 - 0,53 ^(b)
Friktionsjord	0,15 - 0,45 ^(c)
Silt	0,35 - 0,50 ^(a)
Lera	0,34 - 0,60 ^(b)
Bergarter	
Sandsten	0,05 - 0,30 ^(a)
Kalksten	0 - 0,20 ^(a)
Sprucken magmatisk eller metamorf	0 - 0,10 ^(b)
Tät magmatisk eller metamorf	0 - 0,05 ^(b)
Granit	0,1 ^(b)

^a(Freeze och Cherry, 1979) ^b(Domenico och Schwartz, 1998) ^c(Larsson, 2008)

Grundvattnet återfinns i den mättade zonen, där alla porer är vattenfyllda, medan markvattnet återfinns i den omättade zonen där även luft förekommer i porerna (Domenico och Schwartz, 1998). Grundvattenytan utgör gränsen mellan den omättade och mättade zonen. När den mättade zonen kan beskrivas utifrån en geologisk formation med en relativt stor mäktighet på så sätt att vatten både kan lagras och transporteras genom zonen benämns denna grundvattenmagasin (Grip och Rodhe, 1994). Magasinet kan vara öppet eller slutet, där det öppna magasinets övre gräns utgörs av den fria grundvattenytan där atmosfärstryck råder (Figur 1). Det slutna magasinet överlagras istället av ett impermeabelt skikt, vanligtvis lera, vilket begränsar grundvattnets spridning uppåt och skapar ett övertryck. För att beskriva grundvattentrycket i det slutna magasinet används den nivå som vattnet skulle ställa in sig på vid atmosfärstryck, den potentiometrisk ytan (Domenico och Schwartz, 1998).



Figur 1. Det öppna grundvattenmagasinet skiljs från det slutna av ett impermeabelt skikt i mörkare blått. Modifierad bild av © Hans Hillewaert / [CC BY-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

2.1.2 Hydraulisk konduktivitet

Vattenledningsförmågan, eller den hydrauliska konduktiviteten, är ett mått på hur väl vatten leds genom ett material (Grip och Rodhe, 1994). Den hydrauliska konduktiviteten beror dels på vattnets tyngd och viskositet, dels på mediets permeabilitet och dels på vattenhalten (Domenico och Schwartz, 1998). För att specificera att ledningsförmågan gäller för den mättade zonen används ibland beteckningen mättad hydraulisk konduktivitet. Då vattnets egenskaper normalt är relativt konstanta ses skillnader i hydraulisk konduktivitet mellan olika vattenmättade områden främst vid variationer i permeabilitet.

Permeabiliteten beskriver hur väl ett medium leder en vätska och beror i jord till stor del på dess porositet (Domenico och Schwartz, 1998). En högre porositet ger bättre ledningsförmåga än en mindre vilket innebär att sand och grus generellt har högre ledningsförmåga än silt och ler. Jordens struktur kan dock inverka på ledningsförmågan genom förekomst av exempelvis makroporer som bildats av rötter eller maskar (Grip och Rodhe, 1994). I berg beror permeabiliteten istället främst på förekomsten av sprickor och deras frekvens, storlek och råhet (Domenico och Schwartz, 1998). Eftersom sprickorna utgör ett nätverk som är mer eller mindre sammanhängande innebär det dessutom att permeabiliteten hos en spricka är starkt kopplad till dess förbindelse med andra vattenförande sprickor (Eriksson och Stille, 2005). I Tabell 2 ses en sammanställning av förväntad mättad hydraulisk konduktivitet för olika jordar och berg.

Tabell 2. Mättad hydraulisk konduktivitet hos olika jordar och berg.

Hydraulisk konduktivitet (m/s)	
Sorterade jordar	
Grus	$1 \cdot 10^{-3} - 1$ ^(a)
Grovsand	$9 \cdot 10^{-7} - 6 \cdot 10^{-3}$ ^(b)
Finsand	$2 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-4}$ ^(b)
Silt	$1 \cdot 10^{-10} - 5 \cdot 10^{-5}$ ^(a)
Lera	$1 \cdot 10^{-11} - 5 \cdot 10^{-9}$ ^(b)
Moräner	
Grusig morän	$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-5}$ ^(c)
Sandig morän	$1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-6}$ ^(c)
Moig morän	$1 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-7}$ ^(c)
Lerig morän	$1 \cdot 10^{-10} - 1 \cdot 10^{-8}$ ^(c)
Berg	
Sandsten	$1 \cdot 10^{-10} - 5 \cdot 10^{-6}$ ^(a)
Kalksten	$1 \cdot 10^{-9} - 5 \cdot 10^{-6}$ ^(a)
Sprucken magmatisk eller metamorf	$8 \cdot 10^{-9} - 3 \cdot 10^{-4}$ ^(b)
Tät magmatisk eller metamorf	$3 \cdot 10^{-14} - 2 \cdot 10^{-10}$ ^(b)

^a(Freeze och Cherry, 1979) ^b(Domenico och Schwartz, 1998) ^c(Knutsson och Morfeldt, 1973)

Den hydrauliska konduktivitetens variation inom ett medium kan beskrivas på flera sätt. Begreppen homogen och heterogen används för att förklara variation i rummet, där det förstnämnda innebär att konduktiviteten är likformig och det senare att den varierar (Domenico och Schwartz, 1998). Ett heterogent medium består exempelvis av olika jordlager med olika egenskaper. För att indikera den hydrauliska konduktivitetens riktighetsberoende i ett medium används termerna isotrop och anisotrop (Domenico och Schwartz, 1998). När mediet är anisotropt har konduktiviteten olika storlek i olika riktningar, vilket exempelvis ses i sprickigt berg eller i jordar där porositeten minskar med djupet på grund av högre tryck, medan den är samma i alla riktningar vid isotropa förhållanden.

2.1.3 Mättad strömning

Den främsta drivkraften bakom grundvattenströmning är gravitationen. Grundläggande för uppkomsten av flöden är dock att det finns en potentialskillnad mellan olika områden (Rodhe och Seibert, 1999). I syfte att utjämna skillnaden i hydraulisk potential rör sig grundvattnet från områden med hög potential till områden med låg. Skillnaden i potential uppstår dels genom lägeskillnader, vilket representerar gravitationens effekt, och dels genom tryckskillnader (Domenico och Schwartz, 1998). Läget hos en studerad punkt beskrivs utifrån dess lägespotential, vilken anger punktens höjd relativt en referensnivå. Trycket i punkten anges utifrån dess tryckpotential som beskriver höjden av den vattenpelare som bildas i ett rör ovan punkten. Summan av läges- och tryckpotentialen ger den hydrauliska potentialen (Ekvation 1). Där tryckpotentialen är noll och atmosfärstryck råder hittas grundvattenytan för öppna magasin och den potentiometriska ytan för slutna magasin.

$$h = z + \frac{p_w}{\rho_w g} \quad (1)$$

där h [m] är hydraulisk potential; z [m] är lägespotential och $\frac{p_w}{\rho_w g}$ [m] är tryckpotential som beror av vattentrycket (p_w), densiteten hos vatten (ρ_w) och gravitationen (g).

För att bestämma storleken på grundvattenflödet genom ett tvärsnitt behövs, förutom potentialskillnaden, vetskap om den hydrauliska konduktiviteten. Sambandet beskrivs i Darcys lag (Ekvation 2) (Domenico och Schwartz, 1998). Ekvationen gäller för flöde i ett poröst medium och beskriver här endast flöde i en riktning men kan ställas upp för att gälla i flera dimensioner.

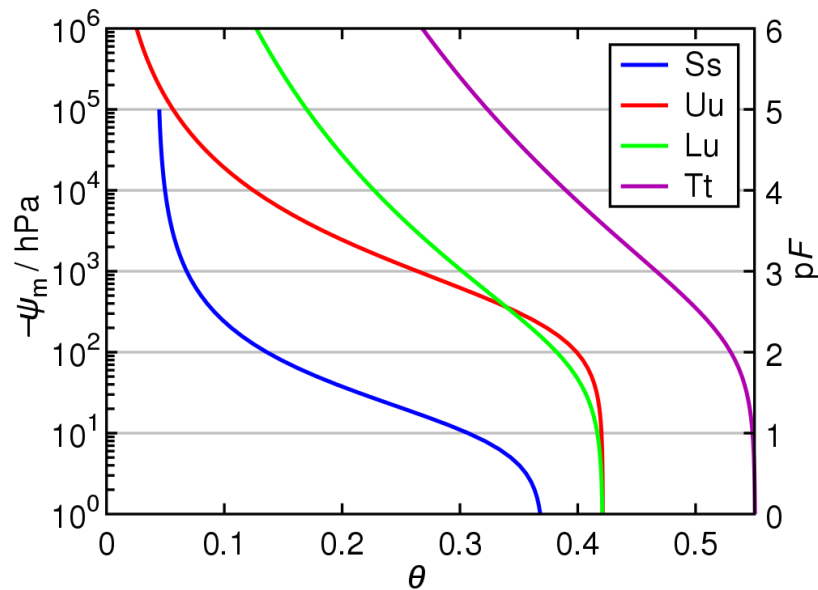
$$\frac{Q}{A} = q = -K \cdot \frac{dh}{dl} \quad (2)$$

där Q [m³/s] är vattenföring; A [m²] är tvärsnittsarea; q [m/s] är specifikt flöde; K [m/s] är hydraulisk konduktivitet och $\frac{dh}{dl}$ [m/m] är hydraulisk gradient.

2.1.4 Omättad strömning

I den omättade zonen gäller samma principer för strömning som i den mättade zonen men däremot tillkommer fler styrande faktorer (Domenico och Schwartz, 1998). De viktigaste skillnaderna är att porerna inte är helt vattenfyllda och att tryckpotentialen är negativ vilket innebär att ett undertryck råder och att det kvarvarande vattnet är bundet till jorden. Storleken på undertrycket, eller tensionen, kommer dels att avgöra hur mycket vatten jorden kan hålla och dels hur lätt vatten flödar genom porerna (Freeze och Cherry, 1979). Både vattenhalten och den hydrauliska konduktiviteten är därmed funktioner av tensionen.

Funktionen för vattenhaltens beroende av tensionen benämns ofta vattenbindningskurva eller bindningskaraktistika och är specifik för varje jord (Figur 2). Flera metoder har föreslagits för att teoretiskt bestämma vattenbindningskurvan, där van Genuchten's ekvation (1980) är den mest erkända men även Fredlund och Xing's ekvation (1994) har viss spridning (Domenico och Schwartz, 1998). Kurvans form beror framförallt av jordens förmåga att binda vatten adsorptivt och kapillärt. Då den adsorptiva bindningen sker mellan partikel och vattenmolekyl, och då mindre korn ger större kontaktyta, är den främst av betydelse i jordar med mycket liten kornstorlek likt lera (Grip och Rodhe, 1994). Den kapillära bindningen skapas istället i porerna genom en ytspänning på grund av att vattnets attraktionskraft är större till sig själv och jorden än till porluften (Grip och Rodhe, 1994). Bindningsstyrkan är större i mindre porer vilka hittas i jordar med mindre kornstorlek.



Figur 2. Vattenbindningskurvor för fyra olika exempeljordar (Ss = sand, Uu = silt, Lu = lerig sandig silt, Tt = lera) skapade utifrån van Genuchten's ekvation. Vertikala axlar anger tension (negativt tryck) i två olika enheter och horisontell axel vattenhalt. Lerjorden ses innehålla mest vatten och sandjorden minst vid höga tensioner. (Ad-hoc-AG Boden, 2004)

Då den kapillära kraften uppkommer genom ytspänning är vattenbindningskurvan egentligen hysteretisk, den ser olika ut beroende på om porerna väts eller dräneras (Freeze och Cherry, 1979). Generellt för kurvans utseende gäller att vattenhalten avtar snabbt vid en specifik tension för välsorterade jordar, då porstorleken och därmed bindingsstyrkan är likartad i hela jorden, medan den avtar mer kontinuerligt vid blandad kornstorlek (Grip och Rodhe, 1994). Ju högre lerhalt jorden innehåller desto hårdare kommer vattnet att bindas och desto större tension krävs för att tömma porerna.

Som tidigare nämnts beror den hydrauliska konduktiviteten hos ett medium till stor del på vattenhalten. Funktionen för konduktivitets beroende av tensionen påverkas därmed starkt av vattenbindningskurvans utseende (Freeze och Cherry, 1979). Störst hydraulisk konduktivitet ses vid mättat tillstånd och först vid tensioner då vattenhalten minskar kommer också konduktiviteten att börja avta (Domenico och Schwartz, 1998).

För att ta fram en vattenbindningskurva som representerar en hel bergmassa måste hänsyn tas till både porer och sprickor i berget. Zhang och Fredlund (2003) har föreslagit en metod som går ut på att en vattenbindningskurva skapas specifikt för bergmatrisen och en specifikt för sprickorna, vilka sedan adderas. Metoden visar att sprickor med stor vidd dräneras redan vid mindre tensioner och att bergets totala kurva därför främst beror av matrisens bindning. För den hydrauliska konduktiviteten, som är större i sprickorna än porerna, innebär det ett kraftigt avtagande så fort spricksystemen inte längre sammankopplas med vatten.

2.1.5 Topografins betydelse

I områden där förhållandevis tätt berg överlagras av ett tunt jordskikt, på så sätt att den hydrauliska konduktiviteten är betydligt högre i jorden än i berget, medverkar ofta större delen av jordens tvärsnittsarea i grundvattenströmningen (Rodhe och Seibert, 1999). Sådana förhållanden är vanligt förekommande i Sverige, där den sprickiga berggrunden täcks av några

meter morän. Följden av detta blir att grundvattenytan ofta återfinns nära markytan och att den därmed följer topografin (Gustafsson, 1968).

Landskapet kan delas in i in- och utströmningsområden baserat på var vatten flödar in och ut ur grundvattenzonen (Gustafsson, 1968). Där grundvattenytan och strömningen följer topografin kommer vatten att röra sig från höglänta till låglänta områden. Därmed återfinns utströmningsområden i dalgångar eller svackor där grundvattenytan når markytan medan inströmningsområden hittas ovan dessa. Gränsen mellan in- och utströmningsområdet kan variera över tid så att utströmningsområdet växer eller krymper beroende på grundvattenytans fluktuering (Rodhe m.fl., 2006).

2.1.6 Avrinningsområden och vattendelare

Avrinningsområdet beskriver det område som beläget uppströms en punkt i ett vattendrag kan bidra med flöde till punkten (Grip och Rodhe, 1994). Det innebär att all nederbörd som faller inom området vid någon tidpunkt kommer att passera punkten. Gränsen för avrinningsområdets utbredning utgörs av en vattendelare som vanligtvis sammanfaller med höjdryggar (Grip och Rodhe, 1994). Ytvattendelaren beskriver randen från vilken vatten på markytan rinner åt olika håll och överensstämmer därför väl med höjdryggar i kuperad terräng men är mer svårdefinierad i flacka områden. Grundvattendelaren definieras på liknande sätt men utgörs istället av den linje där grundvattenytan har sitt högsta läge. I områden där grundvattenytan följer topografin sammanfaller ofta yt- och grundvattendelaren (Grip och Rodhe, 1994).

2.1.7 Grundvattenbildning

Under svenska förhållanden sker nybildning av grundvatten främst genom perkolation av nederbörd från den omättade zonen (Rodhe m.fl., 2006). Tillförsel kan också ske lateralt genom grundvattenflöde från angränsande akviferer där perkolation av nederbörd skett. Grundvattenbildningen är årstidsberoende då endast det vatten som är kvar efter avdunstning och transpiration (tillsammans s.k. evapotranspiration) perkolerar till den mättade zonen (Grip och Rodhe, 1994). Grundvattenbildningen är därmed störst under kallare månader med riklig nederbörd.

Svenska jordar har vanligtvis hög infiltrationskapacitet, vilket innebär att all nederbörd som faller på inströmningsområden infiltrerar marken och att det vatten som bildar avrinning i vattendrag främst består av grundvatten (Rodhe m.fl., 2006). Under antagandet att all nederbörd infiltrerar, och vid studerande av en längre tidsperiod, kan vattenbalansekvationen (Ekvation 3) användas för att ge en uppfattning om grundvattenbildningens medelvärde över ett år (Eveborn m.fl., 2017). Nybildningen av grundvatten sätts då lika med avrinningen och blir därmed nederbördsmängden reducerad för avdunstningen. Denna förenkling är dock mindre lämplig när lokala förhållanden studeras eftersom grundvattenbildningen till stor del beror av förekommande jordarter (Rodhe m.fl., 2006). Därtill tas inte hänsyn till den nämnda årstidsvariationen hos grundvattenbildningen.

$$P = E + R + \Delta S \quad (3)$$

där P [mm] är nederbörd; E [mm] är evapotranspiration; R [mm] är avrinning och ΔS [mm] är lagring.

Grundvattenbildningen i några svenska typjordar har beräknats av Rodhe m.fl. (2006). I sin rapport redovisar de översiktliga värden för den årliga nybildningen i olika jordar och över olika områden i Sverige. En sammanställning över dessa värden för Stockholmsregionen ses i Tabell

3. I bebyggda områden där stora delar av ytorna är hårdgjorda är infiltrationsmöjligheterna små vilket i kombination med dränerande anläggningar och dagvattensystem ger en begränsad grundvattenbildning (Eveborn m.fl., 2017).

Tabell 3. Grundvattenbildning i svenska typjordar i södra Stockholm (Rodhe m.fl., 2006).

Jordartsklass	Jordarter från SGU	Grundvattenbildning (mm/år)
Grov jord	Grovmo, sand, grus, isälvssediment	225-300
Morän	Morän, kalt berg, tunna eller osammanhängande jordtäcken på berg	150-225
Fin jord	Lera, finmo, lerig morän, moränlera	150-225

2.2 GRUNDVATTEN OCH TUNNLAR

Vid konstruktion av tunnlar i berg uppstår i regel alltid ett inläckage av grundvatten. Förståelse för hur grundvattenströmningen ser ut kring tunneln och hur den anläggs är av stor vikt när dess påverkansområde ska utredas, inte minst för att kunna avgöra om resultaten är rimliga.

2.2.1 Grundvattenströmning kring en tunnel i berg

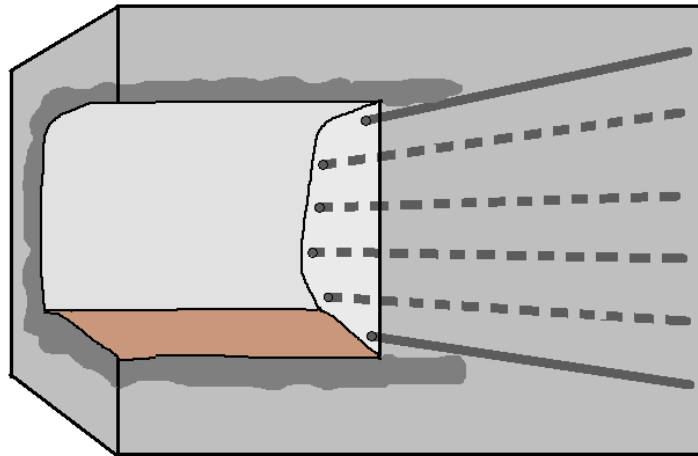
Vid konstruktion av en oinklädd tunnel i berg uppstår alltid ett grundvattenläckage som ofta resulterar i att grundvattennivån ovanför och kring tunneln avsänks (Gustafson, 2009). Förenklat kan den otätade tunneln liknas vid en dränering som medför att grundvattennivån med tiden sänks av till tunnelbotten (Freeze och Cherry, 1979). Eftersom atmosfärstryck normalt råder i en tunnel kommer tryckpotentialen i en godtycklig punkt på tunnelväggen att vara mindre än tryckpotentialen hos en närliggande punkt i berget med samma höjdläge. Detta innebär att den hydrauliska potentialen är lägre längs tunnelväggen än hos omgivande berg och att ett flöde i riktning mot tunneln därmed induceras (Gustafson, 2009). Jämförs den hydrauliska potentialen mellan tunnelns topp och botten, som har samma tryckpotential, inses att den bara beror av lägespotentialen (Gustafson, 2009). Därmed kommer mer grundvatten att flöda mot de nedre delarna av tunneln. Flödet som induceras kan för en större skala och lång tunnel antas vara tvådimensionellt genom att grundvatten flödar från båda sidor mot tunneln (Gustafson, 2009).

Mängden vatten som läcker in i tunneln och storleken på det område där grundvattennivån avsänks beror av bergets hydrauliska konduktivitet (Eriksson och Stille, 2005). För ett tätt berg är påverkan betydligt mindre än för ett berg med väl sammankopplade sprickor. Inflödet till tunneln är också ojämnt fördelat över bergytan då inläckaget sker vid vattenförande sprickor (Freeze och Cherry, 1979). Då sprickorna har varierande hydraulisk konduktivitet förekommer både mindre och större inflöden. Det område där grundvattennivån avsänks på grund av tunneln brukar benämnas påverkansområde. Som en första uppskattning kan påverkansområdets horisontella utbredning i ett opåverkat område med berg och morän bedömas vara 3-5 gånger tunneldjupet (Gustafson, 2009).

2.2.2 Tunneltätning

Vid konstruktion av tunnlar i berg sker vanligen förinjektering kring den planerade tunneln för att minimera läckage av grundvatten när tunneln väl förs fram (Gustafson, 2009). Förinjekteringen görs genom borrhål av borrhål kring tunneln, i riktning framåt mot den planerade tunneln (Figur 3), som sedan injekteras med en cementbaserad massa under tryck

(Eriksson och Stille, 2005). Avsikten med det höga trycket är att fylla ut alla de sprickor som går mellan borrhålen för att på så sätt skapa en tät skärm kring tunneln. När förinjekteringen är klar sprängs tunneln fram så långt som tätningen räcker och därefter börjar processen med förinjektering om.



Figur 3. Schematisk bild av förinjektering. Borrhål bildar en ring runt den planerade fortsättningen av tunneln. I dessa hål injekteras tätmassan vilket bildar en skärm runt tunneln. Först efter detta drivs tunneln fram.

Efterinjektering sker, som namnet antyder, efter avslutad tunneldrivning och syftar till att tätta de sprickor som av någon anledning inte åtgärdats genom den tidigare tätningen. Vid efterinjektering är det dock svårt att få en bra tätning och vanligtvis medför det bara att vattnet förflyttas till nya läckagepunkter (Gustafson, 2009).

Enligt Eriksson och Stille (2005) beror inläckagets minskning efter injektering dels på utbredningen hos den injekterade zonen och dels på konduktiviteten som uppnås i zonen. Utbredningens inverkan på läckaget är dock störst för korta avstånd och avtar sedan snabbt, vilket innebär att det är viktigare att ha en tät och liten zon än en mindre tät och större zon. Hur stor andel av sprickorna som lyckas tätas avgör i sin tur vilken täthet och konduktivitet som uppnås. Där beror resultatet främst av bergets ursprungliga sprickighet och hur väl injekteringsmassan tränger in, sprider ut sig och fyller igen sprickorna (Eriksson och Stille, 2005).

Som riktvärde för vilken konduktivitet som normalt uppnås i tätningszonen används för vanlig cementinjektering $1 \cdot 10^{-8}$ m/s (Eriksson och Stille, 2005), men med specialanpassad teknik och tätning i flera omgångar har även konduktiviteter på $1 \cdot 10^{-9}$ - $1 \cdot 10^{-10}$ m/s kunnat nå (Emmelin m.fl., 2004). Vilken täthet som eftersträvas vid injektering beror av varje projekts förutsättningar och krav.

2.3 GRUNDLÄGGANDE PRINCIPER FÖR GRUNDTVATTENMODELLERING

Grundvattenflöden kan modelleras på många olika sätt. Allt ifrån praktiskt med hjälp av stora sandfyllda kärl till matematiskt med avancerade programvaror. Gemensamt är att metoderna alltid ger en förenklad beskrivning av verkligheten. Medan de fysiska modellerna direkt observerar grundvattenströmningen i ett konstgjort medium använder de matematiska modellerna ekvationer och matematiska samband för att beskriva de fysiska processer som styr

strömningen. Genom att använda numeriska beräkningar kan de matematiska modellerna användas för stora modellområden med varierande och komplexa egenskaper.

2.3.1 Stationär och transient modellering

Vid stationär modellering är grundvattensystemet tidsberoende. Detta innebär att de förhållanden som råder antas vara konstanta i tiden. I en stationär modell tas exempelvis inte hänsyn till säsongsvariationer i nederbörd eller grundvattenytans fluktuation, varför modellen kan användas för att ta fram medelflöden eller medelnivåer (Anderson m.fl., 2015).

I transient modellering är systemet istället tidsberoende, vilket innebär att modellen exempelvis kan användas för att beskriva förloppet när grundvattenytan sänks av runt en brunn, eller hur lång tid det tar för en förorening att sprida sig en viss sträcka (Anderson m.fl., 2015).

2.3.2 Den grundläggande ekvationen

Matematiska modeller som beskriver grundvattenströmning i ett poröst medium är härledda utifrån två grundläggande principer, bevarandet av massa och Darcys lag (Anderson m.fl., 2015). Bevarandet av massa, eller kontinuitetsprincipen, grundas i att det vatten som flödar in ett område måste balanseras av det som flödar ut eller tillfälligt lagras där. Sett över längre tidsperioder kan dock lagringen försummas, vilket utnyttjas för tidsberoende system. Detta tillsammans med Darcys lag formulerad i x-, y- och z-riktning ger den grundläggande ekvationen för tidsberoende grundvattenströmning (Ekvation 4). För att lösa ekvationen behöver modellen randvillkor som specificerar förhållandena längs domänens gränser. Lösningen utgörs av den hydrauliska potentialen.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (4)$$

där $\partial h / \partial x$, $\partial h / \partial y$ och $\partial h / \partial z$ är hydrauliska gradienter och K är den hydrauliska konduktiviteten. Indexen hos K anger att konduktiviteten kan variera i olika riktningar (anisotropi). Att K placerats innanför differentialen innebär att konduktiviteten kan variera i rummet (heterogen).

2.3.3 Tvådimensionell modellering

Modellering i två dimensioner kan göras genom att representera grundvattenflödet antingen i det horisontella eller i det vertikala planet. I den horisontella modellen antas att grundvatten främst flödar horisontellt vilket kan vara en nöjaktig approximation för regionala system (Anderson m.fl., 2015). Vid förekomst av dränerande processer och på lokal nivå är det vertikala flödet dock av betydelse, och därmed är vertikala modeller mer lämpliga i sådana sammanhang. I vertikala modeller representeras domänen av ett tvärsnitt ur marken. Då flödet bara kan ske längs med sektionen behöver den orienteras parallellt med grundvattenflödets huvudriktning (Anderson m.fl., 2015). När flöde endast tillåts i två riktningar, exempelvis i x- och y-led, kan Ekvation 4 förenklas till att gälla tvådimensionell modellering (Ekvation 5).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (5)$$

där $\partial h / \partial x$ och $\partial h / \partial y$ är hydrauliska gradienter och K är den hydrauliska konduktiviteten.

2.3.4 Randvillkor

Vid grundvattenmodellering kan olika typer av randvillkor användas för att beskriva förhållandena vid domänens gränser. Randvillkoren är nödvändiga för att kunna lösa den grundläggande ekvationen. Marsily (1985) beskriver de tre generella randvillkor som finns inom matematiken; Dirichlets randvillkor, Neumanns randvillkor och Fouriers randvillkor (Cauchys randvillkor i senare litteratur). Inom grundvattenmodellering används också benämningarna första, andra respektive tredje typens randvillkor. Dirichlets randvillkor betecknar att den hydrauliska potentialen är specificerad längs en rand vilket till exempel är fallet då domänen gränsar mot ett större vattendrag eller öppet vatten. Då vattenytans nivå normalt är relativt stabil där kommer det angränsande grundvattnet att ha en konstant potential oavsett vad som händer inne i modellen. Neumanns randvillkor beskriver istället en specificerad potentialgradient vilket innebär att flödet specificeras på randen. Villkoret kan antingen formuleras som att inget flöde sker över randen eller som att flödet är specifikt och inte påverkas av andra processer i modellen. Exempelvis är flödet noll över en impermeabel berggrund eller vattendelare och specifikt när infiltration anges. I Fouriers (Cauchys) randvillkor anges förhållandet på en rand som gränsar mot ett lågpermeabelt område, exempelvis en sjöbotten eller ett tätat område i berg. Det lågpermeabla skiktet medför att en skillnad i potential uppstår mellan exempelvis sjöbotten och grundvattenmagasin, men läckaget beror också av skiktets tjocklek och hydrauliska konduktivitet. Egenskaperna hos det lågpermeabla skiktet summeras ofta i en läckagekoefficient.

Utöver dessa beskriver Marsily (1985) ytterligare två randvillkor för grundvattenmodellering, fri grundvattenyta och läckageyta (seepage face). Fri grundvattenyta innebär att grundvattenytan definieras där tryckpotentialen är noll ($h=z$) och att flödet över randen antingen är noll eller definierat som den grundvattenbildning som sker i området. Då grundvattenytan inte är känd krävs att lösningen tas fram iterativt och ofta anges en uppskattad grundvattennivå som startvärde för att minska antalet iterationer som krävs för att nå lösningen. En läckageyta (seepage face) är en yta där grundvatten läcker eller sipprar ut. Två villkor används för att definiera en sådan rand, dels är den hydrauliska potentialen lika med lägespotentialen eftersom atmosfärstryck råder vid ytan, och dels kan flödet över randen bara ske i riktning ut ur modellen.

2.3.5 Kontinuum- eller diskontinuummodell

I berg sker all grundvattenströmning i sprickor, varför det är viktigt att kunna beskriva deras geometri vid modellering. Ett sätt att representera bergets sprickor är som ett kontinuum. Då antas berget vara ett poröst medium med innebörden att strömning kan ske genom hela bergmassan. Detta medför att bergets verkliga egenskaper måste utjämnas så att effektiva värden istället tillämpas (Gustafson, 2009). Då den hydrauliska konduktiviteten varierar stort inom en bergmassa är det viktigt att analysera vilken skala som är lämplig att använda när ekvivalenta värden ansätts samt hur dessa värden beräknas (Gustafson, 2009).

Sprickorna kan också representeras som ett diskontinuum, vilket används i en diskret modell. Här modelleras sprickorna geometriskt som ett nätverk där varje spricka tilldelas enskilda egenskaper (Gustafson, 2009). Egenskaperna kan dels anges deterministiskt, till exempel för stora sprickzoner som undersökts väl, och dels stokastiskt.

2.3.6 Diskretisering av modelldomänen

Numeriska modeller beskriver grundvattenströmning genom att beräkna den hydrauliska potentialen i diskreta punkter, noder, med hjälp av en approximerad version av den

grundläggande ekvationen. Lösningen kan tas fram på olika sätt, där de två vanligaste metoderna är finita elementmetoden (FE) och finita differensmetoden (FD) (Anderson m.fl., 2015). I den finita differensmetoden, som exempelvis används i programvaran MODFLOW, delas modelldomänen upp i ett rutnät av celler och noderna sitter oftast centralt i varje cell. Den hydrauliska potentialen beräknas i varje nod och representerar ett medelvärde för hela cellen. I den finita elementmetoden delas modelldomänen istället upp i ett mesh av triangulära eller fyr-sidiga element och noderna utgörs normalt av deras kontaktpunkter i hörnen. Den hydrauliska potentialen beräknas även här i varje nod, men interpoleras också över varje element baserat på omgivande noder, vilket ger en kontinuerlig lösning. Generellt sett är FE-modeller mer flexibla vid diskretisering av en domän jämfört FD-modeller som begränsas av sitt rektangulära rutnät (Anderson m.fl., 2015).

Lösningsprocessen för båda metoderna är iterativ, vilket innebär att beräkningen upprepas tills skillnaden i hydraulisk potential mellan två beräkningssteg är mindre än den som tillåts (Anderson m.fl., 2015). I en fungerande modell minskar skillnaden i hydraulisk potential i varje steg så att lösningen konvergerar. Eftersom den hydrauliska potentialen beräknas i noderna är deras täthet avgörande för noggrannheten hos lösningen. I områden där potentialen ändras snabbt på korta avstånd, eller där potentialen ska studeras, är det speciellt viktigt att ha ett fint rutnät eller mesh.

2.3.7 Modellering av tunnlar

Vid modellering av tunnlar representeras de vanligen som tomrum eller inaktiva celler i domänen. Butscher (2012) beskriver de randvillkor som framförallt används vid numerisk modellering av tunnlar. För både otätade och tätade tunnlar används Dirichlets randvillkor längs tunnelväggen eftersom atmosfärstryck antas råda, vilket innebär att tryckpotentialen är noll. Den hydrauliska potentialen längs tunnelväggen beror då endast av höjdläget och är därmed konstant i varje nod ($h=z$).

För tätade tunnlar måste också tätningen representeras i modellen. Även om Butscher (2012) beskriver tunnlar som tätats inifrån genom beklädnad av tunnelväggen antas samma principer gälla för val av randvillkor när tätning sker inuti berget. Butcher anger två tänkbara sätt att representera tätningen, antingen som ett diskret område i modellen eller som ett blandat randvillkor. För det förstnämnda alternativet ritas det tätande lagret ut i modellen och dess hydrauliska egenskaper samt tjocklek anges. I det andra alternativet används Cauchys randvillkor längs tunnelväggen. Randvillkoret innebär att flödet över randen beror av en koefficient som beskriver tätningens inverkan på flödet samt en potentialskillnad mellan tunnelväggen och en punkt i berget precis intill väggen. Potentialen längs den inre tunnelväggen antas fortfarande vara samma som höjdläget ($h=z$). Detta randvillkor används exempelvis av Molinero m.fl. (2002) när de modellerar för en tunnel i sprickigt berg.

Modelleringen av tunnlar görs ofta för transienta förhållanden, dels för att kunna studera hur grundvattnet påverkas allteftersom tunneln drivs fram (Molinero m.fl., 2002) och dels för att avsänkning är en tidsberoende process. För att studera förhållandena under jämvikt kan dock steady-state-modellering användas.

2.3.8 Kalibrering och validering

Med hjälp av kalibrering kan en modell utvärderas efter sin förmåga att representera verkligheten. Kalibreringen utförs oftast genom att anpassa modellens parametrar så att de resulterande grundvattennivåerna och flödena stämmer överens med uppmätt data. I

kalibreringen ingår också att utvärdera om de anpassade parametrarna är realistiska. Även om modellen ger verkliga grundvattennivåer är den inte användbar om ett bekräftat jordlager av sand har en konduktivitet motsvarande den hos lera, eller om grundvattenbildningen är betydligt högre än den förväntade. (Anderson m.fl., 2015)

Helst ska kalibrering ske mot både uppmätta grundvattennivåer och flöden. För en steady-state-modell kan medelvärden av data användas så länge det är lämpligt för modellens syfte och då nivåerna inte fluktuerar allt för mycket. (Anderson m.fl., 2015)

2.3.9 Osäkerheter vid modellering

Grundvattenmodeller är alltid approximationer av verkligheten och då många parametrar är okända finns flera möjliga lösningar för ett system (Anderson m.fl., 2015). Modellens resultat beror egentligen bara av hur modellen byggts upp. Om en viktig egenskap för strömningens riktning inte tagits med kommer modellens resultat att avvika från verkligheten, även om resultatet kan te sig rimligt. Därför rekommenderas att alltid börja med en enkel modell för att förstå de generella principerna och vilka egenskaper som är av störst betydelse i det studerade området (Gustafson, 2009). Dessutom är det tvunget att ha en generell uppfattning om strömningen i området så att modellens resultat kan värderas.

2.4 NUMERISK MODELLERING I SEEP/W

SEEP/W är en programvara för tvådimensionell grundvattenmodellering som utvecklats av GEO-SLOPE (2016). Programmet tillämpar finita elementmetoden och kan användas för modellering av både mättat och omättat flöde (GEO-SLOPE, 2015). Matematiskt utgår SEEP/W från att flöde i både den mättade och omättade zonen följer Darcys lag samt kontinuitetsprincipen enligt ekvation (6).

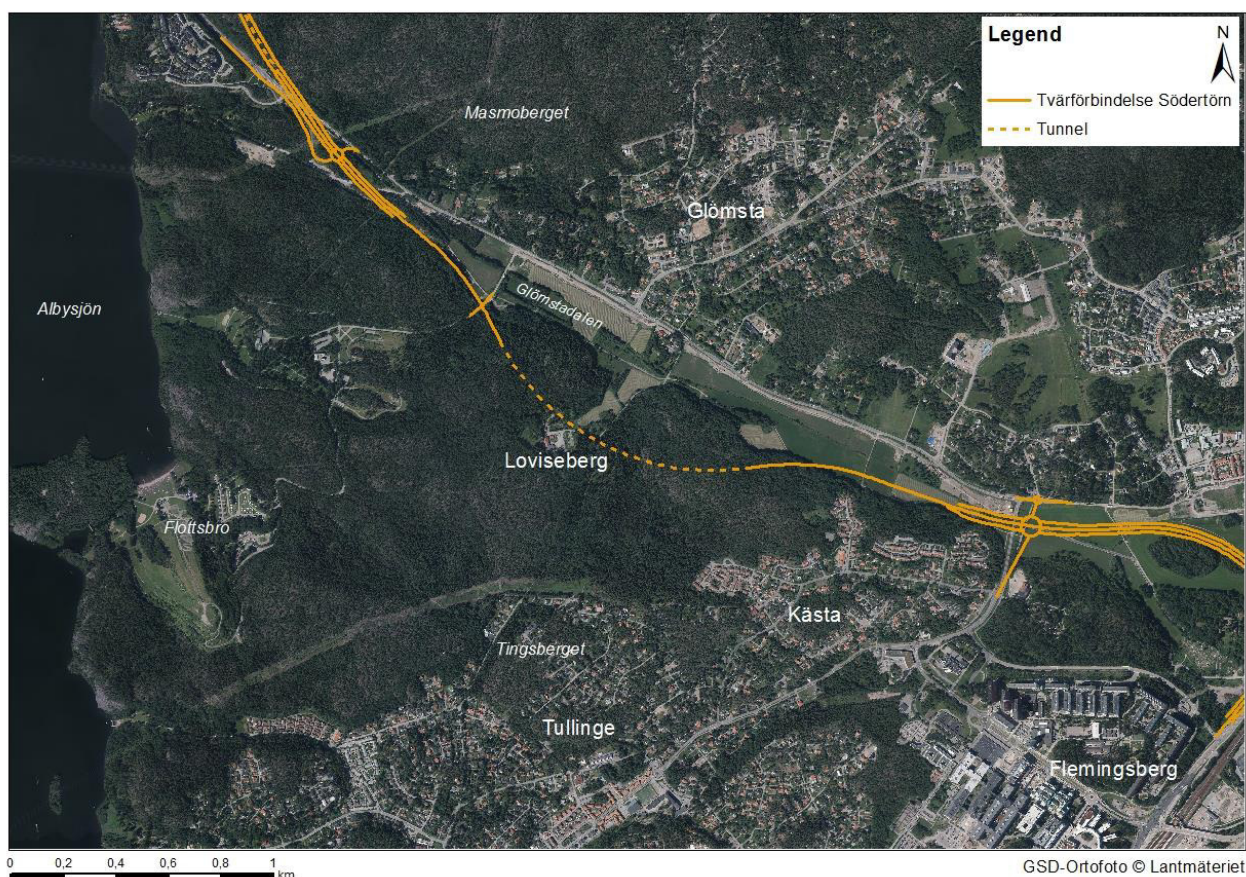
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (6)$$

där $\partial h / \partial x$ och $\partial h / \partial y$ är hydrauliska gradienter; och K är den hydrauliska konduktiviteten; Q är applicerat flöde vid rand; θ är vattenhalten och t är tid.

I SEEP/W kan vattenhalten i en jord förändras antingen om dess egenskaper förändras eller om porvattentrycket förändras. Vid steady-state-modellering är vattenhalten dock konstant. För att beskriva flödet i den omättade zonen används vattenbindningskurvor, se exempel i Figur 2, som vidare ger den hydrauliska konduktivitetens funktion av tensionen för materialen.

3. OMRÅDESBESKRIVNING

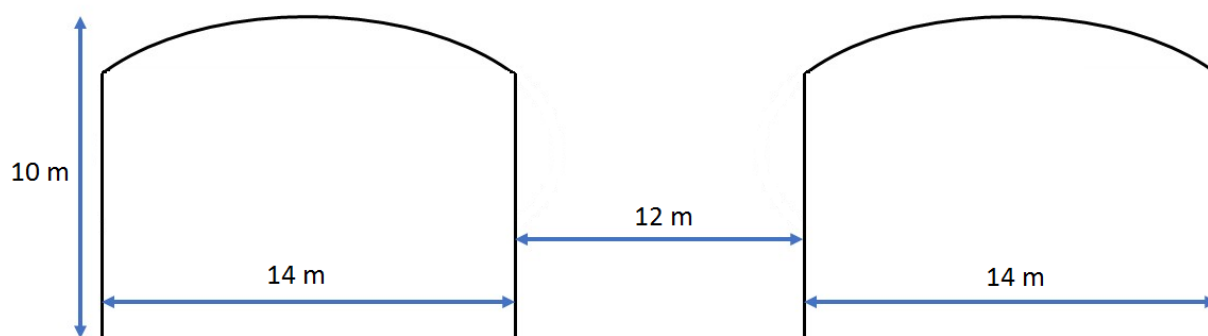
Glömstatunneln, vars potentiella grundvattenpåverkan studeras i detta arbete, är planerad att byggas intill Glömstadalen i Huddinge söder om Stockholm (Figur 4). Tunneln avses anläggas i berg och passera under området Loviseberg. I övrigt utgörs omgivningen ovan tunnelns planerade sträckning mestadels av skogsmark och jordbruksmark. Bebyggda områden som är belägna i närheten av tunneln hittas i Glömsta, Kästa och Tullinge. Närmsta större vattenförekomst är Albysjön i väst. Mindre vattenförekomster i området är Glömstadiket som sträcker sig genom Glömstadalens mitt och Lovisebergsbäcken som rinner från Lovisberg ner till Glömstadiket.



Figur 4. Ortofoto med planerad sträckning samt trafikplatser för Tvärförbindelse Södertörn. Glömstatunneln ses i bilden som den streckade linjen.

3.1 PLANERADE DIMENSIONER

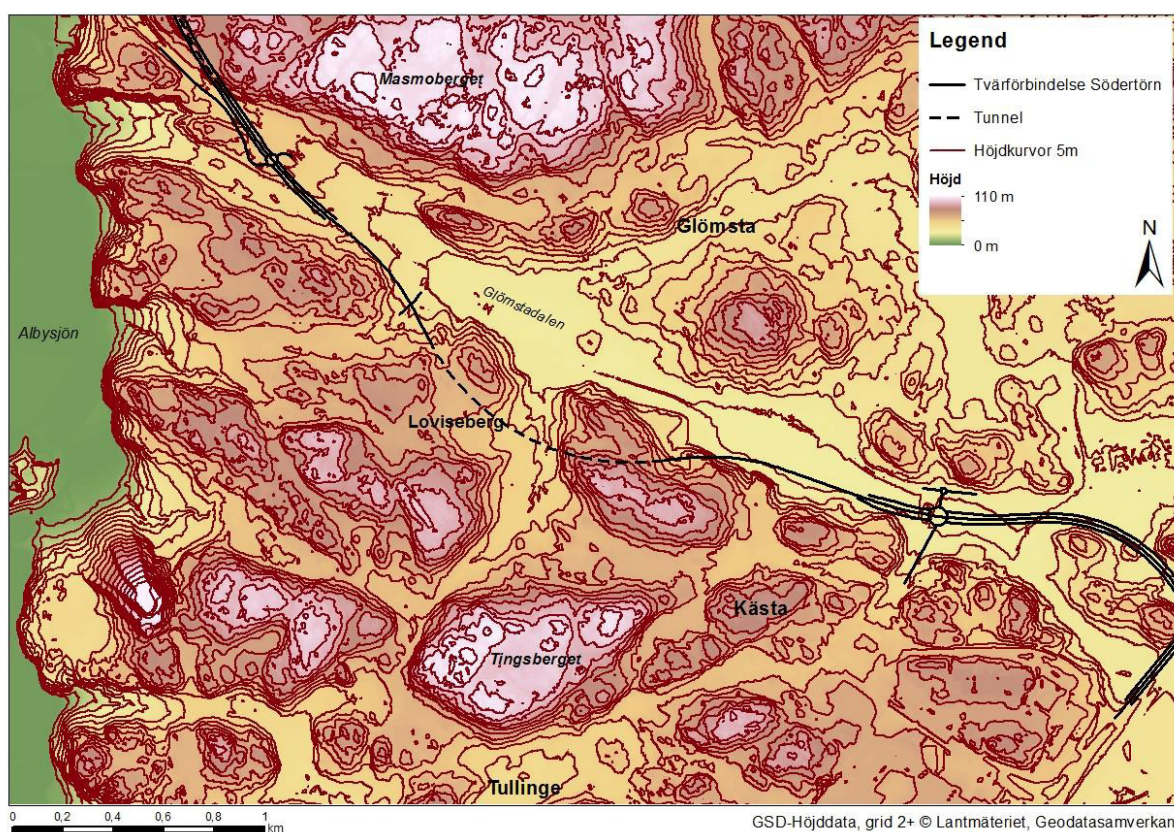
Den planerade tunneln kommer att bli omkring en kilometer lång och bestå av två parallella tunnelrör för trafik i olika riktning. I dagsläget föreslås att varje tunnelrör ska vara omkring 14 meter brett och 10 meter högt, med ett avstånd på 12 meter från varandra (Figur 5). Tunnelarna kommer att ha mellan 10 och 40 meter berg ovanför sig längs med sträckan.



Figur 5. Skiss av tunnlar i genomskärning. Måtten i bilden är ungefärliga och kan komma att ändras.

3.2 TOPOGRAFI

Landskapets topografi varierar stort inom området. Höjddata från Lantmäteriet (Figur 6) visar att markytan stundtals reser högt i terrängen och att det däremellan finns både mindre och större dalgångar. I norr framträder Masmoberget med en högsta höjd på +94,10 meter (RH2000) och i söder når Tingsberget höjder kring +90 meter. Mellan dessa höglänta områden, i nordväst-sydöstlig riktning, kan Glömstadalen tydligt urskiljas med lägsta nivåer kring +35 meter i väst och +24 meter i öst.



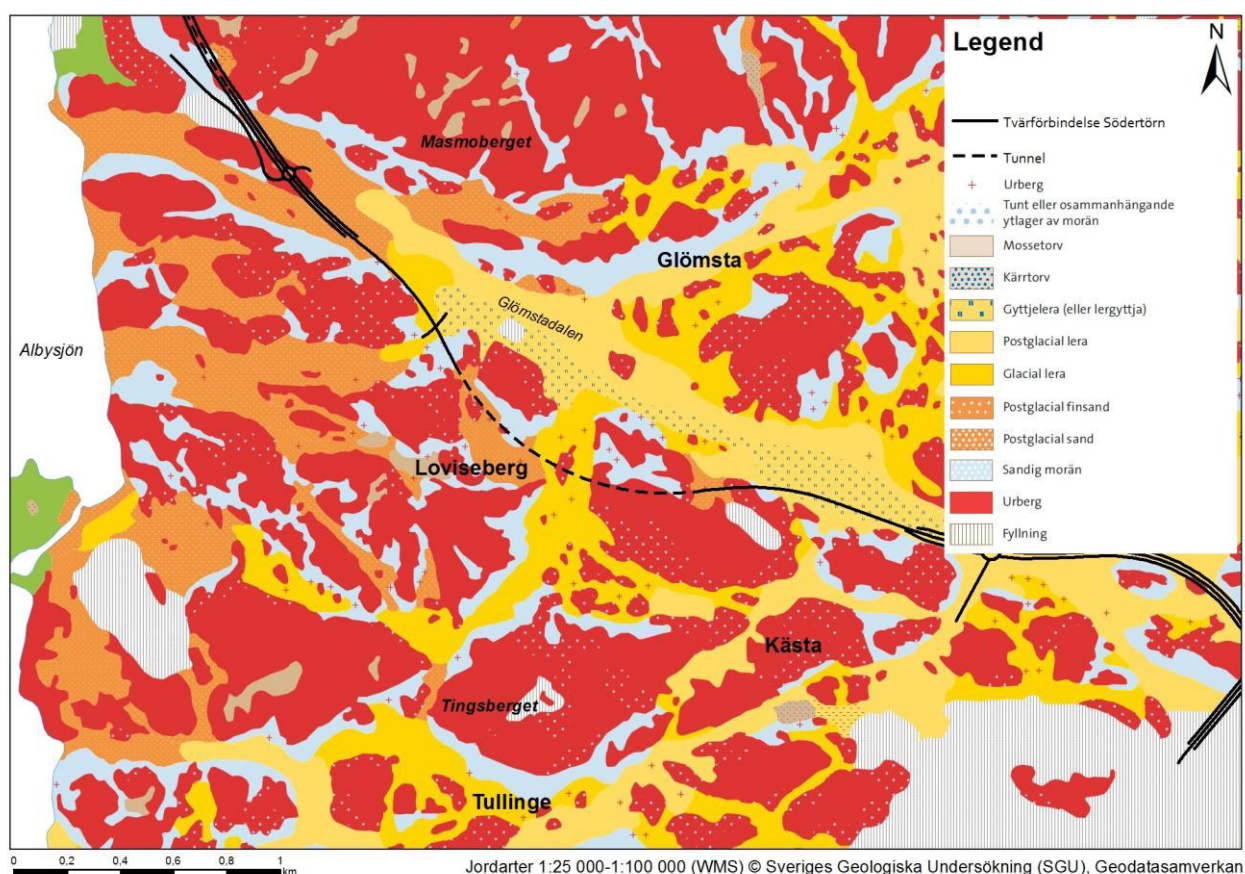
Figur 6. Topografisk karta över området med Glömstatunneln som streckad linje.

3.3 GEOLOGISKA FÖRHÅLLANDEN

Geologin inom området utgörs till stor del av ytligt berg eller berg i dagen med tunna moräntäcken och lerfyllda dalgångar.

3.3.1 Jord

Enligt SGU:s jordartskarta i skala 1:25 000 för detta område (Figur 7) utgörs stora delar av berg i dagen eller ytligt berg med tunna moränskikt. De ytliga jordarter som förekommer är främst lera, sandig morän och postglacial sand. Den postglaciala sanden hittas främst i nordväst, i de dalgångar som sträcker sig mot Albysjön i väst, samt kring Loviseberg. Leran ses i djupare dalgångar och har avsatts vid flera olika tidpunkter. Glacial lera hittas i dalgångar som ligger något högre än Glömstadalen, vilket är fallet strax öster om Loviseberg och för delar av dalgången under bostadsområdet Glömsta. I Glömstadalen hittas istället postglacial lera och gyttjelera överst, vilket tyder på dalen en gång varit sjöbotten. Ytlig sandig morän ses främst i övergångszoner mellan lera och berg i dagen.



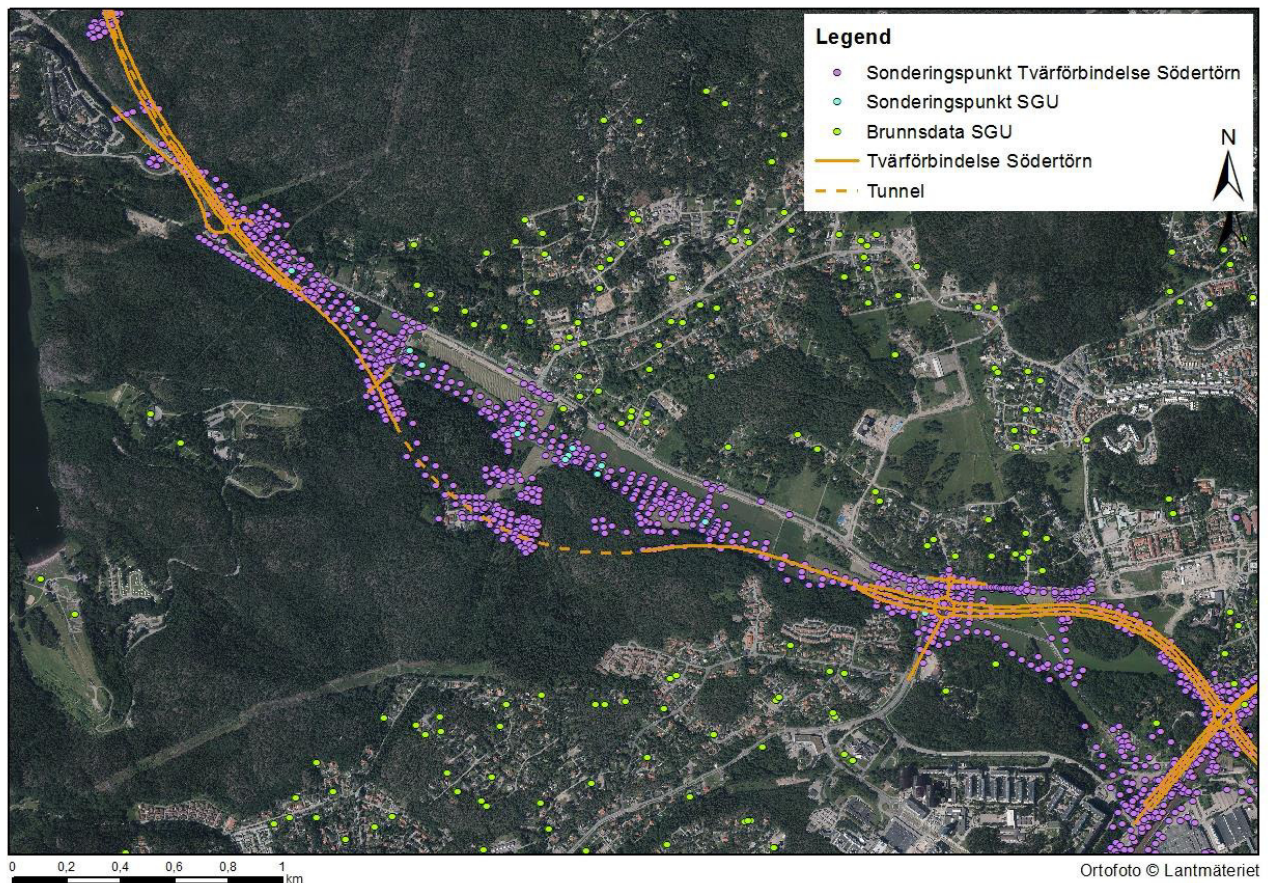
Figur 7. Jordartskarta från SGU. Stora områden med berg i dagen eller lera.

För att vidare bedöma de geologiska förhållandena i området har data från geotekniska undersökningar som gjorts längs väglinjen och delar av Glömstadalen använts. Därtill har sonderingsdata hämtats från SGU. En sammanställning över de provpunkter som finns i området ses i Figur 8. Sonderingarna visar att bergytan, med undantag för områden med berg i dagen, kläs av ett lager friktionsjord som i höglänta områden är ytligt men i dalgångar överlagras av lera. Ingen tydlig trend ses hos lagrets mäktighet mer än att det tunnare ut mot områden med berg i dagen. I Glömstadalen är mäktigheten stundtals uppemot 10 meter.

Sonderingar kring den västra tunnelmynningen bekräftar att sandlagret sträcker sig hela vägen till Glömstadalen och visar att det även förekommer grövre jord under sanden. Kring Loviseberg har sonderingarna endast noterat friktionsjord, varför det är osäkert om sand

förekommer på platsen. Kring den östra tunnelmynningen indikerar utförda sonderingar att friktionsjorden snarare utgörs av siltig morän än sandig morän.

Lerans mäktighet i Glömstadalen varierar och är enligt utförda sonderingar uppemot 20 meter i vissa centrala delar för att sedan avta mot dalgångens ränder. I äldre sonderingspunkter har provtagning gjorts av leran, vilken bekräftar att skikt med växtdelar förekommer, men också att leran ofta är siltig eller sandig. Torrskorpelera har endast noterats överst i ett fåtal punkter. Tunna silt- och sandskikt i leran har noterats i punkter över i stort sett hela området. Huruvida det rör sig om sammanhängande lager och exakt vilken mäktighet de har är inte känt då det rör sig om flertalet skikt och detaljnivån varierar mellan studerade sonderingsprotokoll.



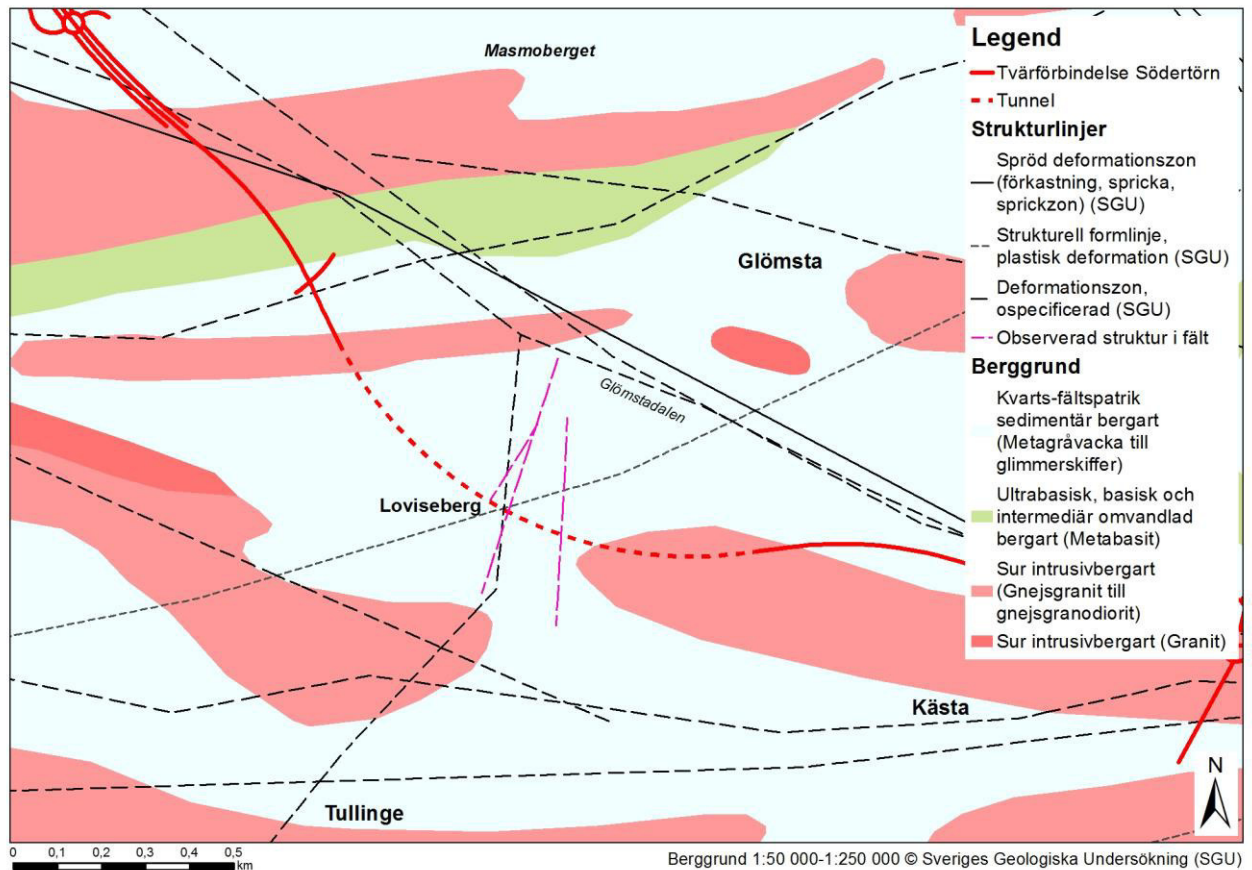
Figur 8. Punkter med geoteknisk information. Data från Tyréns och SGU:s brunnarsarkiv.

3.3.2 Berg

Utifrån bergsonderingar längs den planerade väglinjen och i Glömstadalen, data från SGU:s brunnarsarkiv och SGU:s karta över berghällar har bergytans topografi i området studerats. Bergytans läge varierar stort, där Masmoberget och Tingsberget utgör de högsta punkterna med nivåer runt +90 meter och där de lägsta punkterna kring +4 meter återfinns i Glömstadalen. Medan Masmoberget i norr utgör en större enhetlig bergmassa fluktuerar bergytan mer i övriga områden kring Glömstadalen. Från söder, via Loviseberg, ansluter en mindre dalgång och från norr, genom Glömsta, ansluter en bred dalgång till Glömstadalen. Övriga dalgångar sträcker sig generellt mot större vattenförekomster.

De kärnborrhål och fältkarteringar som gjorts, främst längs tunnellen, visar att berget utgörs av en typ av sedimentgnejs. Detta stämmer överens med SGU:s bergrundskarta i skala 1:100

000 över området (Figur 9) som anger att berget huvudsakligen består av gnejsiga bergarter och vanligast i form av metagråvacka med glimmerskiffer. Metagråvackan är en kvarts- och fältspatik ursprungligen sedimentär bergart som utsatts för varierande metamorfos. De lager med glimmerskiffer som förekommer längs gnejsigheten utgör zoner där berget lättare spricker upp och därmed kan vara vattenförande. I västlig-östlig riktning ses även stråk med gnejsgranit till gnejsgranodiorit och ett mindre område med metabasit. Gnejsgranit och gnejsgranodiorit har bildats genom metamorfos av granit respektive granodiorit.

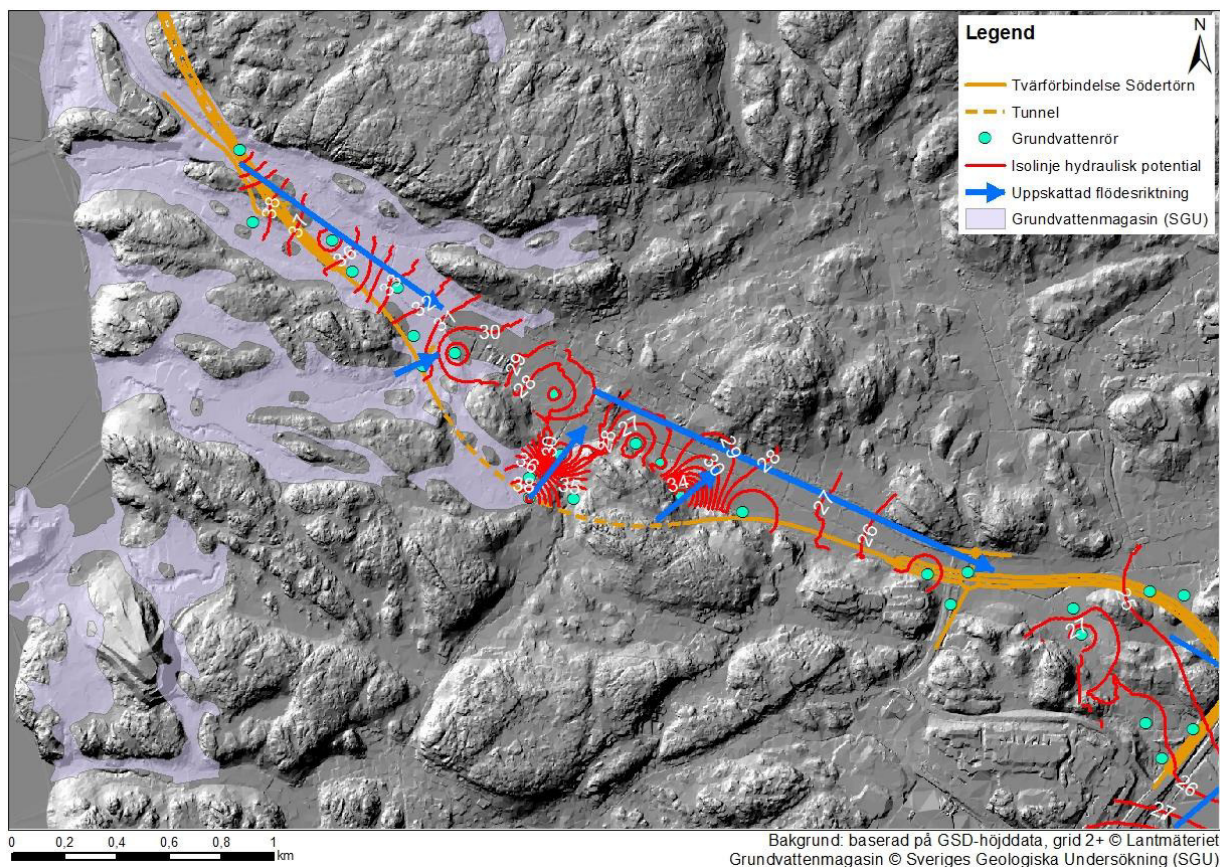


Figur 9. Berggrundskarta från SGU. Berggrunden utgörs främst av sedimentgnejs.

Ett antal deformationszoner kan konstateras ur SGU:s berggrundskarta (Figur 9) och framförallt längs med Glömstadalens sträckning. Där har noterats både en potentiell sprickzon och andra deformationslinjer. Vidare ses flera potentiella deformationszoner som korsar tunnellen kring Loviseberg, vilka både noterats av SGU och under kartering i projektet. I vilken utsträckning deformationszonerna är vattenförande har inte kunnat undersökas i tid för denna rapport.

3.4 HYDROGEOLOGISKA FÖRHÅLLANDEN

Både öppna och slutna grundvattenmagasin förekommer i området. De slutna magasin återfinns i dalgångar där lera överlagrar friktionsjorden, medan de öppna magasin hittas högre upp i terrängen. SGU har identifierat ett större grundvattenmagasin i området (Figur 10) vilket i princip följer den postglaciala sandens utbredning. Uttagsmöjligheterna ur magasinet bedöms vara mindre än 1 l/s.



Figur 10. Grundvattnets strömningsriktningar interpolerade utifrån nivåmätningar. (Tyréns, 2017)

Utifrån grundvattennivåmätningar från ett specifikt mättillfälle har Tyréns approximerat grundvattnets strömning inom området för den planerade tunnelanläggningen (Figur 10). Till följd av att grundvattenrören, i vilka nivåmätningar utförts, är placerade längs Glömstadalens södra sida ger approximeringen endast uppgifter om strömningen söderifrån. Med hänsyn till områdets topografi och geologi kan grundvattenflödet in mot Glömstadalen norrifrån dock antas se ut på liknande sätt. Grundvattenströmningen kan därmed förväntas ske från omgivande höjdområden i riktning in mot Glömstadalens centrala delar, såväl söder- som norrifrån, för att sedan vika av i sydöstlig riktning och följa dalens sträckning. I figuren ses också, baserat på de beräknade strömningsriktningarna, att flödet i det magasin som SGU identifierat antagligen har olika riktningar, dels mot Albysjön och dels mot Glömstadalen.

Utförda grundvattennivåmätningar visar också att grundvattennivåerna generellt ligger nära markytan i Glömstadalen och på omkring 1,5 meters djup högre i terrängen. Vid den östra tunnelmynningen och längs en av de potentiella sprickorna vid Loviseberg ligger dock nivåerna i medel på omkring 3-4 meters djup. Inom projektet har slugttester utförts i 15 av grundvattenrören i området för att bestämma den hydrauliska konduktiviteten i magasinerna. Resultaten visar att konduktiviteten varierar mellan $5,4 \cdot 10^{-7}$ och $7,5 \cdot 10^{-5}$ m/s, med ett medelvärde på $9,6 \cdot 10^{-6}$ m/s.

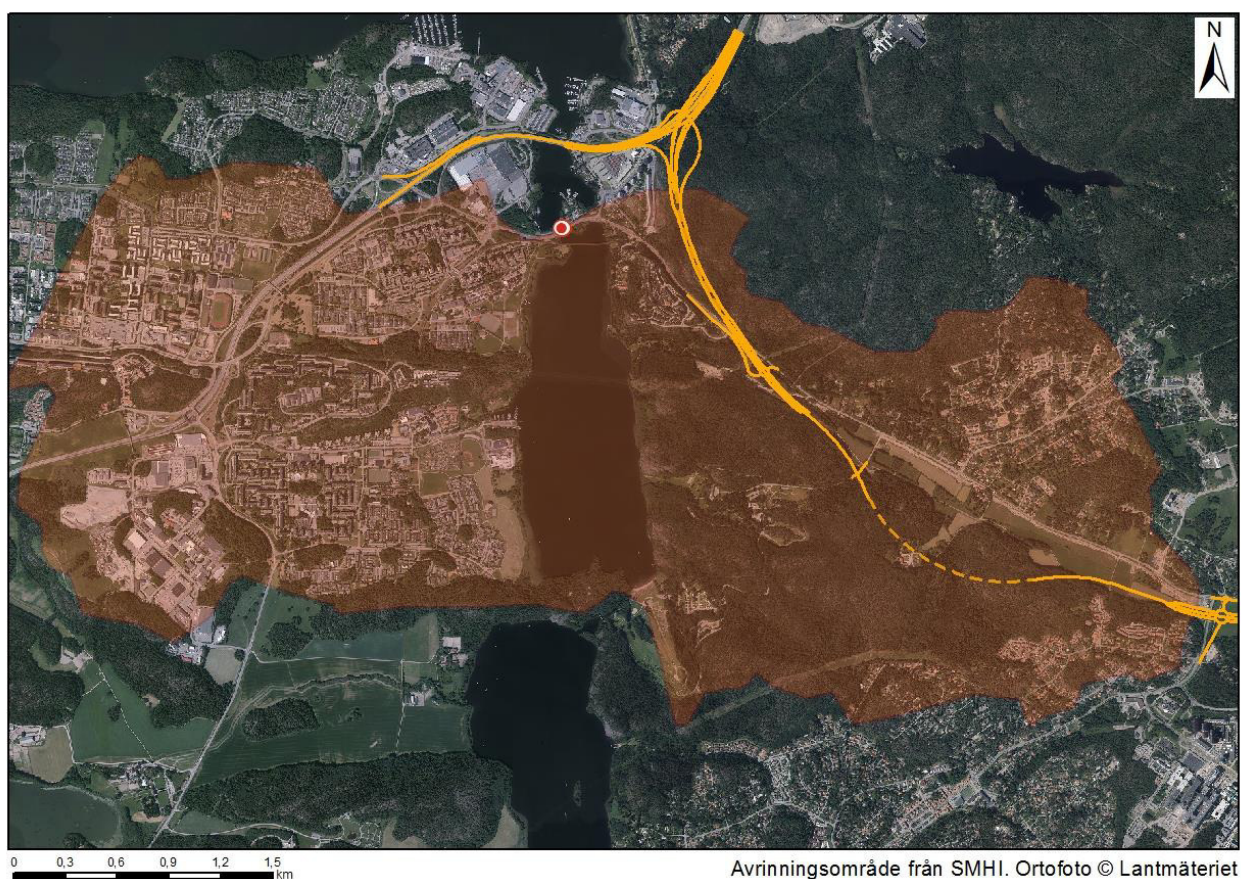
I berget planeras vattenförlustmätningar utföras för att beräkna bergets hydrauliska konduktivitet. Dessa mätningar är inte utförda vid denna tidpunkt men grovt förenklade vattenförlustmätningar har utförts i tre kärnborrhål. Dessutom har brunnnsdata från SGU använts

i 16 punkter för att få fram fler uppskattade värden på bergets konduktivitet. Resultaten visar att den approximerade medelkonduktiviteten i berg är $2,0 \cdot 10^{-8}$ m/s med en variation mellan $1,50 \cdot 10^{-9}$ och $2,16 \cdot 10^{-7}$ m/s.

Grundvattenbildningen i områden med ytlig sand och morän antas motsvara den som redovisas i rapporten *Grundvattenbildning i svenska typjordar* (2006). För en grov jord, likt den postglaciala sanden, är nybildningen 225-300 mm/år och för en morän 150-225 mm/år. I leran antas grundvattenbildningen vara begränsad till obefintlig, dels på grund av lagrets mäktighet och dels på grund av den utdikning som gjorts i framförallt Glömstadalen. Grundvattenbildningen antas även vara begränsad över tätt bebyggda områden, exempelvis i delar av Glömsta.

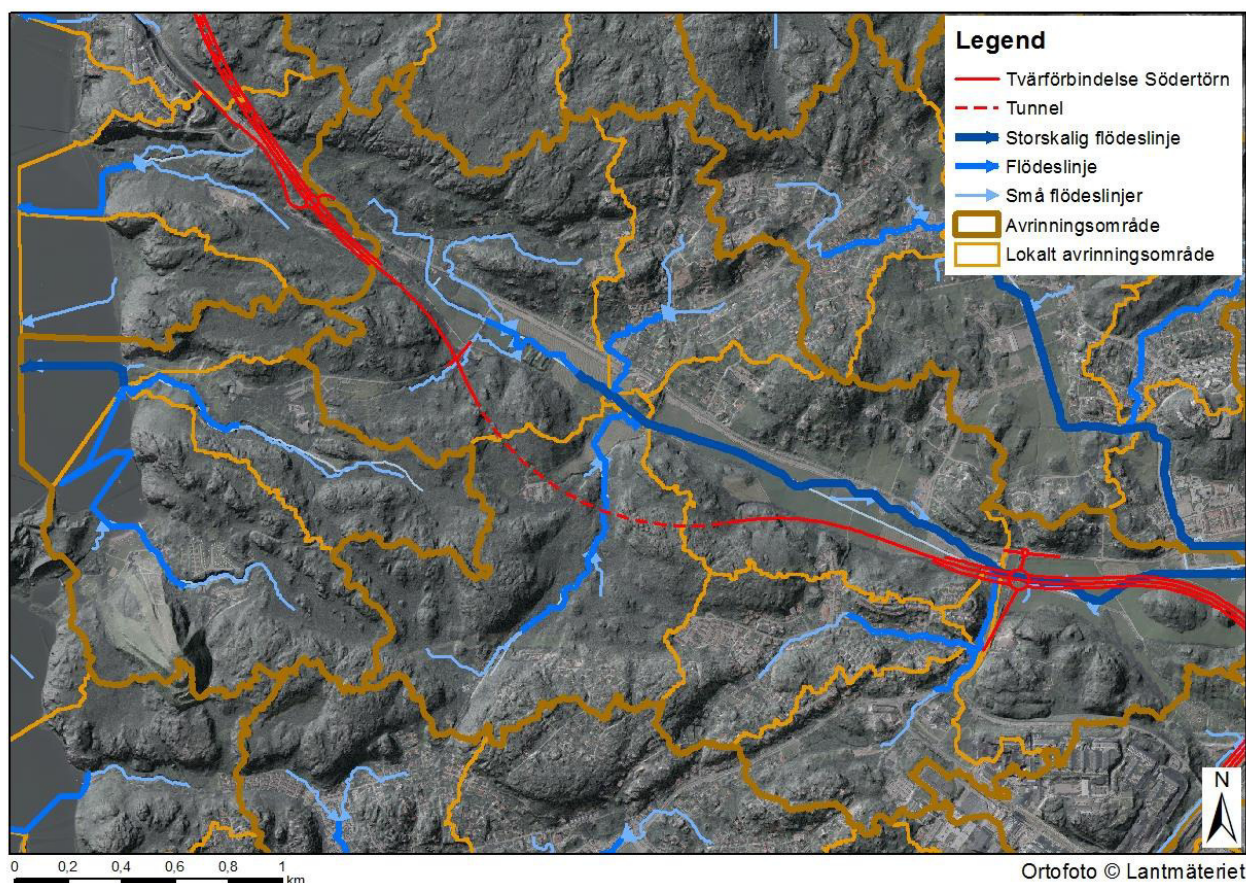
3.5 HYDROLOGISKA FÖRHÅLLANDEN

Aktuellt område är enligt SMHI:s indelning beläget i huvudavrinningsområde 61 Norrström och avvattnas till Mälaren via delavrinningsområde Utloppet av Albysjön (Figur 11). Avvattningen kring Glömstadalen sker dock främst i sydostlig riktning mot delavrinningsområdets sydöstra hörn. Där samlas dagvattnet emellertid upp och leds i anlagd tunnel till Albysjön varför avrinningsområdets gränser sträcker sig längre österut än de naturliga ytvattendelarna.



Figur 11. Avrinningsområde Utloppet av Albysjön från SMHI. Utloppspunkten i rött ses i norr.

Om bortledningen av dagvatten från Glömstadalens sydöstra hörn inte beaktas fås en annan bild av ytvattendelarnas läge i området. Baserat på topografiska data och antaganden om hur strömning sker, exempelvis att den alltid är i den brantaste riktningen, har Tyréns identifierat flera större och mindre ytvattendelare i området med programmet ArcHydro (Figur 12). Den ytvattendelare som ringar in Glömstadal (i mörkare gult) fördelar strömningen antingen mot Albysjön och Mälaren eller i sydöstlig riktning mot sjön Ormlången. Där denna ytvattendelare går över höga bergsryggar med ytligt berg antas att yt- och grundvattendelare sammanfaller väl. Där den korsar dalgångar är grundvattendelarens läge dock mer osäkert.



Figur 12. Beräknade avrinningsområden och flödeslinjer i ArcHydro (Tyréns, 2017).

I Figur 12 ses även de strömningsriktningar som kan förväntas baserat på topografin. Dessa stämmer väl överens med de riktningar som analysen av grundvattennivåer i området gett.

3.6 ANDRA VATTENINTRESSEN I OMRÅDET

Enligt SGU:s brunnsarkiv finns en stor mängd brunnar inom utredningsområdet, främst koncentrerade till bostadsområdena i Glömsta, Kästa och Tullinge (Figur 8). De flesta av brunnarna är bergvärmeanläggningar men några dricksvattenbrunnar och brunnar med okänd användning förekommer i Glömsta. Vilket uttag som sker ur dricksvattenbrunnarna är inte känt.

Inom utredningsområdet finns även två nedlagda torrlägningsföretag, Glömsta Tf och Glömsta-Flemingsberg Tf. Det huvuddike som tillhört företagen och som sträcker sig genom hela dalen, Glömstadiket, underhålls dock fortfarande. Flera mindre öppna diken ansluter också till Glömstadiket från norr och söder. På grund av det mäktiga lerlagret i dalen är det inte känt

i vilken utsträckning flödet i Glömstadiket är kopplat till det underliggande grundvattenmagasinet.

Ytterligare vattenverksamhet i området är en bergtunnel som leder dagvatten från Glömstadalen till Albysjön. Då information kring tunneln är säkerhetsklassad har den inte kunnat tas hänsyn till i detta arbete.

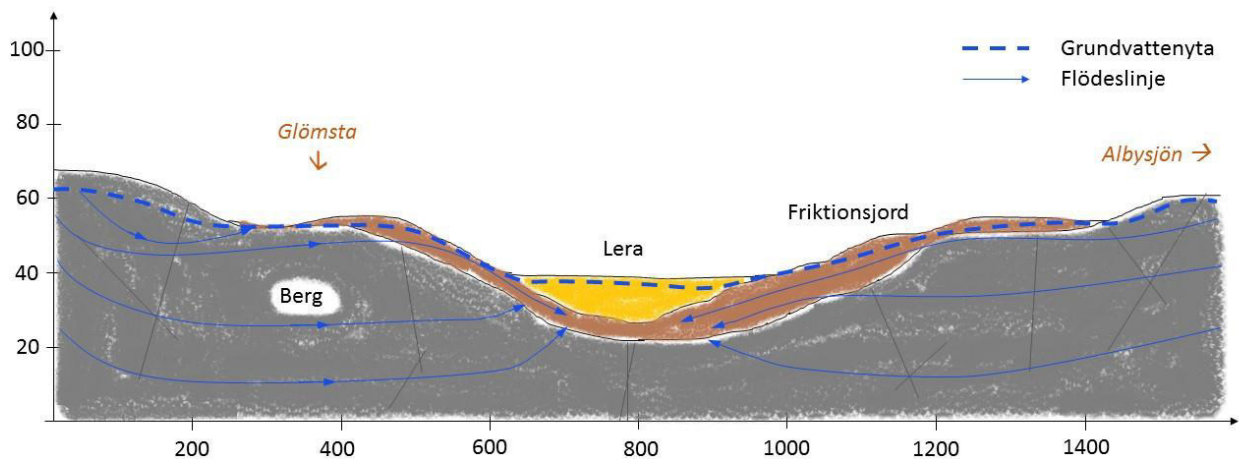
4. METODIK FÖR MODELLERING AV TUNNELNS PÅVERKAN

Den metodik som tillämpats för att undersöka påverkansområdet längs en tvärsektion till Glömstatunneln kan beskrivas utifrån från tre steg; upprättandet av en konceptuell modell, bearbetandet av data och framtagandet av en tvärsektion, samt numerisk grundvattenmodellering med och utan tunnel. Därtill utfördes testmodelleringar som vägledning inför den platsspecifika modelleringen och modelleringar med förändrade modellantaganden för att studera hur påverkansområdets utbredning förändrades. Alla modelleringar utfördes för stationära förhållanden.

Påverkansområdet definierades i detta arbete som det område där grundvattennivån avsänks mer än fem centimeter, med avsikten att få en uppfattning om den nästintill totala påverkan på grundvattensystemet i området. Inom konsultbranschen är det dock vanligare att avgränsa påverkansområdet till det område där avsänkningen är mer än 0,3 meter i jord eller 1 meter i berg, vilket bland annat användes i projekten Västlänken och Förbifart Stockholm (Berzell, 2011; Sundkvist och Wallroth, 2016). Dessa gränser tillämpas eftersom grundvattennivån fluktuerar naturligt inom sådana intervall och därmed gör det svårt att urskilja anläggningens påverkan.

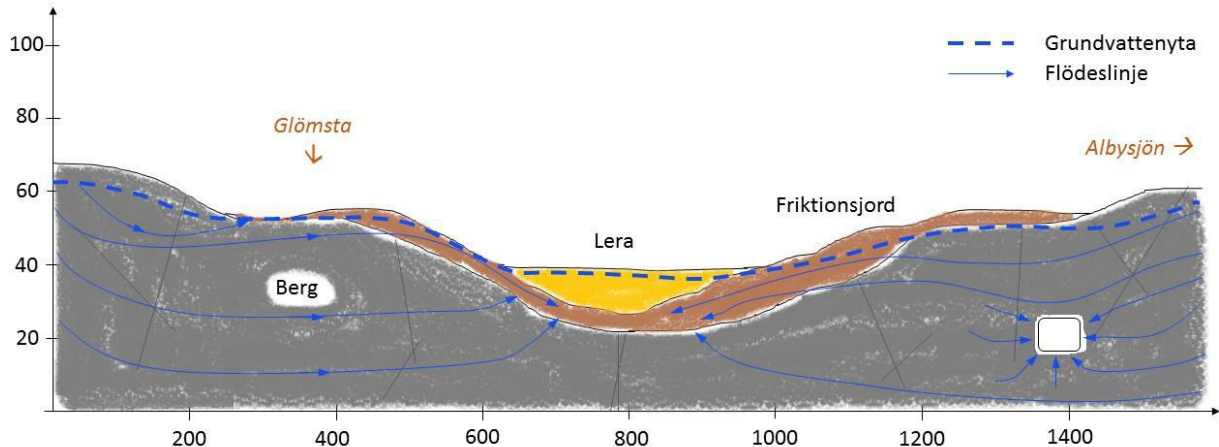
4.1 KONCEPTUELL MODELL

Baserat på data som återgetts under avsnittet *Områdesbeskrivning* togs två konceptuella modeller fram för en typisk tvärsektion ortogonal mot Glömstatunneln. Den första modellen (Figur 13) beskriver förhållandena innan tunneln byggs och grundvattenytan förväntas då följa topografin väl. Flödet antas ske i riktning mot de centrala delarna av dalgången via den vattenförande friktionsjorden, som i dalen överlagras av lera. Flödet i berget har approximerats som för ett poröst medium men i själva verket följer det sprickornas väg. Majoriteten av flödet antas ske i friktionsjorden. Från mitten på dalgången förväntas grundvattnets flödesriktning vridas 90 grader vilket innebär att flödet istället sker in i bild, under lerlagret, och följer dalgångens fortsatta utbredning.



Figur 13. Konceptuell modell för en typisk tvärsektion ortogonal mot tunneln i opåverkat stadie. Grundvattenytan ses som en streckad linje och antas följa topografen. Flödet ses som heldragna linjer och antas ske i riktning mot dalgången och under lerlagret. Grundvattnet förväntas sedan fortsätta flöda rakt in i bild längs med den spricka som ses mitt i dalgången.

Den andra konceptuella modellen (Figur 14) beskriver förhållandena efter konstruktion och tätning av tunneln. Då antas grundvattenytan ovan tunneln ha avsänkts något på grund av det inläckage som nu sker i tunneln. Återigen är berget approximerat till ett poröst medium och i det verkliga fallet kan antas att flödet till tunneln endast följer de sprickor som sträcker sig dit. Påverkan från tunneln förväntas vara lokal, baserat på den teori som återges i kap. 2.2.1, och därför ses ingen förändring på den vänstra sidan om dalgången.



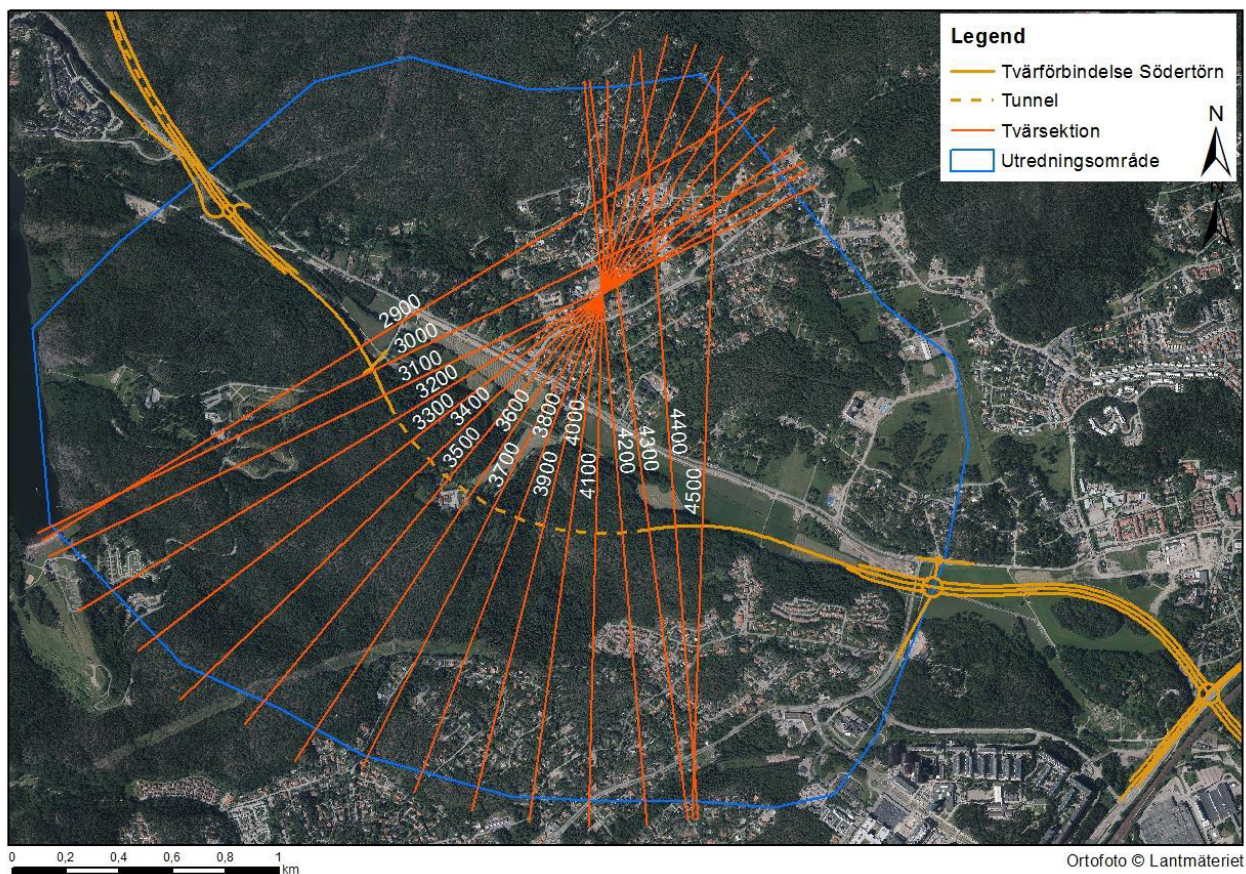
Figur 14. Konceptuell modell för en typisk tvärsektion ortogonal mot tunneln i påverkat stadie. Grundvattenytan ses som en streckad linje och antas vara något lägre över tunneln jämfört det opåverkade stadiet. Flödet ses som heldragna linjer och antas ske i riktning mot dalgången men lokalt även mot tunneln. Som innan förväntas grundvattenflödet fortsätta in i bild mitt i dalgången.

4.2 BEARBETNING AV DATA OCH FRAMTAGANDE AV TVÄRSEKTION

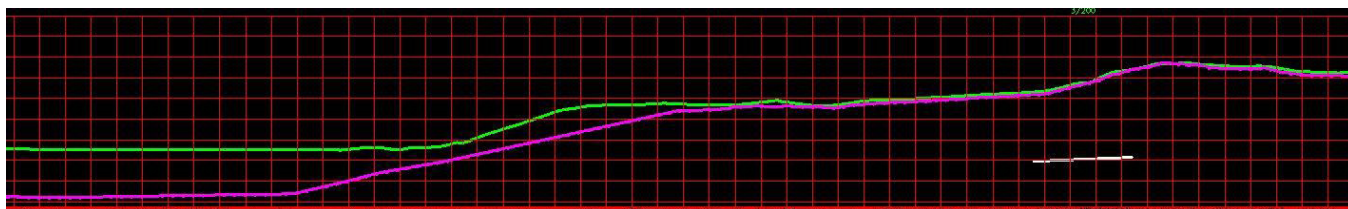
I projektet Tvärförbindelse Södertörn har tredimensionella modeller av markytan och bergytan skapats för att användas i olika sammanhang. Markmodellen har tagits fram med data från laserskanningar gjorda av Tyréns, berörda kommuner och Lantmäteriet beroende på avståndet från tunneln. Bergmodellen har skapats utifrån utförda bergssonderingar och data från SGU:s brunnarsarkiv vilket innebär att den endast har god upplösning kring tunnellinjen där majoriteten av sonderingarna skett. För att begränsa storleken på mark- och bergmodellen, som sträcker sig längs hela Tvärförbindelse Södertörn, valdes ett utredningsområde kring Glömstatunneln (Figur 15) vilket modellerna klipptes efter. Utredningsområdets gräns sattes längs tydliga hydrauliska gränser, likt Albysjön, och där sådana inte fanns på sådant avstånd att tunnelns effekt på grundvattnet inte skulle kunna nå dit.

Eftersom modellering av multipla tvärsektioner längs tunnelsträckningen antogs vara nödvändigt för att utreda påverkansområdets utbredning kring den fullständiga tunneln upprättades sådana i syfte att förbereda för vidare modellering. Detta gjordes genom att i programmet AutoCAD Civil 3D först skapa en arbetsyta dit mark- och bergmodellen importerades tillsammans med tunnelns läge. Med hjälp av en inbyggd funktion i programmet placerades sedan tvärsektionerna ortogonalt mot tunnellinjen och med hundra meters mellanrum. Tvärsektionernas läge sett ovanifrån kan ses i Figur 15.

I AutoCAD plottades tvärsektionerna också sett i genomskärning, vilket gav bergytans och markytans variation längs varje sektion. Figur 16 visar en zoomad bild av den exempelsektion (sektion 3200), som valdes ut för modellering. I figuren ses markytan i grönt, bergytan i lila och vägbanans läge inuti tunneln i vitt. Generellt hade alla tvärsektioner liknande utseende och sektion 3200 valdes ut på grund av sitt läge som den första med tunnel räknat från vänster (sektion 2900 och 3200 är utanför tunnelns sträckning). De resterande tvärsektioner som skapades ämnas användas i vidare modellering för att bestämma påverkansområdet kring hela tunneln, vilket sker utanför detta arbete.



Figur 15. Utredningsområdet kring tunneln i blått och tvärsektionernas läge ovanifrån i rött. Tvärsektionerna är orienterade ortogonalt mot tunneln och med 100 meters intervall.



Figur 16. Zoomad bild på tvärsektion 3200 från AutoCAD. Grön linje representerar markytan, lila bergytan och vit vägbans läge inuti tunneln. Koordinataxlar syns inte i bild men anger höjd- och längdskala i meter.

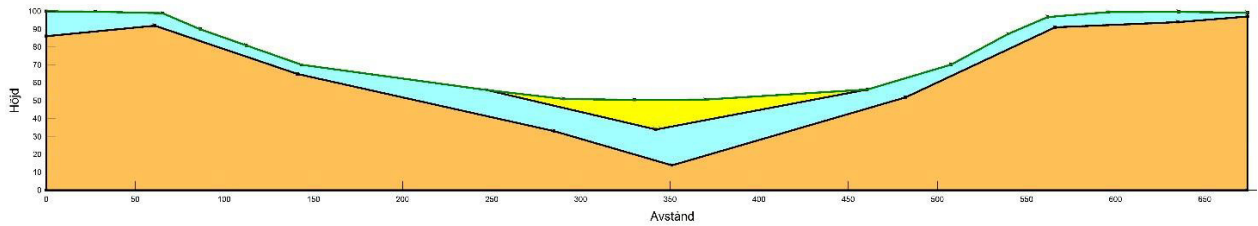
4.3 ALLMÄN METODIK VID MODELLERING I SEEP/W

Den numeriska modelleringen av grundvattenflödet utfördes i programvaran SEEP/W (GEO-SLOPE, 2016). I detta avsnitt beskrivs den allmänna metodiken för att skapa en modell i SEEP/W. Framförallt krävs tre steg, att domänen ritas upp med hjälp av polygoner och diskretiseras i numeriska element, att varje polygons materialegenskaper anges och att minst ett randvillkor för den hydrauliska potentialen ansätts.

All information om SEEP/W som återfinns i detta avsnitt kommer från den tekniska beskrivningen av programmet (GEO-SLOPE, 2015) om inte annat anges.

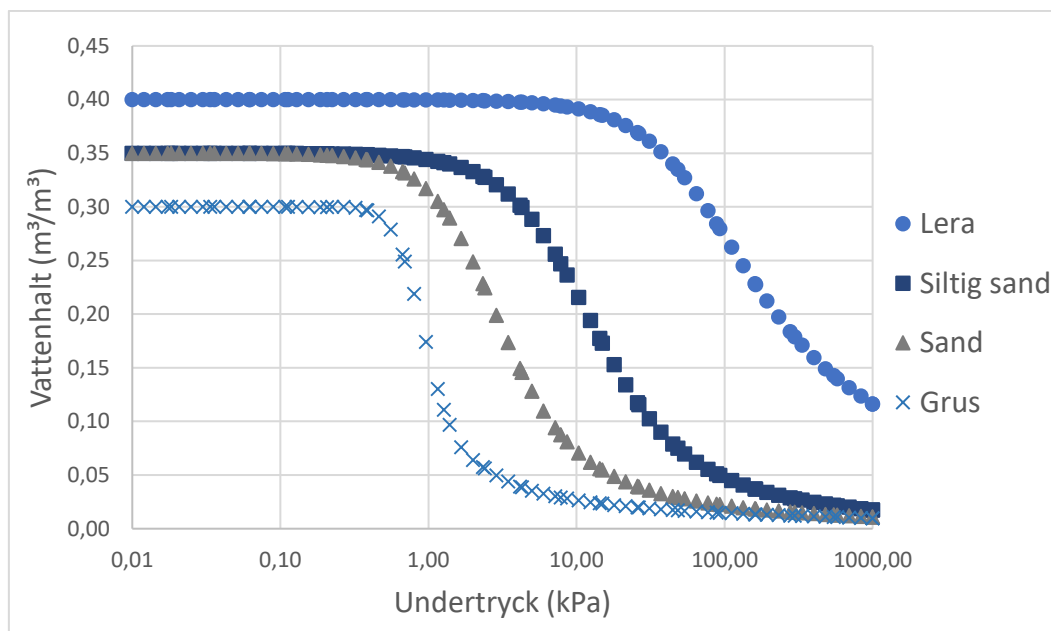
4.3.1 Domän och materialegenskaper

Modelldomänens struktur kan antingen ritas på fri hand eller importeras färdig från AutoCAD om sådan data finns. Domänen byggs upp av polygoner i valfri form, vanligen så att varje geologisk formation utgör en egen polygon, se exempel i Figur 17.



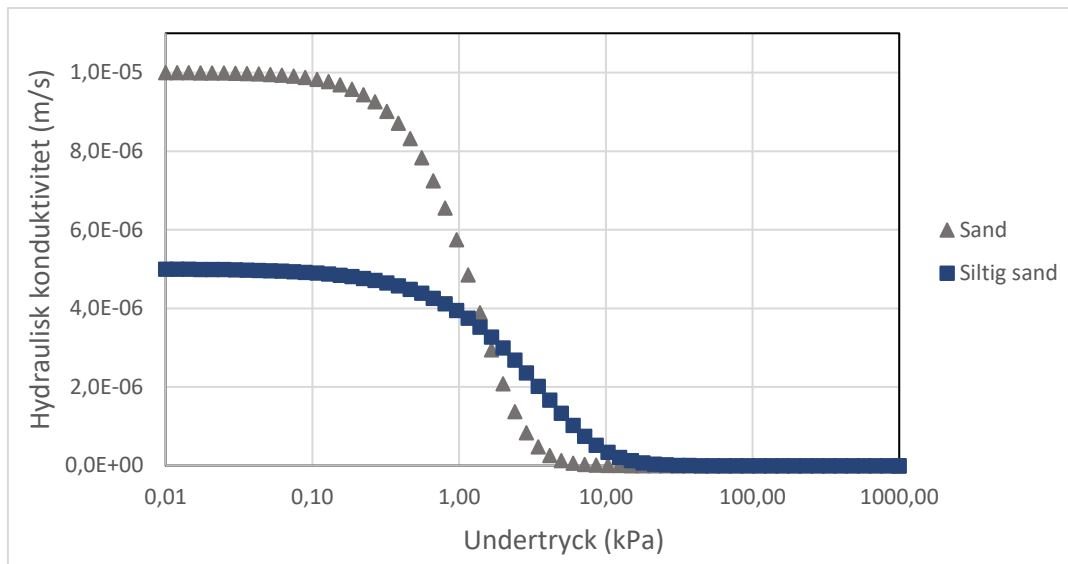
Figur 17. Exempel på hur polygoner kan ritas i SEEP/W för att representera en dalgång med olika jordlager. Varje färg/polygon representerar ett specifikt material.

Om modellering ska göras för både omättat och mättat flöde, vilket rekommenderas för att få ett noggrannare resultat, måste materialens egenskaper definieras som funktioner av tensionen. Detta görs genom att för varje material skapa en vattenbindningskurva och en funktion för den hydrauliska konduktivitetens beroende av tensionen. I SEEP/W finns inbyggda funktioner för att göra detta på ett enkelt sätt. Vattenbindningskurvan kan skapas med hjälp av van Genuchten (1980) eller Fredlunds och Xings (1994) ekvation om de formparametrar som behövs är kända för materialet, eller så kan kurvan bestämmas utifrån den hos ett antal förprogrammerade exempelmaterial. Exempelvis finns redan typiska vattenbindningskurvor för lera, sand och grus i programmet (Figur 18) och när en sådan väljs behöver endast porositeten hos materialet anges.



Figur 18. Vattenbindningskurvor baserade på data från några av de exempelmaterial som finns i SEEP/W. Exempelvärden för maximal vattenhalt (porositet) har tagits från litteraturen.

Den hydrauliska konduktivitetens funktion skapas baserat på vattenbindningskurvan och utifrån antingen van Genuchten eller Fredlund och Xings metod. Här behöver inga formparametrar anges, endast den mättade hydrauliska konduktiviteten hos materialet. Som kan ses i Figur 19 är det möjligt att det material med högst konduktivitet varierar mellan olika tensioner.



Figur 19. Funktioner för hydraulisk konduktivitet baserade på data för exempelmaterialen sand och siltig sand i SEEP/W. Mättad hydraulisk konduktivitet har angetts utifrån litteraturvärden och i liknande storleksordning för att lättare kunna jämföra kurvorna.

4.3.2 Randvillkor

Som i alla numeriska modeller krävs att den hydrauliska potentialen anges i minst en punkt för att programmet ska kunna lösa den grundläggande ekvationen. Om inget annat anges antas det att inget flöde får ske över den aktuella randen. För den övre gränsen används fri grundvattenyta som rand. De randvillkor som annars är tillgängliga i SEEP/W är specificerad hydraulisk potential (Dirichlets randvillkor), specificerad tryckpotential (Dirichlets randvillkor) och specificerat flöde (Neumanns randvillkor). När specificerat flöde anges finns också möjlighet att välja potentiell läckageyta (potential seepage face) som randvillkor. Villkoret innebär att randen är potentiellt läckande och att detta undersöks efter varje körning. Om grundvattennivån ligger över randen startas en ny körning där den hydrauliska potentialen sätts lika med lägespotentialen ($h=z$) längs randen vilket oftast betyder att allt vatten ovanför dräneras. Om grundvattenytan ligger under randen efter körningen händer dock ingenting.

4.3.3 Övriga moment

Ytterligare steg, likt diskretisering av mesh och justering av under-relaxation-parametrar är också möjliga för att få en noggrannare respektive stabilare modell. Programmet använder en inbyggd funktion för att generera ett funktionsdugligt mesh men användaren kan själv ange den generella storleken hos alla element i domänen samt välja ut områden där elementens storlek görs mindre.

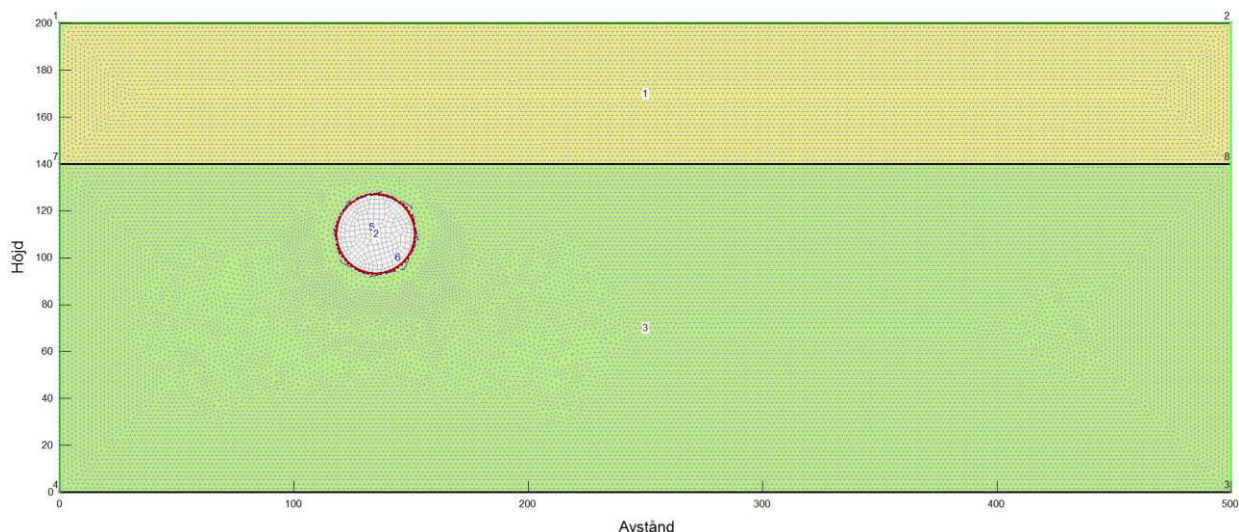
Under-relaxation är ett sätt att få en konvergerande lösning när materialegenskaperna har komplicerade olinjära funktioner. Komplexa funktioner kan exempelvis uppstå i den omättade zonen där konduktiviteten kan variera flera tiopotenser över små tryckintervall. Genom under-relaxation försöker materialegenskapernas variation mellan iterationer att mildras. Detta ger ett stabilare förlopp mot en konvergerande lösning.

4.4 TESTMODELLERINGAR

Inför modelleringen av de platsspecifika förhållandena kring Glömstatunneln gjordes testmodelleringar för enkla, schematiska förhållanden för att lära känna modelleringsprogrammet och studera olika parametrars inverkan på lösningen. I den första simuleringen modellerades en tunnel i syfte att undersöka användbara randvillkor kring tunnelväggen och programmets lämplighet för tunnelmodellering. I den andra simuleringen modellerades den konceptuella modellen för Glömstadalen för att undersöka vilka yttre randvillkor som kunde användas i och med avsaknaden av tydliga hydrauliska gränser i området. Resultaten presenteras i kap. 5.1 och användes som vägledning i den platsspecifika modelleringen.

4.4.1 Tunnelexempel

I denna simulering undersöktes hur en tunnel påverkar systemet utifrån val av randvillkor, hydraulisk konduktivitet och tunneldjup. Den ursprungliga domänen och parametrarna baserades på ett modelleringsexempel från GEO-SLOPE (GEO-SLOPE, u.å.). Exemplet består av en enkel rektangulär modell i två lager med en tunnel i det nedre lagret (Figur 20). Som randvillkor längs den högra och vänstra sidan användes samma specificerade hydrauliska potential för att generera en plan grundvattenyta i en situation utan tunnel. Som randvillkor i botten och på toppen användes programmets förval, inget flöde respektive grundvattenytan som rand. Ingen grundvattenbildning applicerades. Diskretiseringen av domänen gjordes med 2 m stora element.



Figur 20. Modelldomän för simulering av tunnel. Det övre lagret modellerades som en siltig sand och det nedre som berg. Tunneltaket ligger här 13m under det övre lagret.

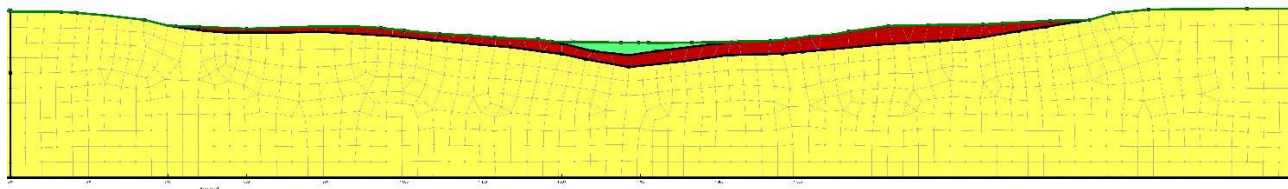
Initialt placerades tunneltaket 13 m under det övre lagret, som valdes till en siltig sand med porositeten 0,35 och konduktiviteten $1 \cdot 10^{-5}$ m/s. Det nedre lagret modellerades som berg med porositeten 0,01, en vattenbindningskurva motsvarande grus och konduktiviteten $1 \cdot 10^{-8}$ m/s. Lämpligheten hos valet av grus som exempelmaterial diskuteras vidare i kap 6.2. Ingen tätning kring tunneln modellerades. De simuleringar som utfördes var:

- Tryckpotentialen satt till noll som randvillkor längs tunnelväggen ($h=z$)
- Randvillkoret potentiell läckageyta (potential seepage face) längs tunnelväggen
- Högre konduktivitet ($1 \cdot 10^{-7}$ m/s) hos berget

- d) Mäktigheten hos det övre lagret minskad till 14 m. Innebär att grundvattenmagasinets tjocklek i det övre lagret minskas från 50 meter till 4 meter. Tunneln är dock på samma avstånd från sandlagret.

4.4.2 Konceptuell modell för Glömstadalen

I simuleringen undersöktes vilka yttre randvillkor som var lämpliga att senare använda i den platsspecifika modellen. Den konceptuella modellen för Glömstadalen användes därför som utgångspunkt för domänens utseende (Figur 21).



Figur 21. Modellområde för simulering av olika randvillkor. Berg ses i gult, friktionsjord i rött och lera i grönt.

Tre simuleringar utfördes, där de två första berörde randvillkoren längs höger och vänster sida. För de ränder där inga randvillkor angivits användes programmets inbyggda (no flow). De två första simuleringarna var:

- e) Specificerad hydraulisk potential längs höger och vänster sida för att motsvara en grundvattennivå i markytan.
- f) Inget flöde över höger rand för att motsvara en vattendelare, specificerad potential till vänster.

Inför valet av den tredje simuleringens utformning, fall g), fördjupades i hur den lägre grundvattennivån i dalgången och grundvattenflödet i riktning ut ur modellen där, bättre skulle kunna representeras i modellen. Ingen distinkt hydraulisk gräns är tillgänglig, likt en sjö eller ett större vattendrag, och att specificera ett utflöde ur modellen skulle vara svårt då något sådant inte är känt. Att fixera grundvattennivån vid en känd nivå i dalen var inte heller ett alternativ eftersom tunnelns påverkan i modellen då skulle kunna bli förhindrad. Utifrån vetskapen om att grundvattnet under lerlagret i dalgången står under tryck vilket antagligen innebär att grundvattennivåerna vid lerlagrets ändar är vid eller över markytan valdes att testa randvillkoret potentiell läckageyta (potential seepage face) där. Med detta randvillkor fixeras inte heller grundvattenytan vilket gör det lämpligt för modellering av tunnelpåverkan. Det antogs dessutom att allt överskott av vatten dräneras bort av det avvattningssystem som finns i Glömstadalen. Den tredje simuleringen som utfördes var därmed:

- g) Specificerad hydraulisk potential längs sidorna och potentiell läckageyta (potential seepage face) i de två punkterna på markytan där friktionsjorden och lerlagret möts.

4.5 MODELLERING AV GLÖMSTATUNNELN

Modellering av grundvattenpåverkan från Glömstatunneln gjordes för en av de framtagna tvärsektionerna, exempelsektion 3200 i Figur 15. För att studera påverkan från tunneln skapades först en opåverkad modell över området som modellerades fram tills att en konvergerande och lämplig modell skapats. Därefter modellerades samma modell med tunneln och avsänkningen av grundvattenytan studerades. Påverkansområdet definierades som det område där grundvattennivån avsänktes mer än fem centimeter. Utifrån dessa modeller varierades också ett antal modellantaganden.

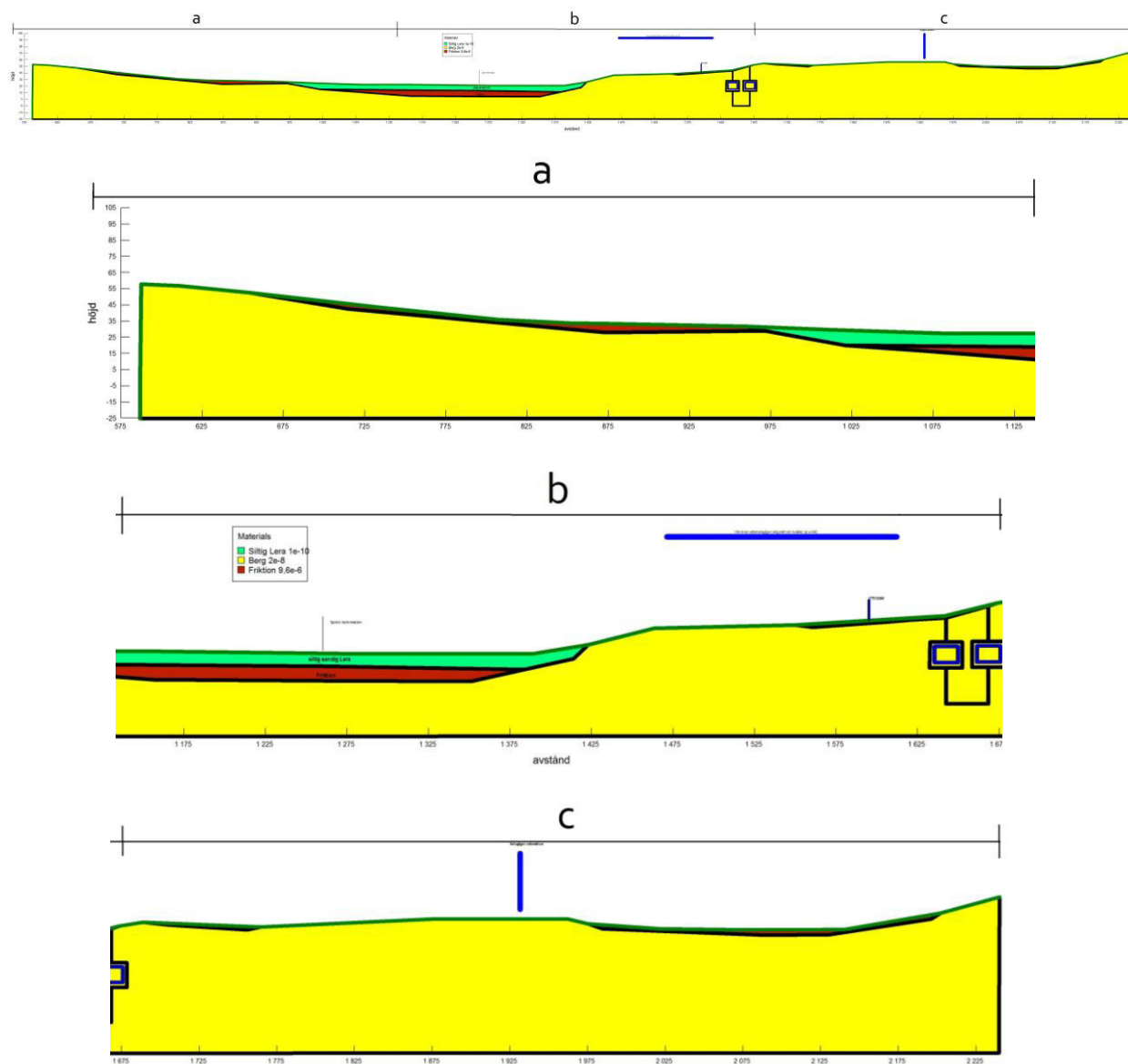
4.5.1 Uppbyggnad av modelldomänen

Tvärsektionen som skapats i AutoCAD importerades till SEEP/W som en bakgrundsbild till modelleringsytan. Modelldomänen ritades därefter ut för hand genom att följa linjerna för markytan och bergytan i bakgrundsbilden. Då upplösningen hos bergmodellen dock var begränsad, vilket innebar att bergytan stundtals gick över markytan (inte möjligt i verkligheten) för att sedan vara många meter under, studerades också parallellt SGU:s data över berghällar. I Glömstadalen och ovan tunneln ritades bergytan dock enligt bergmodellen. I modellens utkanter, där bergytan inte var vid markytan, användes data från SGU:s brunnarsarkiv för att uppskatta bergytans djup. Där sådan data inte fanns, vilket framförallt gällde området söder om tunneln, antogs ett djup på 2-3 meter under markytan.

Genom att studera protokoll från sonderingar som utförts i projektet och sonderingsdata från SGU (punkternas läge ses i Figur 8) bedömdes vilka jordarter som förekom längs med tvärsektionen. Utifrån detta ritades polygoner för friktionsjord i de områden där bergytan inte var vid markytan, och en polygon för den siltiga lera som överlagrar jorden i Glömstadalen. Även tunnarna ritades ut som egna polygoner enligt dimensioner angivna i kap. 3.1. För att representera tätningen ritades en tre meter tjock ram runt tunneln. I Figur 22 ses den uppritade domänen. Glömstadalen definieras här som det område där den siltiga leran hittas.

De större sprickzoner och deformationszoner som konstaterats i berget i området ritades inte ut som diskreta zoner i modellen. Detta på grund av att de har annan riktning än tvärsektionen och därför inte antas påverka resultatet i den tvådimensionella modellen. Konsekvenser av detta antagande diskuteras vidare i kap. 6.2.

Vidare markerades potentiella grundvattendelare ut baserat på den analys som gjorts i ArcHydro av Tyréns (kap. 3.5). Dessutom studerades topografin kring tvärsektionen (kap. 3.2) för att identifiera områden i modellen där grundvattnet lokalt antagligen strömmar i en annan riktning än tvärsektionens. Dessa markeringar ses som blå linjer ovan modellen i alla figurer men användes dock bara för att få en bild av den verkliga grundvattensituationen och var inte en del av modelleringen.



Figur 22. Den uppritade modelldomänen i SEEP/W. I gult ses berg, i rött friktionsjord och i grönt siltig lera. De två inramade kvadraterna utgör Glömstatunnelns två tunnelrör medan den linje som binder ihop tunnlarne ej har någon betydelse. Blå vertikal linje markerar en potentiell grundvattendelare och blå horisontell linje ett område där grundvattnet antagligen flödar i riktning ut ur bilden för att senare vika av mot dalgången. Glömstadalen definieras som det område där den siltiga leran hittas.

4.5.2 Materialegenskaper

Vattenbindningskurvor för de material som identifierats ur sonderingar längs tvärsektionen (siltig lera, friktionsjord och berg) skapades med hjälp av exempelmaterialen i SEEP/W. Det hade antagligen varit mer exakt att ange Van Genuchten's parametrar för att ta fram kurvorna, men sådan information saknades för materialen. För friktionsjorden valdes exempelmaterialet siltig sand eftersom friktionsjorden, utifrån data från jordartskartan (Figur 7), antogs vara en sandig morän. För att kunna modellera berget approximerades det till ett poröst medium. Då inget exempelmaterial finns för berg i SEEP/W valdes det initialt att modelleras som grus, baserat på den förväntade dräneringen av bergets sprickor (kap. 2.1.4). Eftersom ingen data

fanns tillgänglig rörande kornstorlekar eller porositet valdes dessa värden (Tabell 4) utifrån litteraturen.

Mättad hydraulisk konduktivitet för berg och friktionsjord valdes initialt till de medelvärden som beräknats utifrån utförda hydrauliska tester i området och data från SGU:s brunnarsarkiv (Tabell 4). För den siltiga lera användes ett värde från litteraturen. Då ingen information fanns om anisotropi valdes att inte ta hänsyn till detta i modelleringen.

När tunnlarna modellerades utgjorde de tomrum i modellen utan materialegenskaper. Tätningen kring tunnlarna gavs samma vattenbindningskurva som det omgivande berget, men initialt en hydraulisk konduktivitet på $1 \cdot 10^{-9}$ m/s.

Tabell 4. De egenskaper som initialt användes hos de olika materialen i modelleringen.

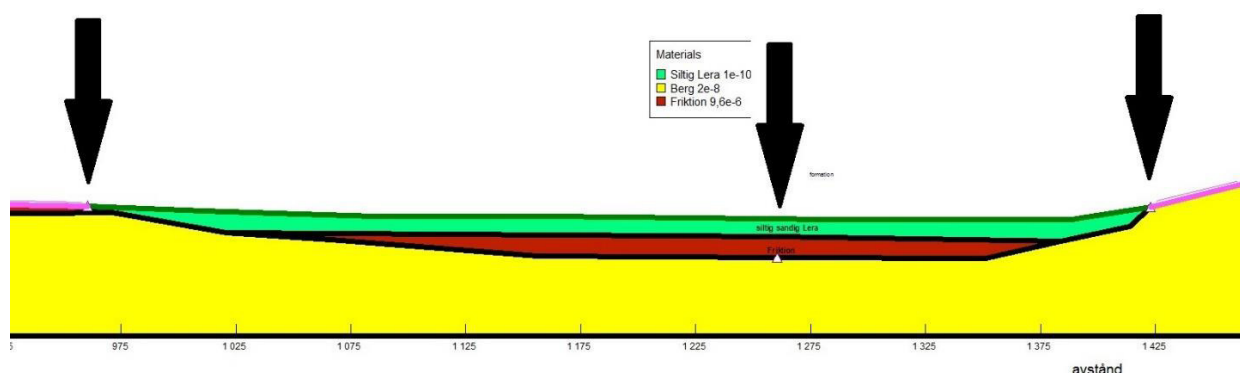
Material	Porositet	Exemplmaterial för vattenbindningskurva	Hydraulisk konduktivitet (m/s)
Berg	0,01	Grus	$2 \cdot 10^{-8}$ (a)
Friktionsjord	0,30	Siltig sand	$9,6 \cdot 10^{-6}$ (a)
Siltig lera	0,50	Siltig lera	$1 \cdot 10^{-9}$ (b)
Bergtätning	0,01	Grus	$1 \cdot 10^{-9}$ (c)

(a) Baserade på mätdata. (b) Baserat på det högre K-värdet som anges för lera av Domenico och Schwartz, (1998) p.g.a. inblandning av silt. (c) Baserat på användning av specialbaserad injektering enligt Eriksson och Stille (2005)

4.5.3 Randvillkor

Randvillkoren som användes baserades på resultaten från testmodelleringarna. Som randvillkor längs kortsidorna valdes inledningsvis specificerad hydraulisk potential motsvarande en grundvattennivå strax under markytan. I punkterna på markytan där lerlagret i Glömstadalen möter berg eller friktionsjord sattes potentiell läckageyta (potential seepage face) (Figur 23). Potentiell läckageyta sattes också inledningsvis i en punkt mitt i dalen i botten av friktionsjorden där en vattenförande spricka i berget förväntas finnas (se kap. 3.3.2) Detta villkor representerar även det flöde av grundvatten som förväntas ske ut ur sektionen längs med Glömstadalen. Som grundvattenbildning sattes initialt 150 mm/år längs hela markytan, förutom över lerlagret där ingen grundvattenbildning förväntas ske. Detta baserades på den lägsta grundvattenbildning som anges för morän i kap. 3.4.

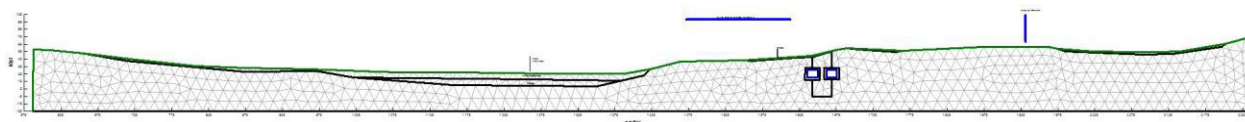
När tunnlarna modellerades användes också randvillkor kring tunnelväggen. Utifrån tidigare tester valdes att sätta tryckpotentialen till noll ($h=z$).



Figur 23. Pilar markerar punkter där randvillkoret potentiell läckageyta (potential seepage face) initialt placerats kring Glömstadalen.

4.5.4 Modellering av opåverkade förhållanden

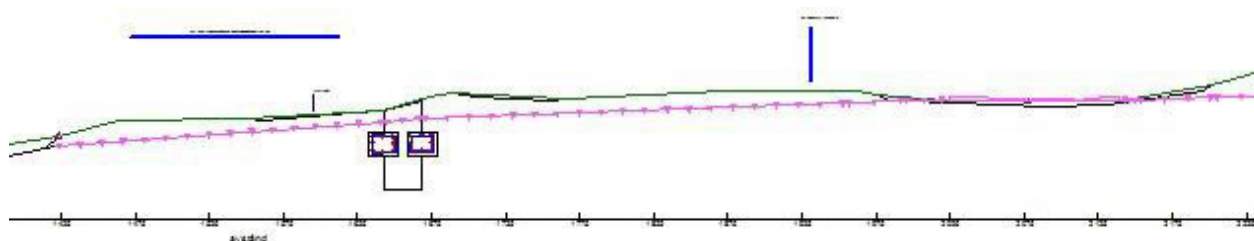
För att kunna studera tunnels inverkan på de hydrogeologiska förhållandena i området gjordes först steady-state-modelleringar för opåverkade förhållanden, utan tunnel. Modelleringen var en iterativ process där modellen kördes ett stort antal gånger med förändrade egenskaper för att hitta en lösning som både konvergerade och var lämplig. Lämpligheten baserades i detta fall enbart på om grundvattenytan var under markytan i områden i närheten av tunneln. Initialt användes ett grovt triangulärt mesh på 15 meter över hela domänen, se Figur 24. Resultatet från den första och andra modellkörningen, där modellen hade de egenskaper som beskrivits i ovan avsnitt men med och utan grundvattenbildningen, kan ses i kap. 5.2.1.



Figur 24. Den initiala diskretiseringen av domänen med triangulära element om 15 m.

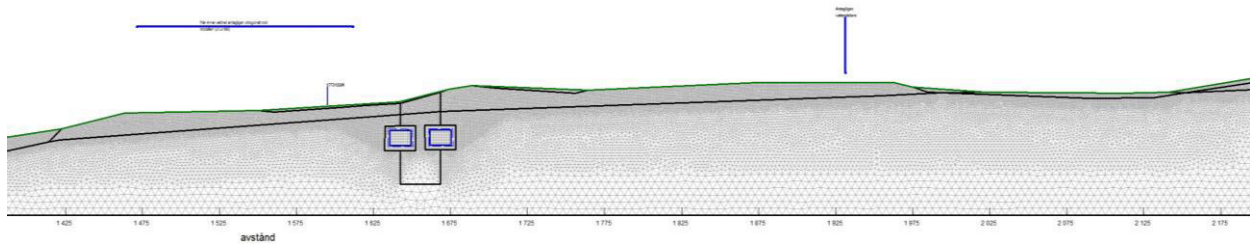
De förändringar och tester som gjordes var bland annat att öka konduktiviteten hos berget (både över hela domänen och indelat i olika områden), att förändra under-relaxationsparametrar, att införa grundvattenbildning direkt i den mättade zonen istället för vid markytan, att öka modelldjup och bredd, att minska elementens storlek och att ändra vissa randvillkor. Mer detaljer kring de förändringar som gjordes och resultaten av dessa hittas i Bilaga 2.

Gällande appliceringen av grundvattenbildningen direkt i den mättade zonen, vilket gjordes längs den linje som ses i Figur 25, var detta den enda förändring som fick modellen att helt konvergera. Den förväntade anledningen till detta diskuteras i kap. 6.2.1. Notera dock att denna förändring, som användes i alla påföljande simuleringar, innebar att modellering i princip bara skedde för mättat flöde (omättat flöde tilläts dock fortfarande).



Figur 25. Den linje där grundvattenbildningen applicerades ses i figuren i rosa.

Resultatet från den sista modellkörningen, som bedömdes ha en lämplig lösning, hittas i kap. 5.2.1. I den slutliga modellen användes ett triangulärt mesh med 1 meter långa element i det område där grundvattenytan förväntades vara och kring de planerade tunnlarna. Från dessa områden övergick elementens storlek gradvis till 5 meters längd vilket kan ses i



Figur 26. Den slutliga diskretiseringen av domänen. Kring tunnelarna och från markyta till förväntad grundvattennivå är elementen 1 m, vilket ses som de mörkare grå partierna i figuren. Från dessa områden ökar storleken hos elementen gradvis till 5 m. Det totala antalet element är 71731.

4.5.5 Modellering av tunnelpåverkan

Tunnelnars påverkan på de hydrogeologiska förhållandena i området modellerades i steady-state med en kopia av den slutliga modellen för de opåverkade förhållandena. Lösningen från de opåverkade förhållandena användes dock inte som initialvillkor eftersom detta inte kan användas i steady-state modellering i SEEP/W. Modellen modifierades först genom att tunnelarna gjordes till hålrum med randvillkoret $h=z$ längs tunnelväggen och genom att det tätande lagret gavs den hydrauliska konduktiviteten $1 \cdot 10^{-9}$ m/s. För att få en konvergerande lösning gjordes också justeringar av parametrarna för under-relaxation.

Under modelleringen användes en funktion i SEEP/W som beräknar flödet över en linje för att ta fram inläckaget till tunnelarna. I detta fall sattes linjen hela vägen runt respektive tunnel för att få med allt inflöde. För att bestämma påverkansområdet för tunnelarna gjordes en grafisk bedömning av skillnaden mellan grundvattenytans läge i den opåverkade och påverkade modellen. Resultatet ses i kap. 5.2.2.

4.5.6 Modellering med förändrade modellantaganden

Utifrån den slutliga modellen för de opåverkade förhållandena gjordes vidare förändringar av ett antal modellantaganden. För att få en översikt över förändringarna och deras resultat delades de in i olika fall. Varje fall modellerades både med och utan tunnel, och påverkansområdets utbredning studerades likt tidigare. Nedan följer en lista med de olika fallen.

1. Ökad grundvattenbildning från 150 till 200 mm/år eftersom den förväntade grundvattenbildningen i området är 150-225 mm/år. Gäller också i alla nedanstående fall.
2. Högersida hos modellerna förlängd med 270 meter då påverkansområdet som observerats nått hela vägen till höger rand. Gäller också i fortsatta fall.
3. Lägre hydraulisk konduktivitet hos tätningen runt tunnelarna för att motsvara en enklare injekteringsprocess ($K=1 \cdot 10^{-8}$ m/s).
4. Med randvillkoret potentiell läckageyta (potential seepage face) i en punkt vid markytan i den mindre dalgången till höger om tunnelarna. Detta eftersom att en liten bäck leder vatten i riktning ut ur modellen där. Gäller också i fortsatta fall.
 - a) När den hydrauliska konduktiviteten hos tätningen är $1 \cdot 10^{-9}$ m/s
 - b) När den hydrauliska konduktiviteten hos tätningen är $1 \cdot 10^{-8}$ m/s

5. Uppjusterad nivå där grundvattenbildningen appliceras för att bättre överensstämma med grundvattenytans läge. ($K=1 \cdot 10^{-9}$ m/s hos tätningen runt tunnlarna). Gäller också i fortsatta fall.
6. Utan hänsyn till den identifierade sprickzonen i Glömstadalen eftersom det inte är känt om den är vattenförande eller vilka trycknivåer som i sådana fall står över sprickan. ($K=1 \cdot 10^{-9}$ m/s hos tätningen runt tunnlarna).
7. Ändrad vattenbindningskurvan för berget genom val av annat exempelmaterial.
 - a) Med exempelaterialet sand
 - b) Med exempelaterialet silt

Resultaten från de olika fallen hittas i kap. 5.2.3.

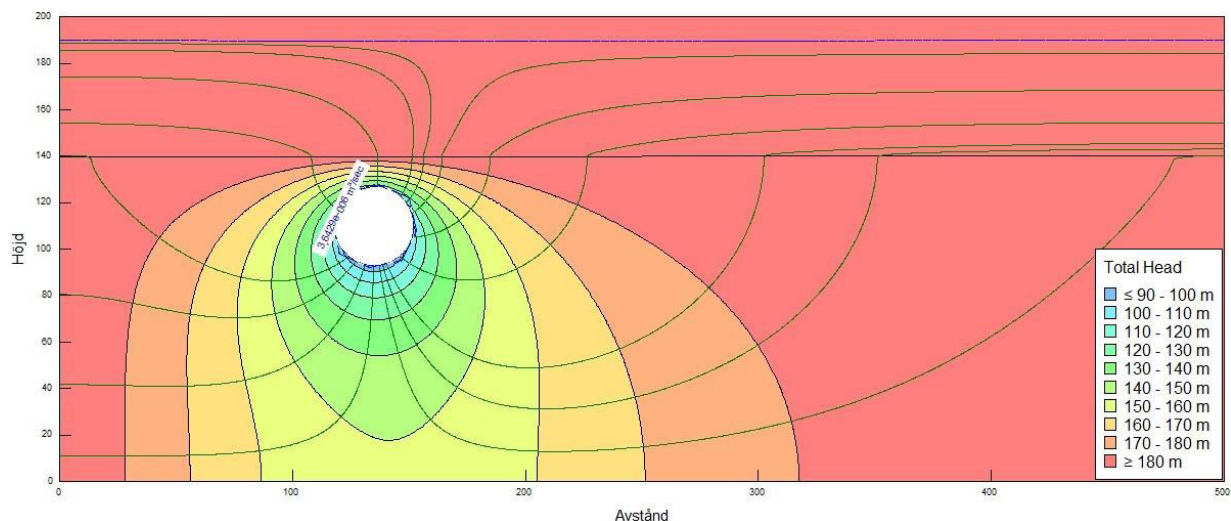
5. RESULTAT

5.1 TESTMODELLERINGAR

Testsimulering med tunnel gav information om det mest lämpliga randvillkoret att använda kring en tunnel, programmets användbarhet för tunnelmodellering samt vilka förändringar i grundvattennivåer som kan väntas i den platsspecifika modelleringen. Simulering utifrån den konceptuella modellen gav vidare information om passande randvillkor längs modellens ränder.

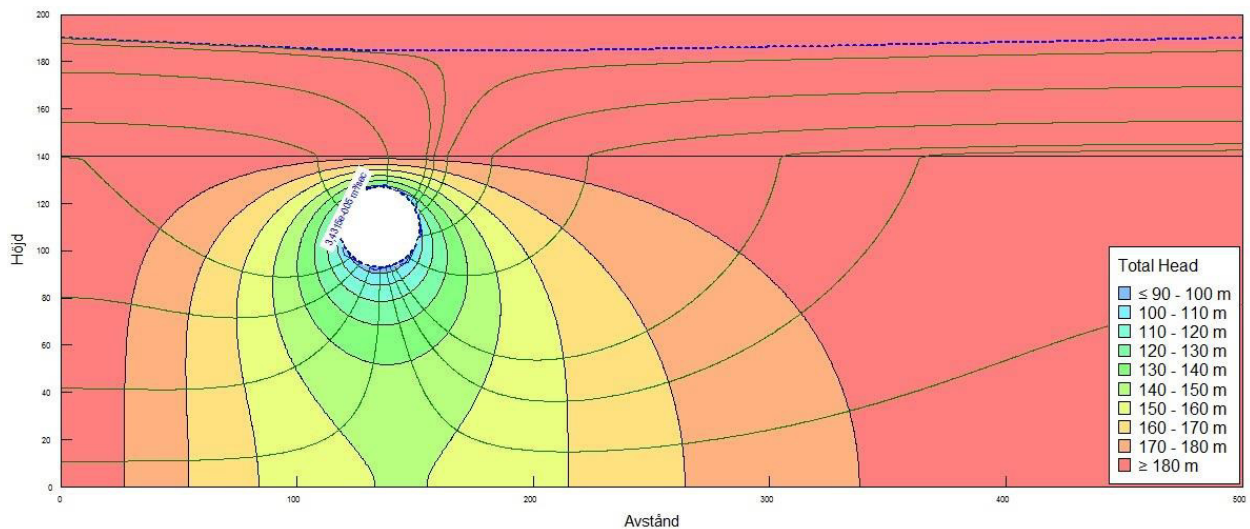
5.1.1 Tunnelexempel

Simulering enligt a) i kap 4.4.1, med tryckpotentialen satt till noll som randvillkor längs tunnelväggen, visade att ett flöde induceras i riktning mot tunneln (gröna linjer) (Figur 27). I figuren ses den hydrauliska potentialens variation från rött (hög potential) till blått (låg potential). Figuren visar att flöde sker i det övre lagret för att sedan vika av mot tunneln vid olika platser beroende på vilket djup flödet skett på. Vid närmare anblick ses att grundvattenytan (blå streckad linje) ovan tunneln sänks av omkring en halv meter.

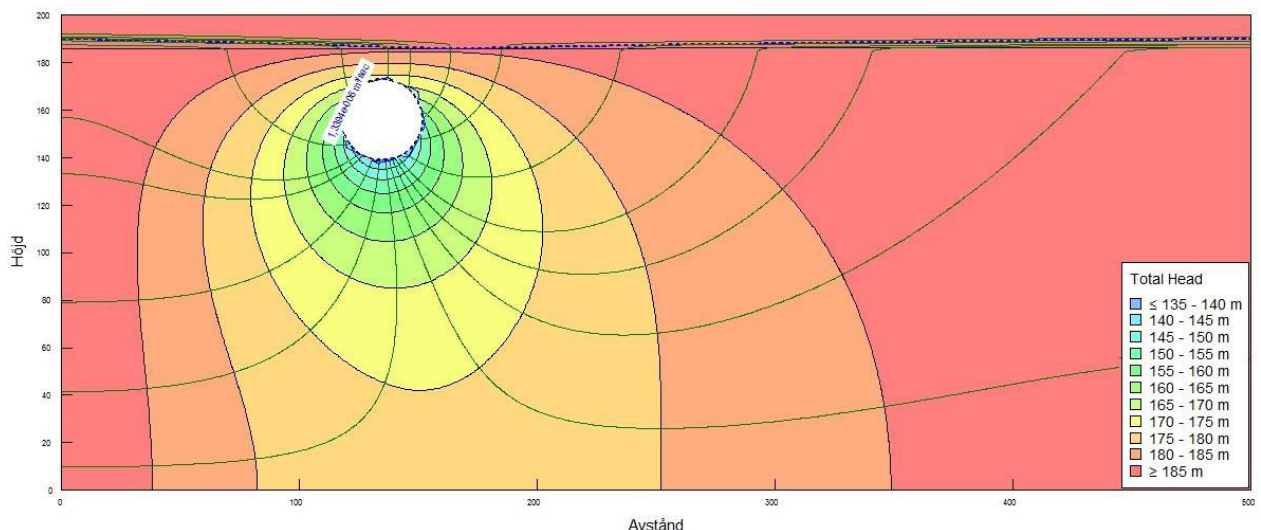


Figur 27. Visar den hydrauliska potentialens variation i testdomänen när tryckpotentialen är noll kring tunneln. Blått motsvarar låg potential och rött hög. Gröna linjer visar grundvattenflödet som ses böja av mot tunneln. Blå streckad linje i överkanten motsvarar grundvattenytan som här avsänks omkring en halvmeter ovan tunneln.

Vid simulering enligt b) i kap. 4.4.1, med potentiell läckageyta (seepage face) längs tunnelväggen, erhöles samma resultat som i a) (Figur 48 i Bilaga 1). Simulering enligt c), med en tiopotens högre konduktivitet hos berget, gav större påverkan på grundvattennivån (Figur 28). Grundvattenytan ovan tunneln sänks här av omkring sex meter. I figuren ses att det orangea området för potentialen sträcker sig till avståndet 335 m. Vid simulering enligt d), där mäktigheten hos det övre lagret minskats till 14 meter, avsänktes grundvattenytan rakt ovan tunneln med fyra meter (Figur 29). I denna modellering ses att tunneln är närmare grundvattenytan och att en stor del av flödet är i riktning mot tunnelns botten.



Figur 28. Visar den hydrauliska potentialens variation i testdomänen när bergets hydrauliska konduktivitet ökas från $1 \cdot 10^{-8}$ till $1 \cdot 10^{-7}$ m/s. Blått motsvarar låg potential och rött hög. Gröna linjer visar grundvattenflödet som tydligt böjer av mot tunneln. Blå streckad linje utgör grundvattenytan som här ses vara några meter lägre ovanför tunneln jämfört vid sidorna.

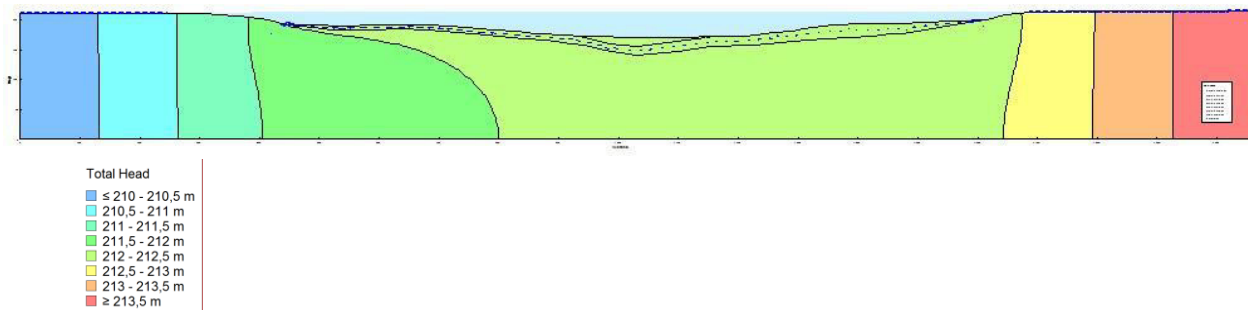


Figur 29. Visar den hydrauliska potentialens variation i testdomänen när det övre lagrets mäktighet minskas till 14 meter. Blått motsvarar låg potential och rött hög. Gröna linjer visar grundvattenflödet som är i riktning mot tunneln över i stort sett hela domänen. Blå streckad linje utgör grundvattenytan som framförallt sänks av strax till höger om tunneln.

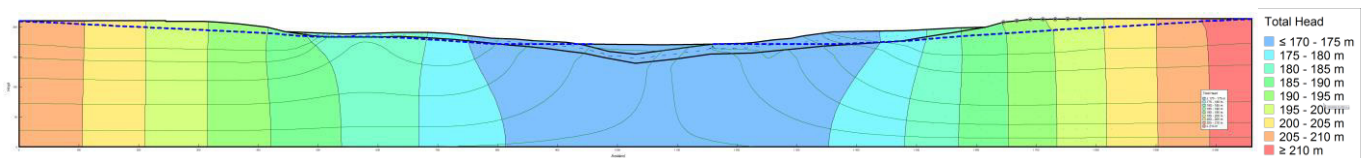
5.1.2 Konceptuell modell för Glömstadalen

Vid simuleringen med en domän byggd utifrån den konceptuella modellen och med randvillkoret specificerad hydraulisk potential längs både höger och vänster sida, enligt e), blev lösningen en linjär grundvattenyta med lutning så att strömning sker från höger till vänster i domänen (Figur 30). Observera att olika specificerade potentialer användes för höger och vänster sida. I figuren ses att grundvattenytan inte påverkas av dalgången.

När randvillkoret längs höger sida byttes ut för att istället motsvara en vattendelare, genom att sätta flödet till noll över randen (enligt f)), blev den hydrauliska potentialen konstant över domänen och grundvattenytan plan (Figur 49 i Bilaga 1). Vid modellering enligt g), där randvillkoret längs höger sida åter valts till specificerad potential och två punkter med potentiell läckageyta (potential seepage face) applicerades vid lerlagrets ändrar, erhöles en mer varierad grundvattenyta (Figur 31). Grundvattenflödet ses generellt vara i riktning mot dalgången och upp mot lagret av friktionsjord. Vid närmare granskning ses dock att flödet i friktionsjorden är riktat mot de båda punkterna där potentiell läckageyta definierats.



Figur 30. Visar den hydrauliska potentialens variation med hög potential i rött och låg potential i blått. Som randvillkor har specificerad potential angivits längs höger och vänster sida. Grundvattenflödet sker från hög till låg potential, därmed från höger till vänster. Grundvattenytan ligger högt ovanför markytan i dalgången och ser bara ut att bero av angivna potentialer längs höger och vänster sida.



Figur 31. Visar den hydrauliska potentialens variation med hög potential i rött och låg potential i blått. Förutom specificerad potential längs höger och vänster sida har två dränerande punkter angetts vid lerlagrets ändrar. Grundvattenflödet följer de gröna linjerna och är därmed i riktning mot dalgången och upp mot lagret av friktionsjord. Grundvattenytan varierar över domänen och är under markytan.

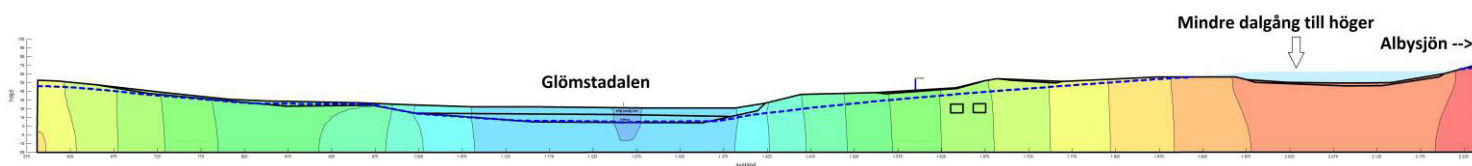
5.2 MODELLERING AV GLÖMSTATUNNELN

Vid modellering av grundvattenpåverkan från Glömstatunneln erhöles först en lösning till den opåverkade modellen. Detta resultat användes sedan för modellering med tunneln och för de olika fallen där modellantaganden förändrades.

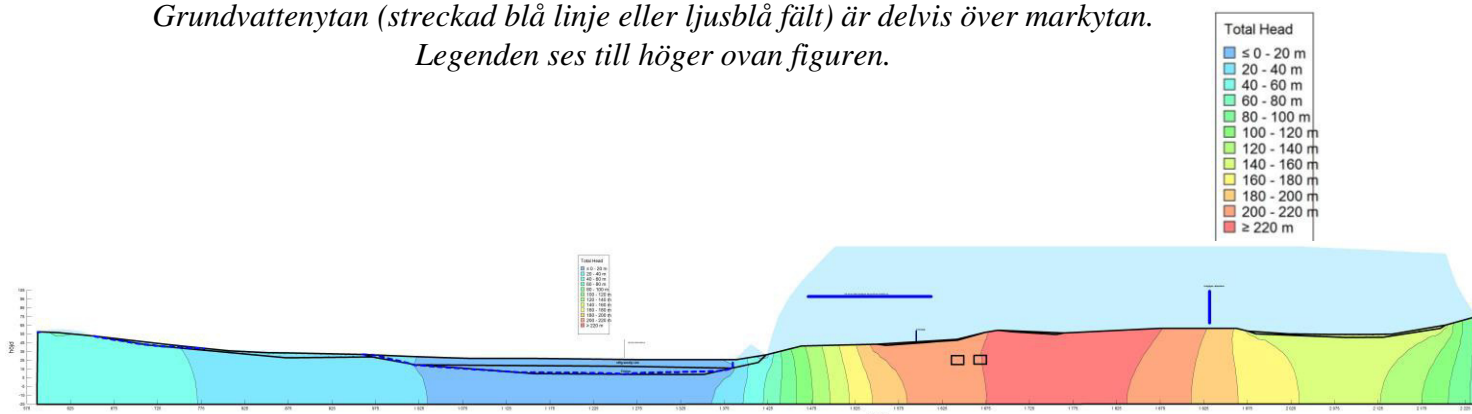
5.2.1 Modellering av opåverkade förhållanden

Modelleringen av de opåverkade grundvattenförhållandena kring Glömstatunneln med de randvillkor och beräknade medelkonduktiviteter som angivits i kap. 4.5.2 och 4.5.3 gav mindre lämpade resultat. Utan grundvattenbildning och med en grov mesh (15 m) visade modelleringen grundvattennivåer som låg både under och över markytan (Figur 32). Notera att även om tunnarna kan ses i figuren så är de inte delaktiga i modelleringen ännu. Grundvattenflödet är i riktning från modellens höger och vänster sida mot dalgången för att där vika av mot den punkt som definierats som en dränerande sprickzon.

När en grundvattenbildning på 150 mm/år lades till vid markytan sågs att stora översvämningar uppstod i området över de planerade tunnarna (Figur 33), vilket antas bero på låg konduktivitet i den omättade zonen och för få möjligheter till utflöde ur modellen. Den horisontella blå linje som ses i figuren, och i kommande figurer, representerar ett område där grundvattnet antagligen flödar ut ur modellen för att senare vika av mot Glömstadalen. Den vertikala blå linje som ses motsvarar en potentiell grundvattendelare men har ingen inverkan på resultatet.

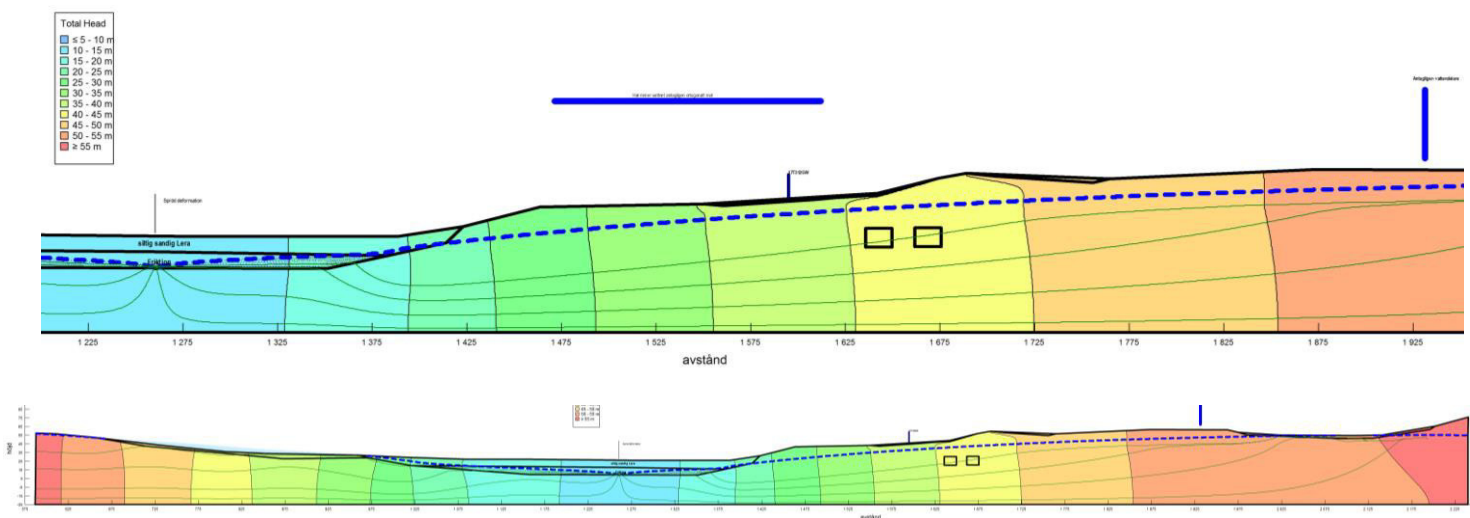


Figur 32. Modellering av opåverkade förhållanden utan grundvattenbildning. I figuren ses den hydrauliska potentialens variation från rött (hög potential) till blått (låg potential). Grundvattenytan (streckad blå linje eller ljusblå fält) är delvis över markytan. Legendan ses till höger ovan figuren.



Figur 33. Modellering av opåverkade förhållanden med grundvattenbildningen 150 mm/år. Stora översvämningar ses i området till höger om Glömstadalen. Legendan ses till höger ovan figuren.

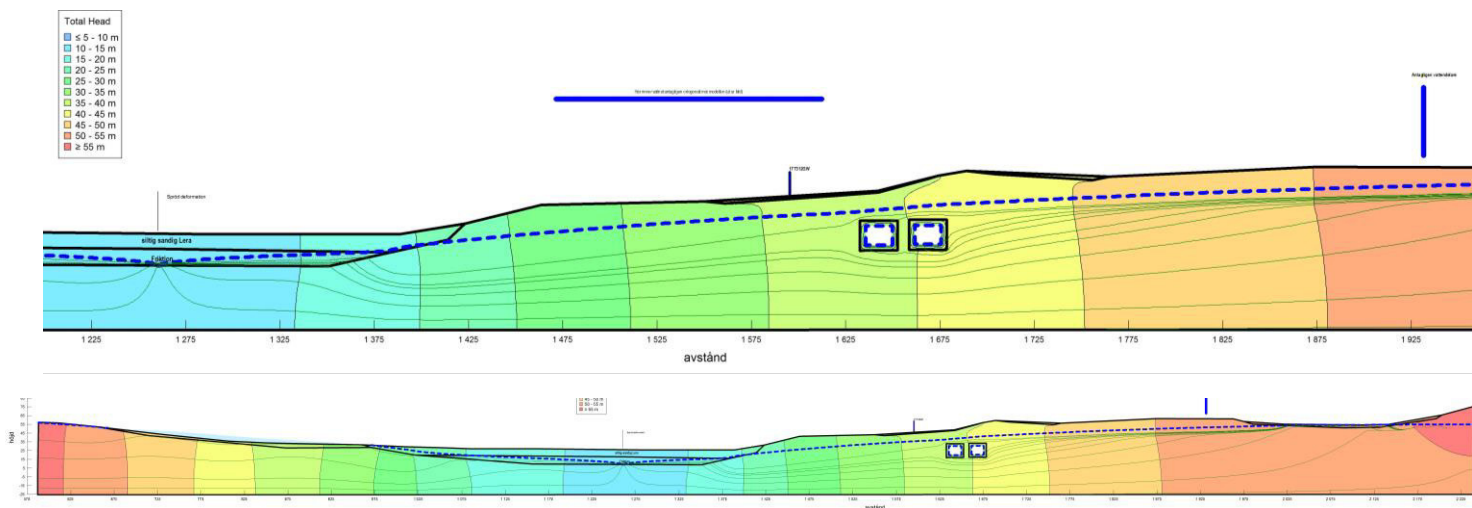
För att nå en konvergerande och lämplig lösning genomfördes ett antal olika förändringar och tester av parametrar och egenskaper hos modellen. Detaljer kring detta och de genererade resultaten hittas i Bilaga 2. Den slutliga lösning som hittades kan ses i Figur 34 nedan. Jämfört den inledande modellen har den slutliga modellen en lägre specificerad hydraulisk potential längs höger sida, grundvattenbildningen appliceras direkt i den mättade zonen istället för vid markytan och bergets hydrauliska konduktivitet har ökats till $7 \cdot 10^{-7}$ m/s. I figuren ses grundvattennivåer som är under markytan över hela domänen bortsett från ett område till vänster om Glömstadalen. I Glömstadalen når grundvattennivåerna knappt upp till lerlagret och avtar mot sprickzonen.



Figur 34. Modellerings av opåverkade förhållanden. Bergets hydrauliska konduktivitet har ökats till $7 \cdot 10^{-7}$ m/s, grundvattenbildningen appliceras i den mättade zonen och den specificerade potentialen längs höger rand är lägre. Grundvattenytan (streckad blå linje) är under markytan över i stort sett hela domänen.

5.2.2 Modellering av tunnelpåverkan

Utifrån den slutliga modellen, Figur 34, skapades en kopia som modellerades med tunnlar. Med en hydraulisk konduktivitet på $1 \cdot 10^{-9}$ m/s hos tätningen kring tunnarna och grundvattenbildningen fortsatt 150 mm/år observerades en lägre grundvattennivå (Figur 35) jämfört den opåverkade modellen (Figur 34). I Figur 35 ses att endast ett fåtal flödeslinjer slutar i tunnarna. Flera flödeslinjer viker istället av och rundar tunnarna. I ett område till höger om tunnarna, strax under grundvattenytan, ses också att många flödeslinjer går ihop. Vid närmare observation kan ses att grundvattenytan är mer än fem centimeter lägre i tunnelmodellen från sprickzonen i Glömstadalen och hela vägen till modellens högra sida. Det beräknade inläckaget till tunnarna hittas i Tabell 5 som Fall 0.

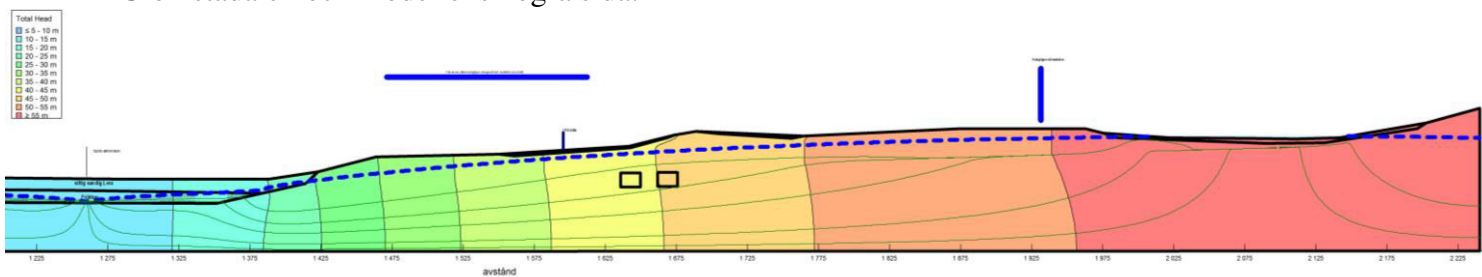


Figur 35. Modellering med tunnlar som omges av ett tätande lager med hydraulisk konduktivitet $1 \cdot 10^{-9}$ m/s. Endast ett fåtal flödeslinjer slutar i tunnelarna. I närheten av grundvattenytan till höger om tunnelarna ses ett område där många flödeslinjer går ihop.

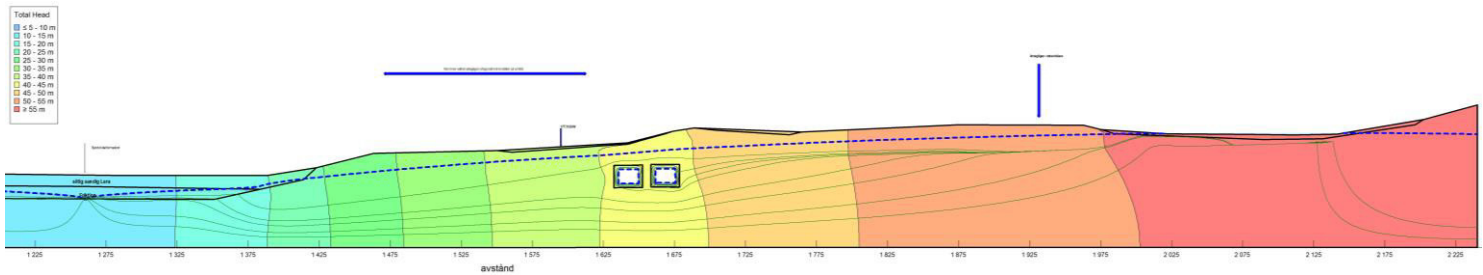
5.2.3 Modellering med förändrade modellantaganden

En sammanställning av de resulterade påverkansområdena och beräknade inläckaget till tunnelarna för detta avsnitt hittas i Tabell 5. Påverkansområdet som anges baseras på den längdskala som används i modellerna med 0 meter i modellens vänstra ände och 2240 meter i högra änden (2510 efter förlängning av modellen). Sprickzonen i Glömstadalen befinner sig vid avståndsmarkeringen 1260 m. Inläckagen som anges avser per meter tunnel.

I Fall 1 ökades grundvattenbildningen till 200 mm/år i både den opåverkade och påverkade modellen vilket gav högre grundvattennivåer ovan tunnelarna (Figur 36 och Figur 37). Även grundvattennivån i Glömstadalen ökade något. Skalan hos den hydrauliska potentialen är samma hos figurerna och jämförs ekvipotentiallinjerna ses att de vid modellering med tunnlar förskjuts något åt höger i området till höger om Glömstadalen. En jämförelse på nära håll av grundvattenytorna visar att påverkansområdet fortsatt sträcker sig mellan sprickzonen i Glömstadalen och modellens högra sida.



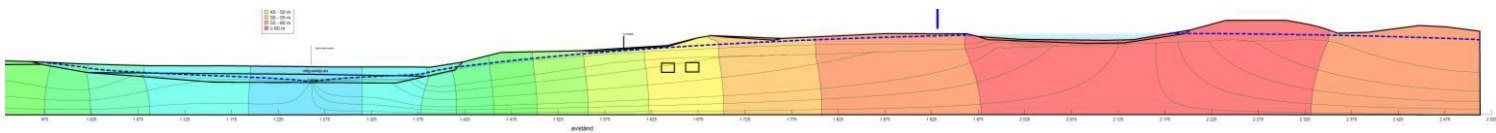
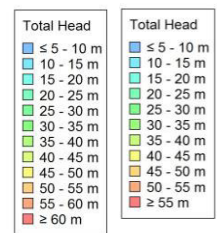
Figur 36. Modellering för opåverkade förhållanden och grundvattenbildningen 200 mm/år enligt Fall 1.



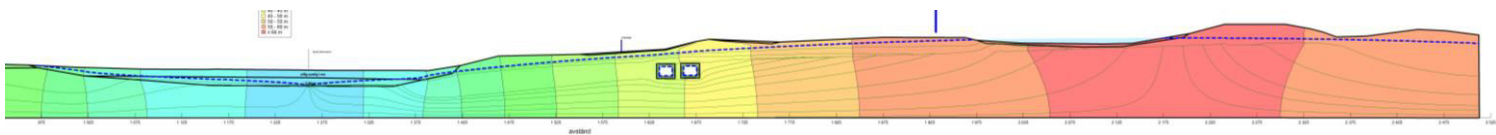
Figur 37. Modellering med tunnlar och grundvattenbildningen 200 mm/år enligt Fall 1.

I Fall 2 förlängdes högersidan hos modellen med 270 meter för att motverka att påverkan från tunnelarna sträcker sig hela vägen till den högra modellranden. Detta resulterade i en högre grundvattenyta i hela området till höger om sprickzonen i Glömstadalen för både den opåverkade (Figur 38) och påverkade modellen (Figur 39). I den mindre dalgången till höger ses att grundvattenytan är över markytan i båda figurerna. Jämförs den hydrauliska potentialen mellan figurerna ses att tunnelarna ger upphov till en förskjutning av ekvipotentiallinjerna till höger om Glömstadalen. Grundvattennivån avsänks mer än fem centimeter i området mellan sprickzonen i Glömstadalen och avståndsmarkeringen 2500 m vilket är ett större område än tidigare fall.

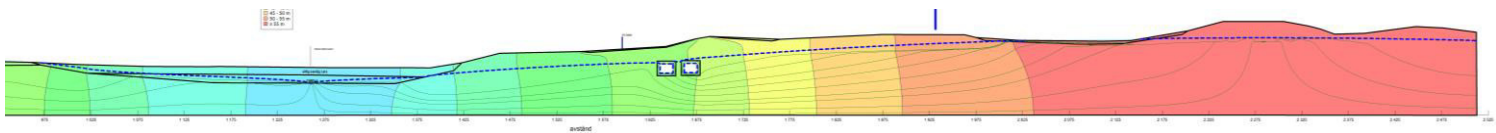
I Fall 3, där tätningen runt tunnelarna gavs den hydrauliska konduktiviteten $1 \cdot 10^{-8}$ m/s, observerades en avsänkning av grundvattenytan till tunneltaken (Figur 40). Påverkansområdet för tunnelarna blev i detta fall betydligt större, från avståndsmarkeringen 1090 m i vänstra delen av Glömstadalen hela vägen till modellens högra sida. Den vänstra legenden som ses i sidan tillhör Figur 38 och Figur 39, och den högra tillhör Figur 40.



Figur 38. Opåverkad modell som förlängts till höger. Grundvattennivå ovan markyta ses i mindre dalgång till höger. Tillhör Fall 2.

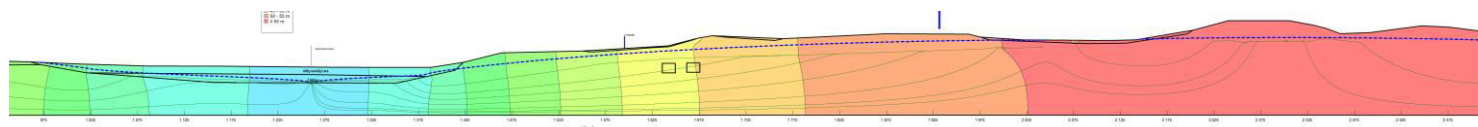


Figur 39. Modell med tunnlar som förlängts till höger. Tätning runt tunnelarna har den hydrauliska konduktiviteten $1 \cdot 10^{-9}$ m/s. Grundvattennivå ovan markyta ses i mindre dalgång till höger. Tillhör Fall 2.

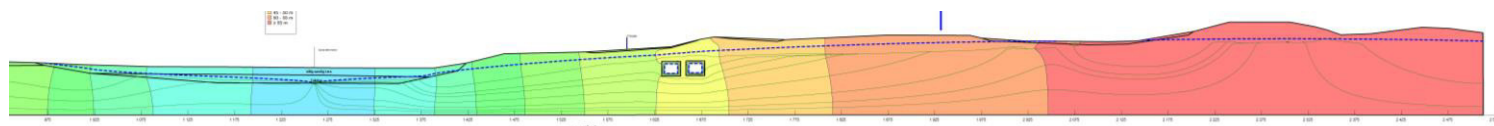


Figur 40. Modell med tunnlar som tätats motsvarande en hydraulisk konduktivitet på $1 \cdot 10^{-8}$ m/s. Grundvattenytan ses tangera tunneltaken. Tillhör fall 3.

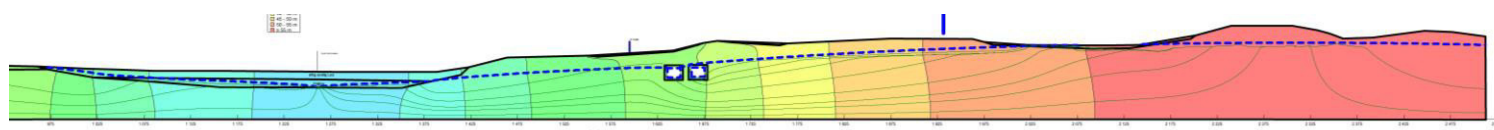
I Fall 4 modellerades ovanstående tre modeller med en dränerande punkt i den mindre dalgången till höger vilket resulterade i lägre grundvattennivåer där (Figur 41, Figur 42, Figur 43). I Figur 41 och Figur 42 observeras endast ett begränsat område i den högra dalgången där grundvattenytan är strax över markytan. I Figur 43 är grundvattenytan under markytan i hela området till höger om Glömstadalen. Skalan för den hydrauliska potentialen är samma i alla figurer (se legend till höger). Fler flödeslinjer ses sluta i tunnarna för Fall 4b (Figur 43) jämfört Fall 4a (Figur 42). Avsänkningen av grundvattenytan blev i detta fall något mindre än Fall 2 och 3, mellan sprickzonen i Glömstadalen och avståndsmarkeringen 2220 m i Fall 4a, samt mellan avståndsmarkeringarna 1130 m och 2440 m i Fall 4b.



Figur 41. Modellering av opåverkade förhållanden med dränerande punkt i den mindre dalgången till höger enligt Fall 4.

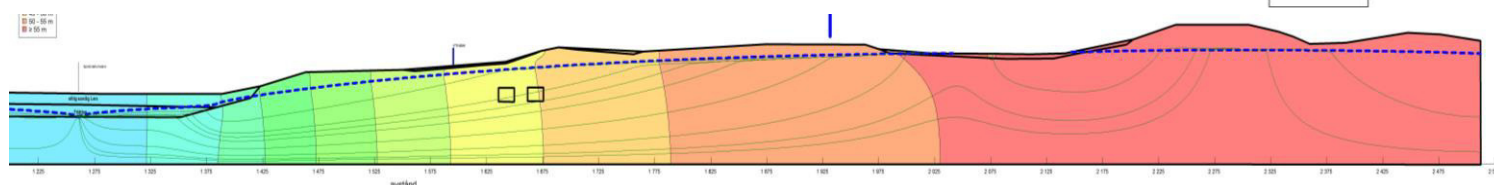


Figur 42. Modell med tunnlar och tätning med hydraulisk konduktivitet $1 \cdot 10^{-9}$ m/s enligt Fall 4a.

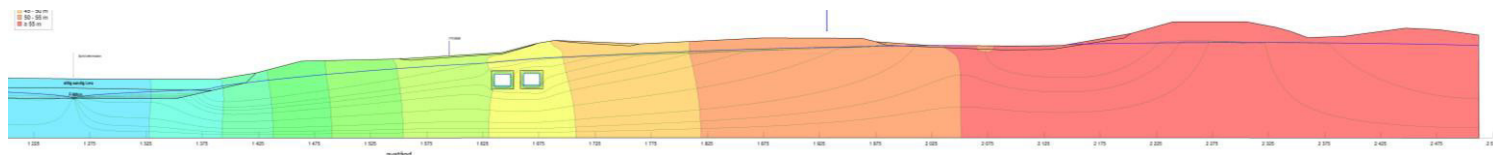


Figur 43. Modell med tunnlar och tätning med hydraulisk konduktivitet $1 \cdot 10^{-8}$ m/s enligt Fall 4b.

I Fall 5, där nivån som grundvattenbildningen appliceras vid justerades uppåt för att bättre överensstämja med grundvattenytan sågs att flödeslinjerna blev mer realistiska (Figur 44 och Figur 45). Flödeslinjerna utgår nu från grundvattenytan och inte från en nivå nedanför den. Vid närmare observation ses att avsänkningen är i princip densamma som för Figur 42. Till höger ses legenden för båda figurerna.

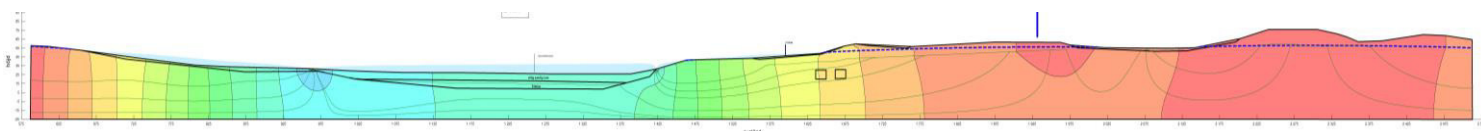
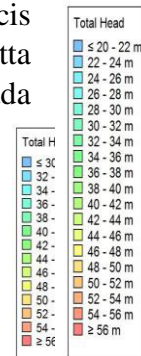


Figur 44. Opåverkad modell med uppjusterad nivå där grundvattenbildning appliceras enligt Fall 5.

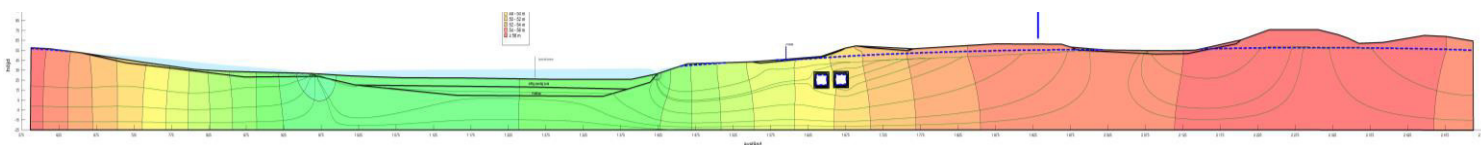


Figur 45. Modell med tunnlar och tätning med hydraulisk konduktivitet $1 \cdot 10^{-9}$ m/s. Nivån där grundvattenbildningen appliceras har här justerats uppåt enligt Fall 5.

I Fall 6 utfördes modellering utan hänsyn till den potentiellt vattenförande sprickan i Glömstadalen vilket gav en lösning där grundvattenytan i dalen var flera meter över markytan (Figur 46 och Figur 47). I Figur 46 kan en ny grundvattendelare observeras precis under den vertikala linjen ovanför modelldomänen. Även i Figur 47 ses att detta område antagligen är en grundvattendelare, men förskjutet något till höger. I båda lösningarna ses också att några av de flödeslinjer som startar kring den nya grundvattendelaren sträcker sig hela vägen till den vänstra sidan av Glömstadalen och den punkt där potentiell läckageyta definierats. Påverkansområdet blev i och med denna förändring betydligt större än tidigare, från den vänstra sidan av Glömstadalen (avståndsmarkering 980) till och med avståndsmarkering 2240 m. I sidan ses till vänster legenden för Figur 46 och till höger legenden för Figur 47.



Figur 46. Opåverkad modell där sprickan i mitten av Glömstadalen inte antas påverka grundvattennivåerna enligt Fall 6. Grundvattenytan ses vara flera meter över markytan i Glömstadalen.



Figur 47. Modell med tunnlar och tätning med hydraulisk konduktivitet $1 \cdot 10^{-9}$ m/s. Sprickan i mitten av Glömstadalen antas inte påverka grundvattennivåerna, enligt Fall 6, vilket ger en grundvattenyta som är flera meter över markytan där.

I Fall 7, där exempelaterialet för berg ändrades till sand respektive silt, observerades inga förändringar jämfört de annars identiska modellerna från Fall 5 som modellerats med exempelaterialet grus. Detta bekräftar att grundvattenflöde bara sker i den mättade zonen, vilket föranleddes när grundvattenbildningen flyttades ned till den mättade zonen. Modellfigurerna hittas i Bilaga 3.

I Tabell 5 ses en sammanställning över påverkansområdena för alla fall, baserat på avståndintervall i modelldomänen, samt beräknade inläckage. Sprickzonen i Glömstadalen befinner sig vid markeringen 1260 m. Höger sida på modellen var inledningsvis vid 2240 m (gäller Fall 0 och 1) och därefter vid 2510m. Inläckaget till tunnarna avser per meter tunnel och läckaget till höger tunnel är genomgående något större än till vänster tunnel. Värdena kan

jämföras med den genomsnittliga vattenförbrukningen i Sverige som är 140 liter per dygn och per person (Svenskt Vatten, 2018).

Tabell 5. Sammanställning av påverkansområden och inläckage för alla modelleringar.

Fall	Påverkansområde (avståndsintervall, m)	Inläckage vänster tunnel (l/dygn)	Inläckage höger tunnel (l/dygn)
0	1260 – 2240	21,6	24,19
1	1260 – 2240	25,92	28,51
2	1260 – 2500	29,38	31,97
3	1090 – 2510	103,7	138,2
4a	1260 – 2220	23,33	27,65
4b	1130 – 2440	103,7	138,2
5	1260 – 2240	25,06	27,65
6	980 – 2240	35,42	36,29
7a	1260 – 2240	25,06	27,65
7b	1260 – 2240	25,06	27,65

6. DISKUSSION

Modelleringarna med både testmodellerna och den platsspecifika modellen genererade en mängd resultat och information om hur grundvattenflödet i området kan påverkas av olika processer och av tunnelbygge. Vid all grundvattenmodellering är det emellertid också viktigt att inse begränsningarna i modellen och att vara medveten om att modellen bara är en representation av verkligheten vilken inte nödvändigtvis är den korrekta representationen. Nedan diskuteras de antaganden och begränsningar i modelleringen som presenterats i denna rapport.

6.1 TESTMODELLERINGAR

Testmodelleringarna med en tunnel gav resultat som visade att SEEP/W kan anses vara lämpligt för tunnelmodellering medan modelleringarna med den konceptuella modellen visade på svårigheter i att representera utflödet av grundvatten ur Glömstadalen med den använda tvådimensionella modellen.

6.1.1 Tunnelexempel

I testmodellering a) och b) (se kap. 4.4.1), där randvillkoren specificerad tryckpotential (lika med noll) respektive potentiell läckageyta (potential seepage face) användes längs tunnelväggen, sågs som förväntat att resultatet blev det samma (Figur 27 och Figur 48). I båda fallen blir det slutliga randvillkoret nämligen att den totala potentialen är lika med höjdläget ($h=z$) vilket ger samma lösning. Gällande den erhållna lösningen ser programmet ut att på ett trovärdigt sätt kunna modellera påverkan från en tunnel. Strömningen av grundvatten sker som förväntat främst i det övre mer konduktiva lagret och flödeslinjerna viker av skarpt mot tunneln först när de kommer i kontakt med det undre lagret eller är rakt ovanför tunneln. Formen som ekvipotentiallinjerna antar runt tunneln gör att grundvattenströmningen till stor del leds mot tunnelbotten vilket är riktigt då potentialen är lägre där. Att grundvattenytan bara sänks av omkring en halvmeter beror i detta fall antagligen på att den mättade zonen i det övre lagret här är 50 meter djup. Dessutom gör de specificerade potentialerna längs höger och vänster sida att

ett konstant inflöde av grundvatten hela tiden finns. Eftersom tryckpotentialen som noll är ett av de traditionella randvillkoren som används för tunnlar valdes att gå vidare med detta för den platsspecifika modelleringen.

När modellering gjordes med högre konduktivitet i det undre lagret, enligt c), sågs att grundvattenytan sänktes av betydligt mer, men inte hela vägen till tunneln (Figur 28). Detta visar åter att programmet är lämpligt för tunnelmodellering eftersom avsänkningen tydligt beror av den hydrauliska konduktiviteten hos materialen. Jämfört testerna i a) och b) ses här att flödeslinjerna och ekvipotentiallinjerna ser likvärdiga ut men att de förskjutits något så att området som påverkas av tunneln är en aning större.

I det sista tunneltestet, enligt d), minskades mäktigheten hos det övre lagret för att se hur dessa förhållanden påverkar resultatet. Avsänkningen blev större jämfört a) där motsvarande konduktiviteter använts men mindre jämfört c) (Figur 29). Att grundvattenytan påverkas mer när mäktigheten minskas antas bero på att det område kring tunneln som har förändrade potentialer ses sträcka sig nästan hela vägen upp till grundvattenytan. Den mindre mäktigheten gör också att mindre grundvatten kan flöda i den övre zonen vilket leder till att en påverkan snabbt kan fortplanta sig. För en större mäktighet kan grundvatten precis i övergångszonen mellan lagren påverkas utan att detta märks nämnvärt i det översta flödet, vilket sågs i a). Att grundvattenytan inte sänks av lika mycket som i c) anses rimligt eftersom att den hydrauliska konduktiviteten har en stor betydelse för inläckage till tunnlar.

6.1.2 Konceptuell modell för Glömstadalen

Det första testet av yttre randvillkor med den konceptuella modellen, e), visade att specificerad hydraulisk potential längs höger och vänster sida inte är tillräckligt för att få en varierande grundvattenyta i domänen (Figur 30). Den skillnad i potential som ses mellan höger och vänster sida beror enbart på att potentialerna valdes för att motsvara en grundvattenyta vid markytan, och i detta fall ligger markytan något högre vid vänster sida än vid höger sida. Att ekvipotentiallinjerna inte är helt vertikala beror på den högre konduktiviteten hos materialet i dalgången. Detta gör att flödet leds från höger mot dalgången, upp mot och genom friktionsjorden och sedan sprids ut över hela bergmassan innan det når vänster sida. Randvillkoren bedömdes ändå ha viss lämplighet för användning i den platsspecifika modelleringen, förutsatt att de kan kombineras med ytterligare randvillkor för att få lägre grundvattennivåer i dalgången.

Eftersom den hydrauliska potentialen måste anges i minst en punkt i domänen och då den i detta fall inte kunde vara någonstans inuti modellen (eftersom det hämmar en eventuell påverkan från tunnarna), kunde inte randvillkor motsvarande vattendelare (inget flöde över randen) modelleras längs både höger och vänster sida i modellen. I f) testades att ändra höger sida till ett sådant randvillkor men resultatet blev en konstant potential över hela domänen eftersom lösningen då endast berodde av den angivna potentialen längs vänster sida. Därmed ansågs denna kombination av randvillkor inte vara användbar i den platsspecifika modelleringen.

I det sista testet, g), där specificerad potential använts längs sidorna i kombination med två punkter i dalgången med potentiell läckageyta (seepage face), erhöles en lösning (Figur 31) som till stor del överensstämde med de grundvattennivåer och flöden som beskrivits i den konceptuella modellen. Däremot observerades att flödet i friktionsjorden var riktat mot de båda punkterna där potentiell läckageyta definierats, och inte mot dalgångens mitt. Resultatet var inte överraskande eftersom dessa punkter var de enda utloppspunkterna i modellen och flödet

av grundvatten som sagt var riktat mot dalgången. Lösningen som erhöles var därmed inte fullkomlig men eftersom grundvattennivåerna var mer realistiska och flödet riktat mot dalgången ansågs randvillkoren vara användbara i den platsspecifika modelleringen.

6.2 MODELLERING AV GLÖMSTATUNNELN

Vid uppbyggnaden av den platsspecifika modellen för Glömstatunneln gjordes en rad antaganden som påverkat resultatet i både mindre och större grad. Till att börja med orienterades tvärsektionerna ortogonalt mot tunneln, och inte utifrån grundvattenflödets huvudriktning som rekommenderas (Anderson m.fl., 2015). Valet baserades på att tunneln inducerar ett flöde som är ortogonalt mot dess sträckning. I detta område sammanfaller dock grundvattnets flödesriktning sett över en större skala väl med de flesta av tvärsektionerna, inklusive den som modellerades. Svårigheten med den tvådimensionella modelleringen är emellertid att de grundvattenflöden som lokalt har annan riktning än tvärsektionen inte kan tas hänsyn till, vilket kan leda till problem med för mycket vatten i modellen.

Vid ritandet av domänen för den tvärsektion som modellerades gjordes, i brist på data, förenklingar av bergytans och jordlagrens utseende och utbredning. Framförallt saknades data i modellens yttre delar vilket innebär att bergytan potentiellt skulle kunna ligga djupare än de 2-3 meter som antagits. SGU:s berghällskarta kan dock antas ha relativt bra upplösning då den överlag överensstämmer med de hållkarteringar som gjorts i projektet. I Glömstadalen var datapunkterna koncentrerade till den södra sidan, närmast tunneln, med enstaka punkter kring bostadsområdet Glömsta i norr, vilket innebär att jordlagrens utbredning extrapolerades. Därtill visade sonderingar bara förekomst av friktionsjord vilket innefattar en mängd olika jordar med skilda egenskaper. De antaganden som gjorts kan ha stor inverkan på resultatet men är samtidigt ofrånkomliga på grund av bristen på data. De förenklingar som gjorts av strukturen är inte nödvändigtvis olämpliga då enklare modeller ofta anses kunna beskriva den generella grundvattenbilden på ett bättre sätt än mer komplicerade modeller eftersom de senare kan vara svåra att representera matematiskt och kräver betydligt mer data (Anderson m.fl., 2015).

Att berget modellerades som ett poröst medium och utan diskretisering av större sprickzoner är något som antagligen påverkat resultatet i stor grad. Det verkliga grundvattenflödet i berg sker, som tidigare beskrivits, allra främst i dess sprickor vilka inte nödvändigtvis har samma riktning som tvärsektionen. Dessutom varierar den hydrauliska konduktiviteten mellan olika delar av området. Därmed överskattas antagligen grundvattenflödet i berget och dessutom inläckaget till tunneln, förutsatt att berget inte har hög sprickfrekvens i området.

Eftersom data gällande porositet och kornstorleksfördelning saknats är de vattenbindningskurvor som använts i modelleringen osäkra och därmed också flödet i den omättade zonen. Enligt den tekniska beskrivningen för SEEP/W (GEO-SLOPE, 2015) är dock modellering med både omättat och mättat flöde noggrannare än modellering med bara mättat flöde, även när vattenbindningskurvorna som används inte är exakta. Att bara ange en någorlunda realistisk vattenbindningskurva möjliggör nämligen för flöde i den omättade zonen vilket i sin tur gör att flödet i den mättade zonen och grundvattennivåer inte överskattas. Osäkerheterna i vattenbindningskurvan för berg är dock särskilt stora eftersom inget exempelmaterial motsvarande berg var tillgängligt. Därtill är en sådan kurva komplex då den beror av flera av bergets egenskaper (se kap. 2.1.4). Att som i detta fall använda en vattenbindningskurva motsvarande den hos grus skulle kunna underskatta det omättade flödet i berget då grus dräneras redan vid låga undertryck. Vidare studier kring

vattenbindningskurvorna för alla material, men främst berget är nödvändigt för att få en mer sanningsenlig modell.

Gällande de hydrauliska konduktiviteter som användes i modelleringen finns också stora osäkerheter. Endast för friktionsjorden fanns pålitliga uppmätta värden men även dessa var osäkra då de genomförda hydrauliska testerna endast var småskaliga och utfördes i ett fåtal punkter i Glömstadalen. Utifrån Darcys lag (ekvation 2) ses att den hydrauliska konduktiviteten är den enskilda parameter som påverkar flödet mest. Att den hydrauliska konduktiviteten också är en av de parametrar som varierar mest i området gör att modelleringsresultatet i högsta grad påverkats av de värden som valts.

Till sist har den platsspecifika modellen inte heller tagit hänsyn till den dagvattentunnel som går genom berget i området och som antagligen redan gör att grundvattennivåerna är lägre än naturligt i området. Då informationen om tunneln är säkerhetsklassad kunde detta dock inte tas med i modelleringen.

6.2.1 Modellering av opåverkade förhållanden

Modelleringen av de platsspecifika förhållandena i Glömstadalen utan tunnel påvisade problem med översvämning i modellen redan innan grundvattenbildning tagits med (Figur 32). Tillägget av randvillkoret potentiell läckageyta, jämfört testmodelleringen, ovanför den potentiella sprickzonen i Glömstadalen gav dock ett mer realistiskt grundvattenflöde i friktionsjorden i Glömstadalen. Hydrauliskt skulle sprickan antagligen inte utgöra en läckageyta men eftersom randvillkoret matematiskt gör att ovanpåliggande grundvatten dräneras, vilket antas ske vid sprickan, ger det ett användbart resultat.

Tillägg av grundvattenbildningen 150 mm/år resulterade i stora översvämningar, men bara för den högra sidan av modellen (Figur 33). Då grundvattenbildningen i området kunde tänkas vara även större än 150 mm/år antogs översvämningen bero på för låga hydrauliska konduktiviteter i den omättade zonen eller icke fungerande randvillkor. Utifrån de förändringar och tester som genomfördes för att hitta en konvergerande och lämplig modell (se Bilaga 2) gjordes flera lärdomar om modellerings-programmet. Den viktigaste insikten var att konvergensproblem främst uppstod i noder i den omättade zonen där grundvattennivån var ett antal meter under markytan. Detta antogs bero på det stora undertryck som skapas vid markytan när grundvattenytan är flera meter nedanför vilket ger en så låg konduktivitet hos materialet att grundvattenbildningen inte kan infiltrera. Då varken förfining eller förstoring av mesh, eller ändringar i under-relaxation parametrar gav konvergens valdes att istället lägga in grundvattenbildningen direkt i den mättade i zonen, i närheten av grundvattenytan. Denna metod innebar dock att modelleringen av omättat flöde i princip frångicks även om sådant flöde fortfarande tilläts i modellen. Därmed är den slutliga lösningen inte optimal och vidare studier krävs för att hitta en metod där infiltration kan ske vid markytan.

I den slutliga lösningen (Figur 34) ses att grundvattenflödet till stor del stämmer överens med den konceptuella modellen över området. Det enda stället som tros vara felaktigt är vid den mindre dalgången till höger i figuren. Precis till vänster om denna dalgång finns nämligen en trolig vattendelare (blå vertikal linje i figuren) och flödet borde därför dela på sig vid denna punkt. Gällande grundvattennivåerna i modellen ses flera områden som inte överensstämmer med den förväntade bilden. Exempelvis är grundvattennivån flera meter under det jordlager som ses ovanför tunnlarna. Här förväntas nivån vara omkring en meter under markytan enligt det grundvattenrör som finns i närheten. I Glömstadalen ses också att grundvattnet inte står

under tryck eftersom grundvattennivån är i höjd med lerlagrets underkant eller lägre. Enligt mätningar i andra rör i dalen borde grundvattennivåerna vara närmare markytan där. Till vänster om Glömstadalen ses också översvämning vilket inte är fallet i verkligheten men då detta område inte bedöms påverkas av tunneln tas denna felaktighet inte i lika stor beaktning.

Ingen kalibrering gjordes av den slutliga modellen, främst eftersom bergets hydrauliska konduktivitet hade stor inverkan på lösningen samtidigt som inga pålitliga mätdata för detta var tillgängliga. Dessutom fanns endast ett grundvattenrör i närheten av tvärsektionen. Om bergets hydrauliska konduktivitet däremot hade varit mer säkert hade grundvattenbildningen kunnat varieras för att försöka få en mer realistisk bild av grundvattenytan. Exempelvis är grundvattenbildningen antagligen inte lika stor över områden med berg i dagen som områden täckta av ett jordlager, eller över områden med brant sluttning.

6.2.2 Modellering av tunnelpåverkan

Inför modelleringen av tunnelpåverkan var förväntningen, baserat på resultaten från testmodelleringen, att påverkan inte skulle bli så stor att grundvattenytan sänktes av till tunneltaket eller -botten. Enligt den lösning som erhöles (Figur 35) blev inte heller så fallet. Lösningen stämmer väl överens med hur den konceptuella modellen beskriver flödet kring tunneln, nämligen att inflöde främst sker från höger. Lokalt, precis kring tunneln, sker dock inflöde från alla håll. Att flödet förbi tunneln på en större skala sker från höger till vänster (söder till norr) är även en trolig orsak till att påverkansområdet sträcker sig längre söderut än norrut. Inget större flöde induceras nämligen från Glömstadalen mot tunnelns vänstra sida, varför den avsänkta grundvattennivån där måste bero på ett minskat tillflöde från modellens högra ände. Med andra ord minskas tillrinningen till Glömstadalen när tunneln införs i systemet vilket ger upphov till lägre grundvattennivåer där. Till höger om tunneln beror den lägre grundvattennivån istället på tunnelns dränerande effekt.

För att bättre studera flödet kring tunneln lades fler flödeslinjer till i denna figur (32) jämfört den tidigare (Figur 31). Lösningen visar att tätningen (med konduktivitet 10^{-9} m/s) har god effekt och delvis fungerar som en impermeabel rand eftersom flödeslinjerna ses runda tunnarna. Dock ses att flödeslinjerna följer en gemensam nivå strax innan de når tunnarna och där separeras. Den linje de följer gemensamt sammanfaller med den nivå där grundvattenbildningen appliceras och därför erhålls antagligen en något annorlunda lösning om denna nivå justeras uppåt.

I resultatet anges det område där tunnelpåverkan är mer än fem centimeter, till skillnad mot den vedertagna metod där endast avsänkningar större än 0,3 meter i jord eller 1 meter i berg tas i beaktning. Detta medför att det beskrivna påverkansområdet kan vara större än vad som normalt ses i liknande projekt. Däremot fås en bra uppfattning om den totala påverkan på grundvattensystemet i området och dessutom en kontroll av att påverkan inte sträcker sig till modellens ränder. I vidare arbete med modellen bör ett mer avgränsat påverkansområde dock tas fram för att kunna jämföra mot liknade projekt och för att förändringar som inte rymms inom den naturliga fluktuationen ska kunna urskiljas vid fältkontroller.

Jämfört den uppskattning av påverkansområde som kan göras som 3-5 gånger tunneldjupet (Gustafson, 2009) är det erhållna området betydligt större. Det uppskattade området skulle sträcka sig mellan 96 och 160 meter från tunneln medan det resulterande i detta fall är 580 respektive 400 meter därifrån. Eftersom Gustafssons (2009) metod dock baseras på vilket avstånd som det inläckande vattnet kommer ifrån är metoderna inte helt jämförbara. Med

avgränsningen 0,3 meter i jord och 1 meter i berg hade påverkansområdenas storlek antagligen överensstämt mer.

6.2.3 Modellering med förändrade modellantaganden

Modelleringen med förändrade modellantaganden gav information om vilka parametrar som påverkar lösningen mer och vilka som påverkar mindre eller inte alls. När grundvattenbildningen ökades till 200 mm/år, enligt Fall 1, erhöles som förväntat högre grundvattennivåer i både den opåverkade och påverkade modellen. Eftersom nivåerna i den tidigare opåverkade modellen enligt ovan diskussion antagligen var för låga gav detta ett bättre resultat men fortfarande inte tillräckligt höga nivåer varken ovanför tunnlarna eller i Glömstadalen. Att modellen klarar högre grundvatten-bildning utan att översvämning skapas tyder på lämplighet eftersom grundvattenbildningen i det naturliga fallet varierar över året och är både lägre och högre än detta värde.

Lösningen visade också att påverkansområdet med 200 mm/år blev det samma som tidigare, vilket inte nödvändigtvis måste vara det verkliga fallet utan skulle kunna bero på att randvillkoret vid sprickzonen är begränsande och att modellen är för kort i högerled. Att randvillkoret vid sprickzonen skulle kunna vara begränsande beror på att det aktiveras när grundvattennivån är ovan punkten och då låser grundvattennivån vid en specifik nivå ($h=z$). Om den modellerade grundvattennivån är under punkten är randvillkoret dock inaktivt. Eftersom tunneln inte dränerar grundvattnet tillräckligt för att nivån ska hamna under sprickzonen blir grundvattennivån i detta fall låst av randvillkoret både för opåverkade och påverkade förhållanden. Att modellen är för kort i högerled innebär att påverkansområdet potentiellt skulle kunna sträcka sig längre, om möjlighet fanns.

Den ökade infiltrationen gav däremot högre inläckage till tunnlarna vilket antagligen följer av det ökade inflödet i modellen. En positiv förändring i denna lösning jämfört den tidigare är också att flödeslinjerna längst till höger nu sträcker sig mot höger kant istället för att också ledas mot Glömstadalen. Detta stämmer bättre överens med den verkliga situationen där flödet i detta område mest troligt leds mot Albysjön.

I Fall 2 förlängdes modellen åt höger för att modelldomänen och det specificerade randvillkoret där inte skulle begränsa påverkansområdets utbredning. Modelleringen resulterade i högre grundvattennivåer i både den opåverkade och påverkade modellen, och även grundvattennivåer ovanför markytan i den mindre dalgången till höger. Eftersom inget mer vatten tillfördes modellerna och randvillkoret längs den nya högersidan angavs samma potential som tidigare måste de ökade nivåerna bero på att randvillkoret längs den tidigare högersidan höll ner grundvattennivåerna. I den opåverkade lösningen hamnade grundvattennivån ovanför tunnlarna nu precis under lagret av friktionsjord och var därmed det bästa resultatet hittills. Även i Glömstadalen ökade nivåerna något, men främst vid kanterna eftersom randvillkoret vid sprickzonen verkar ha stor dränerande effekt och därmed bör utvärderas mer.

Gällande påverkansområdet sågs att avsänkningen sträckte sig i princip hela vägen till den nya högersidan, vilket antyder att modellen borde förlängas ytterligare, och att sprickzonen fortsatt utgjorde den vänstra begränsningen. Att påverkan ses hela vägen till höger sida skulle också kunna bero på att grundvattenflödet där inte helt stämmer överens med den förväntade bilden, som är att grundvattendelare förekommer på båda sidor om den högra dalgången. De ökade grundvattennivåerna leder precis som i Fall 1 till att inläckaget till tunnlarna ökar.

I Fall 3 ökades endast konduktiviteten hos det tätande lagret runt tunnlarna. Lösningen visar att grundvattennivån sänks av betydligt mer än tidigare och att påverkansområdet sträcker sig förbi sprickzonen till de vänstra delarna av Glömstadalen (Figur 40). Lösningen ska dock tas med viss försiktighet eftersom modelleringen gjorts för steady-state-förhållanden och denna tätning antagligen bara skulle gälla under en kort tidsperiod innan ytterligare injekteringar utförts.

I Fall 4 användes randvillkoret potentiell läckageyta (seepage face) i en punkt i den mindre dalgången till höger. Då en mindre bäck ska finnas i dalgången, vilket betyder att det antagligen rör sig om ett utströmningsområde, kan randvillkoret antas vara acceptabelt. För den opåverkade modellen (Figur 41) sågs att grundvattennivåerna sänktes jämfört föregående fall, och hamnade i nivå med de som observerades i Fall 1. Detta antas bero på att Fall 1 och Fall 4 har likande grundvattennivåer i dalgången till höger och att detta till stor del styr grundvattenytans läge hela vägen till Glömstadalen. Dessutom blev påverkansområdet i Fall 4a i princip samma som i Fall 1 men däremot var inläckaget till tunnlarna lägre. Det lägre inläckaget antas bero på att vatten nu kan ta sig ut ur modellen även i den högra dalgången. Något som talar emot denna idé är dock att inläckaget i Fall 4b är det samma som i Fall 3. Detta skulle dock kunna förklaras av att avsänkningen av grundvattennivån är den samma i dessa fall, nämligen hela vägen till tunneltaket. Mellan Fall 1 och 4b varierar istället den absoluta nivån som grundvattenytan sänks av till vilket ger olika inläckage.

Gällande flödesbilden gör det nya randvillkoret att en del flöde från höger sida leds mot bäcken, men djupare i modellen ses fortfarande flöde mot Glömstadalen. Hur det djupa flödet i berggrunden ser ut i det verkliga fallet är svårt att säga men antagligen letar det sig i modellen mot Glömstadalen eftersom detta är den lägsta punkten. Hade däremot Albysjön, som befinner sig en bit ifrån modellens högra sida och som har en nivå kring noll meter, varit med i modellen skulle flödet antagligen riktats ditåt istället.

I Fall 5 justerades nivån där grundvattenbildningen applicerades (randvillkoret i den högra dalgången behölls) vilket inte gav någon synbar förändring av grundvattennivåerna eller potentialens variation jämfört Fall 4. Inte heller påverkansområdet förändrades jämfört 4a. Däremot följde flödeslinjerna inte längre en gemensam nivå strax under grundvattenytan, som kommenterats tidigare, utan utgick istället från grundvattenytan vilket är mer riktigt. Dessutom ökade inläckaget till den vänstra tunneln något. Vad detta beror på är svårt att säga eftersom grundvattennivåerna och -bildningen var de samma men emellertid kan denna lösning antas vara den mer korrekta.

När randvillkoret vid sprickzonen i Glömstadalen togs bort, enligt Fall 6, sågs att grundvattenytan var flera meter över markytan i Glömstadalen. Även om artesiskt vatten förekommer i vissa grundvattenrör i Glömstadalen rör det sig inte om nivåer på över fem meter över markytan. Borttagandet av en dräneringspunkt gör också att grundvattennivåerna stiger i modellen. Bortsett från vänster sida om Glömstadalen som inte beaktas med samma noggrannhet är det dock bara i ett område som grundvattenytan stiger över markytan. Detta gäller området mellan Glömstadalen och tunnlarna. Gällande flödesbilden har en förbättring skett i modellens högra sida. Där ses nu att den potentiella grundvattendelare som markerats ovan domänen också utgör en vattendelare i modellen. Flödet delas nu av så att det dels går mot Glömstadalen, dels flödar mot den mindre bäcken och dels riktas mot Albysjön vilket är den förväntade bilden. Däremot är flödet inte helt representativt i Glömstadalen eftersom flöde nu

sker mot de två punkterna som utgör lerlagrets ändar, vilket också diskuterades som ett problem i test g) med den konceptuella modellen.

Att ta bort randvillkoret i sprickzonen ger alltså både bättre och sämre resultat men det kan också konstateras att det måste finnas ett randvillkor någonstans i dalgången så att vatten kan lämna modellen. Utifrån de randvillkor som är tillgängliga i SEEP/W anses inte något annat vara bättre att använda än potentiell läckageyta eftersom de övriga skulle fixera grundvattennivån helt. Däremot skulle läget hos randvillkoret kunna varieras i vidare undersökningar, men då med insikten om att placeringen inte görs utifrån kända hydrauliska processer utan ifrån önskan om att nå den förväntade bilden av grundvattensituationen i området.

I Fall 6 ses också att påverkansområdet blir det hittills största mot Glömstadalen för tätningen med lägre konduktivitet. Detta beror antagligen på att randvillkoret för sprickzonen inte längre begränsar utbredningen av påverkan åt vänster. När grundvattenytan står ovanför markytan har den dock inga materialegenskaper definierade kring sig, vilket skulle kunna göra att en påverkan fortplantar sig lättare. Som konstaterats tidigare ger de högre grundvattennivåerna högre inläckage till tunnlarna.

I Fall 7, där exempelmaterialen för vattenbindningskurvorna förändrades, observerades inga förändringar jämfört Fall 5 varken i den opåverkade eller påverkade modellen. Detta beror mest troligt på att grundvattenbildningen förflyttades till den mättade zonen för att lösa konvergensproblem, se diskussion angående detta i kap. 6.2.1. I och med att i princip inget flöde längre sker i den omättade zonen ger förändringar i vattenbindningskurvorna ingen effekt. I den mättade zonen har vattenbindningskurvorna nämligen ingen påverkan.

7. SLUTSATS

Inom detta arbete har flera grundvattenmodeller tagits fram för att beskriva de opåverkade förhållandena kring Glömstadalen. Vid framtagandet av dessa har ett flertal olika antaganden gjorts och den modell som bäst bedöms beskriva de platsspecifika förhållandena är den som skapats utifrån Fall 4. Även denna modell har dock svagheter och framförallt finns genomgående ett problem med att grundvattennivån är för låg och inte varierar med topografin i modellerna. För att erhålla en bättre modell rekommenderas att vidare studier utförs gällande vattenbindningskurvor för de olika materialen men kanske främst för berget. Därtill bör den hydrauliska konduktiviteten hos materialen varieras genom systematisk känslighetsanalys för att hitta ett lämpligt intervall.

På grund av svårigheten i att få en konvergerande modell frångicks också modelleringen av omättat flöde. Den slutliga modellen kan därmed vidareutvecklas även kring denna punkt så att infiltration kan ske längs markytan. Dessutom bör infiltrationen varieras över modellen, beroende på material vid ytan och lutningar samt över bebyggda områden. Detta skulle antagligen ge en mer varierad grundvattennivå.

Modelleringen av påverkade förhållanden, med den planerade Glömstatunneln, gav generellt liknande påverkansområden. För flertalet av modelleringsfallen sträckte sig påverkansområdet norrut fram till sprickzonen i Glömstadalen, inklusive Fall 4, vilket motsvarar 400 meter. Undantaget, då större påverkansområde erhöles, var när en sämre tätning användes kring tunnlarna (Fall 3 och 4b) och allra störst blev påverkan när randvillkoret vid sprickzonen togs

bort (Fall 6, 680 meter). Därmed är detta randvillkor sannolikt begränsande för utbredningen av påverkan och vidare studier bör göras för att hitta alternativa randvillkor som kan representera utflödet ur Glömstadalen.

Åt söder sträckte sig påverkansområdet i nästan samtliga fall precis bortanför den mindre dalgången med en bäck, motsvarande 560 meter. Störst påverkansområde i denna riktning erhöles för Fall 3 som var med en sämre tätning kring tunnlarna (840 meter). Eftersom inget begränsande randvillkor fanns på denna sida av modellerna kan de beskrivna sträckorna antas vara mer representativa.

Avslutningsvis ska noteras att de redovisade påverkansområdena är framtagna utifrån det område där avsänkningen av grundvattennivån är mer än 5 centimeter, varför storleken inte kan jämföras med liknade projekt där avgränsning gjorts vid 0,3 meter i jord och 1 meter i berg.

8. REFERENSER

- Ad-hoc-AG Boden, 2004. Verknüpfungsregel 1.18 – Parameter für das Modell einer stetigen Funktion der $\theta(\psi)$ -Beziehung. Staatlichen Geologischen Dienste und BGR.
- Anderson, M.P., Woessner, W.W., och Hunt, R.J., 2015. Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. Amsterdam: Academic Press.
- Berzell, A., 2011. E4 Förbifart Stockholm, PM Hydrogeologi. Stockholm: Trafikverket, Nr. OG14H032.
- Butscher, C., 2012. Steady-state groundwater inflow into a circular tunnel. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 32, s. 158–167.
- Domenico, P.A. och Schwartz, F.W., 1998. Physical and chemical hydrogeology. New York: Wiley.
- Emmelin, A., Eriksson, M., och Fransson, A., 2004. Characterisation, design and execution of two grouting fans at 450 m level, Aespoe HRL. Stockholm: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Nr. SKB-R--04-58.
- Eriksson, M. och Stille, H., 2005. Cementinjektering i hårt berg. Stockholm: Stiftelsen Svensk bergteknisk forskning (SveBeFo).
- Eveborn, D., Vikberg, E., Thunholm, B., Hjerne, C.-E., och Gustafsson, M., 2017. Grundvattenbildning och grundvattentillgång i Sverige. Uppsala: Sveriges Geologiska Undersökning, Nr. RR 2017:09.
- Fredlund, D.G. och Xing, A., 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31(3), s. 521–532.
- Freeze, R.A. och Cherry, J.A., 1979. Groundwater. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- Van Genuchten, M., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils I. Soil Science Society of America Journal, Vol. 44, s. 892–898.
- GEO-SLOPE, u.å. Air Tutorial [internet]. GEO-SLOPE. Tillgängligt: <https://www.geoslope.com/support/support-resources/example-files/example?id=examples:airw:airtutorial&resourceVersion=9.0.0.00000> [Hämtad 2018-4-15].
- GEO-SLOPE, 2015. Seepage Modeling with SEEP/W. Calgary: GEO-SLOPE International Ltd., Nr. June 2015 edition.
- GEO-SLOPE, 2016. GeoStudio. Calgary: GEO-SLOPE International Ltd.
- Grip, H. och Rodhe, A., 1994. Vattnets väg från regn till bäck. 3., reviderad uppl. Uppsala: Hallgren & Fallgren.
- Gustafson, G., 2009. Hydrogeologi för bergbyggare. Stockholm: Formas.
- Gustafsson, Y., 1968. The influence of topography on ground water formation. Oxford: Pergamon Press.

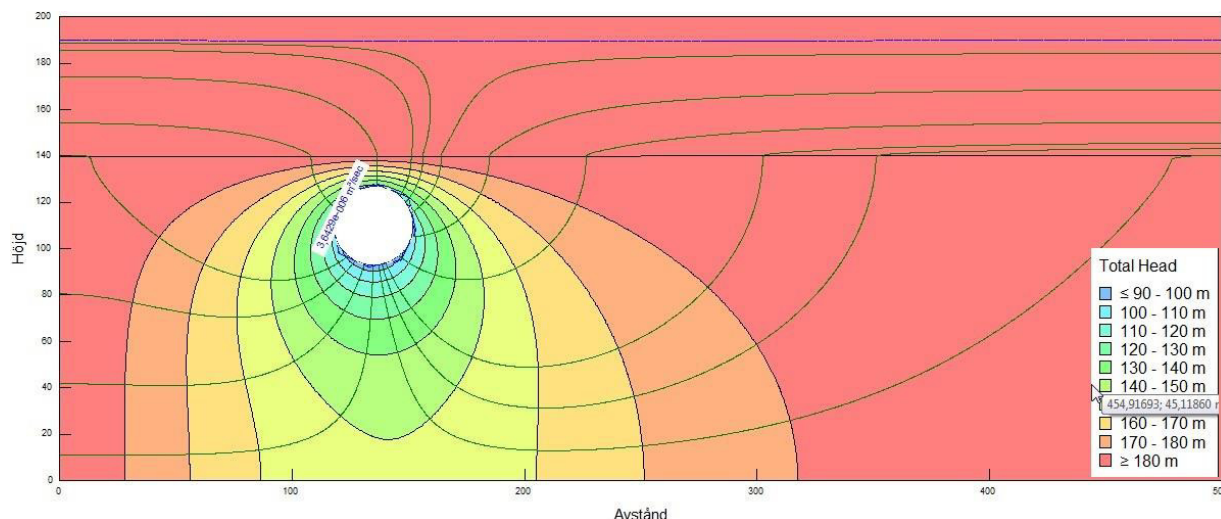
- Knutsson, G. och Morfeldt, C.-O., 1973. Vatten i jord och berg. Stockholm: Ingenjörsförlaget.
- Larsson, R., 2008. Jords egenskaper. 5., reviderad uppl. Linköping: Statens geotekniska institut.
- Marsily, G. de, 1985. Quantitative hydrogeology: groundwater hydrology for engineers. Orlando: Academic Press.
- Molinero, J., Samper, J., och Juanes, R., 2002. Numerical modeling of the transient hydrogeological response produced by tunnel construction in fractured bedrocks. *Engineering Geology*, Vol. 64, Nr. 4, s. 369–386.
- Rodhe, A., Lindström, G., Rosberg, J., och Pers, C., 2006. Grundvattenbildning i svenska typjordar - översiktlig beräkning med en vattenbalansmodell. Uppsala: Institutionen för Geovetenskaper, Uppsala universitet, Nr. 66.
- Rodhe, A. och Seibert, J., 1999. Wetland occurrence in relation to topography: a test of topographic indices as moisture indicators. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 98-99, s. 325–340.
- SFS 1998:808, u.å. Miljöbalk. Stockholm: Miljödepartementet.
- SGU, 2013. Bedömningsgrunder för grundvatten. Uppsala: Sveriges Geologiska Undersökning, Nr. 2013:01.
- Sundkvist, U. och Wallroth, T., 2016. Ansökan om tillstånd enligt miljöbalken för anläggandet av Västlänken och Olskroken planskildhet, PM Hydrogeologi. Göteborg: Trafikverket, Nr. TRV 2016/3151.
- Svenskt Vatten, 2018. Dricksvattenfakta [internet]. Svenskt Vatten. Tillgängligt: <http://www.svensktvatten.se/fakta-om-vatten/dricksvattenfakta/> [Hämtad 2018-5-27].
- Tyréns, 2016. Framtagande av vägplan: Tekniskt PM Hydrogeologi. Stockholm: Trafikverket, Nr. V259 Tvärförbindelse Södertörn: TSK01.
- Zhang, L. och Fredlund, D.G., 2003. Characteristics of water retention curves for unsaturated fractured rocks. Framlagd under Proc. Second Asian Conference on Unsaturated Soils, Osaka, Japan: UNSAT-ASIA, s. 425–429.

BILAGOR

BILAGA 1 TESTMODELLERING

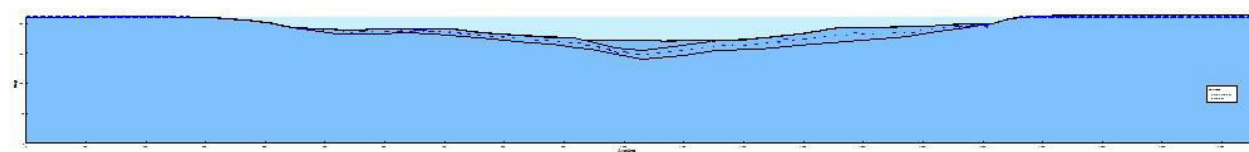
I denna bilaga beskrivs ytterligare några av de resultat som erhöles under testmodelleringen.

Testmodelleringen med olika randvillkor längs tunnelväggen, enligt a), visade att både tryckpotentialen som noll och potentiell läckageyta (potential seepage face) gav samma resultat. I Figur 48 ses resultatet för modellering med potentiell läckageyta kring tunneln. Figuren visar att flödet viker av mot tunneln och framförallt mot dess botten men att grundvattenytan (streckad blå linje) inte påverkas stort sett över denna skala. Vid närmare granskning ses dock att grundvattenytan är omkring en halvmeter lägre i området över tunneln jämfört vid sidorna.



Figur 48. Visar den hydrauliska potentialens variation i testdomänen när tunnelväggen antas utgöra en potentiell läckageyta (potential seepage face). Blått motsvarar låg potential och rött hög. Gröna linjer visar grundvattenflödet som ses böja av mot tunneln. Blå streckad linje i överkanten motsvarar grundvattenytan som här är ungefär en halvmeter lägre ovan tunneln.

Vid testmodellering med den konceptuella modellen som utgångspunkt och med randvillkoren specificerad potential respektive noll flöde längs sidorna (fall f) blev den hydrauliska potentialen konstant över domänen och grundvattenytan plan (Figur 49).

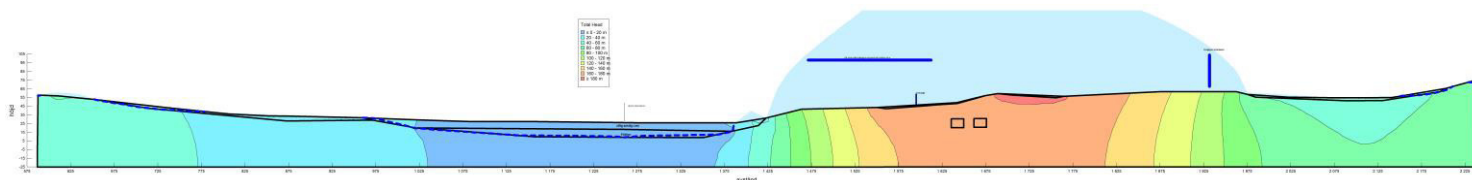


Figur 49. Visar den hydrauliska potentialen när flödet är noll över den högra randen och den hydrauliska potentialen är specificerad längs den vänstra. I detta fall är potentialen konstant över hela domänen och har antagit det värde som specificerats längs den vänstra randen.

BILAGA 2 MODELLERING AV OPÅVERKADE FÖRHÅLLANDEN

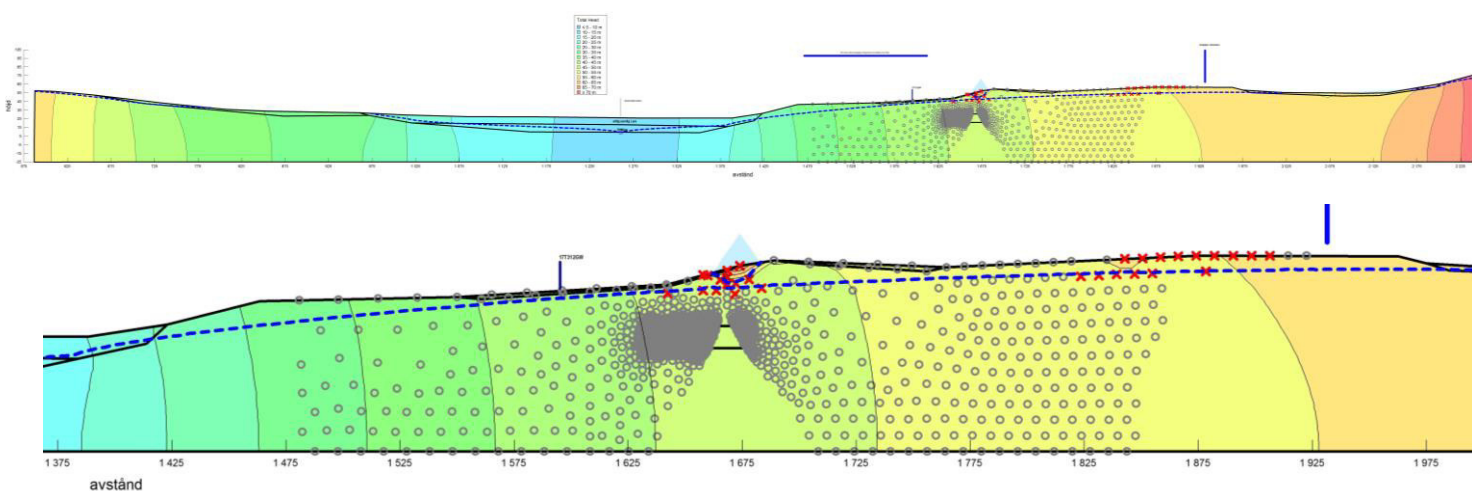
I denna bilaga beskrivs de förändringar som gjordes av den opåverkade modellen för att nå en konvergerande och lämplig lösning.

Utifrån den modell som presenteras i Figur 33 i kap. 5 gjordes ett antal förändringar. Inledningsvis testades att lägga till en dränerande punkt vid markytan mitt i den mindre dalgången vid höger kant, där en bäck leder vatten ortogonalt mot modellen. Lösningen visar att det översvämmede området minskar i utbredning men inte blir lägre (Figur 50).



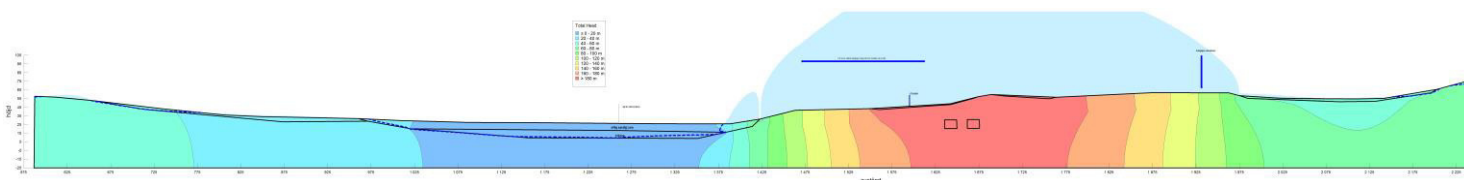
Figur 50. Opåverkade förhållanden med tillägg av en dränerande punkt vid markytan mitt i den mindre dalgången vid höger kant. Översvämning ses över ett stort område.

Vid förändring av den hydrauliska konduktiviteten hos berget visade modelleringen förändrade grundvattennivåer men också konvergensproblem i ett antal noder. Allt eftersom konduktiviteten ökades minskade översvämningen och vid värdet $4 \cdot 10^{-7}$ m/s var grundvattenytan under markytan över nästan hela modellen (Figur 51). De cirklar och röda kryss som ses i figuren markerar noder där minst ett av de två konvergenskriterierna inte uppfyllts. Dessa noder sammanfaller med områden där grundvattenytan ligger några meter under markytan.



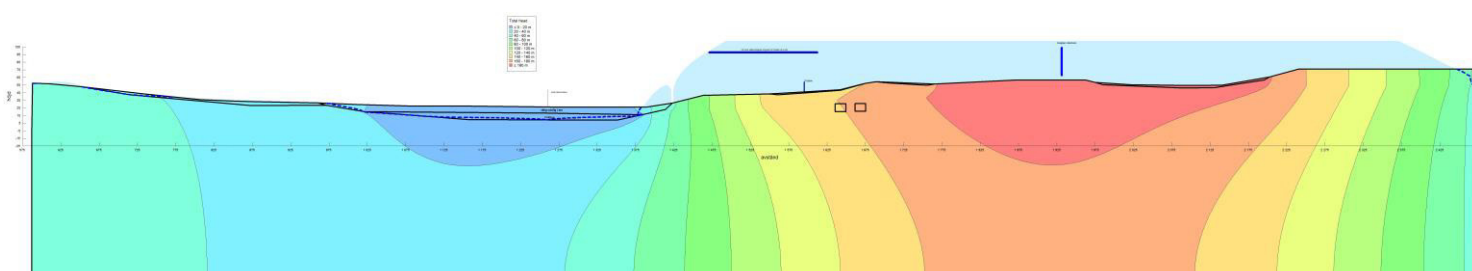
Figur 51. Opåverkat tillstånd med den hydrauliska konduktiviteten hos berget som $4 \cdot 10^{-7}$ m/s. Grundvattenytan är under markytan över nästan hela modellen men en lösning har inte uppnåtts p.g.a. konvergensproblem. Noder som inte uppfyller ett av de två konvergenskriterierna har markerats med rött kryss eller grå cirkel.

I nästa test lades grundvattenbildningen in längs en linje som ritats under markytan i den mättade zonen. Linjens placering baserades på den grundvattenyta som sågs vid modellering utan grundvattenbildning (Figur 32). Med grundvattenbildningen som 150 mm/år och åter med de medelkonduktiviteter som beräknats sågs stor översvämning (Figur 52). För att metoden med justerad nivå för grundvattenbildning ska vara acceptabel bör lösningen vara densamma som i Figur 50, vilket också var fallet.



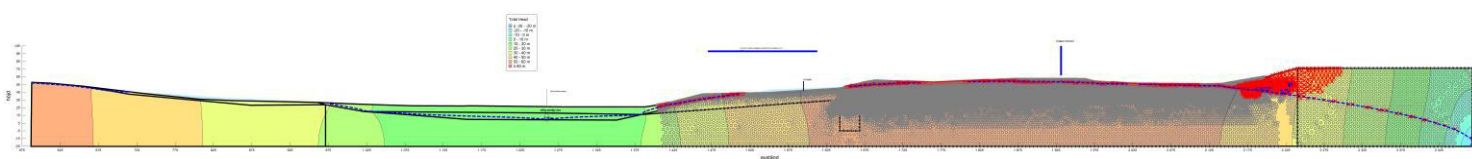
Figur 52. Med grundvattenbildning som 150 mm/år applicerad direkt i den mättade zonen. Den hydrauliska konduktiviteten hos materialen är här enligt de beräknade medelvärdena.

Med grundvattenbildningen fortsatt på en djupare nivå än markytan förlängdes modellen åt höger och den specificerade potentialen längs höger sida minskades med 10 meter vilket inte resulterade i en annorlunda lösning. Utifrån denna modell ökades också djupet på modellen med ca 150 meter vilket gav en något lägre översvämning (Figur 53). Notera att dräneringen vid bäcken till höger här tagits bort vilket också kan påverka resultatet.



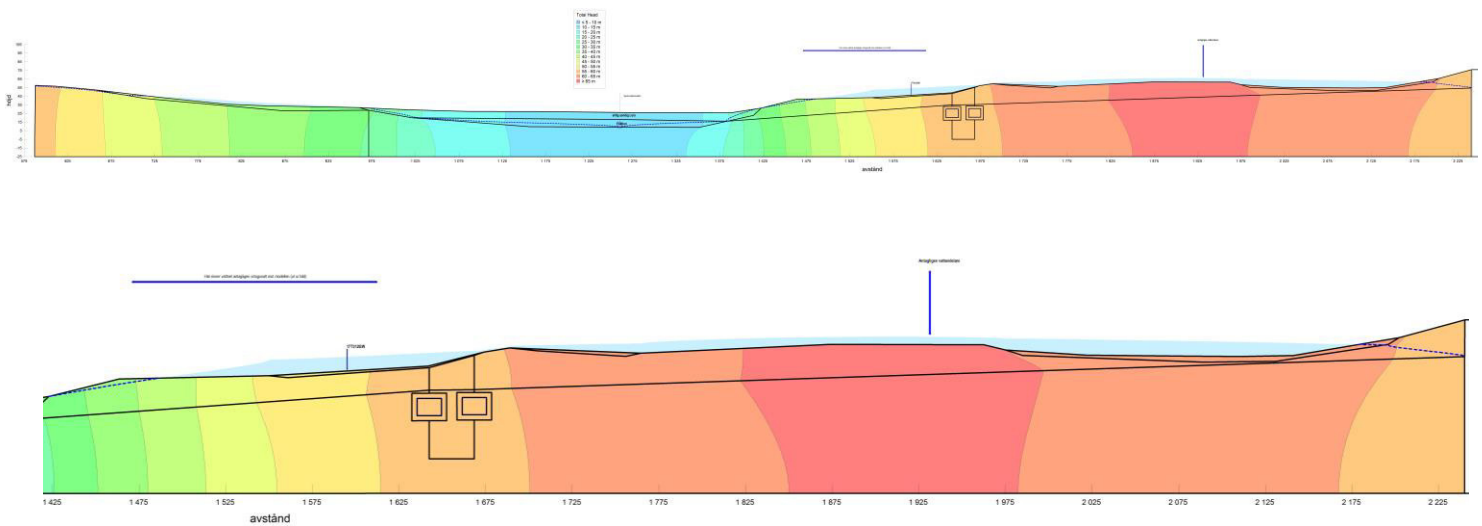
Figur 53. Modell med förlängning till höger och ökat djup med 150m. Den specificerade potentialen längs höger kant har också minskats så att den är ca 10 meter under markytan.

Vidare modellering med ännu lägre specificerad potential längs höger sida gav fortsatt översvämning och dessutom konvergensproblem. Detta gällde även när potentialen sattes till noll meter. Modellering med dränering längs höger sida visade också att översvämningen kvarstod och att konvergensproblem skapades. Förändring av randvillkoren var därmed inte tillräckligt för att få en fungerande lösning och därför valdes att istället öka bergets hydrauliska konduktivitet. När bergets konduktivitet ökades med en tiopotens till $2 \cdot 10^{-7}$ m/s visade modelleringen en lägre grundvattennivå, emellertid kunde inte en fullkomlig lösning uppnås (Figur 54). I denna modell togs den tidigare ökningen av modelldjupet bort och längs höger sida användes randvillkoret potentiell läckageyta (dränering).



Figur 54. Modellering där bergets hydrauliska konduktivitet ökas till $2 \cdot 10^{-7}$ m/s. Som randvillkor längs höger sida används potentiell läckageyta (dränering).

Med samma konduktivitet hos berget som ovan ändrades modelldomänen tillbaka till sin ursprungsstorlek och längs höger sida sattes åter en specificerad potential men nu 20 meter under markytan. Detta gav en konvergerande modell men också en grundvattenyta strax över markytan längs större delen av domänen (Figur 55). I denna modell ökades bergets konduktivitet ytterligare en halv tiopotens vilket gav den slutliga lösning som ses i Figur 34 i kap. 5.

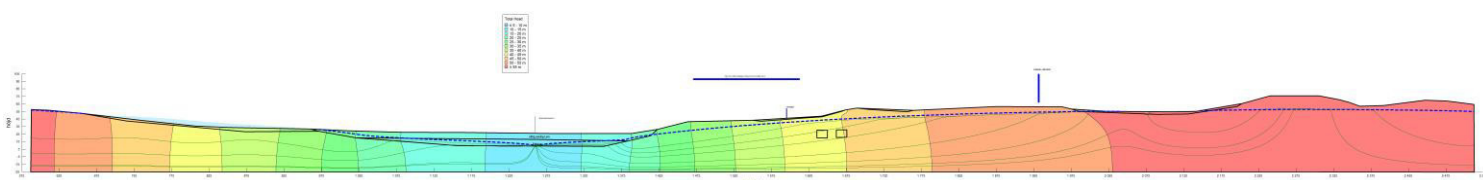


Figur 55. Modellering där bergets hydrauliska konduktivitet ökats till $2 \cdot 10^{-7}$ m/s. Som randvillkor längs höger sida användes specificerad potential på en nivå omkring 20 meter under markytan. Den svarta linje som ses skära genom berget är den linje där grundvattenbildningen appliceras.

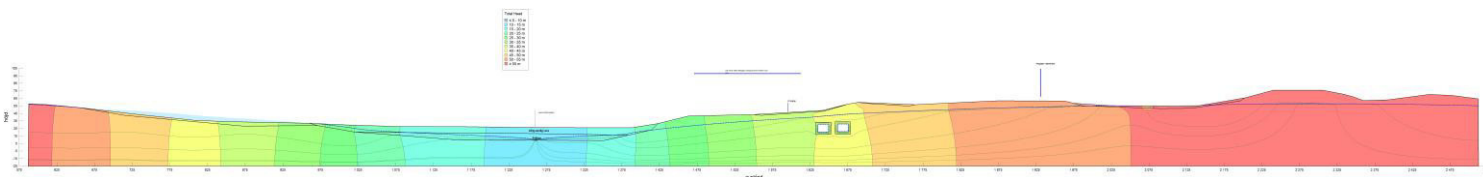
BILAGA 3 MODELLERING MED FÖRÄNDRADE MODELLANTAGANDEN

I denna bilaga redovisas resultaten från modelleringen enligt Fall 7.

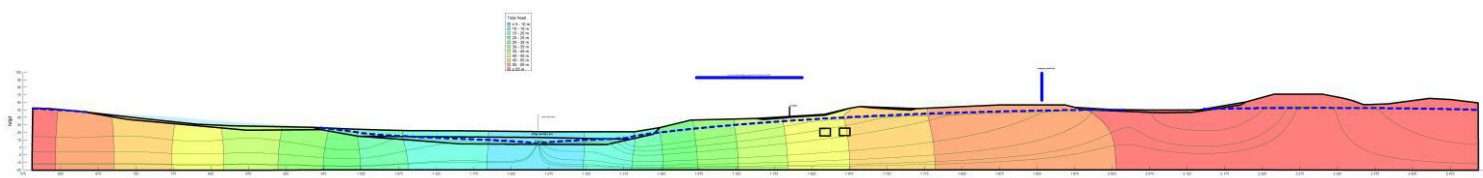
När exempelaterialet som beskriver vattenbindningskurvan för berget ändrades till sand observerades ingen förändring i lösningen (Figur 56 och Figur 57) jämfört när exempelaterialet var grus (Figur 44 och Figur 45). Det beräknade inläckaget till tunnarna och den observerade avsänkningen av grundvattenytan var samma som för exempelaterialet grus. Även när exempelaterialet byttes ut för att motsvara silt sågs ingen skillnad (Figur 58 och Figur 59).



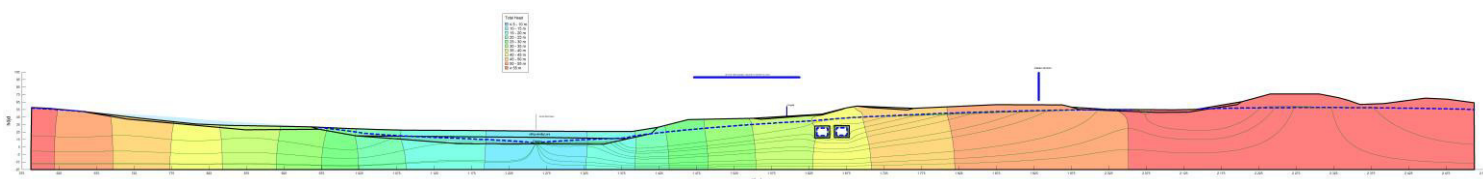
Figur 56. Opåverkad modell där exempelaterialet för vattenbindningskurvan för berg ändrats från grus till sand.



Figur 57. Modell med tunnlar och tätning med hydraulisk konduktivitet $1 \cdot 10^{-9}$ m/s. Exempelaterialet för vattenbindningskurvan för berg har ändrats från grus till sand.



Figur 58. Opåverkad modell där exempelaterialet för vattenbindningskurvan för berg ändrats från grus till silt.



Figur 59. Modell med tunnlar och tätning med hydraulisk konduktivitet $1 \cdot 10^{-9}$ m/s. Exempelaterialet för vattenbindningskurvan för berg har ändrats från grus till silt.